

# Lettre d'information

## Rēsif

Réseau sismologique  
et géodésique français

n° 23  
Mai 2023



Epos  
**Rēsif** 

[www.resif.fr](http://www.resif.fr)



# édito

## sommaire

### Vie de Résif

Lancement des ICS EPOS	3
Nouvelle action spécifique SMM	4
RLBP : état actuel et pistes pour l'avenir	5
Portrait de Vanessa Martray	6
Séismes en Turquie : la communauté mobilisée	7

### Recherche

Suivi sismologique à la Réunion	9
Discrimination d'évènements par Deep Learning	10
Epaisseur de glace et sismique passive	11
Etude du géoïde au Bangladesh	12
Excursions FACT dans le Nord-Ouest	13

### Ingénierie et instrumentation

MACIV : réseau sismologique dans le Massif Central	14
Gravimétrie à Kerguelen	16
Tests de capteurs OBS	17
Sismomètres très large bande	19

### Évènements

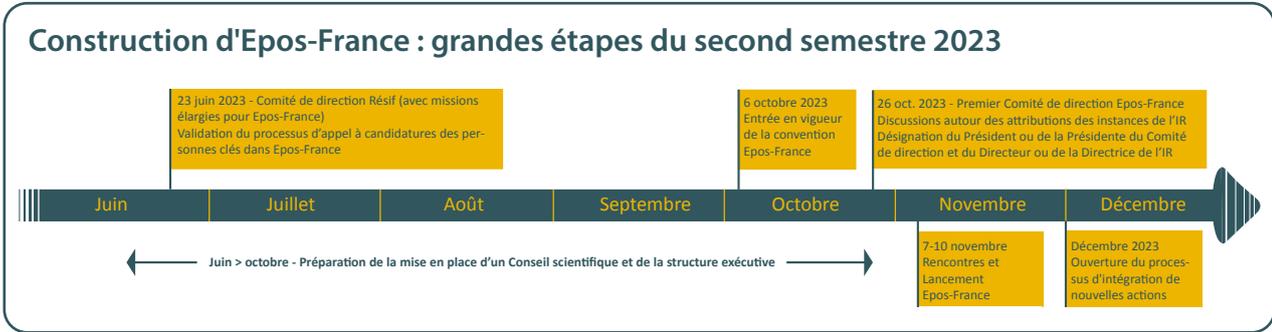
1ères Rencontres Epos-France	20
Agenda	20

Voici la dernière newsletter Résif ! Les efforts déployés pour créer la structure administrative de la nouvelle IR Epos-France mettent effectivement toutes les chances de notre côté pour que la Convention de Consortium soit signée par les 19 partenaires cet été et qu'en octobre 2023 Epos-France prenne la suite de Résif-Epos. Un immense Merci aux 61 membres de la communauté Terre solide qui ont contribué au projet scientifique et technique d'Epos-France et aux responsables des 13 Actions Résif actuelles qui ont fourni des descriptifs détaillés et homogénéisés de leur Action (150 pages au total). Cela nous permettra de démarrer la nouvelle IR à partir d'une base claire et complète. merci aussi aux coordinateurs des contributions françaises aux sept autres disciplines d'EPOS qui ont répondu présent pour démarrer l'intégration progressive de leurs thématiques dans Epos-France. Le lancement de cette nouvelle IR implique la mise en place d'un nouveau Conseil Scientifique adapté aux contours élargis, mais aussi des nouveaux mandats pour les instances exécutives : le/la directeur/trice, et le bureau. L'appel à candidatures est ouvert, prenez contact avec le bureau actuel pour tout renseignement ! Personnellement, je serais prête à assurer la direction d'Epos-France pendant la période de transition entre la signature de la convention et la date de fin de mon mandat à la direction Résif, prévue en 2025 - en particulier parce que la communauté est formidable et une source constante de motivation. Au cours des premières Rencontres Epos-France (REF), du 7 au 10 novembre près de Nice, nous prévoyons une cérémonie de lancement festive. Une première circulaire avec des détails du programme et des inscriptions vous parviendra fin mai. Plus d'information sur la mise en place d'Epos-France ci-contre, ainsi que l'annonce de l'ouverture des services intégrés EPOS.

En attendant Epos-France, une nouvelle Action Résif a été validée par le Comité Directeur Résif. Il s'agit du parc instrumental de Sismologie Mobile Marine (SMM). SMM regroupe les 3 parcs d'instruments marins français, INSU/IPGP, IRD/OCA/Géoazur et Ifremer/UBO/Geo-Ocean, qui vont être considérablement complétés dans le cadre du projet PIA3+ Marmor. Outre un point d'entrée unique pour l'accès à l'ensemble des instruments, cette action met également en place un nœud de gestion et distribution des données acquises en format standard de sismologie terrestre, relié au Système d'Information sismologique de Résif, afin d'optimiser leur utilisation.

Finalement, les séismes de Turquie et Syrie de février mobilisent une grande partie de notre communauté. Ces évènements montrent l'intérêt d'un accès rapide aux données multidisciplinaires et confirment une fois de plus l'importance de services et produits intégrés et transnationaux portés par EPOS, comme les modèles d'aléa et de risque sismiques en Europe, avec des contributions fortes et coordonnées d'Epos-France.

Andrea Walpersdorf, directrice Résif



## Lancement des services intégrés (ICS)

EPOS a ouvert officiellement ses services intégrés et le portail d'accès le 25 avril. L'interface connecte environ 250 services de données dans le domaine de la terre interne, facilitant ainsi la recherche interdisciplinaire par une aisance accrue de découverte et d'accès à des données, produits de données, et d'autres services ('DDSS', pour Data, Data Products, Software and Services).

Les services intégrés d'EPOS reposent sur de nombreux services distribués sur l'ensemble des pays européens et organisés en 9 Services thématiques scientifiques : Seismology, Near Fault Observatories, GNSS Data and Products, Volcano Observations, Satellite Data, Geomagnetic Observations, Anthropogenic Hazards, Geological Information and Modeling, and Multiscale Laboratories. Chaque service thématique a ses propres standards internationaux et/ou traditions concernant le format des données, des métadonnées et des services. L'accès fluide pour l'utilisateur via les services intégrés d'EPOS a donc nécessité l'élaboration d'une couche tech-

nique intermédiaire qui traduit chacun des services et formats en une forme homogène d'accès pour les scientifiques. En sus, les services thématiques opèrent des portails monodisciplinaires avec des fonctionnalités spécifiques pour leur thématique. Les consortia des services thématiques forment le cadre de la collaboration disciplinaire et interdisciplinaire au niveau national et européen et restent ouverts pour l'intégration de nouveaux membres. La France contribue avec des DDSS dans l'ensemble des services thématiques et héberge une partie des services intégrés. La diversité et la richesse des données acquises par l'infrastructure d'observation Epos-

## Conventions d'écriture

Les règles typographiques suivantes s'appliquent pour toute utilisation des noms :

**Epos-France / IR Epos-france**  
**EPOS / ERIC EPOS**

Les logos et codes couleurs Epos-France sont disponibles sur le site web Résif.

[www.resif.fr/ressources/charte-graphique/](http://www.resif.fr/ressources/charte-graphique/)

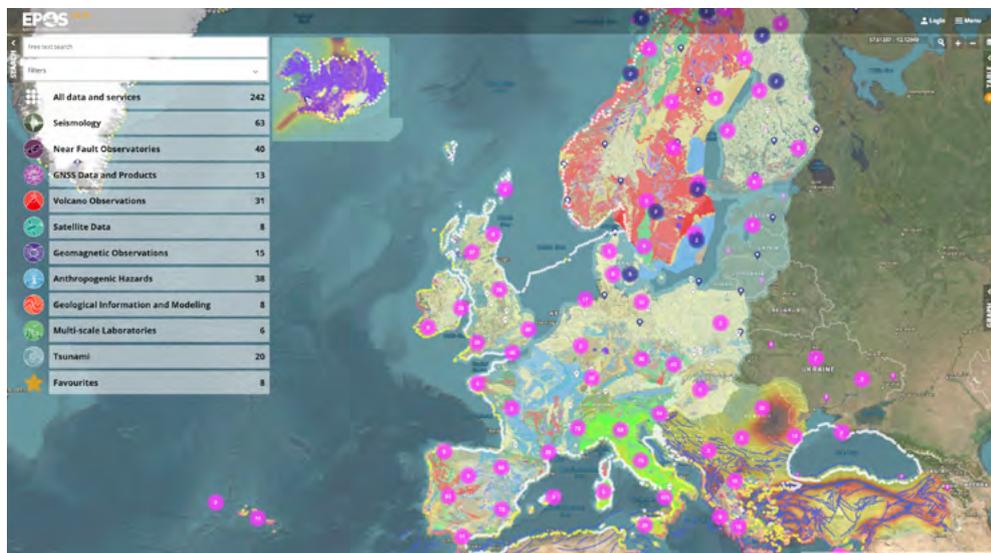
France est un atout important pour cette implication au niveau européen, qui sera coordonnée au sein d'une Action Transverse dédiée dans Epos-France, à partir d'octobre 2023.

Helle Pedersen

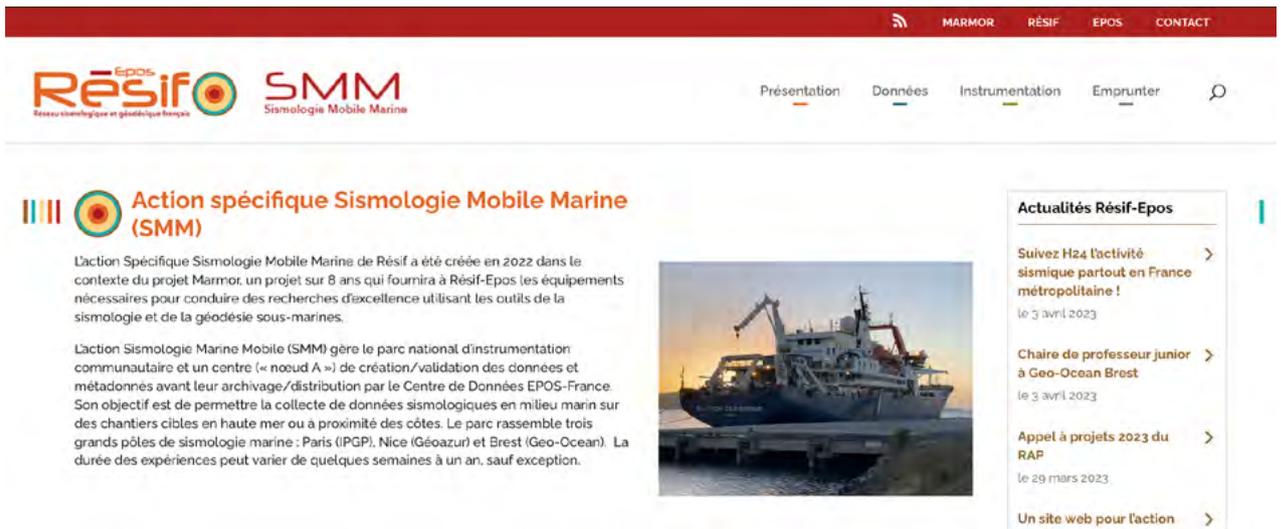
### En savoir plus

EPOS : [www.epos-eu.org](http://www.epos-eu.org)

ICS : [www.ics-c.epos-eu.org](http://www.ics-c.epos-eu.org)



1. Fonctions et services du portail de données EPOS



1 Page d'accueil du site web SMM



## Nouvelle action spécifique Sismologie mobile marine

L'Action spécifique Sismologie Mobile Marine (AS SMM) Résif se met en place autour de trois grands objectifs. Outre celui de fédérer la communauté scientifique française utilisant la SMM, cette action va proposer aux chercheurs français un point d'entrée unique pour l'accès à un éventail d'instruments adaptés à une recherche scientifique de qualité (y compris en cas d'intervention rapide). L'AS SMM va par ailleurs mettre à disposition les données acquises par les instruments du parc et leurs métadonnées via le centre de données Résif/Epos-France.

