



Edito par le Bureau (ancien) de RESIF

Les 3^{ème} Rencontres Scientifique et Technique RESIF se sont déroulées dans une ambiance conviviale à Saint-Jean-de-Monts, en Vendée, du 10 au 12 octobre 2017 ; la communauté RESIF a pu se retrouver, échanger et discuter longuement science et instrumentation (voir encadré p. 10). Les prochaines Rencontres sont programmées dans 2 ans, dans un coin de France métropolitaine encore à préciser.

Les infrastructures gravimétriques françaises sont à l'honneur dans ce numéro avec un historique des parcs instrumentaux mobiles et permanents (p. 2-6). Vous y trouverez aussi la « Shakemap », un outil pour la cartographie rapide des secousses induites par un séisme et l'estimation des dommages associés (p. 6-7), ainsi qu'une procédure de détermination automatique de mécanismes au foyer d'événements de faible magnitude dans le sud-est de la France et régions limitrophes (p. 8-10).

Un nouveau Bureau de RESIF a été mis en place en novembre 2017. C'est aussi le moment qu'a choisi Tony Monfret pour se retirer de l'équipe de rédaction de la newsletter RESIF après 5 années d'engagement et de plaisir à la faire vivre et évoluer.

Nous vous souhaitons à toutes et à tous une excellente année 2018.

ACTUALITÉS

Octobre :

- EPOS Integration Workshop
- 3^{ème} Rencontres RESIF, Saint-Jean-de-Monts
- International workshop on the inter-comparison of space and ground gravity and geometric spatial measurements, Strasbourg

Novembre :

- Colloque G2 (Géodésie & Rhéologie), Nice

Décembre :

- AGU, New Orleans
- Réunion du Board of Governmental representatives de EPOS

Janvier :

- Workshop RESIF : «Aléa sismique» et «Shake Map» (29-31, Montpellier)

PORTRAIT (p.8)

Anthony Mémin, Maître de conférences de l'université Nice Sophia Antipolis, nouveau membre du Bureau de RESIF.

RESIF-GMOB ET L'INFRASTRUCTURE GRAVIMETRIQUE NATIONALE

Auteurs : Sylvain Bonvalot, Jean-Daniel Bernard, Jean-Paul Boy, Cédric Champollion, Alain Coulomb, Michel Diament, Germinal Gabalda, Thierry Gattacceca, Jacques Hinderer, Thomas Jacob, Sylvain Lucas, Marie-Françoise Lalancette-Lequentrec, Nicolas Le Moigne, Laurent Longuevergne, Guillaume Martelet, Sébastien Merlet, Gwendoline Pajot-Metivier, Franck Pereira Dos Santos, Lucia Seoane

RESIF-GMOB, parc national d'instruments gravimétriques mobiles coordonné par le CNRS/INSU et composante instrumentale de RESIF (<http://gmob.resif.fr/>), offre aux équipes scientifiques françaises un ensemble de moyens, de mesures et de services pour des études du champ de pesanteur. Ce parc instrumental comprend divers capteurs complémentaires permettant de mesurer avec une précision variant de quelques 10^{-8} à 10^{-11} g*, les variations spatiales ou temporelles de la pesanteur. Mis en œuvre principalement sur le terrain pour des levés de reconnaissance et l'établissement de réseaux mais aussi ponctuellement en laboratoire pour des mesures permanentes à semi-permanentes, ces différents capteurs contribuent à caractériser et à quantifier des variations de masse ou de densité intervenant au voisinage de la surface terrestre ou à l'intérieur de la Terre. Complété par des observatoires permanents et également par d'autres moyens de mesures gravimétriques disponibles en France auprès de divers organismes ou provenant d'autres programmes de recherche, RESIF-GMOB contribue aujourd'hui à consolider une infrastructure gravimétrique nationale de premier plan construite sur plusieurs décennies et permettant de répondre à de nombreuses applications de recherche fondamentale ou appliquée en géodésie, géophysique, géologie, hydrologie, océanographie, météorologie.

Des années 50 à aujourd'hui ...

Initié au milieu des années 90, GMOB est né de plusieurs décennies d'investissements des équipes françaises dans l'acquisition de moyens de mesures gravimétriques pour des fins de recherche académique et l'établissement de réseaux de référence. Ces investissements ont suivi les évolutions techniques survenues dès les années 50 dans la conception de capteurs gravimétriques miniaturisés, développements issus presque exclusivement depuis un demi-siècle des Etats-Unis et du Canada (constructeurs North American, Wor-

den, LaCoste & Romberg, Scintrex, GWR, Micro-g LaCoste). Les premiers gravimètres relatifs de terrain ont ainsi été acquis dès le milieu des années 50 par l'IGN et l'ORSTOM/IRD et ont permis la réalisation des levés de reconnaissance et l'établissement des premiers réseaux de bases en métropole, dans les DOM-TOM**, sur le continent africain et dans le Sud-Ouest Pacifique (travaux réalisés principalement jusqu'au milieu des années 70 avec une dizaine d'instruments). Ces travaux incluaient l'établissement de bases dites « absolues » réalisées en réalité par des mesures relatives rattachées à de rares stations de mesures absolues disponibles en Europe. Les investissements en moyens de mesures se sont ensuite poursuivis dans les années 60-70, avec l'acquisition de gravimètres relatifs de terrain plus portables (gravimètres Worden ou LaCoste & Romberg) par divers instituts ou laboratoires de recherche (CNRS, BRGM, IGP, IRD, Université de Montpellier, etc.) pour compléter la couverture gravimétrique sur le territoire national (métropole et DOM-TOM) et développer des applications de recherche en géologie structurale, en prospection géophysique, en volcanologie, etc. Parallèlement, des études sur les variations temporelles de la pesanteur et des marées terrestres ont été entreprises conduisant à l'installation en 1954 d'un premier gravimètre enregistreur permanent (gravimètre LaCoste & Romberg) à l'Observatoire / Institut de Physique du Globe de Strasbourg. Cet instrument fut par la suite remplacé dès 1987 par le premier gravimètre cryogénique acquis en France (gravimètre supraconducteur GWR), instrument de plus grande sensibilité et de très faible dérive instrumentale, permettant d'initier des recherches sur la dynamique de la Terre et de son noyau liquide sur une étendue spectrale allant de quelques minutes à plusieurs années.

Comme pour les gravimètres d'observatoires, un saut technologique a été franchi au cours des années 90,



Gravimètre relatif Scintrex CG5 sur un site d'étude microgravimétrique dans les Pyrénées.



Gravimètre relatif supraconducteur iOSG à l'Observatoire Gravimétrique de Strasbourg.



Gravimètre absolu FG5 et gravimètre absolu à atomes froids (AQG) lors d'une campagne d'intercomparaison à l'Observatoire H+ du Larzac.



Gravimètre absolu A10 en opération de terrain dans les Andes chiliennes (4500m).



Intercomparaison de gravimètres absolus sur le site LNE de Trappes (au centre : gravimètre absolu à atomes froids CAG).



Gravimètre absolu à atomes froids GIRAPE 2 (ONERA) en test sur un navire du SHOM.

