



## Actions sur projets INSU

TelluS

Appel d'offres 2019

### Dossier scientifique

Ce formulaire doit être obligatoirement déposé par le porteur du projet sur le site <https://sigap.cnrs.fr/>

sous format PDF

**DATE LIMITE DE CANDIDATURE : 20 SEPTEMBRE 2018, A 12H**

**Titre du projet :** COP2020 - Slow Slip Trigger

**Responsable du Projet** (*nom, prénom, qualité*) :  
Christophe Vigny, DR2, LG-ENS, UMR8538

**Co-porteur du Projet** (*nom, prénom, qualité*) :  
*destiné à des post-docs/ATER et doctorants*  
Emilie Klein, postdoc SIO, UCSD

**S'agit-il d'une re-soumission ? Si oui, donnez des détails :**  
non

**Récapitulatif du plan de financement global du projet (le même budget obligatoirement inscrit en ligne) :**

*Le programme TelluS ne finance que des projets sur 1 an.*

Financement demandé à l'INSU pour l'année 2019				
Equipement	Fonctionnement (dont analyses)	Missions	Animation scientifique	TOTAL
0	0	10 800 €	0	10 800 €

Co-financements pour l'année 2019			
Source	Montant demandé	Montant obtenu	TOTAL
<b>Total</b>			

NB. Le LIA Franco-Chilien « Montessus de Ballore », qui serait un co-financier idéal, cessera de fonctionner (après 10 ans d'existence) au terme de l'année 2018.

### Personnel détaillé par laboratoire et fonction dans le projet

Seulement si impliqué à plus de 10% dans le projet

Nom Prénom	Grade/qualité	Laboratoire/organisme (nom/sigle, ville)	Rôle dans le projet	% de participation	% de participation à d'autre projet
Vigny Christophe	DR	LG-ENS	Coordinateur Mesures et analyses GPS	90%	10%
Klein Emilie	Postdoc	SIO	Mesures et analyses GPS, modélisation	25%	75%
Duputel Zacharie	CR	IPG Strasbourg	Modélisation	10%	90%
Zigone Dimitri	PhAdj	IPG Strasbourg	Modélisation, analyses données sismo	10%	90%
Dobre Cécile	Ph	IPG Strasbourg	Analyse des données sismo & géodésiques	10%	90%
X	IR	LG-ENS	Mesures et analyses GPS	25%	75%

### Résumé du projet (10 lignes maxi) :

Après 15 ans de mesures GPS intensives au Chili, nous disposons de cartes de couplage qui mettent en évidence des successions de longs segments sismiques, bordés de zones étroites où la déformation ne s'accumule pas (LCZ). Nous avons identifié et caractérisé dans la région Atacama un long segment complexe, susceptible de produire bientôt un séisme majeur ( $M_w > 8.5$ ) comme en 1819 et 1922. A l'extrémité Sud de ce segment, la LCZ de Copiapo a fait l'objet d'un glissement lent en 2014, détecté par nos campagnes annuelles. L'unique station GPS continue de la région confirme cet événement et révèle des événements similaires en 2005 et 2009, suggérant une récurrence possible de l'ordre de 4 à 5 ans.

Nous voulons instrumenter la zone pour capturer un futur épisode de glissement lent susceptible de se reproduire aux alentours de 2020, et ce d'autant plus s'il devait déclencher le grand séisme attendu dans la région (comme Iquique 2014 ?).

**(8 pages maximum, figures incluses, les pages en plus ne seront pas prises en compte)**

## 1. Intérêt scientifique situation et état de l'art

Les réseaux de marqueurs géodésiques nombreux, denses et étendus que nous avons déployé au Chili depuis 15 ans (figure 1) nous ont permis de cartographier avec un certain niveau de précision ce que l'on appelle le couplage : les zones où la déformation s'accumule dans la plaque supérieure à cause de la présence d'aspérités qui empêchent le glissement sur le plan de subduction. Les cartes de couplage établies montrent des successions de longs segments sismiques, bordés de zones plus ou moins étroites où la déformation ne s'accumule pas ou peu. Dans ces zones, dénommées LCZ pour *Low Coupling Zone*, la sismicité est souvent anormale et se produit principalement sous forme d'essaims plus ou moins récurrents. La présence de ces LCZ pourrait correspondre à la subduction de rides bathymétriques ou de monts sous-marins, ou encore à des failles dans la plaque supérieure. (e.g. Métois et al., 2012, 2013, 2014, 2016, Klein et al., 2018). Lors de nos derniers travaux, nous avons identifié et caractérisé dans la région Atacama un long segment complexe, susceptible de produire bientôt un séisme majeur ( $M_w > 8.5$ ), répétition des séismes de 1819 et 1922 (Klein et al., 2018). Au bord Sud de ce segment, la LCZ de Copiapo a fait l'objet d'un glissement lent (*Slow Slip Event*, SSE) entre 2014 et 2016, glissement détecté par nos campagnes de mesures GPS annuelles (Klein et al., submitted ; figure 2). Dans cette zone, des essaims de sismicité se produisent fréquemment, parfois associés à des séismes plus forts comme durant la crise de 2006 (2 séismes de  $M_w \sim 6.5$ ). Il existe très peu de stations GNSS permanentes dans cette région reculée et difficile d'accès, une seule station située dans la ville de Copiapo (COPO) fonctionnait depuis 2002 et a été remplacée en 2015 par BN03. Les données collectées par ces deux stations révèlent également ce signal étalé sur plus d'un an et montrent que des événements similaires semblent s'être produits en 2005 et 2009 (Klein et al., submitted, figure 3). De ce fait, nous anticipons une récurrence possible de l'ordre de 4-5 ans et cela pose plusieurs questions.

