

Rapport Scientifique et financier sur les activités menées par le LIA « Montessus de Ballore »

- 2008-

Co-responsables : Gabriel Vargas (U-Chile, Géologie), Jaime Campos (U-Chile-Géophysique), Jean-Pierre Vilotte (IPGP), Christophe Vigny (ENS)

En 2008, les activités du LIA se sont concentrées sur la gestion de plusieurs interventions sur des crises sismo-volcaniques (Tocopilla, Chaiten), et sur la mise en place d'un processus d'échanges et d'interactions entre les laboratoires Français et Chiliens contribuant au LIA. C'est dans ce cadre qu'une mission de longue durée (4 mois) a été effectuée par C. Vigny à l'U-Chile, et qu'une série de cours a été officiellement intégrée dans le cursus de l'Université au niveau master. En tache de fond, le développement et la maintenance des réseaux d'observation a été assuré. Le LIA assure la liaison entre les différents partenaires de plusieurs projets financés par l'ANR en France et le CONYCIT au Chili, ainsi que la coordination de cet ensemble avec des acteurs étrangers de la recherche au Chili en sciences de la Terre : Le Caltech, USA et le GFZ Potsdam. Ces différents projets ont produit des résultats scientifiques qui ont fait l'objet de nombreuses communications à l'AGU et l'EGU, et plusieurs publications: 4 publiées, 3 soumises et plusieurs autres en préparation.

Faits marquants

- Séisme de Tocopilla (14 /11/2007) : mesures post-sismiques en Juin 2008 et Décembre 2008
- Crise sismo-volcanique de Chaiten (mai 2008) : déploiement en urgence d'un réseau de monitoring du volcan.
- Cours de géodésie-géodynamique (mars-juin 2008) : un module de 30h a été introduit dans le cursus de master de géosciences de l'U-Chile (cours 764), et réalisé par un intervenant français (C. Vigny).

Collaborations internationales et structuration

Parallèlement, les collaborations avec le GFZ Potsdam ont été structurées au travers d'un accord cadre (MOU) associant le CNRS/INSU et le GFZ. Cet accord officialise également la création du réseau IPOC, son opération et sa maintenance. Cet accord a permis de renforcer nos échanges scientifiques et de lancer de nouveaux projets pour une évolution dans les prochaines années du réseau IPOC, avec en particulier coté allemand un réseau d'OBS dans la région d'Iquique et une augmentation des stations à terre dans cette régions pour la détection et la localisation des tremors via des techniques d'antenne.

Au cours de l'année 2008, plusieurs réunions ont été organisées entre le GFZ, le DGF, l'IPGP et l'ENS permettant une discussion scientifique et technique fructueuses.

Enfin, en collaboration avec nos collègues chiliens et allemands nous avons pu coordonner plusieurs sessions consacrées à la zone de subduction chilienne dans les congrès de l'EGU et de l'AGU. Sessions dans lesquels nous avons pu faire des présentations communes.

Résumé du rapport scientifique

Une série de travaux a porté sur l'étude de la déformation actuelle, et de son lien avec le cycle sismique. Le résultat majeur concerne l'évaluation du couplage, le long des différents segments d'étude du projet, en intégrant données cGPS, campagnes de mesures GPS répétées et images InSAR. Les zones de couplage sont très variables, en espace et en temps, entre et au sein de ces segments. Ce résultat soulève d'importantes questions sur la géométrie et le couplage sismique/asismique de ces segments, en liaison avec d'éventuels transitoires de déformation et tremors.

Une série d'études a porté sur deux événements sismologiques majeurs enregistrés dans la région Nord Chili: le séisme intraplaque de Tarapaca (Mw 7.8, 13 Juin 2005) de type « slab-pull » et le séisme de subduction de Tocopilla (Mw 7.6, 14 Novembre 2007). Ces études, combinant données sismologiques, géodésiques et images InSAR, ont permis de bien résoudre les ruptures associées. Le séisme de Tocopilla a été parfaitement enregistré par le réseau IPOC, et a pleinement justifié la stratégie instrumentale de ce réseau.

L'étude du séisme de Tocopilla a mis en évidence une rupture qui s'est propagée du nord au sud, activant sur 130 km deux aspérités principales, localisées à 30-50 km de profondeur à la base de la zone couplée. Ces deux aspérités sont confirmées indépendamment par les analyses détaillées du GPS et des images InSAR. Au Sud, le glissement est limité par la terminaison nord du séisme d'Antofagasta (Mw 8, 1995); au Nord, elle est limitée par le séisme du 21 Décembre 1967. La zone de glissement du choc principal est localisée dans la partie profonde de la zone couplée, sous la partie continentale. Il n'y a aucune évidence de glissement sous la péninsule de Mejillones. Contrairement au séisme d'Antofagasta, la partie superficielle, offshore, du contact (10-30 km) semble être restée bloquée préservant l'essentiel de la déformation accumulée depuis 1877 à ce niveau. Si l'on ne peut exclure l'hypothèse d'un précurseur d'un très grand tremblement de Terre, le séisme de Tocopilla remet en cause certaines idées couramment admises pour la lacune Nord Chili et met en évidence un fonctionnement sismique voisin de celui observé dans la région Central Chili. Le séisme de Tocopilla soulève aujourd'hui des questions importantes. Les aspérités définies à partir de l'histoire récente de la sismicité sont-elles stables dans le temps ? Sont-elles associées à des caractéristiques mécanique ou géométrique de la subduction ? Sont-elles associées à des événements de type tremors ou des glissements asismiques ? Le séisme de Tocopilla n'a rompu que très partiellement la partie sud et profonde du segment Nord Chili. Le risque est-il aujourd'hui d'un très grand tremblement de terre rompant l'ensemble du segment Nord Chili, ou de tremblements de terre Mw 8 récurrents ? Ces événements migreront-ils le long du segment au nord de la zone de rupture de 1967 ou continueront-ils à rompre la partie sud en migrant vers la surface ?

Sur le plan tectonique, les études réalisées dans la région métropolitaine ont conduit à proposer un nouveau modèle tectonique des Andes. Les structures parallèles à la subduction, sur le flanc Ouest des Andes, joueraient un rôle très important conduisant à ré-évaluer l'aléa sismique des failles en surface (faille de San Ramon au pied des Andes dans la région de Santiago par exemple). Par ailleurs ce modèle conduit à réinterpréter l'ensemble de la zone de collision en subduction continental embryonnaire dans lequel les structures Ouest Andine sont prédominantes.

1. Introduction

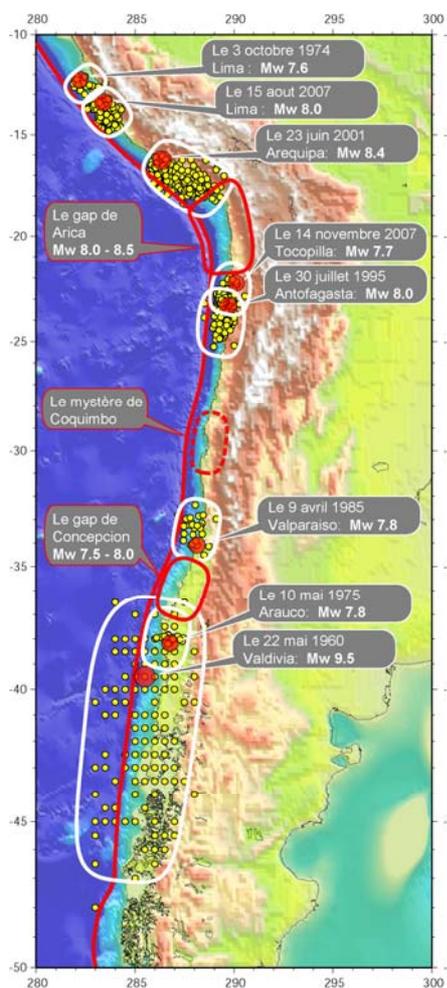


Figure 1 : grand séismes de subduction au Chili depuis 1960. Les ronds rouges montrent les épicentres, les ronds jaunes les répliques, et les cercles blancs les surfaces de rupture. Les cercles rouges décrivent les lacunes.

second lieu sur la déformation tectonique à long terme. Enfin, plus récemment, sur l'analyse du « bruit » sismologique et des « tremors » (stations large bande). En sus des lacunes sur lesquelles nous avons focalisé le gros de notre effort, nous sommes intervenus, en coordination avec l'université du Chili et le GFZ Potsdam, sur plusieurs crises sismiques (Tarapaca, juin 2005, Aysen janvier-mai 2007, Tocopilla novembre 2007, Chaiten avril-mai 2008). Chacune de ces crises est l'occasion d'étudier une région ou un phénomène plus en détail précisément grâce à l'activité tectonique qu'elle produit, et nécessite donc un suivi qui est typiquement de l'ordre de l'année. Le meilleur exemple est celui du volcan Chaiten, qui après une période de relative quiétude (fin 2008) vient d'entrer à nouveau brutalement en éruption le 20 février 2009. La charte internationale pour les catastrophes naturelles des agences spatiales ayant été activée. Toutes ces interventions impliquent donc un volet instrumental (déploiement de réseaux d'instruments permanents ou temporaires), préalable à l'analyse des phénomènes observés.