Fig. 1) Principaux types d'instruments gravimétriques déployés par les équipes françaises.

dans l'instrumentation gravimétrique mobile, avec l'avènement de gravimètres de terrain à acquisition numérique (Scintrex CG3 prédécesseur des actuels CG5 et CG6) et de gravimètres absolus basés sur la chute libre d'un corps (coin cube) dans le vide permettant la réalisation de mesures absolues (gravimètre Micro-g LaCoste FG5 et A10 dans sa version portable de terrain commercialisé au début des années 2000). La plupart des organismes nationaux (CNRS, CNES, BRGM, IRD, IGP, IGN, IFREMER, SHOM, etc.) et laboratoires universitaires (Paris, Toulouse, Montpellier, Strasbourg, Rennes, La Rochelle, Brest, Trappes, Clermont-Ferrand, etc.) impliqués dans la gravimétrie en France ont alors soutenu l'acquisition d'instruments de laboratoire ou de terrain qui ont constitué les prémices du parc instrumental national actuel. Ces moyens, récemment complétés par le programme EQUIPEX - Investissement d'Avenir 2012

- (voir plus loin) fournissent aujourd'hui une infrastructure gravimétrique originale, très complémentaire aux observations spatiales (missions GOCE, GRACE, GRACE-FO), exploitée pour aborder des questions scientifiques très diverses à la fois sur le territoire national mais aussi sur de nombreux chantiers à l'étranger où les équipes sont impliquées. À noter enfin que les gravimètres relatifs de RESIF-GMOB sont également utilisés pour la formation des étudiants lors de stages de terrain.

De nouveaux moyens de mesures

Les moyens de mesures gravimétriques RESIF se répartissent autour de 3 types d'instruments : des gravimètres relatifs de terrain de grande portabilité utilisés pour des levés de reconnaissance à différentes échelles, depuis la prospection microgravimétrique jusqu'au levé de reconnaissance, des gravimètres absolus por-

tables ou transportables mis en œuvre en laboratoire ou dans des conditions de terrain pour des déterminations précises et absolue de la pesanteur (réseau de référence, suivi de variations temporelles, métrologie, étalonnage d'instruments relatifs, etc.) et des gravimètres relatifs supraconducteurs installés pour un suivi temporel de quelques mois à quelques années des variations du champ de pesanteur en un lieu donné (voire de plusieurs décennies pour l'observatoire gravimétrique de Strasbourg).

L'EQUIPEX RESIF-CORE a permis d'entreprendre une jouvence des moyens de mesures mobiles et permanentes avec l'acquisition de deux nouveaux gravimètres de terrain (Scintrex CG5) et d'un gravimètre cryogénique (GWR iOSG) venu remplacé en 2016 celui de l'Observatoire de Strasbourg, en opération depuis plus de 20 ans (<http://www.resif.fr/spip.php?article72>). Il a aussi permis de soutenir, à travers un partenariat public-privé avec la société française MUQUANS, créée en 2011, le développement des premiers gravimètres absolus AQG (pour Absolute Quantum Gravimeter ou gravimètres à ondes de matières) portables et commercialisés au monde (voir Newsletter RESIF n°1). Grâce à des financements complémentaires (IDEX Toulouse, IRD, CNRS/INSU), deux nouveaux gravimètres AQG viendront ainsi équiper les groupes français.

Dans le domaine de l'observation permanente à semi-permanente, deux autres EQUIPEX, CRITEX (<https://www.critex.fr>) et MIGA (<https://www.universite-paris-saclay.fr/fr/recherche/projet/equipex-miga>) ont également permis d'acquérir plusieurs gravimètres supra-conducteurs (GWR iOSG et iGrav) pour des projets appliqués respectivement à l'étude de la zone critique (redistribution des masses d'eau dans les milieux souterrains) ou à la physique fondamentale (étude des ondes gravitationnelles), augmentant ainsi sensiblement les capacités de mesures gravimétriques en continu sur le territoire national. La figure 1 montre les principaux types d'instruments mobiles ou permanents dont disposent actuellement les équipes françaises pour des applications de recherche académique. Des informations plus précises sur les ressources disponibles et les modalités d'utilisation sont fournis sur le

site de RESIF-GMOB.

De nouveaux acteurs de l'instrumentation gravimétrique

Cette dernière décennie a vu l'émergence en France de 3 nouveaux acteurs reconnus au niveau international pour leurs activités R&D dans le domaine de l'instrumentation gravimétrique. Ces acteurs, publics ou privés, sont impliqués dans la conception de capteurs (gravimètres ou gradiomètres) utilisant les propriétés des ondes de matières pour déterminer le module ou les gradients de gravité. Ces techniques de mesures basées sur l'utilisation d'atomes froids représentent la principale innovation technologique depuis ces 20 dernières années dans la mesure du champ de pesanteur. Elles constituent un nouveau champ de recherche, aujourd'hui exploré dans de nombreux pays, qui devrait donner lieu dans les années à venir au développement de capteurs originaux pour un large éventail de mesures de la gravité : mesures ponctuelles ou en continu à haute fréquence, mesures absolues ou mesures gradiométriques, mesures in situ (de surface, de puits ou sous-marines) ou mesures embarquées sur différentes plateformes (véhicules, bateaux, sous-marins, satellites). Dans cette compétition internationale, ces laboratoires ont été parmi les premiers à proposer des réalisations pratiques opérationnelles d'instruments de mesures absolues qui ont pu être testés scientifiquement, notamment en lien avec RESIF-GMOB :

- Le LNE/SYRTE (UMR 8630), avec le développement d'un premier gravimètre à atomes froids transportable (CAG) au début de cette décennie dont les performances ont pu être comparées à d'autres instruments de référence lors de campagnes internationales d'inter-comparaisons de gravimètres absolus. Le site LNE de Trappes étant également amené à devenir site principal pour l'inter-comparaison des gravimètres absolus nationaux. <https://synte.obspm.fr/spip/science/iaci/projets/gravimetre/article/gravimetre-a-atomes-froids>
- MUQUANS avec le développement des premiers gravimètres à atomes froids miniaturisés (AQG) effectué dans le cadre d'un partenariat avec RESIF. <http://>

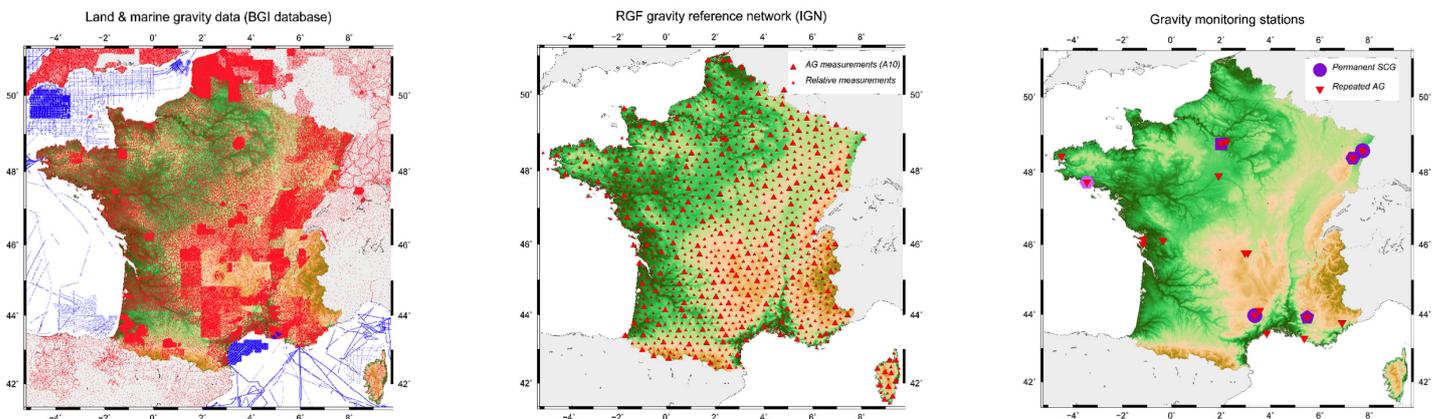


Fig. 2) Etat des lieux de l'infrastructure gravimétrique en France métropolitaine.

