

Lettre d'information

Rēsif Réseau sismologique
et géodésique français

n° 17
Janvier 2020





édito

Une nouvelle année tout aussi dynamique que la dernière s'annonce pour Résif, et pour commencer nous vous invitons à découvrir le nouveau format en quatre rubriques « Vie de Résif », « Recherche », « Ingénierie et instrumentation » (absente de ce numéro) et « Évènements » et le nouveau graphisme de la Lettre d'information Résif! Ce numéro contient en particulier la documentation de la forte implication des membres de Résif dans la mission post-sismique suivant le séisme du Teil du 11 novembre 2019.

Ce séisme rare sur le sol métropolitain a créé une ambiance « sismique » lors des 4^e Rencontres scientifiques et techniques de Résif qui ont rassemblé 110 participants à Biarritz, du 12 au 14 novembre. Les présentations orales couvrant des sessions de bilan, mais surtout aussi de prospective Résif, étaient complétées par six ateliers thématiques et des exposés de posters sur les différentes activités au sein de Résif. Trois étudiants ont remporté un prix qui leur permet de participer à un congrès international durant leur thèse.

Le 2 décembre avait lieu le Comité directeur Résif qui a nommé Véronique Bertrand comme responsable de l'Action transverse « communication et valorisation ». Le bureau Résif a présenté l'état des lieux des différentes actions Résif. D'autres points concernaient la sismicité récente en métropole (Le Teil et Strasbourg), la demande d'intégration d'EDF et du Cerema, et l'évolution de la conception du projet PIA « Résif à l'interface Terre-Mer ». Un appel à candidatures a été lancé (et est renouvelé ici) pour compléter le bureau Résif, en particulier sur les aspects *outreach* et valorisation.

Une dernière bonne nouvelle pour Résif est tombée début janvier, l'ouverture d'un appel à manifestation d'intérêt pour un PIA3+ intitulé « Équipements structurants pour la recherche ». N'hésitez pas à rejoindre le comité de rédaction du projet¹ qui foisonne pour présenter un projet porté par la communauté Résif au mois de mai!

Andrea Walpersdorf

Sommaire

Vie de Résif

Mobilisation en Drôme-Ardèche	3
Résif en images, images de Résif	8
Portrait: Aurore Delahayes	8

Recherche

Carte des taux de déformation en métropole	9
--	---

Évènements

La planétologie s'invite au colloque G2 2019	11
Rencontres scientifiques et techniques 2019	12

1. Contact: Jean-Mathieu Nocquet nocquet@geoazur.unice.fr



Mobilisation de la communauté Résif suite aux séismes de novembre dans la Drôme et l'Ardèche

Le 11 novembre 2019 à 11 h 53 les stations sismologiques Résif enregistrent un séisme d'une magnitude supérieure à 5 à proximité de Montélimar. Un analyste de l'Eost à Strasbourg localise le séisme manuellement moins d'une heure plus tard. Il confirme une magnitude de 5,2 Mlv. Les caractéristiques du séisme apparaissent d'emblée remarquables: magnitude élevée et très faible profondeur (2 à 3 km). Ces informations sont confirmées dans le même temps par le travail de relocalisation effectué à ISTerre (Grenoble) et à Géoazur (Nice), où le mécanisme au foyer est validé à partir des données sismologiques Résif, confirmant la direction probable NE-SW¹ de la faille.

Le jour même, la cellule post-sismique nationale est activée et, à partir de ce moment, de nombreux instruments et équipes scientifiques sont mobilisés pour suivre l'évolution de la crise et en déterminer les caractéristiques avec la plus grande précision possible (magnitude, localisation, profondeur, type de mouvement de faille associé, mouvements du sol...).

On constate rapidement une autre caractéristique étonnante de ce séisme: il n'est suivi que de très peu de répliques. En dehors d'une réplique de magnitude 1,5 trois minutes après le choc principal, la première réplique (2,2 MLv) ressentie a lieu le 13 novembre.

Quelques jours après la première secousse, le CNRS initie une mission scientifique spécifique au sein de laquelle des spécialistes du CNRS, d'universités et d'autres organismes vont coopérer pour étudier l'évènement et ses causes.

■ En savoir plus sur les séismes du 11 et du 13 novembre

<https://lc.cx/mKaL> (Cellule post-sismique)

<https://lc.cx/mKab> (Séisme du 11 novembre - Site RéNaSS)

<https://lc.cx/mKaE> (Séisme du 13 novembre - Site RéNaSS)

Suite p. 4

1. Nord-est - Sud-ouest

La cellule post-sismique de l'INSU

Cette cellule est un outil d'aide et de soutien pour la communauté scientifique intéressée par l'étude des séismes majeurs et des processus naturels associés (répliques, ruptures de surface, déformation post-sismique mesurable en surface...). Son rôle est de permettre une meilleure coordination des actions favorisant le bon déroulement des interventions mises en place sur le terrain après l'occurrence des tremblements de terre. Elle a également vocation à servir de relais entre la communauté scientifique impliquée dans les interventions et les organismes de tutelle, en particulier le CNRS-INSU.

La cellule regroupe des scientifiques de différents laboratoires français impliqués dans les études sismologiques, géodésiques et tectoniques en relation avec les tremblements de terre.

Elle est activée pour tout séisme de magnitude supérieure à 5 se produisant en France métropolitaine et pour les forts séismes à l'international susceptibles d'intéresser la communauté scientifique française.

■ En savoir plus

<https://lc.cx/mKaK>



1 - La station TEIL en cours de paramétrisation dans la cave de la mairie par Diane Rivet. Photo : Anne Deschamps



2 - Paramétrage d'une station par Axel Jung (ISTerre) le 13 novembre 2019. Photo : Cécile Cornou



3 - Campagne microtopographique par LiDAR sur la rupture de surface du séisme du 11 novembre 2019 au Teil. Le drone hexacoptère équipé du système LiDAR YellowScan VX (boîtier jaune) à son décollage du Quartier Lebeau au sommet de la Rouvière (commune du Teil). Photo : Marie de Boisvilliers, L'Avion Jaune

Dès les premières heures, des instruments mobiles sont déployés pour couvrir la zone

La zone dans laquelle s'est produit le séisme est peu instrumentée. Il est cependant crucial de disposer d'un maximum de données pour pouvoir comprendre les phénomènes en cours. C'est pourquoi, à peine quelques heures après le séisme, un ingénieur prépare les instruments du parc mobile de l'observatoire sismologique à Géoazur. Deux sismologues quittent Sophia-Antipolis à 17 h avec quatre stations sismologiques, ainsi que les batteries et tout le matériel nécessaire à la mission.

Le soir même elles installent deux stations : l'une au nord de Montélimar, dans un bâtiment de la communauté d'agglomération (départage 21 h), la seconde sur la commune du Teil dans la cave de la mairie (départage 22h30). [Photo 1 -](#)

Les deux sismologues de Géoazur poursuivent l'opération le lendemain et installent deux autres stations, à Saint-Thomé dans une chapelle (départage 10h) et à Alba-La-Romaine (départage 11h15). Elles sont rejointes dans la journée par une équipe grenobloise qui déploie en deux jours cinq

stations sismologiques large-bande, trois accéléromètres et 24 capteurs courte-période (nodes Fairfield) autonomes du parc Résif-SisMob. Certaines de ces stations sont télémétrées, ce qui permet le suivi des répliques et des mouvements forts en temps réel.

[Photo 2 -](#)

L'IRSN installe de son côté trois stations large-bande autour de la zone épiscopale : à Saint-Thomé en colocalisation d'un node installé par l'équipe grenobloise, à Larnas à proximité des locaux techniques de la mairie et à Chateaufort-du-Rhône. L'IRSN relève également les enregistrements effectués par trois stations large-bande localisés à une vingtaine de kilomètres plus au sud dans la zone du Tricastin. Ces stations temporaires étaient installées depuis début novembre et ont donc enregistré le séisme.

Le Cerema installe cinq stations sismologiques avec un capteur vélocimétrique et accélérométrique autour de la zone épiscopale et du village de Saint-Thomé où des effets de site topographiques sont suspectés. Il participe également à l'installation de 4 nodes avec ISTerre dans des bâtiments historiques affectés par le séisme (Château-Lafarge et Tour-Saint-Michel à Vivier) pour mieux comprendre le comportement dynamique

de ces structures. Des mesures de la déformation finie enregistrée par les édifices plus hauts que la moyenne (fissures et autres dommages) sont menées en parallèle de l'enregistrement des répliques par ces bâtiments pour apporter aux études de l'archéosismicité dans la région.

Au total, une quarantaine de stations sismologiques sont installées en moins de cinq jours dans le périmètre intéressant les scientifiques. En complément des données ainsi collectées, EDF met à disposition les données large-bande et accélérométriques de l'une de ses stations dans le secteur de Cruas pour l'événement du 11 novembre ainsi que les répliques principales.

Des prospections géologiques sur les ruptures de surface sont réalisées au sol et depuis les airs

Un groupe de réflexion autour de la thématique « Failles actives » a été créé au sein de l'axe « Aléa » de l'action transverse sismicité Résif en janvier 2019. Il réunit des géologues et des géophysiciens issus de l'académie et de divers organismes dont certains extérieurs à Résif. Son objectif : contribuer, au travers de



4 - Rupture de surface remarquable pour un séisme de magnitude 5, en France. L'ampleur du décalage est faible, de l'ordre de 2 cm. Coordonnées de l'observation sur la photo : 44.5307N - 4.6689E - élévation : 170 m. Photo : Jean-François Ritz

l'étude des failles actives en France, à mieux comprendre les processus qui contrôlent la déformation active et l'aléa sismique.

En savoir plus

www.resif.fr/spip.php?article134

Dans le cadre de cette thématique « Failles actives », une équipe composée de huit scientifiques de quatre structures (Géosciences Montpellier, IRSN, Géoazur, ISTerre) arrive sur la zone le 13 novembre, avant que les potentielles traces en surface de la rupture ne disparaissent du fait des mauvaises conditions météo et de l'activité anthropique. Ils concentrent leur exploration le long d'une discontinuité identifiée grâce aux images satellites radar (InSAR), dont l'analyse est mise à disposition dès le lendemain du séisme (données Sentinel du programme européen Copernicus) sur Twitter.

Au total, l'équipe observe une quinzaine d'indices de ruptures ponctuels distribués sur une longueur de quatre kilomètres, le long d'un segment de faille cartographié mais dont l'activité quaternaire n'avait jamais été constatée sur le terrain. Certains de ces indices sont scannés avec un laser pour quantifier avec précision la déformation du sol. En parallèle de

l'analyse au sol, une campagne de survols LiDAR en hélicoptère et avec drone est réalisée pour tenter de cartographier la rupture de surface sous le couvert végétal qui couvre une grande partie de la zone.

[Photos 3 - 4 - 5 -](#)

Des observations de terrain sont également menées par des géologues lyonnais afin de préciser le contexte géologique et structural du séisme. Ils complètent ces informations par un survol drone pour acquérir des images optiques de la zone qui est susceptible de présenter des ruptures de surface. Dans le même temps, une

Distributed acoustic sensing (DAS)

La mesure distribuée acoustique (DAS) est un dispositif métrologique qui permet de convertir n'importe quelle fibre optique en un réseau dense de capteurs sismo-acoustiques. La multitude de microdéfauts au cœur de la fibre optique va, via le processus de diffusion Rayleigh, renvoyer une fraction du signal lumineux incident vers la source. La phase de ces signaux rétro-propagés est analysée par interférométrie pour mesurer les variations nanométriques de distance entre les défauts. Un système DAS ne mesure donc qu'une seule chose, l'élongation longitudinale de la fibre, mais à l'avantage de pouvoir fournir une mesure tous les mètres sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. Le principe de mesure du DAS est connu depuis les années 1990 mais il a fallu attendre le milieu des années 2000 pour voir les premières applications concrètes, notamment en sismique pétrolière. Depuis 2017, plusieurs études ont démontré le fort potentiel de l'approche même quand elle est appliquée à des fibres télécoms standard, pourtant sans couplage particulier avec le milieu.



5 - L'hélicoptère avec LiDAR embarqué lors de la mission de cartographie de la rupture. Photo : Philippe Hervé Leloup, Laboratoire de géologie de Lyon

mission d'échantillonnage des roches en surface est également effectuée par une équipe de Géoazur afin d'étudier les propriétés frictionnelles et mécaniques.

[Photo 6 - \(page suivante\)](#)

Deux récepteurs GPS sont installés le 15 novembre, effectuant un enregistrement chaque seconde. Ce jour-là, deux autres sites sont repérés pour l'installation de stations. L'installation des quatre stations GPS est finalisée le 3 décembre.

Lundi 18 novembre, une équipe de Géoazur raccorde un système de



6 – Récupération du drone lors de la mission de cartographie de la rupture.
Photo : Philippe Hervé Leloup, Laboratoire de géologie de Lyon



7 – Un expert du groupe d'enquête macrosismique devant un bâtiment endommagé par le séisme sur la commune du Teil. Photo : Marc Schaming (Eost)

mesure DAS (Distributed Acoustic Sensing) à une section de 14 km du réseau fibre optique télécom local², entre Alba-la-Romaine, Saint-Thomé et Valvignières, afin de détecter les secousses sismiques à venir. C'est la première fois en Europe (et la deuxième fois dans le monde) que des mesures de ce type sont faites en réponse rapide à un séisme.

Le Groupe d'intervention macrosismique enquête dans les communes sur l'intensité de la secousse

Contrairement à la magnitude qui est calculée à partir des enregistrements sismologiques, l'intensité de la secousse n'est connue en chaque commune que par l'analyse des effets observables sur les personnes, objets et constructions.

Pour le séisme du Teil, plus de 2000 personnes ayant ressenti la secousse ont répondu à l'enquête sur les effets du séisme via le site www.franceseisme.fr, certains dès les premières minutes, permettant ainsi une estimation préliminaire et rapide de l'intensité de la secousse. Le BCSF-RéNaSS lance dès le 12 novembre une enquête en ligne auprès des mairies des communes potentiellement impactées. Au vu des premiers dommages signalés, le GIM (Groupe d'intervention macrosismique) est activé pour évaluer précisément les intensités EMS98 des communes proches de l'épicentre, à partir des effets du séisme sur les

2. Ligne mise à disposition par le réseau Ardèche-Drôme-Numérique et son exploitant AD-TIM

bâtiments en tenant compte de leur vulnérabilité et des niveaux de dommages constatés.

Sept experts (IRSN, ISTERre/Résif-RAP, Cerema, Pacte, IPGS et Eost/BCSF-RéNaSS) répondent à l'appel et interviennent sur la zone du 18 au 22 novembre. Répartis en équipe de 2 ou 3, ils inspectent au total 24 communes, aidés par les maires ou les services municipaux et accompagnés par les pompiers, comme pour la commune du Teil. Dans la majorité des cas, ils observent des fissures, parfois importantes, ouvertes et nombreuses, mais sur les zones les plus sinistrées comme au Teil et à Viviers, certains bâtiments anciens sont en grande partie effondrés. Parfois, très peu de dégâts sont observés à l'extérieur du bâtiment, alors que la visite à l'intérieur permet de découvrir des dommages importants dans les murs, plafonds et planchers.