En premier lieu, celle de l'origine de ces SSE et de leur éventuelle période de récurrence. Les événements climatiques du type El Niño qui affectent la côte chilienne ont également une période d'environ 5 ans. Serait-il possible que le glissement lent sur l'interface de subduction soit déclenché par une modification des contraintes

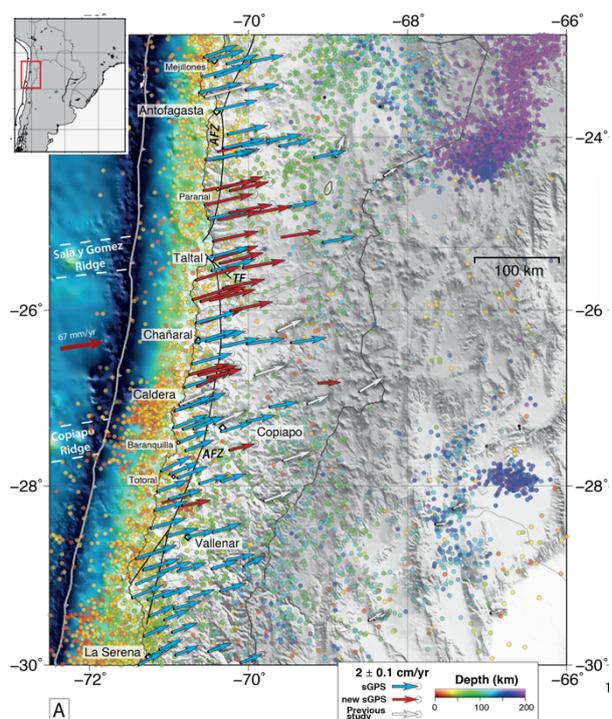


Figure 1 : Champ de vitesse intersismique (mm/an) estimé entre 2010 et 2016 exprimé dans un référentiel Amérique du Sud stable (Klein, Métois, et al. 2018). Catalogue de sismicité USGS (1973-2017)

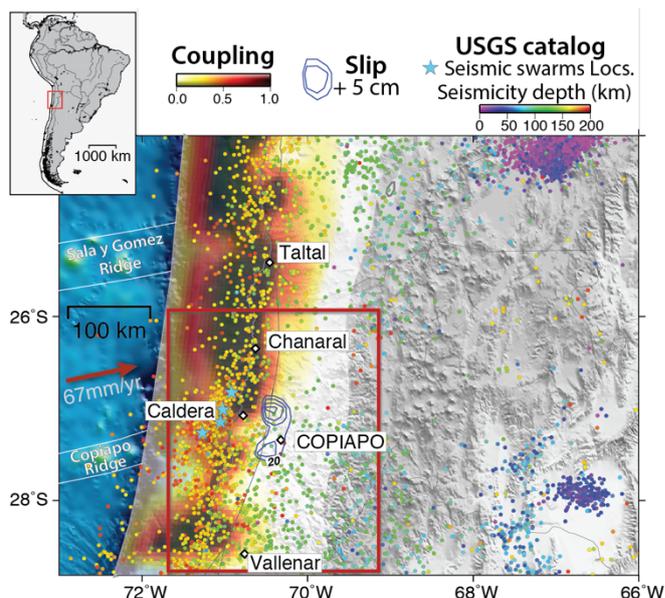


Figure 2 : Contexte sismo-tectonique (Klein et al., submitted). Catalogue de sismicité de l'USGS (1973-2017), représenté en fonction de la profondeur. Modèle de couplage d'après (Klein, Métois, et al. 2018). Les contours de la distribution de glissement du SSE sont représentés en bleu (+5cm)

engendrées par une surcharge hydrologique ? Les premières constatations (comparaison entre les données GPS et l'*Oceanic Nino Index*) montrent qu'il n'y a pas vraiment de corrélation spatio-temporelle claire entre les épisodes de glissement lent d'une part et les événements climatiques à grande échelle (El Niño). Par ailleurs, nous avons exclu toute origine directe due à un forçage local océanique (à partir de prédictions du modèle ECCO), atmosphérique (prédictions du modèle ECMWF ERA-Interim) ou hydrologique (prédictions des modèles GLDAS/Noah v1 et NASA/GSFC) (Klein et al., submitted). Le forçage externe n'est en revanche pas évident et tester cette hypothèse nécessiterait de construire des modèles plus complexes que la simple analyse factuelle. Nous n'envisageons pas de le faire dans le cadre de ce projet sur 1an, mais cela pourrait être l'objet d'études ultérieures.

