

IPOC

Integrated Plate Boundary Observatory in Chile

CNRS / INSU, DGF (Universidad de Chile), GFZ (Potsdam)

1. Contexte Scientifique

Les zones de subduction sont les régions du globe les plus exposées aux risques sismiques et aux tsunamis comme l'a douloureusement rappelé le séisme de Sumatra (Mw 9.2) du 26 décembre 2004. Le plus grand tremblement de terre jamais enregistré, le séisme de Valdivia du 22 mai 1960 de magnitude 9.5, a rompu sur plus de 1000 km la zone de subduction Sud Chili. Ce séisme provoqua un tsunami dont les effets destructeurs ont été ressentis dans tout le Pacifique. Comprendre et prévenir le risque sismique des grandes zones de subduction, sont un enjeu majeur des sciences de la Terre.

Le Chili est un laboratoire naturel unique pour l'instrumentation et l'étude des tremblements de terre de subduction et des tsunamis associés :

1. La zone de subduction du Chili est l'une des plus sismiques du globe, i.e. en moyenne un séisme de magnitude supérieure ou égale à 8 tous les 10 ans (Figure 1).
2. Le taux de déformation important, 8 cm/an de convergence relative entre les plaques Nazca et Amérique du Sud, produit des déformations significatives qui peuvent être mesurée aujourd'hui par la géodésie (GPS et interférométrie radar) durant toutes les phases du cycle sismique.
3. La zone sismogène est directement située au Chili sous le continent ou à proximité des côtes, facilitant ainsi le déploiement de réseau permanent d'observation.
4. Le climat semi-désertique des régions Nord et Centre Chili est particulièrement propice à l'exploitation des techniques spatiales d'interférométrie radar.

Comparée à d'autres zones de subduction, le Chili offre un accès direct à la zone de préparation des tremblements de terre, une situation exceptionnelle pour l'instrumentation sismologique et géodésique, les études de paléo-sismicité et la constitution à terme d'un Observatoire de Frontière des Plaques.

Sur les traces de Montessus de Ballore, les équipes françaises ont, avec le soutien du CNRS/INSU et du Ministère des Affaires Etrangères en France et de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) au Chili, une longue histoire de collaboration scientifique avec les équipes chiliennes des Départements de Géophysique (DGF) et de Géologie de l'Universidad de Chile de Santiago.

Trois lacunes sismiques majeures, proches de la rupture, ont ainsi été identifiées dont deux n'ont enregistré aucun séisme majeur depuis le XIX^{ème} siècle et sont la cible des efforts franco-chiliens : la région Nord, entre Antofagasta et Arica (18°S-27°S) avec la lacune de Tarapacá, et la région Centre, entre La Serena et Concepción (30°S-37°S), avec les lacunes sismiques de Coquimbo et de Constitución-Concepción, incluant la région métropolitaine de Santiago (Figure 2).

Le Chili a également une longue histoire de tsunamis. La prise en compte du risque associé aux tsunamis est critique pour des installations portuaires d'importance économique majeure le long de la côte du Chili. En dehors des tsunamis associés aux grands séismes de subduction, i.e. Valdivia (1960) et Arequipa (2001), le risque associé à des séismes superficiels de moindre magnitude, mais de rupture anormalement lente, doit être pris en compte.

Un programme de recherche d'une nouvelle ampleur, soutenu par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) et coordonné par l'ENS et l'IPGP, a été mis en place pour étudier et capturer la genèse d'un grand séisme de subduction dans l'une de ces lacunes.

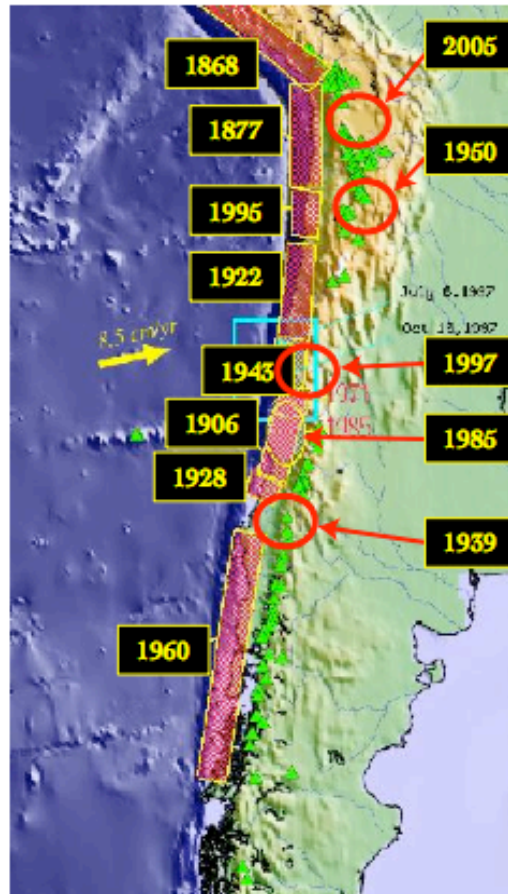


Figure 1. Derniers grands séismes historiques le long de la zone de subduction chilienne. Les zones violettes matérialisent les zones de ruptures des grands séismes de subduction. Les zones cerclées de rouge sont des événements intraplaques.

La structuration des collaborations scientifiques franco-chiliennes a donné lieu à la création d'un Laboratoire International Associé (LIA) Montessus de Ballore, officialisée à Santiago en Novembre 2006. Le LIA a pour but de coordonner les efforts sur deux régions cibles, qui ont fait l'objet d'un effort continu d'instrumentation par les équipes franco-chiliennes:

1. La région Nord-Chili (18° - 27° S), avec la lacune de Tarapacá ;
2. La région Central-Chili (30° - 37° S), avec les lacunes de Coquimbo au Nord et de Constitución-Concepción au Sud, et entre les deux, la région métropolitaine.

