

## La Lettre du RAP

### Second semestre 2021 – Numéro 33

- S'inscrire à la newsletter
- Ne plus recevoir la newsletter

Ce numéro de la Lettre du RAP est dédié à la présentation de 4 projets scientifiques. Je remercie chaleureusement les collègues qui ont pris le temps de nous expliquer le but de leurs travaux. Pour les plus attentifs d'entre vous, nous avons glissé deux petits clins d'œil ; saurez-vous les trouver ? Des **pages 1 à 3**, vous pourrez ainsi en apprendre plus sur **les trois projets retenus à l'APS RAP 2021** que nous avons lancé au printemps dernier. Des **pages 3 à 5**, ne manquez surtout pas le **récapitulatif des observations mises en place à Mayotte** depuis la crise sismo-volcanique de 2018 : l'équipe du BRGM nous retrace chronologiquement les étapes qui ont mené au lancement du nouveau réseau de surveillance REVOSIMA. Et dire que tout ceci a commencé par une seule station RAP diffusée en temps réel... (et un volcan aussi)

Je vous souhaite à tous de passer de merveilleuses fêtes de fin d'année. On se retrouve bientôt et en attendant, prenez soin de vous et de vos proches.  
*Emeline Maufroy, directrice du RAP*

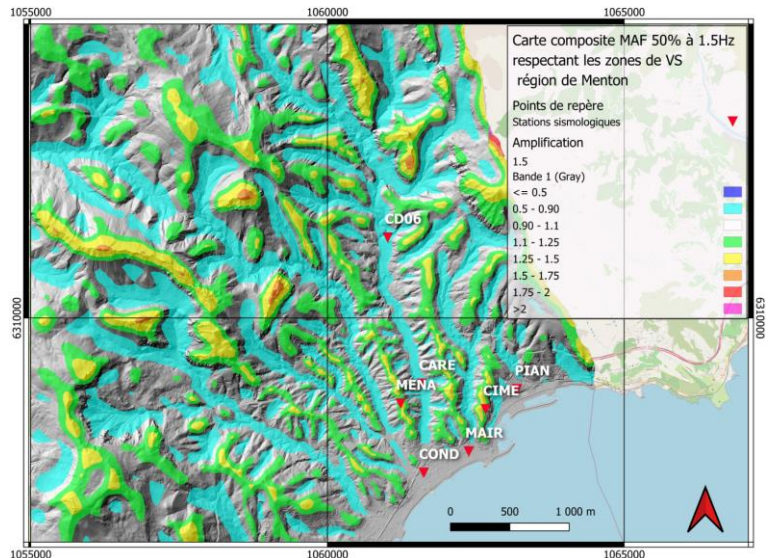
### La prochaine Biennale du RAP

Vous êtes nombreux à m'interroger sur la prochaine Biennale du RAP. Après 3 annulations/reports (novembre 2020, puis avril 2021, puis mai 2021), la nouvelle date est fixée aux **8-10 novembre 2022** (voir l'agenda en bas de page 5). On retombe ainsi sur le calendrier en alternance une année sur deux avec les journées Résif. Comme la crise sanitaire s'étire dans le temps, vous me demandez déjà si je pense que la Biennale pourra bien avoir lieu. Si j'avais cette information, je la monnaierais ! Nous allons faire comme si, et nous allons donc (re)monter le programme d'ici peu, au printemps 2022. Les inscriptions seront ouvertes avant l'été.

### Projet de l'APS RAP 2021

#### EFFTOP2 : Évaluation de l'effet de site topographique par modélisation numérique sur des sites de RAP-Résif

Les effets de la topographie sur les mouvements du sol ont été observés lors de plusieurs séismes et ont causé des dégâts considérables. L'instrumentation de sites et des campagnes de mesures ont mis en évidence un niveau important d'amplification en fonction de la forme du massif et sa position par rapport à la source sismique. La simulation numérique de la propagation des ondes contribue également à la compréhension de ce phénomène complexe, mais les paramètres responsables de l'amplification ne sont pas encore parfaitement compris, en particulier la façon dont se combinent l'effet dû à la forme du relief et celui dû à un contraste d'impédance dans le milieu géologique. Parmi les différentes méthodes d'estimation disponibles, il est intéressant d'étudier des techniques reposant sur un nombre limité de données, comme par exemple la méthode FSC (Frequency Scaled Curvature, [Maufroy et al. 2015](#)) qui nécessite toutefois une extension valable dans les milieux hétérogènes (Fig. 1) pour être applicable partout.