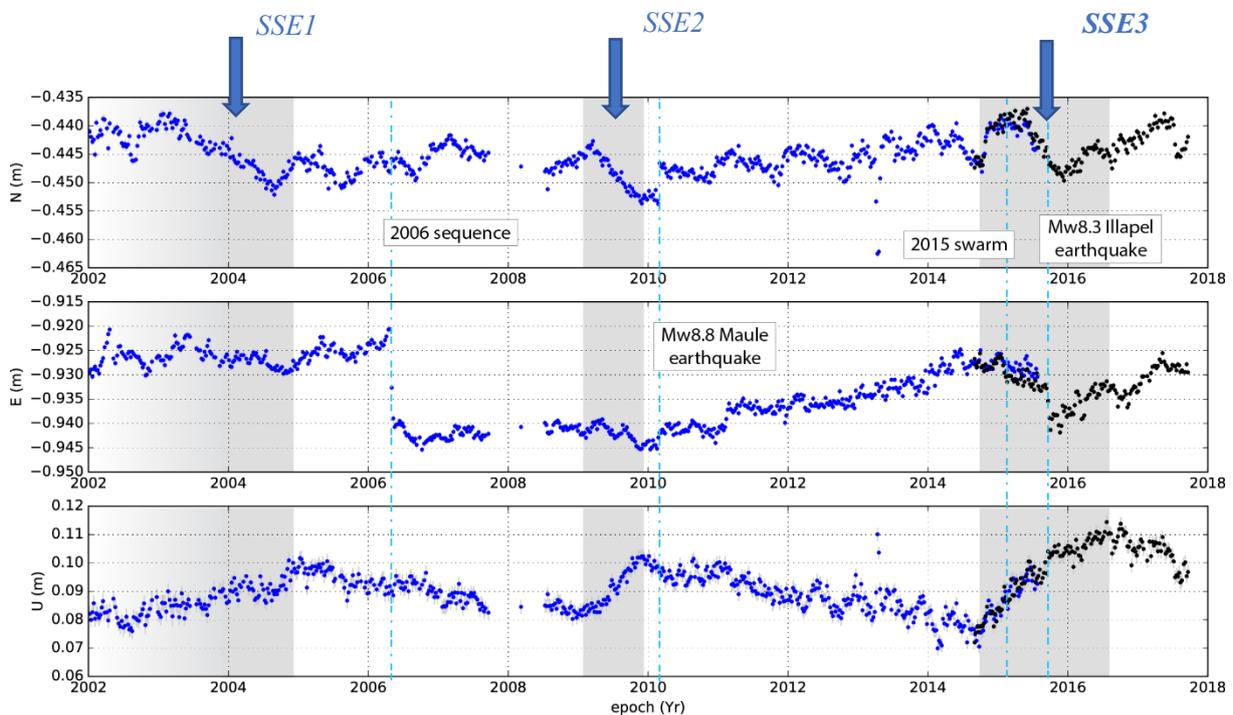


Figure 3 : Série temporelle hebdomadaire des stations cGPS COPO (bleue) et BN03 (noire) (données traitées au Nevada Geodetic Laboratory, UNR), représentées en ITRF. La tendance long terme a été corrigée sur les composantes horizontales. Les zones grises représentent les SSEs, c'est-à-dire les périodes très anormale par rapport à la tendance long-terme (nb. Les variations sont petites).

En second lieu se pose la question des conséquences de ces épisodes de glissement lent : quelle est leur influence sur l'occurrence des séismes majeurs ? Un événement de glissement lent dans une zone faiblement couplée a déjà été observé plus au Nord dans la région de la ville d'Iquique (Ruiz et al., 2014, Socquet et al. 2017). Même si le débat est toujours ouvert, il est plausible que le glissement lent ait déclenché le séisme de magnitude 8.1 qui a rompu le segment bloqué juste à côté quelques semaines après le début de l'essai sismique (Ruiz et al., 2014, Boudin et al. In prep). Un mécanisme similaire a récemment été proposé au Mexique, où un événement de glissement lent en 2014 aurait déclenché le séisme de Mw7.3 de Papanaoa, soit par augmentation des contraintes statiques dans la zone couplée, soit en favorisant l'affaiblissement de la zone hypocentrale du séisme (Radiguet et al., 2016). Le glissement lent, possiblement récurrent, de la LCZ de Copiapo pourrait-il jouer le même rôle et déclencher le séisme d'Atacama que nous attendons ?

En troisième lieu, se pose la question de l'éventuelle présence de sismicité associée au glissement lent sous la forme de tremors non volcanique. Les SSE dans les zones de subduction sont en effet toujours associés à des vibrations de faibles amplitudes persistantes dans le temps, appelées « tremors non volcaniques » (NVT) (e.g., Beroza & Ide, 2011). Leur identification est une étape importante puisque ces signaux sismologiques servent de proxy pour étudier le glissement lent avec une meilleure résolution temporelle que celle obtenue avec les données GNSS. Ils rendent ainsi possible la détection et le suivi de plus petits glissements qui n'auraient pas été détectés avec le réseau GNSS seul (Frank, 2016 ; Frank et al., 2018). De plus, les activités de tremors sont en partie composées de séismes basse fréquence (LFE pour *Low Frequency Earthquakes*) qui se caractérisent par un déficit en hautes fréquences par rapport aux séismes "traditionnels" de magnitudes similaires. La détection de LFE dans les signaux de tremors permet de fournir des localisations et d'inverser des mécanismes au foyer, complétant ainsi les inversions du glissement obtenue avec les données GNSS (e.g., Shelly et al., 2007 ; Frank et al., 2013). Lorsque le SSE de 2014 s'est produit dans la région d'Atacama, les données d'une seule station sismologique à proximité de l'événement ont pu être exploitées (GO03,

Fig. 4 ; Klein et al., submitted). Nous avons mis en évidence des poussées d'énergie de quelques décibels au-dessus de la moyenne, concomitantes avec le glissement lent, qui pourraient indiquer des activités de tremors. Toutefois, il est difficile de conclure sur l'origine tectonique de ce signal avec une seule station sismologique. Si un nouveau glissement lent venait à se produire en 2020, nous pourrions intégrer dans l'analyse les données d'une nouvelle station sismologique installée en 2016 (AC06, Fig. 4), afin de conclure sur la présence de NVT associés aux SSEs de cette région.

En quatrième lieu, le glissement lent que nous avons détecté grâce aux mesures GNSS à terre est relativement profond - il se produit sous la côte, entre 40 et 60 km de profondeur, probablement dans la zone de transition de l'interface de subduction (Klein et al., submitted; figure 4). Les mesures GNSS ne nous permettent pas de savoir s'il y a eu du glissement plus superficiel, sur les 10 premiers kilomètres de la fosse de subduction. Ce point est crucial en raison de l'aléa Tsunami qu'il implique, mais reste pour l'instant insoluble par les mesures GNSS à Terre. Néanmoins, dans l'hypothèse où un nouveau glissement lent se produirait, établissant ainsi une récurrence assez stable, cela deviendrait un argument fort pour que cette zone soit davantage étudiée et deviennent une zone cible pour des mesures de géodésie de fond de mer.

