

INSTITUT DE FRANCE Académie des sciences

# Les traductions des Comptes Rendus

Géoscience

Sciences de la Planète

# Volcanisme et tectonique découverts le long de l'archipel des Comores entre l'Afrique et Madagascar

Corps de l'article traduit par Isabelle Thinon®

Date de publication : 2023-12-01 https://doi.org/10.5802/crgeos.159-fr

*Résumé* : Des données géophysiques et géologiques ont été acquises lors de la campagne océanographique SISMAORE (2020–2021). Deux grands champs tectono-volcaniques sous-marins ont été découverts tout le long et principalement au nord de l'archipel des Comores : la province N'Droundé orientée N160°E au nord de Grande-Comore, et la province Mwezi orientée N130°E au nord d'Anjouan-Mayotte où des roches basaltiques de type popping-rocks suggèrent une activité volcanique possiblement actuelle à pléistocène. La géométrie et la distribution des structures récentes sont cohérentes avec un contexte régional actuel transtensif dextre. Leurs orientations évoluent d'Ouest en Est (~N160°E, ~N130°E, ~EW), suggérant pour la partie occidentale, une mise en place du volcanisme influencée par la structuration crustale préexistante. Le corridor tectono-volcanique de 200 km de large et de 600 km de long dessine une limite de plaque lithosphérique Somalie-Lwandle immature en décrochante dextre entre le système du rift est-africain et Madagascar.

*Mots-clés :* Province volcanique, Tectonique active, Frontière de plaque naissante, Bathymétrie, Rétrodiffusion, Canal du Mozambique Nord, Archipel des Comores

# Article original :

Isabelle Thinon; Anne Lemoine; Sylvie Leroy; Fabien Paquet; Carole Berthod; Sébastien Zaragosi; Vincent Famin; Nathalie Feuillet; Pierre Boymond; Charles Masquelet; Nicolas Mercury; Anaïs Rusquet; Carla Scalabrin; Jérôme Van der Woerd; Julien Bernard; Julie Bignon; Valérie Clouard; Cécile Doubre; Eric Jacques; Stephan J. Jorry; Frédérique Rolandone; Nicolas Chamot-Rooke; Matthias Delescluse; Dieter Franke; Louise Watremez; Patrick Bachèlery; Laurent Michon; Daniel Sauter; Stéphane Bujan; Albane Canva; Emilie Dassie; Vincent Roche; Said Ali; Abdoul Hamid Sitti Allaouia; Christine Deplus; Setareh Rad; Ludivine Sadeski, "Volcanism and tectonics unveiled in the Comoros Archipelago between Africa and Madagascar". *Comptes Rendus Géoscience*, vol. 354, Special Issue S2 (2022), p. 7-34. https://doi.org/10.5802/crgeos.159

Les traductions des *Comptes Rendus* sont mises à disposition du public dans un but d'accessibilité mais n'ont pas reçu de validation scientifique avant leur publication, seule la publication initiale engage la responsabilité de l'Académie des sciences. Le projet Traduction des *Comptes Rendus* est soutenu par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et par la délégation à la langue française et aux langues de France du ministère de la Culture.



This translation is licensed under the CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE. http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



FIGURE 1 – (a) Contexte géologique régional de la zone d'étude. Volcanisme dans le nord du Canal de Mozambique de Michon et al. [2022] et Roche et Ringenbach [2022]. Localisation des tremblements de terre à partir de la base de données de l'ISC [2021]; limites des plaques de Michon et al. [2022]; zones de fracture de Davis et al. [2016]; limite de la croûte océanique et du manteau exhumé (COB) de Roche et Ringenbach [2022]; failles majeures du Système de Rift Est-Africain (EARS, lignes noires épaisses) de Michon et al. [2022]; bathymétrie de GEBCO, 2014 [Weatherall et al. 2015]. A : bassin d'Ambilobe; DR, ride de Davie; K, bassin de Kerimbas; M, bassin de Majumba; N, bassin de Nacada. b) Compilation des mécanismes au foyer [Bertil et al. 2021, et références y figurant] et les mouvements relatifs actuels par rapport à la plaque Nubie [Stamps et al. 2021].

# 1. Introduction

L'archipel des Comores, dans le Canal du Mozambique entre l'Afrique de l'Est et le nord de Madagascar (figure 1), est situé le long de la limite diffuse entre les plaques lithosphériques de Lwandle et de Somalie [Famin et al. 2020; Kusky et al. 2010; Stamps et al. 2018, 2021]. Cette limite a probablement évolué conjointement avec la propagation vers le sud du système de rift de l'Afrique de l'Est (EAR) [par exemple, Franke et al. 2015; Mougenot et al. 1986].

La sismicité dans le Canal du Mozambique est d'intensité modérée et se concentre le long de deux structures à grande échelle : la ride de Davie et l'archipel des Comores [Bertil et Regnoult 1998; Bertil et al. 2021; Lemoine et al. 2020; Figure 1]. Les mécanismes au foyer indiquent principalement une extension E–O régionale le long de la Ride de Davie, considérée comme une branche offshore orientée N–S du Système du Rift Est-Africain [EARS; Courgeon et al. 2018; Déprez et al. 2013; Deville et al. 2018 : À l'ouest de l'archipel des Comores, des mécanismes au foyer clairsemés le long des failles normales N–S sont également compatibles avec l'extension E–O et peuvent être liés au EARS [par exemple, Klimke et Franke 2016]. En revanche, la sismicité dans l'archipel des Comores indique une distribution ESE-ONO à l'ouest de Mayotte et une distribution ENE-OSO à l'est de Mayotte [Bertil et al. 2021]. Ailleurs dans l'archipel, des mécanismes au foyer clairsemés suggèrent principalement un décrochement avec une composante normale, y compris la séquence sismo-volcanique associée à l'éruption de l'Est Mayotte 2018–2021 [Cesca et al. 2020; Feuillet et al. 2021; Lemoine et al. 2020; Lavayssière et al. 2022; Mercury et al. 2022]. L'activité tectonique et volcanique d'âge Holocène est également mise en évidente sur les îles d'Anjouan et de Mayotte [Famin et al. 2020; Quidelleur et al. 2022] et dans la plaine abyssale au nord de l'Archipel [Tzevahirtzian et al. 2021]. Les études récentes [p. ex., Bertil et al. 2021; Famin et al. 2020; Feuillet et al. 2021; Kusky et al. 2010; Lemoine et al. 2020; Michon 2016; Stamps et al. 2018, 2021] ont suggéré que l'archipel des Comores est situé le long d'une limite de plaque diffuse ou naissante entre les plaques Lwandle et Somalie, bien que le sens de déplacement soit mal contraint, compatible avec un contexte en transtension, en décrochement pur ou en transpression.

Les premiers travaux se sont concentrés sur les îles de l'archipel des Comores et peu de documents ont traité des domaines maritimes de l'archipel (figure 2). En utilisant des données bathymétriques, Audru et al. [2006] et Tzevahirtzian et al. [2021] fournissent des premières cartes des structures volcaniques et des instabilités de pente sur les flancs des îles. Depuis 2019, le Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte [REVOSIMA 2019–2022] surveille de près les événements sismo-volcaniques en cours et rapporte des informations détaillées, telles que la morphologie du fond marin et l'activité sismique et volcanique sur le versant est de Mayotte (où environ 6,55 km3 de magma ont jailli sur le fond marin en janvier 2021), ainsi que la lithologie des structures volcaniques [par exemple, Berthod et al. 2021a, b; Deplus et al. 2019; Feuillet et al. 2021; Foix et al. 2021; Jacques et al. 2019; Lavayssière et al. 2022; bulletin REVOSIMA 2021; Saurel et al. 2022]. Encore aujourd'hui, l'âge et la nature de l'archipel volcanique des Comores et des zones environnantes ne sont contraints que par l'analyse d'échantillons de roches prélevés à terre [Class et al. 2005; Michon 2016; Pelleter et al. 2014; Quidelleur et al. 2022] et quelques-uns prélevés en mer, principalement de l'est de Mayotte [Berthod et al. 2021a, b; Feuillet et al. 2021].

Pour combler ce manque de données, la campagne océanographique géophysique et géologique SIS-MAORE, liée au projet COYOTES (COmoros & maYotte : vOlcanism, TEctonics and Seismicity), a eu lieu au large de l'archipel des Comores de décembre 2020 à février 2021 [Thinon et al. 2020a]. Cette campagne a permis d'acquérir des données de bathymétrie multifaisceaux et de rétrodiffusion à haute résolution, des profils de réflexion sismique superficiel à profond et des données de réfraction, des mesures de flux de chaleur, des données magnétiques et de gravités, ainsi que des échantillons de roches et de sédiments. Dans cet article, nous nous concentrons sur les principales caractéristiques des structures volcaniques et tectoniques récentes à l'échelle régionale, afin de mieux cartographier la distribution des déformations autour de l'archipel. Une meilleure connaissance des structures actives et de leur contexte géodynamique régional améliorera l'identification et l'évaluation des risques volcaniques, sismiques, tsunamigènes et de glissements à l'échelle régionale. Dans cet article, nous proposons une configuration géodynamique qui prend en compte l'histoire prévolcanisme du nord du Canal de Mozambique et la cinématique régionale actuelle.

