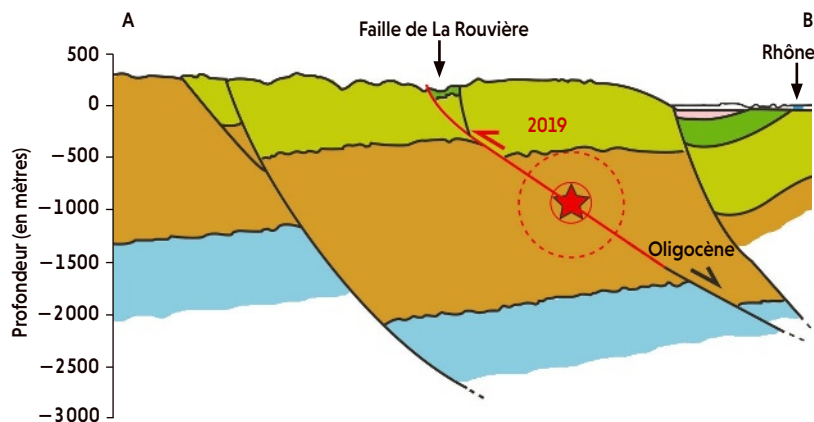
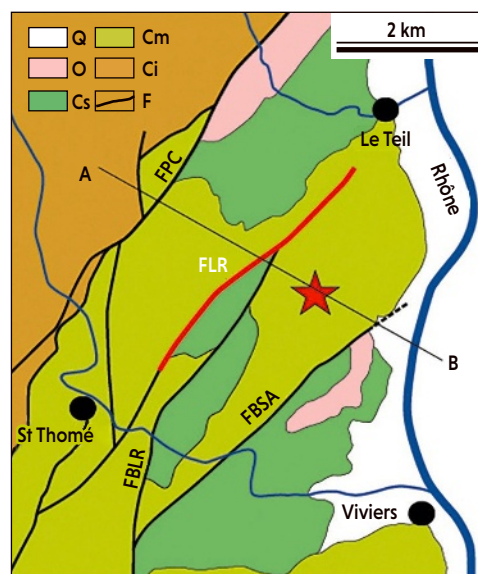




La carte géologique simplifiée de la région (à gauche) autour de l'épicentre du séisme du Teil (étoile rouge) montre les différentes failles du Nord-Est du faisceau des Cévennes, compris entre les terrains du Quaternaire (Q) et ceux du Crétacé inférieur (Ci). Ces failles recoupent les terrains de l'Oligocène (O) et des Crétacés supérieur (Cs) et moyen (Cm). Il s'agit des failles de Pontet-de-Couloubre (FPC), de Bayne-Roche-Renard (FBRR) et de Bayne-Saint-Alban (FBSA). Au niveau de la faille de La Rouvière (FLR), le trait rouge montre la section qui a cassé jusqu'en surface lors du séisme du Teil. Sur la coupe géologique (à droite) sont représentés le mouvement ancien (O) de la faille de La Rouvière durant l'Oligocène, et la réactivation en sens inverse (2019) lors du séisme du Teil du 11 novembre 2019.

la France métropolitaine et plus généralement l'Europe de l'Ouest. La première est de se demander si les failles ou segments de failles composant le système nord-est cévenol, incluant la faille de La Rouvière, avaient déjà rompu ces derniers millions d'années, et, le cas échéant, avec quelle magnitude. Pour répondre, plusieurs études sont nécessaires. D'abord, une imagerie géophysique profonde aidera à localiser ces structures en profondeur, à définir leurs géométries, leurs dimensions et leur capacité à produire des tremblements de terre de magnitude supérieure à 6. En parallèle, des études paléosismologiques renseigneront sur l'âge des séismes anciens dont on déduira un intervalle de récurrence moyen, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre deux séismes ayant provoqué des ruptures de surface. L'objectif de ces travaux est d'améliorer le modèle de failles utilisé dans les analyses de risque sismique.

## UN RISQUE À RÉÉVALUER

De plus en plus, le risque de rupture en surface est considéré comme une menace importante pour les infrastructures et les installations sensibles dont la tolérance aux instabilités du sol est très faible. En France et dans les zones intra-plaques avoisinantes, ce risque est rarement pris en compte. Pourtant, il existe bien, comme le montre le cas du séisme du Teil. Aujourd'hui, cet aléa est essentiellement analysé à partir d'approches empiriques pour anticiper la localisation et l'amplitude du glissement localisé le long d'une faille active en surface. Un couloir sécurisé où toute infrastructure sensible serait proscrite, ou au moins adaptée, peut être défini autour de la faille sismique ainsi répertoriée. Mais toutes ces approches empiriques souffrent de la rareté des données, notamment dans la plage des magnitudes faibles à modérées.