S'il se produit bien tous les 4 à 5 ans, serait-il possible d'anticiper la répétition de l'événement pour 2020 en déployant à l'avance des stations GNSS permanentes dans la région, de manière à capturer le futur glissement lent et mieux contraindre la distribution du glissement en profondeur et, dans le cas où un grand séisme de subduction venait à se produire, le potentiel rôle du SSE dans son occurrence ?

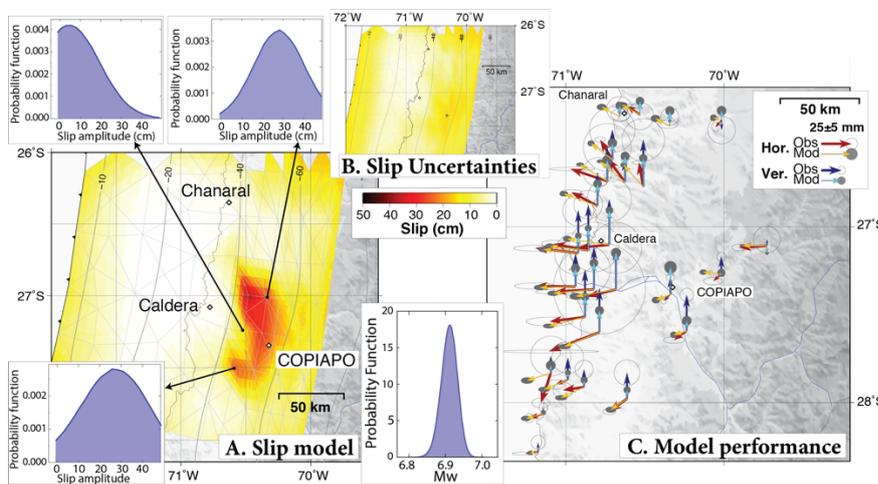


Figure 4 : Distribution de glissement du SSE de 2014-2016 inversé selon une approche probabiliste Bayésienne. A- Distribution de glissement moyenne (cm), les graphes montrent les PDF marginales pour 3 patches ainsi que la PDF marginale de Mw. B- Incertitudes prédites à 1-sigma (même échelle de couleur que A). C- Observations vs. Prédictions en surface du modèle (comp. Horizontales et verticales).

## 2. Plan de recherche et calendrier de réalisation

Une constatation : malgré une infrastructure qui atteint aujourd'hui près de 100 stations GNSS permanentes et autant de stations sismologiques (courtes périodes et larges bandes) le réseau permanent chilien installé et maintenu par le *Centro Sismologico Nacional* (CSN) de l'Université du Chili reste peu dense dans certaines zones compte tenu de l'immensité du pays. Dans la région de l'Atacama en particulier (3ème région du Chili), il y a très peu de cGPS (figure 5). La station IGS de Copiapo, COPO, opérationnelle depuis 2002 a été désinstallée début 2015. Quelques mois plus tôt, 2 nouvelles stations ont été installées à moins de 5 km, BN03 et UDAT et une troisième à 25 km, TAMR. En 2016, 2 stations sont installées un peu plus loin au Nord (PAZU) et au Sud (LLCH). A part COPO, toutes ont moins de 3 ans d'acquisition. Point négatif, dans la région de Copiapo aucune station n'est installée à la côte, ce qui limite la sensibilité du réseau pour des événements superficiels.

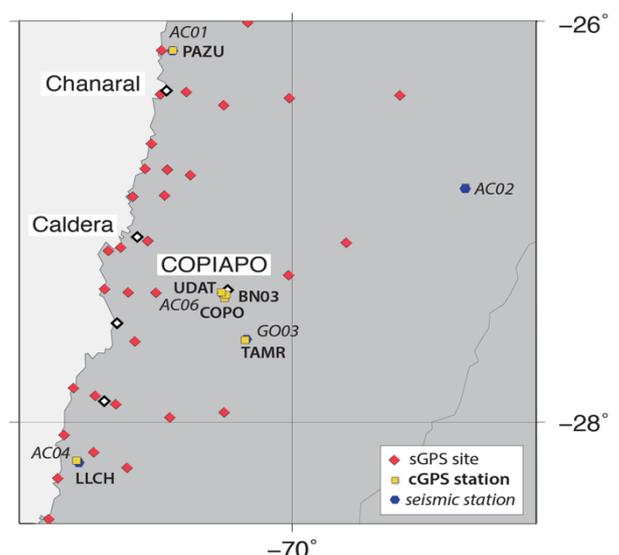


Figure 5: Réseaux sGPS (losanges rouges), cGPS (carrés jaunes) et stations sismologiques large bande (pentagrammes bleus).

## 2.1 Remesure du réseau de campagne

Il est important de remesurer l'intégralité du réseau de campagne dans la région – 30 sites environ, figure 5 - afin de maintenir des « séries temporelles » fiables, avec un point de mesure par an, afin de permettre la détection des SSEs, comme celui de 2014. Une répétition fréquente et régulière des mesures est nécessaire pour deux raisons :

a) la zone étant le lieu de SSEs, petits mais potentiellement fréquents, la tendance inter-sismique long terme n'est pas simple à établir. Seules des séries longues et bien échantillonnées permettront de le faire.

b) en cas d'occurrence prochaine d'un grand séisme de subduction dans la région, la mesure pré-sismique la moins éloignée dans le temps permet de déterminer des déplacements co-sismiques plus précis, en particulier sur les sites où ce déplacement est faible. Ce point n'est pas anecdotique, puisque c'est ce qui permet de bien déterminer les terminaisons de la rupture et d'étudier en détails les corrélations avec le couplage pré-sismique et la topographie côtière comme nous l'avons fait pour le séisme d'Illapel de 2015 (Klein et al. 2017).