Le Laboratoire International Associé « Montessus de Ballore », intégrant sismologie, géodésie et tectonique, doit permettre aux équipes franco-chiliennes de répondre aux enjeux scientifiques et instrumentaux associés au risque sismique des grandes zones de subduction. Il contribue à renforcer et à pérenniser les liens privilégiés entre la France et le Chili en matière de formation d'étudiants et de jeunes chercheurs. C'est aujourd'hui un enjeu stratégique à l'heure où de grands programmes nord-américains et japonais sur les grandes zones de subduction se mettent en place.

Dans le même temps, une collaboration ambitieuse entre le GeoForschungsZentrum (GFZ Potsdam, Allemagne) et le CNRS/INSU, officialisée par la signature d'un MOU, a permis l'installation d'un réseau permanent de stations large-bande et GPS télémétrées au Nord Chili.

Un synoptique des efforts associant le CNRS/INSU, l'Université du Chili et le GFZ au Nord Chili est brièvement présenté dans ce document.

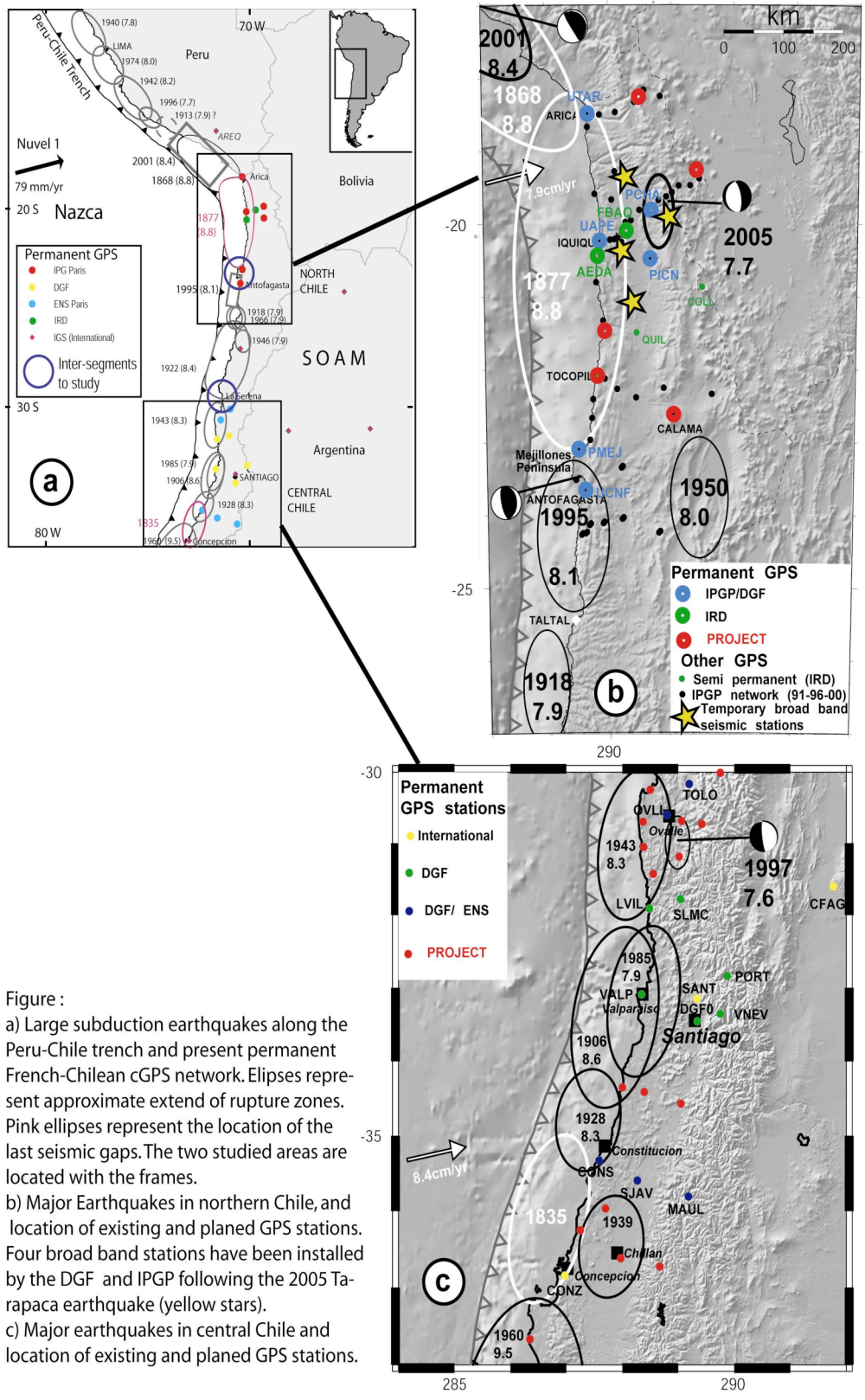


Figure 2. a) Grands séismes le long de la zone de fosse Pérou-Chili, les ellipses représentent approximativement les zones de rupture. Réseau permanent franco-chilien de GPS continus : b) dans la région nord Chili ; c) dans la région du Chili central.