# 2. Le contexte géologique et géodynamique régional

# 2.1. Volcanisme de l'archipel des Comores

L'archipel des Comores comprend les quatre îles principales, Grande-Comore, Mohéli, Anjouan et Mayotte, ainsi que des reliefs majeurs sous-marins, tels que les Jumelles, le mont Vailheu et les bancs Zélée-Geyser [p. ex., Tzevahirtzian et al. 2021; Figure 2]. L'étude par stratigraphie sismique [Leroux et al. 2020] indique que la phase volcanique principale de Mayotte (du Paléogène tardif au Néogène) est beaucoup plus jeune que les



FIGURE 2 – Carte des principales caractéristiques géologiques de la zone d'étude et des données acquises lors de la campagne SISMAORE 2020–2021. Traits fins : profils de sondeur de sédiment (SBP) et profils de sismique réflexion 48-traces (SISRAP); Traits épais : profils de sismique réflexion 960-traces (MCS) [Masquelet et al., 2022]; OBS, sismomètre de fond marin. Les données acoustiques du sondeur multifaisceaux (MBES) et de la colonne d'eau ont été obtenues le long de toutes les lignes noires Thinon et al. [2020a]. Îles volcaniques : GC, Grande-Comore; Mo, Mohéli; A, Anjouan; Ma, Mayotte. Monts sous-marins et chaînes volcaniques majeures : V, Vailheu; J, Jumelles; Z, Zélée Bank; G, Geyser Bank; L, Leven Bank; C, Cordelière Bank. Étoiles blanches : K, volcan Karthala; FMV, volcan Fani Maore; FaC, complexe volcanique Fer à Cheval [Feuillet et al. 2021] Bathymétrie détaillée à partir de la compilation de Tzevahirtzian et al. [2021] (campagnes océanographiques listées dans les références et dans Counts et al. [2018]) superposée à la bathymétrie régionale à basse résolution GEBCO [Weatherall et al. 2015) Les contours blancs correspondent aux autres figures de ce document.

bancs de Zélée-Geyser (transition Crétacé-Paléogène), qui sont à leur tour plus jeunes que les monts sousmarins des Glorieuses (Crétacé tardif). Mayotte, la plus ancienne des quatre îles, a une faible altitude et un plateau insulaire bien développé, tout comme Mohéli [Tzevahirtzian et al. 2021]. L'apparition du volcanisme de Mayotte a été estimée à environ 20 Ma par Michon [2016] et entre 26 et 27 Ma par Masquelet et al. [2022]. Pour Anjouan et Grande-Comore, îles volcaniques de haute altitude avec de jeunes reliefs, le volcanisme aurait pu commencer entre 7 et 10 Ma [Michon 2016].

La partie subaérienne de Mayotte est composée de trois unités morphologiquement et structurellement distinctes correspondant à trois phases éruptives, qui datent de 10,6 à 1,5 Ma dans la partie sud, de 7,1 à 1,0 Ma dans la partie nord-ouest et de 2,4 Ma à 0,15 Ma dans la partie nord-est et l'îlot voisin Petite-Terre [Debeuf 2004; Nehlig et al. 2013]. Les couches de cendres volcaniques datés dans les sédiments du lagon suggèrent que l'activité volcanique explosive la plus récente sur terre est inférieure à 7 ka [Zinke et al. 2003, 2005, et références y figurant]. Sur le versant nord au large de Mayotte, plusieurs petits édifices volcaniques sont identifiés dans un couloir orienté N140°E d'Anjouan à Petite-Terre [Audru et al. 2006]. Sur le fond marin à l'est de Mayotte,

les campagnes de surveillance MAYOBS [Rinnert et al. 2019; REVOSIMA newsletter 2021] lors de la crise sismo-volcanique de Mayotte 2018–2021 ont documenté la Chaîne Volcanique Est de Mayotte orientée N110°E (EVCM; Figure 2), une ride composée de nombreuses structures volcaniques avec un nouvel édifice volcanique actif de 800 m de haut et de 5 km de diamètre à son extrémité [Berthod et al. 2021a, b; Cesca et al. 2020; Feuillet et al. 2021; Lemoine et al. 2020]. Ce nouveau volcan sous-marin actif s'appelle le volcan Fani Maoré (nom soumis à la Commission internationale des cartes marines de l'UNESCO, figure 2).

Avant l'éruption de Mayotte 2018–2021, le seul volcan ayant une activité historique connue (depuis le début du XVIIIe siècle) était le volcan Karthala sur Grande-Comore [Bachèlery et al. 1995, 2016b]. L'activité datée de l'Holocène tardif (à partir de 14°C, soit 1300  $\pm$  65 ans avant J.-C. et 740  $\pm$  130 ans avant J.-C.) est connue pour le volcan La Grille de Grande-Comore [Bachèlery et Coudray 1993; Bachèlery et al. 2016b], et une activité datée de l'Holocène inférieur est connue pour Anjouan [âges 14C de 8335  $\pm$  50 ans BP; par exemple, Quidelleur et al. 2022].

L'origine du volcanisme de l'archipel des Comores est débattue [Michon 2016]. Un modèle de panache mantellique, proposé principalement sur la base d'arguments géomorphologiques à grande échelle et de quelques âges K–Ar précoces, est incompatible avec la transtension dextre présumée entre les plaques Somalie et Lwandle [Calais et al. 2006; Stamps et al. 2018] et par des données géochronologiques ne montrant aucune progression d'âge claire à travers les îles [Debeuf 2004; Quidelleur et al. 2022; Tzevahirtzian et al. 2021]. Une autre explication est que le volcanisme représente une extension du système EARS à l'est de la Ride de Davie, peut-être le long d'une frontière diffuse ou naissante entre la plaque Somalie-Lwandle [par exemple, Deville et al. 2018 et références y figurant; Famin et al. 2020; Feuillet et al. 2021; Lemoine et al. 2020; Michon et al. 2022; Stamps et al. 2018].

#### 2.2. Répartition des déformations récentes et anciennes

La déformation observée sur Mayotte serait produite principalement par des décrochements et de la compression, conformément à la direction N135°E des mécanismes au foyer [Famin et al. 2020 : Les structures offshore orientées N130°E comprennent la chaîne volcanique des Jumelles et certains alignements de cônes volcaniques, de monts et de failles [p. ex., Tzevahirtzian et al. 2021]. De plus, Lemoine et al. [2020] et Feuillet et al. [2021] ont suggéré que le dyke profond alimentant l'éruption actuelle de Mayotte est orientée NO–SE, conformément au contexte de transtension.

Vers la Ride de Davie, sur l'extrémité ouest du Canal du Mozambique, le décrochement et les failles normales d'âge Néogène impliquent une composante de transtension associée au volcanisme [Franke et al. 2015; Roche et Ringenbach 2022]. Excepté là et dans les bassins associés tels que les bassins Kerimbas et Nacala [Courgeon et al. 2018; Mahanjane 2014; Mougenot et al. 1986; Roche et Ringenbach 2022; Vormann et Jokat 2021], aucune déformation quaternaire n'a été décrite dans le bassin des Comores ou dans le bassin de Majunga de la marge nord-ouest de Madagascar (Figure 1).

# 2.3. Histoire géologique régionale - héritage

Des études récentes suggèrent que le rifting du Gondwana a commencé entre la fin du Jurassique inférieur et le début du Jurassique moyen, de 170 Ma à 185 Ma [Davis et al. 2016; Eagles et König 2008; Gaina et al. 2015; Leinweber et Jokat 2012; Mueller et Jokat 2019; Senkans et al. 2019]. Cependant, la datation précise est difficile étant donné les anomalies magnétiques du planche océanique peu développées à partir de cette période. Au nord de l'archipel des Comores, les reconstructions cinématiques [par exemple, Davis et al. 2016] et les rares données gravimétriques et magnétiques suggèrent que le bassin de Somalie est constitué de croûte océanique avec un axe d'accrétion océanique fossile d'orientation EO et des failles transformantes orientées N–S à NO–SE [voir Figures 4 et 8 dans Davis et al. 2016, et figures 5 et 9 dans Phethean et al. 2016] (Figure 1). On pense que l'océanisation a commencé pendant la période magnétiquement calme du Jurassique (~166 Ma) et a cessé à ~120 Ma [Davis et al. 2016; Segoufin et Patriat 1980]. Au Mozambique et en Tanzanie à

l'ouest, la rupture lithosphérique est d'âge Jurassique moyen précoce (Aalénien) [Fossum et al. 2021; Roche et al. 2021; Senkans et al. 2019]. L'âge et la nature de la croûte sous les îles de l'archipel des Comores et le bassin des Comores sont encore débattus : D'une part, une croûte océanique déduite des données isostatiques, des anomalies magnétiques et gravimétriques, des vitesses d'onde P et des profils de sismique réflexion [Coffin et Rabinowitz 1987; Coffin et al. 1986; Klimke et al. 2016; Phethean et al. 2016; Roche et Ringenbach 2022; Talwani 1962; Vormann et Jokat 2021; Vormann et al. 2020]; D'autre part, la présence d'inclusions de quartzite dans les roches volcaniques et un massif de quartzite sur Anjouan [Flower 1972; Flower and Strong 1969; Montaggioni et Nougier 1981; Quidelleur et al. 2022; Wright et Mccurry 1970] et de faibles rapports Vp/Vs [Dofal et al. 2021] suggèrent que l'archipel serait construit sur une croûte continentale ou au moins sur des éléments continentaux [Dofal et al. 2021; Roach et al. 2017]. Dans la figure 1, nous choisissons de représenter la croûte comme océanique [Roche et Ringenbach 2022].

Quelle que soit la nature de la croûte, les données de gravimétrie semblent indiquer une certaine segmentation structurale héritée des domaines continentaux et océaniques sous l'archipel des Comores. Les transformantes et les zones de fracture [Davis et al. 2016; Phethean et al. 2016] pourraient être des structures préexistantes dans les bassins des Comores et de Somalie (Figure 1) qui auraient influencé la distribution des structures plus récentes..

