

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

- 2011 -

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

En 2011, les activités du LIA ont porté sur deux axes. Un axe purement scientifique avec les suites à donner aux études sur le séisme de Maule (magnitude 8.8 du 27 février 2010), et un axe plus « administratif » avec le bilan du premier quadriennal du LIA et son renouvellement dans une géométrie agrandie. Ce rapport comprend un bref résumé des activités menées sur l'année 2011.

1. études sur le séisme de Maule (sismologie, GPS)

Grâce aux réseaux de sismographes déployés rapidement après le séisme principal, un catalogue de répliques a été constitué (Lange et al., Rietbrock et al.). Ces deux premiers catalogues mettent en évidence l'intense activité sismique après le choc principal : plus de 20 000 séismes de magnitudes comprises entre 1 et 6.5 ont pu être localisés en seulement deux mois. Ils mettent également en évidence la difficulté à localiser des séismes au Chili. En effet, les localisations diffèrent sensiblement d'un catalogue à l'autre et suivant les méthodes utilisées (fig. 1). En particulier, le second localise un certain nombre d'événements relativement superficiels, alors que le premier les localise plus en profondeur. Les deux catalogues utilisent à peu près le même modèle de vitesses 2D basé sur d'anciennes tomographies une détection automatique des temps d'arrivée ; mais le premier catalogue n'utilise que les ondes P, là où le second utilise également les ondes S.

Nous sommes donc pour l'instant dans l'impossibilité de trancher une polémique montante au sujet de la rupture : est-elle arrivée très proche de la surface (comme les données GPS avaient tendance à le dire) ou non (comme suggéré dans d'autres publications).

Nous avons donc entrepris un gros travail de relocalisation des événements les plus importants (une centaine de séismes de magnitude supérieure à 5), travail basé sur une détection manuelle des temps d'arrivée, et une nouvelle tomographie. Nous espérons pouvoir conclure sur cet aspect et confirmer que la rupture est bien arrivée en surface et a bien rompu les matériaux mous du prisme d'accrétion jusqu'à la fosse, phénomène sans doute un peu surprenant mais qui semble bien s'être produit au Japon également.