Les conclusions de l'enquête macrosismique, intensités EMS98, sont l'un des éléments majeurs sur lesquels se base la commission interministérielle pour le classement des communes en catastrophe naturelle pour une prise en charge des dommages par les assurances. Au vu des dégâts importants de ce séisme, une commission accélérée a lieu le 20 novembre pour statuer sur 9 communes parmi les plus touchées et analysées par le GIM les 18 et 19 novembre, toutes classées en état de catastrophe naturelle. Les 15 autres communes étudiées par le GIM et celles en cours d'analyse par le BCSF-RéNaSS seront traitées par les commissions suivantes.

Les intensités les plus fortes proches de l'épicentre sont de VII au Teil et

à Viviers, atteignant localement VIII à la Rouvière et à Mélas pour deux quartiers du Teil les plus proches de la faille. Il s'agit des intensités les plus importantes constatées en métropole depuis le séisme d'Arrette de 1967.

Photo 7 – Cartographie 8

Les scientifiques étudient les données dans les laboratoires

En parallèle des observations de terrain, des géophysiciens se mobilisent derrière leur écran pour collecter et analyser les données disponibles : exploration des données sismiques, décryptage des images satellitaires d'interférométrie radar, étude des données GPS, identification du mécanisme au foyer, détection des répliques les plus faibles... La connaissance de l'évènement s'affine petit à petit. À Grenoble une équipe organise la distribution des données sismologiques de – et pour – l'ensemble de la communauté.

Les collègues géologues viennent en renfort pour préciser le contexte structural du séisme. Le laboratoire de géologie de Lyon fournit une coupe géologique de la zone proche de rupture du séisme (2,7 km au sud) et débute un travail de cartographie géologique détaillée.

Une équipe pluridisciplinaire de l'Université de Grenoble-Alpes lance une

étude en ligne pour comprendre les réactions des personnes aux effets du séisme du Teil le 11 novembre 2019. Cette étude anonyme a pour objectif d'améliorer la prévention face aux tremblements de terre.

À Géoazur et ISTERre, des simulations du mouvement sismique sont lancées pour mieux comprendre les origines de ce séisme aux caractéristiques fort inusuelles.

Des chercheurs, ingénieurs et techniciens de disciplines très variées apportent leur concours pour une heure, un jour, ou sur le long terme.

Aux micros des médias

Le 12 novembre, lendemain du séisme, une grande partie de la communauté Résif se réunit pour trois jours à Biarritz dans le cadre de Rencontres scientifiques et techniques qui se tiennent tous les deux ans. Si certains scientifiques ont annulé leur venue pour se rendre sur le terrain ou coordonner les opérations, nombre de participants ont été sollicités par les médias pour commenter l'évènement et apporter leur expertise.

Afin de répondre au mieux aux multiples sollicitations, la mission d'expertise scientifique initiée par le CNRS prend en charge la communication avec les médias quelques jours après le séisme.

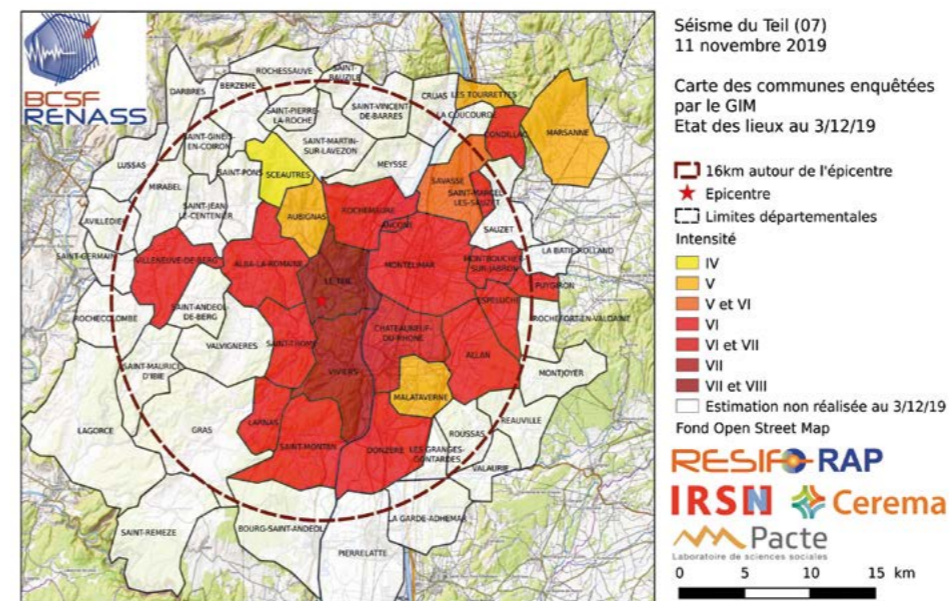
Plus d'une centaine d'articles et reportages sont consacrés à ces événements dans la presse régionale et nationale. Le séisme attire aussi l'attention des médias internationaux, comme le National Geographic.

■ <https://lc.cx/mKVo>

Conclusion

La rapidité et l'efficacité des interventions sur le terrain ont été possibles grâce à l'implication des ingénieurs et chercheurs des observatoires et autres organismes, coordonnés par la cellule post-sismique, mais aussi grâce aux pratiques coopératives qui se sont développées au sein de Résif au fil des années. L'action transverse sismicité a également permis la mobilisation rapide d'une équipe pluridisciplinaire grâce aux collaborations initiées ces dernières années, y compris avec des scientifiques extérieurs à Résif.

■ Les photos de terrain des missions post-sismiques sont disponibles en format HD sur l'archive ouverte HAL-Résif : <https://hal.archives-ouvertes.fr/RESIF>



8 – Carte des intensités EMS98 estimées par le GIM suite au séisme du Teil du 11 novembre 2019. Cartographie : Elise Beck, Pacte-Grenoble

Ont participé aux actions d'analyse ou de terrain

BRGM (Orléans) Michalis Foumelis Marcello de Michele	Antoine Mercier Daniel Mata Elif Oral
CEA-LDG (Bruyères-le-Châtel) Marine Menager Aurélien Trilla	Fabrice Peix Diane Rivet Anthony Sladen Huihui Weng
Cerema (Sophia-Antipolis) Etienne Bertrand Philippe Langlaude Diego Mercerat Michel Pernoud Julie Regnier	Géosciences Montpellier Mathieu Ferry Jeff Ritz Philippe Vernant
Laboratoire de géologie de Lyon (LGL-TPE) Pascal Allemand P. Grandjean C. Lasserre Philippe Hervé Leloup L. Marconato M. Métois	CNRS-INSU (Paris) Nicolas Arnaud Stéphane Guillot Eric Humler
Laboratoire de géologie de l'ENS Paris Pierre Briole Romain Jolivet	IPGP (Paris) Raphaël Grandin Claudio Satriano
L'Avion Jaune Marie de Boisvilliers	IRSN (Fontenay-aux-Roses) Stéphane Baize Bérénice Froment Céline Gelis Sébastien Hok Hervé Jomard Ludmila Provost Rihab Sassi
Eost (Strasbourg) Remi Dretzen Marc Grunberg Alain Hernandez Marc Schaming Antoine Schlupp Christophe Sira	ISTerre (Grenoble) Coralie Aubert Laurence Audin Florent Brenguier Mathieu Causse Mohamed Chlieh Andy Combey Cécile Cornou Isabelle Douste-Bacque Estelle Hannouze Axel Jung Mickaël Langlais Emeline Maufroy Catherine Pequegnat Ildut Pondaven Anne Socquet Christian Sue Benjamin Vial Christophe Voisin Andrea Walpersdorf David Wolyniec
Géoazur (Sophia-Antipolis) Jean-Paul Ampuero Jérémy Billant Didier Brunel Olivier Cavailé Jérôme Chèze Françoise Courboulex Bertrand Delouis Anne Deschamps Martijn van den Ende Tiziano Giampietro Maxime Godano Gauthier Guerin Christophe Larroque Chao Liang Itzhak Lior Xavier Martin	Pacte Grenoble Elise Beck TerraDue (InSAR) Emmanuel Mathot

Résif en images, images de Résif

Le plan de communication Résif 2019-2022, validé en juin 2019 par le comité de direction, est en cours de déploiement. Il vise notamment à améliorer la visibilité et la connaissance de Résif au sein de la communauté scientifique et à sensibiliser le grand public et les scolaires aux thématiques Résif.

La première phase de son application se déroule jusqu'à la fin de l'année 2020. Elle permettra de reposer les bases de la communication de l'infrastructure et de créer une boîte à outils pour tous les acteurs Résif.

Deux actions ont été engagées en priorité: la modernisation de la charte graphique pour tous les supports (web et imprimés) ainsi que la réalisation d'une vidéo de présentation en français et en anglais. Cette vidéo de quatre minutes, destinée tout autant à la communauté scientifique qu'au grand public, présente l'infrastructure, ses objectifs et ses acteurs.

- En français: <https://vimeo.com/379752104> ou <https://www.youtube.com/watch?v=8cwZ4Tks-PE>
- En anglais: <https://vimeo.com/379750908> ou <https://www.youtube.com/watch?v=dJYzVvpzXgg>

La refonte de la charte graphique a été confiée à une graphiste professionnelle¹. Elle a modernisé le logo Résif et élaboré une nouvelle identité graphique pour les supports de communication: plaquette de présentation (disponible uniquement en français à ce jour) et Lettre d'information notamment.

Logo 1 – Plaquette 2 –

Épaulée par une designer web², cette graphiste travaille par ailleurs sur le design du futur site web Résif, qui fait l'objet d'une réflexion engagée durant l'été 2019. L'équipe de projet, composée de membres de la communauté Résif³, a défini l'arborescence du futur site et choisi l'outil. Elle travaille actuellement à l'élaboration des contenus, en cohérence avec les autres sites du domaine resif.fr.

La constitution de la collection HAL-Résif participe également au renouvellement de la communication Résif, en mettant à disposition de tous une archive ouverte de photos, vidéos, posters et autres documents illustrant les activités au sein de Résif. Elle constitue une ressource utile pour la communauté scientifique et éducative, les médias, les particuliers. C'est également une photothèque gratuite et fiable pour l'ensemble de la communauté Résif.

1. Céline Emonet, communication graphique et signalétique - courriel@celine-emonet.fr
 2. Isabelle Mainier, interactive design & motion - isabelle@i-za.net
 3. Groupe de projet: Véronique Bertrand (Strasbourg, coordinatrice), Stéphanie Beaunay et Mickaël Bonnin (Rennes), Sébastien Benhamed (Toulouse), Laurent Stehly (Grenoble), rejoints par Aurore Delahayes (Paris), Jean-Luc Menu et Lucie Rolland (Nice)



1 – 2 – Nouveau logo et plaquette Résif



Aurore Delahayes sur le cratère du volcan Stromboli en 2017.

Portrait Aurore Delahayes

Issue d'un double cursus en volcanologie et en archéologie, Aurore Delahayes a lié les deux domaines à travers une thèse au LPG de Nantes soutenue en 2012, prolongée d'un post-doc au CRPG de Nancy en collaboration avec Saint-Gobain Recherche. Après quelques années en tant qu'ingénieure en bureau d'études, en prospection géophysique et topographie dans les travaux publics, pour le compte de clients tels qu'Enedis, GRDF, ou encore la Société du Grand Paris, elle a souhaité transmettre son expérience par l'enseignement auprès d'enfants, d'adolescents et d'étudiants-ingénieurs.

Elle a rejoint le CNRS en septembre 2019, comme chargée de projets au sein de l'INSU et contribue au pilotage de projets tels que Résif. En tant que Project manager officer, elle accompagne ainsi les scientifiques de la communauté Résif dans leurs échanges avec les services administratifs du CNRS, propose un soutien à l'organisation d'événements ou de réunions et participe au suivi administratif, contractuel et financier de l'infrastructure.

Première carte des taux de déformation à l'échelle de la France Métropolitaine

Tout le monde a en tête l'image du tremblement de terre de 2011 au Japon, entraînant l'accident nucléaire de Fukushima. Cet événement illustre parfaitement le lien entre gestion du risque naturel et enjeux socio-économiques dans les pays industrialisés. La France est le 2^e pays au monde ayant le plus de réacteurs nucléaires. Cependant le contexte géodynamique est très différent de celui du Japon car ce dernier se trouve à proximité d'une frontière de plaque très active. Au niveau mondial, environ 90 % de l'énergie sismique est relâchée au niveau des frontières de plaques (Scholz, 2002). La France, quant à elle, est considérée comme un domaine intraplaque appartenant à la grande plaque Eurasienne jugée stable. Les séismes forts (Magnitude > 6) y sont très rares mais pas inexistantes (Jomard et al., 2017). Il y a toutefois une sismicité faible à modérée présente à travers le territoire. (Fig. 1)

L'étude de la géodynamique actuelle de la France est donc un enjeu scientifique et socio-économique important. Pour étudier et quantifier la déformation, l'analyse des séries temporelles de positions obtenues à partir de données GNSS a fait ses preuves dans les zones de déformation rapide, mais reste en limite de résolution dans les zones de déformation lente. Cette limite de résolution, équivalente au niveau de bruit dans les mesures, est liée à la dispersion des positions quotidiennes estimées. Le bruit est dû, entre autres, aux orbites des satellites, à la météo et aux caractéristiques propres à la station. Ainsi, le principal problème qui se pose est de pouvoir discriminer le signal de déformation par rapport au bruit intrinsèque de la méthode.