▲ **Figure 1.** Coefficient d'amplification topographique à la fréquence 1.5 Hz issu de la méthode FSC et adapté à la valeur de  $V_s$  locale pour le site de Menton (stage de M. Allimant, 2021). L'effet des vallées sédimentaires n'est pas présent sur cette carte mais l'estimation de l'amplification topographique combine sur une même carte les résultats correspondant à un zonage de  $V_s$  en trois catégories ( $V_s = 800, 1200$  et  $1700$  m/s).

Le projet EFFTOP2 (partenaires Cerema, ISTERre, Uni. Eiffel et Brgm) fait suite au projet EFFTOP (APS RAP 2019) et a pour objectif de continuer à élargir le domaine d'applicabilité de la méthode FSC en utilisant le résultat de séries de simulations numériques de la propagation des ondes dans des reliefs 3D, notamment des sites où se trouvent des stations du réseau RAP-Résif (par exemple Menton, Lourdes, ...). Une attention particulière sera apportée à la diversité des géomorphologies considérées. Différents types d'hétérogénéités du sous-sol seront également pris en compte (couche superficielle, massif complet) pour une comparaison des résultats avec le cas homogène. Ces simulations seront réalisées dans le cadre de la thèse de M. Allimant (Cerema-Uni. Eiffel) démarrée à l'automne 2021, et suivront le protocole appliqué par Maufroy et al. (2015) sur le site de Rustrel.

► Contact : [Nathalie Glinsky](#)

## Projet de l'APS RAP 2021

### CASIMIR : Caractérisation sismologique du site de l'IMREDD et analyse de la qualité des enregistrements à NIMR

La basse vallée du Var est une zone de la ville de Nice en plein développement dans le cadre d'un label OIN dont la maîtrise a été confiée à l'établissement public d'aménagement « Nice écovallée ». Dans les 5 dernières années, cette zone de la plaine alluviale s'est couverte de hauts bâtiments comprenant à la fois des habitations, des bureaux ou des centres de formation. Ces enjeux rejoignent les structures déjà présentes dans la vallée telles que l'aéroport Nice Côte d'Azur (1<sup>er</sup> aéroport de province sur le trafic passager), le Centre Administratif des Alpes Maritimes (abritant notamment les services de la préfecture 06 et du conseil départemental), le stade Allianz Riviera, la salle de concert Nikaia et l'autoroute A6.

Fruit de la collaboration entre le Cerema et le laboratoire Géoazur, un nouveau site instrumenté par un réseau vertical de 3 capteurs fournit des données depuis octobre 2020. Le matériel et les infrastructures nécessaires à cette installation ont été financés dans le cadre du projet RISVAL ([Interreg, Alcotra 2014-2020](#)). Le site comprend 2 capteurs large bande (120 s – 200 Hz) Radian à 10 et 30 m de profondeur dans des forages réalisés par le Cerema, un accéléromètre Fortis de surface et 2 Minimus qui assurent la communication avec les Radians et l'acquisition des données accélérométriques de surface (Fig. 2). Un capteur CMG40 a été ajouté en surface dans l'objectif de déterminer l'orientation des capteurs en forage par cross-corrélation du bruit de fond (Fig. 3). Les 2 capteurs de surface (accéléromètre Fortis et CMG40) ont été orientés au gyrocompas. Le CMG40 est toujours en place et peut permettre une analyse plus fine de la propagation des ondes dans les couches sédimentaires de surface.

L'objectif de ce réseau est de compléter les instruments RAP-Résif déjà existants dans cette vallée, et plus largement dans la région Niçoise. Les enregistrements devraient notamment permettre les recherches sur la propagation des ondes dans les milieux sédimentaires superficiels des vallées alluviales et d'analyser les interactions entre les ondes, les sols et les bâtiments autour. L'objectif du projet CASIMIR de l'APS RAP 2021 est de mieux définir les conditions d'installation des stations, concernant l'orientation des capteurs et leur couplage avec le sol environnant, d'analyser le niveau de bruit au site, sa variation temporelle et

de comparer aux autres stations RAP de Nice. Une première analyse des enregistrements de séismes locaux, régionaux et tésismiques recueillis depuis près d'un an nous permettra également de préciser la réponse sismique du site, et plus généralement des sédiments de la Vallée du Var.

