

Edito par René Crusem, Tony Monfret et Helle Pedersen

2014 sera une année charnière pour le projet RESIF. Plusieurs nouvelles infrastructures d'observation financées par RESIF seront mises en fonction cette année, ainsi qu'un nouveau site web et le portail de distribution des données sismologiques.

Outre l'installation d'une instrumentation géophysique permanente soigneusement répartie et de manière homogène sur tout le territoire métropolitain, et l'accès à une instrumentation mobile moderne, un des objectifs du projet RESIF est également de fournir en continu des données de qualité. La sismicité dans l'Hexagone pourra ainsi être mieux localisée et sa magnitude calculée de manière plus précise ce qui donnera lieu à des catalogues plus fiables et mieux adaptés aux études et estimations relatives à l'aléa sismique; de même, les systèmes d'alerte associés seront à même de mieux remplir leur fonction sociétale. Quelques-uns de ces points sont abordés dans ce numéro.

Nous tenons enfin à saluer la mémoire de Jean-François Stéphan. Jean-François Stephan a apporté un sou-

tien inconditionnel au projet RESIF dès ses débuts, tout d'abord dans ses fonctions au Ministère de la recherche puis comme Directeur de l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS.

ACTUALITÉS

Avril : - EGU General Assembly

Mars : - Board of Governmental Representatives de EPOS

- Conseil du GIS-RAP

- Réunion du Comité Directeur de RESIF

Février : - EPOS Working Group Workshop

- Assemblée générale RENAG et GPSMob

PORTRAIT (p. 8)

Michel Cara, Professeur Émérite, Université de Strasbourg

BULLETIN DE RÉFÉRENCE DE LA SISMICITÉ INSTRUMENTALE DE LA FRANCE MÉTROPOLITAINE AU BCSF-RÉNaSS

Par Sophie Lambotte, Marc Grunberg, Fabien Engels, Alain Hernandez et Rémi Dretzen

Les bulletins de sismicité sont les données indispensables à de nombreuses études, notamment d'évaluation de l'aléa sismique, de sismotectonique, ou encore de physique de la source. L'amélioration du suivi de la sismicité par la construction d'un bulletin de qualité est donc fondamentale. L'étude de la sismicité est effectuée au niveau régional par certains OSU (Observatoire des Sciences de l'Univers) avec des objectifs régionaux et d'études détaillées. Au niveau national, deux instances effectuent un suivi de la sismicité : le CEA-LDG (Laboratoire de Détection et de Géophysique du CEA) avec un objectif premier d'alerte en cas de séisme (*voir article de Y. Cansi*) et le BCSF-RéNaSS avec un objectif premier de construction du bulletin de référence exhaustif de la sismicité de la France métropolitaine intégrant l'ensemble des données et tirant ainsi avantage de la complémentarité des réseaux.

En 2013, une fusion des activités du BCSF (Bureau Central Sismologique Français) et du RéNaSS (Réseau National de Surveillance Sismique) – tous les deux pilotés par l'EOST, Strasbourg – a été initiée avec pour objectif d'améliorer la diffusion d'information sur la sismicité métropolitaine, en intégrant à la fois les données sur le séisme et les données de sévérité de la secousse. Cette nouvelle entité est dénommée BCSF-RéNaSS. Une cellule de veille "sismologique" a été mise en place pour répondre aux diverses sollicitations en cas d'évènement ressenti par la population.

Mise en œuvre opérationnelle de la détection et de la localisation de la sismicité

En mai 2013, le BCSF-RéNaSS a effectué la migration de son système de détection et de localisation automatique vers le logiciel Seiscomp3 (<https://www.seiscomp3.org/>) après 2 ans de tests intensifs. Ce dispositif intègre les données des stations opérées par différents OSU et organismes, comprenant des stations courte période (RéNaSS), des stations large bande (RESIF-RLBP et la station de fond de mer du projet ANTARES) et quelques stations accélérométriques (RESIF-RAP), ainsi que des stations des pays frontaliers (Angleterre, Belgique, Allemagne, Suisse, Espagne). A ce jour, les données temps-réel d'une centaine de stations, dont 70 françaises, sont utilisées.

Ce nouveau système fournit des localisations automatiques robustes (très peu de fausses détections) disponibles en temps réel sur le site du RéNaSS (<http://renass.unistra.fr>). Il a permis l'amélioration du suivi de la sismicité dans

la plupart des régions. En effet, une diminution du nombre de localisations avait été observée avec le système précédent sur la période 2006-2011, notamment liée au vieillissement du réseau RénaSS qui s'est traduit par la fermeture d'un certain nombre de sous-réseaux et de stations courte période, et à la difficulté d'ajouter de nouveaux flux de données.

Un travail manuel de localisation, intégrant une estimation de l'incertitude sur les pointés ainsi qu'un premier étiquetage des évènements non-tectoniques, est effectué quotidiennement en jours ouvrés par deux analystes. Ce travail de localisation permet également d'avoir un retour sur la qualité des données (en terme de temps et amplitude).

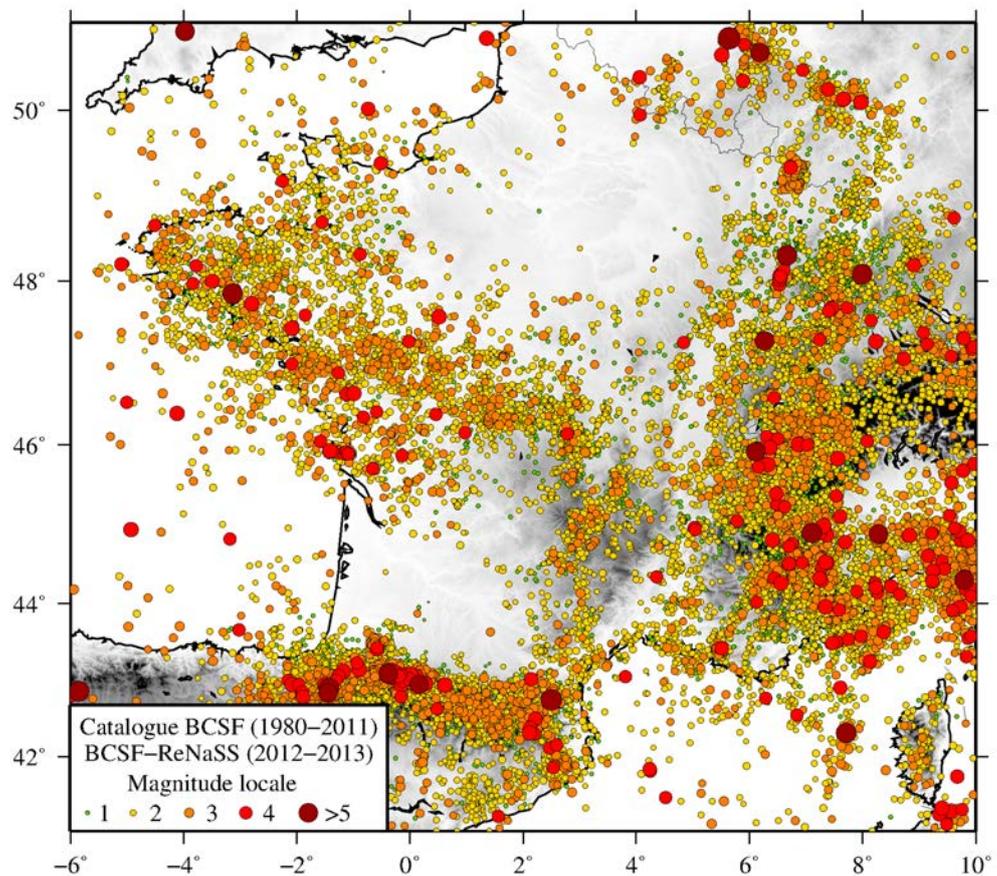
L'ensemble des localisations est intégré dans une base de données basée sur le QuakeMI (<https://quake.ethz.ch/quakeml>) - standard international. Cette base de données est multi-origines et permet d'intégrer un large panel de paramètres (incertitudes, type de l'évènement, mécanismes au foyer, etc). De plus, un webservice (ws-event, standard FDSN*) a été mis en place pour permettre la récupération des données paramétriques des séismes. La standardisation des formats et des procédures permet de faciliter leur utilisation, notamment par les agences internationales.