2. Contexte géodynamique du Nord Chili

La région Nord Chili (18°S-27°), entre Antofagasta et Arica, définit la lacune de Tarapacá qui n'a pas enregistré de grand tremblement de terre de subduction depuis 1877. Ce segment est aujourd'hui chargé à ses deux extrémités depuis les séismes d'Antofagasta (Mw=8.1, 1995) au Sud (Ruegg et al., 1996) et d'Arequipa (Mw=8.4, 2001) au Nord. La lacune de Tarapacá est identifiée comme une région à haut risque sismique depuis les années 70. Un risque qui a été renforcé récemment par le séisme intraplaques de Tarapacá (13 juin 2005, Mw=7.7), localisé à 105 km sous le réseau GPS permanent des équipes franco-chilienne. Ce type d'événement est considéré par certains sismologues comme précurseur possible d'un grand tremblement de terre de subduction. Cette région a également une longue histoire de tsunamis qui représentent un risque important en raison des installations portuaires et industrielles (Antofagasta, Iquique et Arica) en plein développement.

La détection des déformations pré-, co- et post-sismiques des séismes d'Antofagasta (juillet 1995) et d'Arequipa (Pérou, janvier 2001) sont les premiers fruits de l'installation d'un réseau GPS franco-chilien au Nord Chili. A la suite du séisme de Tarapacá (2005) dans la lacune du Nord Chili, localisé sous le réseau GPS permanent installé par l'IPGP et le DGF, le déploiement d'un réseau sismologique temporaire, lors d'une rapide intervention post-sismique coordonnée entre l'IPGP et le Departamento de Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile, a permis pour la première fois de contraindre le mécanisme de ce séisme intraplaques et d'enregistrer une activité post-sismique soutenue.

Les enjeux scientifiques identifiés au Nord Chili:

- l'observation et l'analyse la sismicité, et de ses variations spatio-temporelles, en relation avec les structures et la genèse des grands tremblements de terre de subduction;
- l'étude des tremblements de terre intraplaques, en relation avec le cycle sismique et l'évolution pétrophysiques des zones de subduction afin d'améliorer leur compréhension en termes de processus de rupture et de risque sismique;
- la détection et la compréhension du rôle et de l'origine du couplage sismique/asismique lors du cycle sismique (trémors et transitoires de déformation) ainsi que de leurs implications en termes de genèse et de prédiction des grands tremblements de terre de subduction ;
- la détection et l'analyse des tremblements de terre tsunamigéniques (caractérisation des sources), en vue de l'intégration d'outils sismologiques au sein de réseaux d'alerte de tsunamis;
- l'étude sismo-tectonique et la caractérisation des systèmes de failles actives en surface (potentiel sismique, relations avec l'appareil de subduction);
- l'étude géomorphologique du partitionnement de la déformation le long des segments majeurs de la subduction, ainsi que de la stabilité spatio-temporelle des aspérités/barrières, i.e. zones de terminaison et/ou de nucléation des grands tremblements de terre de subduction (presqu'île de Mejillones) ;
- l'étude des paléoséismes et des paléotsunamis le long de la zone de subduction chilienne, combinant observations à terre et en mer, par des méthodes géomorphologiques, sédimentologiques et géochronologiques;
- l'imagerie 3D de la lacune Nord Chili ;
- l'analyse des lois d'atténuation locales et régionales.

Sur le plan méthodologique, les équipes du CNRS/INSU, U. Chile et GFZ (Potsdam) entendent développer une stratégie combinant:

- réseaux permanents large bande, accélérométriques et géodésiques (cGPS, inclinométrie), en enregistrement continu et transmission en temps quasi-réel intégrés à des bases de données et des systèmes d'information opérationnels;

- réseaux temporaires courte-période et géodésique sur des régions cibles;
- observation satellitaire (interférométrie radar) bien adapté aux dimensions spatiales et aux conditions du Nord Chili;
- études géomorphologiques et tectoniques sur des zones cibles (Mejillones).

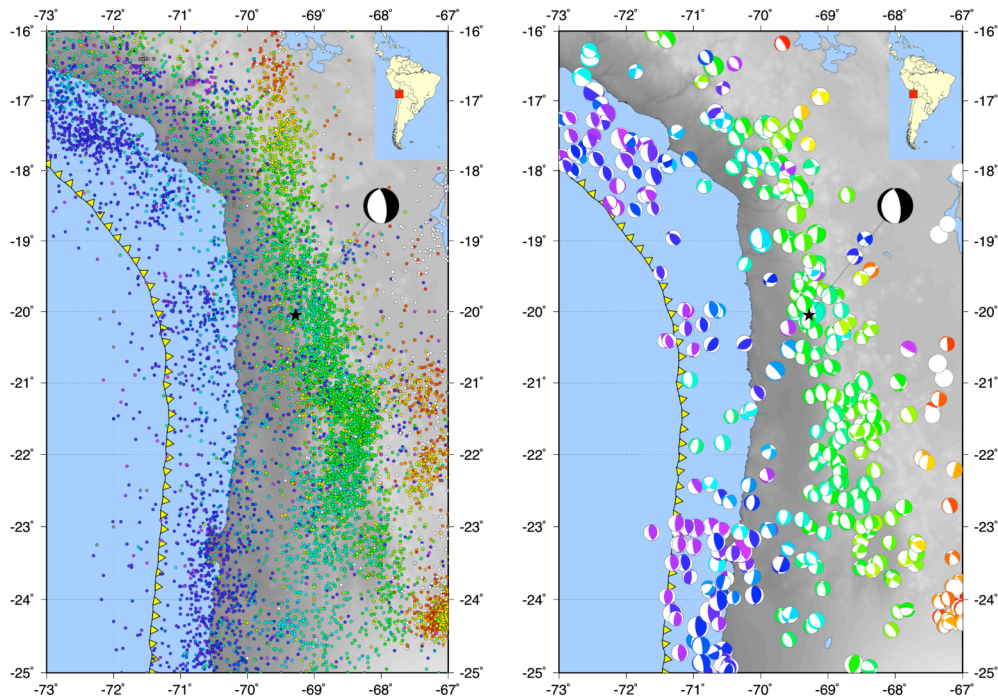


Figure 3. Sismicité entre 1970 et 2006 ($M > 4.5$) et mécanismes au foyer de la région nord du Chili.