Gauche) Distribution des données gravimétriques terrestres et marines disponibles au BGI (avec contributions BRGM, SHOM et IFREMER) ; Milieu) Réseau gravimétrique de référence RGF établi par l'IGN à partir de campagnes hybrides de mesures absolues et relatives. Droite) Réseau de suivi temporel des variations de gravité par mesures permanentes (gravimètres supra-conducteurs) et mesures absolues réitérées. Les stations permanentes actives (violet) et en projet (violet clair) incluent les contributions RESIF (cercles), CRITEX (hexagones), MIGA (pentagone) et LNE (carré).

www.muquans.com/index.php/products/aqg ; <http://www.resif.fr/spip.php?article77>

- L'ONERA avec le développement d'un gravimètre à atomes froids mobile pour des mesures dynamiques (GIRAFE/GIRAFE2) testé en collaboration avec le SHOM lors de campagnes marines <https://www.onera.fr/actualites/lonera-invente-avec-le-shom-la-cartographie-de-pesanteur-a-precision-atomique>. Cet instrument sera prochainement testé dans des conditions de mesures aéroportées dans le cadre d'un projet soutenu par le CNES.

Un réseau d'observations complémentaires

Les travaux gravimétriques conduits depuis plusieurs décennies par les équipes françaises ont conduit à définir un référentiel gravimétrique d'un très bon niveau (parmi les meilleurs au niveau européen), que ce soit par la couverture gravimétrique terrestre (sous responsabilité du BRGM) ou marine (sous responsabilité de l'IFREMER et du SHOM) ou encore par les réseaux matérialisés (sous responsabilité de l'IGN). À cela s'ajoute un nombre croissant de sites où des observations gravimétriques relatives ou absolues sont acquises de façon permanente, semi-permanente ou réitérée, de plus en plus co-localisées avec d'autres réseaux (géodésiques, sismologiques, marégraphiques) en particulier dans le cadre de l'IR SOERE RESIF. La figure 2 montre l'état des lieux des observations actuellement disponibles sur la France métropolitaine, reflétant 3

composantes fortes du dispositif d'observation gravimétrique en termes (i) de connaissance du champ statique par des mesures ponctuelles, (ii) de suivi temporel par des observations permanentes à semi-permanentes et (iii) de réseaux et sites gravimétriques de référence. À noter enfin que de nombreuses autres observations sont aussi disponibles dans les ROM-COM*** et dans différentes régions du monde (Europe, Amérique du Sud, Afrique, Asie, Pacifique, zones polaires) où les équipes françaises contribuent activement à l'acquisition de données gravimétriques à Terre (campagnes de mesures relatives ou absolues, réseaux de référence) ou en mer (campagnes de mesures océanographiques). L'ensemble de ces données, ainsi que des produits et autres outils destinés aux utilisateurs scientifiques, sont accessibles à travers les services scientifiques internationaux de l'IAG (également reconnu composante du Service National d'Observation Gravimétrie-Géodésie), à savoir le Bureau Gravimétrique International (BGI) en charge de l'archivage de de la distribution de toutes mesures gravimétriques relatives ou absolues acquises à la surface du globe (<http://bgi.obs-mip.fr/>) et l'International Geodynamics and Earth Tide Service (IGETS) collectant et redistribuant les séries temporelles de pesanteur et d'autres capteurs géodynamiques associés (http://igets.u-strasbg.fr/data_products.php).

Perspectives

L'utilisation de technologies innovantes d'atomes froids pour la mesure de la pesanteur et le positionne-

ment de pointe des laboratoires métrologiques français dans la conception de capteurs innovants (gravimètres ou gradiomètres) ouvre aussi de nouvelles pistes pour l'observation gravimétrique in situ mais également spatiale. Cette dynamique permet aujourd'hui de mieux structurer la communauté autour de moyens et outils communs, et de disposer d'un ensemble croissant d'observations complémentaires de plus en plus homogènes et précises, pour étudier les variations spatiales et temporelles de la pesanteur et répondre à des problématiques scientifiques variées (physique du globe, risques naturels, enveloppes fluides terrestres, ressources, physique fondamentale, métrologie, systèmes et réseaux de référence, etc.). L'une des conséquences est aussi un élargissement de la communauté

des utilisateurs de la gravimétrie en France vers un plus grand nombre de spécialistes (géophysiciens, géodésiens, géologues, hydrologues, volcanologues, sismologues, modélisateurs, etc.) et le développement de nouvelles synergies avec des laboratoires de métrologie et des développeurs industriels.

Contacts :

- Sylvain Bonvalot, GET, Toulouse
(sylvain.bonvalot@get.omp.eu)

**g : accélération de la pesanteur à la surface de la Terre*

***DOM-TOM : Départements d'Outre-Mer - Territoires d'Outre-Mer*

****ROM-COM : Régions d'Outre-Mer - Collectivités d'Outre-Mer*

SHAKEMAP NATIONALE: UN PRODUIT RESIF

Auteurs : Antoine Schlupp et Didier Bertil

Une cartographie précise des secousses induites par un séisme est une donnée d'entrée indispensable pour une estimation des dommages. Elle permet aussi d'appréhender les variations spatiales des secousses, en réalité bien plus complexes que celles représentées par les lois d'atténuation, principalement dues à la source (mécanisme, taille de la rupture, directivité), propagation (variabilité spatiale de l'atténuation) et aux effets de site (géologique ou topographique). Ces paramètres, difficiles à caractériser pour un séisme donné, rendent *ipso facto* une modélisation théorique de la secousse peu représentative, situation aggravée en cas d'incertitudes sur la magnitude et la localisation hypocentrale. Nous avons cependant un atout en France, celui d'avoir accès en temps réel à plus de 200 stations sismologiques (bientôt 400 – RESIF) et un maillage de 36000 communes pour les intensités déduites des témoignages et enquêtes (www.franceseisme.fr).

Le programme ShakeMap V3.5 (USGS), distribué par l'United States Geological Survey (USA), permet de concilier modélisation et données, en corrigeant une modélisation *a priori* (basées sur l'hypocentre, la magnitude, les relations reliant magnitude et distance, accélérations et intensités, et les effets de sites) par les informations issues des observations instrumentales et

macrosismiques lors du séisme.

Cependant, la qualité et la densité des données évoluent dans le temps. Les observations instrumentales, disponibles très rapidement, restent spatialement limitées et rares en milieu urbain, cible principale pour l'aléa et le risque sismique. Par ailleurs, les intensités déduites des données macrosismiques, spatialement très denses, évoluent de l'intensité préliminaire issue des premiers témoignages quelques minutes après le séisme, à l'intensité finale au bout de plusieurs mois après enquête complète. La ShakeMap est donc elle aussi évolutive dans le temps, d'une version préliminaire et rapide à une version finalisée et tardive.