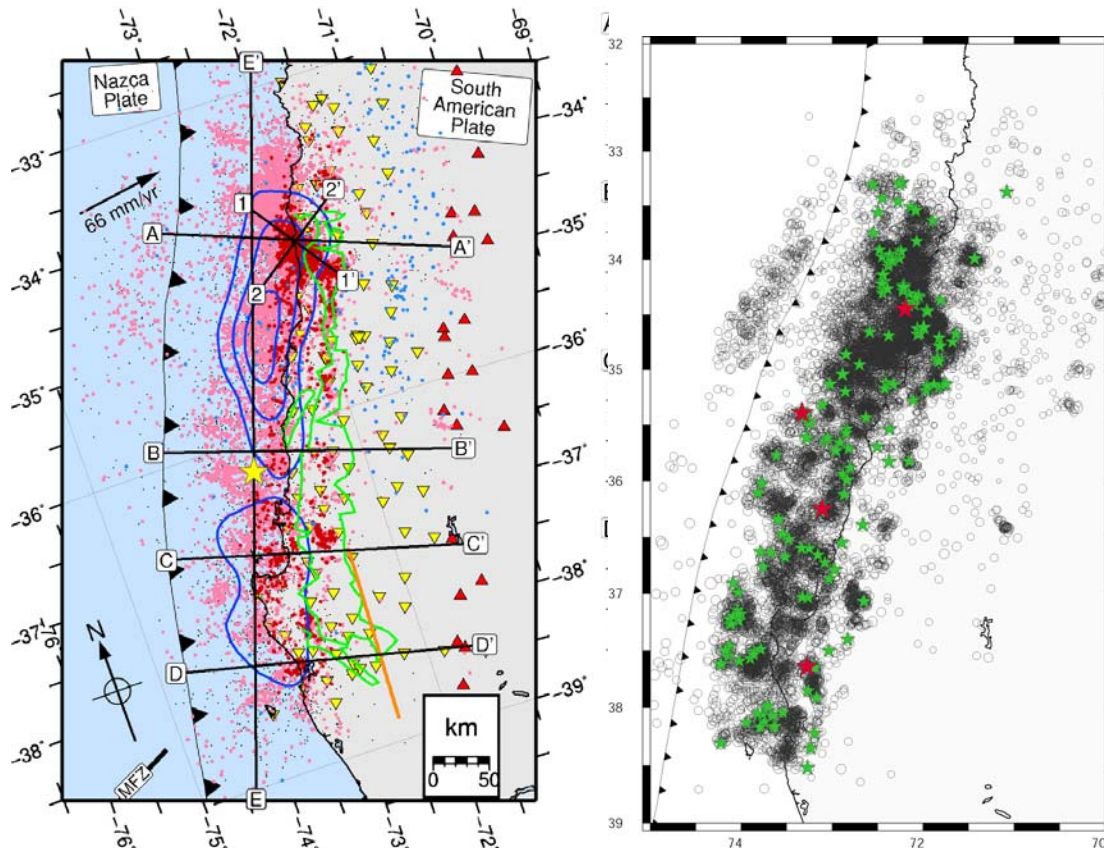


Fig1. Catalogues de sismicité: Lange et al (mars-septembre), à gauche ; Rietbrock et al., (mars-mai) à droite. Dans la carte de droite, les étoiles montrent les séismes de magnitude supérieure à 6 (rouges) et supérieure à 5 (verte).

Grâce aux réseaux GPS installés immédiatement après la rupture (fig. 2), il est possible de suivre la déformation post-sismique en grand détail. L'observation d'un an de déformation montre clairement :

- la zone de Valparaiso ne se déforme absolument pas, malgré le grand nombre de répliques localisées à cette latitude. La station VALN a conservé son mouvement pré-sismique, vers l'intérieur des Terres. Ceci démontre à posteriori que la rupture n'est pas montée aussi au Nord que Valparaiso. Les séismes se produisant dans cette zone ne doivent donc probablement pas être analysés comme des « répliques » stricto-sensu.
- La zone de la pointe Topocalma, entre les stations NAVI (Navidad) et LEMU (Pichilemu), qui se trouve à la bordure Nord de la réplique est affectée par un fort signal post-sismique. Ce signal relativement local est relié aux deux fortes répliques du 11 mars 2010 (des magnitudes proches de 7) qui se sont produits à 15 minutes d'intervalle sur des failles normales de la région de Pichilemu.
- Le post-sismique est à peu près de même amplitude tout au long de la côte, de Iloca (ILOC) jusqu'à Concepcion (CONZ)
- dans la zone épiscopale, une réplique (Mw 6.8 en février 2011) déplace les stations VITA et CONZ de plusieurs cm. Cette réplique se produit alors qu'un glissement lent initié dans la même région plusieurs semaines auparavant était en cours (cf. série temporelle de la station PELL (Pellu)). La combinaison de glissement lent asismique étalé sur plusieurs semaines et d'aspérités cassantes dans la même région est révélatrice du mécanisme du frottement sur le plan de subduction : on a à priori bien affaire à un couplage « mixte » combinant des aspérités d'une certaine taille environnées de zones qui glissent. Nous travaillons aux inversions destinées à définir la taille et la localisation de la zone du glissement lent, à comparer aux localisations des séismes.