Bulletin de référence de la sismicité métropolitaine

Pour la période 1980-2011, le bulletin de référence de la sismicité de la France métropolitaine – appelé bulletin BCSF – a été construit à partir de la concaténation des données paramétriques du RéNaSS et du CEA-LDG, avec une procédure homogène sur l'ensemble du territoire. Ce bulletin, comprenant environ 50 000 évènements, a été converti en QuakeMI et intégré à la base de données. Il est disponible via le webservice.

Le bulletin a été complété et révisé dans le cadre du projet SI-Hex pour la période 1962-2009 (*voir article de M. Cara et al.*) à partir des données paramétriques du RéNaSS, du LDG, et des différents OSU/universités (Strasbourg, Grenoble, Nice, Toulouse, Nantes, Brest), ainsi que des données étrangères. La localisation de référence, lorsqu'elle existe, est celle issue des travaux régionaux. Un important travail d'estimation de magnitude de moment M_w et de discrimination a également été effectué. Le BCSF-RéNaSS va bénéficier de cette révision par son intégration à la base de données; la localisation de référence sur cette période sera celle issue du projet.

Figure 1 : Sismicité de la France métropolitaine sur la période 1980-2013 (catalogue BCSF sur la période 1980-2011 ; issu de la concaténation des données paramétriques du CEA-LDG et du BCSF-RéNaSS ; localisations BCSF-RéNaSS sur la période 2012-2013)



A partir de 2012, poursuivant la dynamique lancée avec le projet SI-Hex, le bulletin de référence de la sismicité de la France métropolitaine est un bulletin évolutif et multi-origines permettant de valoriser à la fois le travail fait au niveau national et celui fait au niveau régional par les OSU. Il intégrera une localisation obtenue avec une procédure homogène à partir des données disponibles (notamment BCSF-RéNaSS, CEA-LDG, données étrangères), ainsi que les localisations réalisées par les OSU (*voir article de M. Sylvander*). De plus, le travail d'estimation de magnitude de moment et de discrimination sera poursuivi.

Perspectives

A court terme, différentes actions vont être menées: il est prévu d'optimiser le dispositif en place par l'intégration de flux de données complémentaires pour améliorer la couverture du réseau dans certaines régions (notamment données accélérométriques du réseau RESIF-RAP et données étrangères); l'extension du réseau large bande RESIF-RLBP va également y participer, et ainsi permettre une diminution de la magnitude de complétude** dans la plupart des ré-

gions. Dans les évolutions à court-terme, il est également prévu de mettre en place un calcul de mécanismes au foyer par modélisation des formes d'onde pour les événements de magnitude supérieure à 3,5-4,0.

Auteurs :

Sophie Lambotte, EOST, Strasbourg
 Marc Grunberg, EOST, Strasbourg
 Fabien Engels, EOST, Strasbourg
 Alain Hernandez, EOST, Strasbourg
 Rémi Dretzen, EOST, Strasbourg

Contacts:

renass@unistra.fr, bcsf@unistra.fr
<http://renass.unistra.fr>, <http://www.franceseisme.fr>

* FDSN: Federation Digital Seismograph Networks

** Magnitude minimum à partir de laquelle tous les séismes sont enregistrés

ALERTE SISMIQUE SUR LE TERRITOIRE MÉTROPOLITAIN

Par Yves Cansi

Initiée à la fin des années cinquante dans un but de détection, la mise en place du réseau de sismographes du Laboratoire de détection et de géophysique (LDG) a débuté par l'installation de trois stations en Normandie. Trois autres ont rapidement suivi dans le Morvan. Ce réseau a évolué par la suite pour atteindre aujourd'hui plus de quarante stations réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain.

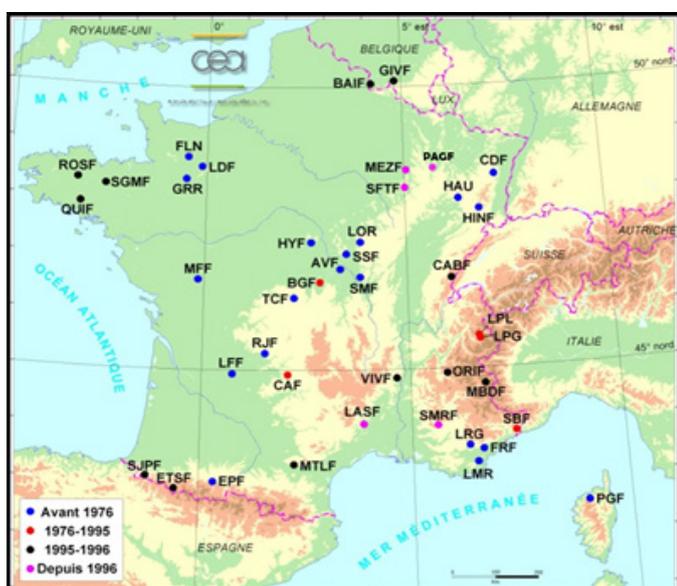


Figure 2: stations utilisées pour l'alerte sismologique en France métropolitaine

La Figure 2 montre l'évolution du réseau en fonction de la date d'installation des stations. Le réseau de base (points bleus) s'est constitué petit à petit de la fin des années 1950, jusqu'en 1976. Après une période sans beaucoup d'évolutions (cercles rouges), la couverture de la France a été améliorée, en 1995, par l'installation de stations en Bretagne, Ardennes, Pyrénées et, dans une certaine mesure, dans les Alpes (points noirs). La dernière évolution a eu lieu en 2001 avec, en particulier, l'installation de trois stations en Champagne (points mauves). Les données fournies par ces stations sont transmises en temps réel jusqu'au site de Bruyères-le-Châtel où elles sont centralisées, enregistrées et traitées. Depuis 2012, six de ces stations font partie du réseau RESIF-RLBP.

Les enregistrements de ces stations sismiques sont traités en temps réel pour les divers objectifs d'alerte rapide vers les autorités décrits ci-dessous, puis ensuite traités en différé de manière exhaustive pour l'élaboration du bulletin d'activité sismique de la métropole. L'un des principaux travaux dans l'analyse de la sismicité est de trier les événements artifi-

ciels (tirs de carrière, tirs en mer, autres événements anthropiques,...) qui représentent plus de 80% des événements enregistrés par rapport aux séismes naturels (4777 séismes proches détectés et localisés en 2013).

Le LDG assure l'alerte sismique vis-à-vis des autorités françaises. La zone couverte comprend une partie des pays voisins pour inclure tout événement qui pourrait être ressenti en France métropolitaine. Le niveau officiel d'alerte est une magnitude 4,0. Toutefois, en cas d'événement compris entre 3,5 et 4,0, un message d'avis de séisme est transmis au COGIC (Centre Opérationnel de Gestion Interministérielle des Crises) pour devancer toute demande venant des populations. Cela représente entre 20 et 60 événements par an (voir Figure 3).

De même, une procédure similaire, mais avec des niveaux d'alerte différents et modulés en fonction des régions d'intérêt, est appliquée pour le compte d'EDF à la surveillance des barrages installés dans les différentes régions françaises (métropolitaine et DOM-TOM).

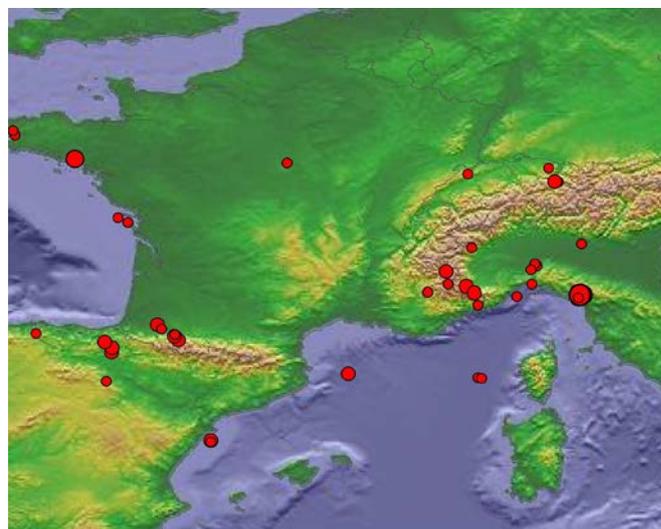


Figure 3: alertes sismiques en 2013 pour des événements de magnitude $M_I \geq 3,5$

Enfin, en utilisant principalement les stations installées en Champagne, le LDG assure un suivi au plus bas niveau de magnitude de l'activité dans la région du site de stockage de l'Andra. Pour ce faire, des traitements spécifiques destinés à obtenir des localisations précises et une identification claire du type d'événement (naturel ou artificiel) ont été élaborés.