A cause de la convergence très rapide (7 cm/an) de la plaque Nazca, qui subducte sous la plaque Amérique, le Chili est une zone d'activité sismique intense. Un séisme majeur ($M_w > 8$) a lieu tous les dix ans en moyenne le long de la côte chilienne et la plupart des segments de subduction dans la région ont produit un séisme de magnitude 8 lors du 20ème siècle. Le long de la côte chilienne l'interface de subduction est fragmentée en zones élémentaires de l'ordre de 100 à 200 km de long et de 50 à 100 km de large, susceptibles de produire des grands séismes lors de la relaxation des contraintes accumulées, voir de produire des séismes géants si plusieurs segments rompent ensemble. La plupart des séismes majeurs correspondent à des glissements "en faille inverse" sur l'interface de subduction dans la zone qui est habituellement bloquée lors de la période intersismique. L'objectif du projet Subchile était de progresser dans la compréhension des processus de friction sur l'interface de subduction qui contrôlent la sismicité et le déclenchement de grands séismes destructeurs. A partir d'études précédentes nous avons identifié trois lacunes sismiques au Nord et au Centre/Sud du Chili qui nous semblent être proche de la rupture (figure 1). Dans deux de ces lacunes il n'y a pas eu de tremblement de terre majeur depuis 130 ans. Ces lacunes nous offrent l'opportunité de comprendre les processus mécaniques qui se produisent lors de la maturation et de l'initiation des grands tremblements de terre de subduction.

Afin d'atteindre nos objectifs, nous avons travaillé suivant plusieurs axes en utilisant plusieurs outils. En premier lieu sur la mesure de la déformation actuelle de la plaque supérieure (GPS, INSAR, inclinométrie, sismologie). En

2. Instrumentation et infrastructure

Réseaux GPS/sismo/inclino (voir tables et cartes en annexe)

Le réseau cGPS a été porté de 16 stations existantes avant le projet (6 dans le Nord et 10 dans le centre) à 37. Par ailleurs, nous avons réalisé la jouvence d'un certain nombre de stations existantes de manière à améliorer la capacité et la cohérence du réseau. En particulier, 27 stations acquièrent maintenant des données à haute fréquence (1 Hz). Une composante d'un inclinomètre longue base a été installé dans le Nord (région d'Iquique). En collaboration avec le GFZ Potsdam et l'Université du Chili, la région Nord Chili a été instrumenté avec la création du réseau sismologique IPOC en enregistrement continu. Le réseau IPOC comporte aujourd'hui 15 sites instrumentés (large bande, accéléromètre, inclinomètre) dont 4 sites français financés dans le cadre de l'ANR. Sept sites sont équipés en transmission continue (HMBCX, PSGCX, MNXCX, PB01, PB04, PB07, PB09), le quatrième site français (PATCX) devrait l'être courant 2009. Le réseau IPOC est complété par la station IRIS/Geofon de Limon Verde. Ce réseau a permis d'enregistrer le séisme de Tocopilla et fournir pour la première des observations large bande et accélérométriques en champ proche au Chili.

Base de données et distribution

Les données GPS continues sont rassemblées et archivées en deux endroits :

- au Chili sur le serveur GPS du DGF (<http://www.dgf.uchile.cl>)
- en France sur le serveur GPScope qui rassemble toutes les données GPS des équipes françaises (<http://gpscope.dt.insu.fr>)

Les données sont accessibles sur ces deux serveurs. Toutefois, seules 21 stations (sur 37) sont télémetrées et envoient des données chaque jour. Les données des 16 autres sont stockées sur place, puis récupérées lors de visites irrégulières aux stations et enfin archivées et diffusées sur la base avec un délai de l'ordre de plusieurs mois (Voir table en annexe).

Les données sismologiques en transmission continues sont aujourd'hui distribuées en temps quasi-réel par Geofon (Potsdam) (<http://geofon.gfz-potsdam.de/geofon//status/index.html>), et prochainement par Geoscope (<http://geoscope.ipgp.jussieu.fr/>). Par ailleurs, l'ensemble des données sont également rassemblées sur plusieurs serveurs de base de données au GFZ Potsdam, IPG Paris et DGF Santiago. Ces serveurs de base de données sont en passe d'être interopérés dans le cadre du LIA.

3. Interventions en contexte de crise sismo-volcanique

Aysen – janvier-mai 2007

Le 21 Avril 2007 à 17h53 TU un séisme de magnitude 6.2 s'est produit dans les environs d'Aysen au sud (45°S) du Chili. Le séisme a déclenché des glissements de terrains massifs tout autour du Fjord d'Aysen, provoquant un tsunami local qui ravage les cotes du fjord dans un rayon de quelques km. A certains endroits, des hauteurs de run-up de plus de 40m seront relevées. Au moins 14 personnes ont disparu. Le séisme n'est pas venu de nulle part. Depuis janvier 2007, une crise sismique se développait au centre du Fjord. Des centaines de petits séismes de magnitude 1 à 4 se sont produits en 3 mois, avec de temps en temps un séisme un peu plus fort. En coopération avec nos collègues chiliens, nous avons décidé d'installer une série d'instruments (GPS, sismomètres) pour suivre cette crise dès le début du mois de février. Les premières mesures semblaient représentatives d'une activité magmatique au centre du Fjord, migrant petit à petit vers la surface ; mais le séisme du 21 avril semble différent, et s'être produit sur une faille tectonique décrochante qui se trouve au voisinage de l'essaim de séismes (la faille Liquine-Ofki). Il s'agit très probablement

d'un cas de séisme déclenché par une modification du champ de contraintes. Il existe une autre possibilité, celle d'un séisme initial plus fort mais silencieux (un séisme lent ?) qui serait à l'origine de toute la crise, le séisme du 21 avril n'étant qu'une forte réplique du séisme initial. Nous recherchons à l'heure actuelle des traces de cet événement, dans les images INSAR en bande L (satellite ALOS) ou dans les données du sismomètre large-bande le plus proche (station Geoscope de Cohaique). En tout état de cause, nous avons réalisé à l'occasion les premières mesures GPS à très haute fréquence (10 Hz) d'un séisme en champ proche (épïcêtre à moins de 10km de la station).

Tocopilla – novembre 2007 Le 14 Novembre 2007, un séisme de $M=7.7$ s'est produit au sud de la lacune Nord Chili instrumentée en collaboration avec le GFZ de Postdam. Ce séisme a rompu la partie profonde de la zone sismogène du Nord du Chili (la lacune du coude d'Arica) sur une extension de près de 130 km. Ce séisme a induit une importante activité post-sismique qui se poursuit encore aujourd'hui. En décembre 2007, une forte réplique ($M_w=6.8$) de type « slab-push » s'est produite en profondeur, en deçà du plan de rupture du choc principal. Cette région de la zone de subduction Pérou-Chili a été chargée à ses deux extrémités par les séismes d'Antofagasta ($M_w=8.1$, 30 Juillet 1995) au Sud, et d'Arequipa ($M_w=8.3$, 23 Juin 2001) au Nord. Grâce aux efforts instrumentaux de l'ANR, le séisme de Tocopilla ($M_w 7.7$, 2007), et ses répliques, ont été très bien enregistrés par un grand nombre de stations sismologiques et géodésiques installées de manière coordonnée par les équipes chiliennes, françaises, allemandes et américaines (Caltech). Les stations du réseau d'observation continue « IPOC » (CNRS-IPGP/GFZ/DGF) ont parfaitement fonctionné. Ces données sismologiques, accélérométriques, géodésiques et inclinométriques d'excellente qualité, complétées par les observations d'interférométrie spatiale, et des marégrammes du SHOA, font de ce tremblement de Terre de subduction l'un des mieux observés au Chili

Une mission post-sismique, coordonnée entre l'Université du Chili, l'IPGP et le GFZ Potsdam a été rapidement mise en place en Décembre 2007 pour densifier ce réseau d'observation pour l'étude des répliques et le suivi des déformations. Un réseau temporaire composé de 25 stations courtes périodes et 6 stations large bande et 5 accéléromètres a été installé dans la région et a fonctionné jusqu'à Mars 2008. Une partie de ce réseau a pu réoccuper des sites précédemment utilisés lors de l'étude post-sismique du séisme d'Antofagasta (1995). Il a permis d'enregistrer un nombre important de répliques. Cette masse de données est en cours de traitement.

Au cours de l'intervention post-sismique, un réseau de répétition de 21 points GPS dans la région du séisme a été remesuré 3 fois depuis le séisme: deux profils de 6 points aux latitudes de Tocopilla et Antofagasta et 9 points distribués le long de la côte. Enfin, afin de densifier les mesures continues, 3 stations GPS (1Hz) ont été installées le long d'un profil E-W à la latitude $\sim 21.5 / 22^\circ\text{S}$ (extrémité nord de la rupture. L'acquisition d'images supplémentaires (environ une image par mois et par track) a été commandée à l'Agence Spatiale Européenne pour l'étude de la déformation post-sismique.

Si la crise de Tocopilla a permis de tester le bon fonctionnement du dispositif instrumental aujourd'hui installé, ainsi que la coordination CNRS/INSU, GFZ Potsdam et Université du Chili, elle a également soulevé de nouvelles questions remettant en cause la notion classique de lacune sismique au Nord Chili.

4. Résultats scientifiques

Dans le domaine de la déformation actuelle et de son lien avec le cycle sismique, le résultat majeur concerne l'évaluation du couplage entre les deux plaques tout au long de la subduction. Grâce aux réseaux de stations GPS permanentes et aux campagnes de mesures GPS répétées d'une part, et aux images INSAR d'autre part, nous avons mis en évidence des zones de couplage très variable, à la fois dans l'espace et dans le temps.