L'AS SMM dispose, depuis le 28 mars, d'un site web dédié où il est possible de consulter le calendrier des campagnes et de réserver des instruments. Ces deux outils seront encore améliorés dans les mois à venir.



2 Le capteur A0A Résif et OBS CNRS-INSU prêts à être déployés sur le pont du navire Marion Dufresne lors de la campagne Mayobs15 à Mayotte © Denis Dausse

Le nouveau parc national d'instrumentation communautaire SMM est le fruit du rassemblement des parcs historiques gérés par trois grands pôles de sismologie marine : Paris (IPGP/INSU), Nice (Géoazur/OCA/IRD) et Brest (Geo-Ocean/UBO/Ifremer). La mise en place de l'Action spécifique s'accompagne par ailleurs d'un développement considérable du parc, grâce à l'acquisition de nouveaux instruments financés par le projet PIA3/Equipex Marmor (Marine Advanced geophysical Research equipment and Mayotte multidisciplinary Observatory for research and Response). Il s'agit en particulier de :

- un nouveau parc d'OBS (Ocean Bottom Seismometers) légers (mis en œuvre par Geo-Ocean) et des hydrophones dérivants pouvant se poser sur le fond des océans (mis en œuvre par Géoazur) dans le cadre d'intervention rapide pour le suivi de crises sismiques et/ou volcaniques
- un nouveau parc d'OBS légers (mis en œuvre par Géoazur) dédiés à l'imagerie par sismique active
- un nouveau parc dédié à la sismologie avec des capteurs large-bandes par jouvence et l'amélioration des OBS du parc existant (mis en œuvre par l'IPGP), l'acquisition de nouveaux OBS (mis en œuvre par Géoazur) et l'intégration d'un parc d'hydrophones sur mouillages avec l'achat d'une nouvelle station hydro-acoustique (mis en œuvre par Geo-Ocean).

Véronique Bertrand, Audre Galve, Sara bazin

### En savoir plus

Site web : [smm.resif.fr](http://smm.resif.fr)

Centre de données : [seismology.resif.fr](http://seismology.resif.fr)

## RLBP : état actuel et pistes pour l'avenir

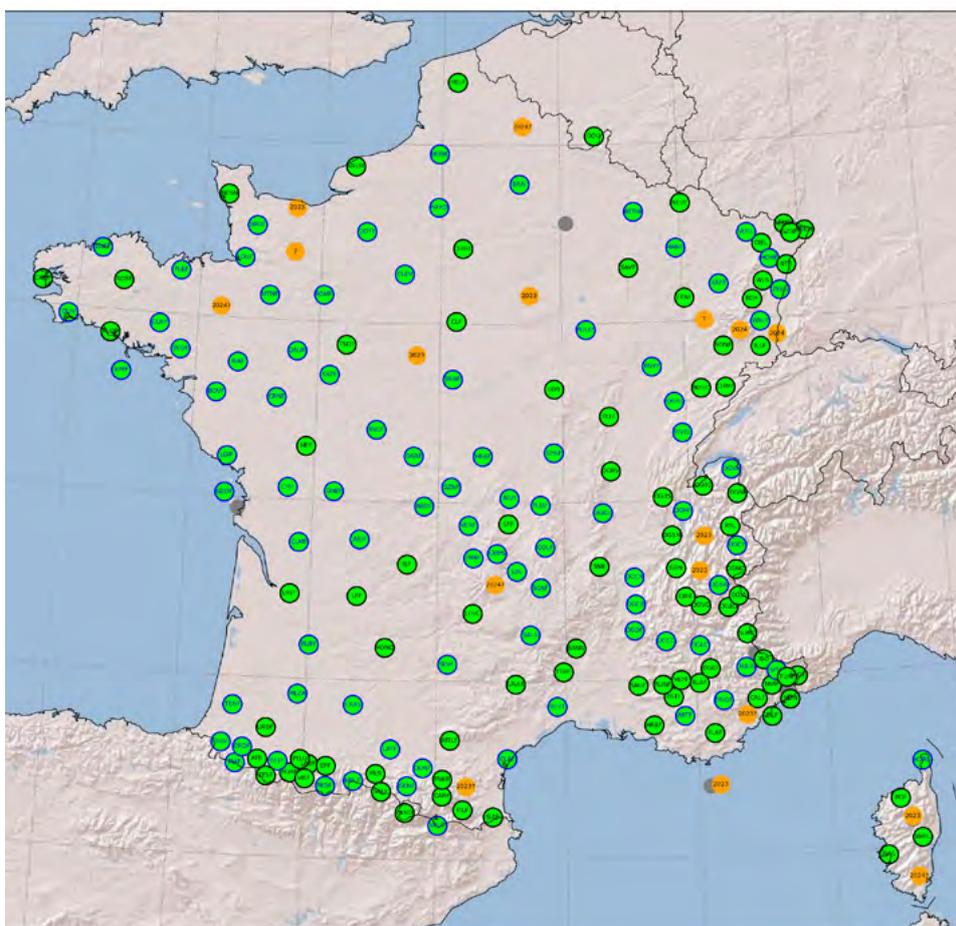
Il y a un peu plus de 15 ans, la communauté française mettait en avant la nécessité de développer sur le territoire hexagonal un réseau sismologique permanent composé de stations à large bande passante et grande dynamique pouvant s'insérer dans le dispositif européen. En 2007, le service national d'observation RLBP (Réseau Large Bande Permanent) était créé et sa construction fut l'un des principaux objectifs de Résif-Epos et de l'EquipEx Résif-Core (2012-2021).

Grâce aux financements associés, mais aussi à l'implication constante et sans faille du personnel de huit OSU (Eost, IPGP, OCA, OMP, OPGC, Oreme, Osug, Osuna), du CEA et de la Division technique de l'INSU, le RLBP est aujourd'hui constitué d'environ 185 stations (dont une quinzaine ayant le statut « RLBP associé ») réparties de manière relativement homogène sur l'ensemble du territoire et qui fournissent des données continues et de grande qualité à travers le Système d'Information sismologique de Résif-Epos. En 2022, le volume de données distribué a atteint 53 To (soit environ 2 fois le volume total de données disponibles) et plus de 12 millions de requêtes ont été effectuées via le webservice data-select. Ces données ont notamment permis de multiplier par 7 le nombre d'évènements sismiques localisés annuellement par le BCSF-Réness sur le territoire par rapport à 2012. Elles servent également à tout un ensemble d'études autour de la structure superficielle et

profonde de la Terre, de l'estimation de l'aléa sismique du territoire, et des interactions entre la Terre solide et ses enveloppes externes (activité océanique, évènements climatiques extrêmes, entrées météoritiques, ...). Le RLBP constitue également une ossature pour des déploiements temporaires et denses de sismomètres (issus du parc national Résif-Sismob) comme lors des expériences Pyrope et Alp-Array, et désormais pour le projet Maciv centré sur le Massif Central.

Aujourd'hui, une quinzaine de sites du RLBP restent encore à construire pour atteindre la configuration initialement prévue. Ils devraient être

réalisés dans les deux prochaines années. Mais il est également désormais temps de réfléchir au futur du réseau. Il s'agira bien sûr d'assurer un fonctionnement optimal et pérenne de ce dispositif d'envergure car nombre d'études nécessitent des observations stables sur un temps long. Mais il est également nécessaire de faire évoluer le RLBP pour qu'il s'adapte au mieux aux nouveaux besoins de ses utilisateurs. Afin de réfléchir à ces nouveaux challenges, une assemblée générale du RLBP s'est tenue pendant trois jours en Mars 2023 à Paris. Elle a notamment permis de dégager quatre grands



1 Stations opérationnelles (cercles verts) et futures (cercles oranges) de Résif-RLBP au 1er mars 2023 © J. Vergne - RLBP

.../...



.../...

axes de développements techniques qui seront déclinés sous la forme de groupes de travail :

#### L'amélioration de la qualité des données

Elle passe notamment par le développement et la mise en œuvre opérationnelle de procédures de détections d'erreurs (orientation, datation, réponse instrumentale, ...), de calibration in-situ, et d'outils permettant une interaction plus aisée entre utilisateurs scientifiques, opérateurs de stations et centres de données.

#### L'amélioration de l'installation des stations

Le but est de limiter l'influence de sources locales de bruit (activité anthropique, conditions météorologiques, corrosion, ...). Les installations en forage promues lors de la construction du RLBP ont montré tout leur intérêt dans ce cadre. Des systèmes d'isolation des capteurs de surface sont également à l'étude ainsi que des pistes d'amélioration du fonctionnement des armoires techniques.

#### Le développement de sites multi-instrumentés

Il permettra en particulier de mieux caractériser localement le champ d'onde sismique, incluant l'influence des conditions environnementales, et de mener des études aux interfaces. Cela passe par l'installation de capteurs accélérométriques en lien avec le RAP (Réseau Accélérométrique Permanent - 45 sites actuellement co-localisés), de stations géodésiques en lien avec l'Action spécifique Rérag, de stations météo (5 sites actuellement équipés) et de piezomètres, de capteur de rotation (site prototype PYLO à Lourdes), voire de capteurs infrasons ou d'antennes sismiques locales.

#### La caractérisation complète de l'ensemble des sites du RLBP

Elle concerne tant la description et la réponse de site dans le cadre d'un travail collaboratif avec le RAP. Cette caractérisation est notamment critique pour utiliser correctement les données du RLBP dans les études d'aléa sismique et pour estimer plus précisément les magnitudes. Cela doit s'accompagner d'un descriptif détaillé des conditions d'installation de chaque site notamment pour pouvoir modéliser l'effet d'enfouissement des capteurs installés en fond de forage.

L'ensemble des acteurs du RLBP sont désormais mobilisés pour mener à bien ces actions afin que ce dispositif d'observation puisse continuer à répondre aux attentes de la communauté scientifique.

Jérôme Vergne

## Portrait de Vanessa Martray



### Vanessa Martray est Responsable Financière de la Division Technique de l'INSU.

Elle est entrée au CNRS en tant que Technicienne en 1996, après avoir obtenu un BTS de comptabilité-gestion. Après un premier poste de gestionnaire à l'Agence comptable principale du CNRS, elle a rejoint en 2000 la Délégation du siège du CNRS, tout nouvellement créée. Elle était chargée de la liquidation des dépenses des laboratoires rattachés à cette nouvelle délégation.

En 2004, elle a quitté le siège du CNRS pour Meudon, pour gérer les conventions de recherche au Service financier de la délégation. Elle était également chargée de la mise en place du nouveau logiciel de gestion du CNRS, BFC, mis en application en 2007. Elle a formé ses collègues sur cette nouvelle application.

En 2010, elle a rejoint la Division technique de l'INSU. Avec le départ à la retraite de l'administratrice, elle a pris en charge la responsabilité financière de la DT, la partie RH étant gérée par une collègue sur le site de la Seyne-sur-Mer. En dehors du CNRS, elle s'intéresse à un autre domaine de recherche : l'archéologie, dans le cadre d'une association portant le projet de restauration d'un château du Moyen-Age.