Le Chili est une région de forte sismicité et les cartes de la Figure 3 montrent la sismicité entre 1970 et 2006 ($M > 4.5$) et les mécanismes au foyer de la région nord du Chili, ainsi que le dernier séisme qui a eu lieu en 2005 dans la région de Tarapaca. Dans ce contexte de subduction, plusieurs lacunes sismiques ont été identifiées.

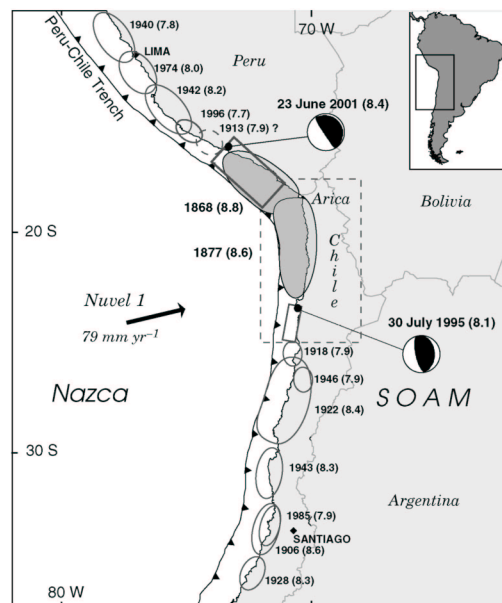


Figure 4. Zones de rupture des grands séismes et lacune du Nord-Chili (Chlieh, 2004)

La Figure 4 montrent les grands séismes ($M > 7.7$) le long de la subduction Nord-Chili. Les ellipses illustrent approximativement les régions présumées des ruptures. Dans la région entre Arica et Antofagasta, le dernier grand séisme a eu lieu en 1877 ($M_w=9$, 10 mai 1877) et il a produit un tsunami destructeur dans tout le Pacifique. Les parties nord et sud de ce segment ont rompu respectivement durant les séismes d'Arequipa ($M_w=8.3$, 23 juin 2001) et d'Antofagasta ($M_w=8.1$, 30 juillet 1995). Il n'y a donc pas eu de séisme majeur de subduction dans cette région depuis plus de 100 ans, cette lacune sismique est donc probablement sous forte contrainte tectonique. Le séisme de Tarapaca qui a eu lieu en 2005 au milieu de cette région et qui est de profondeur intermédiaire a pu aussi jouer un rôle majeur dans le transfert des contraintes durant le cycle sismique.

3. Ensemble du réseau IPOC (Integrated Plate Boundary Observatory)

Les équipes du CNRS/INSU (IPGP, Géosciences Azur, ENS) et du GFZ (Potsdam) ont installé un réseau permanent composé de 15 sites, dont 5 sites français. Les choix techniques et le mode d'opération de ce réseau est défini en commun entre le CNRS/INSU, le GFZ (Potsdam) et l'U. Chili.