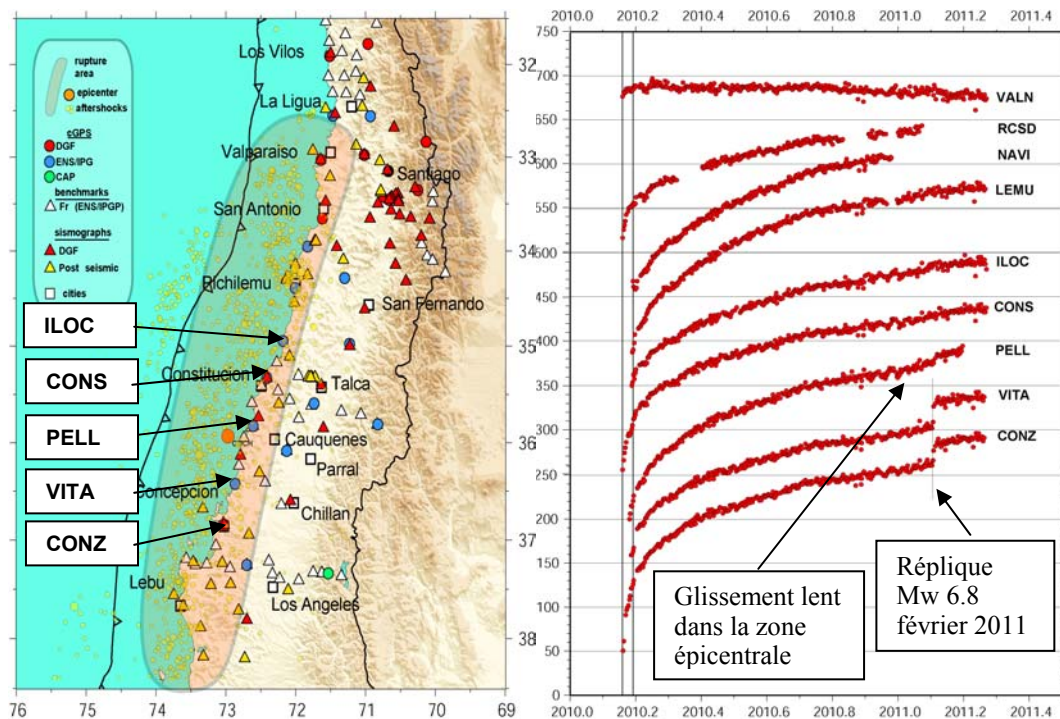


Fig2. Réseaux GPS/sismo et séries temporelles cGPS choisies (stations à la côte)

Sur tous ces travaux, pas moins de 7 articles (dont encore un à Science) associant pour tout ou partie des membres du LIA ont été publiés en 2011 ou sont sous presse.

2. Modélisation post-sismique

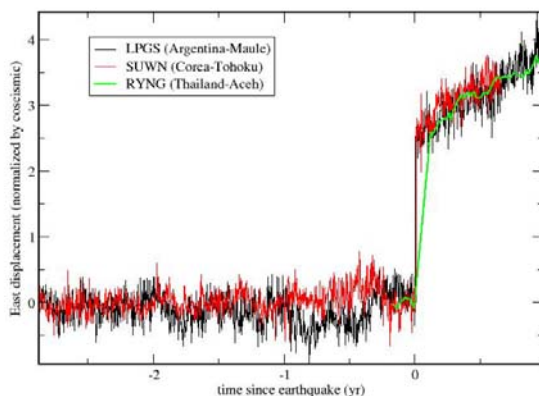


Fig 3. séries temporelles de 3 stations cGPS dans 3 régions du monde affectées par des séismes de subduction géants

Nous avons entrepris la modélisation 3D de la déformation post-sismique sur le modèle de ce qui a été réalisé dans le cadre du séisme de Sumatra de 2004 : codes aux éléments finis (Zebulon – école des mines de Paris), maillage 3D affiné.

La comparaison avec les événements de Sumatra et du Japon (fig. 3), permet déjà d'anticiper sur une découverte fondamentale : la déformation en champ lointain (de plusieurs centaines de km à un millier de km) est identique dans les 3 cas, rapportée au saut co-sismique. Cela pointe une propriété globale du manteau terrestre, valable partout : une viscosité Newtonienne qui implique que la déformation post-sismique soit strictement proportionnelle à la co-sismique.

Un article est en cours de rédaction sur ce sujet

3. extension de l'étude du couplage au long de la zone de subduction (GPS, INSAR)

Suite à un gros effort initié en 2010, les réseaux GPS ont été étendus à des zones où il n'existait quasiment aucune mesure auparavant. Dans le «grand nord» entre Arica et Iquique le réseau ancien a été ré-installé, complété à près de 60 points, et remesuré entièrement. Les réseaux autour d'Antofagasta et de la péninsule de Mejillones ont également été complétés et remesurés. Dans le «petit nord», le «no mans land» de la région d'Atacama (entre 28°S et 26°S), nous avons installé (en 2010) et re-mesuré (en 2011) une trentaine de points. Enfin, un dizaine de points remplit le trou entre le réseau de la IV^{ème} région (Coquimbo) et la région métropolitaine. Au total, près de 200 points ont été installés et mesurés en 2010/2011. Les données produites par ces campagnes de mesures sont en cours de traitement, et des cartes de vecteurs/déformation préliminaires ont été produites (fig 4).