La lacune de Concepcion (35°S-37°S) présente la situation « de référence » standard : dans cette région, la déformation de la plaque supérieure correspond exactement à la prédiction d'un modèle d'accumulation élastique standard, avec blocage complet de la subduction. Au

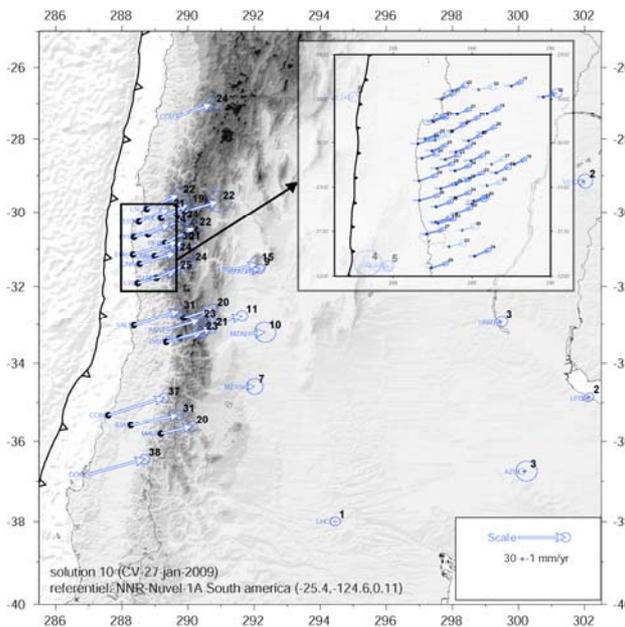


Figure 2 : déformation de la plaque supérieure mesurée par GPS

fur et à mesure que l'on remonte vers le nord, le couplage diminue, ainsi que l'atteste la diminution de la déformation de la plaque continentale : 38 mm/an à Concepcion (37°S), 31 mm/an à Valparaiso (33°S), 22 mm/an à La Serena (30°S). La situation dans le Nord du Chili est plus difficile à caractériser, compte tenu des séismes récents (Antofagasta 1995, Tocopilla 2007) qui perturbent les séries de mesure, mais un ré-examen attentif des données inter-sismiques anciennes semblerait montrer que contrairement à ce que l'on croyait jusqu'à peu, le couplage ne redevient jamais 100%.

Superposé à ce signal à grande échelle, on trouve également des variations très abruptes du couplage, le gradient de déformation tombant de 80 nano-strain/an à zéro en à peine plus de 100km aux alentours de 30°S. Suite à cette découverte, nous avons entrepris un agrandissement du réseau d'instruments

vers le nord, afin de quantifier la taille de cette anomalie. Une première hypothèse consiste à associer cette zone très fortement découplée à la présence d'une ride océanique fossile (la ride Challenger) subductée précisément à cet endroit. Dans ce cas, cette structure serait permanente et pourrait constituer une barrière sur laquelle butteraient les ruptures des grands séismes de subduction.

Le couplage semble varier également dans le temps. Dans le Nord du Chili, autour d'Iquique, la déformation de la plaque supérieure change après le séisme de Tarapaca (2005). Avant ce séisme de profondeur intermédiaire, la situation est normale et la vitesse de déformation est stable et constante à 30 mm/an, après ce séisme, la déformation oscille entre de longues

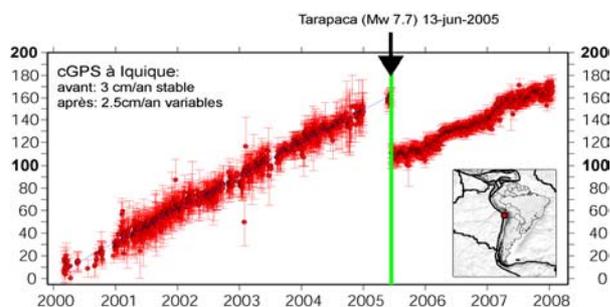


Figure 3 : station GPS continue à Iquique, avant et après le séisme de Tarapaca de juin 2005

périodes de glissement apparent sans blocage et de courtes périodes d'accrochage sur l'interface. Une première hypothèse serait que le séisme intra-plaque profond a suffisamment contribué au changement de l'état de contrainte de la plaque pour modifier la friction sur l'interface de subduction. En toute rigueur, cela devrait également se voir dans la sismicité: par un plus grand nombre de séisme sur l'interface de subduction, ou par l'apparition d'un trémor. Si cela était établi, un parallèle

pourrait être fait avec la situation qui est apparue autour de 31°S juste après le séisme d'Illapel en 1997, autre séisme intra-slab qui a modifié la sismicité de

la région, sans que l'on sache si la déformation avait changé ni si un trémor était apparu pour cause d'instrumentation inexistante de la région à l'époque. Une étude est en cours sur la détection de trémors à partir des observations continues du réseau IPOC ainsi que celles acquises sur une période de 18 mois lors de l'intervention post-sismique après le séisme de Tarapaca.

Plusieurs résultats sismologiques majeurs ont été obtenus lors de l'étude des séismes de Tarapaca (Mw 7.7, 13 Juin 2005) et de Tocopilla (Mw 7.7, 14 Novembre 2007) intervenus au Nord Chili.

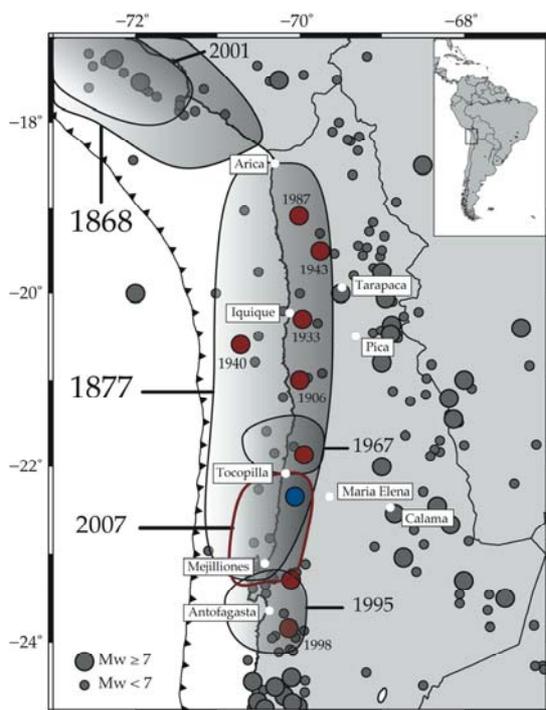


Figure 4: Contexte tectonique Nord Chili: localisation des zones de rupture associées aux derniers grands tremblements de terre et sismicité ($M_w > 5.5$, cercles gris) à partir du Centennial Catalog (Engdahl et Villaseñor, 2002); cercle bleu: séisme du 14 Novembre 2007.

Sur la base de données historiques, plusieurs lacunes ont été identifiées le long de la subduction chilienne. Ce concept de lacune sismique est souvent invoqué pour prédire les zones de futurs grands tremblements de terre. Dans quelle mesure ces lacunes résultent d'une segmentation par des barrières stables dans le temps ou ne sont que le reflet des événements les plus importants d'une histoire récente reste un problème très débattu. Les derniers très grands tremblements de Terre au Nord Chili – Sud Pérou remontent au XIX siècle: Mai 1877 (Mw 8.9, Kausel 1986) dans la région d'Iquique ; Août 1868 (Mw > 8.7) au Sud Pérou, dont une partie de la zone de rupture a été réactivée lors du séisme d'Arequipa (Mw 8.4, Giovanni et al 2002). Une étude paléo-sismologique de Vargas et al (2005), au niveau de la péninsule de Mejillones, a identifié deux très grands tremblements de terre en 1409-1449 et 1754-1789 mais aucune trace du séisme de 1877 dont la rupture se serait arrêtée plus au Nord. En Juillet 1995, le séisme d'Antofagasta (Mw 8) a rompu l'interface de la plaque plongeante au Sud de la péninsule de Mejillones. La sismicité de la zone couplée au Nord Chili est restée faible au

cours du XX siècle, avec seulement quelques événements de magnitude $7 < M_w < 7.5$ près de la côte, et aucun événement superficiel de $M_w > 7.4$. Une activité sismique significative a lieu à des profondeurs intermédiaires avec en particulier les séismes de 1950 (Mw 8) à l'est de Tocopilla et de 2005 (Mw 7.7), dans la région de Tarapaca, étudié au cours de ce projet. Les données instrumentales, géodésiques et sismologiques, du Nord Chili semblent indiquer que, dans la région de Tocopilla, la zone couplée est bloquée avec peu ou pas de glissement en deçà de la zone de transition. Un des événements intéressants est le séisme de subduction de Tocopilla (1067, Mw 7.4, Malgrange et Madariaga, 1983), de profondeur de 46-48 km, au Nord du séisme de 2007, avec un petit nombre de répliques de profondeurs et de plans de faille différents. Le 14 Novembre 2007, le séisme de Tocopilla (Mw 7.6) a rompu sur ~ 130 km une zone étroite de la partie profonde de la zone couplée, au sud (22°-23°S). La zone de rupture du séisme de Tocopilla (Mw 7.6, Novembre 2007) est encadrée par les séismes de 1967 au Nord et 1995 au Sud. Le séisme de 2007 est le plus grand événement de subduction enregistré depuis 1877 dans cette région, et n'est pas sans rappeler le séisme de 1987 (Mw 7.5) qui précéda le séisme d'Antofagasta (1995).