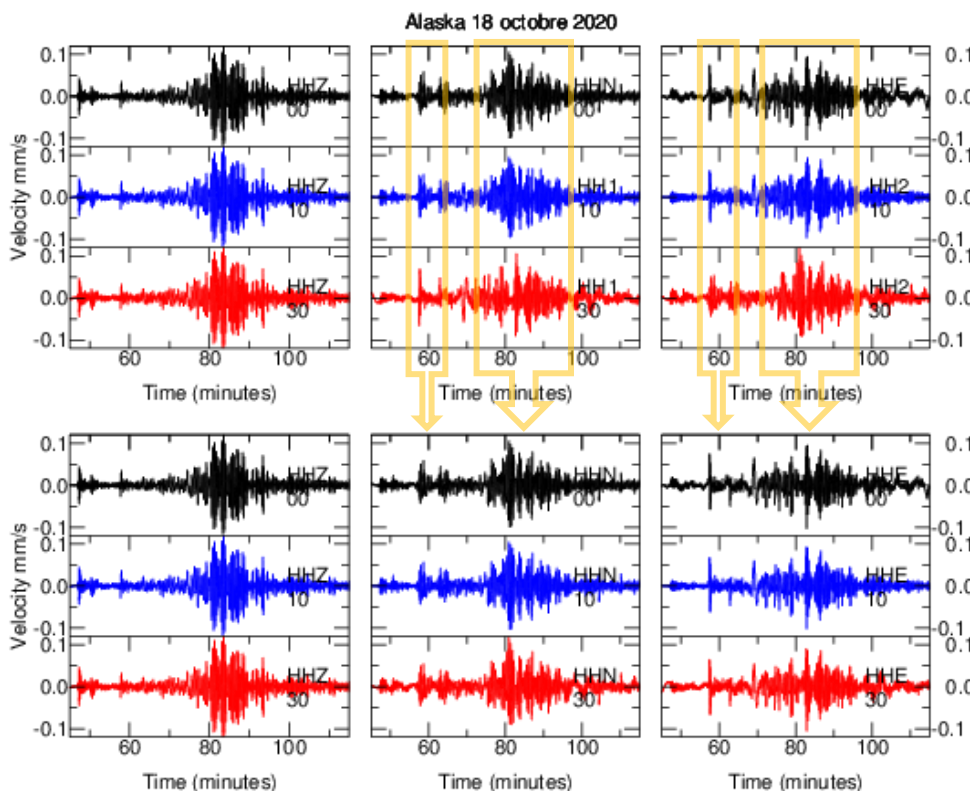
« Figure 3. Haut : enregistrement du séisme d'Alaska ( $M_w$  7.6 le 18/10/2020) et signal (ondes P, PP, S, et ondes de surface) durant plus de 50 min produit sur les 3 capteurs vélocimétriques (noir en surface, bleu à 10 m, rouge à 30 m). Bas : les signaux après rotation des composantes horizontales pour les capteurs de forage de 10 m et 30 m (respectivement de  $-18^\circ$  et  $98.5^\circ$ ) montrent un très bon accord. Les signaux sont filtrés entre 0.005 et 1 Hz. Figure réalisée en utilisant SAC, Seismic Analysis Software.

► Contact : [Etienne Bertrand](#)



N.B. : Photo prise avant ancrage de l'accéléromètre.

▲ Figure 2. Gauche : forage en cours à NIMR (photo Cerema, février 2017). Droite : le regard du capteur à 10 m avec la tête de forage d'où sort le câble du capteur Radian (photo M. Pernoud, Cerema, 9 octobre 2020).