Par ailleurs l'archive d'images SAR ENVISAT existantes sur les régions Atacama-Coquimbo a été entièrement traitée. Des résultats spectaculaires ont été obtenus grâce à de nouveaux algorithmes développés au laboratoire de Géologie pour éliminer au maximum les effets de topographie et de troposphère et conserver la cohérence sur des temps les plus longs possibles (thèse G. Ducret). Les cartes de déformation établies sur plusieurs dizaines d'interferogrammes «stackés» montrent une déformation intersismique (fig. 4) cohérente avec celle déterminée à l'aide des points GPS existants. On reconnaît la forte variation de couplage avec la latitude qui avait été identifiée grâce au GPS, mais avec cette fois la densité de point de mesure incomparable fournies par l'INSAR : des millions de pixels.

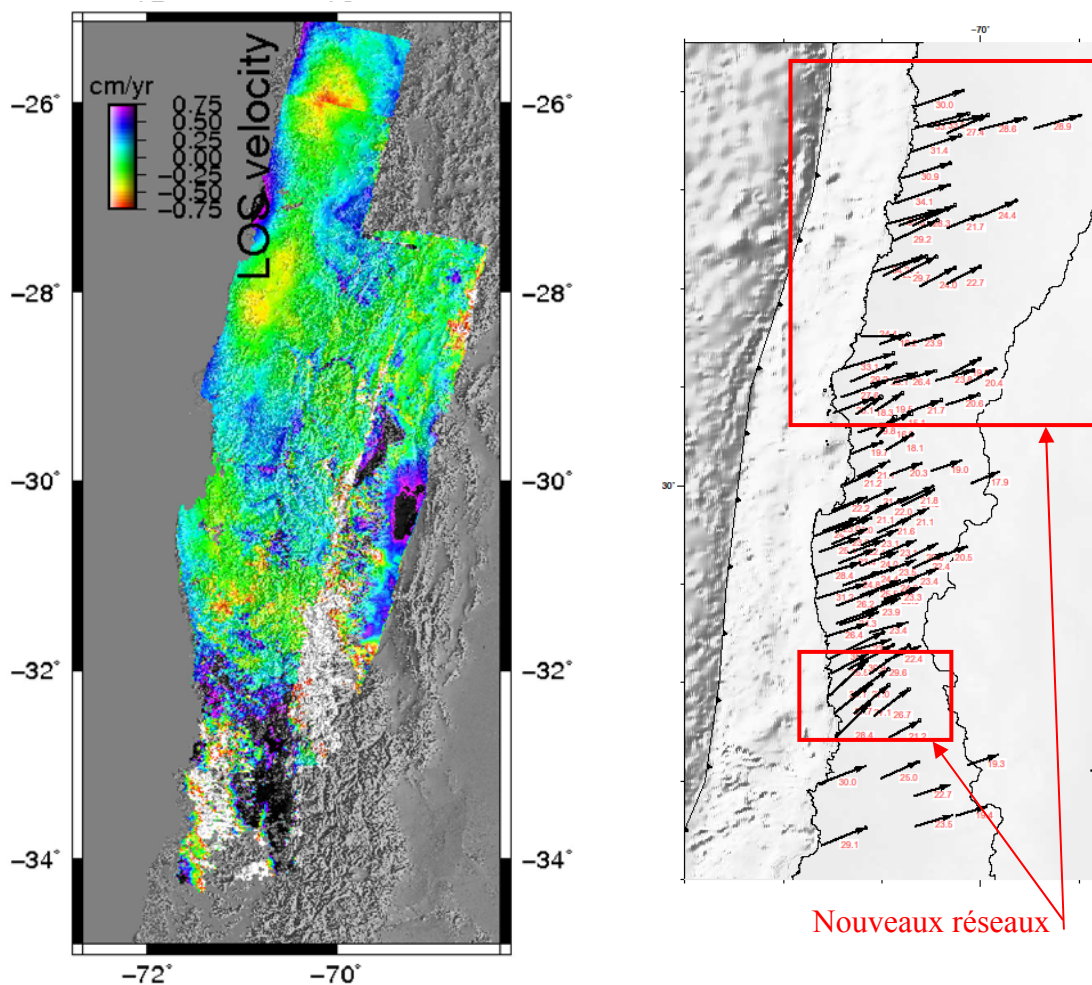


Fig. 4 déformation inter-sismique GPS (gauche) et INSAR (droite). Solution très préliminaires pour les nouveaux réseaux GPS (seulement deux mesures à 1 an d'intervalle). Pour l'INSAR, le stack est composé des tracks 325 (à l'Ouest), 53 (au centre) et 282 (l'Est).

4. études tectoniques