La déformation actuelle dans les Alpes et les Pyrénées a pu être partiellement identifiée dans de précédentes études (Rigo et al., 2015, Nocquet et al., 2016, Walpersdorf et al. 2018), mais pour le reste du territoire, la

densité et les durées d'opération des stations GNSS restaient trop faibles. La quantification précise des taux de déformation en France est l'objectif principal du service national d'observation Résif-RENAG (Réseau national GNSS). Le travail de thèse de Christine Masson à Montpellier s'est intégré dans cette thématique et a donc consisté à mettre en place des méthodologies afin de pouvoir

(réseau RGP), puis enrichi par les réseaux commerciaux (par exemple: Orpheon, Teria ou SatInfo). La quantification de la résolution de chacune des stations a été réalisée grâce à l'utilisation de données synthétiques. L'avantage des données synthétiques, à la différence des données réelles, est que l'on connaît la vitesse réelle des sites et qu'ainsi on peut estimer la déviation entre l'estimation et la vitesse

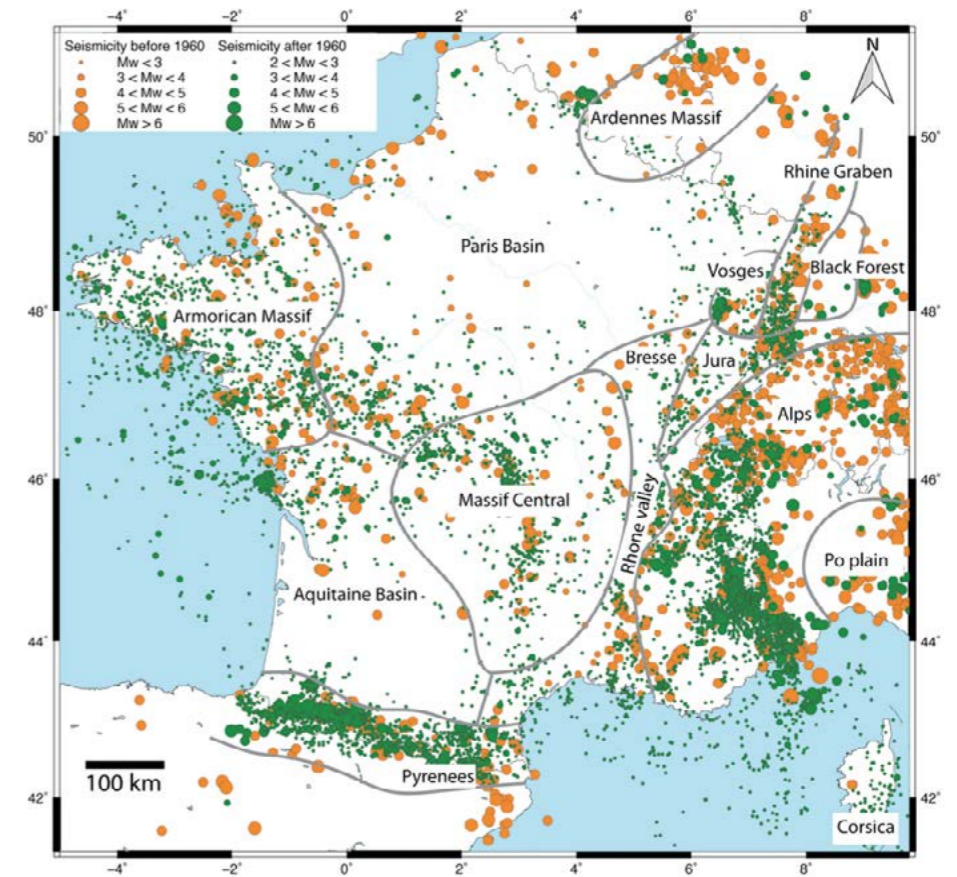


Figure 1 – Sismicité de la France, instrumentale en vert et historique en orange (catalogues SHARE et SI-Hex). (Masson et al., 2019b)

quantifier de manière robuste et statistique la déformation pour l'ensemble du territoire métropolitain. Ce travail a été possible grâce à la maturité du réseau de stations GNSS permanentes, d'abord développé par la communauté scientifique depuis 20 ans (Résif-RENAG) et par l'IGN

vraie. Cela revient à quantifier la limite de précision de notre analyse en fonction des caractéristiques de chaque série temporelle (pour plus de détails, Masson et al., 2019a). Les résultats ont montré que, pour des stations de plus de 8 ans, la précision sur la vitesse atteint 0,2 mm/a

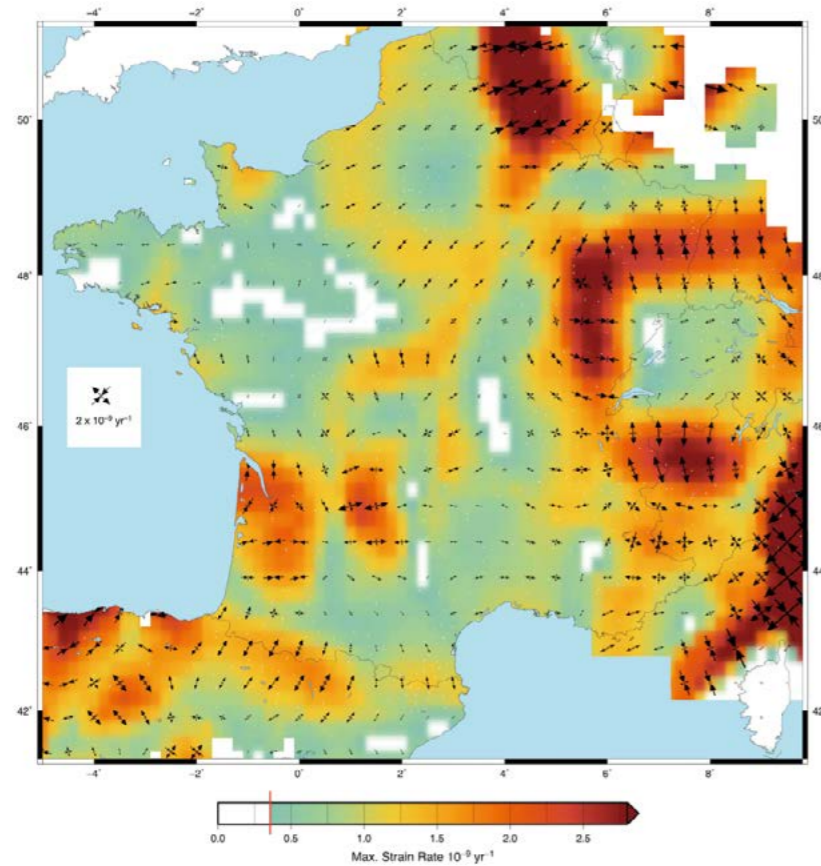


Figure 2 – Taux de déformation horizontale de la France. (Masson et al. 2019b)

pour les composantes horizontales. Mais, pour aller plus loin, Christine Masson a cherché à vérifier si une cohérence spatiale existe dans le champ de vitesses obtenu. Pour assurer des résultats robustes, elle a utilisé deux méthodologies indépendantes dont les performances ont été quantifiées statistiquement et qui fournissent des résultats proches. Ce travail de thèse a permis de fournir la première carte de taux de déformation pour l'ensemble du territoire métropolitain français (Fig. 2) et de quantifier la confiance sur les taux de déformation obtenus (plus de détails, Masson et al., 2019b).

Sur la figure 2, plusieurs choses sont remarquables :

- On retrouve et améliore la caractérisation de la déformation en extension, mise en évidence par de précédentes études, dans les Alpes et les Pyrénées (Rigo et al., 2015, Nocquet et al., 2016, Walpersdorf et al., 2018).

- Plusieurs zones ne présentant quasiment pas de sismicité (Fig. 1), présentent une déformation importante, notamment au niveau des Bassins Aquitain et Parisien. Cette remarque entraîne de nouveaux questionnements sur l'origine de cette déformation. Est-elle tran-

sitoire? Est-elle liée à l'exploitation des ressources naturelles par l'Homme?

- Un autre exemple de zone remarquable est la Bretagne, où, pour la première fois, nous sommes capables de quantifier une faible déformation en extension compatible avec la tectonique long terme et la sismicité de la région (Mazabraud et al., 2005).

À l'heure actuelle, ce travail ne permet pas de répondre de manière directe aux questions de sécurité industrielles, mais il a permis de débloquent certains verrous scientifiques liés à la résolution des méthodes géodésiques. Il est maintenant important d'aller plus loin et d'utiliser ces résultats pour contraindre les calculs d'aléa sismique. Par exemple, en 2019 un travail a été mené, en partenariat avec l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) afin d'intégrer les données GNSS dans les modèles de sismicité.

Christine Masson, Philippe Vernant et Stéphane Mazzotti
(Géosciences Montpellier)

Contact: gns@oreme.org

Bibliographie

- Masson C., Mazzotti S. and Vernant P., "Precision of continuous GPS velocities from statistical analysis of synthetic time series". *Solid Earth*, 10(1), 329–342, <https://www.solid-earth.net/10/329/2019> (2019a).
- Masson C., Mazzotti S., Vernant P. and Doerflinger E., "Extracting small deformation beyond individual station precision from dense GNSS networks in France and Western Europe". *Solid Earth Discuss.*, 1–34, <https://www.solid-earth.net/10/1905/2019> (2019b).
- Jomard H., Cushing E. M., Palumbo L., Baize S., Davi, C., & Chartier T., "Transposing an active fault database into a seismic hazard fault model for nuclear facilities - Part 1: Building a database of potentially active faults (B DFA) for metropolitan France". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(9), 1573-1584 (2017).
- Mazabraud Y., Béthoux N., Guilbert J., & Bellier O., "Evidence for short-scale stress field variations within intraplate central-western France". *Geophysical Journal International*, 160(1), 161-178 (2005).
- Nocquet J. M., Sue C., Walpersdorf A., Tran T., Lenôtre N., Vernant P., Cushing M., Jouanne F., Masson F., Baize S., Chery J., van der Beek P., "Present-day uplift of the western Alps". *Scientific reports*, 6, 28404 (2016).
- Rigo A., Vernant P., Feigl K. L., Goula X., Khazaradze G., Talaya J., Morel M., Nicolas J., Bayse S., Chéry J., Sylvander M., "Present-day deformation of the Pyrenees revealed by GPS surveying and earthquake focal mechanisms until 2011". *Geophysical Journal International*, 201(2), 947-964 (2015).
- Scholz C. H., "The Mechanics of Earthquakes and Faulting, 2nd ed.", Cambridge University Press, Cambridge (2002).
- Walpersdorf A., Pinget L., Vernant P., Sue C., Deprez A., and the RENAG team, "Does Long-Term GPS in the Western Alps Finally Confirm Earthquake Mechanisms?". *Tectonics*, 37, <https://doi.org/10.1029/2018TC005054> (2018).

La planétologie s'invite au colloque G2 2019

Tour d'horizon des applications planétaires de la géodésie et la géophysique

Le colloque annuel 2019 du groupe G2 « Géodésie – Géophysique » s'est tenu à l'École supérieure d'ingénieurs géomètres et topographes située au Mans, du 20 au 22 novembre 2019. Cette édition 2019 a accueilli une session particulièrement appréciée par les congressistes, consacrée aux applications de la géodésie et la géophysique pour l'étude des autres planètes et des petits corps du système solaire. Bien que l'étymologie des termes « géodésie » (diviser, partager la Terre) et « géophysique » (physique de la Terre) renvoie à la seule étude de notre planète Terre, les applications planétaires de ses dernières constituent actuellement un panel d'outils d'investigation essentiel au service de la planétologie comparée.

Comme l'explique Pascal Rosenblatt du Laboratoire de planétologie et géodynamique de Nantes (UMR CNRS 6112) et animateur de cette session aux côtés de Joëlle Nicolas du Laboratoire « Géomatique et foncier » (EA Cnam 4630), la géodésie spatiale est la méthode d'investigation la plus utilisée pour la structure interne des planètes telluriques du système solaire et de ses petits corps. Cette méthode utilise des satellites artificiels, orbitant autour des planètes, dont la trajectoire est suivie de façon minutieuse grâce à la mesure du décalage Doppler

de la fréquence d'un lien radiofréquence entre ces satellites et la Terre. L'orbite des satellites martiens de la NASA a été rendue avec une incertitude de 2 m à partir de ces mesures de poursuite Doppler (notamment traitées à l'aide du logiciel GINS, Géodésie par intégrations numériques simultanées du CNES). Le champ de gravité martien a été restitué avec une résolution de 110 km, ainsi que ses variations saisonnières et le potentiel de marée via les nombres de Love. Si le satellite en orbite embarque également un altimètre laser comme dans le cas de la Lune avec LRO, il devient possible de déterminer les déformations de la surface dues aux marées.

La technique du lien radiofréquence peut également s'appliquer pour restituer le champ de gravité en mesurant les variations de distance entre deux satellites en orbite. Ce principe, déjà mis en œuvre sur les missions GRACE pour la Terre, a été appliqué à la Lune avec la mission GRAIL aboutissant à une résolution spatiale de 25 km. Forte des avancées récentes sur la technologie des nano-satellites de type « CubeSat », la mission BIRDY de l'IMCCE étudie la technique du lien radiofréquence pour

Suite p. 12

Opportunités d'expérience de radio-science sur les missions à venir

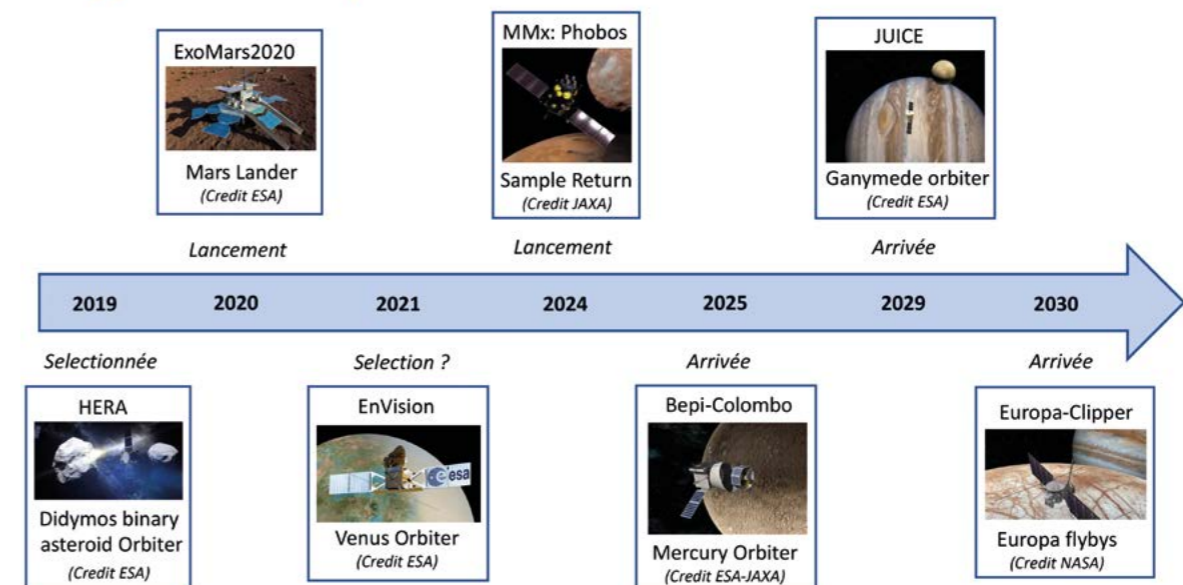


Figure 1 – Chronologie de la sélection et du lancement de missions de géodésie spatiale dédiées à l'étude du système solaire. Infographie: Pascal Rosenblatt



l'étude de la structure interne des petits corps du système solaire. La perturbation mesurée dans ce cas est celle de la trajectoire du nano-satellite lors de son survol de l'objet.