Enfin, le rôle même des processus tectoniques à long terme, s'étalant sur plusieurs centaines de millions d'années, liés aux mouvements des plaques lithosphériques lointaines, est remis en question. En effet, la France métropolitaine ainsi que ses pays voisins de l'Europe de l'Ouest correspondent à des régions continentales stables, où nous l'avons vu, les taux de déformations sont très faibles. Et il n'est pas impossible que la sismicité de ces régions soit davantage liée à d'autres types de mécanismes «tectoniques» qui s'expriment à plus court terme que la tectonique des plaques. Des études récentes suggèrent par exemple que le champ de contraintes régnant actuellement dans la région où a eu lieu le séisme du Teil serait lié au soulèvement du Massif central et des Alpes induit par des processus d'érosion ou consécutif à la fonte des glaces lors de la dernière déglaciation il y a entre 15 000 et 18 000 ans (on parle de rebond postglaciaire). Résoudre ces problèmes géodynamiques requiert l'acquisition de données géologiques et géophysiques supplémentaires ainsi que la mise en œuvre de nouveaux modèles. En d'autres termes, plus les experts acquerront des connaissances, plus ils seront en mesure d'être précis dans la détermination de l'aléa sismique.

Alors seulement, on pourra vraiment savoir si à l'instar de la faille de La Rouvière, il existe en France, par exemple dans le Massif armoricain, les Alpes, les Pyrénées, les Vosges... d'autres failles anciennes, capables de produire des séismes avec ruptures de surface. Rappelons que la métropole compte une dizaine de grandes zones de failles. Plusieurs projets en cours visent à réévaluer la sismicité dans les zones intracontinentales stables pour, à terme, redessiner la carte des failles actives en France. ■

## BIBLIOGRAPHIE

J.-F. RITZ ET AL., Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France, *Commun. Earth & Environ.*, pp. 10, 2020.

K. MANCHUEL ET AL., The French seismic CATalogue (FCAT-17), *Bull. Earthquake Eng.*, vol. 16, pp. 2227-2251, 2018.



Nathalie Feuillet



Arnaud Lemarchand

# Mayotte a tremblé sous le coup de la plus grande éruption sous-marine jamais documentée

Mayotte ne connaissait pas de séismes importants. La situation a changé en 2018 quand cette petite île française située entre Madagascar et le continent africain a connu une série de tremblements de terre, parfois violents. Comment expliquer ces secousses ? Par une activité volcanique inédite. Nathalie Feuillet et Arnaud Lemarchand, de l'institut de physique du globe de Paris (IPGP), racontent l'histoire de cette découverte et les recherches entreprises pour mieux comprendre le phénomène et prévenir d'éventuels risques.

## BIO EXPRESS

Nathalie Feuillet est responsable de l'équipe de Géosciences marines à l'IPGP. Elle codirige des missions *Mayots* dédiées aux phénomènes sismiques et volcaniques touchant l'île de Mayotte depuis 2018.

Arnaud Lemarchand est ingénieur de recherche à l'IPGP.

## Quelle est l'origine du volcanisme à Mayotte ?

**Nathalie Feuillet :** Mayotte, dans l'archipel des Comores, est une île volcanique qui a commencé à s'édifier il y a environ 20 millions d'années. L'origine exacte de son volcanisme est controversée. L'une des hypothèses est la présence d'un point chaud, c'est-à-dire d'une remontée massive de matière chaude depuis les profondeurs du manteau terrestre. Une autre attribue ce volcanisme à un système de fractures faisant partie du rift est-africain, ce grand fossé parsemé de volcans courant de l'Éthiopie au Malawi, qui s'élargit et fracture lentement l'Afrique.

Selon la théorie du point chaud, Mayotte serait la plus ancienne île de tout l'archipel des Comores, et l'île de la Grande Comore serait le témoignage le plus récent de sa présence. Toutefois, la morphologie bien préservée de cônes

volcaniques et de cratères à l'est de Mayotte – à Petite-Terre et à Mamoudzou – suggère une activité volcanique récente. Elle est attestée par le carottage, réalisé en 2005 dans le lagon de Mayotte par une équipe franco-allemande, qui a révélé un dépôt de cendre volcanique daté de quelques milliers d'années seulement. Tous ces indices d'activité récente, et surtout la découverte d'une nouvelle éruption et d'un nouveau volcan au large de l'île, nous amènent à revoir nos théories sur l'origine de Mayotte.

#### Comment a-t-on découvert l'éruption ?

**Nathalie Feuillet :** Tout a commencé le 10 mai 2018 par de très forts séismes à l'est de Mayotte. Le 15 mai, un séisme de magnitude 5,9 a fait des dégâts sur l'île et apeuré la population, ce qui, de mémoire humaine, n'était jamais arrivé. Au départ, nous n'avions aucune idée précise de l'origine du phénomène, puisque la région de Mayotte n'était considérée ni à risque sismique, ni à risque volcanique. Les séismes étaient organisés en essaims, c'est-à-dire en séries de tremblements produits sur des périodes de temps courtes. Cela suggérait autre chose qu'un événement tectonique ponctuel ; c'était plutôt caractéristique d'une activité volcanique.