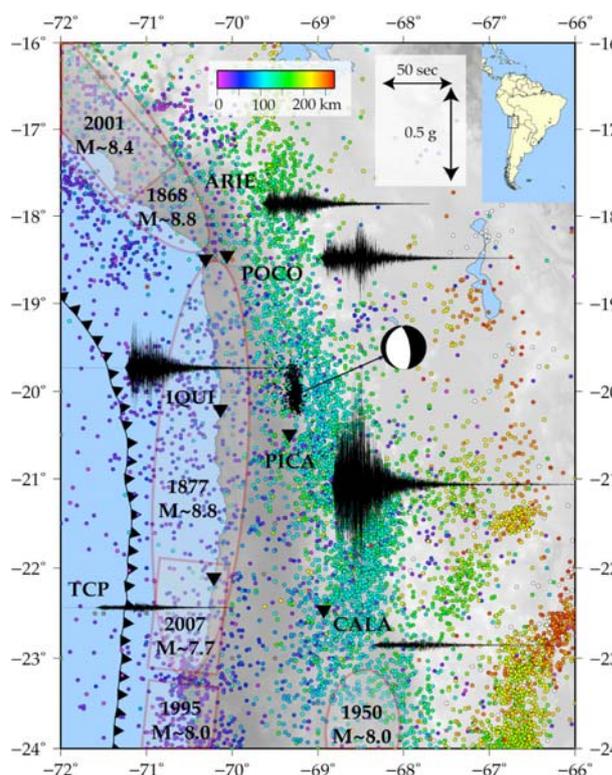


Figure 5: Contexte tectonique: localisation des zones de rupture des derniers grands événements au Nord Chili, localisation du choc principal du séisme de Tarapaca (13 Juin 2005) et sismicité (NEIC) pour les événements de MW > 4.5 sur la période 1973-2005. Les données accélérométriques: localisations des stations et données (composante verticale).

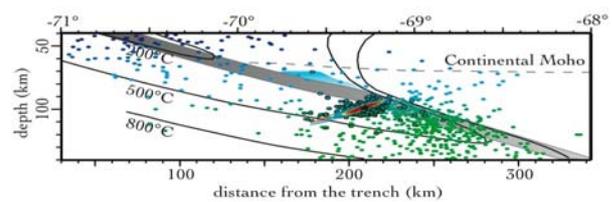


Figure 6: Coupe EW (20°S): localisation de la rupture de type "slab-pull" au sein du contexte géodynamique extrapolé à partir de l'étude ANCORP'96 (profil sismique et température). Les cercles bleus et verts représentent la sismicité ambiante (Mw > 4.5) à partir de NEIC (Engdahl et al. (1998)). Les cercles noirs représentent les répliques du séisme de Tarapaca. Les zones rouge à bleu représente la distribution de glissement à partir d'un modèle de rupture spontanée (échelle de couleur de 0 à 5m).

Le séisme de Tarapaca (Juin 2005) de profondeur intermédiaire est intervenu avant que le réseau IPOC ne soit opérationnel. Le séisme a été enregistré par le réseau accélérométrique permanent (<http://www.cec.uchile.cl/~ragic/ragic.htm>) opéré en mode déclenché par l'Université du Chili. Une mission post-sismique coordonnée entre l'Université du Chili et l'IPGP a permis d'installer un réseau temporaire, de 8 stations courte-période et 4 stations large-bande, une semaine après le choc principal. Une étude couplant sismologie, géodésie et interférométrie (Peyrat et al., 2006) a permis de contraindre le mécanisme de ce séisme comme de type « slab-pull ». La distribution des répliques permet de contraindre une surface de rupture planaire sub-horizontale orientée Nord-Sud, d'environ 60 km de long et 30 km de large. L'hypocentre est situé à ~97.6 km de profondeur au sud de la distribution de répliques. Le plan de faille horizontale est compatible avec une rupture de la plaque plongeante.

Une étude plus fine de la source (Peyrat et Favreau, 2009), à partir des données accélérométriques, combinant inversion cinématique et modélisation dynamique de la rupture, a permis d'identifier deux sources distinctes: une source principale centrée sur l'hypocentre et une source secondaire déclenchée plus en profondeur dans la plaque plongeante. Ce résultats sont compatibles avec une vitesse de rupture rapide. Le séisme de Tarapaca résulterait de la réactivation d'une faille lithosphérique héritée de la plaque plongeante à la faveur de processus de déshydratation. Le séisme de Tarapaca soulève plusieurs questions concernant le rôle de ces séismes de profondeur intermédiaire dans le chargement de la zone couplée, ainsi que comme marqueur du couplage sismique/asismique en base de la zone couplée en relation avec les processus de déshydratation. Une question importante concerne la variation spatio-temporelle de l'activité sismique de profondeur intermédiaire, ainsi que son éventuelle relation avec des épisodes de type trémor ou asismique. Grâce aux données du réseau

IPOC, une étude est en cours sur la période 2007 – 2008 encadrant le séisme de Tocopilla (2007).

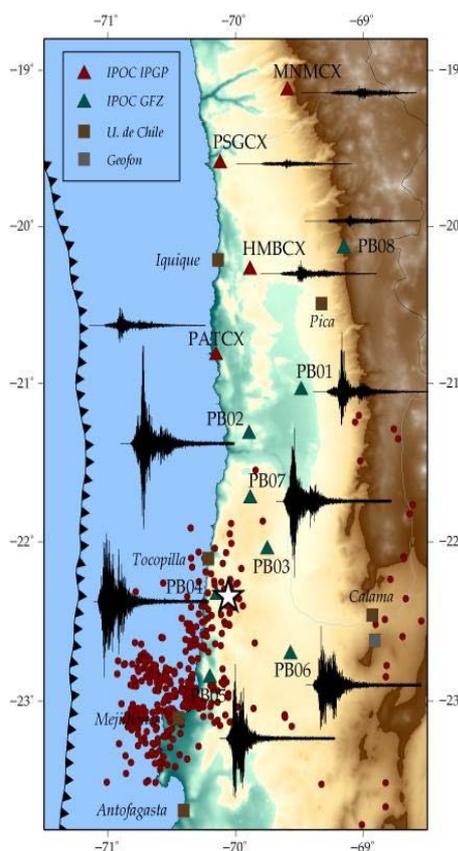


Figure 7: Données accélérométriques (composante EW) enregistrées par le réseau IPOC lors du séisme de Tocopilla (à droite). La nouvelle localisation du choc principal (Longitude 70.057 W, Latitude 22.343 S, Profondeur 52 km) est reportée (étoile blanche) ainsi que les principales répliques durant les 15 premiers jours relocalisées par le DGF. (Peyrat et al, 2008).

Le séisme de Tocopilla (Mw 7.6, 14 Novembre 2007), et ses répliques, a été enregistré par le nouveau réseau IPOC. Si les enregistrements large-bande ont été saturés, les enregistrements accélérométriques se sont révélés d'excellentes qualité et ont pleinement justifié la stratégie instrumentale du réseau IPOC. Les données accélérométriques, combinées aux données sismologiques en champ lointain, complétées par les observations géodésiques (GPS et interférométrie spatiale), inclinométriques et de marégrammes du SHOA, ont permis d'obtenir une vue assez complète de processus de rupture et des déformations associées.

Les modélisations des ondes P et S téléseismiques, ainsi que des données accélérométriques du réseau IPOC, complétées par les accélérogrammes du réseau déclenché opéré par l'université du Chili ont permis de produire une image bien résolue de la rupture sismogène (Peyrat et al. 2009).

La rupture s'est propagée du nord au sud, activant sur 130 km deux aspérités principales, localisées à une profondeur de 30 à 50 km à la base de la zone couplée. Ces deux aspérités sont confirmées indépendamment par les analyses détaillées du GPS et des images InSAR. La région entre ces deux aspérités serait associée à une résistance plus importante d'origine mécanique ou géométrique. Au sud, la distribution de glissement est limitée par la terminaison nord de la zone de rupture du séisme d'Antofagasta (Mw 8, 1995). Au Nord, elle est limitée par la zone de rupture du séisme du 21 Décembre 1967. La zone de glissement du choc principal est localisée dans la partie profonde de la zone couplée, sous la partie continentale avec aucune évidence de glissement sous la

péninsule de Mejillones. Contrairement au séisme d'Antofagasta, la partie superficielle (offshore) du contact, entre 10 et 30 km semble être restée bloquée préservant l'essentiel de la déformation accumulée depuis 1877 à ce niveau. Le séisme de Tocopilla apparait très similaire aux séismes répétés de Mw 8 de la région Central Chili.

Les répliques sont localisées pour l'essentiel autour de l'extrémité SW de la rupture, en association avec les deux plus grosses répliques, Mw 6.3 et 6.8 du 15 Novembre, proches de la péninsule de Mejillones. Le 16 Décembre 2007, une réplique de Mw 6.8, à la base de la bordure sud du plan de rupture du choc principal, a un mécanisme de type « slab-push », avec un plan de rupture sub-vertical attesté par la distribution des répliques associée. Elle pose clairement la question de l'interaction entre choc principal et réplique de profondeur intermédiaire, avec en corollaire le problème de concentration de contrainte associée et du couplage sismique/asismique.