#### 3. Données de la campagne SISMAORE et méthodes

La campagne SISMAORE (décembre 2020 à février 2021) de N/O (Navire Océanographique) Pourquoi Pas? a collecté 80 000 km2 de données de bathymétrie et de rétrodiffusion autour de l'archipel des Comores avec le sondeur multifaisceaux de coque (MBES RESON 7150 à 12 ou 24 kHz) et qui complètent les acquisitions précédentes autour de Mayotte [Figure 2; Thinon et al. 2020a; pour plus de détails, voir Informations supplémentaires]. En outre, nous avons acquis 10 000 km de profils de sondeur de sédiments (SBP) et 6 730 km de profils de sismique réflexion 48-traces (pour plus de détails, voir Informations supplémentaires), imageant respectivement le sous-sol jusqu'à 0,1 seconde temps double (s. TWTT) avec une très haute résolution et jusqu'à ~3 s. TWTT sous le fond marin. Cinq dragages (figures 2 et 3) ont permis de recueillir principalement des roches volcaniques sur les flancs du banc Zélée (ensemble d'échantillons SMR1), de la chaîne volcanique Jumelles (SMR2), de Mohéli (SMR3), de la chaîne volcanique Chistwani (SMR4) et d'un mont sous-marin dans la plaine abyssale au nord de Mayotte (SMR5) [Thinon et al. 2020a]. Ces roches sont macroscopiquement similaires à celles décrites sur les îles [Bachèlery et Hémond 2016; Debeuf 2004; Pelleter et al. 2014, et références y figurant] et au large de Mayotte [Berthod et al. 2021a, b]. Les roches de la drague SMR5 sont des roches basaltiques fraîches riches en CO2 appelées « popping rocks » (figure supplémentaire S1) qui contiennent des xénolithes d'arkose et de quartzite, parfois avec des formes fondues, et des xénocristaux d'olivine rares [Thinon et al. 2020al.

#### 4. Observations et interprétation

Sur la base des nouvelles données régionales de bathymétrie et de rétrodiffusion du MBES (Figure 3), nous avons construit une nouvelle carte géomorphologique régionale autour de l'archipel des Comores (Figure 4). En plus des îles et des monts sous-marins mentionnés précédemment, elle montre deux grands champs volcaniques et leurs structures tectoniques nouvellement cartographiés (les provinces de N'Droundé et de Mwezi), et les chaînes volcaniques sous-marines Domoni, Chistwani et Safari qui rejoignent les îles [d'abord décrites par Tzevahirtzian et al. (2021).

La profondeur de la plaine abyssale varie entre 3000 m et 3800 m (Figure 3a). Au nord de l'archipel des Comores, la plaine abyssale relativement lisse du bassin de Somalie est interrompue par deux grandes régions aux bathymétries hétérogènes (figure 3a) et avec de forts contrastes de réflectivité (figure 3b). La première, au nord d'Anjouan et de Mayotte, s'appelle la province de Mwezi (« Lune » en comorien; Figures 4 et 5), et la seconde, au nord de Grande-Comore, s'appelle la province de N'Droundé (de la ville de N'Droundé sur



FIGURE 3 – Cartes montrant (a) la bathymétrie et (b) l'imagerie par rétrodiffusion acoustique acquises lors de la campagne SISMAORE, combinée aux données bathymétriques précédentes. Sont également indiqués les principaux reliefs sous-marins nouvellement décrits : chaînes volcaniques de Vailheu, Domoni, Chistwani et Safari et provinces de N'Droundé et Mwezi. Les cercles jaunes et rouges représentent les tremblements de terre d'après Bertil et al. 2021. Autres symboles : idem figure 2.

Grande-Comore; Figures 4 et 6). Dans la partie orientale du bassin de Somalie se trouvent deux grandes vallées orientées N-S vers NNE–SSO, l'une sur le fond marin entre les îles Glorieuses et Banc de Leven à 3800 m de profondeur et l'autre au nord des Jumelles et de Zélée-Geyser à 3600 m (figures 3a et 4).

La plaine abyssale au sud de l'archipel, dans le Bassin des Comores, présente une morphologie homogène et plate à 3500 m de profondeur (figure 3a) sans forts contrastes de réflectivité (figure 3b). De petites variations de



FIGURE 4 – Carte géomorphologique de la zone d'étude montrant les principales structures volcaniques, tectoniques et sédimentaires identifiées sur les cartes bathymétriques et de rétrodiffusion de SISMAORE (Figure 3). Les principales structures sur les autres secteurs publiées dans des travaux antérieurs sont aussi intégrées [Feuillet et al. 2021; Paquet et al. 2019; Tzevahirtzian et al. 2021]. Les deux lignes pointillées grises marquent les limites du corridor tectono-volcanique de l'archipel des Comores décrit dans cet article.

réflectivité du fond marin plat au sud-est de Mayotte (figures 3b et 4) semblent être associées à la distribution des sédiments superficiels.

À l'est de Mayotte, l'EVCM (figures 3 et 4) comprend des rides allongées, plusieurs cônes volcaniques jusqu'à 500–900 m de hauteur dont le volcan sous-marin formé lors de l'éruption 2018–2021, des coulées de lave, et un complexe volcanique en forme de fer à cheval avec une activité actuelle [MAYOBS Cruises, REVOSIMA newsletter 2021; Feuillet et al. 2021; Rinnert et al. 2019]. Deux grands plis forcés en forme de dôme, des failles et d'éventuels dépôts sous-marins de transport de masse décrits par Paquet et al. [2019] sont également imagés (Figure 4).

Sur les pentes insulaires, la carte représente les principaux glissements volcanoclastiques identifiés par Tzevahirtzian et al. [2021] et Audru et al. [2006] avec de nouveaux détails. Sur la plaine abyssale, les profils sismiques (Figure 7) montrent que l'épaisseur de l'ensemble de la couverture sédimentaire peut dépasser 2,5 s TWT, soit ~3,1 km sur la base d'une vitesse moyenne de 2500 m·s-1 dans les sédiments [Masquelet et al. 2022].



8



FIGURE 5 – (a) Carte bathymétrique et b) carte de rétrodiffusion du Bassin de Somalie au nord d'Anjouan et de

Mayotte, montrant la sismicité et une vallée incisée (Va). Les régions délimitées sont indiquées en (d) et (e), respectivement. (c) Carte interprétative montrant la province de Mwezi, la chaîne volcanique de Jumelles, le banc de Zélée-Geyser et d'autres structures tectoniques, volcaniques et sédimentaires (pour la légende, voir la figure 4). (d) Carte détaillée de la morphologie du fond marin et (e) de la réflectivité dans la province centrale de Mwezi. Le cercle rouge indique le tremblement de terre du 24 juillet 2018 [3,62 Mwu, 15 km de profondeur; Bertil et al. 2021). C, structure conique; Cc, mont sous-marin avec cratère au sommet; Cd, mont sous-marin avec dôme au sommet; D, pli forcé en forme de dôme; De, dépression; F, faille; Lf, écoulement de lave; R, ride. La figure supplémentaire S2 présente des vues obliques de cette zone.



FIGURE 6 – (a) Bathymétrie, b) rétrodiffusion et c) cartes interprétatives de la province de N'Droundé. Trois chaînes volcaniques subparallèles (cercles numérotés) sont marquées par des lignes épaisses pointillées (c). Notez que la chaîne volcanique 1 change d'orientation de NNO–SSE à NO–SE à l'approche de Grande-Comore (GC), contrairement aux chaînes 2 et 3. (d) Détails de la bathymétrie et (e) cartes de rétrodiffusion. Voir la figure 5 pour l'explication des symboles.





FIGURE 7 – Sélection de profils de sismique réflexion 48-traces et leurs interprétations, montrant l'architecture du sous-sol de différentes structures volcaniques visibles sur le fond marin. Emplacements illustrés à la figure 2. (a, b) Profils orthogonaux dans la province de Mwezi (MAOR21R002 et MAOR21R075, respectivement), (c) Profil NNE–SSO dans la province de N'Droundé (MAOR21R070) et (d) Profil ONO–ESE dans le Bassin de Somalie au nord du banc Zélée-Geyser (MAOR21R001). Gr, graben; V, édifice volcanique; v.e., exagération verticale; autres : idem figure 5.

#### 4.1. Nord de l'archipel des Comores

#### 4.1.1. La province tectono-volcanique de Mwezi

La province de Mwezi couvre une superficie de 100 km sur 60 km (~6000 km2) dans la plaine abyssale du Bassin de Somalie (~3400 m de profondeur) et représente une extension vers l'ouest des chaînes volcaniques des Jumelles N130°E (Figure 5). Il contient de nombreux reliefs bathymétriques (Figures 5a et d) correspondant à des patchs avec une réflectivité modérée à forte (Figures 5b et e). Parmi ces reliefs, il y a des rides allongées à flancs abrupts et des reliefs coniques (figure 5d). Les rides ont généralement une longueur de 1 à 4 km et atteignent des hauteurs de plusieurs centaines de mètres au-dessus du fond marin environnant. Le mont sous-marin le plus élevé de cette région (C1 sur les figures 5d et e) se trouve à environ 600 m au-dessus d'une profondeur de 3355 m à la base. Les reliefs coniques peuvent présenter des cratères (Cc) ou des dômes (Cd) à leurs sommets. Ils atteignent généralement des diamètres de quelques kilomètres (jusqu'à 4 km) et des hauteurs allant jusqu'à 600 m. La réflectivité de ces structures suggère un fond marin dur constitué d'affleurements rocheux ou de substrat rocheux légèrement recouverts de sédiments [Le Gonidec et al. 2003]. L'échantillon SMR5 prélevé sur l'un de ces monts sous-marins contenait des popping rocks (figure supplémentaire S1). Nous avons interprété ces structures comme des édifices volcaniques [Wessel et al. 2010]. Ils ont la même morphologie et les mêmes caractéristiques géophysiques que les édifices volcaniques identifiés sur l'EMVC, où des popping rocks ont été échantillonnées au sommet et au niveau des coulées de lave du volcan Fani Maoré [Berthod et al. 2021a, b; Feuillet et al. 2021], et observés sur les pentes des îles Comores [Audru et al. 2006; Feuillet et al. 2021; Tzevahirtzian et al. 2021].