## Séismes en Turquie : la communauté française mobilisée



1 Déplacement latéral en surface déformant les rails à Şekeroba © Cengiz Zabcı

### Contexte

Dans la nuit du 5 au 6 février 2023, un tremblement de Terre de magnitude Mw 7,8-8 a secoué la région frontalière entre la Turquie et la Syrie, suivi d'un autre séisme de magnitude Mw 7.5-7.7 neuf heures plus tard. Dans les jours et semaines qui ont suivi, de nombreuses répliques, dont certaines de forte magnitude, ont contribué à aggraver la situation, faisant au total près de 50 000 morts, plus de 100 000 blessés et plus de 34 milliards d'euros de dégâts (bilan au 28 février 2023).

La Turquie se situe en majeure partie sur la plaque Anatolienne, qui se retrouve pincée entre la plaque Eurasienne au Nord, le long de la faille Nord Anatolienne et la plaque Arabique à l'Est, le long de la faille Est Anatolienne. La vitesse de la plaque Anatolienne le long de ces deux systèmes de faille majeures est, respectivement, de 2 et 1 cm/an. La séquence du séisme de Turquie-Syrie, également appelée séquence

de Kahramanmaraş, a eu lieu sur la faille Est Anatolienne, un décrochement sénestre d'environ 700 km de long.

Le séisme, qui a duré plus de 120 secondes, s'est propagé sur 300 km le long de plusieurs segments de la faille Est Anatolienne qui n'avaient pas rompu lors de forts séismes depuis 150-200 ans. Il s'est terminé au nord, proche d'un segment ayant déjà rompu en 2020 (Mw 6.7 ; Elazığ), et au sud à la jonction avec les failles de la Mer Morte et l'arc chipriote. Les déplacements latéraux mesurés en surface atteignent cinq mètres dans certaines régions. Cette première rupture importante a possiblement perturbé le champ de contraintes régional, conduisant à l'initiation du second séisme le long des failles de Surgu et Cardak. Bien qu'ayant une rupture moins longue (environ 100 km), le second évènement a provoqué des mouvements en surface de grande amplitude (7-8 mètres). La magnitude de

cet évènement est bien au-delà des magnitudes attendues pour les répliques de forts séismes. Cela pourrait indiquer que les deux séismes sont deux évènements majeurs ayant chacun sa propre séquence de répliques. La proximité de tels séismes, spatialement et temporellement, est très rare et rappelle les séquences de Bolnay/Tsetserleg en Mongolie au début du XXe siècle. Une forte réplique (Mw 6.4) a été enregistrée le 20 février 2023 à la terminaison sud de la rupture, laissant présager de potentiels forts séismes le long de failles majeures n'ayant pas rompu depuis longtemps.

### Mobilisation de la communauté scientifique française

Au fil des jours, un travail collaboratif a été mené par les scientifiques de Résif et ForM@ter dans de nombreux laboratoires pour avancer dans la compréhension des séismes, déterminer les failles qui ont rompu, la profondeur et l'étendue des ruptures, les processus de déformation à l'œuvre, l'évolution des répliques... La cellule post-sismique de l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS a été activée afin de centraliser les contributions, qui ont été mises à disposition des collègues turques et syriens.

Dès le lendemain du premier séisme, la communauté scientifique Résif a été largement sollicitée par les journalistes pour commenter l'évènement, puis les répliques qui ont succédé. Des dizaines d'interviews ont été accordées aux journaux et médias divers (y compris Turcs), qui ont pu s'appuyer par ailleurs sur le site web l'ObservaTerre de Résif pour une première approche de ces phénomènes.

Au travers de cette catastrophe sans précédent, c'est aussi et une nouvelle fois la question de la prévisibi-

.../...

.../...

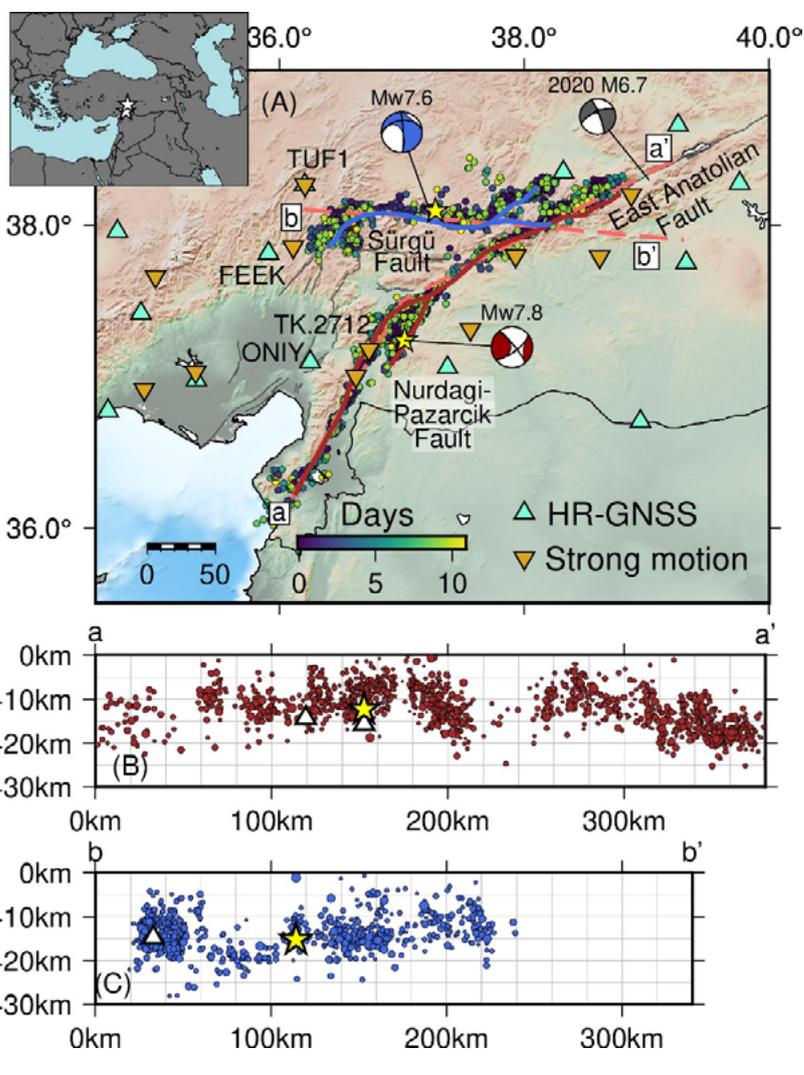
lité de tels phénomènes qui se pose. Les modèles d'aléa et de risque sismiques en Europe, présentés en avril 2022 sur le site web Résif, ont pris tout leur sens.

Véronique Bertrand, Blandine Gardonio, Clément Perrin,

Form@ter : [www.poleterresolide.fr](http://www.poleterresolide.fr)

L'ObservaTerre : [public.resif.fr](http://public.resif.fr)

Nouvelles évaluations d'aléa et de risque sismiques en Europe : [lc.cx@SLrnJA](mailto:lc.cx@SLrnJA)



2 | Carte des répliques associées aux deux séismes de février 2023 (ruptures simplifiées en traits rouge et bleu). Les mécanismes au foyer montrent le mouvement relatif des blocs de part et d'autre de la faille. Ici, on voit un décrochement sénestre (le bloc de gauche s'est décalé vers le sud par rapport à celui de droite). En dessous : Coupes montrant la répartition des répliques en profondeur le long de chaque rupture. Crédits : Diego Melgar



L'érosion sur l'île de La Réunion est responsable de la formation des cirques et d'une topographie particulièrement accidentée. Cette érosion est clairement associée aux fortes précipitations que connaît tous les ans l'île, notamment lors de dépressions et de cyclones tropicaux. La quantification du transport sédimentaire est essentielle pour l'étude de la dynamique des cours d'eau, de l'érosion et des reliefs mais aussi pour l'évaluation des risques et phénomènes afférents. L'objectif principal de l'expérience menée sur la rivière des Pluies et sur la rivière du Mât est d'effectuer un suivi spatio-temporel du transport des sédiments dans des cours d'eau de La Réunion lors d'événements cycloniques en exploitant les signaux sismologiques.

Afin de pouvoir suivre et localiser le transport sédimentaire avec des enregistrements sismiques, nous avons déployé temporairement, de fin 2015 à fin 2022, un réseau sismique appelé Rivière des Pluies (code ZF). Il était composé de 11 stations de type large bande, dont six au niveau de la rivière des Pluies dans le nord de La Réunion, trois à proximité de la rivière du Mât dans l'est de l'île, une à proximité de la rivière d'Abord dans le sud et une à la Saline, à proximité de la côte ouest de l'île et d'un cours d'eau : la ravine des Trois-Bassins.



1 | Exemple d'installation pour la station RIV5.

# Suivi sismologique du transport sédimentaire lors de cyclones à La Réunion

A titre d'exemple, nous présentons, pour une station de la rivière du Mât, l'évolution de la moyenne quadratique (RMS) comparée avec la hauteur d'eau et les précipitations lors du cyclone Dumazile en mars 2018. Les résultats montrent que l'amplitude du signal sismique est fortement corrélée à la hauteur d'eau dans la rivière.

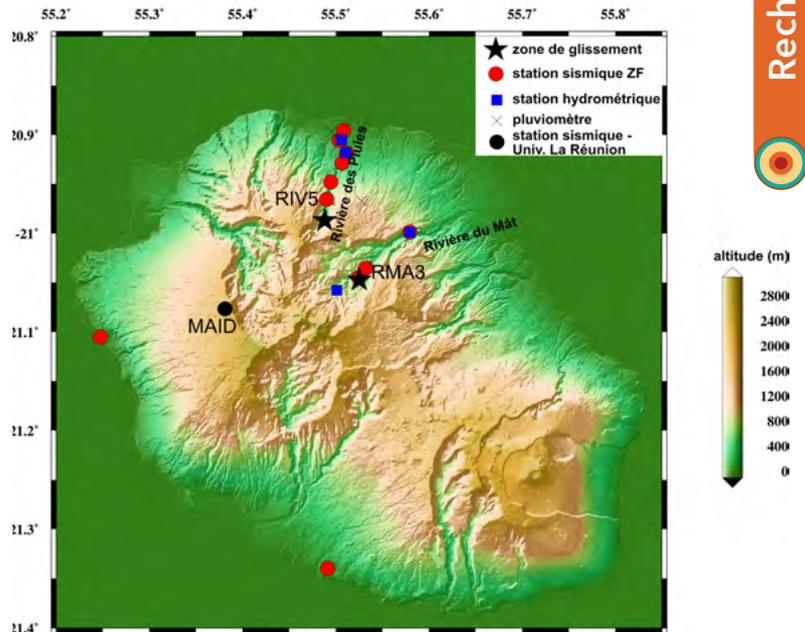
Les signaux sismiques enregistrés par les stations installées le long de la rivière des Pluies lors du même cyclone Dumazile ont également permis d'estimer la vitesse de l'onde de crue au sein du réseau, entre 5 et 7 m/s.

Les données du réseau sismique Rivière des Pluies ont enfin été utilisées par l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP) afin de mieux caractériser la sismicité de la partie nord de La Réunion, qui était moins densément instrumentée que celle où est situé le volcan.

Depuis la fin de l'expérience temporaire, deux stations sismiques ont été pérennisées dans la rivière des Pluies dans le cadre de l'observatoire de l'EROSion à La RéUNion (Errorun) qui fait partie de l'infrastructure de recherche Ozcar (Observatoire de la Zone Critique Application et Recherche). Une de ces stations (RVP), ainsi qu'une station située à proximité de la rivière du Mât (LAC), transmettent leurs données en temps réel à l'OVPF-IPGP. Elles sont accessibles à partir du réseau PF, doi : 10.15778/Résif.ZF2015.