- Paléo-sismologie de la Faille de San Ramon (tranchées) : Yann Klinger, Tom Rockwell, Gabriel Vargas, Rolando Armijo, Robin Lacassin. Deux tranchées ont été ouvertes sur l'escarpement plurimétrique identifié au voisinage de la Quebrada Macul (Armijo et al. 2010). Ces tranchées montrent de façon spectaculaire l'émergence du chevauchement ouest andin, et permettent d'identifier une ou deux ruptures sismiques avec des offsets unitaires de 2-3m, qui correspondent donc à des séismes de magnitude 7 au moins (fig. 5). L'étude détaillée de ces tranchées est en cours (en particulier logs détaillés, datations OSL).

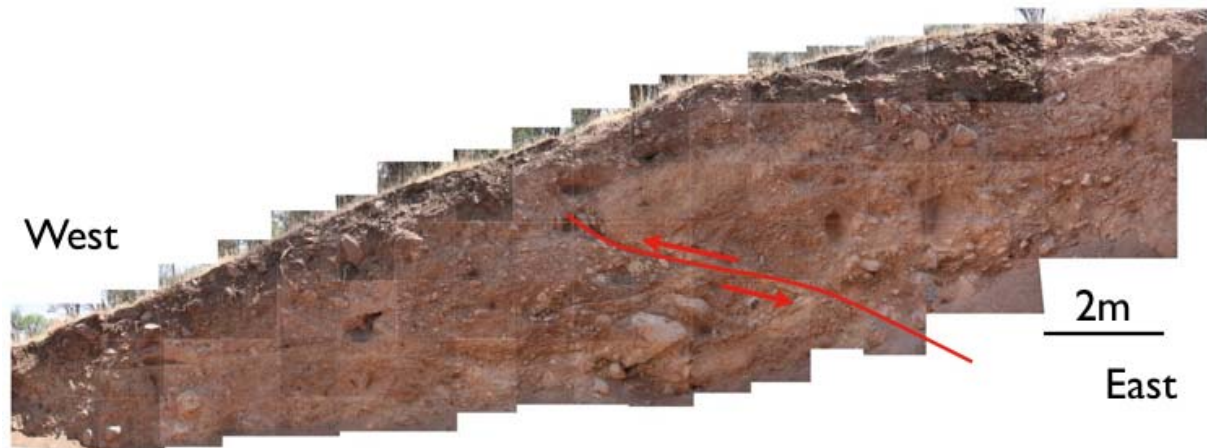


Fig 5 ; Tranchée paléosismologique sur la faille de San Ramon (hauts de la ville de Santiago); la trace de la faille principale, chevauchante, soulignée en rouge, est caractéristique d'une ou deux ruptures sismiques avec des déplacements unitaires pluri-métriques

- Géomorphologie et tectonique de la marge côtière du N-Chili : Rolando Armijo, Robin Lacassin, Gabriel Gonzalez, Daniel Carrizo. Cette mission a permis de faire sur le terrain la synthèse et la discussion de nombreuses observations clés, de confronter les interprétations, et mettre en chantier toute une série d'articles qui seront soumis à courte échéance.