La carte de rétrodiffusion contient des taches de forte réflectivité, certaines atteignant plus de 15 km (Lf sur la figure 5e), qui ont peu ou pas de relief bathymétrique (figure 5d). Généralement associée à une rugosité complexe et à des formes diverses (généralement des lobes), une seule tache a une forme linéaire (Lf1 sur la figure 5e, orientée N160°E). Nous interprétons ces patchs comme des coulées de lave sur le fond marin ou légèrement recouvertes de sédiments très fins. Les formes et les dimensions de ces coulées de lave suggèrent des laves de faible viscosité comme celles observées et échantillonnées lors de l'éruption de 2018 à l'est de Mayotte [Berthod et al. 2021a, b; Feuillet et al. 2021].

La carte bathymétrique montre de nombreux dômes circulaires grands, plats et aux surfaces lisses qui atteignent des altitudes de 100 m et des diamètres de plusieurs kilomètres (D sur la figure 5d). Ils n'ont pas de signature de réflectivité (Figure 5e). Les profils sismiques à travers ces dômes montrent une couverture sédimentaire soulevée et faillée recouvrant un réflecteur de forte haute amplitude, souvent en forme de soucoupe (Figure 7 a,b). Ces réflecteurs profonds sont compatibles avec des intrusions magmatiques peu profondes (sills ou laccolithes), qui induiraient le soulèvement en dôme et la formation de failles dans la couverture sédimentaire sus-jacente [Kumar et al. 2022; Medialdea et al. 2017; Montanari et al. 2017; Omosanya et al. 2017, et références). Nous interprétons ces dômes comme des plis forcés par analogie avec la description de Paquet et al. [2019] et d'autres sources [Montanari et al. 2017, et références]. La modélisation analogique de Montanari et al. [2017] montre que la croissance de plis forcés en forme de dôme produit des déformations en tension et en compression (failles normales et inverses) dans la couverture sédimentaire. Certains de ces plis forcés dans la province de Mwezi sont accompagnés de failles sub-verticales d'offset apparent atteignant 10 m (Figure 7a2–a4, b). La perturbation des signaux sismiques sous et au-dessus des sills peut résulter de la présence de coulées de lave sus-jacentes (masque acoustique) ou de voies de migration des fluides (cheminées) [Masquelet et al. 2022 et références incluses].

La plupart des cônes volcaniques, des rides et des monts sous-marins sont répartis le long de d'une direction ~N130°E (Figure 5c). En outre, les escarpements raides identifiés sur le fond marin sont principalement orientés ~N130°E au centre de la province de Mwezi et principalement orientés ~N–S sur le bord nord. Ils ont une longueur de 10 km et des décalages verticaux allant jusqu'à 10 m (voir F1, F2, F3 sur les figures 5d et 7a3). Certains de ces escarpements sont constitués de segments discontinus légèrement décalés (figure supplémentaire S2). Certains relient des monts sous-marins ou des dômes, et certains recoupent les dômes formant des escarpements de 10–20 m (voir F1 coupant les dômes D3 et D4 sur la figure 5d; figure supplémentaire S2). Nous interprétons ces escarpements comme des failles à composante subverticale apparente.

#### 4.1.2. La province tectono-volcanique de N'Droundé

La province de N'Droundé couvre une superficie de 40 km sur 100 km (~4000 km2) à l'extrémité ouest de l'archipel des Comores, au nord de Grande-Comore, et se compose de trois linéaments topographiques sous-marins remarquables NNO-SSE subparallèles (Figure 6). La plus méridionale mesure 60 km de long et environ15 km de large, avec un sommet atteignant une profondeur de 1230 m au-dessus de 3000 m (caractéristique 1 de la figure 6). Près de son extrémité sud-est, son orientation change doucement de N160°E à N130°E. Les deux autres sont des linéaments topographiques parallèles, orientées N160°E, d'environ 130 km de long et d'une largeur moyenne de 5 km à une profondeur de 3100 à 3400 m (éléments 2 et 3 de la figure 6). Ils ont une grande variété de formes, y compris des rides étroites et des édifices coniques dont certains ont des cratères ou des cratères percés à leurs sommets (Figure 6d). Celles-ci font entre 1 et 5 km de diamètre et quelques kilomètres de long et atteignent des hauteurs de plusieurs centaines de mètres au-dessus du fond marin environnant. Le mont sous-marin le plus élevé culmine à 735 m à une profondeur de 2472 m (C1 sur la figure 6a). Nous interprétons ces monts sous-marins comme des édifices volcaniques. Certains plis forcés en forme de dôme sont observés dans la province de N'Droundé via les profils sismiques (D sur la figure 7c), mais peu affectent le fond marin et ont des altitudes inférieures à 100 m. La plupart d'entre eux sont recouverts d'une fine couche d'une unité sismique chaotique ou non réfléchissante (max. 0,1 s TWT; V et S sur la figure 7c). Un dépôt important de sédiments provenant de Grande-Comore peut entraîner une bathymétrie plus douce ici que dans la province de Mwezi, qui manque de sédiments. Alternativement, les monts sous-marins de N'Droundé sont plus anciens que ceux de la province de Mwezi et ont une couverture sédimentaire plus épaisse. Avec les monts sous-marins, des escarpements orientés N160° E de quelques mètres de haut affectent le fond marin en relais (F sur la figure 6d).

# 4.2. Autres indices de volcanisme récent dans l'archipel des Comores

#### 4.2.1. Chaînes volcaniques sous-marines

La chaîne volcanique Safari entre les îles d'Anjouan et de Mayotte possède plusieurs édifices volcaniques composés de monts sous-marins coniques, de rides, de fissures éruptives et de coulées de lave (Figures 3, 4 et 8). Les monts sous-marins coniques sont alignés selon une orientation N130°E et atteignent des hauteurs allant jusqu'à 400 m et des diamètres de 1 à 1,5 km (figure 8, figure supplémentaire S3). Les grandes taches à haute réflectivité près d'eux sont interprétées comme des coulées de lave, et les taches à faible réflectivité sont interprétées de lave recouvertes d'une mince couche de sédiments (Figure 8b,e). Les rides, d'orientation NO–SE, mesurent jusqu'à plusieurs kilomètres de long, des centaines de mètres de large et 200 m de haut (R sur la figure 8d) et peuvent contenir des dépressions sur leurs sommets jusqu'à environ 20 m de profondeur (Ef1 sur la figure 8d–f). L'une de ces rides se prolonge en une fissure de 2 km de long avec des parois pouvant atteindre 20 m de haut et une forte réflectivité (Ef2 sur la figure 8e,f). Des caractéristiques similaires sur le mont sous-marin axial (Juan de Fuca Ridge) ont été interprétées comme des fissures éruptives [Chadwick et al. 2019; Clague et al. 2011].

D'autres grandes chaînes volcaniques sous-marines, telles que les chaînes de Domoni et de Chistwani (figures 4 et 9, figure supplémentaire S4) contiennent des édifices volcaniques, notamment des monts sousmarins coniques, des rides et des coulées de lave. Les roches draguées du flanc SE de la chaîne de Chistwani (SMR4) sont basaltiques [Thinon et al. 2020b]. Ce large éventail de structures volcaniques est la preuve de plusieurs phases volcaniques qui ont formé des chaînes volcaniques sous-marines dans tout l'archipel des Comores, à la fois entre les îles (chaînes Domoni, Chistwani et Safari) et au-delà (chaîne Vailheu et EMVC).



FIGURE 8 – (a) Morphologie de la chaîne volcanique Safari entre les îles Anjouan et Mayotte à partir des données bathymétriques MBES SISMAORE (échelle des gris) et des acquisitions antérieures (couleur, de Tzevahirtzian et al., 2021). (b) Carte de rétrodiffusion. (c) Carte interprétative montrant les édifices volcaniques coniques (C), les rides (R), les coulées de lave (Lf) et les fissures éruptives (Ef). (d) zoom de (a) et (e) zoom de (b). (f) Sections transversales des rides (R) et des fissures (Ef2) observées sur le fond marin. La figure supplémentaire S3 présente des vues obliques de cette zone.

# **CHISTWANI** volcanic chain



FIGURE 9 – (a) Vue oblique montrant la morphologie de la chaîne volcanique du Chistwani entre Mohéli et Anjouan. Orientée N 55°E, la chaîne est étroite (~20 km de large), asymétrique (flanc SE plus raide) et s'élève jusqu'à ~500 m (jusqu'à 2830 m de profondeur) au-dessus de la plaine abyssale environnante (3400 m de profondeur). b) Carte interprétative montrant les édifices volcaniques (violet) et les coulées de lave (rose) au sommet de la chaîne volcanique. Les traits pointillés noirs indiquent des linéaments en échelon qui peuvent représenter un mouvement dextre.

#### 4.2.2. Autres indices de volcanisme

Grande-Comore, Mohéli et Anjouan ont des pentes insulaires escarpées recouvertes de dépôts volcanoclastiques (cônes détritiques) et de blocs d'affleurement [Tzevahirtzian et al. 2021; Figure 4]. Dans les dépôts volcanoclastiques du versant sud de Grande-Comore, quelques petits édifices coniques et diverses taches à haute réflectivité ont été identifiés (Figure 10a).

Contrairement aux autres iles de l'Archipel des Comores, les pentes de Mayotte (à l'exception de la pente orientale) ont une bathymétrie relativement lisse et un aspect ondulé [Audru et al. 2006; Tzevahirtzian et al. 2021; figures 4 et 11bis]. Il n'y a pas d'importants dépôts volcanoclastiques, et seul un glissement de terrain sous-marin superficiel ne dépassant pas 20 m est apparent au pied du flanc ouest (figure 11a,b). Dans cette zone, les caractéristiques de réflectivité les plus fortes correspondent principalement aux canyons et à quelques petits monts sous-marins isolés non recouverts de sédiments (figure 11c,d). Les profils sismiques in-diquent que les reliefs lisses et ondulées correspondent à des dépôts de sédiments (figure 11e,f). L'unité sédimentaire recouvrant le socle acoustique au large de Mayotte peut atteindre des épaisseurs de ~0,5 s TWT (environ 500 m en utilisant 2000 m·s-1 de vitesse) et couvre souvent des édifices volcaniques. Sur le versant ouest de





FIGURE 10 – Cartes bathymétriques (à gauche) et de rétrodiffusion (à droite) (a) du versant sud de l'île Grande-Comore et (b) du versant ouest du banc Cordelière. Le point (b) montre également la bathymétrie détaillée d'un édifice volcanique conique (C) avec une coulée de lave (Lf). Lf0, coulée de lave recouvert par une fine couche de sédiments ( réflectivité relativement faible) ; autres symboles : idem figure 5.