Une telle ShakeMap est réalisée pour les Pyrénées depuis 2012 (www.SisPyr.eu) avec des mises à jour pendant 24 h. En 2015, un groupe de travail national « ShakeMap » est créé sous l'impulsion du RESIF-RAP. Il est coordonné par le BCSF-RéNaSS. Les autres membres du groupe de travail sont issus du BRGM, CEA, CEREMA, IPGP/OVSG-OVSM, ISTERre, OMP et OSUNA. Un des objectifs est de définir une ShakeMap de référence, de la meilleure qualité possible. Depuis 2016, une ShakeMap nationale est opérationnelle sur www.franceseisme.fr pour tout séisme faisant l'objet d'une alerte (du CEA en

Estimation régionale de la secousse (à partir des données macrosismiques et instrumentales)

Séisme du 28/04/2016 08h47 (heure locale)

28/04/2016 06:46:53 GMT M 5.0 46.05°N 1.12°W Prof.: 10.0km [source BCSF]

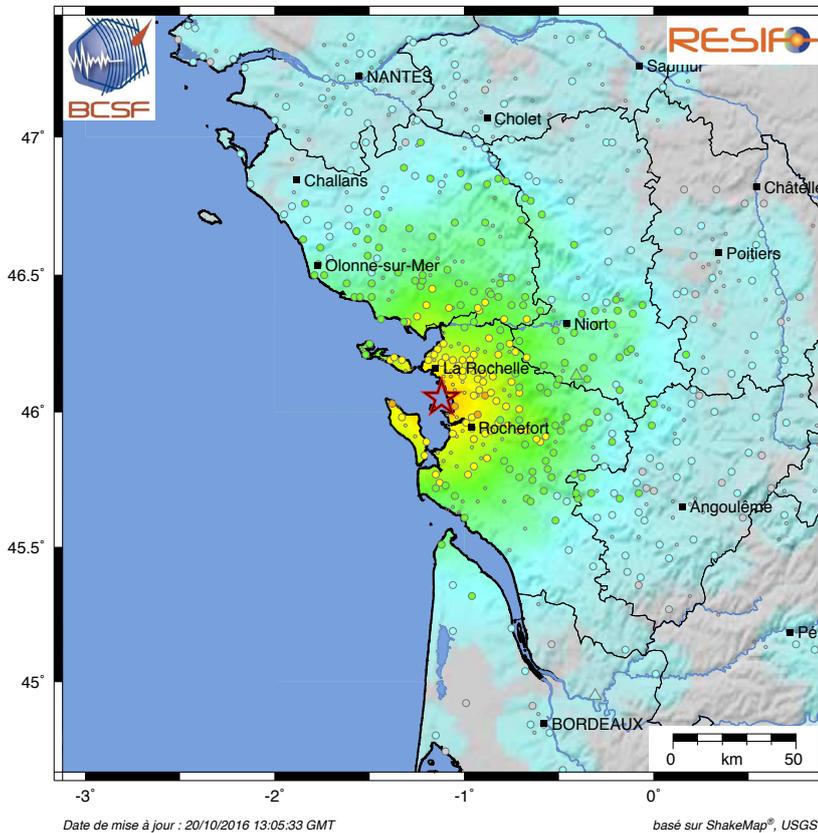


Fig. 1) ShakeMap pour le séisme de La Rochelle du 28 avril 2016 et qui a permis de démontrer la surestimation de sa magnitude. http://www.franceseisme.fr/affiche_shakemap.php?IdSei=599.

métropole et de l'IPGP aux Antilles) avec mise à jour jusqu'à 7 jours. Elle est appelée « Estimation régionale de la secousse à partir des données instrumentales et macrosismiques ».

Les cartes et les données utilisées pour chaque ShakeMap sont mises à disposition sur le site web. Depuis 2017, L'action transverse RESIF-Sismicité est divisée en 5 axes. L'axe 4, animé et coordonné par les auteurs, se penche sur cette thématique et ses possibilités d'amélioration et de valorisation.

La ShakeMap est un produit transverse, s'abreuvant des données RESIF issues des axes 1, 2 et 3 (bulletins, catalogues, données macrosismiques) et éclairant l'axe 5 (aléa sismique).

Contacts :

Antoine Schlupp, EOST-IPG, Strasbourg

(antoine.schlupp@unistra.fr)

Didier Bertil, BRGM, Orléans

(d.bertil@brgm.fr)

| Intensités EMS98 | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X+ |
|---|--------|-------------|--------|---------|-------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Dégâts potentiels bâtiments vulnérables | aucun | aucun | aucun | aucun | très légers | modérés | quelques effondrements partiels | nombreux effondrements partiels | nombreux effondrements | effondrements généralisés |
| Dégâts potentiels bâtiments peu vulnérables | aucun | aucun | aucun | aucun | aucun | aucun | très légers | modérés | effondrements partiels | nombreux effondrements |
| Perception humaine | aucune | très faible | faible | modérée | forte | brutale | très brutale | sévère | violente | extrême |

| Contribute au calcul | Ne contribue pas au calcul | Type d'observation |
|----------------------|----------------------------|--|
| ○ | ◦ | Intensité d'après données macrosismiques (témoignages internet) |
| △ | ◡ | Intensité issue d'une conversion à partir du PGA / PGV (donnée instrumentale) <small>Conversion PGA, PGV / intensité basée sur Caprio et al. (2015)</small> |

Workshop Aléa sismique

Dans le cadre de l'action transverse RESIF-Sismicité, le comité organisateur et le bureau de RESIF vous annoncent la tenue du 2^{ème} Workshop RESIF – Aléa sismique, les 29, 30 et 31 janvier 2018 à Montpellier (centre Genopolys).

Ce workshop couvrira les deux thématiques suivantes :

- Processus et taux de déformation à l'origine de la sismicité en France métropolitaine, modélisation et confrontation aux données géophysiques et géologiques
- Shakemaps nationales de référence : objectifs, données, méthodes et outils dans le contexte national et international

Contacts : stephane.mazzotti@gm.univ-montp2.fr et matthieu.ferry@gm.univ-montp2.fr

Vous trouverez plus d'informations sur le site web de RESIF : www.resif.fr

CALCUL AUTOMATIQUE DE MÉCANISMES AU FOYER PAR INVERSION DES FORMES D'ONDES DES STATIONS RESIF

Auteur : Bertrand Delouis

Lorsqu'un séisme est détecté et localisé en temps réel par seiscomp3 (<https://www.seiscomp3.org>) à Géoazur (<http://sismoazur.oca.eu>), un calcul automatique du mécanisme au foyer par inversion des formes d'ondes est déclenché si la magnitude locale (Ml) atteint un certain seuil et que le séisme se situe dans une aire géographique prédéfinie. Le seuil est $M_l=2,5$ pour le domaine métropolitain et les régions frontalières (aire locale), et $M_l=4,5$ pour un domaine plus large incorporant le Nord de l'Europe, l'Espagne, le Nord de l'Afrique, et se prolongeant vers l'Est jusqu'à la Turquie (aire régionale, voir carte sur http://sismoazur.oca.eu/focal_mechanism).