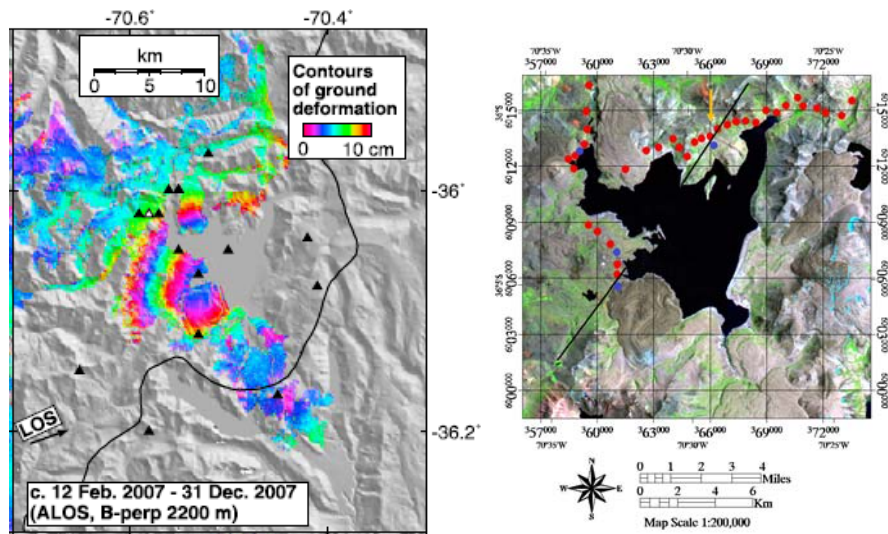
Plusieurs articles sont en préparation sur ces sujets.

5. Projets Chiliens : Laguna del Maule

Enfin, le prêt de matériel GPS LIA à une jeune équipe du DGF (A. Pavez, D. Carrizo) a permis à cette équipe d'entreprendre des études dans une zone volcanique en déformation (La Laguna del Maule, située dans la cordillère à la latitude de Constitucion). Jusqu'à récemment, les seules données qui existaient sur cette déformation proviennent d'images InSAR (Pritchard et al, 2006, Fournier et al ; 2010) Les nouvelles données GPS (3eme campagne de mesures en janvier 2012 – thèse de master de C. Honores) donneront l'occasion d'une part de confirmer cette activité et d'autre part de mieux caractériser la source de cette déformation. Ceci nous permettra ainsi de connaître la tuyauterie interne d'une zone active au sein d'une caldera volcanique.

Ces études peuvent avoir des retours intéressants car dans cette zone se trouvent également de nombreuses sources géothermiques. L'étude la tuyauterie locale (probablement associée à une structure tectonique au sein de la structure volcanique) nous permettrait de proposer un modèle géologique pour les réservoirs géothermiques de cette région. En complément des

données GPS, l'équipe est aussi entrain de lever des profils structuraux au sein de cette caldera au moyen de stations gravimétriques statiques. Les premiers résultats montrent très clairement le signal associé a la faille sous-jacente...



Interferogramme de la déformation récente (figure gauche, extraite de Fournier et al., 2010) et carte des points de mesure gravi et GPS (figure droite).

6. **Site web / bases de données** : le site WEB du LIA a été mis en place, et petit à petit alimenté en documents divers (cartes, rapports, etc...). Il est consultable sur : <http://www.lia-mdb.net>
7. **Echanges/visites/étudiants**: le LIA coordonne une activité scientifique basée sur des échanges, des visites et des séjours de plus ou moins longue durée d'étudiants et de chercheurs français et chiliens, au Chili ou en France.
 1. Sergio Ruiz, thésard chilien, J.Campos au Chili – R. Madariaga en France
 2. Patrizio Toledo, thésard Chilien, J.Campos au Chili – R. Madariaga en France
 3. Gianina Menesez, thésarde Chilienne, J. Campos au Chili – P. Bernard en France
 4. Gabriel Vargas (prof. U.Chile, 3 semaines) - sujet: paléosismologie de la Faille de San Ramon
 5. René Garreaud (prof. U.Chile, 2 semaines) - lien entre climat, hyperaridité de l'Atacama, et tectonique
 6. Daniel Carrizo (postdoc U.Chile, 3 semaines) - géodésie et tectonique du séisme de Maule et du nord Chili
 7. Gabriel Gonzalez (prof. U Cat. Norte, Antofagasta, 2 semaines) - géomorphologie et tectonique du N-Chili

8. **Stages et Rapports:**

Trois thèses soutenues et/ou terminées en 2011

Marta Bejar Pizarro

Comportamiento mecánico de la interfase de subducción durante el ciclo sísmico: Estudio mediante la geodesia espacial en el Norte de Chile.