Mayotte, trois monts sous-marins coniques présentent un alignement N160°E (Figure 11a,c,d). En créant une barrière au transport des sédiments sur le versant ouest, ces monts sous-marins contrôlent potentiellement la forme d'un canyon sous-marin. Un plus grand nombre de monts sous-marins coniques sur le versant nord de Mayotte se trouvent dans un couloir N130°E entre la chaîne volcanique Safari et le volcan Fani Maoré, en accord avec les observations précédentes [Audru et al. 2006; Famin et al. 2020; Tzevahirtzian et al. 2021].

Sur les flancs du banc Zélée, les échantillons du dragage SMR1 sont des roches volcaniques [Figure 3; Thinon et al. 2020b]. Dans la plaine abyssale au nord du banc Zélée-Geyser, on observe des plis forcés en forme de



FIGURE 11 – (a) Carte bathymétrique ombrée du versant ouest de Mayotte avec localisation de la ligne sismique MARO21R105 (ligne noire). Un ensemble d'édifices volcaniques (C) alignés NO–SE délimite le bord ouest d'un grand canyon. (b) Zoom de (a) montrant un glissement au pied de la pente (3544-3521 m de profondeur). (c) Zoom de (a) montrant l'alignement N160°E de de l'ensemble des édifices volcaniques. (d) Carte de réflectivité de la zone en (c). (e) Interprétation du profil sismique 48-traces MARO21R105 (f), orienté EO (localisation en (a))

dôme de 0,2 s TWTT sur les profils sismiques (c'est-à-dire ~200 m avec une vitesse de 2000 m·s-1; Figure 7d). Cependant, ils n'ont pas d'expression superficielle en raison de l'épaisse couverture sédimentaire (0,15 à 0,4 s TWTT), qui est plus épaisse que la couverture sédimentaire en onlap sur les plis forcés en forme de dôme dans les provinces de Mwezi (quasi-inexistante) et de N'Droundé (max. 0,1 s TWTT). Des plis forcés en forme de dôme faillés existent également à l'est de Mayotte près du volcan Fani Maoré [Figure 4; Masquelet et al. 2022; Paquet et al. 2019; Rolandone et al. 2022].

À l'est de l'archipel des Comores, nous avons identifié des indices de volcanisme près de la marge continentale de Madagascar. Un petit mont sous-marin conique et un patch de haute réflectivité de 85 km2 avec des faciès en forme de lobe et rugueux ont été identifiés au pied du versant ouest du banc Cordelière (figure 10b). Leur morphologie et leur réflectivité suggèrent qu'il s'agit de structures volcaniques récentes, en accord avec les indices de volcanisme suggérées par l'échantillonnage par dragage dans cette région [Daniel et al. 1972].

# 4.3. Répartition des structures volcaniques et tectoniques dans l'archipel

Les grandes provinces volcaniques de N'Droundé et de Mwezi dans la plaine abyssale de Somalie, ainsi que les quatre îles Comores et les principales chaînes volcaniques du fond marin qui les entourent, constituent un corridor volcanique de 600 km de long et 200 km de large (figure 4). La cartographie basée sur les données de la campagne SISMAORE montre sur le fond marin la présence d'au moins 2200 édifices volcaniques récents et des coulées de lave, couvrant une superficie d'environ 5300 km2 (environ 2500 km2 de cônes et de rides et environ 2800 km2 de coulées de lave), ainsi que des plis forcés en forme de dôme sur le fond marin avec une superficie supérieure à 972 km2 dans tout l'archipel des Comores.

À l'extrémité ouest de l'archipel des Comores, les caractéristiques volcaniques sont réparties principalement le long d'une direction N160°E (N'Droundé, Grande-Comore, Domoni). A l'est de Mohéli et d'Anjouan, le volcanisme se répartit principalement selon une direction N130°E (Mwezi, Jumelles, Safari, EMVC). La topographie de la province de Mwezi et des deux chaînes volcaniques les plus septentrionales de la province de N'Droundé est moins importante que celle des chaînes volcaniques les plus élevées (Jumelles, Domoni, Chistwani, EMVC). Les champs volcaniques de Mwezi et N'Droundé peuvent donc être des chaînes volcaniques naissantes, plus jeunes que les chaînes majeures et polyphasées ailleurs dans le couloir.

Les failles identifiées dans la plaine abyssale du bassin de Somalie et à l'est de Mayotte présentent deux orientations principales. Les failles d'orientation N130°E se trouvent principalement dans la province de Mwezi, à l'est de Mayotte, et dans la chaîne volcanique Safari, et les failles d'orientation N160°E se trouvent principalement dans la province de N'Droundé, dans la chaîne volcanique Domoni et sur le versant ouest de Mayotte (Figure 4). Des failles d'orientation Nord-Sud à NNE–SSO existent dans la partie nord de la province de Mwezi. Ces ensembles de failles et de structures volcaniques, tous deux trop récents pour être recouverts de sédiments, semblent être contemporains car ils se recoupent dans de nombreux cas. Certaines des failles coupent la surface des plis forcés en forme de dôme ou relient deux structures majeures (par exemple, la faille Lf1 dans la figure 5e, figure supplémentaire S2). Ils peuvent former des systèmes de graben (par exemple, figures 5d, 7a2 et 7a4) ou des failles de segments décalés (par exemple, figure 6c,d). La plupart des failles montrent des offsets sub-verticaux atteignant 20 m, souvent avec une composante normale (Figure 7, Figure supplémentaire S2). Des mouvements décrochants pourraient exister, mais ils ne sont pas identifiables sur les profils sismiques.

Le flanc Est de la chaîne volcanique du Chistwani contient trois alignements d'édifices volcaniques et de rides avec des orientations ENE–OSO (N60°E à N90°E) (Figure 9). Certains escarpements à regard vers l'est sont présents. Ces linéaments sont disposés en échelon, comme s'ils reflétaient l'influence d'un mouvement dextre.

# 5. Discussion

Nos interprétations des cartes bathymétriques et de rétrodiffusion et des profils sismiques ont révélé une distribution régionale plus étendue des déformations volcaniques et tectoniques récentes qui nous permet de

proposer un contexte géodynamique pour l'archipel des Comores et de répondre aux questions sur le rôle de l'héritage structural (Figure 12).

# 5.1. Événements tectono-volcanisme dans l'archipel des Comores

Les structures volcaniques et tectoniques de la plaine abyssale reposent sur une couverture sédimentaire d'environ 3 km d'épaisseur (figures 7 et 11), en accord avec les auteurs précédents [Coffin et al. 1986; Leroux et al. 2020; Masquelet et al. 2022].

Dans la province de Mwezi (figures 4 et 5), la quasi-absence de sédiments sur les coulées de lave, les édifices volcaniques, les plis forcés et les failles suggère que l'activité volcano-tectonique, bien que non datée, est très récente. La haute réflectivité des structures du fond marin est similaire à celle des coulées de lave de l'éruption du volcan Fani Maoré 2018–2021 [Deplus et al. 2019; Feuillet et al. 2021]. De plus, la présence de popping rocks (drague SMR5) dans la province de Mwezi (figure supplémentaire S1) implique que la durée de séjour de ces basaltes sur le fond marin a été trop court pour permettre un dégazage complet. Les preuves concordent avec une très jeune activité volcanique dans la province de Mwezi. Nous proposons que les affleurements frais et les structures du fond marin représentent une activité volcanique et tectonique similaire récente dans tout l'archipel des Comores, y compris dans la province de N'Droundé, sur le versant de Grand-Comore, dans la chaîne volcanique Safari, au pied de la chaîne volcanique des Jumelles et sur le banc Cordelière (comme indiqué en violet sur les figures 4 et 12). Cependant, aucune éruption volcanique ou activité d'émissions actuelles de fluides n'était apparente dans les données acoustiques de la colonne d'eau de la campagne SISMAORE, sauf à l'est de Mayotte [bulletin REVOSIMA 2021; Thinon et al. 2020a].

Il y a plus de coulées de lave et de plis forcés en forme de dôme visibles sur le fond marin dans la province de Mwezi que dans la province de N'Droundé. Cette différence pourrait être due à des événements magmatiques d'intensités ou d'âges différents. Cependant, dans la province de N'Droundé, de nombreux plis forcés en forme de dôme et des coulées de lave sont recouverts de dépôts sédimentaires ou d'autres produits volcaniques jusqu'à 100 m (0,1 s TWTT en utilisant une vitesse de 2000 m·s-1) (figure 7c). Cette province reçoit un approvisionnement abondant en sédiments provenant de l'érosion par les vagues et des processus hydrodynamiques côtiers à Grande-Comore, tandis que la province de Mwezi est plus éloignée des sources de sédiments.