Fabrice R. Fontaine, Ghilhem Barruol, Jean-Lambert Join, Alicia Gonzalez

Cette expérience a été soutenue par le projet FEDER ReNovRisk-Erosion (financé par la Région Réunion et l'union européenne), la Région Réunion, la fédération OMNCG et l'Observatoire des Sciences de l'Univers - Réunion à l'Université de La Réunion, le programme TelluS-Syster de l'INSU et l'INSU-Résif/SisMob.



2 - Localisation des stations sismiques déployées dans le cadre du projet. Source du modèle numérique d'élevation : Shuttle Radar Topography Mission, 30-m de résolution.

### En savoir plus

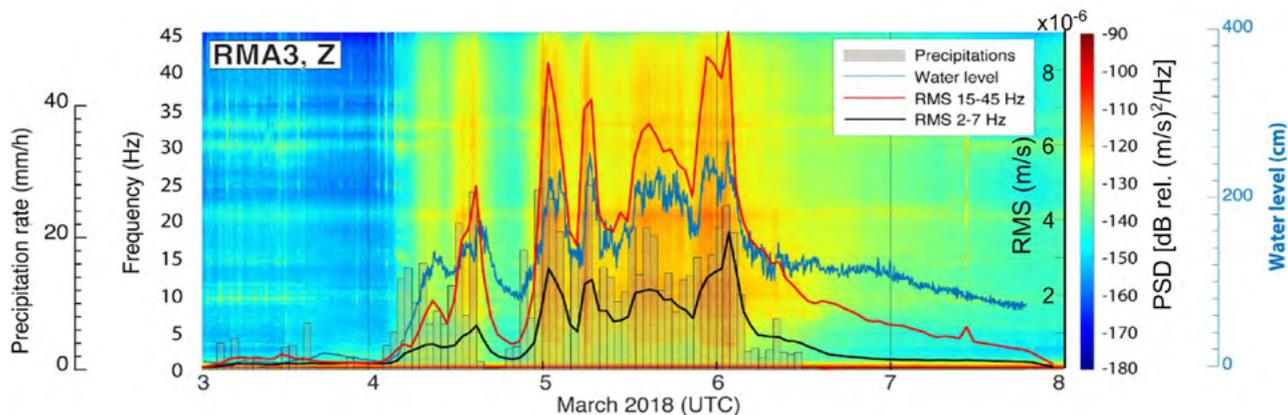
Données : [doi.org/10.18715/reunion.pf](https://doi.org/10.18715/reunion.pf)  
 Ozcar Errorun : [www.ozcar-ri.org/fr/observatoire-errorun/](http://www.ozcar-ri.org/fr/observatoire-errorun/)

### Références

Duputel Z. et al., 2021, Seismicity of La Réunion island, C. R. Géoscience - Sciences de la Planète, 353, 237-255, doi.org/10.5802/crgeos.77

Gonzalez A. et al., 2022, Seismic signature of a river flooding in La Réunion Island during the tropical cyclone Dumazile (March 2018), submitted to J. Appl. Geophys.

Gonzalez A., 2019, Suivi sismologique de l'impact des cyclones sur la charge de fond de la Rivière des Pluies et de la Rivière du Mât à La Réunion, thèse de l'Université de La Réunion, 146 p.



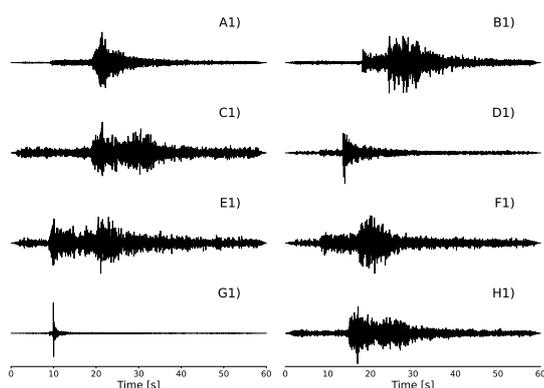
3 - Spectrogramme déterminé à la station sismique RMA3 installée à proximité de la rivière du Mât lors du cyclone Dumazile. (Gonzalez et al. 2022).



## Discrimination entre événements naturels et anthropiques basée sur le Deep Learning

L'étude des séismes de faible magnitude permet de mieux comprendre l'activité sismique naturelle, en particulier dans les régions continentales stables où il est difficile d'expliquer l'existence de tremblements de terre dans des conditions de faibles déformations.

L'un des principaux défis dans l'élaboration d'un catalogue d'événements de faible amplitude est la discrimination entre les événements naturels (événements tectoniques) et les événements anthropiques (causés par les activités humaines, comme les tirs de carrières ou les explosions militaires).



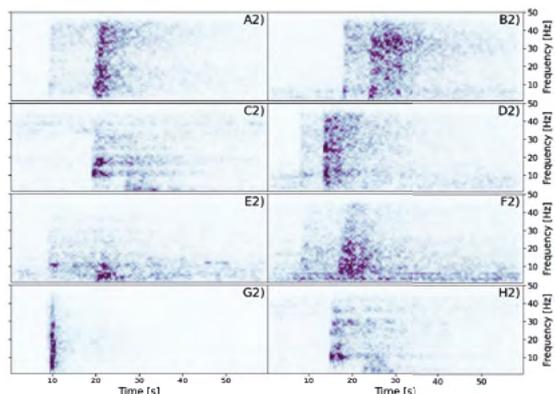
une continuité fréquentielle, localisée temporellement au niveau des arrivées des ondes sismiques et formant des bandes verticales. Pour les événements anthropiques, l'énergie est généralement confinée aux fréquences les plus basses et forme des bandes horizontales.

Compte tenu des informations « visuelles » présentes dans ces spectrogrammes, nous avons choisi d'implémenter et d'entraîner un Réseau de Neurones Convolutif (CNN). Ce type de réseau de neurones permet d'extraire des caractéristiques discriminantes par l'application successive de filtres de taille définie.

du BCSF-Rénass, cette application donne une précision de discrimination de 98,18%.

Nous avons ensuite appliqué, sans aucun re-entraînement, notre CNN aux données d'une campagne post-sismique dans le Nord-Ouest de la France (48 événements) et de l'UUS (University of Utah Seismograph Stations) aux États-Unis (396 événements entre janvier et mars 2016). Nous atteignons, respectivement, une précision de 100,00% et 96,72%.

Comme chaque discrimination est accompagnée d'un niveau de confiance, notre ap-



1 Exemples de cinq événements naturels (A, B, D, F et G) et de trois événements anthropiques (C, E et H), enregistrés par les stations du réseau FR, avec les spectrogrammes associés. Les signaux sismiques correspondent aux données brutes normalisées de la composante verticale. Les spectrogrammes sont normalisés par leur maximum (C. Hourcade et al, 2023).

Pour parvenir à une discrimination automatique, nous avons développé une méthode basée sur du Deep Learning : grâce à une base de données suffisamment importante, des algorithmes d'intelligence artificielle peuvent s'entraîner à reconnaître, comme des humains, des objets naturels et prendre des décisions.

Pour constituer cette base de données, nous avons choisi d'utiliser les spectrogrammes de formes d'ondes sismiques. La Figure montre huit exemples d'événements naturels et anthropiques. En observant seulement les sismogrammes (panneau de gauche de la figure), la discrimination n'est pas évidente. Une fois convertis en spectrogrammes, les signaux issus des événements naturels présentent

Après avoir choisi l'architecture du CNN, nous utilisons le catalogue du BCSF-Rénass entre le 1er janvier 2020 et le 1er juin 2021, constitué d'événements de  $M_l$  (magnitude locale)  $\leq 3$ , pour réaliser la base de données d'entraînement. Elle est composée de 50 000 spectrogrammes (trois composantes) de 60 secondes entre 1 et 50 Hz.

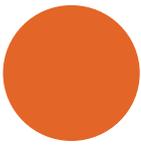
Pour démontrer la performance de cette approche, le CNN entraîné est ensuite appliqué à différents catalogues. Dans un premier temps, nous l'avons appliqué à des événements détectés en France métropolitaine entre juin et novembre 2021, jamais vu par le réseau de neurones. Les prédictions pouvant être facilement comparées au catalogue

proche peut être considérée comme un outil d'aide à la décision pour les analystes. Elle permet également de construire des catalogues d'événements sismiques fiables et de réduire le nombre d'événements mal étiquetés dans les bases de données.

Céline Hourcade, Mickaël Bonnin, Éric Beucler

### Référence

Céline Hourcade et al., New CNN-based tool to discriminate anthropogenic from natural low magnitude seismic events, *Geophysical Journal International*, Volume 232, Issue 3, March 2023, Pages 2119-2132, doi.org/10.1093/gji/ggac441



# Suivi de l'épaisseur de glace avec la sismique passive et l'apprentissage automatique

Comprendre la dynamique de la glace de mer dans le changement climatique est un défi majeur en océanographie et en climatologie, d'autant plus dans la perspective à venir d'un océan Arctique dénué de glace de façon saisonnière. Par exemple, les variations spatiales de l'épaisseur de la glace et de la neige modifient la façon dont la lumière est filtrée à travers la glace de mer, ce qui influence la prolifération de phytoplancton à la fois dans l'Arctique et dans l'Antarctique. Le suivi à grande échelle de l'étendue et de l'épaisseur de la glace de mer repose sur des radiomètres à micro-ondes embarqués sur satellite. La résolution spatiale typique pour la couverture et la concentration de glace de mer est d'environ 1 km. L'estimation de l'épaisseur se traduit essentiellement par une épaisseur apparente et intégrée sur la même échelle spatiale, car son estimation est sensible à de nombreux facteurs d'échelle locale, tels que la densité de la glace, la rugosité de surface, l'enneigement, la polynie\*... qui conduisent à de grandes incertitudes, en particulier à des échelles inférieures au kilomètre. Compte tenu de l'évolution rapide de l'état de la glace de mer, l'obtention de résolutions temporelles et spatiales

élevées avec des estimations améliorées de l'épaisseur de la neige et de la glace établira les nouvelles normes de surveillance de la glace de mer.

Le projet Icewaveguide a établi la preuve de concept de méthodes de surveillance sismique passive pour estimer simultanément l'épaisseur, la rigidité et la densité de la banquise, soit par l'interférométrie du bruit sismique enregistré dans la glace soit en exploitant les signaux des tremblements de glace. Une résolution spatiale de quelques dizaines de mètres et une résolution temporelle de quelques heures ont été atteintes. Tant sur la banquise côtière que sur la banquise, les épaisseurs estimées étaient en très bon accord avec celles trouvées avec les forages et les levés électromagnétiques.

Le chaînon manquant entre l'acquisition de données et la surveillance à long terme de la glace de mer est la capacité d'extraire, dans les enregistrements continus, les parties utiles des formes d'onde sismiques du bruit de fond, pour des estimations automatiques des propriétés de la glace de mer. Pour résoudre ce problème, nous proposons de combiner une méthode d'apprentissage pour le regroupement automatique

des formes d'onde enregistrées sur la glace de mer avec l'inférence bayésienne pour localiser la position de milliers de tremblements de glace tout en évaluant simultanément l'épaisseur de la glace (Figure 1a). L'énergie des tremblements de glace peut également être calculée pour dériver une loi d'échelle (Figure 1b), qui peut contenir des informations sur la structure de la glace. On retrouve une loi de puissance avec une pente de -0,9 entre 400 J et 80000 J. Celle-ci est plus importante que pour les séismes, pour lesquels la loi d'échelle typique en énergie a une pente de -0,66.