Il est rare qu'un mécanisme automatique puisse être obtenu pour une magnitude inférieure à 3, mais avec le développement du réseau RESIF métropolitain cela pourrait devenir possible dans les zones à forte densité de stations large bande. Pour l'aire locale, les stations utilisées pour l'inversion des formes d'ondes sont celles du réseau FR, RD (CEA), RA (RAP), complétées par les stations du réseau suisse (CH), les stations italiennes proches (GU, Gênes et IV, INGV Rome), et deux stations de Catalogne (CA). Pour l'aire régionale, à ces mêmes stations se rajoute un maillage plus large provenant des réseaux IV, MN (Mednet), G (Géoscope), et GE (Geofon). Les canaux large bande (HH, voire BH) sont utilisés en priorité, mais les canaux accélérométriques peuvent être pris en compte si le rapport signal sur bruit est suffisamment élevé.

Lorsqu'un séisme est re-pointé manuellement, avec l'ajout des temps d'arrivée des ondes S, et qu'une nouvelle localisation affinée est obtenue, la procédure est relancée et le résultat de la nouvelle inversion de la source remplace le précédent sur le site web. Le résultat

de l'inversion n'est affiché sur la page web sismoazur que si la solution est associée à un critère de qualité suffisamment bon (qualité A, B, ou C) indiquant qu'un nombre suffisant de composantes (N, E, ou Z) a été utilisé et que la solution est correctement contrainte. En effet, l'inversion étant basée sur une recherche sur grille, l'unicité (ou la non-unicité) de la solution peut être évaluée.

Les solutions sont affichées sous la forme d'une carte et d'une liste chronologique des séismes sur http://sismoazur.oca.eu/focal_mechanism.

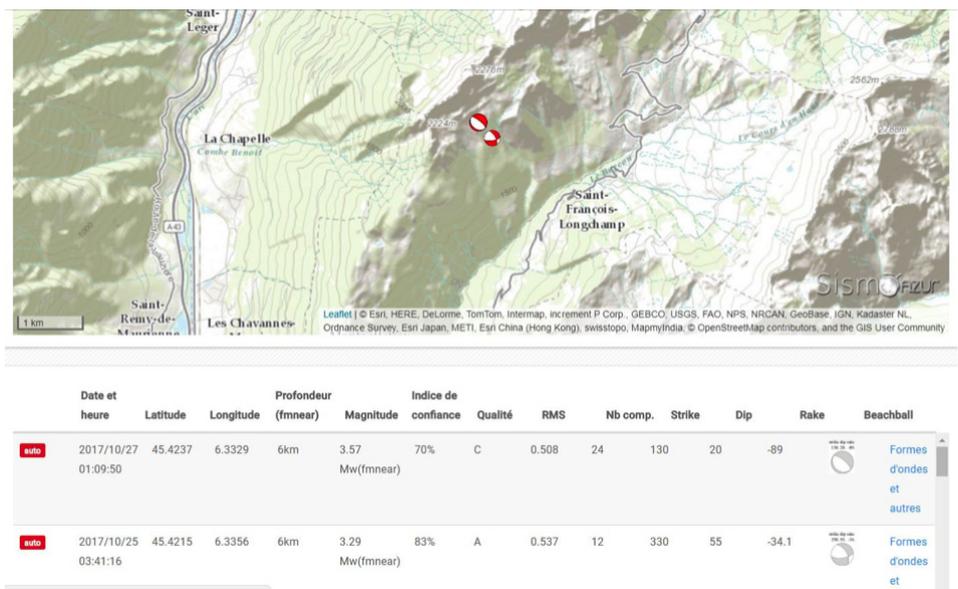


Fig. 1) Extrait de la page web http://sismoazur.oca.eu/focal_mechanism montrant les mécanismes au foyer obtenus pour les séismes de M_l 3,3 et 3,6 des 25 et 27 octobre 2017 à proximité de Saint-François-Longchamp, situés à une vingtaine de kilomètres au nord de Saint-Jean-de-Maurienne. Les valeurs de latitude et longitude sont celles de la localisation Seiscomp3, dans ce cas après pointé manuel des ondes P et des ondes S. La profondeur et la magnitude de moment M_w ont été estimées par l'inversion des formes d'ondes, en même temps que le mécanisme au foyer (strike, dip, rake). L'indice de confiance est une mesure de l'unicité de la solution (plus l'indice se rapproche de 100% mieux la solution est contrainte). La RMS est l'erreur quadratique moyenne d'ajustement des formes d'ondes (plus la RMS est faible, meilleur est l'ajustement). « Nb comp. » indique le nombre de composantes (N, E, ou Z) utilisées en fin de compte dans l'inversion. Des informations complémentaires, telles qu'illustrées sur la figure 2, peuvent être visualisées en cliquant sur « Formes d'ondes et autres ».

Fig. 2 (partie 1)

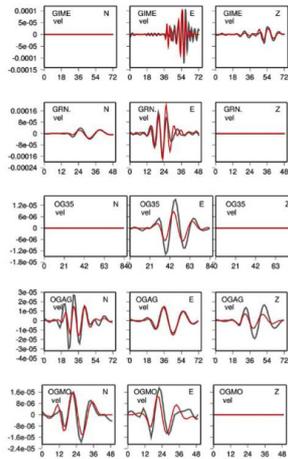
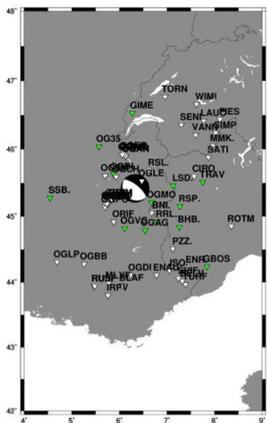


Fig. 2 (partie 3)

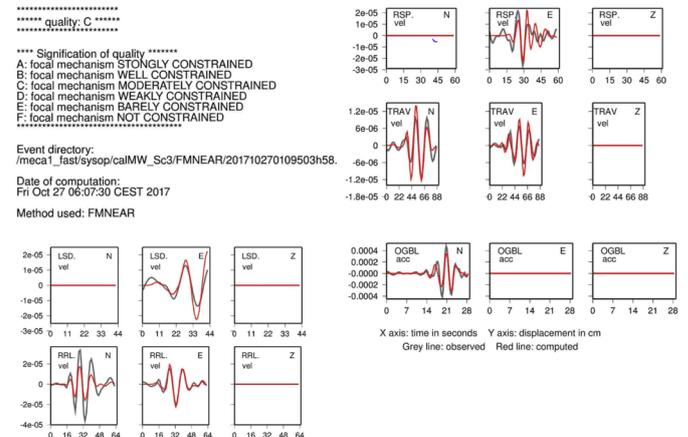


Fig. 2 (partie 2)

M < 5.5, only one point source

Frequencies too low to constrain the STF

strike dip rake
 130. 20. -89.