Auteur :

Yves Cansi, CEA-LDG , Bruyères-le-Châtel

LE CENALT: LE CENTRE D'ALERTE AUX TSUNAMIS POUR LA MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE ET L'ATLANTIQUE NORD-EST

Par François Schindelé et Pascal Roudil

En partenariat avec le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) et le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS-INSU), le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) a été chargé en 2009 par les ministères de l'intérieur et du développement durable de créer et d'exploiter à l'horizon 2012, un système d'alerte pour surveiller la Méditerranée occidentale et l'Atlantique nord-est.

Le CENALT est situé à Bruyères-le-Châtel et est géré par les équipes du CEA. Exploité par des spécialistes en analyse de données géophysiques, il fonctionne 24h/24 et 7j/7. Opérationnel depuis le 1er juillet 2012, il a pour missions :

- ◇ l'alerte, en moins de 15 minutes, des autorités nationales en charge de la protection de la population en cas de séisme susceptible de générer un tsunami dans la zone couvrant l'Atlantique nord-est et la Méditerranée occidentale;

- ◇ l'avertissement des autorités des pays de la région. Dans chacun des pays concernés, la mise à l'abri de la population est ensuite organisée par les autorités de sécurité civile ou de protection civile.

La France a implanté le CENALT dans le cadre des systèmes d'alerte aux tsunamis coordonnés par l'Unesco.

Un réseau de stations sismiques et marégraphiques

Le CENALT reçoit les données en temps réel en provenance de deux types de réseaux de mesures, tous deux nécessaires à la détection de la formation des tsunamis :

- ◇ les stations sismiques, qui enregistrent les ondes sismiques, à partir desquelles sont déterminées la localisation des épicentres, les magnitudes et les autres caractéristiques des séismes;

- ◇ les stations de mesure du niveau de la mer, qui enregistrent les variations de hauteur d'eau lors du passage des vagues du tsunami le long des côtes (au moyen de marégraphes).

Les stations sismiques françaises font partie des réseaux CEA et RESIF-RLBP. De nombreuses collaborations ont été mises en place avec les pays bordant la Méditerranée occidentale et l'Atlantique nord-est, afin d'assurer la mise à disposition en temps réel des données sismiques et marégraphiques via des moyens privés et sécurisés. Des moyens de traitement spécifiques des données sismiques et marégraphiques ont été conçus et implantés au CENALT afin de :

- ◇ détecter et caractériser tout événement sismique susceptible de générer un tsunami dans la Méditerranée occidentale et l'Atlantique nord-est

- ◇ évaluer les heures d'arrivée du tsunami à partir des paramètres du séisme

- ◇ mesurer les caractéristiques du tsunami, en particulier l'heure d'arrivée de la première vague et l'amplitude des différentes vagues.

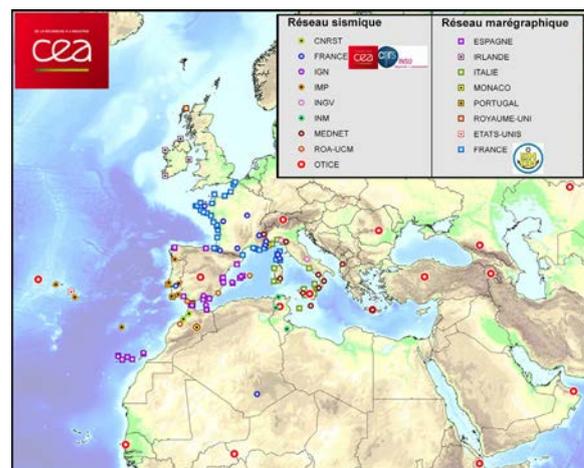


Figure 4: réseaux sismiques et marégraphiques intervenants dans le cadre du CENALT

Des moyens de traitement et dissémination des messages

Les outils logiciels du CENALT permettent de fournir les caractéristiques du séisme et du tsunami dans les délais imposés. Les messages sont transmis aux autorités françaises (Centre de gestion interministérielle des crises – COGIC) et aux points focaux tsunami des pays de la région via un produit logiciel spécifiquement conçu pour émettre par différents modes (email, fax, système mondial de télécommunication). Le COGIC prévient les autorités régionales et locales.

Deux niveaux d'alerte ont été définis en fonction de la magnitude du séisme et d'autres paramètres :

- niveau orange : évacuation du bord de mer, des plages, rivages, ports, routes côtières à moins de 3 m d'altitude, interdiction de baignade et de transbordement de passagers ;
- niveau rouge : niveau orange plus évacuation verticale rapide (sur des points hauts, dans les collines, dans des immeubles en béton), ou loin à l'intérieur des terres, hors et loin des estuaires.

Auteurs :

François Schindelé, CEA-LDG, Bruyères-le-Châtel
Pascal Roudil, CEA-LDG, Bruyères-le-Châtel

Contacts : cenalt@cea.fr, <http://www.info-tsunami.fr>



SI-HEX UN NOUVEAU CATALOGUE DE SISMICITÉ EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

Par Michel Cara, Yves Cansi et Antoine Schlupp

Le projet SI-Hex de "Sismicité Instrumentale de l'Hexagone" a eu pour objet de créer un catalogue unifié de la sismicité de la France métropolitaine sur la période 1962-2009. Pourquoi 1962-2009 ? 1962 est l'année où le CEA a implanté le premier réseau sismique permanent sur le territoire métropolitain. 2009 est l'année où le Ministère en charge de l'Environnement a financé le projet. Le catalogue SI-Hex résulte d'un effort collectif qui associe sept unités de recherche CNRS-Université (Strasbourg, Grenoble, Nice, Toulouse, Nantes, Brest et Clermont-Ferrand), et le LDG du CEA-DAM (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives – Direction des Applications Militaires).

Trois questions ont été examinées avec un soin particulier lors du projet: localisation précise des épicentres, discrimination entre séismes naturels et séismes artificiels, et enfin reprise complète du problème des magnitudes.

Localisation

La "trame de fond" du catalogue SI-Hex résulte de l'application d'une méthodologie de localisation homogène sur tout le territoire métropolitain et toute la période 1962-2009. La méthode utilise le modèle 1D de vitesses sismiques de Haslach simplifié utilisé par le BCSF-RéNaSS à l'EOST. Ce catalogue, placé en trame de fond, sert d'identifiant des séismes supposés d'origine naturelle et résultant de la fusion d'observations de temps d'arrivées portant sur l'ensemble des réseaux sismiques français (LDG, RéNaSS, Sismalp, OMP, OCA), avec l'apport de stations étrangères grâce à la contribution du Centre Sismologique Euro-Méditerranéen (CSEM). Ce catalogue couvre la France métropolitaine et la zone marine d'intérêt économique français, complétées par une bande large de 20 km hors frontières. Une fois la liste des événements identifiés dans ce premier catalogue, les solutions de localisation hypocentrales ont été remplacées par les hypocentres préférentiels localisés par Isterre (Sismalp) et OCA dans les Alpes, par l'OMP dans les Pyrénées, et par quelques solutions précises effectuées au LDG dans différentes régions. Le catalogue SI-Hex présente ainsi les solutions les plus précises possibles pour chaque événement identifié par le processus de fusion de données. En dehors des quelques séismes anciens relocalisés au LDG, les solutions préférentielles ne concernent

que la partie récente du catalogue, postérieure à 1989 dans les Alpes, 1997 dans les Pyrénées, et 2000 dans la zone Méditerranéenne. La même procédure sera appliquée à la région nord-est à partir du catalogue régional EOST à la première révision du catalogue SI-Hex.