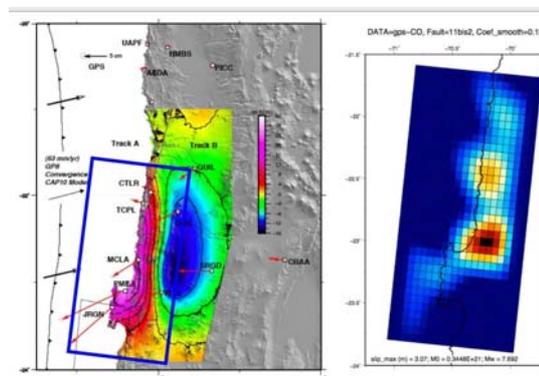


Figure 8: Gauche: déplacements de la surface du sol générés par le séisme et mesurés par interférométrie radar et GPS continu. Droite: distribution du glissement cosismique sur le plan de faille qui a rompu lors du

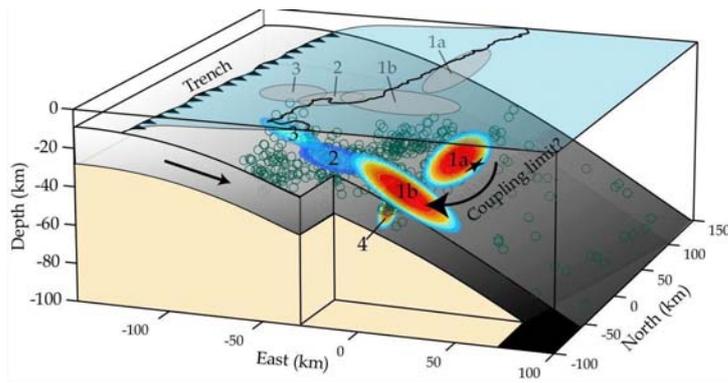


Figure 9: Surface de glissement du choc principal (1a et 1b) et des principales répliques (2,3,4) du séisme de Tocopilla 2007 d'après l'étude sismologique (Peyrat et al., 2009). Les répliques relocalisés par le DGF sont en vert

L'analyse préliminaire des premiers mois de déformation post-sismique montre que la faille a continué à glisser: une zone de glissement superficiel se situerait au nord-ouest de la péninsule de Mejillones et serait associée aux principales répliques. Une deuxième zone a été identifiée en profondeur à l'est de la péninsule et n'est pas associée à des répliques. Il pourrait s'agir de glissements asismiques transitoires, comme identifiés à la suite du séisme d'Antofagasta (1995). Un volant

important du travail en cours consiste aujourd'hui à caractériser les glissement post-sismique et à exploiter a masse de données importantes enregistrée par le réseau temporaire déployé lors de l'intervention post-sismique en coordination avec le GFZ et le DGF.

Si l'on ne peut exclure que le séisme de Tocopilla soit le précurseur d'un très grand tremblement de Terre, ce séisme montre que le segment la région Nord Chili est le siège de ruptures dont la taille et le glissement varient d'un cycle de tremblements de terre à l'autre: quelques très rares grands tremblements de Terre tsunamigéniques et de plus fréquents grands séismes de Mw 8. Un scénario proche de celui de la région Central Chili et caractéristique d'autres segments de subduction comme le segment Equateur-Colombie plus au Nord ou au Japon le segment de Nankai. Dans le cas du séisme de Tocopilla, es aspérités sont plus petites que la largeur de la zone couplée étendant le concept d'aspérité à deux dimensions : le long du strike et le long du dip. Le séisme de Tocopilla soulève aujourd'hui d'importantes questions. Les aspérités définies à partir de l'histoire récente de la sismicité sont elles stables dans le temps ? Sont-elles associées à des structures mécaniques ou géométrique de la subduction ? Peuvent-elles être associées à des évènements de type trémors ou des glissements asismiques ? Le séisme de Tocopilla n'ayant rompu que très partiellement la partie sud et profonde du segment Nord Chili, le risque est-il aujourd'hui d'un très grand tremblement de terre rompant l'ensemble du segment, ou d'une récurrence de tremblements de terre de Mw 8 ? Ces évènements migreront-ils le long du segment au nord de la zone de rupture de 1967 ou continueront-ils à rompre la partie sud en migrant vers la surface?

Le séisme de Tocopilla (Mw 7.6, Novembre 2007), a été enregistré sur la composante EW de l'inclinomètre longue base installé en Août 2007, dans le cadre du réseau IPOC, au NNE de la ville d'Iquique, à plus de 200 km, ainsi que plusieurs séismes modérés de magnitude entre 5.2 et 6.3 (distances 10 à 50 km). Les signaux cosismiques ainsi enregistrés sont clairs. Tous sont compatibles en amplitude avec une

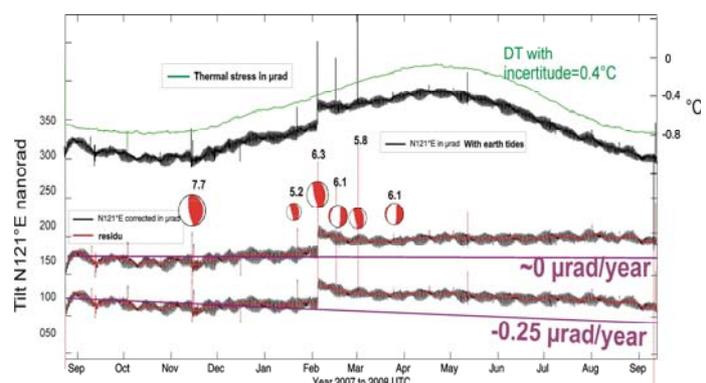


Figure 10: 13 mois de signal inclinométrique. En haut: vert: signal de température; noir: tilt. En bas: tilt corrigé de la température (deux courbes suivant les hypothèses extrêmes de dérive du thermomètre); la « dérive » moyenne est de 0.12 micro-radians par an. On voit clairement le sauts co-sismique du séisme de magnitude 6.3 de Février, ainsi que la modulation par les marées. (Boudin et al., 2008)

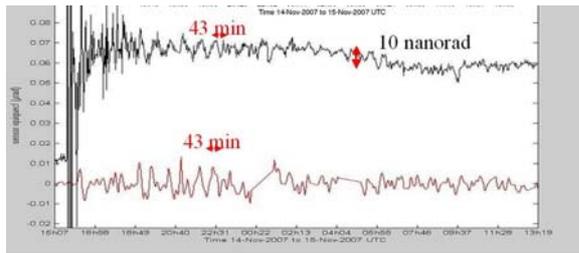


Figure 11: 22 heures de tilt (noir, en haut) et de marégramme (rouge, en bas, données SHOA) à Iquique, pour le séisme de Tocopilla. Les oscillations de tilt de 40-50 minutes de période sont liées à celles du tsunami, persistantes pendant plusieurs heures après le séisme.

charge, confirme que les faibles oscillations de longues périodes observées sur l'inclinomètre (40-50 minutes) après le séisme sont associées aux effets de flexure élastique de la croûte terrestre en réponse à la charge du tsunami (Hebert et al., 2008). Ceci ouvre des pistes pour la détection à terre de tsunamis avant que ceux-ci n'atteignent les côtes. Une analyse des sismogrammes large bande du réseau IPOC montrent ces mêmes effets à ces périodes. L'inclinomètre d'Iquique démontre une stabilité et une résolution autorisant la détection d'éventuels transitoires de déformation sur une échelle de temps de la minute à l'année. Enfin, il est probable qu'il puisse résoudre la variation lente et régulière de tilt liée au chargement tectonique.

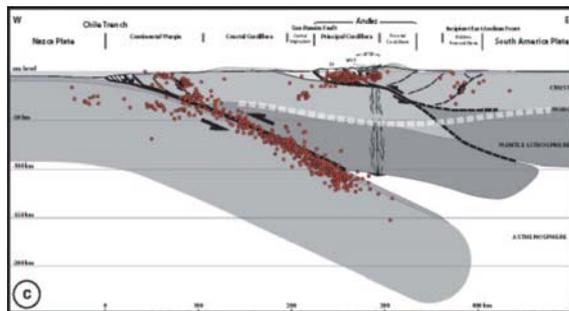


Figure 12 : modèle tectonique schématique des Andes (à 33°): subduction continentale embryonnaire et faille active au chevauchement ouest Andin (faille de San Ramon). La sismicité obtenue à partir du réseau permanent Chilien est portée et montre la bonne correspondance avec les structures actives décrites.

sont observés le long de la trace de cette faille et des séismes de forte magnitude (Mw 7.4) paraissent plausibles. Nos résultats nous conduisent aussi à réinterpréter l'ensemble des structures Ouest Andines (à vergence ouest, parallèle à la zone de subduction océanique) comme une zone de subduction continentale embryonnaire. Ce type de structure est prédominante dans la zone Andine active à la latitude de Santiago, mais elle évolue graduellement vers le Nord, vers un système à double vergence, avec une sismicité plus diffuse.

déformation cosismique élastique, sauf celui de Tocopilla pour lequel le signe du tilt est inversé (Boudin et al., 2008) et dont l'interprétation est en cours (effet possible de perturbation gravimétrique).

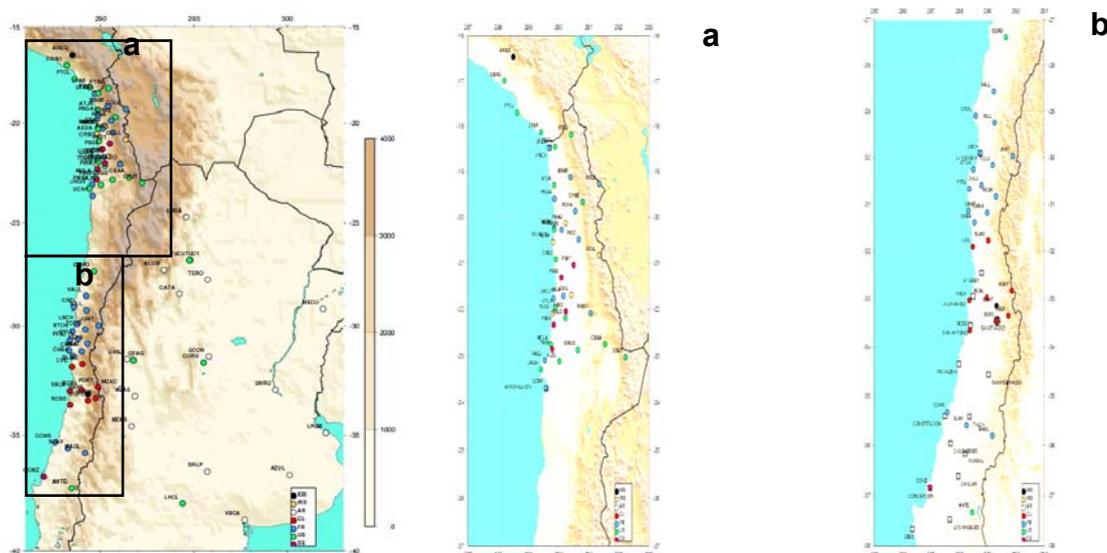
L'ensemble de ces signaux de déformation sont trop faibles pour être détectés par GPS, ce qui fait des inclinomètres d'excellents compléments aux mesures GPS, en particulier pour d'éventuels transitoires de déformation localisés dans la zone de transition.