strike dip rake
 130.0 20.0 -89.0 : best focal mechanism

RMS = 0.508

Selected depth: 6.0 km

24 = number of components with freqband > 0.015Hz

70 % : index of confidence

3.57 : Mw from waveform inversion

Epicenter used (lat, long): 45.424 6.333

Starting depth(km): 4.0

strike dip rake of the second nodal plane:
 309.0 70.0 -90.4

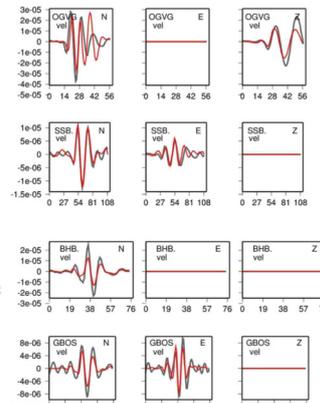


Fig. 2) Informations plus détaillées accessibles sous forme graphique depuis la page web [sismoazur](http://sismoazur.fr) pour un séisme dont l'inversion des formes d'ondes a donné un résultat correctement contraint. Exemple du séisme du 27 octobre 2017 de la figure 1. La carte de la partie 1 montre le mécanisme au foyer obtenu avec les stations utilisées (triangles blancs : stations initialement incorporées dans l'analyse, mais non utilisées finalement ; triangles verts : stations finalement retenues pour l'inversion). Sur la colonne de droite des parties 1, 2, et 3, les ajustements de formes d'ondes en déplacement (signaux observés en gris, calculés en rouge). Les amplitudes sont en déplacement (cm). « vel » signifie vélocimètre (large bande) et « acc » accéléromètre, c'est-à-dire le type de capteur. Des informations complémentaires sont données sous forme de texte.

La figure 1 présente un zoom sur les deux séismes dominant l'essai sismique du mois d'octobre 2017 au Nord de Saint-Jean-de-Maurienne en Savoie. Sur la figure 2, les composantes « à plat » ne signifient pas un dysfonctionnement de la station, mais elles peuvent correspondre à deux cas de figure, i) la procédure entièrement automatique a rencontré une difficulté pour trouver un filtrage adapté au signal, généralement en raison d'un rapport signal/bruit trop faible, ii) l'ajustement des formes d'ondes était médiocre et ces composantes ont été éliminées au cours de l'inversion.

Une sélection initiale des stations est effectuée sur la base d'un critère azimut – distance, combiné à une première estimation de l'ajustement des formes d'ondes (RMS), afin de ne garder dans l'inversion qu'un nombre maximum de 15 stations aussi bien réparties que possible autour de l'épicentre et dont la modélisation ne présente pas de problème majeur. Avant cela, une identification des stations vélocimétriques saturées en amplitude et/ou affectées par un tilt (signaux présentant une forte dissymétrie entre

les valeurs positives et négatives en vitesse) est effectuée et les stations concernées sont éliminées d'office.

La modélisation porte sur les formes d'ondes complètes en déplacement, dont l'amplitude initiale en counts a été simplement divisée par la valeur du gain (sensitivity), contenant les termes en champ lointain (P et S), intermédiaire et lointain, ainsi que les premières ondes de surface pour les stations les plus lointaines. La distance est toutefois limitée à 800 km car un simple modèle de vitesse 1D plan est utilisé pour générer les sismogrammes synthétiques. La méthode utilisée cherche à modéliser les signaux filtrés à basse fréquence, car ceux-ci, lorsqu'ils sortent du bruit, contiennent l'information nécessaire à la détermination du mécanisme au foyer et de la magnitude de moment Mw, sans être trop dépendants du modèle de vitesse.

Pour des petits séismes ($M_l < 5,5$) la source est représentée par un point source unique et la fonction temporelle de la source (STF) n'est généralement pas contrainte. Dans le cas d'un fort séisme ($M_l > 5,5$), le

séisme est représentée par une ligne source de dimension finie étendue selon l'azimut (strike) de l'un des plans nodaux du mécanisme. De plus amples informations sur le traitement des signaux et la méthode d'inversion sont présentés dans Delouis (2014). L'article correspondant traite surtout des séismes de forte magnitude mais incorpore le cas des petits séismes tels que ceux des exemples présentés ici (figures 1 et 2).

La procédure d'extraction des formes d'ondes en lien avec Seiscomp3 et de présentation des résultats sur le site sismoazur repose en grande partie sur des développements en informatique, base de données, et web,

réalisés à Géoazur par Jérôme Chèze et Fabrice Peix. Il est prévu que les solutions mécanismes au foyer trouvées soient envoyées automatiquement au RENASS-BCSF, selon des modalités qui seront définies dans le cadre de l'action transverse RESIF-Sismicité.

Contact :

Bertrand Delouis, Géoazur, Valbonne
(delouis@geoazur.unice.fr)

Référence :

- Delouis, B., 2014. BSSA, 104 (3), 1479-1500. doi: 10.1785/0120130151.

3^{ème} Rencontres Scientifique et Technique RESIF, 10-12 octobre 2017

Les 3^{ème} Rencontres Scientifique et Technique RESIF se sont déroulées du 10 au 12 octobre 2017 à Saint-Jean-de-Monts, en Vendée. Plus de cent participants, chercheurs, ingénieurs, techniciens et étudiants ont partagé expériences et savoir-faire dans un cadre accueillant sur la côte atlantique. Le bilan de ces Rencontres est globalement positif : 22 présentations orales, 22 posters et 6 ateliers thématiques ont animés les 4 demies journées du colloque dans les domaines scientifiques et techniques de la sismologie, la géodésie et la gravimétrie. Les étudiants Christine Masson (Université de Montpellier) et Ugo Nanni (Université Grenoble Alpes) ont remporté le concours 2017 « les deux meilleurs posters ». Des ateliers thématiques ont permis de faire le point sur certaines actions spécifiques et transverses de RESIF, tandis que d'autres sur le rôle que pourrait jouer RESIF dans l'observation et l'analyse des changements environnementaux ainsi que sur la sensibilisation et l'éducation du citoyen dans la cadre des risques telluriques.

Les présentations orales et les comptes rendus des ateliers seront prochainement disponibles sur le site web de RESIF (www.resif.fr).

Portrait

Anthony Mémin est Maître de conférences de l'université Nice Sophia Antipolis depuis fin 2014, à la suite d'une thèse soutenue en septembre 2011, un cours passage au LEGOS à Toulouse, et un post-doc de 3 ans à l'université de Tasmanie, Hobart (Australie). Ses activités de recherche portent sur la réponse de la Terre solide aux variations de masse de glace passées et actuelles à partir de l'étude des déformations et des variations du champ de gravité. Il s'intéresse également à suivre et caractériser les variations actuelles de la calotte Antarctique par géodésie spatiale. Depuis novembre 2017, il est membre du bureau RESIF, en charge de la communication interne.



Équipe de rédaction : Lydie GUILLEROT (IPGP), Tony MONFRET, (Géoazur, membre du Bureau de RESIF), Anaïs SCHNEIDER (ISTERRE) et Bureau de RESIF.

Adresse courriel : comm@resif.fr

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

Edito par le Bureau de RESIF

RESIF évolue ! Effectivement, les projets d'instrumentation de l'Equipex RESIF CORE sont actuellement en train de se finir et une nouvelle phase de conception est en cours sous la forme d'un nouveau projet dans le cadre du Plan Investissement Avenir – Phase 3 (PIA3).

Tout en continuant son action au niveau équipement et instrumentation, le futur de RESIF est de mettre l'accent sur la valorisation des données acquises par le parc instrumental qui a été déployé ces 10 dernières années ainsi que celles que RESIF diffuse par le biais de son infrastructure. Cette infrastructure de diffusion est réalisée principalement dans le cadre des activités de l'action transverse «Système d'Information».