Lorsque la planète dispose d'atterrisseurs à sa surface comme Mars avec les récentes missions InSight (Nasa, 2018) et ExoMars (ESA/RosCosmos, 2020), la technique radio-science permet de mesurer son mouvement propre (variations de sa vitesse de rotation et de l'orientation de son axe de rotation dues à la précession, aux nutations et librations). Les missions InSight et ExoMars ont été dotées des transpondeurs radiofréquences RISE (Rotation and interior structure experiment) et LaRa (Lander radioscience) dans ce but. Exemple en termes d'instrumentation, InSight embarque également le sismomètre de grande sensibilité SEIS, qui est utilisé comme gravimètre en vue d'étudier *in situ* la marée induite par Phobos.

L'exploitation pour la géophysique des produits de la géodésie s'appuie sur l'analyse conjointe des modèles de champ de gravité et des nombres de Love. Elle conduit à des estimations de la taille et de l'état physique du noyau, de la viscosité du manteau, de l'épaisseur de la croûte et de la lithosphère, des transferts de masse dans l'atmosphère qui sont très utiles pour répondre aux questionnements sur la formation et l'évolution des planètes et de leurs atmosphères. Le dynamisme de la géodésie spatiale est soutenu par le nombre croissant de missions programmées dans les agences spatiales du monde entier et la variété des objets d'étude (Fig. 1). Nul doute que des avancées déterminantes sur la compréhension de notre système solaire viendront de cette science passionnante.

Jérôme Verdun,
Pascal Rosenblatt,
Joëlle Nicolas

4^e Rencontres scientifiques et techniques Résif

La quatrième édition des Rencontres scientifiques et techniques Résif s'est déroulée à Biarritz du 12 au 14 novembre. Elle a réuni une centaine de personnels des observatoires et laboratoires membres du réseau, pour un état des lieux de l'infrastructure, des présentations d'instruments, de recherches et de résultats, des ateliers et des posters. Ces rencontres sont une occasion unique pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens d'échanger avec leurs collègues de toute la France sur leurs pratiques, d'initier des collaborations et d'entretenir les relations conviviales indispensables au bon fonctionnement de l'infrastructure.

■ En savoir plus

Le programme détaillé et les présentations sont disponibles sur le site web des rencontres : <https://rst-resif-19.sciencesconf.org>



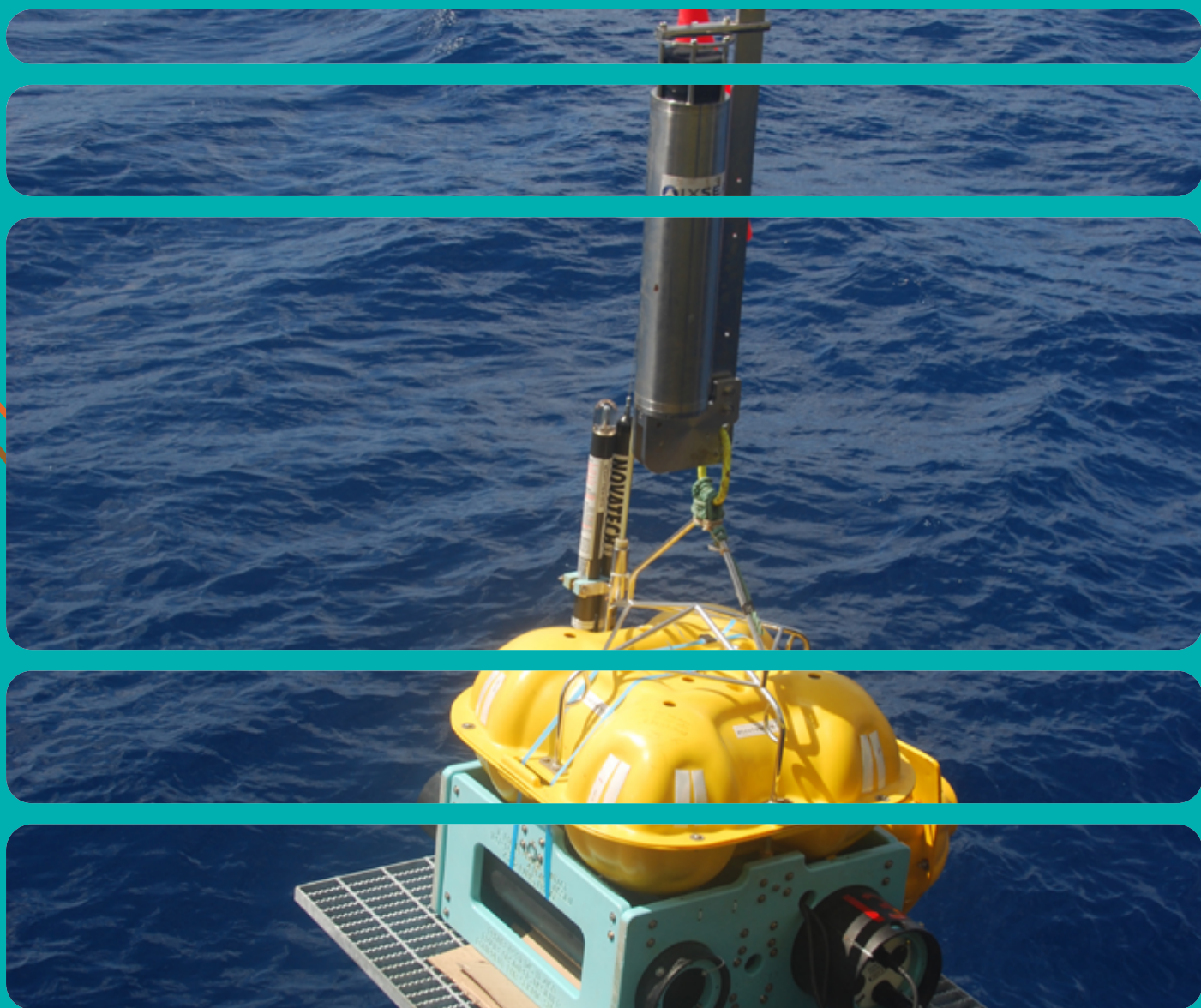
Image de couverture :
Rupture de surface remarquable pour un séisme de magnitude 5, en France. L'ampleur du décalage est faible, de l'ordre de 2 cm.
Coordonnées de l'observation sur la photo : 44.5307N - 4.6689E - élévation : 170 m.
Photo : Jean-François Ritz

Directrice de la publication :
Andrea Walpersdorf
Responsable éditoriale :
Véronique Bertrand
Design graphique :
Céline Emonet
Impression :
Groupe Car, Strasbourg
© Résif 2020

Lettre d'information

n° 18
Décembre 2020

Rēsif Réseau sismologique
et géodésique français





édito

Sommaire

Vie de Résif

Résif prend le large avec Marmor	3
Campagnes de mesure à Mayotte	5

Recherche

Séisme du Teil, un an après	6
Origine de la sismicité en métropole	7
Géothermie profonde et séismes à Strasbourg	8
La mesure acoustique distribuée (DAS)	9

Ingénierie et instrumentation

Dernière campagne de forages du projet CLB	11
Projet Alparry : trois ans de mesures	12
Yasmine version 2 : outil pour la communauté	13
Plateformes instrumentales sismologiques	14
Boîtier de protection pour les capteurs du Rap	15

Évènements

Agenda	16
Rencontres scientifiques et techniques 2021	16

Un printemps perturbé pour les activités Résif

Résif n'a pas échappé aux perturbations et au ralentissement général induits par la crise sanitaire et par le confinement qu'elle a entraîné au printemps dernier.

Plusieurs événements qui devaient réunir la communauté ont dû être reportés, comme le workshop "Sigma2-Résif" qui devait se tenir en juin (reporté d'une année), ou encore la Biennale du Rap reportée de nov. 2020 à avril 2021. L'assemblée générale annuelle du Renag/GPSmob, prévue au mois de mai 2020, a été annulée.

Toutes les missions de terrain ont été mises à l'arrêt, comme les mesures semi-permanentes du Renag ou la jouvence et l'installation de nouvelles installations du Réseau accélérométrique permanent. Le projet de construction large bande permanent a également interrompu, pendant trois mois, les tests de sites, la construction de stations (forage, adduction, des autres travaux d'infrastructure) et l'installation d'équipements scientifiques et techniques. La mission de caractérisation des stations Rap aux Antilles été stoppée. Le rapatriement des personnels, difficile, s'est déroulé sur 7 à 10 jours.

Le bilan est cependant plutôt positif côté acquisition des données car, malgré la longue interruption de la maintenance des stations, aucune panne critique ne s'est produite et la collecte a pu se poursuivre sans interruption sur toute la période de confinement. Le travail d'automatisation, de gestion à distance et de consolidation des stations de mesure mené par les équipes de Résif a donc payé !

La gestion courante a, elle, été compliquée par la nécessité de s'adapter à l'évolution rapide et incertaine de la situation, en lien avec des services administratifs eux-mêmes à l'arrêt ou en fort ralentissement et avec des outils numériques de communication parfois saturés. Il a fallu par exemple réorienter des crédits de la mission Rap aux Antilles en urgence pour rapatrier personnels et matériel. Pendant et après le confinement, les échéances financières des contrats ont dû être reportées et le calendrier administratif bousculé.

D'un autre côté, le ralentissement de l'activité courante et le calme du confinement ont permis à certains de se consacrer à des tâches négligées en temps normal, faute de temps, ou de travailler plus sereinement loin de l'agitation habituelle. En particulier, l'équipe de rédaction du projet PIA3+ de Résif a pu s'investir sans retenue dans sa tâche de réaliser une proposition communautaire qui situera notre infrastructure de recherche à la pointe des techniques observationnelles pour la décennie à venir.

La seconde période de confinement décrétée par le gouvernement depuis le 30 octobre ramène certaines difficultés et pose de nouveaux défis que la communauté Résif s'attache à relever, en commençant par la publication de cette Lettre d'information et en gardant en ligne de mire les prochaines Rencontres Résif en novembre 2021 !

Andrea Walpersdorf



Résif prend le large avec Marmor

Si les océans sont au cœur des enjeux sur le changement climatique ou la biodiversité, ils sont aussi le siège de processus telluriques essentiels de la dynamique interne de notre planète. Ils sont également la source d'aléas telluriques (séismes, volcans, glissements de terrain) impactant les côtes et la population croissante qu'elles hébergent.

Le projet Marmor (Marine Advanced geophysical Research equipment and Mayotte multidisciplinary Observatory for research and Response), soumis à l'appel d'offre PIA3-ESR-Equipex+2¹ se propose de construire les éléments d'une infrastructure communautaire pour étudier les aléas telluriques, imager les structures de la Terre et répondre aux défis émergents dans le domaine des sciences de l'environnement, de l'océan et du climat.

Au cours de la dernière décennie, l'Infrastructure de Recherche Résif a offert un cadre à la communauté nationale, lui permettant de moderniser et développer les observations géophysiques à terre. Étendre cette démarche et l'expérience de Résif sur les 70% marins de notre Planète est un des défis majeurs pour notre communauté dans les prochaines décennies.

Objectifs scientifiques en Terre Solide et au-delà

Les objectifs scientifiques de Marmor sont tout d'abord la caractérisation de la déformation et de la sismicité aux frontières de plaque, l'étude des processus physiques menant à l'occurrence des grands séismes et leur relation avec la génération de tsunamis. Le second objectif est l'étude des phénomènes gravitaires sous-marins qui constituent des menaces locales importantes pour les

populations côtières et infrastructures sous-marines. Un troisième objectif de Marmor est la compréhension des dynamiques volcaniques et la surveillance de la crise sismo-volcanique à Mayotte, en construisant un observatoire permanent sous-marin câblé relié en temps-réel à Petite-Terre. Enfin, Marmor a pour objectif également l'imagerie fine de la structure interne de la Terre depuis les premiers kilomètres (nécessaires pour comprendre la circulation des fluides, la stabilité de hydrates de gaz stockés dans les sédiments marins), jusqu'aux échelles lithosphériques et mantelliques pour comprendre les processus géodynamiques.

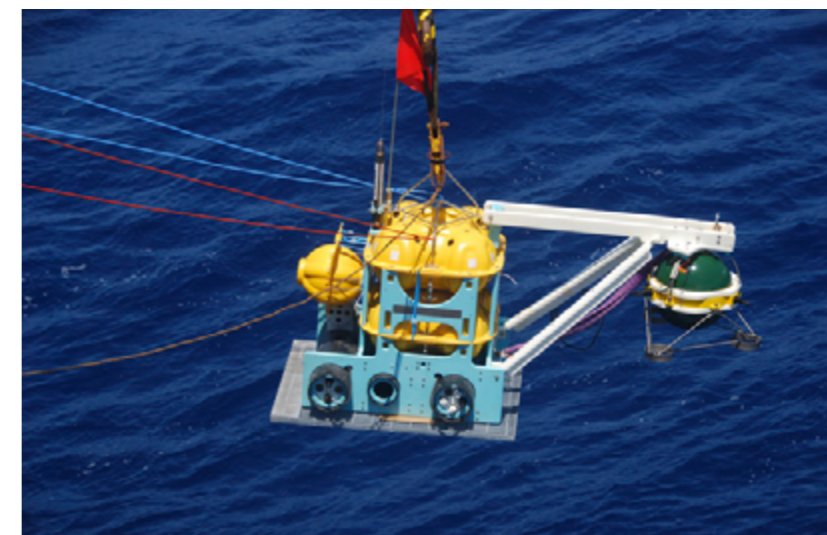
En dehors du domaine de la Terre Solide, l'infrastructure ouvrira de nouvelles perspectives sur les interactions entre hydrosphère et tectosphère, sur les variations absolues et relatives du niveau marin, sur la dynamique océanique à différentes échelles de temps (houle, ondes internes, bilans de masse). Elle permettra des études sur le suivi des mammifères marins à partir d'enregistrements acoustiques, les phéno-

mènes de dégazage en fond de mer et contribuera à évaluer les impacts anthropiques en mesurant la pollution sonore des océans.

Enfin, au-delà des études fondamentales, l'infrastructure améliorera le suivi opérationnel des crises sismiques ou volcaniques impactant le territoire national, comme la crise sismo-volcanique en cours au large de Mayotte, pour laquelle le projet propose de mettre en place un observatoire permanent de fond de mer relié à la terre par un câble sous-marin.