Ludovic Moreau, Léonard Seydoux, Jérôme Weiss

\* Polynie : zone, en Arctique ou en Antarctique, qui reste libre de glace ou couverte d'une couche de glace très mince, au milieu de la banquise (Wikipedia).

## Références

Moreau, L. and Résif (2019), Svalbard - Vallunden (Icewaveguide), doi.org/10.15778/Résif.XG2019.

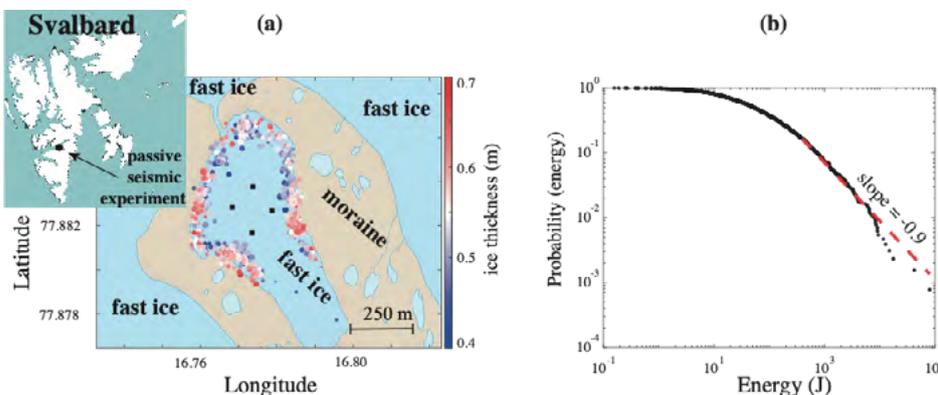
Moreau, L. et al. (2020), Sea ice thickness and elastic properties from the analysis of multimodal guided wave propagation measured with a passive seismic array, *J. Geophys. Res. Oceans* 125, doi.org/10.1029/2019JC015709

Moreau, L. et al., Accurate Estimations of Sea Ice Thickness and Elastic Properties From Seismic Noise Recorded With a Minimal Number of Geophones: From Thin Landfast Ice to Thick Pack Ice, *J. Geophys. Res. Oceans* 125 doi. org/10.1029/2020JC016492

Screen, J. and C. Deser (2019), Pacific Ocean variability influences the time of emergence of a seasonally ice-free Arctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.* 46, doi. org/10.1029/2018GL081393

Serripierrri, A. et al. (2022), Recovering and monitoring the thickness, density and elastic properties of sea ice from seismic noise recorded in Svalbard, *The Cryosphere* 16, doi.org/10.5194/tc-16-2527-2022

Seydoux, L. et al. (2020), Clustering earthquake signals and background noises in continuous seismic data with unsupervised deep learning, *Nature Communications*, 11, 3972, doi.org/10.1038/s41467-020-17841-x



1 - (a) Localisation du réseau de l'expérience de sismique passive qui a duré 28 jours au Svalbard (Mars 2019) avec la position de quatre géophones (carrés noirs). Les points colorés indiquent l'épicentre des tremblements de glace et l'épaisseur de glace associée. Notez l'augmentation d'environ 15 cm pendant le déploiement en raison des températures froides. (b) Loi d'échelle de l'énergie des tremblements de glace.



## Etude du champ de gravité et du géoïde dans le Delta du Bengale au Bangladesh

### Contexte scientifique

Une connaissance précise du géoïde (voir 1) dans les zones littorales et au niveau du continuum Terre-Océan est indispensable pour contraindre notamment les aléas de submersion associées à la remontée des eaux ou à des événements extrêmes (comme les tempêtes, les cyclones ou encore les tsunamis). Des erreurs sur le géoïde à une échelle locale ou régionale peuvent aboutir à des erreurs d'élévation (positionnement vertical) des terres relativement aux océans (voir 1). Ces erreurs sont de plusieurs mètres dans certaines zones géographiques comme dans le delta du Bengale où plus de 200 millions de personnes habitent.

Les plaines deltaïques sont des environnements avec des altitudes très faibles (quelques mètres seulement au-dessus de la mer) et peu contrastées (faible pente). Dans le delta du Bengale, le rythme des marées et des saisons rend aussi ces environne-

ments particulièrement dynamiques, avec des changements saisonniers d'élévation (de l'ordre du mètre) et du champ de gravité particulièrement importants. Les variations de la gravité terrestre peuvent affecter la forme du géoïde à l'échelle régionale. Nous avons donc travaillé à contraindre conjointement et de manière indépendante ces deux observables : la variabilité du champ de gravité local sur Terre et l'élévation du géoïde sur l'eau.

### Campagne amphibienne d'opportunité

La campagne FRES\* au Bangladesh, initialement prévue en avril 2020, a finalement eu lieu en mars 2022. Le point positif de ce retard est qu'il nous a donné du temps supplémentaire pour ajouter une composante de travail dans ce projet de recherche : contraindre le géoïde. Nous avons sollicité l'INSU et le parc de gravimètres PGravi pour utiliser les instruments suivants :

- Le Scintrex-CG5, un gravimètre relatif haute précision qui permet de cartographier les variations locales du champ de gravité et après correction d'avoir une information sur les variations locales du géoïde
- Le Nano-Cyclopée, un instrument de cartographie cinématique du niveau d'eau qui, déployé sur un bateau, permet après correction d'avoir une information sur le géoïde sur l'eau

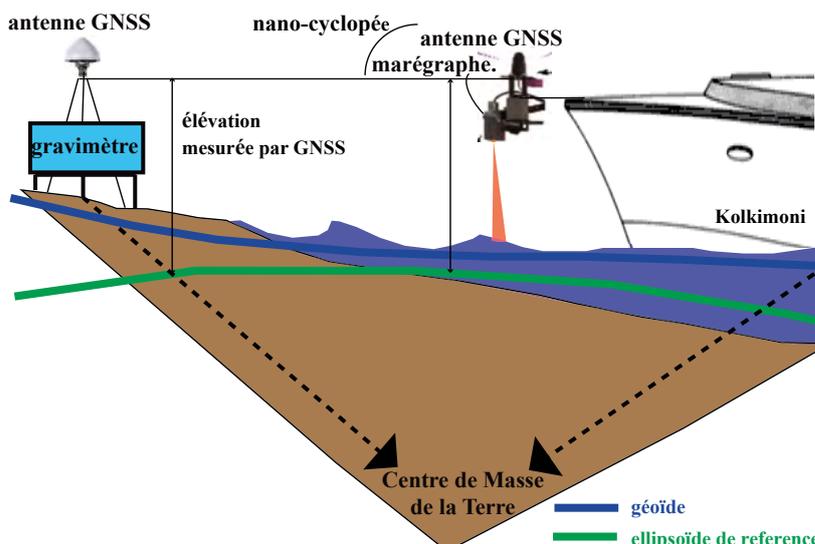
Nous avons mené une campagne de 25 jours de terrain et réalisé un travail amphibien résumé dans la figure 1. Alors que le Nano-Cyclopée fait des mesures continues à l'avant de la proue du bateau (le Kolkimoni), nous débarquons sur la terre ferme pour faire des mesures de gravité (avec le CG5) et d'élévation. Grâce à l'utilisation des voies navigables, nous pouvons accéder à des zones extrêmement isolées où aucune mesure n'a jamais été faite (comme la forêt nationale des Sundarbans, 2 et 3)

Nous avons ainsi acquis plus de 170 mesures de gravité et occupé 55 stations de mesure (figure 2). Le travail d'intégration de ce large jeu de données est encore en cours mais nos résultats préliminaires montrent des erreurs métriques sur les modèles de géoïde local communément utilisés. Ce travail de terrain a aussi été l'opportunité de développer des approches de terrain adaptées au continuum Terre-Océan et à la question des aléas submersions dans le delta du Bengale.

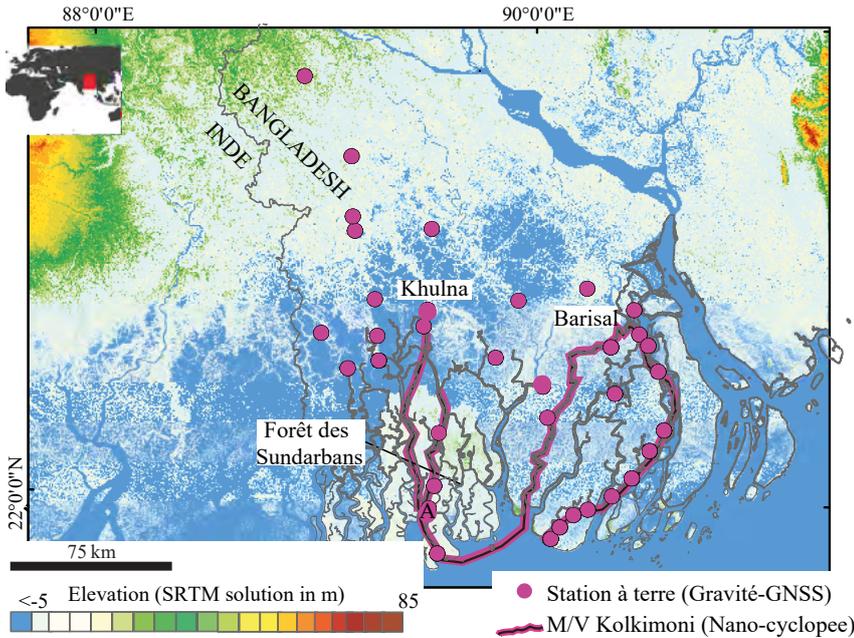
Céline Jo Grall, Laurent Testut, Victor Kerebel, Valérie Ballu

### Référence

Campagne FRES\* pour « Fresh Water Sequestration » associée au projet EAR-19-25974 financé par la fondation de la recherche Américaine. [lc.cx/8ffkx](https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-8ffkx)



1 - : Le géoïde est une surface de référence du champ de pesanteur, proche de la forme de la Terre et qui suit le niveau moyen des mers. Le géoïde présente des anomalies, associées à la variabilité du champ de gravité terrestre à la surface de la Terre. Pour connaître notre élévation en un point donné, nous utilisons des méthodes satellitaires (antenne GNSS). Ces mesures permettent après traitement des données de connaître l'élévation d'un point par rapport à une autre surface de référence : l'ellipsoïde de référence. Cette dernière correspond à une forme idéalisée de la Terre et l'élévation de l'ellipsoïde peut être assez éloignée des élévations réelles des terres et des océans. Comme le géoïde suit le niveau moyen des mers, connaître la forme du géoïde est une variable indispensable pour connaître l'élévation des terres par rapport à la mer.



2 Localisation des mesures réalisées à Terre et sur l'eau lors de la campagne de terrain. La photographie prise dans la forêt des Sundarbans, est localisée par la lettre A.



3 Exemple d'un point de mesure réalisé dans la forêt des Sundarbans. Le couvert végétal est extrêmement dense. Nous choisissons des sites où ce dernier est moins dense afin que l'antenne GNSS capte un nombre suffisant de satellites, les arbres limitant le passage des ondes. Pour des raisons de sécurité, nous devons rester extrêmement groupés et à moins de quelques mètres des gardes forestiers armés qui nous accompagnent, car nous sommes sur le territoire d'un grand prédateur, le tigre du Bengale dont nous avons souvent croisé les traces. Crédits : C. J., Grall.