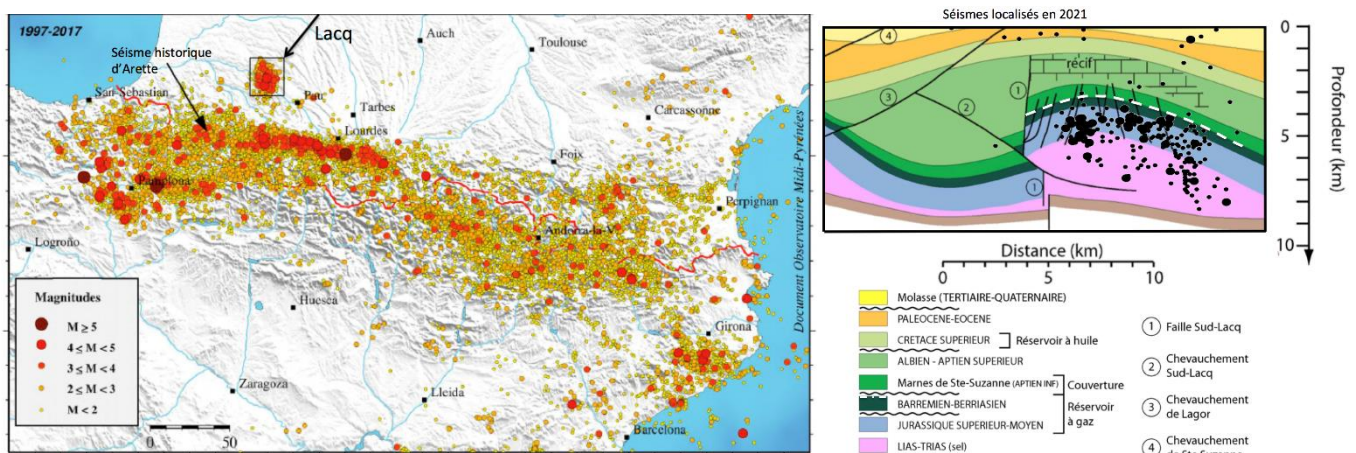


## Projet de l'APS RAP 2021

### Estimation de l'aléa sismique déterministe de la région de Lacq

La région de Lacq, au nord-ouest de Pau, est connue pour son importante exploitation de gaz naturel depuis les années 50. Le site industriel héberge de nombreuses entreprises à haut risque, classées CEVESO. L'extraction de gaz dans un premier temps, et l'injection d'eau usée par la suite, génèrent une sismicité induite, importante, avec des magnitudes régulièrement au-dessus de 2 et ayant dépassé 4 (Fig. 4). L'objectif long terme de ce projet LACQ de l'APS RAP 2021 est d'estimer le risque sismique de cette zone d'intérêt, pourtant peu instrumentée depuis les années 2010. Pour cela, nous cherchons dans un premier temps à construire un catalogue fiable de localisations de séismes, et de mesures de mouvements du sol (PGA) pour (i) identifier des scénarii réalistes de séismes majeurs ( $M > 5$ ) pouvant se produire, (ii) calibrer les modèles de prédiction du mouvement du sol pour cette région, et (iii) estimer l'aléa sismique déterministe et le risque de la région pour les différents scénarii identifiés. Ce travail a commencé durant le stage de master de Laetitia Jacquemond à l'OMP. Le financement du RAP a permis de relocaliser finement les événements localisés à proximité du site (CDD d'1 mois à ISTERre, relocalisation par double différence, méthode HypoDD) et d'acquérir deux capteurs de type RaspberryShake qui seront installés de manière permanente sur le site.

Cette étude de la sismicité induite et l'estimation de l'aléa sismique sont également fortement motivées par le fait que le réservoir de Lacq est un **potentiel site d'injection de CO<sub>2</sub>**. L'OMP va alors aussi installer une station accélérométrique permanente du RAP à Lacq, courant 2022 (déplacée de Pau à Lacq).



▲ **Figure 4.** Gauche : la sismicité induite de Lacq (flèche du haut) se détache de la sismicité liée à la chaîne Pyrénéenne. Elle provient d'un double effet : (i) extraction de gaz et déplétion long terme du réservoir, et (ii) injection d'eau usée des industries dans le réservoir de gaz profond, à plus de 3 km de profondeur. Droite : sismicité de l'année 2021 (points noirs) localisée par le [réseau SISLACO](#) de 10 capteurs déployés en 2021. La sismicité est représentée sur une coupe géologique SN (extraite de [Bardainne et al. 2008](#)). Le pointillé blanc indique le toit du réservoir de gaz profond. Les séismes les mieux localisés, dont l'incertitude est inférieure à 1 km, sont représentés par des points noirs plus gros. La majorité de la sismicité se concentre sous le toit du réservoir.