Au nord des bancs de Zélée-Geyser, une couverture sédimentaire importante recouvre les plis forcés en forme de dôme (0,15-0,4 s TWTT ou 100–400 m en utilisant 2000 m·s-1 de vitesse, Figure 7d), masquant ainsi la déformation induite par les intrusions magmatiques. Même si les taux de sédimentation diffèrent entre les deux zones, ces plis forcés semblent être plus anciens que ceux de la province de Mwezi, ce qui perturbe le fond marin. Cette différence est cohérente avec l'histoire magmatique à long terme du nord du Canal de Mozambique [Michon 2016], et avec la mise en place des bancs Zélée-Geyser, qui sont plus anciens que les îles Comores à l'ouest [Leroux et al. 2020]. Nous suggérons que les provinces de Mwezi et N'Droundé se composent principalement de cônes volcaniques monogénétiques et de coulées de lave, alors que les chaînes volcaniques sous-marines (Jumelles, Chistwani et Domoni) et les bancs de Zelée-Geyser sont le produit d'une évolution complexe et s'apparentent à des structures constructives polyphasiques telles que l'EVCM [Feuillet et al. 2021; Masquelet et al. 2022] ou des îles telles que Mayotte [par exemple, Nehlig et al. 2013]. Sur la base de nos comparaisons des caractéristiques topographiques et des signatures de rétrodiffusion, nous proposons que la plupart des structures volcaniques et tectoniques dans les provinces de Mwezi et N'Droundé sont plus jeunes que celles des chaînes volcaniques et des bancs de Zelée-Geyser.

Les preuves d'une activité volcanique récente étendue sur les chaînes volcaniques sous-marines et les îles (couleurs violettes sur la figure 4) suggèrent l'apparition de multiples événements volcaniques dans tout l'archipel des Comores. Les structures volcaniques identifiées sur le banc Cordelière (édifices coniques et coulées de lave; Figure 10b) semblent être le produit d'événements éruptifs récents de par leur morphologie et leur forte réflectivité, plus récents que ceux des îles Glorieuses [Crétacé supérieur selon Leroux et al. 2020]. Un modèle de phases multiples séparées par des périodes de quiescence serait similaire à celui de Mayotte,



FIGURE 12 – (a) Contexte géologique régional de l'archipel des Comores, incluant la répartition du volcanisme et de la tectonique récents identifiés à partir de cette étude et de la limite diffuse et naissante des plaques de Somalie-Lwandle. Voir la légende à la figure 1. b) Interprétation géodynamique des structures tectoniques et volcaniques récentes et de la fabrique crustale fossile Mésozoïque de la zone d'étude. Sont montrés les failles et les linéaments majeurs de cette étude ainsi que les fentes de tension de cette étude (Tf4) et d'après Famin et al. [2020] et Feuillet et al. [2021] (Tf1, Tf2, Tf3). Les emplacements, les mécanismes au foyer et les dates des tremblements de terre (jusqu'à Mw 5) proviennent de Bertil et al. [2021] et les références et la structuration crustale préexistante, dérivés de données magnétiques, proviennent de Davis et al. [2016]. (c) Cadre tectonique régional entre l'EARS et Madagascar. K, bassin de Kerimbas; A, bassin d'Ambilobe. Des lignes pointillées grises marquent la limite diffuse et immature entre les plaques de Somalie et Lwandle.

où l'activité volcanique s'est produite entre 10,6 et 1,9 Ma, puis a repris pendant le Pléistocène [Bachèlery et al. 2016a; Michon 2016; Pelleter et al. 2014].

Ces failles et structures volcaniques semblent être contemporaines car elles se recoupent dans de nombreux cas, mais sont trop récentes pour être recouvertes de sédiments. Certaines des failles se forment et se développent en réponse à des champs de stress locaux causés par des intrusions magmatiques et des éruptions [voir les sections 4.1 et 4.2; Figure 7; Montanari et al. 2017]. Cependant, les grandes orientations des failles (N130°E et N160°E à N–S) et l'alignement des monts sous-marins dans les provinces de Mwezi et de N'Droundé sont cohérents avec le champ de stress régional. Lors de l'éruption en cours au large de Mayotte, le magma semble remonter à travers la structure lithosphérique orientée NO–SE, conformément au champ de contrainte régional [Berthod et al. 2021b; Feuillet et al. 2021; Lemoine et al. 2020].

#### 5.2. Répartition spatiale de la déformation et contexte cinématique actuel

À partir de la distribution des structures volcaniques et tectoniques récentes, nous avons identifié des événements géologiquement récents dans tout l'archipel des Comores (Figure 12a), y compris la province de Mwezi (N130°E), la province de N'Droundé (N160°E), la chaîne volcanique Safari (N130°E) et la chaîne volcanique Domoni (N160°E). La figure 12a montre des groupes de fentes de tension (Tf1-Tf4) correspondant aux principales provinces tectono-volcaniques et chaînes volcaniques identifiées à partir des données SISMAORE et d'études antérieures [Famin et al. 2020; Feuillet et al. 2021], ainsi que les failles et linéaments majeurs. Ces observations suggèrent la présence de fentes de tension majeures en échelon et de cisaillements secondaires de Riedel (Figure 12) dans les îles Comores, la chaîne volcanique de Jumelles, les bancs de Zélée-Geyser et au nord d'Anjouan. Feuillet et al. [2021] ont également interprété l'EVCM comme une fente de tension. Les caractéristiques avec des azimuts à peu près orthogonaux (ENE–OSO) dans l'archipel des Comores, telles que celles de la chaîne volcanique de Chistwani (figure 9), peuvent avoir leur origine dans des événements de diking avec des mouvements cisaillant dextres.

Le déplacement de l'orientation des principales fentes de tension de N160°E à l'ouest à N130°E à E–O à l'est suggère une segmentation de l'archipel (Figure 12). À l'extrémité ouest, les azimuts des principales structures volcaniques ont tendance à être parallèles aux branches offshore des EARS, comme les graben Kerimbas orienté N-S le long de la côte tanzanienne/mozambicaine [Franke et al. 2015; McGregor 2015; Mougenot et al. 1986; figures 1 et 12]. Pris dans son ensemble, la sismicité dans l'archipel des Comores dessine une zone de déformation assez étroite qui change de direction autour de Mayotte (Figure 12b). À l'est, la sismicité récente est répartie dans un corridor ENE–OSO (N80°E) de l'ouest des Jumelles jusqu'à Madagascar [en particulier à partir de 2018; Bertil et al. 2021], et à l'ouest elle est concentrée dans une direction NO-SE à l'ouest de Mayotte. La tendance N80°E du segment oriental est parallèle au bassin sédimentaire ENE-OSO Ambilobe du nord de Madagascar, d'âge Cénozoïque [Piqué et al. 1999; Roig et al. 2012 Les structures tectono-volcaniques observées sur les bancs de Zélée-Geyser sont orientées à peu près E–O. Le même changement d'orientation des structures tectono-volcaniques correspond à un changement de la configuration des tremblements de terre, qui sont relativement diffus à l'ouest, où les structures sont orientées de NNO-SSE à NO-SE, et moins diffus à l'est, où elles forment un couloir orienté N80°E et les structures tectono-volcaniques tendent à peu près E-O. Les quelques mécanismes au foyer disponibles supportent un régime de contrainte en transtension (Figure 12b). Le régime de contrainte actuel est cohérent avec une direction NE-SO de moindre contrainte (sigma 3) et une direction NO-SE de plus grande contrainte (sigma1), ce qui implique un modèle de déformation globale cisaillant dextre qui produit des fentes de tension en échelon parallèles à sigma 1 et perpendiculaires à sigma 3, en alignement avec les principales chaînes volcaniques. Le champ de contrainte en transtension favorise les dykes, comme en témoignent les récentes éruptions de Mayotte.

Les nouvelles données présentées dans cet article montrent que les structures volcaniques et tectoniques récentes observées sur le fond marin forment un couloir d'environ 200 km de large et 600 km de long qui comprend la plaine abyssale du Bassin de Somalie Sud et les îles de l'archipel des Comores de Grande-Comore à Madagascar (figures 4 et 12). Le volcanisme et les failles sont absents sur le fond marin dans le Bassin des

Comores au sud des îles de l'archipel des Comores. Notons que ce corridor tectono-volcanique ne correspond pas de près à la « large zone de déformation » proposée par Stamps et al. [2021] à partir de la modélisation GNSS, qui s'étend à 1000 km de l'archipel des Comores, y compris la moitié nord de la plaque Lwandle, et du Bassin des Comores. En effet, le réseau GNSS régional n'est pas configuré de manière optimale [Bousquet et al. 2020] pour contraindre clairement la cinématique régionale. Le corridor tectono-volcanique représenté à la figure 12 correspond davantage à la limite de la plaque Somalie-Lwandle précédemment proposée par des études antérieures [p. ex., Calais et al. 2006; Famin et al. 2020; Stamps et al. 2021

Dans ce corridor tectono-volcanique, aucun système de failles majeur n'affecte le fond marin comme ceux observés, par exemple, le long de la limite de la plaque atlantique NE-SO dans la région des Açores [Sanchez et al. 2019]. Les failles dans le couloir sont petites (moins de 10 km de long avec des projections verticales apparentes ne dépassant pas 20 m) et discontinues (figures 4 et 12). L'absence de grands tremblements de terre (M6+) et le fait que les plus grands événements rapportés sont associés à des événements volcaniques, tels que les éruptions de Karthala en 1918 à Grande-Comore [Bachèlery et al. 1995, 2016b] et l'éruption 2018–2021 au large de Mayotte, sont une preuve supplémentaire de l'absence de failles majeures dans l'archipel des Comores. Si une frontière de transformation dextre entre les plaques de Somalie et de Lwandle est présente dans l'archipel des Comores, la faible intensité des déformations suggère qu'elle est très immature ou naissante.

# 5.3. Relations entre les forces aux limites des plaques, le rôle de l'héritage et le magmatisme

La zone d'étude est le lieu des interactions entre la déformation aux limites des plaques et le magmatisme intense.