L'analyse des marégrammes pour le séisme de Tocopilla, et la modélisation de leurs effets de

Dans le domaine de la déformation à plus long terme, les études géologiques et sismo-tectoniques réalisées dans la région métropolitaine nous conduisent à proposer un nouveau modèle tectonique des Andes : Nous proposons que les structures parallèles à la subduction sur le flanc Ouest des Andes, jouent un rôle plus important que celui estimé jusqu'à présent. Cela conduit en premier lieu, à réévaluer l'aléa sismique de ces structures à la hausse. Notamment, la faille de San Ramon, située au pied des Andes dans la région de Santiago, a été cartographiée en grand détail. Elle correspond à un système frontal de rampe et décollement avec une vitesse de glissement moyen de ~4 mm/an. Des escarpements récents

Annexe 1 – Instrumentation

Réseaux GPS continus permanents



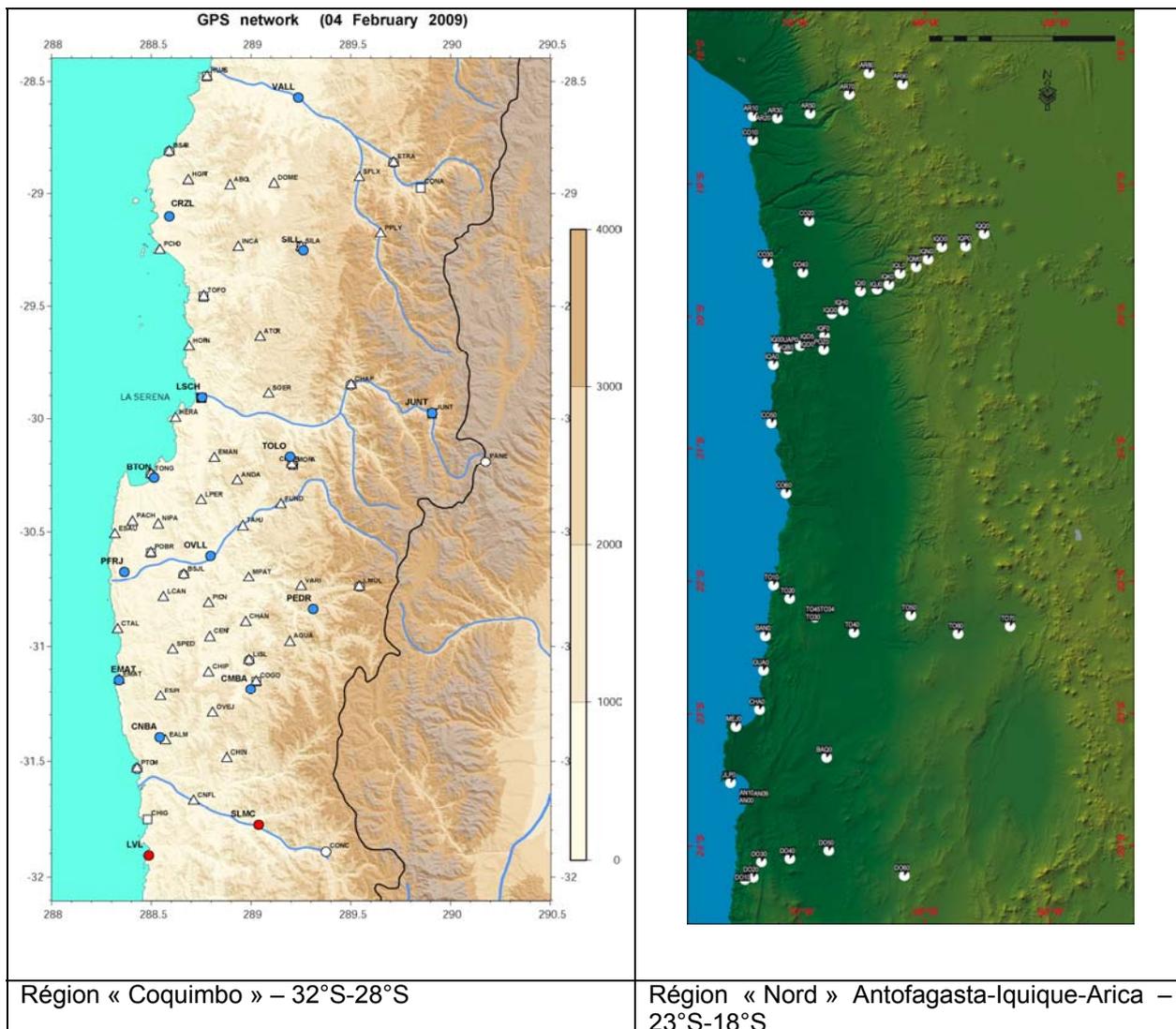
Chili-Argentine-Bolivie : 15°S – 40°S

Arica-Antofagasta : 700 km

Concepcion-Copiapo : 1000 km

code	name	Lat. (°)	Long(°)	altitude	rec. type	sampling	data transfer	operational since
UTAR	Univ. Tarapaca, Arica	-18.490	-70.296	87	Ashtech ZXtrem	----- 30s	internet	03-dec-2003
MNMI	MiniMini	-19.131	-69.595	2351	TopCon GB-1000	1Hz -----	Satellite	28-mar-2007
COLC	Colchane	-19.276	-68.638	3777	TopCon GB-1000	1Hz -----	manual	04-nov-2007
PSGA	Pisagua	-19.597	-70.123	1002	TopCon GB-1000	1Hz -----	Satellite	30-mar-2007
PCHA	Pachica	-19.869	-69.432	1682	Ashtech ZXtrem	----- 30s	manual	03-jun-2003
UAPE	Univ. Arturo Prat, Iquique	-20.241	-70.141	56	Ashtech ZXtrem	----- 30s	internet	21-may-2005 (init 1995)
HMBS	Humberstone	-20.278	-69.887	1208	TopCon GB-1000	1Hz -----	Satellite	29-mar-2007
PICC	Pica	-20.485	-69.321	1376	TopCon GB-1000	1Hz -----	manual	03-nov-2007 (init 1999)
MICA	Cerro Mica	-21.714	-69.827	1675	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	16-dec-2007
URCU	Punta Urcu	-21.763	-70.152	0	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	04-dec-2007
RADO	Radomiro tomic mine	-22.082	-68.926	0	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	08-dec-2007
PMEJ	Punta Mejillones	-23.100	-70.448	48	Ashtech ZXtrem	----- 30s	internet	29-nov-2003
UCNF	Univ. Cat. Norte, Antofagasta	-23.680	-70.410	72	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	03-dec-2003
VALL	Vallenar	-28,572	70,764	378	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	12-jun-2008
CRZL	Carizalillo	-29,101	71,409	84	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	15-nov-2008
SILL	La Silla	-29,254	70,738	2323	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	13-jun-2008
LSCH	La Serena	-29,908	71,246	77	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	20-nov-2006
JUNT	Junta El Toro	-29,976	70,093	2138	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	14-dec-2007
TOLO	El Tololo	-30,169	70,806	2229	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	11-may-2005
BTON	Tongoy	-30,263	71,487	39	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	16-nov-2006
OVLL	Ovalle	-30,603	71,203	248	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	26-avr-2004
PFRJ	Parc Fray Jorge	-30,674	71,635	206	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	18-nov-2006
PEDR	Pedregal	-30,838	70,689	881	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	21-nov-2006
EMAT	Caletta El Maiten	-31,146	71,662	46	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	08-may-2007
CMBA	Combarbala	-31,188	70,998	963	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	08-may-2007
CNBA	Canela Baja	-31,398	71,457	316	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	21-nov-2006
SLMC	Salamanca	-31,777	70,962	547	Ashtech MicroZ	----- 30s	manual	28-jul-2003
LVIL	LosVilos	-31,909	71,513	29	Ashtech MicroZ	----- 30s	manual	28-jul-2003
PORT	Portillo	-32,835	70,130	2925	Ashtech UZ-12	----- 30s	internet	11-dec-2002
ROBL	Roble	-32,976	71,015	2255	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	28-oct-2008
VALN	Valparaiso_SHOA	-33,027	71,635	119	Ashtech ZXtrem	----- 30s	internet	01-jan-2005
VNEV	Valle Nevado	-33,353	70,249	3097	Ashtech UZ-12	----- 30s	internet	08-jan-2003
DGF1	U-Chile, Santiago	-33,457	70,664	581	Ashtech ZXtrem	----- 30s	internet	01-jan-2004
RCSD	Roca Santo Domingo	-33,654	71,613	66	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	16-Oct-2008
CONS	Constitucion	-35,330	72,412	39	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	29-avr-2003
SJAV	San Javier	-35,595	71,733	119	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	internet	24-jun-2003
MAUL	Laguna del Maule	-35,809	70,821	1184	Trimble Net-RS	1Hz + 30s	manual	22-dec-2003