► Contacts : [Jean Letort](#) & [Mathieu Causse](#)

## FOCUS

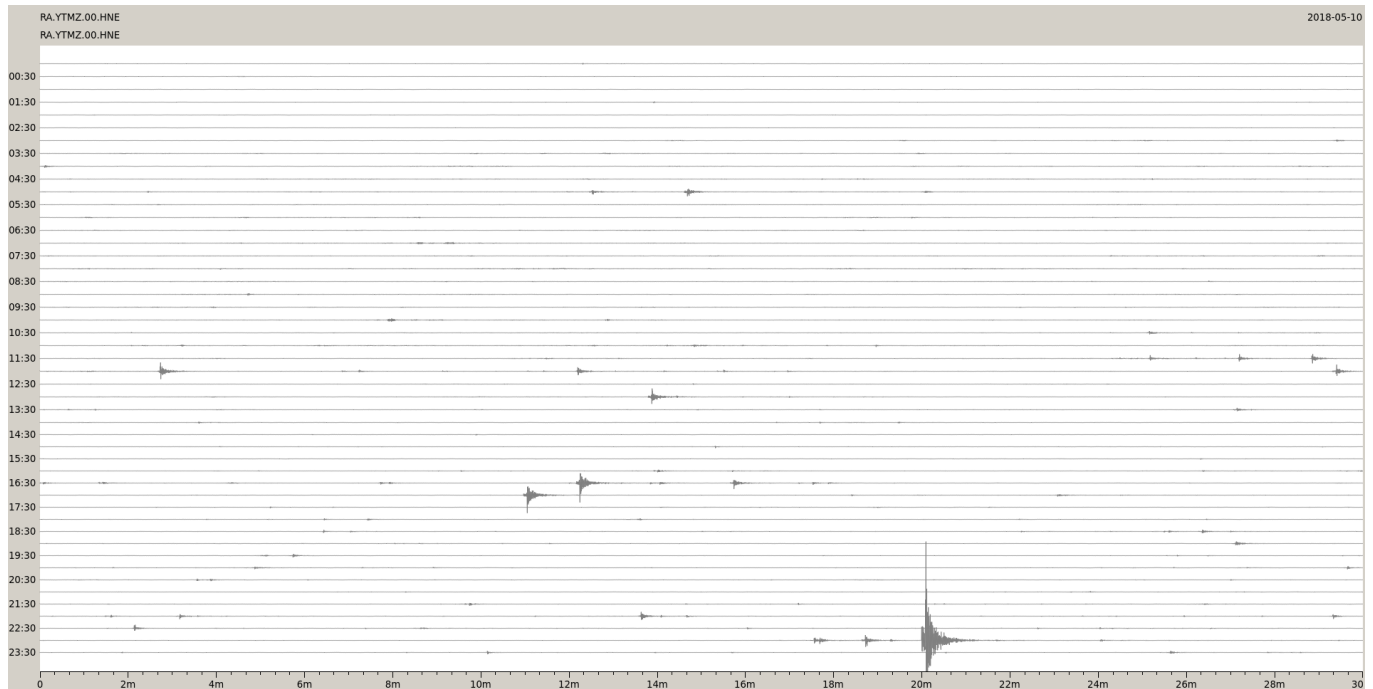
### Évolution du suivi de la sismicité mahoraise : depuis un réseau régional jusqu'à un observatoire fond de mer<sup>1</sup>

La crise sismo-volcanique de Mayotte qui débute le 10 mai 2018 a surpris la communauté scientifique. Le contexte de sismicité faible à modérée ne nécessitait pas de stations permanentes pour la surveillance. Il n'existait sur place que 3 accéléromètres installés en 2016 par le BRGM pour étudier les effets de site, dont la station RAP [YTMZ](#) à Mamoudzou qui était la seule transmise en temps réel. Le suivi de la séquence sismique s'est donc mis en place dans les premières semaines de façon improvisée autour des données de cette station. Nous rappelons ici l'évolution progressive depuis 2018 du réseau de suivi de l'activité sismologique et volcanologique à Mayotte.