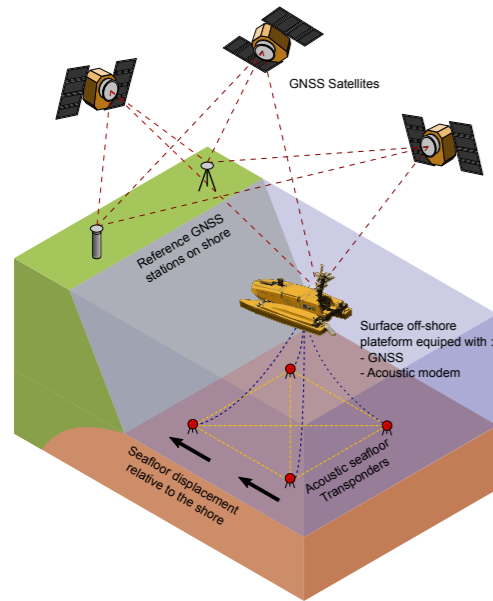
Un projet par et pour la communauté

Le projet Marmor vise à répondre aux besoins de la communauté des Géosciences marines, parmi lesquels s'inscrit, notamment, le suivi long-terme de la crise sismo-volcanique à Mayotte. Il s'est construit sur une consultation auprès de la communauté scientifique nationale et des organismes partenaires, menée depuis 2017 à travers des journées thématiques et des ateliers comme celui organisé pendant les journées



2- Déploiement d'un sismomètre fond de mer (OBS) large-bande du parc INSU lors de la campagne Rhum-Rum sur le navire océanographique Marion-Dufresne. Crédits : W. Crawford, IPGP.

1 <https://lc.cx/IrLDCfSAB>



2- Schéma de principe du positionnement GNSS/Acoustique. Crédits : Pierre Sakic, LIENSS, La Rochelle et GFZ, Potsdam

Résif à Biarritz en 2019. Le projet a aussi réalisé une analyse critique des interventions menées en mer à la suite de crises telluriques depuis une vingtaine d'années et des infrastructures similaires dans le monde pour définir les équipements à acquérir et leurs modalités de mise en œuvre. Enfin, Marmor s'appuie sur un tissu industriel français favorable et dynamique pour les développements technologiques, notamment en positionnement acoustique précis, communication sous-marine, électronique fiable et basse consommation, ou encore technologies de fibre optique.

L'ensemble des données acquises dans le cadre du projet Marmor sera validé, archivé et distribué via un système d'information à construire à partir du système d'information Résif.

Un large consortium

Le projet regroupe toutes les entités françaises impliquées dans les géosciences et les activités marines et une grande partie des partenaires du consortium Résif. C'est l'Ifremer qui porte le projet. Le CNRS est partenaire principal à travers ses laboratoires, sa direction technique et les observatoires en sciences de l'Univers. L'IPGP, l'IRD, le BRGM et l'Oca sont partenaires. Plusieurs instituts soutiendront le projet par une implication en personnel (Shom, Cnes, IGN, IRSN, Ifsttar, CEA, ESGT), ainsi que les universités UBO-Brest, UCA-Nice, LRU-La Rochelle, UGA-Grenoble, l'Eseo² et le Centre pour l'éducation et la recherche à Mayotte. Le projet s'appuiera sur l'expérience de l'infrastructure Résif-Terre et l'intégration réussie du nœud A "marin" pour la validation et la mise à disposition des données de sismologie fond de mer pour la communauté.

Valérie Ballu, Jean-Mathieu Nocquet

² <https://eseo.fr>

Le projet Marmor est structuré en cinq axes

Axe 1 : Géodésie sous-marine

L'objectif ici est de réaliser l'investissement initial permettant la réalisation d'opérations de géodésie sous-marine. Pour que notre communauté puisse acquérir ces techniques nouvelles, des expériences seront entreprises à Mayotte et en mer Ligure en synergie avec l'infrastructure de recherche Emso¹. L'équipement envisagé comprend un drone de surface équipé pour réaliser les mesures de GNSS/Acoustique², un parc de balises acoustiques fond de mer autonomes, et des capteurs de pression pour la détermination pluri-annuelle en continu des mouvements verticaux du fond océanique.

Axe 2 : Réponse rapide aux crises sismiques et volcaniques

Un parc mixte, mobilisable à tout moment, de sismomètres fond de mer légers, d'hydrophones autonomes avec lien satellites, de capteurs de pression, tous déployables à partir de navires d'opportunité permettront des interventions en quelques jours pour suivre l'évolution de la sismicité et de la déformation.

Axe 3 : Régénération des parcs de sismomètres fond de mer (OBS)

Des OBS courtes périodes permettront des projets ambitieux d'imagerie par sismique active. Un nouveau parc d'OBS multi-capteurs compacts, d'hydrophones dérivants autonomes, l'intégration de nouvelles technologies pour dix OBS très large-bande ainsi que la rénovation du parc d'hydrophones sur mouillage permettront les études de la sismicité, de tomographie, de la dynamique océanique, de suivi des mammifères marins, de la pollution sonore des océans.

Axe 4 : Recherche et développement en fibre optique

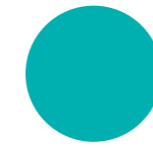
Les applications des fibres optiques présentent un fort potentiel pour l'observation permanente en mer, en permettant des mesures distribuées denses ou en permettant de déporter l'acquisition à terre de capteurs en mer. Cet axe inclut l'acquisition d'interrogateurs de type DAS pour l'observation permanente en mer Ligure et des campagnes d'opportunité, la recherche et développement requise pour des systèmes d'interférométrie Fabry-Perot et une nouvelle génération d'extensomètres.

Axe 5 : Observatoire sous-marin au large de Mayotte

En réponse à la crise sismo-volcanique en cours depuis mai 2018 au large de l'île de Mayotte et dans le contexte du nouvel observatoire volcanologique Revosima², le projet prévoit le développement du premier observatoire sous-marin en Europe pour le suivi permanent, continu, long-terme de l'activité sismique et des déformations. L'infrastructure comportera un réseau de câbles électro-optiques et optiques pour un suivi temps réel. Cette infrastructure fournira aussi l'opportunité d'un suivi géochimique, biologique et écologique.

¹ European Multidisciplinary Seafloor and Water Column Observatory : https://lc.cx/4Po_FD0z4

² Réseau de surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte : <https://lc.cx/x-zsiEBoC>



Campagnes de mesures à Mayotte De nombreux instruments Résif mobilisés

Dans le cadre du suivi par le Revosima (opéré par l'IPGP avec l'appui du BRGM, de l'Ifremer et du CNRS) de la crise sismo-volcanique à Mayotte, plusieurs opérations et campagnes de mesures se sont déroulées du 6 au 23 octobre 2020, à terre et en mer.

Une campagne de sismique active avec tirs à terre et déploiement d'un réseau de mesure temporaire terre/mer (70 capteurs à terre et dix capteurs en mer) a été menée avec dix tirs en forage répartis à Mayotte (campagne Refmaore menée par le BRGM).

Les stations magnéto-telluriques marines ont été relevées et redéployées entre Mayotte et le nouvel édifice volcanique lors de la campagne Mayobs14.

Une campagne océanographique (MD228_Mayobs15) a été menée sur le navire océanographique Marion Dufresne opéré par l'Ifremer. Elle a permis de procéder à des mesures de bathymétrie et de colonne d'eau via le sondeur du navire et un AUV¹, et à des observations visuelles du fond marin. Des prélèvements dans la colonne d'eau, de roches sur le fond et de carottes de sédiments ont aussi été réalisés. La campagne Mayobs15 a par ailleurs permis le relèvement et le redéploiement de plusieurs instruments associés à Résif. Six OBS² du parc Insu/IPGP ont été relevés, entretenus et redéployés ¹. Quatre hydrophones du futur nœud A marin ont été mouillés dans le canal Sofar pour acquérir des enregistrements hydro-acoustiques. Le nouveau capteur de pression absolue à dérive contrôlée (capteur A-0-A) financé par Résif a été déployé pour la première fois ¹⁻². Il devrait permettre d'estimer les mouvements verticaux du fond marin avec une bonne résolution (proche du millimètre pour les mouvements rapides et de l'ordre du cm/an pour les mouvements lents). Ces données devraient permettre d'améliorer les modélisations de déformation en ajoutant un point de mesure à proximité des zones actives, en mer.

En complément à ces actions, l'IPGP a réalisé des mesures DAS (voir page 9) exploratoires sur une fibre optique d'un câble télécom dans le cadre d'une convention entre l'IPGP et le consortium du câble Fly-Lion3, en partenariat avec Orange et Febus Optics.

Jean-Marie Saurel

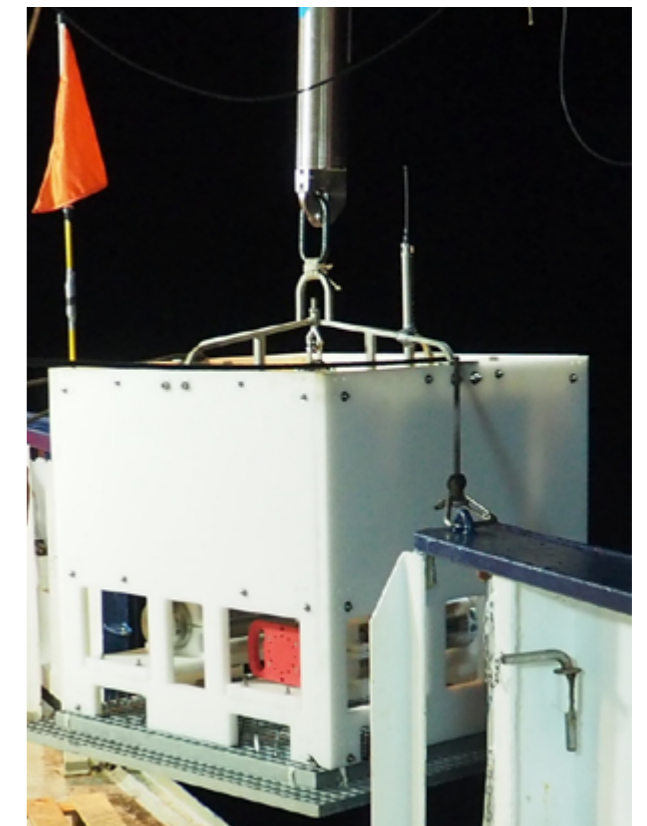
En savoir plus

Résultats préliminaires de la campagne Mayobs15 : <https://lc.cx/NkA4E6sWF>

- 1 Autonomous Underwater Vehicle
- 2 Ocean Bottom Seismometers



1- Le capteur A0A Résif et OBS Insu-IPGP prêts à être déployés sur le pont. Crédits : Denis Dausse, Mayobs15 - Revosima 2020



2- Le capteur A0A Résif débordé et prêt à être largué à l'eau. Crédits : Simon Besançon, Mayobs15 - Revosima 2020



Séisme du Teil Où en est-on de l'analyse de cet événement inédit un an après ?

Il y a un an, le séisme du Teil du 11 novembre 2019, de magnitude Mw 4.9, faisait trembler l'Ardèche et endommageait fortement la région épiscopale avec une intensité EMS98 évaluée à VIII, provoquant de très gros dégâts estimés à plusieurs dizaines de millions d'euros. Correspondant au séisme le plus destructeur depuis le tremblement de terre d'Arette (Pyrénées) en 1967 (ML 5.3, MSK VII-VIII), la catastrophe avait été largement couverte par les médias qui avaient, à l'époque, concentré leurs interventions autour de la question de l'influence ou non de l'activité anthropique sur le déclenchement du séisme (i.e. la présence d'une carrière située à proximité du plan de faille).

Passée cette première effervescence médiatique, après notamment la publication d'un rapport d'expertise réalisée à la demande du CNRS¹, les scientifiques ont pu s'atteler à l'analyse détaillée de ce séisme aux caractéristiques inédites dans le paysage sismotectonique français, avec une profondeur superficielle de l'ordre de 1 km, très peu de répliques, des accélérations du sol qui ont dépassé la valeur de g, et une rupture de surface de 5km le long de laquelle le sol s'est déplacé en moyenne de 10 cm en raccourcissement. L'organisation et la mise en place très rapide de ces différentes investigations ont pu être réalisées grâce à la coordination de la cellule post-sismique du CNRS, avec le soutien financier de l'Insu, de Résif et des différents partenaires impliqués aux côtés des laboratoires académiques (IRSN, CEA, EDF...). Un article sous presse dans le journal Comptes-rendus Géosciences synthétise l'ensemble

des investigations engagées (Cornou et al., sous presse), un article décrit l'évolution temporelle de la rupture (Mordret et al., 2020), tandis que deux articles dans la revue Communication Earth & Environnement (Nature) décrivent la rupture de surface associée à la réactivation de la faille de la Rouvière - une faille héritée de la phase d'extension Oligocène qui n'était pas cartographiée comme active jusque-là (Ritz et al., 2020), ainsi que les accélérations très fortes générées le long de la faille (Causse et al., en révision).

Une des questions importantes soulevée par Ritz et collaborateurs est celle du risque de rupture de surface sur d'autres failles du réseau cévenol, ainsi que sur d'autres réseaux de failles en France métropolitaine qui n'auraient pas été cartographiées comme actives à l'instar de la faille de la Rouvière. Une autre question importante également soulevée par cette étude est de savoir si la faille de la Rouvière était réactivée pour la première fois

depuis l'Oligocène ou si elle avait déjà rompu la surface au cours de précédents paléoséismes, sans que ces ruptures aient pu être décelées en surface du fait de la rareté de ce type d'événement et de l'érosion. Relayée par un communiqué de presse du CNRS, les résultats et conclusions de l'article paru dans Communication Earth & Environnement ont fait l'objet d'une très large couverture médiatique avec au total plus d'une cinquantaine d'articles, reportages ou interviews parus sur le Web, à la radio (par exemple France Culture, France Inter, France info), à la télévision (comme France 3) ou dans la presse écrite (par exemple Le Monde).

Pour répondre aux questions qui se posent, des investigations paléosismologiques, soutenues notamment par un financement du programme Insu-Tellus, ont été lancées depuis le mois de Juin 2020 sur l'ensemble du réseau nord-est cévenol. Une quinzaine de tranchées ont d'ores et déjà pu être réalisées au niveau



1 - L'une des tranchées creusées sur la section nord de la faille de la Rouvière. La bande blanche verticale pourrait être une trace d'une activité sismique antérieure. Crédits : J.F. Ritz

1 Rapport d'évaluation du groupe de travail CNRS-INSU sur le séisme du Teil du 11 novembre 2019 et ses causes possibles.17 décembre 2019 - <https://lc.cx/r1O8DTvj7>

de la section nord de la faille de la Rouvière (celle qui a rompu lors du séisme du Teil) et les résultats préliminaires suggèrent que celle-ci aurait effectivement rompu la surface au moins une fois avant 2019 dans une période de temps allant de la fin du Pléistocène à la période historique ¹. Les données récoltées sont encore en cours d'analyse et viendront préciser ces résultats préliminaires.