Nous proposons que les jeunes structures tectoniques et volcaniques identifiées dans cette étude marquent l'emplacement d'une frontière diffuse et immature entre les plaques Somalie et Lwandle entre les EARS et Madagascar (lignes en pointillées dans les figures 4 et 12). Un régime de contrainte de transtension dextre régional récent à actuel explique bien l'emplacement et l'orientation des structures volcaniques et tectoniques comme la province de Mwezi et la partie de l'EMVC associée au volcan actif Fani Maoré. Particulièrement à l'ouest de Mayotte, ces structures sont bien alignées avec la structuration crustale préexistante du bassin de Somalie, interprétée à partir de données magnétiques et de gravité comme les failles transformantes mésozoïques de Davis et al. [2016] et Phethean et al. [2016] (Figure 12a). Nous proposons que ces zones de fractures océaniques préexistantes jouent un rôle dans la distribution des structures du fond marin plus jeunes N–S à N160°E en agissant comme des zones de faiblesses, sujettes à la réactivation dans le champ de contrainte régional actuel (cisaillement dextre avec axe de tension NE-SO ou transtension), comme Sauter et al. [2018] l'ont établi dans le bassin de Somalie du nord-ouest. Les complexes volcaniques de l'archipel des Comores semblent être situés à des intersections entre des fentes de tension guidées par des zones de fracture préexistantes et des chaînes volcaniques orientées NE-SO situées presque parallèlement à la structuration lithosphérique mise en évidence par les anomalies magnétiques dans le bassin de Somalie méridional. Ces observations sont cohérentes avec une fabrication fossile réactivée qui guide l'ascension du magma et contrôle les sites de volcanisme sur le fond marin.

Cependant, la relation entre les jeunes structures du fond marin et le motif tectonique ancien est moins claire à l'est de la longitude 44,5°E, d'Anjouan à Madagascar. La tendance N160°E des anomalies de gravimétrie à l'air libre est modérée dans cette région. Les orientations N130°E et E–O des structures tectono-volcaniques dans la province de Mwezi, les chaînes volcaniques Jumelles et Safari, l'EVCM et les bancs Zélée-Geyser sont clairement obliques par rapport à l'orientation N–S à N160°E du motif structural fossile. Il se peut que les structures N130°E se soient formées en réponse au contexte géodynamique actuel d'une limite de plaque immature, indépendante de la structure lithosphérique héritée. Cependant, des études d'autres régions avec une lithosphère hétérogène et des contextes géodynamiques régionaux et locaux actifs, en particulier dans le bassin de Wharton dans l'océan Indien [Delescluse et Chamot-Rooke 2007; Deplus et al. 1998; Hananto et al. 2018; Stevens et al. 2020, et références y figurant] ont rapporté que les orientations des failles nouvelles et réactivées, et des structures profondes et superficielles, peuvent être différentes. Ils suggèrent également

que les déformations peu profondes peuvent être influencées à la fois par les structures préexistantes et les champs de contraintes locaux ou régionaux. Une forte influence d'une anomalie thermique du manteau ou d'une convection du manteau ne peut être exclue [Tsekhmistrenko et al. 2021]. Ainsi, la relation entre les déformations récentes du fond marin, la structuration fossile de la croûte océanique et la présence ou l'absence de croûte océanique sous l'archipel des Comores sera précisé par des travaux supplémentaires menés dans le cadre du projet ANR COYOTES [par exemple, Boymond et al. 2022; Masquelet et al. 2022; Rolandone et al. 2022; Thinon et al. 2020b].

# 6. Conclusions

La campagne SISMAORE a mis en lumière une zone jusqu'alors mal connue autour de l'archipel volcanique des Comores. Les données bathymétriques et de rétrodiffusion, les profils sismiques et les échantillons de dragages ont révélé la présence d'au moins 2200 édifices volcaniques et des coulées de lave sur le fond marin, dans la plaine abyssale, sur les chaînes volcaniques sous-marines et sur les pentes des îles de l'Archipel des Comores. D'autres structures nouvellement identifiées incluent des plis forcés en forme de dôme liés à des intrusions magmatiques (sills) dans l'épaisse couverture sédimentaire de la plaine abyssale. La majorité de ces structures sont situées dans deux grands champs volcaniques et tectoniques observés sur le fond marin de la plaine abyssale : la province de N'Droundé, au nord de Grande-Comore et la province de Mwezi, au nord d'Anjouan et de Mayotte. Des échantillons de roches basaltiques fraîches riches en gaz dragués dans la province de Mwezi suggèrent que l'activité volcanique, bien qu'elle ne soit pas encore datée, est très récente. Les îles de l'archipel des Comores, les principales chaînes volcaniques sous-marines et les provinces de N'Droundé et de Mwezi sont interprétées comme des fentes de tension associées à des événements de dyking, conformément au contexte régional actuel en transtension dextre. Bien que la distribution des structures tectoniques et volcaniques récentes (Holocène à Pléistocène) semble assez similaire à la structuration crustale préexistante dans la partie occidentale de l'archipel des Comores, le rôle de l'héritage est moins clair dans la partie orientale. La distribution de ces déformations récentes semble principalement compatible avec le contexte cinématique actuel, possiblement avec une influence de la structuration crustale préexistante et des hétérogénéités dans la lithosphère. Une forte influence d'une anomalie thermique du manteau ou d'une convection du manteau ne peut être exclue.

Les structures volcaniques et tectoniques récentes, ainsi que la sismicité régionale, sont réparties dans un corridor d'au moins 200 km de large, comprenant les îles de l'archipel des Comores et la plaine abyssale au nord, qui s'étend sur 600 km entre le Système du Rift Est-Africain et Madagascar. La distribution des structures volcaniques et tectoniques, et donc de l'orientation des fentes de tension majeures, varie entre les segments : les orientations d'ouest à l'Est varient de ~N–S, N160°E, N130°E à E–O. Les îles de l'archipel des Comores se localisent à la jonction entre les fentes de tension (N160°E et N130°E) et les linéaments ENE–OSO. Cette répartition régionale des structures récentes est cohérente avec la répartition de la sismicité dans l'archipel des Comores.

Nous interprétons le corridor tectono-volcanique de l'archipel des Comores comme un marqueur de la limite entre les plaques Somalie et Lwandle. Bien qu'il y ait des épisodes de volcanisme intense, la faible intensité et le style de déformation tendent à confirmer l'état très immature de cette limite de plaque en contexte cisaillant dextre.

# 7. Conflits d'intérêts

Les auteurs n'ont aucun conflit d'intérêts à déclarer.

# 8. Remerciements

La campagne SISMAORE a été principalement financée par la Flotte Océanographique Française et le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM). Nous remercions les capitaines P. Moimeaux et G. Ferrand

du R/V Pourquoi Pas? et ses équipages et techniciens notamment et l'équipe GENAVIR pour le traitement bathymétrique et le déploiement de la sismique. Merci au département régional du BRGM de Mayotte, à l'Ifremer, au REVOSIMA et à la Délégation interministérielle aux risques majeurs Outre-mer pour leur aide lors de la crise sanitaire COVID. Nous remercions également le Rectorat de Mayotte et deux de ses enseignants (J. Jacquot, P. Deparis) pour leur participation, le blog Mission Sismaoré (https://sismaore.ac-mayotte.fr/) et les élèves du primaire et du secondaire pour la richesse des échanges. Merci au laboratoire du BRGM pour l'analyse des gaz et à D. Bertil pour les discussions sur la sismicité régionale.

Cet article est une contribution des équipes COYOTES (COmores & maYotte : vOlcanisme, TEctonique et Sismicité) et SISMAORE. Ce document a bénéficié des travaux antérieurs de la communauté REVOSIMA. Nous remercions les reviewers pour pour leurs commentaires et leurs recommandations, qui nous ont aidé à améliorer considérablement la première version du manuscrit. Nous remercions également M. A. Alden pour les correction de l'anglais. Le traitement et l'analyse détaillée de ces données géophysiques et géologiques sont réalisés principalement dans le cadre du projet COYOTES (ANR-19-CE31-0018; https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE31-0018) financé par l'Agence Nationale de Recherche et le BRGM.

# Références

- Audru, J.-C., Guennoc, P., Thinon, I., and Abellard, O. (2006). Bathymay : La structure sous-marine de Mayotte révélée par l'imagerie multifaisceaux. *C. R. Géosci.*, 338, 1240–1249.
- Bachèlery, P., Ali, D. B., Desgrolard, F., Toutain, J. P., and Coudray, J. (1995). L'éruption phréatique du Karthala (Grande-Comore) en Juillet 1991. *C. R. Acad. Sci. Sér. 2. Sciences de la terre et des planètes*, 320(8), 691–698.
- Bachèlery, P. and Coudray, J. (1993). *Carte volcano-tectonique (1/50000e) de la Grande-Comore et notice explicative.* The French Embassy in Moroni, Comores, and The University of La Réunion, St. Denis de La Réunion.
- Bachèlery, P. and Hémond, C. (2016). Geochemical and petrological aspects of Karthala volcano. In *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean*, pages 367–384. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bachèlery, P., Lenat, J. F., Di Muro, A., and Michon, L. (2016a). *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean : Piton de la Fournaise and Karthala.* Springer, Berlin.
- Bachèlery, P., Morin, J., Villeneuve, N., Soulé, H., Nassor, H., and Ali, A. R. (2016b). Structure and eruptive history of Karthala volcano. In *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean*, pages 345–366. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Berthod, C., Médard, E., Bachèlery, P., Gurioli, L., Di Muro, A., Peltier, A., et al. (2021a). The 2018-ongoing Mayotte submarine eruption : Magma migration imaged by petrological monitoring. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 571, article no. 117085.
- Berthod, C., Médard, E., Di Muro, A., Hassen Ali, T., Gurioli, L., Chauvel, C., Komorowski, J.-C., et al. (2021b). Mantle xenolith-bearing phonolites and basanites feed the active volcanic ridge of Mayotte (Comoros archipelago, SW Indian Ocean). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 176(10), 1–24.
- Bertil, D., Mercury, N., Doubre, C., Lemoine, A., and Van der Woerd, J. (2021). The unexpected Mayotte, 2018– 2020 seismic sequence : a reappraisal of the regional seismicity of the Comoros. *C. R. Géosci.*, 353(S1), 211– 235.
- Bertil, D. and Regnoult, J. M. (1998). Seismotectonics of Madagascar. Tectonophysics, 294, 57-74.
- Bousquet, O., Lees, E., Durand, J., Peltier, A., Duret, A., Mekies, D., et al. (2020). Densification of the Ground-Based GNSS Observation Network in the Southwest Indian Ocean : Current Status, Perspectives, and Examples of Applications in Meteorology and Geodesy. *Front. Earth Sci.*, 8, article no. 566105.
- Boymond, P., Feuillet, N., Thinon, I., Scholtès, L., Leroy, S., Rusquet, A., Masquelet, C., and Jacques, E. (2022). Volcano-tectonic interactions within two recently discovered submarine volcanic fields : implication for geodynamics in the Comoros. In *EGU General Assembly 2022, Vienne, Talk*.
- Calais, E., Ebinger, C., Hartnady, C., and Nocquet, J. M. (2006). Kinematics of the east African rift from GPS and earthquake slip vector data. *Geol. Soc., Lond. Spec. Publ.*, 259(1), 9–22.