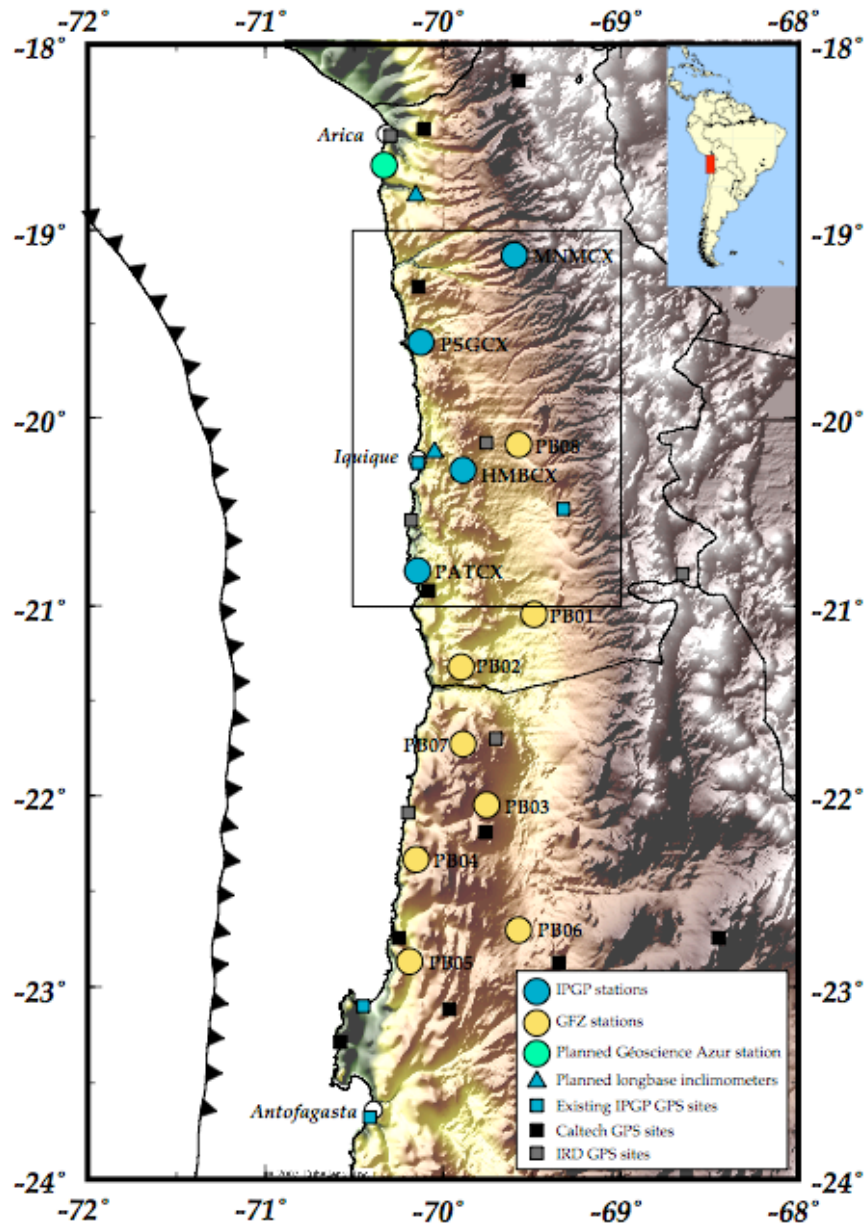


Figure 5. Réseau IPOC

Instrumentation sismologique

D'un point de vue instrumental, chacun de ces sites est au minimum équipé :

- d'une station large-bande STS2 ;
- d'une station accélérométrique 24 bits ;
- d'un numériseur de type Quanterra (Q330) en enregistrement continu

L'ensemble des capteurs est opéré en mode continu. Les 15 stations accélérométrique viennent ainsi compléter le réseau accélérométrique chilien (10 stations), opéré par l'U. Chili en mode de déclenchement.

Le GFZ et le CNRS/INSU ont décidé d'équiper au minimum 8 sites (4 sites français et 4 sites allemands) d'un système de transmission satellite en continu. Les données de ces 8 sites sont ainsi transmises par satellite sur Santiago et par réseau câblé sur Potsdam et Paris. La transmission est opérée via une connexion seed-link. Les données à l'arrivée sont stockées et archivées dans des bases de données opérées conjointement à l'IPGP et au GFZ. Les données sont accessibles à l'ensemble de la communauté.

Ce mode de transmission continu permet d'opérer une partie du réseau à distance, un aspect logistique important compte-tenu de la situation géographique.

Instrumentation Géodésique

Au niveau de l'instrumentation GPS, l'ensemble des sites opérés par le GFZ sont progressivement équipés d'un cGPS. Du côté français, 4 des 5 sites sont équipés d'un cGPS. Sur les sites équipés de transmission satellitaire, les données GPS seront transmises avec les données sismologiques.

Ce réseau vient compléter un réseau cGPS CNRS/INSU – IRD – DGF de 7 stations déjà installé dans la région, ainsi qu'un réseau de 8 stations cGPS installées par le groupe du Caltech (USA) avec lequel il existe aujourd'hui une coordination.

L'ensemble des données GPS sont intégrées dans une base de données commune à l'U. Chili.

Du côté français, l'instrumentation GPS est complétée par des inclinomètres de type pendule sur 2 sites, et d'ici l'été deux sites équipés d'inclinomètres longue-base doivent être installés.

4. Les sites français du Nord Chili

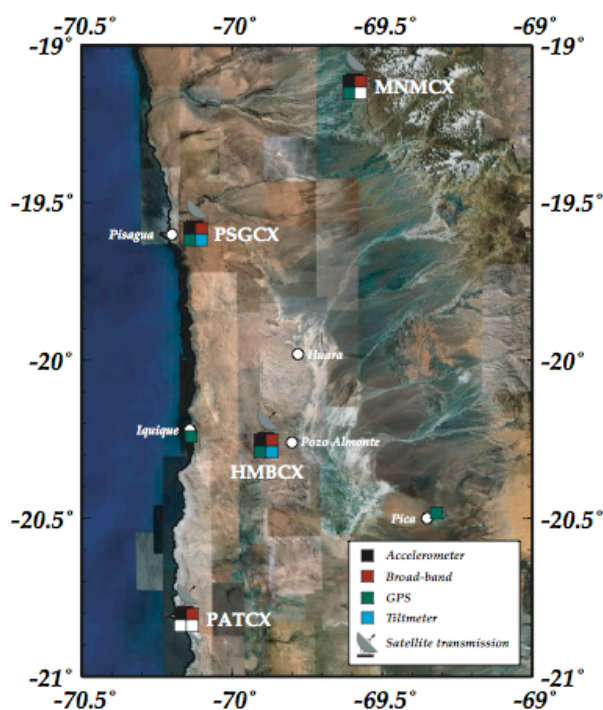


Figure 6. Carte des 4 sites français avec les différents instruments installés

5. Installation type d'un site

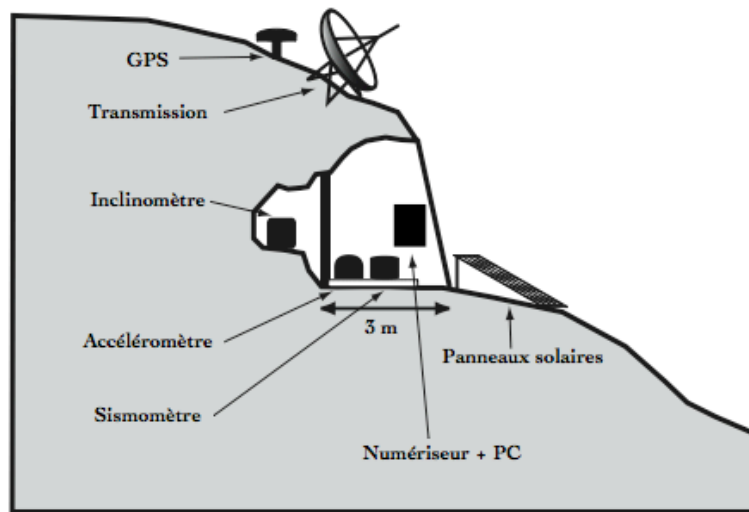


Figure 7. Schéma d'un site



Figure 8. Site de Miñimiñi (MNM CX)