En ce qui concerne l'analyse des mouvements forts, des campagnes d'investigation géophysique ont été conduites à l'automne 2020 par les laboratoires Insu, le Cerema, Polytech'Nice et l'IRSN sur les villages impactés par le séisme et à proximité même de la faille dans le but d'imager les terrains de couverture. Ces investigations aideront à comprendre la distribution spatiale des dégâts dans les villages du Teil et de St Thomé. Elles permettront également d'affiner les prédictions numériques du mouvement fort lors du séisme du Teil et des dommages subis dans certains bâtiments historiques instrumentés après le séisme. Ces imageries de proche surface permettront également de raffiner le modèle géologique 3D en cours de construction par l'ENS de Lyon.

A noter également qu'un projet de forage de la zone hypocentrale, coordonné par Jean-Paul Ampuero à Géoazur, est également en cours de montage.

L'ensemble de ces recherches devraient continuer à occuper un grand nombre de chercheurs (une cinquantaine, sans compter les ingénieurs et techniciens) pour plusieurs années encore (pour peu que les demandes de financements qu'ils ont soumises soient acceptées...).

Le séisme du Teil est assurément un bel objet d'étude et constitue en quelque sorte un précédent qui vient illustrer à point nommé le besoin de compléter un certain nombre de données (notamment en ce qui concerne la cartographie des failles actives), mais aussi en termes de compréhension des processus en jeu, comme le soulignent le récent article de Mazzotti et al., (2020. Voir encadré) et le lancement de l'action Failles actives France (Fact) de l'Ac-

tion transverse sismicité Résif².
Jean-François Ritz, Cécile Cornou

Références :

Causse, M., Cornou, C., Maufroy, E., Grasso, R.-R., Baillet, L., El Haber, E., 2020. Exceptional ground motion for moderate-sized shallow earthquake, Commun Earth Environ, in revision

Cornou et 90 co-auteurs (dont CNRS, IRSN, EDF, CEA), Rapid response to the Mw 4.9 earthquake of November 11, 2019 in Le Teil, 1 Lower Rhône Valley, France, CR Géosciences, in press. <https://doi.org/10.31219/osf.io/3afs5>

Delouis B., Ampuero J.-P., Audin L., Bernard P., Brenguier F., Delouis B., Grandin R., Jolivet R., Leloup P.H., Ritz J.-F., Vergne J., Vernant P., Voisin C., Rapport d'évaluation du groupe de travail CNRS INSU sur le séisme du Teil du 11 novembre 2019 et ses causes

2 <https://lc.cx/3uqjqSNHx>

possibles. Rapport d'expertise CNRS, 11 Décembre 2019

Mazzotti S., Jomard H. and Masso F., Processes and deformation rates generating seismicity in metropolitan France and conterminous Western Europe, BSGF - Earth Sciences Bulletin 2020, 191, 19, <https://doi.org/10.1051/bsgf/2020019>

Mordret, A., Brenguier, F., Causse, M., Boue, P., Voisin, C., Dumont, I., ... & Ampuero, J. P. (2020). Seismic Stereometry Reveals Preparatory Behavior and Source Kinematics of Intermediate Size Earthquakes. Geophysical Research Letters, 47(17), e2020GL088563.

Ritz J.-F., Baize S., Ferry M., Larroque C., Audin L., Delouis B., Mathot E., 2020, Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France, Commun Earth Environ 1, 10 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-0012-z>

Origine de la sismicité en France métropolitaine

Les taux de déformation et de sismicité sont faibles en France métropolitaine, située loin des frontières de plaques tectoniques. Ces faibles taux compliquent fortement la caractérisation de la sismotectonique et de l'aléa sismique. Au cours des deux dernières décennies, des études en géologie, sismologie et géodésie ont d'ailleurs mis en évidence des déformations inattendues en France métropolitaine, telle qu'une extension perpendiculaire aux chaînes pyrénéennes et alpines.

Dans le cadre de l'Action Transverse Sismicité Résif, des chercheurs ont proposé une revue et une synthèse critique de ces études. La principale conclusion est que, bien que contribuant au régime de contrainte à l'échelle continentale, la tectonique des plaques n'est probablement pas le principal moteur de la déformation actuelle et de la sismicité à l'échelle de la France métropolitaine. D'autres processus doivent être envisagés, tels que l'érosion quaternaire ou le réajustement isostatique postglaciaire. S'y ajoute un fort héritage structural lié aux événements tectoniques passés et qui contribue à la localisation et l'amplification de la déformation et de la sismicité.

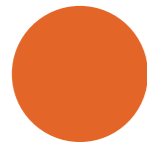
Cette revue permet de mettre en avant trois axes de recherche pour mieux caractériser la sismicité, les taux de déformation et les processus associés en France métropolitaine :

- poursuivre les recherches sur la sismicité historique et la macrosismicité en vue d'étendre et homogénéiser les catalogues ;
- densifier et améliorer les mesures de déformation par géodésie, y compris dans les régions de faible sismicité où le ratio déformation sismique / asismique reste une inconnue majeure ;
- produire un modèle sismotectonique intégrant géologie, sismologie et géodésie à l'aide de modèles numériques. Ce dernier point est un élément essentiel pouvant conduire à d'importantes améliorations dans la caractérisation de l'aléa sismique en France métropolitaine.

■ En savoir plus

<https://doi.org/10.1051/bsgf/2020019>





La mesure acoustique distribuée (DAS)

La fibre optique est un concept fascinant qui fait d'un fil de silice de la finesse d'un cheveu un guide de lumière sur de très grandes distances, propageant l'information à la vitesse de la lumière. Cette invention, qui remonte aux années 1960, a révolutionné nos façons de communiquer. Depuis quelques années maintenant, elle est en passe de révolutionner notre façon de faire de la sismologie grâce aux mesures acoustiques distribuées, ou Distributed Acoustic Sensing (DAS). Cette approche instrumentale issue de la photonique permet de convertir cette même fibre en un réseau très dense de capteurs de déformation.

Fonctionnement

Cette application alternative des fibres optiques utilise les anomalies de densité aléatoires et inhérentes au processus de fabrication qui rétro-diffusent une faible partie de la lumière injectée. C'est l'analyse de la différence de phase du signal réfléchi par deux segments de fibre qui va quantifier l'élongation de la fibre entre ces segments. Les positions des segments le long de la fibre seront déduites du temps de propagation aller-retour de la lumière dans la silice.

Aujourd'hui, les progrès de la photonique permettent au système DAS de mesurer des élongations nanométriques de la fibre, tous les mètres, sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres et à des fréquences dépassant le kilo-hertz. Un câble de fibre optique devient

ainsi un réseau sismologique hyperdense, riche de plusieurs dizaines de milliers de capteurs, et cela grâce à un seul interrogateur en bout de fibre.

Le DAS s'est d'abord développé dans le monde pétrolier dans les années 2010, notamment pour l'imagerie sismique en forage. Son essor majeur ces dernières années ¹ dans le monde académique peut être relié à la démocratisation des interrogateurs (typiquement 150 à 200 k€) et à l'usage des fibre Telecom standards, faiblement couplée au sol, qui fournissent des enregistrements de qualité pour des fréquences supérieures à 0.1 Hz (Lindsey et al., 2017).

Au delà de sa densité de mesure et de l'utilisation de réseaux de fibre existants, le DAS a d'autres qualités : la mesure est faite depuis une seule extrémité, le système d'acquisition ² peut donc être déporté de plusieurs dizaines de kilomètres de la zone d'étude, ce qui facilite et sécurise la mesure. La fibre optique est un capteur passif supportant fortes pressions et fortes températures, adapté à l'étude des fonds marins ou des volcans, moins sujet aux défaillances que des capteurs électro-mécaniques traditionnels.

Contraintes et limites

Ces avantages font du DAS une solution prometteuse pour étudier un grand nombre d'objets géologiques tels que glissements de terrain, glaciers, champs géothermiques, rides océaniques..., et adaptée à des enjeux opérationnels comme l'alerte rapide aux aléas naturels, la météo marine, le suivi du trafic routier ou maritime.

Cependant, le DAS n'est pas le pur équivalent d'un réseau dense de sismomètres et il présente des contraintes propres : la mesure est limitée à la déformation suivant l'axe longitudinal

de la fibre ; si la fibre n'est pas purement rectiligne, on accède au champ d'onde sur 2D, mais la mesure 3D n'est possible qu'avec des déploiements en forage ou des fibres hélicoïdales. De plus, le couplage de la fibre avec le milieu, qui conditionne la qualité du signal enregistré, est rarement homogène. Dans le cas des câbles télécom tirés dans des conduites souterraines, les variations peuvent être importantes (p. ex. ³) et rendre certaines portions du câble inexploitable. Une phase de calibration sera alors nécessaire pour utiliser pleinement le signal. L'exploitation des mesures est également compliquée par le fait que l'on enregistre la déformation, dérivée spatiale du déplacement, ce qui rend le signal plus sensible aux hétérogénéités de proche surface. Cela affecte surtout les ondes de surfaces les plus lentes, les plus perturbées par les effets de diffraction (p.ex. Lior et al., 2020, van den Ende and Ampuero, 2020). Enfin, si la densité de données est une richesse, elle induit des volumes de données importants, typiquement 1To/jour/fibre, qui implique de recourir à des méthodes de traitement rapides et automatisées.

Etat des lieux en France

En France, les premiers travaux sur le DAS se sont focalisés sur des fibres fond de mer en France (Meust NumerEnv) et en Grèce (HCMR et Nestor). Ces travaux menés dans le cadre du projet ANR Seafood (PI. A. Sladen, Géoazur) apportent un nouvel éclairage sur la génération du bruit microsismique (Sladen et al., 2019), la calibration des données (Lior et al., 2020), ou la réponse du câble aux signaux acoustiques (Rivet et al., en révision). Deux autres campagnes de mesure sur des câbles sous-marins ont été effectuées cette année au large de Mayotte (collaboration Orange-IPGP - Voir page 5), et

au large de la Sicile (ERC Focus, PI. M-A. Gutscher, UBO). L'instrumentation actuelle du fond des océans étant particulièrement limitée au regard des surfaces et des intérêts scientifiques, chacune de ces nouvelles campagnes devrait apporter des observations uniques. A terre, une fibre commerciale Covage a pu être utilisée en 2018 dans les Alpes pour enregistrer la sismicité locale (Coutant et al., 2019), des expériences avec des fibres dédiées ont eu lieu en 2020, sur le Stromboli (J-P. Metaxian, UGA) et sur un lac gelé (O. Coutant, UGA). A la suite du séisme M4.9 au Teil en novembre 2019, une intervention rapide a permis de suivre l'activité des répliques (Cornou et al., 2021). D'autres projets (Dasara, B. Tauzin, LGL-TPE) prévoient d'utiliser les fibres en ville comme réseau de capteurs.

A l'heure du déploiement massif de la fibre sur nos territoires, un enjeu pour notre communauté sera d'arriver à dialoguer et à développer les collaborations avec des opérateurs pour qui les enjeux financiers sont importants. Par ailleurs, déployer de la fibre optique, qui reste peu onéreuse, sur des objectifs purement scientifiques nécessite un savoir-faire qui reste à acquérir : enfouir la fibre et optimiser le couplage nécessitent d'inventer des outils adaptés (p.ex. développement d'une charrue fond de mer dans le cadre de Seafood). Enfin, les contraintes de déploiement nécessitent de nouvelles approches (autorisation, contraintes d'accès, sécurisation de l'installation, etc.) que notre communauté apprend à maîtriser grâce aux multiples initiatives et expériences actuelles dont la valorisation des résultats facilitera l'adoption du DAS par un plus grand nombre.

Au delà des différents projets mentionnés ci-dessus, l'ANR MoniDAS (PI : O.Coutant, UGA), démarrée en 2020, vise à fédérer plusieurs laboratoires français autour des différents champs d'application du DAS (volcan, marin, géothermie) en partenariat avec la PME française Febus Optics, fabricant de systèmes d'acquisition DAS. Une autre initiative fédératrice pourrait venir du projet d'EquipEx Marmor (voir page 3) soumis en 2020, qui vise à développer l'instrumentation fond de mer et

l'observatoire de Mayotte. Ce projet comprend l'acquisition de trois systèmes DAS pour la communauté, avec une partie dédiée au développement d'une solution pour la mise à disposition des données.

Les (méga)données

A l'échelle internationale, des initiatives émergent pour fédérer les groupes de recherche comme le DAS Research Coordination Network (RCN) financé par la NSF. Ce projet comporte un volet sur la gestion des données, en collaboration avec IRIS. Les volumes pourraient rapidement dépasser de 2 à 3 ordres de grandeur ceux des réseaux sismologiques actuels et nous amener à repenser le concept de serveur de données. L'intégration de pré-traitement à ces nouveaux « serveurs » permettrait par exemple de minimiser les transferts. Enfin, le format des données et métadonnées doit également être repensé pour s'adapter aux spécificités des mesures DAS (géométrie et conditions d'installation de la fibre, paramètres d'acquisition optiques...), une étape qui devra se faire dans un cadre collaboratif large.

Cette projection de la communauté dans l'univers des mégadonnées incite aussi naturellement au développement de méthodes d'analyse automatique ou mettant en jeu l'intelligence artificielle (p. ex. Duval et al., 2020 ; van den Ende et al., 2020).

Conclusion

En résumé, le DAS est une technologie qui a déjà démontré sa capacité à s'affranchir de plusieurs contraintes de l'instrumentation sismologique traditionnelle et devrait apporter un nouvel éclairage (sic) sur une multitude de processus. Un travail important est en cours au sein de la communauté internationale et nationale pour adapter les



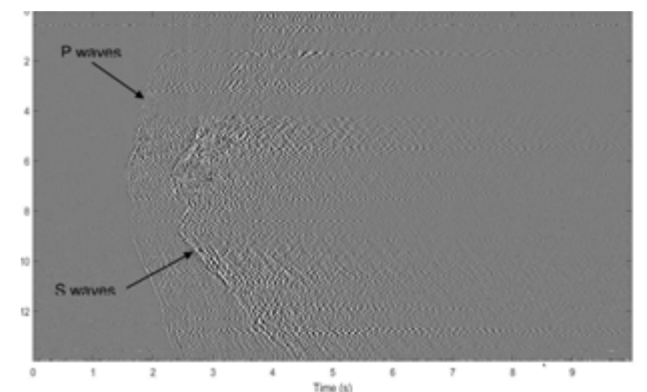
² Photo du système DAS de Febus Optics durant une mesure sur le câble fond de mer MEUST-NumerEnv au large de Toulon

méthodes d'analyse les plus répandues aux mesures de déformation, pour mieux contrôler les effets de couplage ou gérer les importants volumes de données. La nature des enregistrements est déjà remarquable mais on peut supposer que l'intérêt grandissant pour cette technologie ainsi que l'évolution permanente du marché des composants télécom, vont permettre d'améliorer sensiblement les performances et le coût de la technologie dans les années à venir.