Magnitude

La magnitude retenue pour le projet SI-Hex est la magnitude de moment, notée Mw. C'est le standard international actuel pour les études d'aléa sismique. Mw se substitue à la magnitude locale de Richter (ML) et à ses nombreuses variantes. Basée sur une analyse à basse fréquence des signaux sismiques, Mw peut différer notablement de ML qui traduit les amplitudes maximales des ondes sismiques enregistrées sur des réseaux de stations le plus souvent équipés de vélocimètres 1 Hz. Les magnitudes Mw issues du projet SI-Hex sont généralement plus faibles que les ML calculées par le LDG depuis 1962, du RéNaSS depuis 1980, ou des réseaux Sismalp et OMP sur les périodes plus récentes. Les Mw des plus gros séismes du catalogue SI-Hex sont calculées à partir des mêmes signaux que ceux ayant servi à déterminer ML au LDG mais en utilisant une technique différente. Après l'arrivée principale des ondes P et S, les sismogrammes présentent une "coda" résultant de la diffusion multiple des ondes sismiques dans la croûte et dont l'amplitude va en décroissant avec le temps. Cette coda a des propriétés de stabilité remarquables d'un séisme à un autre et d'une station sismique à une autre. Elle est peu sensible à la distance de l'épicentre, peu sensible à l'orientation et à la nature de la faille sismique à l'origine du séisme et enfin, peu sensible à la profondeur du foyer. L'autre très grand intérêt de la coda est que son amplitude est mesurable sur les anciens enregistrements sur papier des réseaux de surveillance sismique. Cette technique mise au point dans le cadre d'une thèse du projet SIGMA-EDF a été utilisée systématiquement pour attribuer une magnitude Mw aux séismes de magnitude ML-LDG supérieure à 4. Pour les plus petites magnitudes des lois de conversions entre ML et Mw ont été utilisées.

Discrimination

La discrimination entre événements naturels et arti-

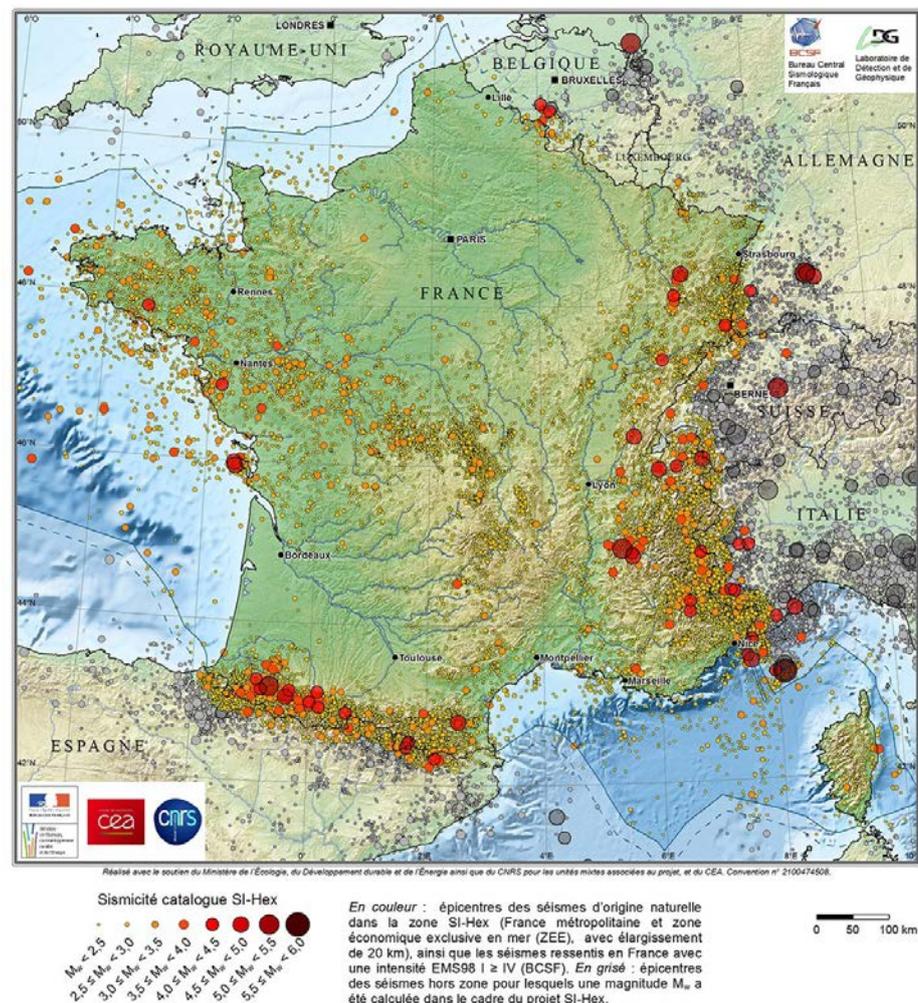
fficiels a constitué une autre action centrale du projet SI-Hex et s'est appuyée sur une approche multicritères. A terre, les tirs de carrières ont été éliminés dans la mesure du possible à partir d'une analyse spatio-temporelle du catalogue, notamment à partir d'une liste de carrières potentiellement susceptible de générer des ondes sismiques. Les évènements miniers ont été éliminés à partir de la connaissance des zones d'activités par les observatoires régionaux. Enfin, une analyse systématique de signaux par analyse spectrale a permis d'identifier un nombre important d'explosions marines dans l'Atlantique et la Méditerranée. La qualité de la discrimination est évidemment bien meilleure sur la partie récente du catalogue que sur la partie ancienne, si bien qu'il reste de toute évidence des évènements d'origine artificielle dans le catalogue SI-Hex. Avec de nouvelles magnitudes, des localisations plus précises et une discrimination permettant de nettoyer le catalogue des évènements sismiques d'origine artificielle, le catalogue SI-Hex contient plus de 30 000 séismes dont

les épicentres sont localisés sur le territoire métropolitain et la zone marine d'intérêt économique française ou leur voisinage immédiat. Ce catalogue devrait contribuer à faciliter les recherches sur l'aléa et le risque sismique en France métropolitaine et servira de base au calage des magnitudes des séismes historiques. Co-propriété du CNRS et du CEA, le catalogue SI-Hex 2013 a été conçu dans le cadre de convention avec le Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) et EDF. Il a été mis en ligne en janvier 2014 sur le site <http://www.franceseisme.fr> du BCSF-Ré-NaSS. Ce catalogue doit être régulièrement mis à jour et intégrer les résultats de nouveaux travaux et les évènements sismiques postérieurs à 2009.

Auteurs :

Michel Cara, EOST, Strasbourg
Yves Cansi, CEA-LDG, Bruyères-le-Châtel
Antoine Schlupp, EOST, Strasbourg

Figure 5: sismicité instrumentale de l'Hexagone entre 1962 et 2009 obtenue à partir du projet SI-Hex



L'OBSERVATION DES SÉISMES DANS LES PYRÉNÉES

Par Matthieu Sylvander

Historique

L'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) opère un réseau sismologique sur le versant français des Pyrénées depuis la fin des années 1980. Dix ans auparavant, l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) avait déployé un dispositif de taille très limitée centré sur le village d'Arette (Pyrénées-Atlantiques), siège d'un séisme destructeur en 1967. Ces deux réseaux ont fusionné à la fin des années 1990, pour former le Réseau de Surveillance Sismique des Pyrénées (RéNaSS-RSSP), homogène à la fois en termes d'instrumentation (vélocimètres courte-période à trois composantes) et de distribution géographique.

Le RSSP est actuellement engagé dans une nouvelle phase d'évolution, motivée au départ par l'émergence du projet franco-espagnol SISPy (http://www.sispyr.eu). Voué à mettre en place un système d'observation transfrontalier efficace, ce projet a permis à l'OMP d'installer 10 stations équipées de capteurs large-bande et de transmissions en temps-réel entre 2009 et 2012. Aujourd'hui, c'est dans le cadre de RESIF-RLBP que l'OMP s'est attelé à faire évoluer l'ensemble de ses stations vers le même standard. En 2018,

il sera responsable opérationnel RESIF d'une quarantaine de stations couvrant l'ensemble du sud-ouest de la France.