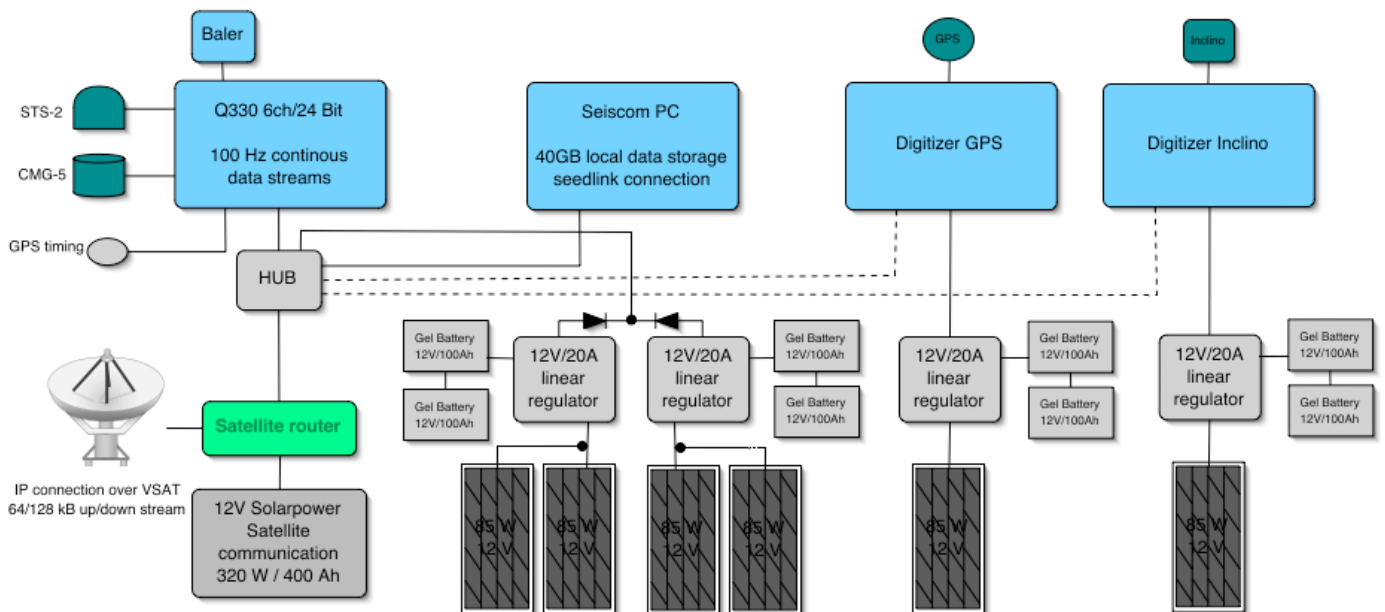
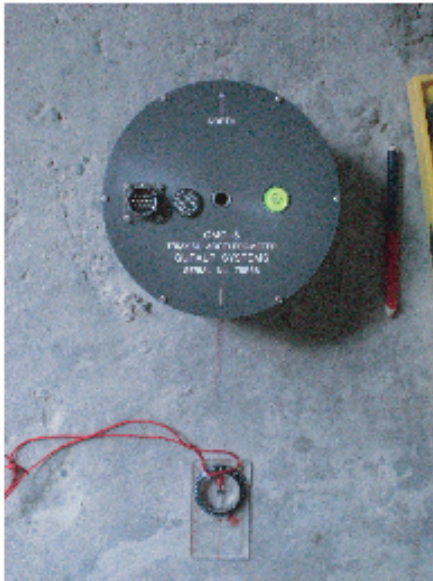


Figure 9. Schéma de l'installation (alimentation, acquisition, transmission)

6. Instrumentation multiparamètres

6.1 Capteurs

Accéléromètre
CMG-5T Guralp Systems

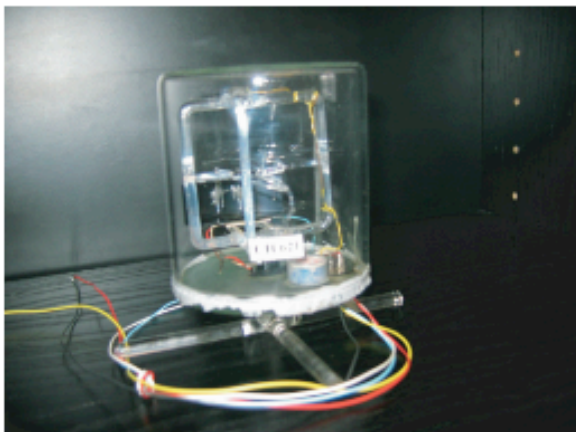


Sismomètre large-bande
STS-2 Kinemetrics



Antenne GPS
Topcon PGA1

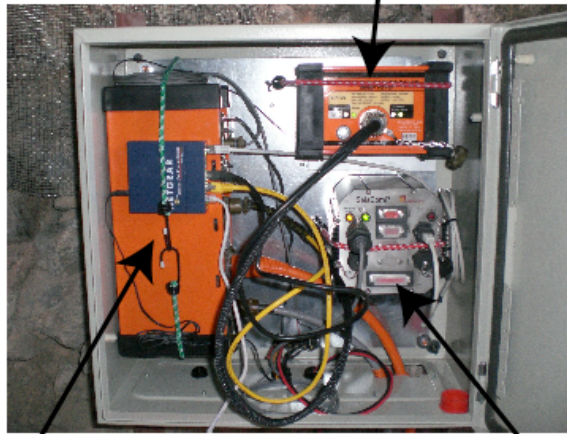
Inclinomètre pendulaire
en silice de Blum