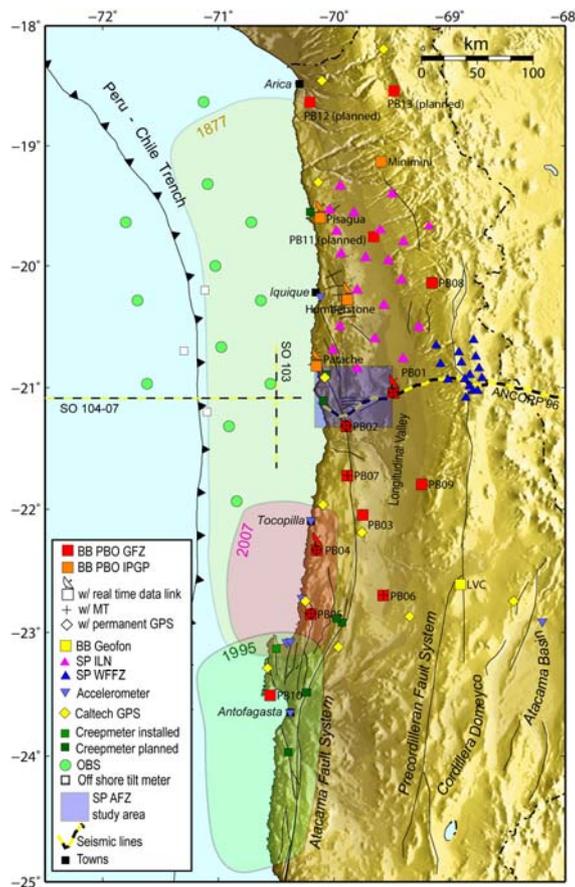
Réseaux GPS de répétition



Campagnes de mesure GPS

Tocopilla	oct 2007	21 points
Coquimbo	du 05-dec-2007 au 19-dec-2007	34 points
Coquimbo	du 29-avril-2008 au 14-mai-2008	34 points
Tocopilla	juin 2008	21 points
Coquimbo	du 13-nov-2008 au 23-nov-2008	50 points
Tocopilla	du 21-nov-2008 au 10-dec-2008	21 points

Réseau sismologique IPOC



Installation type d'un site

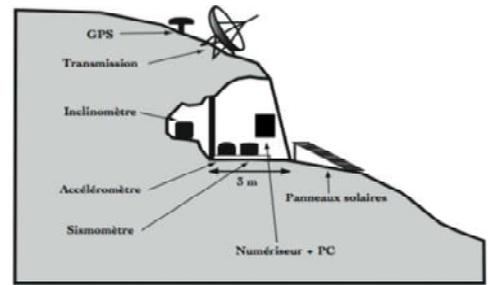


Figure 7. Schéma d'un site



Figure 8. Site de Mirimiñi (MNMCM)

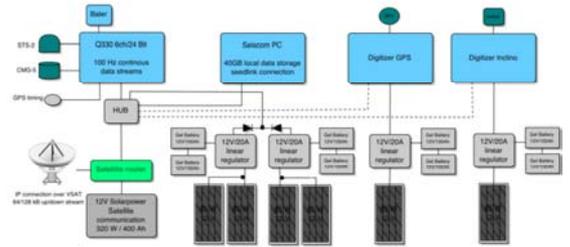


Figure 11: Réseau Integrated Plate Boundary Observatory (IPOC) (CNRS/INSU-GFZ-IRIS) de stations multi-paramètres (sismologie large-bande, accéléromètre, inclinomètre pendulaire) dans le Nord-Chili. Sont indiqués également les développements en cours avec la GFZ (campagne OBS en demande et le réseau complémentaire ILN qui sera déployé en Mars 2009).

Stations multi-paramètres : chaque site est équipé d'une station large bande STS2, d'un capteur accélérométrique 24bits CMG5 et d'un numériseur Quantera Q330. L'enregistrement est en continu. Les 15 stations accélérométriques complètent le réseau chilien de 10 stations à déclenchement. Deux des quatre stations françaises sont équipées en plus d'un inclinomètre pendulaire en silice, de type Blum. Les données de 8 stations (4 françaises, 4 GFZ) sont transmises par satellite en temps quasi réel via une connexion seed-link sur le DGF, GFZ et IPGP.

Inclinomètre longue base

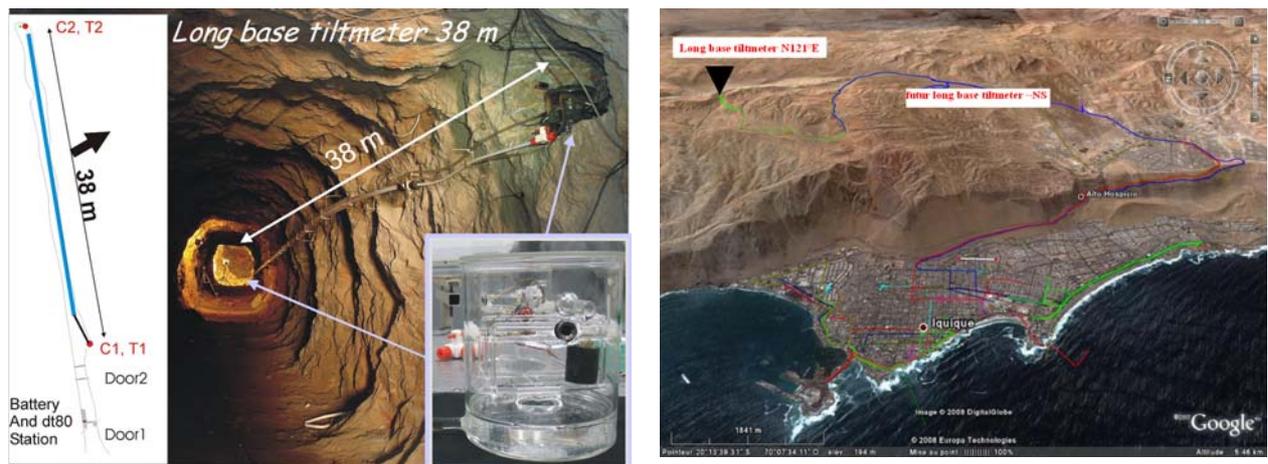
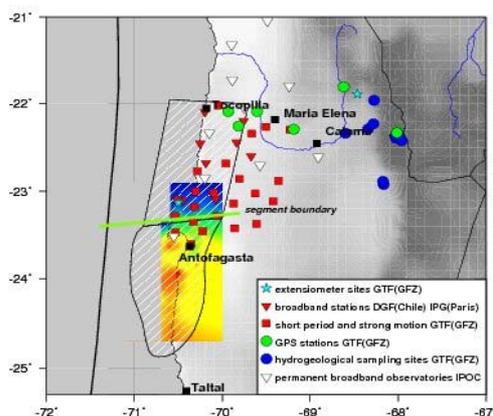


Figure 12: Inclinomètre longue base dans le tunnel de la mine de Neuquen, installé au mois d'Aout 2007.

Un inclinomètre longue base a commencé à être installé en Août 2007 et intégré au réseau IPOC. Cet instrument a été développé par F. Boudin (IR Geosciences Montpellier) dans le cadre d'une thèse. Plusieurs prototypes sont aujourd'hui opérationnels. Cet appareil, qui fonctionne sur le principe du niveau hydrostatique, avec des flotteurs en silice et des capteurs de déplacement de type LVDT, a une résolution 100 à 1000 fois meilleure que celle du GPS. En contre partie, cette grande résolution le rend extrêmement sensible aux influences météorologiques (pression, pluie, température), nécessitant une installation souterraine soigneusement contrôlée et isolée. Au Nord Chili, une première installation a été réalisée à 10 km au NNE de la ville d'Iquique, dans un tunnel de lamine de Neuquen (Lat : -20.172075, Long : -70.073134). Pour des raisons budgétaires, seule la composante EW du capteur, 35 m de long, a pu être installée, en aout 2007. Les mesures depuis 17 mois montrent le succès de cette installation avec : une stabilisation très rapide de l'instrument (en moins d'un mois); un cycle annuel simple lié au thermostress, dont la mesure de tilt peut être corrigée; une dérive très faible, de l'ordre de 1.25×10^{-7} radians par an; une grande résolution de 10^{-9} radians aux courtes périodes jusqu'à celles de la marée terrestre (amplitudes 10^{-7}).

Réseau d'intervention postsismique séisme de Tocopilla



Une mission post-sismique, coordonnée entre l'Université du Chili, l'IPGP et le GFZ Potsdam a été rapidement mise en place en Décembre 2007 pour densifier ce réseau d'observation pour l'étude des répliques et le suivi des déformations. Un réseau temporaire composé de 25 stations courtes périodes et 6 stations large bande e 5 accéléromètres a été installé dans la région et a fonctionné jusqu'à Mars 2008. Une partie de ce réseau a pu réoccuper des sites précédemment utilisé lors de l'étude post-sismique du séisme d'Antofagasta (1995). Il a permis d'enregistrer un nombre important de répliques. Cette masse de données est en cours de traitement.