La détection de l'essai sismique et les localisations régionales se sont faites dès les premiers jours de la crise avec la station accélérométrique YTMZ (Fig. 5) et un partage de flux temps réel de stations large-bande toutes situées à plusieurs centaines de kilomètres de l'essai (stations CAB, SBC, MOIN de l'Observatoire Volcanologique du Karthala OVK aux Comores ; stations du réseau Geofon GE : SBV, VOI à Madagascar, KIBK au Kenya ; station ABPO du réseau IRIS/IDA à Madagascar, cf. [Lemoine et al. 2020](#)).

<sup>1</sup> ou encore « De l'improvisation à l'innovation : les évolutions d'un réseau de surveillance à Mayotte ».

Il faut attendre plus d'un mois, le 23 juin 2018 pour voir l'implantation d'une station large-bande, MCHI au collège de Chiconi, dont l'installation était déjà prévue comme station à vocation pédagogique du réseau Sismo-à-l'École. Deux stations RaspberryShake sont installées par le BCSF-RéNaSS lors de la mission post-sismique fin juin 2018, dont une seule, RAE55 à Koungou avec une seule composante verticale, a pu fonctionner de façon continue jusqu'en 2021. Ce premier réseau virtuel évolutif « de fortune » avec des stations hétéroclites, une très mauvaise répartition en distance et en azimut, et un seuil de détection de l'essai sismique au-dessus d'une magnitude locale  $M_{lv}$  3.5, a néanmoins permis un suivi au jour le jour de l'évolution de la crise sismique par le BRGM en appui à la Préfecture de Mayotte et de disposer de données pour les premières analyses scientifiques ([Cesca et al. 2020](#), [Lemoine et al. 2020](#), [Feuillet et al. 2021](#)).



▲ **Figure 5.** Helicorder du premier jour de la séquence sismique de Mayotte le 10 mai 2018 pour la station RAP YTMZ. Premiers séismes détectés vers 05h00 TU, magnitude  $M_{lv}$  3.2. Premier séisme ressenti par la population à 23h50 TU, magnitude  $M_{lv}$  4.3.

Le renforcement de ce réseau, avec 3 stations LB à Mayotte du réseau SisMob (PMZI, KNKL, MTSB), une station LB sur Glorieuse (GGLO, île éparse française à 200 km au NE de Mayotte), et la pose de stations OBS en mer autour de l'essai, n'a pu avoir lieu qu'en février-mars 2019 dans le cadre d'un projet INSU-CNRS Tellus Mayotte (SISMAYOTTE). La campagne océanographique en mer MAYOBS sur le navire océanographique Marion Dufresne II, avec une équipe pluridisciplinaire IPGP, Ifremer, BRGM, CNRS a permis la découverte d'un nouveau volcan sous-marin actif ([Feuillet et al. 2021](#)) un an après le début de la séquence sismique, et une meilleure caractérisation de la sismicité grâce à l'analyse des données à terre et des données des OBS.

À partir de juin 2019, une surveillance de plus longue durée se met en place avec la création du réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte ([REVOSIMA](#)). L'IPGP opère ce réseau à travers l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise (OVFP-IPGP) en coresponsabilité avec la direction régionale du BRGM à Mayotte. Pendant une période de transition qui a permis l'organisation de l'OVFP pour la surveillance de l'activité sismique, le RéNaSS a assuré le suivi de cette sismicité, en prenant le relai du BRGM, avec l'appui de sismologues volontaires sur l'ensemble du territoire qui assureraient une astreinte pour remplir la main courante. Des campagnes océanographiques régulières MAYOBS ([Rinnert et al. 2019](#)) permettent le maintien de stations OBS au plus près de l'essai sismique et du volcan. Le suivi journalier du REVOSIMA se fait à partir des stations à terre. Les données des OBS sont traitées par la suite et rajoutées aux données des stations terrestres pour améliorer les catalogues de sismicité ([Saurel et al. 2021](#)).