6.2 Acquisition

Pour le sismomètre et l'accéléromètre :

Disque dur externe Baler 14F Kinematics

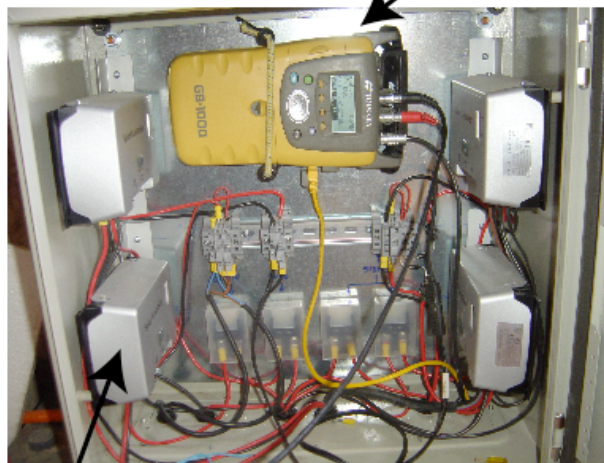


Numériseur Q330 Kinematics

SeiscomP PC

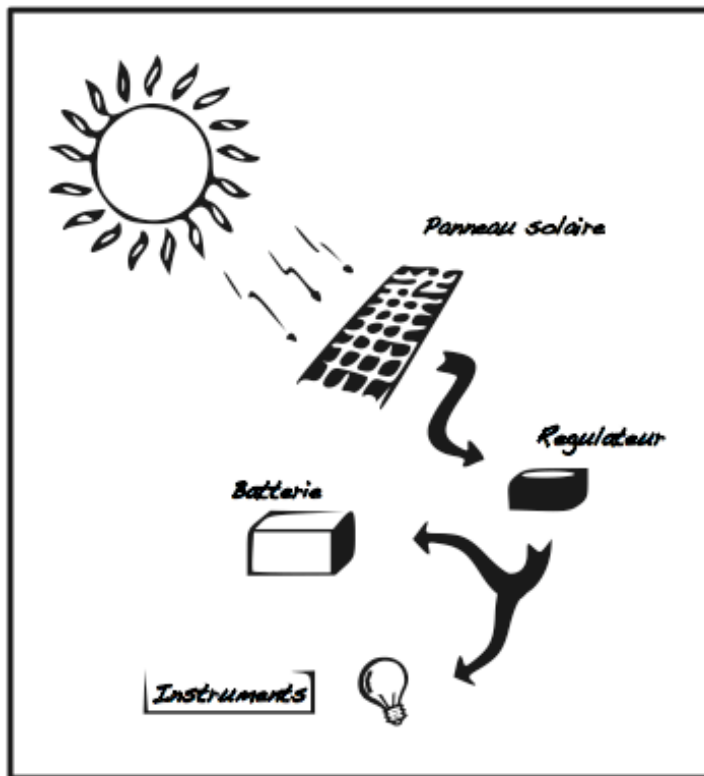
Pour le GPS :

Numériseur Topcon GB-1000



Régulateur de charge linéaire IVT

6.3 Alimentation



Panneaux solaires photovoltaïques
KS80T Solartec 80 W



Régulateurs de charge linéaire IVT

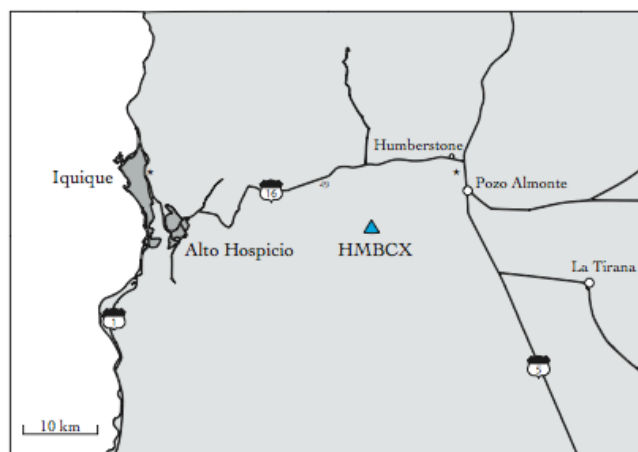


Batteries gel 100Ah



7. Les différents sites

7.1 Humberstone (HMBCX)



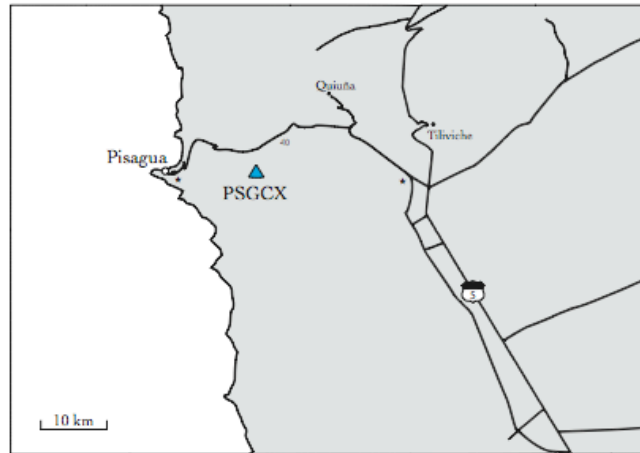
Longitude : -69.88791°
Latitude : -20.27822°
Élévation : 1152m

Accéléromètre (nov. 2006)
Sismomètre large bande (nov. 2006)
GPS (mars 2007)
Inclinomètre (nov. 2006)
Transmission satellite (prévue sept. 2007)