Nous avons l'habitude de réaliser de telles campagnes au Chili (28 campagnes chiliennes de C. Vigny en 15 ans) avec une logistique relativement légère - la plupart du matériel nécessaire (ordinateurs, adaptateurs, batteries, chargeurs, etc..) est entreposé sur place à l'Université du Chili, donc pour un coût modéré. Une équipe de deux personnes, éventuellement assistée par 1 ou 2 technicien(s) du CSN (payés par le CSN), disposant d'une camionnette pick-up de location et d'une quinzaine de récepteurs du parc INSU (Leica GR25 avec petites antennes) peut réaliser une telle campagne en 10-12 jours de mesures et produire des résultats de très bonne qualité (la plupart des sites stationnés 5 jours) (cf. planning des campagnes de 2010 à 2016 disponibles en ligne : <http://www.geologie.ens.fr/~vigny/chili-f.html#DOCS> ).

Une partie du budget demandé sera donc utilisé pour réaliser une campagne de mesures, focalisée dans cette région et sur ces sites, possiblement sur la période Mars-Avril 2019.

## 2.2 Identification/installation de sites pour stations GPS permanentes

Le laboratoire de Géologie de l'ENS dispose d'une dizaine de récepteurs GPS (Trimble Net-RS & d'antenne Zephyr) qui équipaient des stations permanentes chiliennes. Ils ont été démontés, récupérés et stockés à l'Université du Chili après que le CSN ait installé ses instruments plus modernes (Trimble Net-R9), et identiques à ceux de ses propres installations, sur ceux de nos sites qui leur convenaient pour le réseau national chilien. Nous proposons de réinstaller tout ou partie de ces instruments, avec l'aide du CSN et du matériel qu'il mettrait à disposition (panneaux solaires, régulateurs, batteries, etc.). Ces stations seront réparties de manière homogène sur toute la zone du glissement lent de 2014, depuis la côte jusqu'à l'intérieur des terres. Bien évidemment, les stations seront programmées de manière à acquérir simultanément les données utiles au positionnement statique de précision (30s sur 24h) et les données utiles au suivi des déformations rapides (transitoires < 24h, déplacements co-sismiques, etc.) à 1 ou 10 Hz.

Tous les sites de notre réseau de campagne sont équipés de marqueurs à centrage forcé, et la plupart sont dans des lieux isolés et difficile à trouver, ou bien protégés. Ils sont nombreux et certains sont donc transformables à moindre frais en station permanente (figure 5). Nous avons l'expérience de telle transformation : la même méthode a été utilisée avec succès en 2016 dans la LCZ de La Serena quelques centaines de km au sud de la région de Copiapo. Les 4 stations installées ainsi fonctionnent sans discontinuer et sans problème depuis 2 ans. D'autres stations pourront être installées sans difficultés majeures dans des sites qui nous sont connus (hôtels, mairies, écoles) puisque 7 campagnes de mesures ont déjà été réalisées dans cette région depuis 2010.

Une partie du budget demandé sera donc utilisé par une mission de reconnaissance et installation des stations permanentes dans cette région.

*Nb : Cette mission sera réalisée en même temps et par les mêmes personnes que la campagne de remesure, nous augmenterons simplement le nombre de jours nécessaire pour atteindre cet objectif.*

Une deuxième mission, 4 à 6 mois plus tard, apparaît nécessaire pour visiter les nouvelles stations permanentes et s'assurer de leur bon fonctionnement, voire permettre leur réparation. Une mission plus courte, donc moins coûteuse, pourra pour cela être envisagée.

## 2.3 Fonctionnement du groupe de travail

Le groupe de travail est organisé de manière simple et pratique :

- Le partenaire LG-ENS (C. Vigny, E. Klein, X) organise et réalise les mesures GPS et produit les données sGPS et cGPS. Seul le coût des mesures est demandé dans le cadre de ce projet, le traitement de données est réalisé à coût marginal faible, non facturé au projet.
- Le partenaire IPG-S (D. Zigone, Z. Duputel, C. Doubre) réalise et coordonne l'analyse des données sismologiques disponibles (base de données du CSN) et les modélisations (inversions probabilistes bayésiennes) des données GPS obtenues

Nous souhaitons donc organiser :

- a) de brefs séjours (2-3 jours, à 1 ou 2 reprise dans l'année) d'au moins l'un(e) des « parisien.ne.s » à Strasbourg afin de travailler sur les inversions ensemble
- b) deux réunions de travail (1 à Strasbourg, 1 à Paris) d'une journée

## 3. Résultats attendus et perspectives

Après les séismes de Maule 2010 dans la région Centre-Chili, Iquique 2014 au Nord-Chili et Illapel 2015 dans la région Métropolitaine, il nous semble maintenant impératif de concentrer nos efforts sur la région d'Atacama, où un séisme de magnitude supérieure à 8.5 est susceptible de se produire bientôt. La séquence de grandes ruptures qui a commencé en 2010 au centre-Sud du Chili pourrait fort bien continuer avec cet événement attendu, tout comme la subduction de Sumatra a rompu tout du long lors de la décennie précédente, au cours d'une séquence initiée par le séisme d'Enganno en 2000 et « conclue » par le séisme de Mentawai 2010 (avec bien sûr les séismes géants de Banda-Aceh en 2004 et Nias en 2005).