## Journées d'excursions FACT dans le Nord-Ouest de la France hexagonale

Les 17 et 18 avril 2023, dix-sept chercheurs et enseignants-chercheurs du monde académique et industriel (universités de Nantes, Bretagne-Occidentale, Le Havre Normandie, Montpellier, Université Gustave Eiffel, IRSN, EDF) se sont retrouvés le long de zones de faille et de cisaillement potentiellement actives dans la région de Nantes. Cette

initiative, soutenue par l'axe Failles ACTives (FACT) de l'Action Transverse Sismicité de Résif et l'Observatoire des Sciences de l'Univers Nantes Atlantique (Osuna), a permis de rassembler des experts en géomorphologie, sismo-tectonique, géophysique et sismologie afin de (re)visiter des sites d'intérêt montrant des déformations affectant

des dépôts quaternaires. Sous un soleil radieux, ils ont pu observer et discuter les déformations associées à la branche sud du Cisaillement Sud Armoricaire, aux failles de Machecoul et Guérande, ainsi que dans la région de Pénestin. Les discussions riches et animées ont posé les premiers jalons menant à de futurs projets et collaborations

entre les membres de la communauté FACT-Résif. Ceux-ci viseront à affirmer ou infirmer certains indices de déformations récentes, qui viendront alimenter la base de données FACT en cours de construction.

Clément Perrin

1 - Le groupe sur la plage de la Roche Marie à La Bernerie-en-Retz © Romain Le Roux-Mallouf (par drone).



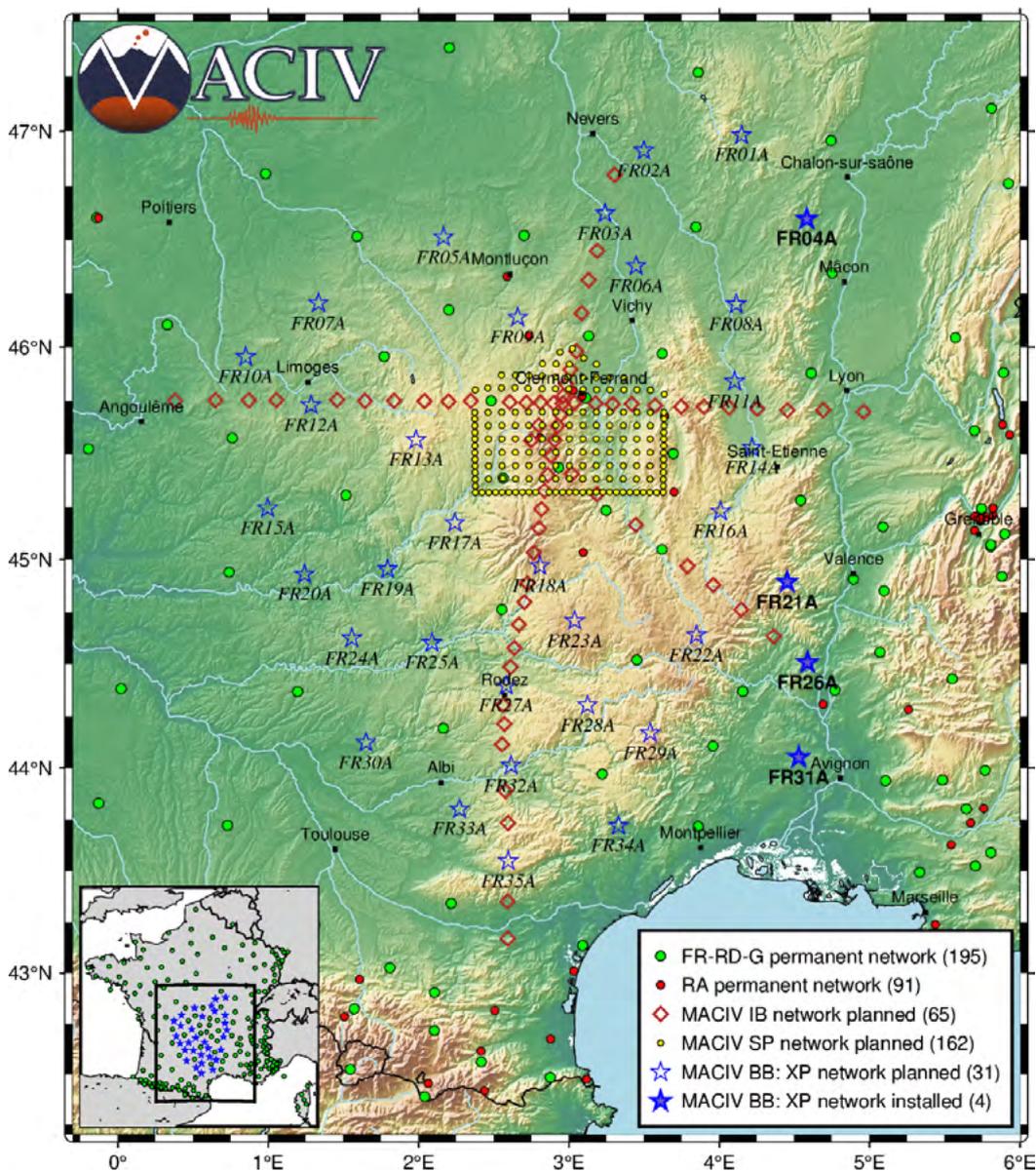


## Maciv : un réseau sismologique multi-échelles pour étudier le volcanisme du Massif Central

Le volcanisme du Massif Central est considéré comme potentiellement actif puisque les dernières éruptions ont eu lieu il y a 6700 ans. La région de l'Eifel (Allemagne) montre d'ailleurs des signes d'activité magmatique actuelle, alors que ses volcans appartiennent au même système européen de rifts Cénozoïques que le Massif Central. Pourtant, les connaissances géophysiques sur les

sources du volcanisme se limitent au modèle de mini-panache mantellique issu de la dernière expérience d'imagerie sismique il y a plus de 30 ans. Pour mieux appréhender l'aléa volcanique et contribuer à une meilleure évaluation des ressources minérales et géothermiques associées au volcanisme, le projet Maciv va mettre en œuvre dans le Massif Central les méthodes de tomogra-

phie sismique les plus innovantes grâce au déploiement d'un important réseau sismologique temporaire multi-échelles. Ce projet essentiellement expérimental est porté par une équipe pluridisciplinaire de géophysiciens, géologues et volcanologues d'ISterre (Grenoble), de l'IRAP et du GET (Toulouse), du LMV (Clermont-Ferrand) et de l'ITES (Strasbourg). Maciv est financé par



1 Prévisions de déploiement des instruments durant le projet Maciv (7 avril 2023)

l'ANR pour 5 ans (2023-2028).

De 2023 à 2027, cinq réseaux sismologiques temporaires multi-échelles vont être déployés sur l'ensemble du Massif Central. Nous installerons au total 750 stations sismologiques dont 35 stations large-bande (BB) en une nappe couvrant l'ensemble du massif pour 3 ans, 65 stations moyenne-bande (IB) sur trois profils au travers des principaux ensembles volcaniques pendant 2 ans, et 650 capteurs courte période (SP) de type "nodes" pour un mois. Les réseaux temporaires grande échelle complèteront le réseau permanent français (codes FR, RD, G, RA) et permettront de préciser la position et la géométrie des sources volcano-magmatiques dans le manteau, les conditions de fusion, leurs liens avec les structures Varisques et Cénozoïques. A l'échelle kilométrique, des nappes de plusieurs centaines de capteurs SP seront déployées à l'automne 2025 sur la chaîne des Puys et le Mont Dore/Sancy pour étudier les systèmes de transport du magma dans la croûte et les liens entre systèmes volcaniques, gisements minéraux et ressources géothermiques. Ces nappes de capteurs multi-échelles amélioreront considérablement les capacités de détection des événements sismiques du réseau permanent et permettront d'élaborer une stratégie de surveillance de l'activité volcanique à long terme.

Le projet Maciv fournira ainsi une base unique de données sismologiques qui sera exploitée pendant des années pour mieux comprendre le volcanisme intraplaque.

La nappe de stations large-bande (BB) constitue aussi la contribution française au grand projet Européen AdriaArray pour lequel des stations sismologiques temporaires sont en cours d'installation du Massif Central aux Carpates. Les données sismologiques de cette partie du réseau Maciv sont en libre accès dès l'installation. Les données AdriaArray sous embargo vont, sous peu, devenir accessibles aux équipes françaises qui le souhaitent grâce aux contributions Maciv et Résif/Epos-France.

Actuellement, des équipes d'ISTerre et de l'IRAP sillonnent le Massif Central pour prospector les sites qui accueilleront les stations BB du projet. Quatre stations sont installées à ce jour, et le déploiement se poursuivra jusqu'à l'automne. Les données, collectées en temps réel, sont diffusées par le centre de données Résif-SI et déjà accessibles à tous.

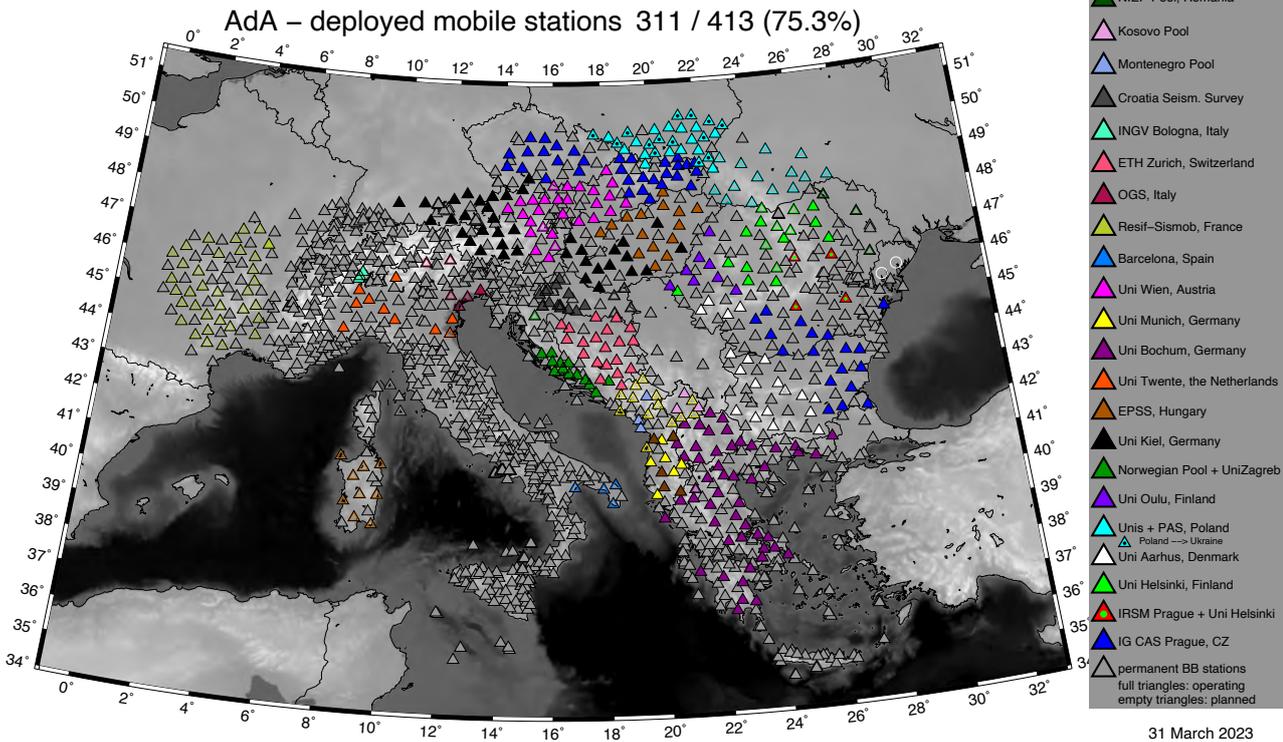
Anne Paul, Aurélien Mordret, Coralie Aubert et l'équipe de coordination Maciv.