Coopération transfrontalière

Les Pyrénées étant également une frontière nationale, l'observation sismologique y nécessite des échanges permanents avec les organismes espagnols. Depuis le début des opérations menées par l'OMP, des échanges de données se sont mis en place avec l'Institut Cartographique et Géologique de Catalogne (ICGC – formes d'ondes et pointés) et l'IGN espagnol (pointés), ainsi qu'avec le CEA-LDG (pointés). Un bulletin commun France/Catalogne a été édité pendant une dizaine d'années, puis interrompu à la suite de changements technologiques de part et d'autre. Depuis 1997, l'OMP concrétise son observation sous la forme d'un catalogue, incrémenté sur une base trimestrielle, rassemblant l'ensemble des pointés disponibles. Ce bulletin inclut depuis 2012 des pointés de certaines stations accélérométriques du réseau RESIF-RAP. Au total, une soixantaine de stations (vélocimétriques et accélérométriques, France et Espagne) contribuent à ce catalogue régional qui compte 1600 tremblements de terre pour la période 1997-2012 (voir Figure première page).

Auteur:

Matthieu Sylvander, IRAP-OMP, Toulouse

Portrait

Michel Cara a dirigé avec Yves Cansi et Antoine Schlupp le projet SI-Hex de 2009 à 2013. Sismologue de formation, il a travaillé longtemps dans le domaine de l'analyse et de la modélisation des ondes de surface avant de se consacrer plus pleinement à l'étude de la sismicité et de la macrosismicité en France, notamment en tant que responsable du BCSF de 1997 à 2007. Enseignant à l'école d'ingénieurs de l'EOST, son travail de recherche principal a concerné la modélisation d'ondes de surface multimodes en vue de les appliquer à la tomographie. Il a eu d'importantes responsabilités collectives à l'Université et au CNRS de 1992 à 2007, date à laquelle s'est terminé son deuxième mandat de directeur de l'EOST. Il est maintenant professeur émérite à l'Université de Strasbourg.



Équipe de rédaction : Pascale DAYNES (ISTERRE), Lydie GUILLEROT (CNRS-INSU), Tony MONFRET, membre du Bureau de RESIF, Helle PEDERSEN, Directrice de RESIF et René CRUSEM, Président du Comité Directeur de RESIF.

Adresse courriel : comm@resif.fr

Inscription à la Newsletter RESIF : <http://www.resif.fr/newsletter.php>



Edito par René Crusem

En ce début d'août 2014, prend fin mon mandat de Président du Comité Directeur du Consortium RESIF. Grand enfant au moment de la signature de l'accord de consortium en octobre 2011, RESIF est aujourd'hui devenu un grand adolescent; cela ne s'est pas fait sans quelques petites crises, surmontées grâce aux efforts et à la bonne volonté de tous. Au-delà des différences liées à l'histoire et à la culture de chacun, il existe aujourd'hui dans notre pays une véritable communauté RESIF, regroupant l'essentiel des organismes et laboratoires concernés par l'observation des déformations de la Terre, et partageant une même vision et de mêmes ambitions pour l'avenir.

Il appartiendra à mon successeur, Pierre Soler, directeur de l'Observatoire Midi-Pyrénées, et à l'équipe dirigeante menée par Helle Pedersen, de faire entrer RESIF dans l'âge adulte. De nouveaux modes d'organisation et de financement devront être mis en place pour la phase d'exploitation; la visibilité et la reconnaissance internationales de RESIF – pour lesquelles la Direction a déjà beaucoup œuvré – devront être encore renforcés; la synergie entre les différents moyens d'observation se mettra progressivement en place, que ceux-ci soient localisés à terre, dans les océans, dans l'atmosphère, ou dans

l'espace; RESIF fournira toujours plus de services à la communauté scientifique et deviendra ainsi son outil de travail incontournable.

Je ne peux terminer ces quelques lignes sans souligner l'apport essentiel du CNRS/INSU et remercier chaleureusement l'ensemble des personnels impliqués - techniciens, ingénieurs, chercheurs, directeurs d'observatoire et Partenaires - pour leur engagement et leur soutien. RESIF leur doit son succès.

ACTUALITÉS

Novembre: - colloque G2

- biennale du RAP

Août: nouveau président pour le CD RESIF

Juin: -réunion de EPOS

-revue du Système d'Information de RESIF

Mai: réunion du Conseil Scientifique de RESIF

Mars: réunion des représentants gouvernementaux de EPOS

PORTRAIT (p. 8)

Olivier Charade, Ingénieur de Recherche au CNRS, Direction Technique de l'INSU, Meudon

LE TOUR DU MONDE EN 20 ANS DE CAMPAGNES GPS

Par Stéphane Mazzotti

Le parc mobile GPSMOB, composante de RESIF, offre un ensemble de matériel et de services en support des activités de campagnes GNSS de la communauté scientifique française, principalement dans le cadre de projets soutenus ou en rapport avec l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers). L'activité principale de GPSMOB tient dans la gestion et mise à disposition d'équipements de campagnes couvrant l'ensemble des besoins des utilisateurs: récepteurs, antennes, systèmes de mise en station, portables, etc. Au cours des 20 dernières années, GPSMOB a soutenu et permis la réalisation de plus de 400 campagnes GPS, et plus récemment GNSS, dont les données acquises sont archivées et mises à disposition sur son serveur.

Qu'est-ce que, et à quoi sert une campagne GPS/GNSS? Lancé dans les années 1980 et complètement opérationnel depuis 1995, le GPS (Global Positioning System) est un système américain de 24 satellites en orbite à 20.000 km d'altitude et qui permet de se positionner en tout point et en tout temps sur le globe. Initialement à objectifs militaires puis civils, le système GPS est utilisé depuis les années 1990 par la communauté des sciences de la Terre pour mesurer positions, déplacements, vitesses, et déformations associés aux phénomènes géologiques (tectonique des plaques, tremblements de terre, etc.). Depuis la restauration complète du système GLONASS (équivalent russe du GPS) en 2011, la mise en service partiel de Compass (système chinois) fin 2011, et le lancement - compliqué - de Galileo (système européen) fin 2013, l'acronyme GNSS (Global Navigation Satellite System) est utilisé pour indiquer les acquisitions multi-systèmes.



Figure 1: Campagne GPS en Jordanie. (Photographie Yann Klingner).

Le parc mobile GPSMOB offre un support à une large panoplie de projets de recherches intégrant les mesures GNSS. Plusieurs exemples sont présentés dans les articles de cette newsletter, recouvrant des domaines aussi variés que le cycle sismique des zones de subduction, la néotectonique et le volcanisme des rifts, les phénomènes météorologiques extrêmes, ou l'étude des variations du niveau marin. En pratique, la majorité des campagnes GNSS soutenues par GPSMOB implique des déploiements de stations temporaires variant de quelques stations sur quelques jours à plusieurs dizaines de stations sur plusieurs semaines. Comme illustré sur les photographies, l'équipement GNSS de GPSMOB doit permettre des déploiements dans des conditions parfois extrêmes allant des déserts Jordaniens aux calottes glaciaires du Yukon. Pour répondre à ces besoins, GPSMOB dispose de différents types de récepteurs et antennes (GPS et GNSS pour les plus récents), de système de mise en station (trépieds, mats, etc.), et de panneaux solaires permettant des mesures autonomes et continues sur de longues périodes.



Figure 2: Campagne GPS au pied du Mont Logan, 2^{ème} plus haut sommet d'Amérique du Nord, Yukon, Canada. (Photographie Stéphane Mazzotti).

Le GNSS est un système jeune et se caractérise par des développements technologiques quasi continus; l'un des objectifs de GPSMOB est donc de fournir aux utilisateurs les équipements les plus performants et surtout les plus adaptés à leurs besoins. A cet effet, GPSMOB bénéficie depuis sa création du support constant d'Olivier Charade et, depuis son installation à la Division Technique de l'INSU à Meudon en 2007, de l'expertise technique de Benoit Arnold. Au-delà de la gestion et de la mainte-



Figure 3: Localisations des campagnes GNSS depuis 1991.

nance de l'équipement mis à disposition, GPSMOB offre aux utilisateurs un site web permettant le suivi du matériel, une analyse des caractéristiques des récepteurs et antennes, ainsi que les résultats de tests techniques (<https://gpscope.dt.insu.cnrs.fr/spip/spip.php?rubrique17>). A titre d'exemple, GPSMOB conduit actuellement une série de tests sur plusieurs antennes et récepteurs GNSS afin de déterminer leurs caractéristiques et performances in-situ et de guider les choix d'achats de futurs équipements pour la communauté géodésique française (RENAG, laboratoires universitaires, etc.).