Thèse cotutelle U. Madrid - IPGP. Soutenue en septembre 2011

Rodrigo Rauld

Deformacion cortical y peligro sismico asociado a la falla de San Ramon en el frente cordillerano de Santiago, Chile central.

Thèse U. Chile - co-direction R. Armijo, IPGP. Soutenue en septembre 2011.

Aurélie Coudurier-Curveur

Evolution morpho-tectonique de la marge de subduction andine au nord Chili.

Thèse IPGP - direction R. Armijo et R. Lacassin. Soutenance en février 2012.

9. **Communications à divers congrès et colloques**

Les abstracts sont disponibles en ligne sur le site Web du LIA, à la rubrique «[publications] – [Talks and presentations]

Articles publiés

1. Coseismic slip distribution of the February 27, 2010 Mw 8.8 Maule, Chile earthquake
Pollitz, F. F., B. Brooks, X. Tong, M. G. Bevis, J. H. Foster, R. Bürgmann, R. Smalley Jr., C. **Vigny, A. Socquet, J.-C. Ruegg, J. Campos, S. Barrientos**, H. Parra, J. C. B. Soto, S. Cimbaro, and M. Blanco
Geophys. Res. Lett., 38, L09309, doi:10.1029/2011GL047065, 2011
2. The 2010 (Mw 8.8) Earthquake of central Chile, monitored by GPS
Vigny, C., A. Socquet, S. Peyrat, J.-C. Ruegg, M. Métois, R. Madariaga, S. Morvan, M. Lancieri, R. Lacassin, J. Campos, D. Carrizo, M. Bejar-Pizarro, S. Barrientos, R. Armijo and the SSN team, the LIA-MdB team, the CAP team
Science, 332, 17 june 2011, pp 1417-1421 [DOI:10.1126/science.1204132], 2011
3. Aftershock seismicity of the 27 February 2010 Mw 8.8 Maule earthquake rupture zone
Lange, D., F. Tilman, S. Barrientos, E. Contreras-Reyes, P. Methe, M. Moreno, B. Heit, H. Agurto, **P. Bernard, J.-P. Vilotte**, and S. Beck
Earth Planet. Sci. Lett. (EPSL), [doi:10.1016/j.epsl.2011.11.034], 2011
4. Large extensional aftershocks in the continental forearc triggered by the 2010 Maule earthquake, Chile,
Ryder, I., A. Rietbrock, K. Kelson, R. Bürgmann, M. Floyd, **A. Socquet, C. Vigny, and D. Carrizo**
Geophys. J. Int., doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05321.x, 2012
5. Variable coupling reflects the seismic segmentation and the first order mechanical behaviour of the central Chile subduction zone
Métois, M., A. Socquet, and C. Vigny
Journal of Geophysical research (JGR), in press, 2012
6. Toward understanding tectonic control on the Mw 8.8 2010 Maule Chile earthquake
Moreno, M., D. Melnick, M. Rosenau, J. Baez, J. Klotz, O. Oncken, A. Tassara, K. Bataille, J. Chen, M. Bevis, **A. Socquet, J. Bolte, C. Vigny, B. Brooks, M. Simons, I. Ryder, V. Grund, B. Smalley, D. Carrizo, M. Bartsch, H. Hase**
Earth Planet. Sci. Lett. (EPSL), [doi:10.1016/j.epsl.2012.01.006], 2012
7. Short period rupture process of the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake in Chile
Ruiz, S., R. Madariaga, M. Astroza, G. Saragoni, M. Lancieri, C. Vigny and J. Campos
submitted to *Earthquake Spectra*, 2011