Équipe de coordination Maciv : Jean Battaglia, Guillaume Boudoire, Sébastien Chevrot, Nicolas Cluzel, Stéphanie Duchêne, Didier Laporte, Hélène Pauchet, Guilhem Scheiblin, Nikolai Shapiro, Matthieu Sylvander, Olivier Vanderhaeghe, Jérôme Vergne

En savoir plus

Données : [seismology.resif.fr/networks/#/XP](http://seismology.resif.fr/networks/#/XP)

2 Carte du réseau instrumental du projet AdriaArray





## Campagne de gravimétrie à Kerguelen

Le programme de recherche Talisker s'intéresse aux transferts de fluides et de magmas à travers la lithosphère de Kerguelen. C'est un programme de l'Institut Polaire Français (IPEV) démarré en 2013 mais qui fait suite à de nombreux programmes depuis les années 70 consacrés à l'étude géologique de ce territoire français à la frontière entre l'Océan Indien et l'Océan Antarctique.

Le contexte géodynamique intraplaque océanique du vaste plateau de Kerguelen-Heard laisserait imaginer une lithosphère océanique paisible. Pourtant, les retours des premiers scientifiques embarqués sur les navires d'exploration faisaient état de roches granitiques, incongrues dans un contexte océanique. Les campagnes de cartographie géologique menées dans les années 80 et 90 (programme

Cartoker) ont confirmé la présence de ces roches continentales (des syénites plutôt que des granites) sous forme de laccolithes \* intrusifs dans les séries basaltiques et que l'on observe dans plusieurs régions de l'archipel. Dans le cadre du programme Talisker, nous avons consacré plusieurs campagnes et plusieurs années à étudier ces laccolithes pour préciser la source de ces magmas particuliers, leurs histoires magmatiques et le mode de leur mise en place.

Pour préciser la structure de la lithosphère de Kerguelen en général et affiner la compréhension de ce magmatisme "continental" en contexte océanique en particulier, grâce au prêt d'un gravimètre de terrain Scintrex CG6 du PIN PGravi, nous avons démarré cet hiver 2022-2023 une campagne de mesures gravimétriques couplées à des me-

sures GNSS sur l'archipel. Ces mesures se poursuivront pendant l'hiver 2023-2024.

### Gravimétrie à Kerguelen, un petit défi logistique

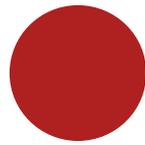
Kerguelen est un archipel d'une taille comparable à la Corse. Contrairement à la Corse, il n'y a pas d'habitants, sauf une cinquantaine de personne sur la base de Port aux Français, et pas de routes ni de chemins, sauf entre les bâtiments et dans les plus proches environs de la base. Enfin, contrairement à la Corse, le climat de Kerguelen est froid, venteux et le plus souvent pluvieux ou neigeux à relativement faible altitude. Le support logistique indispensable à une campagne de mesure de gravimétrie - GNSS sur tout l'archipel demande donc beaucoup de préparation et constitue un défi logistique, tous les déplacements se faisant à pied pour réaliser les acquisitions le long de profils à travers l'archipel.

Pendant la campagne de l'été austral 2022-2023, de fin décembre à fin mars, nous avons parcouru plus de 900km à pied en transportant les instruments sur une claie de portage, cette claie étant équipée d'un support télescopique pour l'antenne GNSS. La nécessité de conserver le gravimètre toujours alimenté imposait de disposer de batteries de rechange ainsi que d'une source d'énergie (groupe électrogène/solaire + batterie) pour les recharges et l'alimentation nocturne du gravimètre.

Le bilan de cette première campagne est bon. Nous avons réalisé la plus grande partie des profils envisagés et les données sont de bonne qualité. Un pré-traitement de ces données, réalisé au fil des acquisitions, montre qu'il y a un contraste suffisamment important entre les différentes régions et que



1 - Mesures gravimétriques et GNSS aux îles Kerguelen. A gauche, mesure protégée du vent. A droite, déplacement d'une station de mesure à une autre avec l'équipement (A : Support antenne GNSS, B : paravent, C : GNSS, E et D : Gravimètre CG6 et trépied ; F : claie de portage). En bas à droite, profils gravimétriques prévus sur l'île.



## Tests de capteurs OBS

L'on pourra vraisemblablement mettre en évidence l'influence des intrusions. Le travail à venir, objet de la thèse de Hugo Raffet, et la campagne d'été austral 2023-2024 permettront de compléter et d'affiner ces données.

Damien Guillaume

Cette première campagne de mesures couplées gravimétrie-GNSS a été réalisée sur le terrain par Damien Guillaume (responsable scientifique du programme, LGL-TPE, Université de Saint-Etienne), Hugo Raffet (GET, doctorant Université de Toulouse), Michel de Saint-Blanquat (GET, CNRS Toulouse) et Marc Le Romancer (Université de Brest).

Les instruments de terrain - gravimètre Scintrex CG6, GNSS Leica GR50 et antenne AS10 - ont été prêtés par les parcs d'instruments nationaux de l'INSU (PGravi et GPSmob Résif). Nous avons bénéficié de l'aide de Germinal Gabalda (GET, IRD Toulouse) pour le suivi des données au fur et à mesure des séries d'acquisitions.

Cette campagne a aussi pu se réaliser grâce au support indispensable de l'équipe de logistique de l'IPEV et nous remercions Chloé Bazile, Pierre Ecoiffier, Franck Foucault et Axel Bres, résidents de Kerguelen, qui nous ont accompagnés lors des sorties sur le terrain et dont l'aide était précieuse, tant pour la bonne humeur que pour le transport du matériel.

### Contexte

Au début de l'année, l'action spécifique Sismologie Marine Mobile (SMM) a été créée au sein de Résif (voir page 4). Au sein de cette action, les 3 parcs OBS français se sont fédérés pour offrir une instrumentation marine de pointe (incluant OBS, hydrophones flottants, hydrophones ancrés, capteurs de pression absolue) pouvant répondre aux besoins des chercheurs.

Le projet d'investissement d'avenir Marmor, financé par l'ANR, (PIA3-ESR-Equipex+), permet l'achat et la jouvence d'instruments de ce parc. Ainsi, de nouveaux instruments sont acquis et seront mis à disposition de la communauté. Parmi les acquisitions, un véritable parc d'intervention rapide, mobilisable rapidement en cas de crise sismiques et volcaniques, sera créé et le parc d'OBS dédiés à l'imagerie va être étoffé. Dans ce contexte, la question du choix des capteurs qui équiperont les OBS est devenue prééminente car depuis quelques années, un nouveau type de capteurs accélérométriques, les MEMS, basés sur un système microélectromécanique, a fait son apparition.

### Acquisitions

Afin d'éclairer le choix et devant l'absence de données comparatives, nous avons créé un groupe de travail formé d'ingénieurs et de chercheurs de l'UMR Geo-Océan à Brest et de l'UMR Géoazur à Nice. Geo-Océan disposant d'OBS de type MicrOBS (Sercel) munis de MEMS (MEMS QuietSeis), plusieurs déploiements d'opportunités de MicrOBS de dernière génération, munis de géophones analogiques (GS-ONE ayant une fréquence naturelle de coupure de 4.5 Hz) ou de MEMS, numériques, ont été menés d'abord en Rade de Brest, puis lors des campagnes à la mer HIPER (mars/avril 2022, P.I. A. Galve

et MANTA-RAY (mai-juin 2022, P.I. F. Klingelhofer). Afin de parfaitement cerner le comportement des capteurs de type MEMS versus celui des géophones, il nous est apparu nécessaire de sortir exceptionnellement ces instruments de leur milieu de déploiement habituel afin de les placer sur la terre ferme au voisinage de stations Résif permanentes. Nous avons récolté un mois d'enregistrement permettant de comparer les performances des différents capteurs composant les OBS avec celles des accéléromètres (EpiSensor ES-T\*) de la station RA-UBBR située à l'IUEM à Plouzané et des vélocimètres large bande (Trillium-120QA\*\*) de la station FR-CAMF de Camaret sur Mer.

### Comparatifs

La figure 1 (page suivante) compare les enregistrements des trois composantes OBS à ceux des capteurs de références. Pour cela, des spectrogrammes sont calculés sur des séries temporelles d'une heure et compilés sous forme de PSDs (Power Spectral Densities). Ces dernières permettent de visualiser une bande de niveau de bruit en fonction de la fréquence. Une courbe moyenne de ce niveau de bruit est également extraite et comparée à des courbes similaires obtenues précédemment avec d'autres capteurs de référence.

Les PSD des géophones large-bande (figure 1a) montrent un très faible niveau de bruit dans les très basses fréquences (< 0.1 Hz) lié à la très grande sensibilité de ces capteurs. Un premier pic de bruit s'exprime entre 0.1 Hz et 1 Hz correspondant à la micro-sismicité ambiante. Enfin les niveaux de bruit s'étalent entre 1 Hz et 50 Hz et révèlent la dynamique du site particulièrement exposée à la houle. En comparaison, les capteurs OBS munis de géophones ont une bien

\* Laccolithes : un magma qui s'insère entre deux couches sédimentaires horizontales sans en perturber la disposition et qui montre une allure en coupole donne une laccolithes (wikipedia)

moindre sensibilité aux très basses fréquences, mais malgré leur fréquence naturelle de coupure à 4.5 Hz, ils donnent des résultats quasi-identiques jusqu'à 0.2 Hz et satisfaisant jusqu'à 0.1 Hz. Ceux munis de MEMS montrent un comportement similaire aux GS-ONE entre 0.1 Hz et 50 Hz qui semble meilleur pour des fréquences inférieures à 0.1 Hz, particulièrement sur les composantes horizontales ce qui permet d'envisager l'enregistrement de signaux télésismiques. Le pic de micro-sismicité est bien contraint par l'ensemble des capteurs, excepté sur la composante verticale du MEMS. Dans les plus hautes fréquences, il y a une très forte résonance de la structure de l'OBS centrée à 15 Hz qui ne s'observe jamais sur les enregistrements en mer où ils sont fermement lestés, assurant un meilleur couplage.

En conclusion, on notera la très bonne restitution du bruit par les GS-ONE, qui affichent des sensibilités équivalentes aux géophones large-bande (Trillium-120QA) ou

de bande intermédiaire (CMG40-T) entre 0.1 Hz et 10 Hz. Enfin, les MEMS offrent une bonne restitution du bruit ambiant entre 0.1 Hz et 50 Hz, mais avec une plus faible sensibilité des accéléromètres par rapport aux vélocimètres, surtout sur la composante verticale.

La comparaison entre PSDs des capteurs OBS et celles des accéléromètres de la station RA-UBBR (figure 1b) confirme les observations précédentes. Le site est également très bruité à hautes fréquences à cause de la soufflerie du bâtiment, cumulée à d'importants travaux de voiries en cours pendant la période d'écoute. Néanmoins, il est de nouveau constaté des niveaux de bruits identiques entre capteurs OBS et accéléromètres permanents entre 0.1 Hz et 10 Hz. Aux plus basses fréquences, il est intéressant de noter une restitution du bruit également identique entre les composantes horizontales des MEMS et des EpiSensors.

Mikaël Evain, Pascal Pelleau, Philippe Schnurle, Sara Bazin et Louis Géli

(Geo-Ocean), Audrey Galve, Davide Oregioni et David Ambrois (Géoazur), Damien Fligel et Mickaël Bonnin (Osuna).