Annexe 2 – Publications (2008-)

Articles parus, sous-presse, soumis:

1. Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo gap, Chile
Vigny, C., A. Rudloff, J.C. Ruegg, R. Madariaga, J. Campos, M. Alvarez
PEPI in press, 2008.
2. Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitucion and Concepcion in Chile
Ruegg, J.C., A. Rudloff, C. Vigny, R. Madariaga, J.B. DeChabalier, J. Campos, E. Kausel, S. Barrientos, D. Dimitrov
PEPI in press, 2008
3. The West Andean Thrust (WAT), the San Ramon Fault and the Seismic Hazard for Santiago (Chile)
Armijo, R., R. Rauld, R. Thiele, G. Vargas, J. Campos, R. Lacassin and E. Kausel
submitted to *Tectonics*, 2008
4. Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements,
Bonney-Claudet, S., S. Baize, L.F. Bonilla, C. Berge-Thierry, C. Pasten, J. Campos, P. Volant, and R. Verdugo
Geophys. J. Int., doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.04020.x., 2008
5. Kinematic and spontaneous rupture models of the 2005 Tarapaca earthquake,
Peyrat, S. and P. Favreau
Geophys. J. Int. in press, 2009
6. Kinematic rupture process of the Tocopilla Earthquake and its main aftershocks from teleseismic and strong motion data
Peyrat, S., R. Madariaga, E. Bufforn, J. Campos, G. Asch and J.-P. Vilotte
submitted to *Geophysical Journal International*, 2009-02-16

Communications en colloques & congrès:

1. The Mw=7.7 Tocopilla Earthquake (North Chile) of November 14, 2007: First results from space geodesy (InSAR).
Béjar-Pizarro, M., A. Socquet, R. Armijo, J.B. de Chabalier.
VII Congreso Geológico de España, 2008.
2. The Mw 7.7 Tocopilla, Chile, Earthquake of 14 November 2007: A Comprehensive Study Using Teleseismic, Local and InSAR data
Campos, J., S. Peyrat, M. Bejar, A. Socquet, G. Meneses, A. Perez, R. Madariaga, P. Favreau, P. Bernard, S. Barrientos, R. Armijo, G. Asch, M. Sobesiak, and J.-P. Vilotte
Eos Trans. AGU, 89(23), Jt. Assem. Suppl., Abstract S24A-01, may 2008
3. Rupture Geometry and Slip Associated With the 2007 November 14 Mw = 7.7 Tocopilla (Chile) Earthquake, as Preliminary Determined by InSAR and GPS Observations
Béjar-Pizarro, M., D. Carrizo, A. Socquet, R. Armijo, J.-B. DeChabalier, A. Nercessian, O. Charade, J.-C. Ruegg, S. Barrientos, and J. Campos
Eos Trans. AGU, 89(23), Jt. Assem. Suppl., Abstract S24-A02, may 2008
4. Detailed source process of the 2007 Tocopilla earthquake.
Peyrat, S., R. Madariaga, J. Campos, G. Asch, P. Favreau, P. Bernard, J.-P. Vilotte
Eos Trans. AGU, 89(23), Jt. Assem. Suppl., Abstract S24-A03, may 2008
5. The M 7.7 Tocopilla earthquake and its aftershock sequence: deployment of a Task Force local network
Sobiesak, M., S. Eggert, H. Woith, H. Grosser, S. Peyrat, J.-P. Vilotte, E. Medina, J. Ruch, T. Walter, P. Victor, S. Barrientos, and G. Gonzales
Eos Trans. AGU, 89(23), Jt. Assem. Suppl., Abstract S24A-04, may 2008, invited
6. Transient measurement with a silica long base tiltmeter
Boudin, F., P. Bernard, L. Longuevergne, O. Bour
Jena, 2008

7. The 2007 November 14 Mw = 7.7 Tocopilla (Chile) Earthquake: preliminary results from InSAR and GPS.
Béjar-Pizarro, M., D. Carrizo, A. Socquet, R. Armijo, J.C. Ruegg, J.B. de Chabaliér, A. Nercessian, O. Charade, S. Bonvalot.
7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG);, Nice, France, September 2008
8. The 2007 november 14 Mw=7.7 Tocopilla earthquake: contribution of InSAR and GPS observations in the understanding of Chile-Peru subduction process.
D. Carrizo, Bejar-Pizarro, M., Socquet, A., Armijo, R., Ruegg, J-C., de Chabaliér, J-B., Nercessian, A., Charade, O., Barrientos, S., Campos, J.
4th Alexander von Humboldt International Conference - The Andes: Challenge for Geosciences, Santiago November 2008.
9. Potentiality of microtremor to evaluate site effects at shallow depths in the deep basin of Santiago de Chile,
Bonnefoy-Claudet, S., F. Leyton, S. Baize, C. Berge-Thierry, L.F. Bonilla, and J. Campos
In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, paper 07-0094, 2008.
10. Upper plate deformation is dominated by varying interface coupling in the chilean subduction context
Vigny, C., A. Socquet, R. Madariaga, J.-C. Ruegg, J. Campos, and S. Barrientos
Eos trans. AGU, Fall Meeting Suppl., Abstract G33D-03, invited, dec. 2008
11. Accommodation of convergence in North Chile seismic gap : questions raised by 2007 Mw 7.7 Tocopilla earthquake
Socquet, A., M. Bejar, D. Carrizo, R. Armijo, C. Vigny, J.-C. Ruegg, J.-B. deChabaliér, A. Nercessian, O. Charade, M. Simons, and S. Bonvalot
Eos trans. AGU, Fall Meeting Suppl., Abstract G33D-04, dec. 2008
12. Observation of transient measurement with a silica long base tiltmeter
Boudin, F., P. Bernard, L. Longuevergne, N. Florsh, J. Chery, M. Olcay, C. Larmat, J. Boy, M. Esnoul, M. Kammenthaler, T. Vincent
Eos trans. AGU, Fall Meeting Suppl., Abstract S43B-1892, dec. 2008
13. Tsunami modelling and source constraints from regional tide-gages and tilt measurements for the 2008 M=7.5 Tocopilla subduction earthquake
Hebert, H., F. Boudin, P. Bernard, S. Peyrat, M. Béjar-Pizzaro
Eos trans. AGU, Fall Meeting Suppl., Abstract OS43D-1338, dec. 2008

Cours et conférences (disponibles sur le Web U-Chile et Laboratoire de Géologie de l'ENS)

- [Curso 764 abstract](#)
- [Curso 764-part 1 : Introduction to geodesy](#)
- [Curso 764-part 2 : Monitoring the earth from space](#)
- [Curso 764-part 3 : Basics of GPS measurements: uncertainties/precision/errors](#)
- [Curso 764-part 4 : Rigid plate tectonics](#)
- [Curso 764-part 5 : Deformation pattern in elastic crust](#)
- [Curso 764-part 6 : Seismic cycle](#)

- [Exercise 1 : Computing Strain and Rotation rates in a GPS network](#)
- [Exercise 2 : Finding and applying a rigid rotation pole to a velocity field](#)
- [Exercise 3 : Inverting a velocity field around a strike-slip fault](#)
- [Exercise 4 : Surface deformation generated by an elastic dislocation buried a depth](#)

- [GPS: from plate tectonics to seismology; what did we learn from a decade of advances in techniques and methodology](#) - Conférence DGF U-Chile Santiago 3 Juin 2008
- [Plate tectonics measured by GPS in Chile; what do we know... and don't know after more than a decade of measurements](#) - Conférence DGF U-Chile Santiago 8 Juin 2008

Rapports internes (disponibles sur le Web Laboratoire de Géologie de l'ENS)

1. [Rapport07IPOC](#) Rapport sur l'installation d'instrumentation géophysique dans la lacune du Nord Chili. [**Sophie Peyrat, courant 2007**].
2. [Rapport_cGPS_IV](#) Rapport sur l'installation de stations GPS permanentes dans la lacune du Coquimbo. [**Christophe Vigny, période 2006-2007**].
3. [GPS: Intervention séisme Tocopilla 1](#) Rapport sur l'installation de stations GPS permanentes et semi-permanentes pour la crise sismique de Tocopilla. [**Anne Socquet, Nov-Dec. 2007**].
4. [Rapport_cGPS_IV_CB1](#) Rapport sur la maintenance des stations GPS permanentes dans la lacune du Coquimbo. [**Carolina Valderas-Bermejo, février 2008**].
5. [Crise sismo-tectonique et Tsunami d'Aysen \(Sud Chili\), du 21 Avril 2007](#) Rapport sur l'intervention dans le cadre de la crise sismotectonique du Fjord d'Aysen. [**Christophe Vigny, Juin 2007**].
6. [CR-missionsGPSavrmai2008.pdf](#) Rapport sur la campagne de mesures GPS dans la région du Coquimbo [**Christophe Vigny, avril/mai 2008**].
7. [CR-mission_Tocopilla_Chaiten_mai08.pdf](#) Rapport sur la maintenance des stations GPS/sismo Nord Chili et Tocopilla et intervention sur la crise du volcan Chaiten [**Alexandre Nercessian & Sophie Peyrat, mai 2008**].
8. [GPS: Intervention séisme Tocopilla 2](#) Rapport sur la remesure du réseau GPS de répétition de la région Antofagasta/Iquique pour le post-sismique de Tocopilla [**Daniel Carrizo & Christophe Vigny, Juin 2008**].
9. [Profils topo pour transmissions radio](#) Etude de faisabilité des transmissions radio pour les stations cGPS [**Arthur Delorme, Octobre 2008**].
10. [Inclinomètre longue base d'Iquique \(Nord Chili\)](#) Rapport sur l'installation et la première année de mesure de l'inclinomètre LBT [**Frédéric Boudin & Pascal Bernard, période 2007-2008**].