7.2 Pisagua (PSGCX)

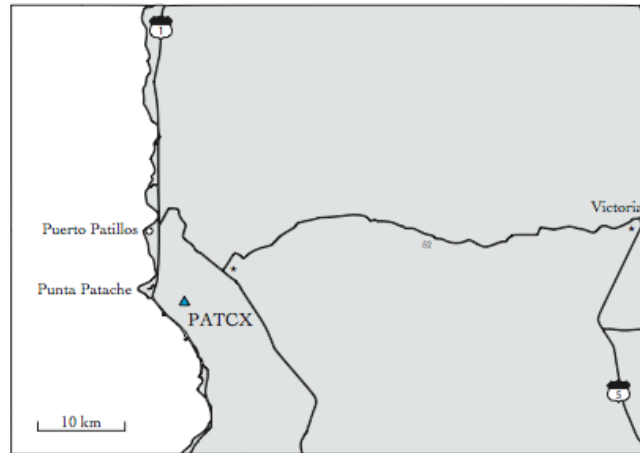


Longitude : -70.12305°
Latitude : -19.59717°
Élévation : 966 m

Accéléromètre (nov. 2006)
Sismomètre large bande (nov. 2006)
GPS (mars 2007)
Inclinomètre (nov. 2006)
Transmission satellite (prévue sept. 2007)



7.3 Punta Patache (PATCX)

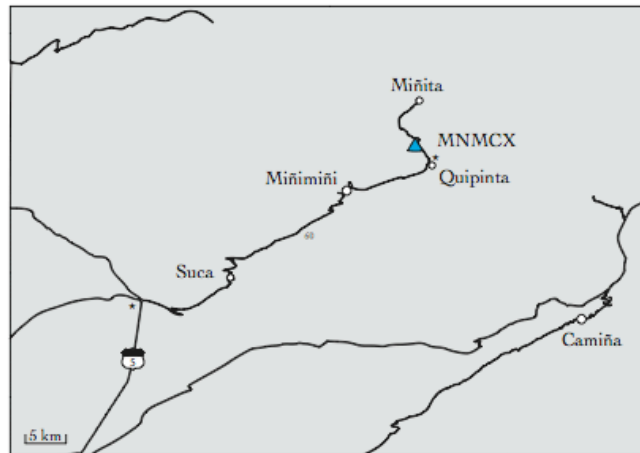


Longitude : -70.15288°
Latitude : -20.82071°
Élévation : 832m

Accéléromètre (nov. 2006)
Sismomètre large bande (nov. 2006)
Transmission satellite (prévue sept. 2007)



7.4 Miñimiñi (MNM CX)



Longitude : -69.59553°
Latitude : -19.13108°
Élévation : 2304 m

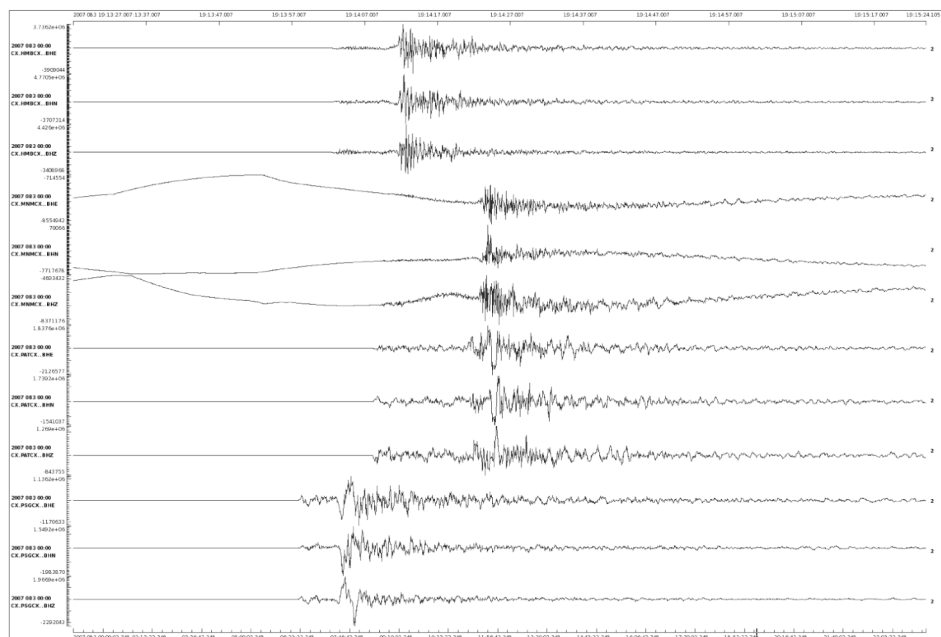
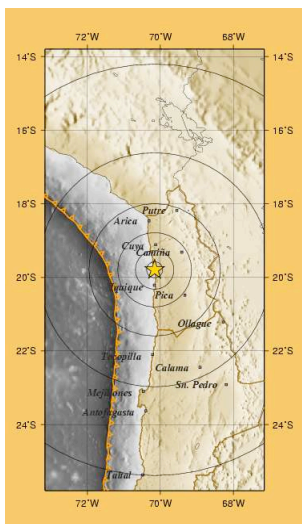
Accéléromètre (nov. 2006)
Sismomètre large bande (nov. 2006)
GPS (mars 2007)
Transmission satellite (prévu sept. 2007)





8. Premières données

Séisme du 24/3/2007 (19:13:47 UTC)
 Mw=5.7 (NEIC)
 Latitude -19° 47' 49" S
 Longitude -70° 9' 32" W
 Profondeur 28 km



Données large-bandes enregistrées aux 4 stations HMBCX, MNMCX, PATCX, PSGCX.
 Au moment du séisme, des contrôles et l'installation du GPS à la station MNMCX étaient en train d'être fait.