Cette action transverse est en cours de développement et passe notamment par l'intégration de RESIF dans EPOS (European Plate Observing System). Pour mettre en place

DÉTERMINATION DES VITESSES VERTICALES POUR LES STATIONS GNSS DES PETITES ANTILLES

Auteur : Pierre Sakic, Valérie Ballu et Guy Wöppelmann *

L'arc des petites Antilles est situé à proximité d'une frontière de plaques en subduction et de ce fait, l'aléa sismique y est important. Pourtant, peu de grands événements ont été recensés, ce qui peut être lié à la nature de la zone ou à la trop courte période d'observation. Actuellement, les éléments manquent pour écarter définitivement la possibilité d'un futur méga-séisme tsunamigénique.

En exploitant les observations GNSS disponibles dans la région jusqu'à la fin 2014 nous avons cherché à déterminer si une déformation était visible en surface. Les données proviennent de stations appartenant au réseau ORPHEON (société Geodata Diffusion) diffusées par le centre de données RESIF-RENAG, ainsi que les stations maintenues par l'Observatoire volcanique et sismologique de Guadeloupe (OVSG) de l'IPGP, et son homologue martiniquais. Enfin, les données de la station ABMF maintenue par l'IGN ont aussi été traitées. Les premières stations ayant été déployées au début des années 2000, on dispose de près de quinze ans de données pour les plus anciennes (voir fig. 1).

Le calcul des données GNSS est effectué avec le logiciel de calcul géodésique GINS du CNES, en adoptant une stratégie PPP avec résolution des ambiguïtés entières [3], et les séries temporelles sont déterminées dans

le nouveau projet et accompagner la valorisation scientifique, un nouveau bureau RESIF s'est constitué sous la direction d'Andrea Walpersdorf, avec Nikolai Shapiro et Anthony Mémin comme membres. Il sera appuyé par un nouveau conseil scientifique qui vient de se réunir le 6 juin.

Ainsi la lettre d'information se voit attribuer d'un nouvel objectif : informer la communauté des avancées scientifiques qui sont réalisées grâce à RESIF. Pour nourrir les prochaines lettres, nous lançons un appel à contribution d'articles à tous les acteurs RESIF (contacter Anthony Mémin). Dans cette édition vous découvrirez notamment un travail réalisé sur les Antilles où RESIF joue son rôle de diffusion de données mais où son implication instrumentale est encore à concrétiser.

Enfin, le nouveau bureau RESIF remercie grandement Helle Pedersen, Tony Monfret et Jean Chéry (le précédent Bureau de RESIF) pour le travail qui a été réalisé jusqu'à maintenant.

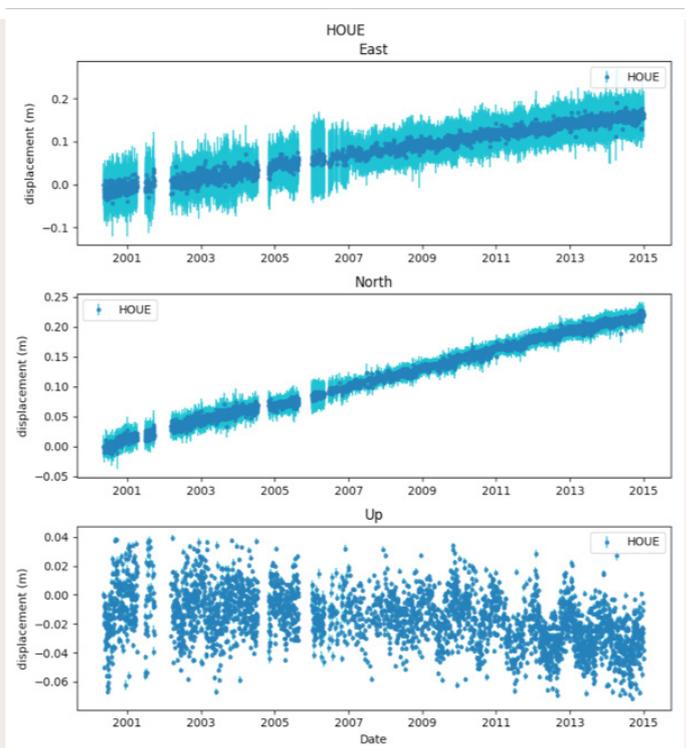


Fig.1 : Série temporelle du déplacement de la station GNSS HOUE (site de l'Observatoire de Guadeloupe) par rapport à sa position moyenne, traitée en PPP par GINS. Les composantes Est, Nord et Verticale sont représentées de haut en bas

l'ITRF08. La vitesse de déplacement des stations est déterminée avec HECTOR [1,2], permettant l'estimation de tendance linéaire sur des séries temporelles perturbées par un signal annuel ou semi-annuel avec des incertitudes réalistes, basées sur les caractéristiques du bruit.

Edito par le Bureau de RESIF

Tourner vers le futur, RESIF se prépare pour être prolongé dans le cadre du PIA3 ! Le conseil scientifique (CS) de Juin dernier recommande de mettre en avant un projet scientifique fédérateur, un développement prioritaire sur les technologies fond de mer (géodésie et sismologie) afin d'élargir le rayon d'action de RESIF en intégrant l'interface Terre-Mer, avec la sélection notamment d'un ou deux chantiers d'application pouvant se focaliser sur les risques naturels (Antilles, Réunion, Mayotte, TOM, Méditerranée occidentale) et de continuer son action de coordination du développement d'instruments innovants. Le comité directeur, désormais présidé par M. Diament (IPGP), soutient l'avis du CS et a notamment approuvé la proposition de création d'une action spécifique sismomètre fond de mer.

Côté instrumental, tandis que le gravimètre absolue quantitative est en phase finale de développement, le parc Gmob s'est doté d'un nouveau gravimètre relatif et un nouvel Broad-Band-OBS a été acquis. Enfin, EPOS devient une infrastructure européenne de recherche - RESIF en est la contribution française majeure.

Enfin, vous découvrirez dans cette édition de la lettre les activités de l'action transverse sismicité sur l'aléa pour lequel un atelier sera prochainement dédié.

Bonne lecture !

ALÉA SISMIQUE EN FRANCE : COMBIEN, OÙ, POURQUOI, COMMENT ?

Auteurs : Stéphane Mazzotti, Géosciences Montpellier, Hervé Jomard, IRSN

Le 30 septembre 2002, le séisme de Hennebont (ML = 5.4) touche le quart nord-ouest de la France, ne générant que des dégâts légers bien qu'il soit ressenti jusqu'à 400 km de son épicentre [1]. Les répliques et mécanismes au foyer suggèrent une réactivation du Cisaillement Sud Armoricaïn, une des structures majeures de l'orogénèse hercynienne [2]. Comme le montre la sismicité instrumentale de la France métropolitaine, ce séisme fait parti de la « zone sismique bretonne », zonation qui se retrouve dans les modèles d'aléa sismique (Fig. 1).

Ce séisme, qui s'est produit dans une région tectoniquement stable, illustre bien les questions scientifiques concernant la sismicité et l'aléa sismique en France métropolitaine. Par exemple :

- Les structures du Massif Armoricaïn sont-elles capables de générer des séismes de magnitude 6 ou plus ?
- Si oui, quelle serait leur probabilité d'occurrence ?
- Les structures hercyniennes sous le Bassin de Paris sont-elles sismogènes ?
- Plus généralement, quels sont les processus contrôlant la sismicité et l'aléa sismique ?