Après plus de 20 ans d'existence, le bilan de GPSMOB est tout à fait honorable. GPSMOB implique environ 60 chercheurs, ingénieurs et techniciens regroupés au sein de 17 laboratoires (universitaires, CNRS, IGN, ...). Chaque année, il contribue à 15 – 25 campagnes GNSS dans le cadre de projets ANR, INSU, ERC, etc. Comme illustré sur la carte ci-dessus, la plupart de ces campagnes ont lieu hors métropole et impliquent de nombreux collègues et instituts étrangers. A titre d'exemple, GPSMOB a été impliqué en 2012 et 2013 dans 42 campagnes GNSS aux quatre coins du monde : Pérou, Botswana, Vanuatu, Baie de Somme, ... Entre 2009 et 2012, les données acquises dans le cadre de campagnes supportées par GPSMOB ont donné lieu à plus de 45 publications de rang A, soit environ une douzaine par an.

Le taux d'utilisation moyen des équipements de GPSMOB est de l'ordre de 70%, soit plus de 8 mois pleins par an durant lesquels la totalité des 45 récepteurs GPS est

déployée sur des chantiers internationaux. Afin de faire face à cette forte demande, GPSMOB conduit actuellement un plan de jouvence et d'évolution de son équipement. 20 nouveaux récepteurs et antennes ont été acquis cette année et 20 autres sont planifiés pour les trois années à venir, avec pour objectifs 1) de remplacer l'ensemble des vieux récepteurs qui ont fidèlement servi les utilisateurs depuis plus de 10 ans, et 2) d'améliorer notre capacité à répondre aux nouveaux besoins : mesures haute fréquence (1 Hz), nouveaux signaux (L5, GLONASS, ...), déploiements massifs de parfois plus de 30 récepteurs, etc.

Au-delà de ces indicateurs quantitatifs, GPSMOB contribue à maintenir un lien et une cohésion au sein de la communauté géodésique des sciences de la Terre. En partenariat avec RENAG (réseau national GPS), GPSMOB organise chaque année une assemblée générale servant de forum de discussion sur les développements techniques et scientifiques pouvant impacter la géodésie et ses applications géologiques. Cet aspect «socio-scientifique» se trouve renforcé depuis l'intégration de GPSMOB au sein de RESIF, comme l'illustrent les discussions et groupes de travail menés durant les Rencontres scientifiques et techniques RESIF en octobre dernier. Les échanges scientifiques et techniques qui ont lieu lors des réunions et colloques contribuent au succès et à la qualité de la recherche menée avec le support du parc mobile GPSMOB.

Contact :

Stéphane Mazzotti, Géosciences Montpellier

DÉFORMATION ET SISMICITÉ : DES CLÉS POUR QUANTIFIER L'ALÉA SISMIQUE

Par Christophe Vigny et le groupe scientifique du LIA* Montessus de Ballore

Les zones de subduction produisent les plus grands séismes. Parmi elles, la subduction du Chili a une forte activité sismique avec, en moyenne, un séisme de magnitude 8 tous les dix ans et un tremblement de terre géant ($M > 8,7$) au moins une fois par siècle. Au début des années 2000 les équipes franco-chiliennes ont identifié une lacune sismique mûre : une zone dans laquelle le dernier grand séisme s'était produit il y a longtemps (en l'occurrence 1835), où la déformation s'accumulait inexorablement (fait attesté par les mesures GPS) et où la sismicité était anormalement faible (Campos *et al.*, PEPI 2002; Ruegg *et al.*, PEPI 2009). L'objectif premier de nos projets était donc d'équiper cette zone de manière à capturer un éventuel futur séisme (c'est-à-dire mesurer ce qui s'y passe exactement avant, pendant et après la rupture). Il s'agissait également de réaliser des mesures dans d'autres zones moins connues du Chili afin de caractériser leur état et leur potentiel sismique. Le 27 février 2010, un séisme de magnitude 8,8 (le 6^{ème} plus fort de l'histoire instrumentale) s'est produit dans la région surveillée, apportant son lot d'informations... et de surprises.

Depuis le début des années 90 le système GPS permet de mesurer avec une extraordinaire précision la position d'un point n'importe où sur la Terre. En une décennie, grâce à des progrès méthodologiques et algorithmiques, la précision est passée de quelques cm à quelques mm seulement. Il est donc possible de mesurer la déformation de la croûte terrestre à la précision de quelques mm/an, soit en effectuant des campagnes de mesures régulières sur des bornes géodésiques, soit en installant des stations permanentes qui mesurent leur position en continu. Initialement, on ne savait que déterminer la position moyenne de la station sur une session de mesures assez longue, par exemple 1 fois par jour sur la base de 24 heures d'enregistrements, ce que l'on appelle le positionnement statique. Depuis quelques temps, on sait également suivre le déplacement de la station à la fréquence d'acquisition du récepteur GPS, typiquement 1 fois par seconde, ce que l'on appelle le positionnement cinématique. Le premier type de mesure (le plus précis) a permis de quantifier les petites variations de l'accumulation de déformation dans la croûte terrestre en seulement quelques années de mesure et beaucoup de campagnes de terrain réalisées grâce au récepteurs GPS du parc mobile GPSMOB de l'INSU (41 campagnes depuis 1991). Ces variations correspondent aux anomalies de couplages sur le plan de subduction en profondeur. On a ainsi pu mettre en évidence

des longs segments fortement couplés où la déformation s'accumule, séparés par des zones plus étroites peu ou pas couplées. Les mesures réalisées pendant le séisme et qui permettent de quantifier la rupture elle-même ont mis en évidence la corrélation entre couplage pré-sismique et rupture co-sismique : celle-ci se développe dans le segment fortement couplé mais bute sur les zones faiblement couplées qui ne rompent pas, puisque peu ou pas de déformation y a été accumulée. Les premières observations post-sismiques semblent également confirmer une relation couplage/mode de glissement puisque le plus gros du glissement post-sismique semble situé autour des zones préalablement fortement couplées.

Les mesures réalisées ont permis de progresser dans la prévision - à distinguer de la prédiction - des très grands séismes. Si on ne sait toujours pas dire quand ils vont se produire, on comprend mieux l'une des conditions nécessaires à leur occurrence (un fort couplage) et la longueur de leur rupture qui correspond à la distance disponible entre deux zones de faible couplage. Reste à évaluer si ce couplage reste constant dans le temps, et alors le même segment rompra régulièrement plus ou moins de la même manière et la sismicité historique nous renseigne sur l'aléa futur, ou si le couplage a un lien dynamique avec la rupture et alors seule la mesure de la situation actuelle est pertinente.

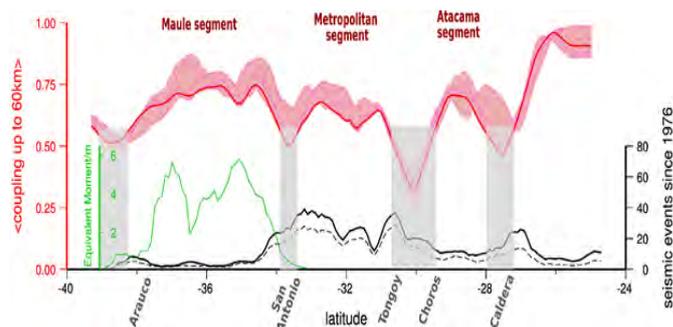


Figure 4: Courbes du couplage moyen (en rouge), de la sismicité (en noir) et de la rupture de 2010 (en vert) le long de la côte chilienne - de 40° à 24° de latitude Sud. L'enveloppe rouge montre la variabilité des modèles de couplage qui expliquent les données de déformation GPS. Les bandes grises marquent les zones de faible couplage qui définissent les limites des segments sismiques, (Maule, Métropolitain, Atacama). Le segment de Maule qui a rompu en 2010 (courbe verte) est délimité par deux zones de faible couplage : la baie de San Antonio au Nord, la péninsule d'Arauco au Sud (Figure d'après Métois *et al.*, JGR 2012).