#### Vous avez donc relié ces essaims de séismes à un possible volcanisme ?

**Nathalie Feuillet :** Oui, d'autant plus que l'activité sismique s'est poursuivie pendant deux mois. Il y a eu un bref retour au calme à l'été 2018, mais qui a très vite été suivi d'une reprise de l'activité sismique en septembre. En outre, les stations géodésiques de l'île ont enregistré de très importantes déformations du sol : Mayotte se déplaçait vers Madagascar et s'enfonçait de plusieurs centimètres par an, ce qui est considérable. Ces signes faisaient penser à la vidange d'un réservoir magmatique.

Le 11 novembre 2018, un étrange phénomène est venu conforter cette hypothèse : vingt minutes durant, les stations sismiques du monde entier ont enregistré un fort signal sismique de très basse fréquence issu de quelque part à l'est de Mayotte ; or ce genre de signal est caractéristique d'une activité volcanique. L'occurrence de cet événement a provoqué une intense discussion sur Twitter entre sismologues de tous les pays. À partir de ce moment-là, nous

savions avoir affaire à un phénomène magmatique important.

#### Où pouvait-il se situer ?

**Nathalie Feuillet :** Les données des stations sismologiques mondiales et régionales indiquaient que le phénomène se déroulait en mer à l'est de Mayotte, mais on ne savait pas où exactement : les sources sismiques se trouvaient dans une vaste zone située à quelques dizaines de kilomètres de l'île. En février 2019, nous sommes allés y placer six « sismomètres fond de mer », des instruments qui enregistrent les mouvements du fond marin. Nous avons ainsi découvert que les sources des séismes étaient toutes localisées le long d'un alignement de volcans sous-marins. La grande majorité d'entre elles se trouvaient sous des structures volcaniques situées à quelques kilomètres seulement de Petite-Terre, à des profondeurs se mesurant en dizaines de kilomètres.

#### Êtes-vous aussi allés observer ce qui se passait au fond ?

**Nathalie Feuillet :** En mai 2019, grâce au soutien de l'État, le *Marion Dufresne* a été affrété. Le navire amiral de la flotte des TAAF, la collectivité des Terres australes et antarctiques françaises, possède en effet des instruments qui nous ont permis de mener la campagne d'observation *Mayobs 1*. Notre objectif était d'acquérir les données des sondeurs multifaisceaux de coque afin de faire de la bathymétrie, c'est-à-dire la cartographie du fond océanique, mais

#### Et en avez-vous trouvé ?

**Nathalie Feuillet :** Un soir, l'équipe de quart a détecté un important panache acoustique se propageant dans la colonne d'eau. Un tel phénomène résulte d'une variation de la vitesse des ondes sonores et peut être dû au passage d'une baleine, d'un banc de poissons, d'un courant d'eau, etc. Nous avons tout de suite soupçonné que l'origine de ce panache était plutôt une remontée de gaz volcaniques. Le panache que nous voyions au-dessus d'un fond à 3 000 mètres, situé à 50 kilomètres à l'est de Mayotte, mesurait près de 2 kilomètres de haut. Nous n'avions jamais rien vu de tel. Ce que nous observions était tout simplement extraordinaire.

Pour savoir d'où il venait, nous avons comparé nos données bathymétriques à des données plus anciennes collectées dans la zone en 2014 par le *Beautemps-Beaupré*, le navire océanographique du Shom, le Service hydrographique et océanographique de la Marine. Nous avons ainsi mis en évidence un nouveau relief : nous assistions à la naissance en direct sur le territoire français d'un grand volcan sous-marin...

#### Grand comment ?

**Nathalie Feuillet :** Il mesure 5 kilomètres de diamètre et plus de 800 mètres de haut. Cela représente une énorme quantité de lave déversée : de l'ordre de 5 kilomètres cubes en un an environ. C'est comme si l'on avait recouvert la moitié de la ville de Paris d'une couche haute de plusieurs centaines de mètres de lave. Le volcan mesure trois

## NOUS AVONS ASSISTÉ À LA NAISSANCE EN DIRECT D'UN GRAND VOLCAN SOUS-MARIN

aussi d'obtenir des images de la colonne d'eau et du fond, de sonder les sédiments et finalement de recueillir des données magnétiques et gravimétriques. Nous voulions mettre en évidence des traces d'activité volcanique récente sur le fond océanique.

fois la tour Eiffel. C'est la plus grande éruption sous-marine jamais documentée.

#### Qu'avez-vous alors fait ?

**Nathalie Feuillet :** Nous avons pu collecter plusieurs kilogrammes de lave fraîche, tout juste mise en place, sur le flanc du