Annexe A – Bilan financier

N° de cde	date Facture	Fournisseur/agent	Designation	Montant facturé (euros)
Campagne GPS juin 2011 Atacama-Antofagasta				7 941,84
L03181	01/06/2011	FRAM	Billets Paris/santiago C.Vigny	1 283,42
L03182	01/06/2011	FRAM	Billets Paris/Santiago M. Métois	1 298,42
L03204	10/06/2011	C.Vigny	Mission au Chili	4 360,00
L03210	10/06/2011	M.Métois	Mission au Chili	1 000,00
Mission maintenance du réseau sismologique - septembre 2011				8 221,54
L03890	01/08/2011	FRAM	Billets Paris/Santiago A.Nercessian	1 299,26
L03897	01/08/2011	FRAM	Billets Paris/Santiago M.Aissaoui	1 227,83
L03899	14/09/2011	A.Nercessian	Mission au Chili	2 772,45
L03900	19/09/2011	M.Aissaoui	Mission au Chili	1 622,00
			Frais de terrain Chili	1 300,00
Factures diverses				14 638,27
L03338	03/06/2011	Nanometrics	Câbles	698,94
L03390	20/05/2011	Conrad	Régulateurs solaires	138,58
L03705	04/07/2011	LDLC.COM	Disque dur externe	149,10
L03768	22/07/2011	UPS	Frais de douane Nanometrics	207,50
L03797	19/07/2011	Moguilny	Achat domaine web LIA	43,05
L3062	07/06/2011	IPGP/RTC CHILI	Prestation Rural Telecom Chili	11 130,00
L04998	12/12/2011	IPGP/RTC Chili	Prestation Rural Telecom Chili	2 100,00
L04954	01/12/2011	FRAM	Billets de train Montpellier/Paris	156,10
L04955		F.Boudin	Mission à Paris	15,00
Réunion conseil scientifique du LIA – Novembre 2011				16 424,72
L04361	01/11/2011	FRAM	Billets Paris/Santiago JP Montagner	1 385,18
L04362	01/11/2011	FRAM	Billets Paris/Santiago C.Vigny	1 310,18
L24363	01/11/2011	FRAM	Billets Paris/Santiago JP Vilotte	1 400,18
L04621	01/11/2011	FRAM	Billets Nice/Santiago Monfret	2 059,80
L04626	01/11/2011	FRAM	Billets Strasbourg/Santiago L.Rivera	2 318,20
L04628	01/11/2011	FRAM	Billets Paris/Santiago S.Peyrat	1 652,02
L04629	01/11/2011	FRAM	Billets Paris/Santiago A.Socquet	1 552,02
L04391	11/11/2011	JP Montagner	Mission au Chili	516,15
L04364		C.Vigny	Mission au Chili	1 700,00
L04367	12/11/2011	J.P.Vilotte	Mission au Chili	816,20
L04744	12/11/2011	T.Monfret	Mission au Chili	756,00
L04743	10/11/2011	L.Rivera	Mission au Chili	210,19
L04745	13/11/2011	S.Peyrat	Mission au Chili	113,40
L04716	11/11/2011	A.Socquet	Mission au Chili	635,20
Réunion CNRS-GFZ Potsdam Juillet 2011				3 712,35
L03550	01/07/2011	FRAM	Billets Paris/Berlin C.Vigny	449,48
L03551	01/07/2011	FRAM	Billets Paris/Berlin A.Socquet	449,48
L03553	01/07/2011	FRAM	Billets Paris/Berlin J.P.Vilotte	532,48
L03556	01/07/2011	FRAM	Billets Paris/Berlin M.Aissaoui	532,48
L03600	01/07/2011	FRAM	Billets Paris/Berlin R.Armijo	532,48
L03602	24/06/2011	R.Armijo	Mission à Potsdam	280,10
L03546	24/06/2011	A.Socquet	Mission à Potsdam	193,00
L03547	24/06/2011	C.Vigny	Mission à Potsdam	268,65
L03552	24/06/2011	J.P.Vilotte	Mission à Potsdam	253,20
L03578	24/06/2011	M.Aissaoui	Mission à Potsdam	221,00
MONTANT TOTAL				50 938,72 50 938,72