Afin de progresser dans l'étude de ces questions, l'Action Transverse Sismicité RESIF a mis en place l'Axe 5 « Aléa » dans le but de promouvoir la caractérisation des sources sismiques en France. Il s'agit d'encourager les interactions entre les membres des communautés académiques et des praticiens de l'aléa sismique afin, dans une premier temps, de construire une base de données de référence permettant d'évaluer le potentiel sismogène des sources sismiques.

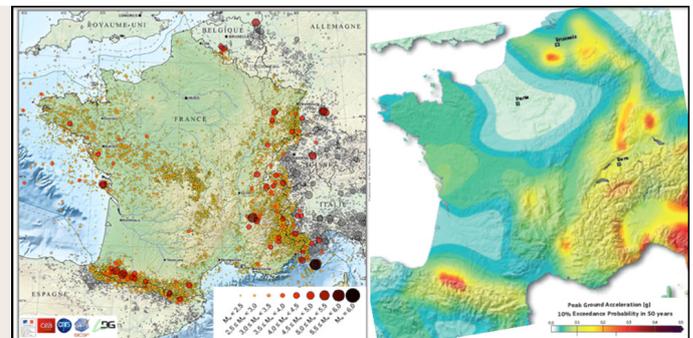


Fig.1 : Sismicité instrumentale [5] et aléa sismique [6] en France métropolitaine.

Dans un second temps, nous envisageons l'élaboration de nouveaux modèles d'aléa sismique intégrant les développements de recherche les plus récents d'aléa sismique intégrant les développements de recherche les plus récents.

Ces objectifs ont été précisés récemment lors de deux workshops auxquels ont participé plus d'une quarantaine de chercheurs (<https://www.resif.fr/spip.php?rubrique52>). Les discussions ont mis en avant l'importance d'adopter une approche ouverte, novatrice et pluridisciplinaire intégrant les nouvelles données et idées parues au cours des dix dernières années (Fig. 2). Ainsi, les travaux récents montrent l'importance des données telle que la géodésie ou les taux d'érosion [e.g., 3], en particulier dans les systèmes à très lente vitesse de déformation qui sont fortement impactés par les forçages non tectoniques [e.g., 4].

Dans le cadre de l'Axe 5 « Aléa », il s'agit donc de faire appel aux données classiques et originales pour mieux définir les propriétés sismogènes en France. Dans cette optique, un atelier « Modèles et zonages sismotectoniques de la France métropolitaine » se tiendra du 14 au 16 janvier 2019 à Montpellier. Trois objectifs principaux ont été identifiés :

1. Sensibilisation aux notions de zonage sismotectonique en aléa sismique ;

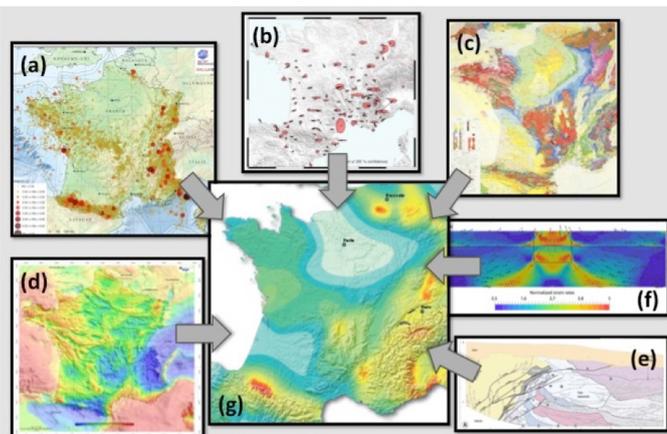


Fig.2 : intégration multi-données contribuant à la construction de futurs modèles d'aléa sismique : (a) catalogues de sismicité [5] ; (b) géodésie [7] ; (c) géologie ; (d) géophysique ; (e) paléo-sismologie [8] ; (f) modélisation numérique [9].

2. Discussions de la sismotectonique de la France : Quels sont les processus ? De quelles données disposons-nous ?
3. Comment avancer (base de données nationale de référence, groupes de travail) ?

La participation à cet atelier est ouverte à tous. Nous espérons que cette initiative permettra d'améliorer la compréhension de la sismotectonique et sismicité en France métropolitaine.

A terme, un modèle communautaire de référence peut être envisagé, qui serve de base à la fois pour les projets de recherche et pour les calculs d'aléa sismique. Enfin, une approche similaire appliquée aux Départements et Territoires d'Outre-Mer est également souhaitée suivant le même schéma communautaire.

Références :

1. Cara, M. & al. (2003), Note préliminaire, Séisme de Hennebont (Morbihan), du 30 septembre 2002, BCSF.
2. Perrot J., & al. (2005), *Geophys. J. Int.*, 162, 935-950.
3. Genti, M., & al. (2016), *Comptes rendus - Geoscience*, 348 (3-4), 173-183, doi:10.1016/j.crte.2015.08.004.
4. Craig, T. J. & al. (2016), *Geophys. Res. Lett.*, 43, 1-11, doi:10.1002/2016GL069359.
5. Cara, M., & al. (2015), *Bull. Soc. Geol. France*, 2015, 186 (1), 3-19, doi:10.2113/gssgfbull.186.1.3.
6. Giardini, D. & al. 2014), *EOS*, 95(29), 261-262.
7. Nguyen, H. N. & al. (2016), *Solid Earth*, 7, 1349-1363, doi:10.5194/se-7-1349-2016.
8. Chardon, D. & al. (2005), *Geology*, 33(11), 901, doi:10.1130/G21713.1.
9. Tarayoun, A. & al. (2018), *Earth Planet. Sci. Lett.*, *subm.*

ACTUALITÉS

Novembre :

- 6-8 IXème biennale du RAP, Lourdes
- 7, EPOS devient Infrastructure Européenne de Recherche
- 12-14 colloque Géodésie et Géophysique, Montpellier

Janvier :

- 14-16 atelier « Modèles et zonages sismotectoniques de la France, Montpellier

Avril :

- 23-26 SSA annual meeting, Seattle

ARTICLE

«Muquans valide son gravimètre quantique», CNRS La Lettre Innovation, oct. 2018

PORTRAIT, Nikolai SHAPIRO

Après l'obtention de sa thèse en 1996 en France, et l'exercice de son activité de recherche en sismologie au Mexique et aux Etats-Unis, Nikolai s'installe à partir de 2005 à l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) où il est directeur de recherche du CNRS.



Il prend la tête (2006-2012) de la Fédération de l'Observation Sismologique Française (FOSFORE), précédant RESIF, et est membre (2006-2015) de ORFEUS (Observatories & Research Facilities for European Seismology) qui est une fédération de réseaux/centres de données sismologiques en Europe. Nikolai s'investit ensuite dans la direction adjointe de l'IPGP et la direction de ses observatoires et de son centre de données. Depuis 2017, Nikolai est membre du bureau RESIF en charge de la prospective scientifique.

Équipe de rédaction : Lydie GUILLEROT (IPGP), Anthony MEMIN (Géoazur, membre du Bureau de RESIF), Anaïs SCHNEIDER (ISTERRE) et Bureau de RESIF.

Adresse courriel : comm@resif.fr

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