Contacts :

Christophe Vigny, ENS, Paris

LIA Montessus de Ballore: structure mixte CNRS-Université du Chili

* LIA: Laboratoire International Associé

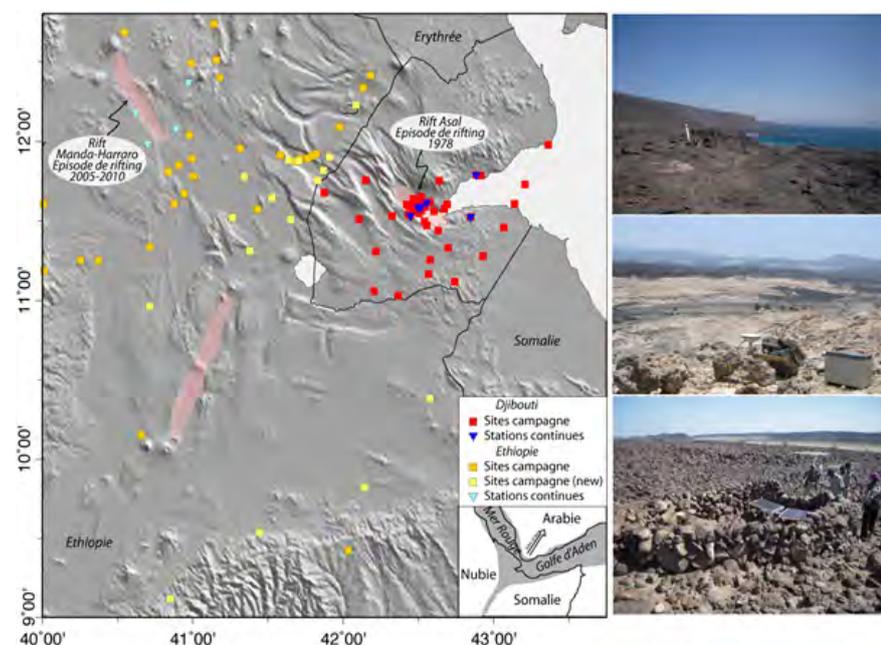
EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE LA DÉFORMATION EXTENSIVE EN AFAR (AFRIQUE DE L'EST)

Par Cécile Doubre, Aline Déprez, Frédéric Masson, Anne Socquet, Patrice Ulrich, Raphael Grandin, Jean-Bernard De Chabalier, Christophe Vigny, Jean-Claude Ruegg, Eric Calais, Saad Ibrahim, Elias Lewi et Tim Wright

La région Afar a été reconnue très tôt comme un site exceptionnel pour étudier les mécanismes intervenant dans le rifting actif, notamment à partir de la géodésie. Plus particulièrement dans la partie orientale, à Djibouti, de nombreuses campagnes ont été menées par les équipes franco-djiboutiennes dès les années 50 (IGN), puis dans les années 70, avec l'implantation d'un réseau géodésique conventionnel. Ce réseau a été par la suite densifié et mesuré à plusieurs reprises avec les techniques de géodésie spatiale de 1991 à 2003. Dans le cadre du projet ANR-JCJC 'Dynamique du Rifting en Afar', de nouvelles séries de mesures ont été réalisées en utilisant les stations du parc mobile GPSMOB. En 2014, 20 stations ont été utilisées simultanément pour mesurer plus de 45 sites. Ces mesures sont complétées par les données de 6 stations GNSS continues du réseau permanent de l'Observatoire Géophysique d'Arta, réinstallées en 2010 grâce à l'aide du parc mobile GPSMOB. Aussi, afin de pouvoir décrire le champ de déformation sur l'ensemble de la région Afar, notre équipe a mesuré le réseau existant dans

la partie éthiopienne et mis en place un nouveau réseau dans la partie centrale de l'Afar (collaboration avec les Universités d'Addis-Ababa et de Leeds). Les vitesses acquises à plus de 80 sites permettent de décrire l'organisation spatiale de la déformation extensive associée à la présence du point triple Nubie-Somalie-Arabie, et notamment le comportement post-dyking et inter-dyking des segments de rifts récemment affectés par des crises sismo-volcaniques. L'ensemble de ces données GPS sont confrontées aux données InSAR* afin de décrire le champ de déplacement en trois dimensions, et aux données gravimétriques et sismologiques collectées dans le cadre de ce projet, pour rendre compte des éventuels transferts de masse dans la croûte et évaluer le caractère sismique et asismique de la déformation. L'obtention de séries temporelles GPS exceptionnellement longues couplées avec les séries temporelles InSAR* permet de mettre en évidence des variations du champ de déplacements révélant des mouvements crustaux transitoires associés à l'activité magmatique et à une importante circulation de fluides.

Figure 5: Carte et photographies des sites géodésiques mesurés et installés dans le cadre du projet DoRA (les segments de rift sont indiqués en rosé).



Contacts :

Cécile Doubre, EOST, Strasbourg
 Aline Déprez, EOST, Strasbourg
 Frédéric Masson, EOST, Strasbourg
 Anne Socquet, ISTERre, Grenoble
 Patrice Ulrich, EOST, Strasbourg
 Raphael Grandin, IPGP, Paris
 Jean-Bernard De Chabalier, IPGP, Paris

Christophe Vigny, ENS, Paris
 Jean-Claude Ruegg, IPGP, Paris
 Eric Calais, ENS, Paris
 Saad Ibrahim, Observatoire Géophysique d'Arta, Djibouti
 Elias Lewi, IGSSA, Université d'Addis-Ababa, Ethiopie
 Tim Wright, Université de Leeds, UK

* InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar (radar à synthèse d'ouverture interférométrique)

LE GNSS POUR LA MÉTÉOROLOGIE

Par Karen Boniface et Cédric Champollion

Longtemps l'atmosphère a été la boîte noire des géodésiens. Les mesures géodésiques contiennent généralement un signal d'origine météorologique considéré comme un élément perturbateur. Lors du traitement de données GNSS en particulier, on estime précisément les perturbations atmosphériques pour mieux les exclure. Une partie du temps de propagation de l'onde émise par les satellites GNSS est due à la vapeur d'eau atmosphérique : il est nommé "retard" par les enfants prodiges de la géodésie. Comme si l'atmosphère terrestre était une anomalie. Malgré les menaces du maître, intéressons-nous à l'élément perturbateur et ouvrons la boîte noire des applications du GNSS à la météorologie. Un GNSS permet donc de mesurer précisément la vapeur d'eau atmosphérique en continu, jour et nuit, qu'il vente ou qu'il pleuve. C'est un avantage majeur comparé aux autres sources de données de vapeur d'eau en météorologie souvent limitées. A partir de ce constat, le GNSS peut être intégré de manière originale aux campagnes de mesures météorologiques. Par exemple pour mieux prévoir les pluies cévenoles, il est nécessaire de bien connaître l'état de l'atmosphère au-dessus de la mer Méditerranée. Or les mers et les océans ont des lacunes d'observation météorologique. On a donc démontré (Figure 6) qu'un GNSS embarqué sur un bateau pouvait mesurer précisément la vapeur d'eau et combler à terme cette lacune.

En plus de l'observation directe de la vapeur d'eau, le GNSS est aussi utilisé pour mieux contraindre l'état initial des prévisions numériques du temps (assimilation de données). C'est depuis quelques années une donnée supplémentaire utilisée opérationnellement par Météo-France pour ces prévisions grâce au traitement routinier de l'IGN. La mesure du « retard » atmosphérique par GNSS est ainsi passée (en trois générations de thèse) de la principale perturbation du signal à la principale utilisation des données GNSS de RENAG. En recherche, les travaux se poursuivent sur la mesure de la variabilité du champ de vapeur et sa description en 3 dimensions : la tomographie.