Grâce à la mission de remesure du réseau sGPS, nous pourrons :

- a) Produire des séries temporelles rallongées disposant de 8 mesures pour les sites les plus anciens, 4 pour les sites les plus récents.
- b) Affiner l'estimation de la vitesse intersismique, et donc la détermination du couplage dans la région en corrigeant précisément de l'effet du SSE qui s'est produit en 2014-2016 et éventuellement des prochains qui seront mesurés.
- c) Etablir un nouvel « état zéro » du réseau, après l'occurrence du SSE entre 2014 et 2016. L'intérêt est ici double, il permet non seulement de repartir d'un niveau « stable » pour la détermination des vitesses inter-sismiques, mais aussi une détermination précise des déplacements co-sismiques dans le cas où le séisme de Mw8.5+ attendu viendrait à se produire.

L'installation des nouvelles stations permanentes dans la région nous permettra :

- a) De vérifier notre hypothèse de récurrence du SSE, en capturant le prochain événement qui se produira.
- b) De disposer d'un réseau dense cGPS de monitoring de tous les signaux dans la région, complétant les observations de campagnes, qui permettra d'étudier les corrélations spatio-temporelles avec la sismicité et les potentiels NVT associés au SSE, dont l'analyse des données d'au moins deux stations sismologiques permettra de confirmer ou d'infirmer la présence.
- c) De disposer de données cGPS à haute fréquence en cas de séisme important (les motogrammes) qui permettent d'étudier la nucléation du séisme et la vitesse de propagation de la rupture sous un angle nouveau et complémentaire de celui des données sismologiques seules.

L'ensemble de ces données acquises permettront d'étudier l'évolution spatio-temporelle du prochain SSE, ce qui n'a pas été possible pour celui de 2014-2016. Nous pourrons ainsi mieux imaginer et comprendre les interactions entre la partie superficielle sismogène de l'interface, a priori bloquée, et la partie profonde où se produisent les SSE, et l'éventuel transfert de contrainte entre les deux zones. Nous pourrons aussi détecter et étudier des potentiels signaux précurseurs au prochain grand séisme et étudier si l'occurrence des SSE profonds a pu avancer celle du méga-séisme. Nous pourrons aussi et enfin observer la nucléation de ce séisme grâce à un meilleur réseau permanent, à l'appui des données sismologiques qui pourront être rassemblées.

## MOYENS NECESSAIRES À LA RÉALISATION DU PROJET

**1. Equipements disponibles ou nécessaires à la réalisation du projet.** Indiquer les équipements déjà disponibles et ceux demandés par ailleurs ou dans la présente demande ; dans tous les cas, préciser dans quel laboratoire.

- Une dizaine de récepteurs et antennes GPS (TRIMBLE Net-RS et Zephyr) appartenant au LG-ENS, provenant de la jouvence des stations GPS du réseau permanent chilien, réalisée par le CSN au cours des 5 dernières années sont disponibles à l'*Universidad de Chile* à Santiago, pour les installations cGPS.
- Du matériel d'environnement des stations cGPS (caisses métalliques, panneaux solaires, batteries gel de forte capacité, régulateurs de charge) sera mis à disposition gratuitement par le CSN, dans le cadre de 10 ans d'échanges de services réciproques rendus dans le cadre de la construction du réseau cGPS chilien.
- Moyens de stockage de données et calculs des données (cluster) disponibles au LG-ENS, à coût marginal faible et non facturé au projet.

**2. Instruments ou Equipements Nationaux sollicités** (Instruments du parc national, heures de calcul sur un grand centre, demande de campagne à la mer, analyse AMS, SARM, nanoSIMS, microsonde électronique, etc.) :

- Récepteurs du parc mobile GPS INSU pour la remesure du réseau de campagne, 15 récepteurs seront demandés pour 3 semaines à la DT-INSU qui gère le parc

**3. Autres financements attribués** (autres programmes nationaux, demandes d'équipements mi-lourds, CPER, soutien d'organisme ou de laboratoire,...). A faire apparaître dans la rubrique budget.

- Le LIA franco chilien « Montessus de Ballore » serait un co-financeur idéal. Malheureusement son renouvellement n'est pas prévu après 2018, dernière de 10 années de fonctionnement depuis sa création en 2007 et son renouvellement en 2013.

**1. Références bibliographiques** – 2 pages maximum

Indiquer ici les références bibliographiques des demandeurs, en particulier sur le sujet de la demande (ou les références les plus significatives des 5 dernières années si le sujet est nouveau pour l'équipe).