A. Sladen, O. Coutant, D. Rivet, J-P. Ampuero

Références

Coutant, O., Boué, P., Aubert, C., Calbris, G. et V. Lanticq (2019) Recordings of « La Chapelle » seismic swarm activity using a DAS and a commercial Telecommunication fiber. Conférence EGU, Vienne, 2019-16511



³ Enregistrement DAS d'une réplique ML=2.0 le 23 novembre 2019, suite au séisme M4.9 du Teil, France. La campagne de mesure s'est faite sur une section de 14km de fibre optique située à proximité immédiate de la zone de rupture. Ces mesures n'auraient pas été possible sans la collaboration du réseau public Ardèche Drôme Numérique, l'opérateur ADTIM et le soutien de la société Febus Optics pour la partie acquisition



¹ Evolution du nombre de publications sur le DAS dans la littérature scientifique en général, et en géophysique en particulier (source : Web of Science).



Cornou, C., Ampuero, J. P., Aubert, C., Audin, L., Baize, S., Billant, J. ... & de Michele, M. (2021). Rapid response to the M_w 4.9 earthquake of November 11, 2019 in Le Teil, Lower Rhône Valley, France. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, accepté. Pre-print : 10.31219/osf.io/3afs5

Duval, C., van den Ende, M., Sladen, A., Richard, C., Ferrari, A., Ampuero, J.-P., Rivet, D. et D. Fontanes (2020) Unsupervised anomaly and object detection benchmark on Distributed Fiber-Optic Sensing technology. Conférence Soph.IA Summit 2020, Sophia-Antipolis, France.

Lindsey, N. J., Martin, E. R., Dreger, D. S., Freifeld, B., Cole, S., James, S. R., ... & Ajo Franklin, J. B. (2017). Fiber optic network observations of earthquake wavefields. Geophysical Research Letters, 44(23), 11-792.

Lior, I., A. Sladen, D. Rivet, J. P. Ampuero, Y. Hello, P. Lamare, C. Jestin, S. Tsagkli and C. Markou (2020) On the Detection Capabilities of Underwater DAS. Soumis à Journal of Geophysical Research-Solid Earth, publié sur ESSOAr <https://doi.org/10.1002/essoar.10504330.1>

Rivet, D., de Cacqueray, B., Sladen, A., Roques, A. et G. Calbris. Preliminary assessment of shipping noise monitoring using Distributed Acoustic Sensing on optical fiber Telecom cable, Journal of the Acoustical Society of America en révision

Sladen, A., Rivet, D., Ampuero, J. P., De Barros, L., Hello, Y., Calbris, G., & Lamare, P. (2019). Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor Telecom cables. Nature communications, 10(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13793-z>

van den Ende, Ampuero, J.-P., C. Duval, A. Ferrari, D. Fontanes, I. Lior, C. Richard et A., Sladen (2020) A self-supervised approach for improving signal coherence in Distributed Acoustic Sensing. Conférence Soph.IA Summit 2020, Sophia-Antipolis, France.

Van den Ende, M., & Ampuero, J. P. (2020). Evaluating seismic beamforming capabilities of Distributed Acoustic Sensing arrays. Solid Earth Discuss. Preprint <https://doi.org/10.5194/se-2020-157>

Géothermie profonde à Strasbourg

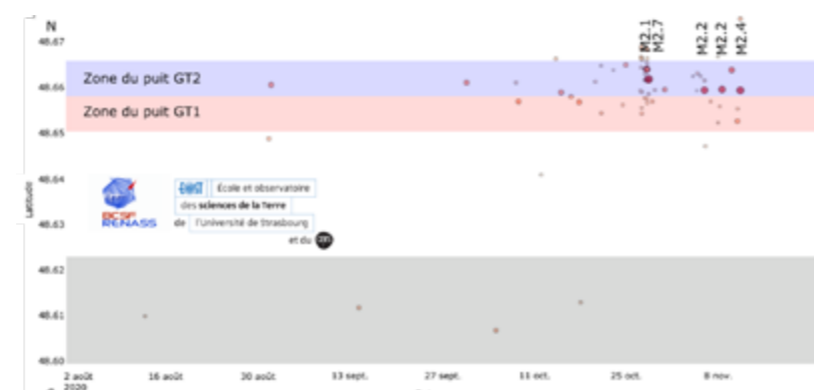
Une reprise des essais mais aussi de la sismicité induite

Le 12 Novembre 2019, un séisme de magnitude M13.0 était ressenti largement par la population de Strasbourg, sans pour autant induire de dégâts.

Il s'est produit dans le secteur de la Robertsau (quartier situé au nord de Strasbourg) au sud des puits du site de géothermie profonde Geoven de la société Fonroche. Rapidement un controverse s'est imposée puisque la société Fonroche a considéré l'événement comme totalement indépendant de ses activités. Pourtant, sa localisation proche des puits, sa corrélation temporelle avec l'activité d'injection dans les puits, la similitude de la profondeur avec celle des puits, l'absence de sismicité locale dans les années précédant l'apparition de l'événement, les structures géologiques connues dont une faille importante reliant la zone de l'hypocentre au réservoir, ont été des arguments forts pour considérer cet événement comme induit malgré une distance relativement importante au site (4-5 km). Il est apparu ensuite que ce séisme faisait partie d'un essaim de sismicité qui avait été initié quelques jours auparavant et allait durer près de 4 mois, jusqu'au printemps de cette année avec plus d'une centaine d'événements enregistrés par le BCSF-Rénass. Suite à cette crise sismique, les activités de géothermie ont été réduites conformément à l'application par la Dreal de l'arrêt préfectoral, le seuil d'alerte ayant été dépassé. L'analyse menée dans les mois qui ont suivi par Fonroche et sa tierce-expertise par le BRGM et l'Ineris, ont permis à la préfecture d'autoriser un redémarrage de essais début octobre. Très rapidement, plusieurs événements sismiques induits ont été enregistrés au voisinage proche du puits nord de Geoven où se produisait l'injection. Le 27 octobre commençait une série de cinq événements ressentis dans l'Eurométropole dont la magnitude était comprise entre 2.1 et 2.7, suscitant une réaction médiatique importante. L'analyse fine du développement de la sismicité faite par l'Eost montrait alors un développement inquiétant de la sismicité sur des structures pré-existantes, potentiellement instables. Sous la pression politique, le 13 novembre, Fonroche décidait de revoir à la baisse ses paramètres d'injection pour un meilleur contrôle de la stabilité du réservoir et permettre ainsi la poursuite du projet

■ En savoir plus

Communiqué de presse Eost : <https://lc.cx/QuIC3bo1d>



Détail du déroulé temporel des événements sismiques de Strasbourg identifiant trois zones : au nord, les zones des puits GT1 (rose) et GT2 (violet), et au sud, la zone de la Robertsau (gris). Ce détail montre l'apparition de ces événements, dont les séismes ressentis : M2.1 du 27/10, M2.7 du 28/10/20, M2.2 du 5/11/20, M2.2 du 8/11/20 et M2.4 du 11/11/20. Crédits : Eost

Dernière campagne de forages du projet Construction large bande

Gouttières (27), Restinclières (34), Champagny-en-Vanoise (73), Gouzon (23), Béthincourt (55), Méricourt (80) ... Voici là un petit aperçu des 12 étapes du « tour de France des forages » de l'année 2020 !

Depuis plus de 10 ans maintenant, un vaste projet nommé Résif-CLB (pour « Construction Large Bande ») a été lancé afin de développer le réseau sismologique large-bande permanent métropolitain (Résif-RLBP). L'objectif est de bâtir un réseau de 190 stations réparties de manière relativement homogène sur l'ensemble du territoire et capables d'enregistrer en continu les vibrations sismiques dans une large gamme de fréquences et d'amplitudes pour ainsi faire progresser nos connaissances de l'aléa sismique et des structures profondes de la Terre.

Les habitudes en sismologie sont plutôt d'installer ces capteurs « large-bande » dans des sites dits fermés (grotte, tunnel, ...), proposant des environnements thermiques stables et généralement éloignés du tumulte des activités humaines. L'une des particularités de Résif-CLB a été de développer une solution d'installation adaptée aux milieux ouverts, moins dépendante de la géologie ou des infrastructures locales.

Suite à différentes phases de test et de prototypage conduites jusqu'en 2015, la solution retenue consiste à installer un capteur sismologique dédié dans un forage de 6 à 20m de profondeur (suivant la nature du sol) au fond d'un tube en acier étanche ¹. Après une phase assez technique de descente, de nivellement et d'orientation, le capteur est alors recouvert de corindon¹ ou

¹ Oxyde d'aluminium hydrophobe et non agglomérant facilitant l'extraction du sismomètre en cas de maintenance

de quartz. Aujourd'hui, plus de 80 forages de ce type ont été réalisés et Résif-RLBP est l'un des premiers réseaux mondiaux à adopter ce type d'installation de manière générique.

Les données obtenues aux sites déjà instrumentés confirment que ce mode d'installation permet d'obtenir généralement des données de très bonne qualité, voire parfois meilleures que dans des installations classiques en milieu fermé ².

La dernière grande phase de forages du projet a pu être réalisée cette année, malgré les complications dues au confinement et aux restrictions sanitaires. Plusieurs de ces forages ont été effectués par les collègues de l'atelier forage du BRGM, avec parfois l'appui de la division technique du CNRS-Insu (Seyne-sur-mer). Quasiment tous les observatoires des sciences de l'Univers impliqués dans Résif-RLBP (Osuna, Oreme, ISTERre, OGCP, Eost, IPGP) se sont mobilisés durant ces derniers mois pour accompagner la réalisation des sites qui accueilleront, dès l'année prochaine, les instruments scientifiques (capteur, numériseur).

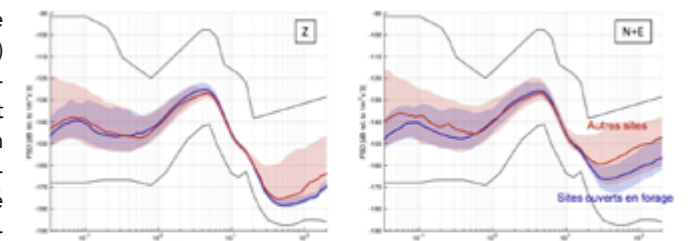
La réalisation de ces forages ainsi que de l'ensemble des infrastructures (gros œuvre, adductions des réseaux internet et électrique) et équipements techniques (baie instrumentale, système de gestion d'énergie et de supervision à distance) qui constituent une station sismologique sont l'aboutissement d'un long travail de prospection, de tests de qualité de sites et d'interactions avec les propriétaires (très souvent des élus de collectivités) menées par tous les acteurs de Résif-RLBP depuis plus de 10 ans.

Grâce à cet investissement, la communauté dispose aujourd'hui de plus de 150 stations sismologiques modernes, de très haute qualité et nous devrions être mesure d'atteindre l'objectif de 190 stations initialement annoncé d'ici moins de 2 ans.

Jérôme Vergne, Eric Beucler, Olivier Charade



¹ Foration du site de Gouttières (27), le 5 août 2020, par le BRGM (L. Ardito et M. Parrella) pour la future station GOTF de Résif-RLBP - crédits D. Fligiel/P. Gernigon, Osuna.



² Distribution du niveau de bruit aux stations de Résif-RLBP sur l'année 2020 pour 58 installations de forage peu profond (bleu) et 56 autres types d'installations (rouge). Les courbes représentent la médiane des densités spectrales de puissance médianes de chaque station et les plages de couleur délimitent les 25ème et 75ème percentiles. A gauche pour la composante verticale, à droite pour la moyenne des 2 composantes horizontales. Les courbes noires correspondent aux niveaux haut et bas du modèle de bruit de Peterson (1993).Crédits : J. Vergne, Eost-Ites

Alparray Trois ans de mesures sismologiques pour comprendre les Alpes

AlpArray est un consortium de projets de recherche d'une dizaine de pays européens qui vise à préciser les structures profondes des Alpes (croûte et manteau supérieur) pour mieux comprendre la dynamique de la chaîne. AlpArray s'est appuyé sur le déploiement d'un réseau sismologique dense et homogène ¹ (maille ~50 km) à terre et en mer, sur 11 pays. Les 352 stations des réseaux large-bande permanents ont été complétées par 246 stations temporaires terrestres et 30 sismomètres fond de mer. Déployé à partir de l'été 2015, le réseau terrestre complet a fonctionné de mi-2017 à fin 2019 et le réseau fond de mer pendant 8 mois en 2017-2018.

AlpArray-FR est la composante française d'AlpArray, associant les laboratoires ISTerre à Grenoble, IPGS à Strasbourg et Geoazur à Nice. Financé par l'Agence nationale de la recherche, ce projet a permis l'installation et la maintenance de 63 stations temporaires terrestres de l'Alsace à la Corse ² et huit sismomètres fond de mer en Méditerranée ³. Il a aussi accéléré l'installation de 17 stations permanentes de Résif-RLBP, et huit stations temporaires terrestres étaient équipées avec des instruments large-bande du parc Résif-Sismob, alors que le parc d'OBS Insu-IPGP a fourni sept instruments large-bande et Geoazur le huitième. 29 sismomètres fond de mer AlpArray ont été déployés en Mer Ligure et à l'ouest de la Corse en juin 2017 par une équipe scientifique franco-allemande (ISTerre, IPGP, Geomar Kiel) à bord du Navire océanographique Pourquoi-Pas? Après huit mois d'immersion par des fonds de 1100 à 2800 m, les instruments ont été récupérés en février 2018 depuis le navire océanographique allemand Maria S. Merian.

De nombreux personnels techniques et scientifiques des trois laboratoires ont contribué à la bonne marche du réseau temporaire terrestre AlpArray-FR. Deux ingénieurs en CDD ont travaillé à temps plein à ISTerre (1,5 an) et à l'IPGS (1 an) sur la prospection des sites et l'installation. L'installation de chaque station, suivant une procédure définie à ISTerre sur la base d'expériences précédentes, a pris 1/2 à 1 journée (à 2 personnes) selon le type d'installation. La télétransmission par le réseau 3G a permis de surveiller à distance le fonctionnement des stations grâce à l'outil de supervision Synapse¹. Les pannes ont ainsi été rapidement détectées, réparées à distance ou lors d'interventions sur place. En moyenne, trois interventions ont été nécessaires par site sur la durée du projet pour améliorer les installations ou effectuer des opérations de maintenance. Les principales causes de panne ont été : télétransmission inexistante ou intermittente, capteur



1 - Carte des stations temporaires et permanentes installées dans les Alpes pendant le projet AlpArray (voir légende carte) - Crédits : Anne Paul



2 - Station sismologique temporaire Z3.A178A installée sur la commune de Lathuile (74) - Crédits : Anne Paul

1 <https://www.resif.fr/donnees-et-produits/logiciels-et-outils/>

inondé, carte mémoire déficiente (numériseurs anciens), vandalisme (quatre stations), sous-dimensionnement de l'alimentation solaire. Les principaux enseignements sont d'une part que sans télétransmission, une expérience de cette taille est difficile sinon impossible, d'autre part que les installations en extérieur avec capteur enterré et panneaux solaires sont une source incessante de problèmes pour un gain négligeable en qualité de donnée.