\* Kinometrics \*\* Nanometrics

## Références :

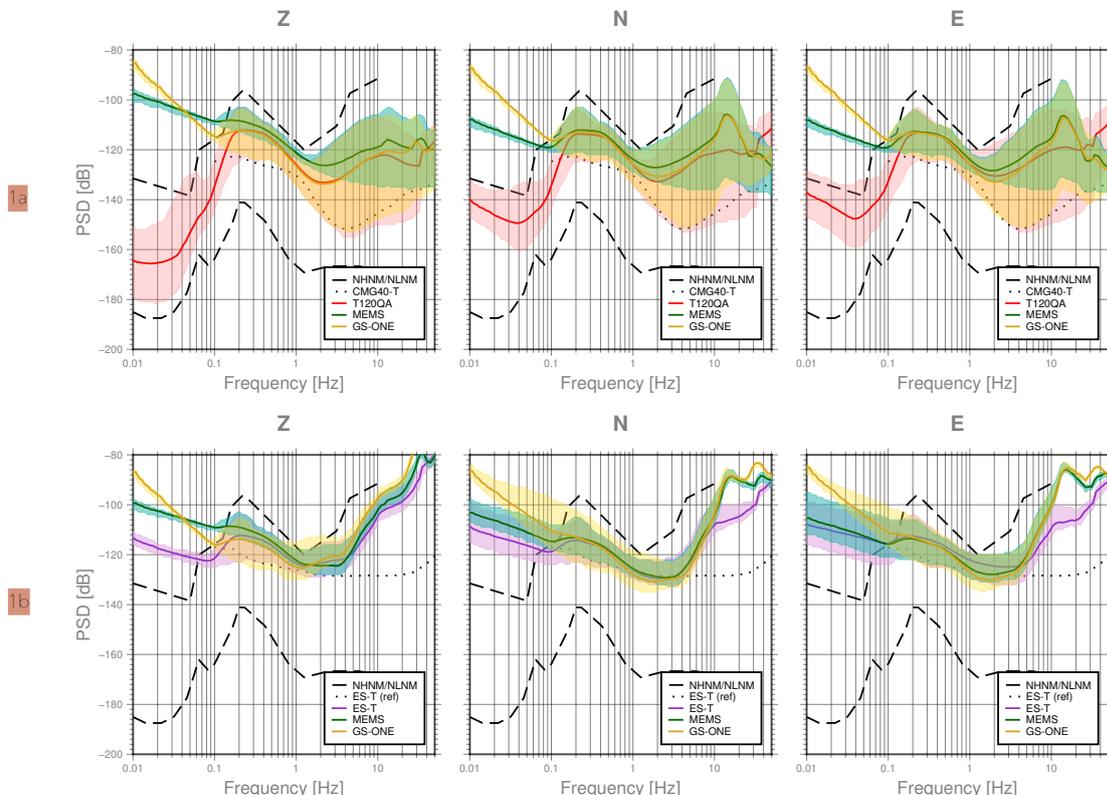
Auffret, Y. et al. (2004). MicroOBS: a new ocean bottom seismometer generation. *First Break* 22, 41-47.

Bonnin, M. et al.. Short-Range Recordings of Shallow Underwater Explosions with Short-Period and Broadband Seismometers in the Bay of Hyères, France. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2022, doi.org/10.1785/0120220141 - hal-03876400

Fougerat, A. et al. (2018). High-quality signal recording down to 0.001 Hz with standard MEMS accelerometers. *SEG Abstracts*

Laine, J., Mougénot, D. (2014). A high-sensitivity MEMS-based accelerometer. *The Leading Edge*, 33(11), 1234-1242.

Peterson, J. (1993). Observations and Modeling of Seismic Background Noise. U.S. Geological Survey open-file report 93-322, Albuquerque, N.M.



1- Comparaison des Power Spectral densities (PSDs) des capteurs MEMS et GS-ONE équipant les MicroOBS/LotOBS Sercel avec les PSDs des sismomètres large-bande (Trillium-120QA) de la station Résif du RLBP FR-CAMF (a) et celles des accéléromètres (EpiSensor ES-T) de la station permanente du RAP RA-UBBR (b). Les réponses instrumentales connues pour ces capteurs ont été corrigées. Les PSDs ont été calculées sur les totalités de la période d'enregistrement commune en compilant les spectrogrammes calculés sur des séries temporelles d'une heure. Pour chaque capteur la courbe de bruit en gras est la moyenne entourée par une bande constituée par les percentile 1 % et 99 %. Les courbes de références correspondent au new high et new low noise models de Peterson (1993) et de précédents enregistrements de bruit nocturne par des sismomètres CMG40-T et EpiSensor.

## Sismomètres très large bande

Les sismomètres très large bande sont utilisés principalement dans les stations des réseaux sismologiques globaux (en particulier Geoscope et GSN). Les objectifs scientifiques de ces réseaux sont axés sur la compréhension de la dynamique terrestre à partir d'études de structures et de sources sismiques. Les signaux à mesurer pour ces études vont de quelques Hz à plusieurs centaines, voire milliers de secondes.

On parlera ici des sismomètres capables d'enregistrer des signaux sismiques avec une bande passante allant jusqu'à une période de 360s.

Les premiers capteurs très large bande (STS-1) ont été installés au sein du réseau Geoscope dès sa création en 1982, après les premiers tests concluants effectués à la station SSB (tunnel de Saint-Sauveur-En-Rue, au sud de Saint Etienne). Les performances des STS-1 (bande passante et bruit) sont restées inégalées jusqu'en 2018 où une nouvelle génération de capteurs très large bande a été mise sur le marché : le Streckeisen STS-6A\* (capteur fond de puits) et le Trilium T360\*\* (modèle fond de puits ou pilier). Malheureusement, en 2020, le STS-6 a été retiré du marché, le marché essentiellement institutionnel des réseaux globaux étant jugé trop petit par le constructeur pour assurer qualité et rentabilité. La première version du T360 n'atteignait pas les performances des STS-1. Une nouvelle version appelée « GSN-Vault »

a été développée et a permis d'atteindre les performances attendues.

L'installation des STS-1 est relativement compliquée : les composantes sont unitaires, c'est à dire qu'il faut installer un capteur vertical et deux capteurs horizontaux. Chacun de ces capteurs doit être installé sur un support sous vide qui permet un découplage des variations de pression (aussi appelé warp-free base plate) améliorant de plusieurs décibels le bruit à longue période. Une protection thermique isole chaque capteur des variations de température. L'électronique est située à l'extérieur du capteur et nécessite un câblage spécifique. L'orientation est délicate puisqu'il faut s'assurer que les deux composantes horizontales sont bien orientées et orthogonales.

A contrario, l'installation sur pilier des T360 (modèle « GSN-Vault ») est très simple et se rapproche de l'installation des capteurs standards 120s. Les trois composantes et leurs électroniques sont intégrées dans le même boîtier. Il suffit de niveler le capteur et d'installer sa protection thermique. L'orientation est plus simple car il n'y a qu'un capteur à orienter et l'orthogonalité est garantie. L'installation des capteurs fond de puits (STS-6 et T360 « post-hole ») est un peu plus complexe mais équivalente à l'installation des capteurs fond de puits 120s.

Alors que les STS-1 ont une bande passante qui va de 10Hz à 360s, celle des nouveaux capteurs est



1- T360-GSN-Vault installé au fond de la mine de la station ECH (photo prise avant l'installation de la protection thermique).

comprise entre 50Hz et 360s, et donc plus étendue vers les hautes fréquences. Leur niveau de performance général atteint celui des STS-1 et peut même s'avérer meilleur, notamment pour les modèles fond de puits. Dans le cadre d'un réseau large-bande national comme celui du RLBP, ces capteurs T360 constituent donc aussi une opportunité intéressante pour instrumenter les quelques meilleurs sites du réseau.

A ce jour, 19 stations Geoscope sont encore équipées avec des STS-1. Les autres sont équipées avec des STS-2 ou des Trilium 120 moins performants.

Geoscope fait l'acquisition d'un à deux nouveaux capteurs par an pour équiper de nouvelles stations et maintenir autant que possible les STS-1, en les doublant par un T360 partout où cela est possible. Pour l'instant, 4 stations sont équipées de capteurs nouvelle génération :

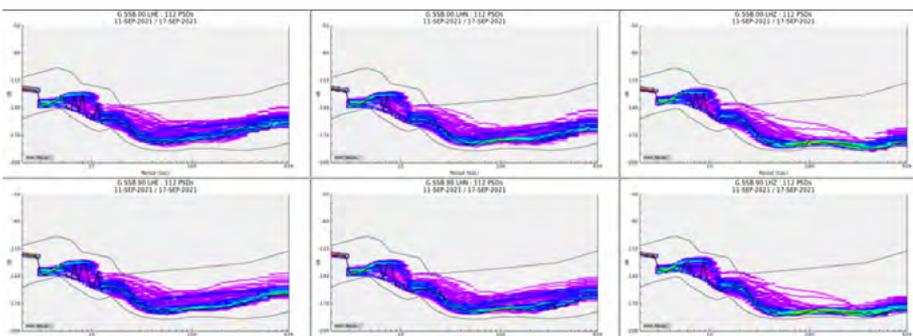
- TAM, Tamanrasset, Algérie : T360 + STS1
- ECH, Echery, France : T360 + STS1
- SOK, Sop/Niakhar, Sénégal : STS-6 et T360
- KIP, Kipapa, Hawaï : STS6 + STS1 (+ STS2)

Un T360 sera installé à la station SANVU (Vanuatu) en juin 2023 et plusieurs nouvelles installations sont prévues à moyen terme.

Nicolas Leroy, IPGP/Geoscope

\* Kinematics \*\* Nanometrics

2- Tests T360-GSN-Vault à SSB (en haut : STS-1, en bas : T360)





## Rencontres Epos-France

Dans la continuité des Rencontres scientifiques et techniques Résif-Epos, dont la 5ème et dernière édition s'est tenue en Alsace en 2021, les **1ères Rencontres Epos-France (REF)** se dérouleront du mardi 7 novembre au vendredi 10 novembre 2023, à Saint-Jean-Cap-Ferrat, près de Nice. Elles sont ouvertes à tous les chercheurs, étudiants et ingénieurs intéressés par les données Epos-france.

Ces quatre jours seront consacrés aux discussions et échanges autour de posters, présentations orales et ateliers qui permettront de faire le point sur l'existant et de réfléchir ensemble à l'évolution à court et moyen terme de la nouvelle infrastructure. Le colloque se veut également un moment dédié à la réflexion commune sur les méthodes et les approches scientifiques, les techniques prometteuses ainsi que sur l'instrumentation d'aujourd'hui et de demain.

Nous organiserons par ailleurs, durant les Rencontres, le lancement de la nouvelle infrastructure Epos-France.



Photo de couverture : Exemple d'un point de mesure réalisé dans la forêt des Sundarbans. Le couvert végétal est extrêmement dense (détails page 12). Crédits : C. J. Grall

## Agenda

### Juin

23 - Comité de direction Résif

### Juillet

3-7 - Journées thématiques Frensz

11-20 - AG International Union of Geodesy and Geophysics

### Octobre

4-6 - Geo-Inquire Annual Meeting

6 - Signature de la convention Epos-France

26 - Comité de direction Epos-France

30 - 2 nov. - Rencontre des sciences de la Terre

### Novembre

7-10 - Rencontres et lancement IR Epos-France

7-10 - Colloque AFPS

Lettre d'information Résif

Directrice de la publication : A. Walpersdorf

Equipe éditoriale : V. Bertrand, B. Gardonio, C. Perrin, A. Walpersdorf

Réalisation : V. Bertrand

Design graphique : C. Emonet

Impression : Groupe Car, Strasbourg

© Résif 2023