Zoom: La campagne VAPIMED visait à caractériser les processus météorologiques en relation avec le cycle de l'eau afin d'améliorer la compréhension du comportement à méso-échelle de l'eau sous ses différentes formes (vapeur d'eau, précipitations et processus micro-physiques). Afin d'évaluer la validité des

mesures d'humidité GNSS sur des plateformes mobiles, un récepteur GNSS provenant du parc mobile GPS-MOB a été installé sur le ferry Paglia Orba (SNCM) de septembre 2008 à janvier 2009. L'instrumentation déployée comporte un récepteur GNSS Trimble NetRS fixé sur le bateau à environ 30 m au-dessus du niveau de la mer. Plusieurs traitements GNSS spécifiques ont permis de mettre en évidence que des écarts importants sur la quantification de la vapeur d'eau existent

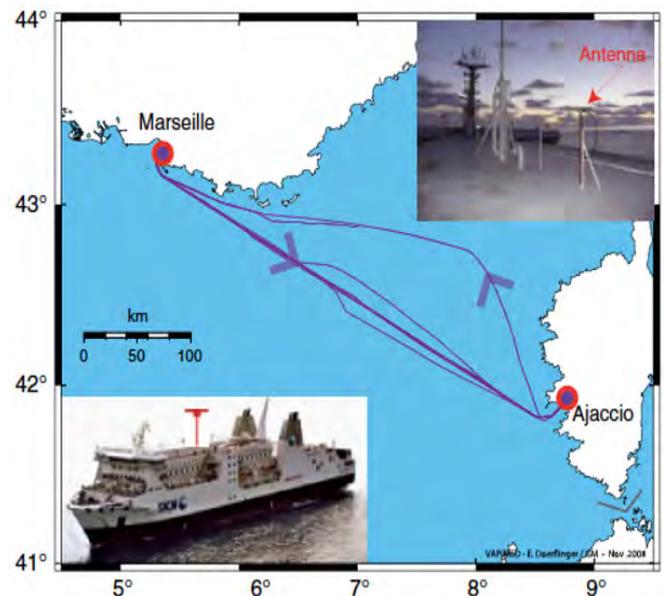


Figure 6: Trajets de navigation principaux au cours de la campagne VAPIMED et position de l'antenne GNSS. (Crédit : E. Doerflinger).

entre les observations GNSS et les analyses issues des modèles météorologiques (AROME et ALADIN, Météo France) pour des situations météorologiques bien particulières. L'estimation des délais troposphériques par GNSS sur bateau peut atteindre une précision de l'ordre de 2-3 mm en termes de RMS. Cette grande précision est primordiale pour la recherche météorologique sur les processus notamment de méso-échelle en mer mais aussi pour la calibration de capteurs satellitaires délivrant une mesure de vapeur d'eau. L'expérience se continue actuellement dans le programme HYMEX.

Contacts :

Karen Boniface, ISTERre, Grenoble
Cédric Champollion, Géosciences Montpellier

LA MESURE DE LA HAUTEUR D'EAU PAR GNSS AU VANUATU

Par Valérie Ballu, Stéphane Calmant, Marie-Noelle Bouin et les participants au programme GEODEVA

Les subductions sont à l'origine de séismes et tsunamis dévastateurs ; mieux comprendre le potentiel de chacune à générer des séismes, en particulier en caractérisant l'extension et la position de la zone bloquée au niveau de l'inter-plaque est donc d'un intérêt majeur. Un des outils approprié pour cette question est la quantification de la déformation de surface. Toute subduction impliquant au moins une plaque sous-marine, la difficulté réside dans le fait qu'il faille quantifier la déformation de la croûte terrestre sous l'eau, alors que les ondes électromagnétiques utilisées par les techniques GNSS ou l'imagerie satellitaires ne se propagent pas sous l'eau.

Au Vanuatu, depuis plusieurs années, nous maintenons avec le soutien de l'IRD, du CNES (programme TOSCA) et de l'ANR (Arc-Vanuatu), un site d'expérimentation nous permettant de développer des méthodes de géodésie marine et sous-marine dans une zone tectoniquement très active. La déformation verticale à proximité de la limite des plaques étant un bon indicateur du couplage et de l'accumulation des contraintes à l'inter-plaque, nous cherchons à estimer la hauteur par rapport à l'ellipsoïde (et les variations de hauteur au cours du temps) d'un point sous-marin. A cette fin, nous combinons des mesures de hauteur de la surface de l'eau avec des mesures de pression fond de mer. La zone présente une configuration expérimentale unique en ce sens qu'il existe deux hauts-fonds situés de part et d'autre de la frontière de plaque, sous des traces au sol de satellites altimétriques ; ces hauts-fonds ont été équipés de capteurs de pression depuis 1999. Grâce à cette configuration, nous avons pu estimer les variations de hauteur du fond en combinant pression de fond et mesures altimétriques de la surface et montrer que le point situé sur la plaque chevauchante subsidait de plusieurs mm/an alors que celui sur la plaque plongeante était stable (Ballu *et al.*, ASR 2013). Bien qu'intéressantes car disponibles sur l'ensemble du globe, les données altimétriques présentent des inconvénients notables (échantillonnage spatial et temporel imposé, nécessité d'un suivi de la calibration/validation des différentes missions...). Les mesures de la hauteur d'eau par GNSS (sur bouées et navires) permettent de s'affranchir partiellement de ces limitations. Lors des campagnes GEODEVA, des instruments du parc GPSMOB ont été utilisés comme station de référence à terre, ainsi que pour des instal-

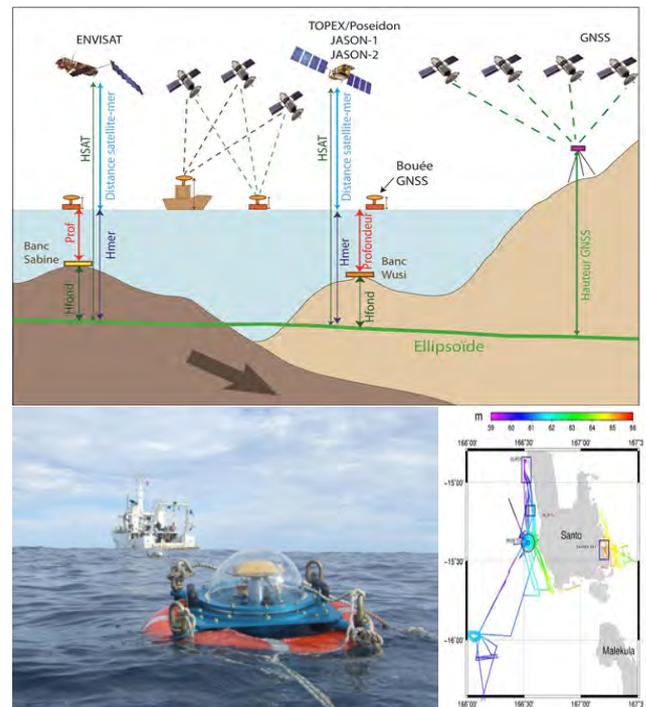


Figure 7. En haut : Configuration expérimentale pour la mesure des mouvements verticaux sous-marins au Vanuatu. Bas gauche : bouée GNSS et N/O Alis en mesures. Bas droite : carte de hauteur GNSS de la mer obtenue par calcul cinématique de la hauteur du navire.

lations sur le navire N/O Alis de l'IRD, en complément des mesures sur bouées GNSS. Le navire équipé de GNSS du parc GPSMOB est utilisé à la fois pour cartographier les variations spatiales de la hauteur de la surface de la mer (utiles dans le traitement des données altimétriques) et pour obtenir une série de hauteurs de la surface à l'aplomb du marégraphe permettant l'estimation de la hauteur du fond par rapport à l'ellipsoïde.

Contacts :

Valérie Ballu, LIENSs, La Rochelle
Stéphane Calmant, LEGOS, Toulouse
Marie-Noelle Bouin, MétéoFrance, Brest

Bibliographie

- Ballu *et al.*, 2013. *Advances in Space Research*, 51, 1335-1351
 Campos *et al.*, 2002. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 132, 177-195
 Métois *et al.*, 2012. *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JB008736
 Ruegg *et al.*, 2009. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 175, 78-85