Les données étaient, pour la majorité des stations, transmises en temps quasi-réel au nœud A SisMob et mises à disposition au nœud B dans un délai de 3 jours. La mise en place de la base de données et des codes de traitement automatique a mobilisé l'équivalent d'une année temps plein des personnels du centre de données Résif. Le volume total de l'archive Alparray-FR est de 2.1To. Le pourcentage de données disponibles est excellent et dépasse 95%. Les données de toutes les stations temporaires AlpArray sont regroupées sous le même code réseau Z3, archivées et distribuées par 6 nœuds du système EIDA (European Integrated Data Archive). Elles sont sous embargo jusqu'au 01/04/22, soit 3 ans après la fin officielle de l'expérience.

Les données sont en cours de valorisation dans tous les pays participants. A ce jour, la contribution principale des équipes françaises porte sur la tomographie de bruit ambiant (5 publications parues, 1 en révision, 2 en préparation)². Les données AlpArray-FR ont été intégrées à la localisation des séismes par le BCSF-ReNaSS, contribuant à une meilleure connaissance de la sismicité.

2 Ces recherches feront l'objet d'un article dans un numéro ultérieur

3 M. Bès de Berc, J-X. Dessa, C. Doubre, H. Jund, X. Martin, L. Métral, C. Péquegnat, D. Wolyniec

Yasmine : un outil Résif au service de la communauté sismologique internationale

Après avoir été le standard qui a permis la multiplication et la standardisation des échanges de données brutes et métadonnées sismologiques pendant 30 ans, le Seed (Standard for Exchange of Earthquake Data) et plus particulièrement sa partie métadonnées, le dataless Seed, a été remplacé par le format stationXML. Ce remplacement, décidé par la FDSN (Federation of Digital Seismic Networks) au sein de laquelle siègent Résif et Geoscope, a été progressivement implémenté par les centres de données mondiaux, y compris Résif dès ses débuts.

Un recueil des besoins en matière de logiciel d'édition de métadonnées au format stationXML au sein de la communauté française a été présenté aux Rencontres scientifiques et techniques Résif de Saint-Jean de Mont fin 2017. Fin 2018, le groupe Résif en charge du projet a pu rencontrer le groupe de IRIS qui avait supervisé en 2018 la réalisation d'une première version de Yasmine (Yet Another Station Metadata Information Editor), un outil spécifique produisant nativement du stationXML. D'un commun accord, le système d'information Résif a pris en charge le pilotage du développement d'une seconde version, sous-traité à la société ISTI (également à l'origine de la première version). Résif a ainsi pu ajou-

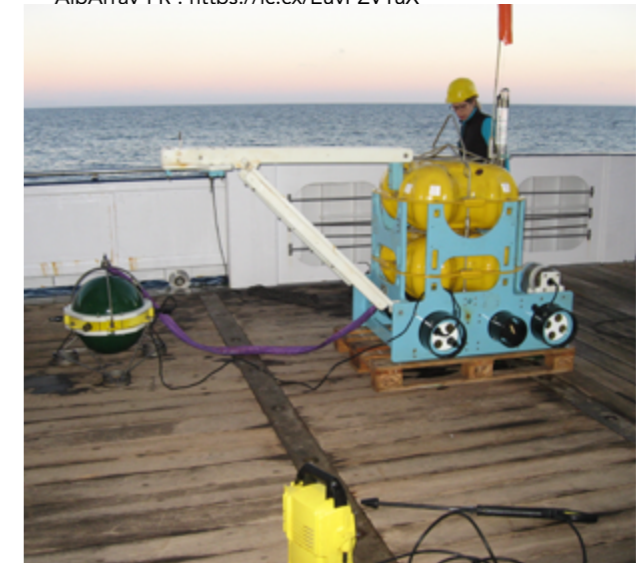
Trente stations fonctionnaient encore lors du séisme du Teil (11/11/19), dont une située à 9 km de l'épicentre. Les enregistrements ont été mis à disposition de la communauté.

Anne Paul, Coralie Aubert et groupe technique AlpArray-FR³

En savoir plus

AlpArray : www.alparray.ethz.ch/

AlpArray-FR : <https://lc.cx/EuvPZVYuX>



3 - Récupération du sismomètre fond de mer Z3.A413A (OBS large-bande du parc Insu-IPGP) à bord du navire océanographique Maria S. Merian - Crédits : Anne Paul

ter de nombreuses fonctionnalités, dont le support des librairies atomiques d'instruments maintenues depuis de nombreuses années au sein des nœuds A Résif, ainsi qu'un outil d'édition en ligne de commande. Ce projet, d'un montant total de 86457€ HT a été intégralement financé par Résif.

Yasmine est un éditeur avec une interface graphique web moderne qui peut être hébergé localement ou sur un serveur. Il offre la possibilité d'utiliser la librairie de réponses instrumentales nominales NRL maintenue par IRIS et une librairie au nouveau format de réponse atomique Arol dont une version sera maintenue par Résif. Yasmine-cli permet, quant à lui, d'automatiser facilement l'ajout ou la modification de champs dans un fichier stationXML.

Actuellement en cours de livraison finale, ces deux nouveaux logiciels, sous licence libre GNU-GPL3.0, vont pouvoir bénéficier à l'ensemble de la communauté internationale (modalités de distribution en cours de mise en place avec IRIS). Ils illustrent l'implication de Résif dans l'amélioration de la qualité des données et métadonnées sismologiques au niveau international.

Contact

Jean-Marie Saurel

IRIS : Incorporated Research Institutions for Seismology

Les plateformes instrumentales sismologiques

Le parc national d'instruments Sismologiques Mobiles terrestres (SisMob), est hébergé et géré à l'Osug/ISTerre (Grenoble) au sein du Service Instrumentations Géophysiques (Sig). Le parc compte 120 stations de type large-bande (LB) ou moyenne-bande (MB), composées de capteurs et numériseurs dissociés pouvant être connectés pour transmettre les données en temps réel. Depuis 2017, la parc a bénéficié d'une campagne de jouvence et s'est vu complété par 65 stations courtes-périodes autonomes (nodes), permettant le déploiement de réseaux densifiés à l'échelle locale sur des périodes courtes (1 à 2 mois). De plus, l'Osug pilote le Service National d'Observation (SNO) Réseau Accélérométrique Permanent (Rap) qui comprend environ 80 stations télémetrées.

Le Réseau Large Bande Permanent (RLBP), quant à lui, SNO piloté au sein de l'Eost à Strasbourg, a bénéficié d'une extension et d'une modernisation depuis 2011 (Equipex Resif-CLB, 9M€) portant aujourd'hui à 140 le nombre de stations télémetrées, après huit ans de travaux. De plus, l'Eost possède depuis début 2020 un parc de 120 nodes déjà largement utilisé pour des expériences

locales ou impliquant des Établissements Public à caractère Industriel et Commercial (Epic) ne pouvant avoir accès au parc SisMob.

La réalisation de ces projets sismologiques d'envergure a fait émerger le besoin de structures capables de tester, caractériser et étalonner l'ensemble de cette instrumentation. Ces aspects requièrent des infrastructures telles qu'un pilier sismologique dédié, une salle de tests et des expertises spécifiques.

L'Eost disposant d'un tel pilier dans ses sous-sols, le service Pise (Plateforme Instrumentale Sismologique de l'Eost) est né en 2016. Dans un premier temps, Pise a développé une série de procédures normalisées d'étalonnages absolus et relatifs pour les systèmes câblés (capteur et numériseur dissociés). Par exemple, l'usage d'une table vibrante et l'analyse de la réponse par injection d'un signal dans la bobine de calibration du capteur permettent le calcul complet de la fonction de transfert. Ces méthodes ont permis à Pise de caractériser l'ensemble de l'instrumentation acquise dans le cadre de l'appel d'offre conjoint Resif-CLB/SisMob entre le début 2016 et fin 2019, soit 130 stations. Par la suite, l'achat des nodes en nombre bien plus important, et ne disposant pas de bobine de calibration, a nécessité la mise au point d'étalonnages strictement relatifs. Ainsi, Pise est capable de caractériser leurs réponses lorsqu'ils sont disposés simultanément autour du capteur de référence, mais aussi d'estimer leur seuil de détection (self-noise) ¹.

ISTerre disposant d'un pilier sismologique dans une salle dédiée, le Sig a mis en place



2 – Plateforme ISTerre- Crédits : Corallie Aubert

une plateforme analogue à celle de Pise ². Des procédures identiques ont été déployées et adaptées aux besoins de SisMob, de GProge (parc d'instruments de prospection géophysique) et des réseaux permanents locaux. En complément, des procédures spécifiques pour les capteurs accélérométriques du Rap ont été développées, dont une bascule permettant de vérifier le gain statique des capteurs selon les trois axes (de 0 à 1g) ³.

Depuis leur mise en place, ces structures peuvent tester de manière fiable dix stations LB/MB/accélérométriques ou trente nodes par semaine. Chaque instrument étalonné fait l'objet d'une fiche, qui est archivée dans les bases de données de gestion de matériel (GLPI, Gismo), et les données associées sont conservées, permettant le suivi des instruments dans le temps.

Deux plateformes instrumentales sismologiques analogues coexistent et collaborent donc à l'Eost et à ISTerre, permettant de tester de manière homogène les instruments sismologiques utilisés par la communauté scientifique française.

Corallie Aubert, Maxime Bes de Berc



3 – Bascule - Test des capteurs accélérométriques à Grenoble - Crédits : Corallie Aubert



1 – Nodes sur la plateforme Eost - Crédits : M. Bes-de-Berc

Le MiniTank

Nouveau boîtier de protection pour les capteurs du Rap

Les capteurs du Réseau accélérométrique permanent (Rap), de par leur installation dans des fondations et sous-bassement de grandes structures ou de bâtiments en milieu urbain, et typiquement dans le bassin grenoblois, sont régulièrement détériorés à cause de la montée des eaux lors des épisodes de précipitations importantes.

Dans le cadre d'un cahier des charges élaboré en collaboration avec plusieurs acteurs du Rap, Benjamin Vial, du Service d'Instrumentation Géophysique d'ISTerre, a conçu le MiniTank, un boîtier de protection qui reprend les bases du dispositif Tank¹ (déjà développé à Grenoble) pour l'adapter aux accéléromètres.

Il s'agit d'un boîtier compact, réalisable à faible coût, rapide à installer, qui assure une protection contre la submersion à un mètre de profondeur pendant 24 heures minimum. Il permet un pré-positionnement de l'embase avec la possibilité, si nécessaire, de changer le capteur en conservant le bon positionnement et l'orientation de la mesure.

Le boîtier est principalement destiné aux capteurs Episenor ES-T, mais il peut aussi être utilisé avec des Trillium Compact, et, sur une prochaine version du système, avec les accéléromètres Titan.

Quatre assemblages ont été lancés en production cet automne par la société Utp (Usinage technique précision en Isère). Après un contrôle de conformité au cahier des charges, leur installation devrait être effectuée début 2021.

Caractéristiques techniques

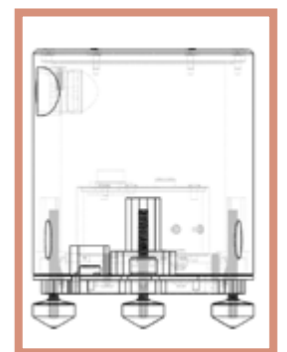
Les matériaux utilisés sont l'alliage d'aluminium pour les pieds et l'embase, du polymère PVC pour le cylindre, et du plexiglass pour le hublot transparent, qui permet de connaître l'état du boîtier sans avoir à l'ouvrir. L'étanchéité entre les éléments est assurée par des joints toriques en nitrile.

Le système du passage de câble est constitué de plusieurs rondelles en élastomère en néoprène compressées. Ce système permet un passage de câble étanche, sans connecteur électrique afin de préserver la qualité de signal.

L'embase est également équipée d'un niveau à bulle intégré, et de deux ajours qui permettent de sceller l'embase au sol afin de garder la possibilité aux capteurs de mesurer les séismes de fortes amplitudes. Des pieds réglables sous l'embase permettent de faire sa mise à niveau.

Benjamin Vial

¹ <https://lc.cx/sX-gv5a9H>



agenda

Décembre 2020

09/12 – Conseil scientifique Résif

Janvier 2021

21/01 – Comité directeur Résif

Février

15-16/02 – European Geothermal PhD Days (EGPD)

Avril

6-8/04 – Dixième Biennale du RAP à Vogüé (Ardèche)

Juin

Dates à confirmer – International Workshop on “Active tectonics and dating” à Praz-sur-Arly (Haute-Savoie)

Septembre

6-11/09 – Assemblée générale de l'European Seismological Commission à Corfu (Grèce)

Octobre

6-8/04 – 17e édition de la Réunion des sciences de la Terre à Lyon

4-8/10 – 1e Conférence internationale Ozcar Tereno « Advancing Critical Zone Science »

Novembre

2-5/11 – Rencontres Scientifiques et Techniques Résif et centenaire BCSF à Obernai (Alsace)

5^e Rencontres scientifiques et techniques Résif en Alsace

La cinquième édition des Rencontres scientifiques et techniques Résif se tiendra à Obernai, en Alsace, du 2 au 5 novembre 2021. Elle réunira les organismes et laboratoires membres du réseau, pour un état des lieux de l'infrastructure, des présentations d'instruments, de recherches et de résultats, des ateliers et des posters. Ces rencontres sont une occasion unique pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens d'échanger avec leurs collègues de toute la France sur leurs pratiques, d'initier des collaborations et d'entretenir les relations conviviales indispensables au bon fonctionnement de l'infrastructure.

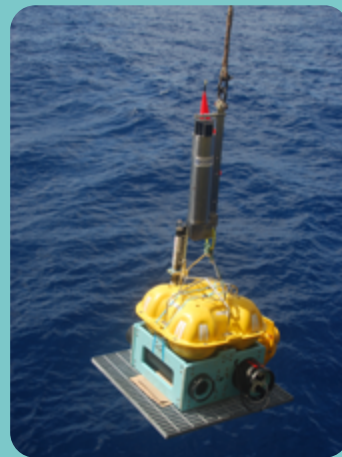


Photo de couverture :
OBS courtes périodes du parc CNRS-Insu lors de la campagne Momarsat2013 sur le navire océanographique Pourquoi Pas?
Crédits : Wayne Crawford, IPGP

Directrice de la publication : Andrea Walpersdorf
Responsable éditoriale : Véronique Bertrand
Design graphique : Céline Emonet
Impression : Groupe Car, Strasbourg

Photos et illustrations Résif :
<https://hal.archives-ouvertes.fr/RESIF/>

© Résif 2020