À l'heure actuelle, la station accélérométrique [MILA](#) est venue compléter le réseau RAP en plus de YTMZ. La station éducative MCHI fait partie du réseau de suivi du REVOSIMA. Les trois stations LB installées en 2019 devraient être déplacées en 2022 vers des sites permanents et moins bruités. Le REVOSIMA [diffuse des bulletins mensuels et des communiqués](#) en cas de séismes ressentis (voir un exemple en Fig. 6).

Dans le cadre du REVOSIMA, à côté des actions de surveillance de la sismicité, de la géodésie et de la géochimie liées à l'activité sismo-volcanique, des travaux sur les aléas sont menés par différentes équipes (sismique, tsunami, volcanique). Par ailleurs, de nombreuses activités de recherche se développent pour comprendre le phénomène et le contexte géologique régional, ainsi que le fonctionnement de la ride volcanique (ANR COYOTES, campagnes océanographiques SISMAORE, SCRATCH, GEOFLAMME...). Depuis août 2021, 14 stations RaspberryShake supplémentaires sont installées dans des locaux municipaux

de Mayotte par le BCSF-RéNaSS, pour des travaux sur les intensités macrosismiques et les effets de site, en complément des stations sismiques existantes.

Grâce à la présence d'une station du RAP sur l'île et à un réseau sismologique évolutif partagé, il a été possible de suivre les caractéristiques principales de la sismicité des premiers mois. Une connaissance fine de la sismicité n'a été possible qu'avec le déploiement d'un réseau sismologique local terre-mer mais seulement plusieurs mois après le début de la séquence. Le suivi en temps réel reste dépendant d'un réseau sismologique à terre limité car insulaire, qui n'aura jamais une couverture azimutale ou en distance optimale autour de l'essai. Les campagnes en mer apportent des localisations beaucoup plus précises avec les OBS mais traités plusieurs mois plus tard. Le projet PIA3 Equipex+ Marmor (Marine Advanced geophysical Research equipment and Mayotte multidisciplinary Observatory for research and Response), piloté par l'Ifremer, démarre ; il devrait apporter de fortes améliorations du suivi temps réel avec la création d'un observatoire sous-marin au large de Mayotte au plus près des sources sismiques et volcaniques relié à la côte par câble.



▲ *Figure 6. Extrait du bulletin mensuel simplifié du REVOSIMA de novembre 2021 (accessible [sur cette page](#)).*

► **Contacts :** [Didier Bertil](#), [Anne Lemoine](#), [Agathe Roullé](#)

## Brèves

**Info 1 – Accès aux données** – Retrouvez les liens utiles pour l'accès aux données du RAP et les mentions à faire apparaître lors de leur utilisation dans vos publications [SUR CETTE PAGE](#).

**Info 2 – Les données paramétriques de mouvement du sol fort**, récoltées pour les séismes du territoire métropolitain depuis 1996, sont diffusées dans ces **flatfiles** : le flatfile français (données RAP et RLBP) disponible dans l'[entrepôt des produits Résif](#) ou sur la plateforme [RESORCE](#), le flatfile européen émis par le [service ESM](#) de Orfeus (données RAP uniquement).

**Info 3 – Dernières publications scientifiques** – Vous pouvez retrouver la liste des publications 1998-2021 utilisant des données du RAP [SUR CETTE PAGE](#). Si une publication est absente de cette liste, n'hésitez pas à le signaler : [contact](#).

**Info 4 – Organigramme 2022 du RAP** [SUR CETTE PAGE](#).

## Agenda

- La 10<sup>ème</sup> **BIENNALE DU RAP** est prévue du **8 au 10 novembre 2022 à Vogüé en Ardèche**. L'événement sera hébergé à 30 km de Le Teil, commune la plus touchée par le séisme du 11 novembre 2019. Pour l'organisation d'événements en marge de la Biennale du RAP ou pour donner un coup de main : [contact](#). Le programme sera constitué au printemps 2022.

Rédacteurs de ce numéro 33 : BERTIL Didier (BRGM), BERTRAND Etienne (UGE), CAUSSE Mathieu (UGE/ISTerre), GLINSKY Nathalie (Cerema), LEMOINE Anne (BRGM), LETORT Jean (IRAP OMP), MAUFROY Emeline (ISTerre), ROULLÉ Agathe (BRGM).