- Klein, E., Duputel, Z., Zigone, D., Vigny, C., Boy, J-P., Doubre, C., and G. Meneses (2018)  
Deep transient slow slip detected by survey GPS in the Atacama Desert, Chile.  
Submitted to *Geophysical Research Letter*.
- Boudin, F., P. Bernard, G. Meneses, C. Vigny, et al. (2018)  
Slow slip event precursory to the 2014 Iquique earthquake revisited with long-base tiltmeter and GPS records  
in prep for *Earth and Planetary Science Letters*
- Klein, E., M. Métois, and V. C. D. A. Meneses, G. (2018),  
Bridging the gap between North and Central Chile: insight from new GPS data on coupling complexities and the Andean sliver motion,  
*Geophysical Journal International*, 213(3), 1924 – 1933, doi:10.1093/gji/ggy094.
- Klein, E., C. Vigny, L. Fleitout, R. Grandin, R. Jolivet, E. Rivera, and M Métois (2017)  
A Comprehensive analysis of the Illapel 2015 Mw8.3 earthquake from GPS and InSAR data  
*Earth and Planetary Science Letters*, April 2017, [doi:10.1016/j.epsl.2017.04.010]
- Métois, M., C. Vigny, and A. Socquet (2016),  
Interseismic coupling, megathrust earthquakes and seismic swarms along the Chilean subduction zone (38–18° S),  
*Pure and Applied Geophysics*, 173(5), 1431–1449, [doi:10.1007/s00024\_016\_1280\_5]
- Métois, M., C. Vigny, A. Socquet, A. Delorme, S. Morvan, I. Ortega, and C.-M. Valderas-Bermejo (2014),  
GPS-derived interseismic coupling on the subduction and seismic hazards in the Atacama region, Chile,  
*Geophysical Journal International*, 196(2), 644–655, doi:10.1093/gji/ggt418.
- Ruiz, S., M. Metois, A. Fuenzalida, J. Ruiz, F. Leyton, R. Grandin, C. Vigny, R. Madariaga and J. Campos (2014)  
Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique Mw 8.1 earthquake  
*Science*, 24 July, [doi:10.1126/science.1256074], 2014.
- Metois, M., A. Socquet, C. Vigny, D. Carrizo, S. Peyrat, A. Delorme, E. Maureira, M.-C. Valderas-Bermejo and I. Ortega (2013)  
Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling  
*Geophysical Journal International*, [doi:10.1093/gji/ggt183], 2013.
- Métois, M., A. Socquet and C. Vigny (2012)  
Interseismic coupling, segmentation and mechanical behavior of the central Chile subduction zone  
*Journal of Geophysical Research*, VOL. 117, B03406, [doi:10.1029/2011JB008736], 2012.
- Vigny, C., A. Socquet, S. Peyrat et al. (2011)  
The 2010 Mw 8.8 Maule Mega-Thrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS  
*Science*, 332, 17 June 2011, pp 1417-1421 [DOI:10.1126/science.1204132], 2011
- Vigny, C., A. Rudloff, J.C. Ruegg, R. Madariaga, J. Campos, M. Alvarez (2009)  
Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo gap, Chile  
*Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol 175, issue 1-2, June, 10.1016/j.pepi.2008.02.013, 2009
- Ruegg, J.C., A. Rudloff, C. Vigny, R. Madariaga, J.B. DeChabaliere, J. Campos, E. Kausel, S. Barrientos, D. Dimitrov (2009)  
Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitucion and Concepcion in Chile  
*Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol 175, issue 1-2, June, 10.1016/j.pepi.2008.02.015, 2009.

## Références bibliographiques additionnelles

- Beroza, G. C., and S. Ide (2011), Slow earthquakes and nonvolcanic tremor, *Annual review of Earth and planetary sciences*, 39, 271–296.
- Frank, W. B. (2016). Slow slip hidden in the noise: the intermittence of tectonic release. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1002/2016GL069537.
- Frank, W. B., B. Rousset, C. Lasserre, and M. Campillo (2018). Revealing the cluster of slow transients behind a large slow slip event. *Science Advances*, doi: 10.1126/sciadv.aat0661
- Frank, W. B., N. M. Shapiro, V. Kostoglodov, A. L. Husker, M. Campillo, J. S. Payero, and G. A. Prieto (2013), Low-frequency earthquakes in the mexican sweet spot, *Geophysical Research Letters*, 40(11), 2661–2666.
- Radiguet, M., Perfettini, H., Cotte, N., Gualandi, A., Valette, B., Kostoglodov, V., ... & Campillo, M. (2016). Triggering of the 2014 M w 7.3 Papanoa earthquake by a slow slip event in Guerrero, Mexico. *Nature Geoscience*, 9(11), 829.
- Socquet, A., Valdes, J. P., Jara, J., Cotton, F., Walpersdorf, A., Cotte, N., ... & Norabuena, E. (2017). An 8 month slow slip event triggers progressive nucleation of the 2014 Chile megathrust. *Geophysical Research Letters*, 44(9), 4046-4053
- Shelly, D. R., G. C. Beroza, and S. Ide (2007), Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, *Nature*, 446(7133), 305.

**2. Liste des contrats obtenus au cours des trois dernières années** dans le cadre d'une action spécifique INSU ou autre (une page par contrat)

**Titre du projet : ANR « MEGA-CHILE »**

**Action/année : - AAP Blanc SIMI 6 (n° 12-BS06-004) – 2013-2016**

**Crédits obtenus : 211 538 €**

**Résumé des principaux résultats** (20 lignes maximum) :

Depuis le séisme géant de Banda Aceh, Sumatra en 2004 (magnitude  $M_w > 9.1$ ), plusieurs événements équivalents (Maule, Chili, 2010,  $M_w$  8.8; Tohoku-Oki, Japon, 2011,  $M_w$  9) ont révélé le risque majeur, y compris de fort tsunami, posé par les grandes failles de subduction. Plus précisément, la catastrophe du Japon a mis en lumière la mauvaise compréhension des caractéristiques sismo-tectoniques et physiques de tels séismes, et donc, une évaluation très erronée du risque associé. Le projet Mega-Chile, basé comme point de départ sur l'étude géodésique, géologique et sismologique du séisme du Maule, 2010 au Chili, s'est attaché à mieux contraindre ces caractéristiques.

Les ruptures (nucléation, croissance, propagation, position du centroïde) des séismes de 2010, 2014 et 2015 ont été décrites sur la base de mesures géodésiques (GPS, Interférométrie radar), sismologiques, et leur modélisation (inversion conjointe sismo-géodésique et backprojection) contraignant un modèle de source sismique précis. Les nombreuses données géodésiques (GPS continu et de campagne) ont permis de calculer un modèle de couplage inter-sismique à l'échelle de toute la zone de subduction chilienne, et définir ainsi les zones qui se chargent efficacement. Le même type de données, sur la zone du séisme du Maule 2010, a été utilisé pour contraindre un modèle numérique de relaxation visco-élastique à l'échelle de la lithosphère et du continent sud-américain. La segmentation long-terme du méga-chevauchement de subduction et des failles majeures affectant la plaque supérieure a aussi été abordée par une approche géomorphologique et géologique. Grâce à la paléosismologie en tranchée et à des datations  $^{14}C$  et OSL, deux paléo-séismes ( $M7$  à  $7.5$ ) ont été mis en évidence sur la Faille de San Ramón dans la ville de Santiago. Enfin, l'évolution plus long terme ( $\geq 10^6$  ans) du front actif et sismogène de la chaîne andine a été étudié par la cartographie géologique 3D et la thermochronologie basse température.

**Liste des publications :**

22 publications recensées, liste complète sur <http://megachile.blogspot.com/p/overview-of-megachile-project.html>

**Titre du projet : LIA « Montessus de Ballore »**

**Action/année : - DERC CNRS– 2007-2018**

**Crédits obtenus : 15 000 € / an**

**Résumé des principaux résultats (20 lignes maximum) :**

Le LIA a mis en place un processus d'échanges et d'interactions entre les laboratoires Français et Chiliens contribuant au LIA. C'est dans ce cadre que plusieurs missions de longue durée (4-5 mois) ont été effectuées par des chercheurs français au Chili, et que des étudiants chiliens en co-tutelle ont effectué des séjours en France. Toujours dans ce cadre, une série de cours (en géodésie) a été officiellement intégrée dans le cursus de l'Université du Chili au niveau master). Enfin une ouverture vers les sciences sociales a eu lieu dans le cadre des études menées par B. Soulé sur les crises de Puerto Aysen (2007) et Maule (2010). En continu, le LIA a conduit sa tâche essentielle : assurer le développement et la maintenance des réseaux d'observation (GPS, sismo, inclinométrie). Le LIA a assuré 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. Le CNRS a d'ailleurs signé un accord de coopération avec le GFZ qui dépasse largement le LIA mais qui a identifié la coopération franco-allemande au Chili sur les thèmes du LIA comme un axe fort.

Les rapports d'activité annuels du LIA (20 à 30 pages chaque) sont disponibles sur :

<http://www.geologie.ens.fr/~vigny/chili-f.html#DOCS>

## BUDGET

*Il s'agit d'expliciter ici les montants indiqués sur les tableaux du formulaire informatique sur l'application SIGAP et de la première page du dossier scientifique.*

**Le budget en ligne et le budget indiqué dans le dossier scientifique doivent être identiques. Dans le cas contraire, le budget inférieur sera pris en compte.**

*Outre les financements demandés à une action spécifique de l'INSU, expliciter également les co-financements relatifs au projet accordés (ou demandé) par ailleurs au niveau national (autres programmes nationaux, demandes d'équipements, demandes de campagne en mer, soutien interne d'organisme ou de laboratoires, heures de calcul sur un grand centre...), européen et extra européen.*

### 1. Equipement :

- Néant -

### 2. Fonctionnement (Pour toute demande d'équipement au-delà de 5k€, un devis est exigé.) :

- Néant -

### 3. Missions : 10 800 €

Détail du budget de la première mission mesures sGPS - reconnaissance/installation cGPS : **7 050 €**

Poste	Coût	total
Billet Avion Paris – Santiago du Chili	1000 € /pers. X 2	2 000 €
Location camionnette pick-up 4x4	100€/jour x 20 (*)	2 000 €
Frais (IJ)	50€/jour/pers x 2 x 21	2 200 €
Essence	~5000 km = 500€	500 €
Carnet ATA récepteurs GPS	~350 €	350
Convoyage récepteurs GPS (bagage avion accompagnés, 15 récepteurs = 3 valises)	- coût nul -	
Batteries, régulateurs, chargeurs, panneaux solaires (tout disponible à l'U-Chile pour la campagne, au CSN pour le cGPS)	- coût nul -	

*(\*) 12 jours de mesure, 2 jours de voyage Santiago-Copiapo AR, 6 jours de reconnaissance/installation des nouveaux sites, soit 20 jours au total.*

Détail du budget de la deuxième mission maintenance cGPS : **2 250 €**

Poste	Coût	total
Billet Avion Paris – Santiago du Chili	1000 € /pers. X 1	1 000 €
Location voiture	100€/jour x 6 (*)	600 €
Frais (IJ)	50€/jour/pers x 1 x 8	400 €
Essence	~2500 km = 250€	250 €
Petit matériel	- coût nul -	

Détail du budget réunions de travail : **1 500 €**

Poste	Coût	total
Billet train AR Strasbourg-Paris	150 € /pers. X 3	450 €
Billet train AR Paris-Strasbourg	150 € /pers. X 3	450 €
Séjour 3 jour 1 parisien(ne) à Strasbourg	300 € x2	600 €

### 4. Analyses :

- Néant -

## VISA DU DIRECTEUR D'UNITE DU PORTEUR

*Page à imprimer (si nécessaire pour la signature) et joindre au dossier scientifique*

Je (*Christophe Vigny*), Directeur de « *Laboratoire de Géologie de l'ENS/UMR8538*», affirme que le projet « *COP2020-SlowSlipTrigger*» soumis par «*Christophe Vigny*» à l'AO TelluS, CT3 : Aléas, Risques et catastrophes telluriques, rentre dans les objectifs scientifiques de mon laboratoire.

Date, signature

Le 12/09/2018