- Cesca, S., Letort, J., Razafindrakoto, H. N., Heimann, S., Rivalta, E., Isken, M. P., et al. (2020). Drainage of a deep magma reservoir near Mayotte inferred from seismicity and deformation. *Nat. Geosci.*, 13(1), 87–93.
- Chadwick Jr, W. W., Rubin, K. H., Merle, S. G., Bobbitt, A. M., Kwasnitschka, T., and Embley, R. W. (2019). Recent eruptions between, 2012 and, 2018 discovered at west mata submarine volcano (NE Lau Basin, SW Pacific) and characterised by new ship, AUV, and ROV data. *Front. Mar. Sci.*, 6, article no. 495.
- Clague, D. A., Paduan, J. B., Caress, D. W., Thomas, H., Chadwick Jr, W. W., and Merle, S. G. (2011). Volcanic morphology of west mata volcano, NE Lau Basin, based on high-resolution bathymetry and depth changes. *Geochem. Geophys. Geosystems*, 12(11), 1–21.
- Class, C., Goldstein, S. L., Stute, M., Kurz, M. D., and Schlosser, P. (2005). Grand Comore Island : a well-constrained "low 3He/4He" mantle plume. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233(3–4), 391–409.
- Coffin, M. F. and Rabinowitz, P. D. (1987). Reconstruction of Madagascar and Africa : evidence from the Davie Fracture Zone and Western Somali Basin. *J. Geophys. Res.*, 92(B9), 9385–9406.
- Coffin, M. F., Rabinowitz, P. D., and Houtz, R. E. (1986). Crustal structure in the western Somali Basin. *Geophys. J. Int.*, 86(2), 331–369.
- Counts, J. W., Jorry, S. J., Leroux, E., Miramontes, E., and Jouet, G. (2018). Sedimentation adjacent to atolls and volcano-cored carbonate platforms in the Mozambique Channel (SW Indian Ocean). *Mar. Geol.*, 404, 41–59.
- Courgeon, S., Bachélery, P., Jouet, G., Jorry, S. J., Bou, E., Boudagher-Fadel, M. K., Révillon, S., Camoin, G., and Poli, E. (2018). The offshore east African rift system : neo insights from the Sakalaves seamounts (Davie Ridge, SW Indian Ocean). *Terra Nova*, 30(5), 380–388.
- Daniel, J., Dupont, J., and Jouannic, C. (1972). Relations Madagascar-Archipel Des Comores (Nord-Est Du Canal De Mozambique) : Sur La Nature Volcanique Du Banc Du Leven. *C. R. Acad. Sci. Ser. D : Sci. Naturelles*, 274(12), 1784–1787.
- Davis, J. K., Lawver, L. A., Norton, I. O., and Gahagan, L. M. (2016). Neo Somalie basin magnetic anomalies and a plate model for the early Indian Ocean. *Gondwana Res.*, 34, 16–28.
- Debeuf, D. (2004). Etude de l'évolution volcano-structurale et magmatique de Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien) : approches structurale, petrographique, geochimique et geochronologique. PhD thesis, Université De La Réunion. Unpublished.
- Delescluse, M. and Chamot-Rooke, N. (2007). Instantaneous deformation and kinematics of the India–Australia Plate. *Geophys. J. Int.*, 168(2), 818–842.
- Deplus, C., Diament, M., Hébert, H., Bertrand, G., Dominguez, S., Dubois, J., et al. (1998). Direct evidence of active deformation in the eastern Indian oceanic plate. *Geology*, 26(2), 131–134.
- Deplus, C., Feuillet, N., Bachelery, P., Fouquet, Y., Jorry, S., et al. (2019). Early development and growth of a deep seafloor volcano : preliminary results from the MAYOBS Cruises. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, volume 2019, pages V43I–0227.
- Déprez, A., Doubre, C., Masson, F., and Ulrich, P. (2013). Seismic and aseismic deformation along the East African Rift System from a reanalysis of the GPS velocity field of Africa. *Geophys. J. Int.*, 193(3), 1353–1369.
- Deville, E., Marsset, T., Courgeon, S., Jatiault, R., Ponte, J. P., Thereau, E., Jouet, G., Jorry, S. J., and Droz, L. (2018). Active fault system across the oceanic lithosphere of the Mozambique channel : implications for the Nubia– Somalia southern plate boundary. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 502, 210–220.
- Dofal, A., Fontaine, F. R., Michon, L., Barruol, G., and Tkalčić, H. (2021). Nature of the crust beneath the islands of the Mozambique channel : constraints from receiver functions. *J. African Earth Sci.*, 184, article no. 104379.
- Eagles, G. and König, M. (2008). A model of plate kinematics in Gondwana breakup. *Geophys. J. Int.*, 173(2), 703–717.
- Famin, V., Michon, L., and Bourhane, A. (2020). The Comoros archipelago : a right lateral transform boundary between the Somalia and Lwandle plates. *Tectonophysics*, 789, article no. 228539.
- Feuillet, N., Jorry, S., Crawford, W., Deplus, C., Thinon, I., Jacques, E., Saurel, J.-M., et al. (2021). Birth of a large volcano offshore Mayotte through lithosphere-scale rifting. *Nat. Geosci.*, 14(10), 787–795.
- Flower, M. F. J. (1972). Petrology of volcanic rocks from Anjouan, Comores Archipelago. *Bull. Volcanol.*, 36(1), 238–250.

- Flower, M. F. J. and Strong, D. F. (1969). The significance of sandstone inclusions in lavas of the Comores Archipelago. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 7(1), 47–50.
- Foix, O., Aiken, C., Saurel, J. M., Feuillet, N., Jorry, S. J., Rinnert, E., and Thinon, I. (2021). Offshore Mayotte volcanic plumbing revealed by local passive tomography. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 420, article no. 107395.
- Fossum, K., Dypvik, H., Haid, M. H., Hudson, W. E., and van den Brink, M. (2021). Late Jurassic and early Cretaceous sedimentation in the Mandawa Basin, coastal Tanzania. *J. African Earth Sci.*, 174, article no. 104013.
- Franke, D., Jokat, W., Ladage, S., Stollhofen, H., Klimke, J., Lutz, R., and Schreckenberger, B. (2015). The offshore east African rift system : structural framework at the toe of a juvenile rift. *Tectonics*, 34(10), 2086–2104.
- Gaina, C., Van Hinsbergen, D. J. J., and Spakman, W. (2015). Tectonic interactions between India and Arabia since the Jurassic reconstructed from marine geophysics, ophiolite geology, and seismic tomography. *Tectonics*, 34, 875–906.
- Hananto, N., Boudarine, A., Carton, H., Singh, S. C., Avianto, P., Dyment, J., et al. (2018). Evidence of pervasive trans-tensional deformation in the northwestern Wharton Basin in the 2012 earthquakes rupture area. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 502, 174–186.
- International Seismological Centre (2021). International Seismograph Station Registry (IR). https://doi.org/10. 31905/EL3FQQ40.
- Jacques, E., Feuillet, N., Aiken, C., Lemoine, A., Crawford, W. C., Deplus, C., et al. (2019). The 2018–2019 Mayotte seismic crisis : evidence of an upper Mantle rifting event? In *AGU Fall Meeting Abstracts*, volume 2019, pages V43I–0221.
- Klimke, J. and Franke, D. (2016). Gondwana breakup : no evidence for a Davie fracture zone offshore northern Mozambique, Tanzania and Kenya. *Terra Nova*, 28(4), 233–244.
- Klimke, J., Franke, D., Gaedicke, C., Schreckenberger, B., Schnabel, M., Stollhofen, H., and Chaheire, M. (2016). How to identify oceanic crust-evidence for a complex break-up in the Mozambique channel, off east Africa. *Tectonophysics*, 693, 436–452.
- Kumar, P. C., Niyazi, Y., Eruteya, O. E., Moscariello, A., Warne, M., Ierodiaconou, D., and Sain, K. (2022). Anatomy of intrusion related forced fold in the offshore Otway Basin, SE Australia. *Mar. Pet. Geol.*, 141, article no. 105719.
- Kusky, T., Toraman, E., Raharimahefa, T., and Rasoazanamparany, C. (2010). Active tectonics of the Alaotra– Ankay Graben system, Madagascar : possible extension of Somalian–African diffusive plate boundary? *Gondwana Res.*, 18, 274–294.
- Lavayssière, A., Crawford, W. C., Saurel, J. M., Satriano, C., Feuillet, N., Jacques, E., and Komorowski, J. C. (2022). A new 1D-velocity model and absolute locations image the Mayotte seismo-volcanic region. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 421, article no. 107440.
- Le Gonidec, Y., Lamarche, G., and Wright, I. C. (2003). Inhomogeneous substrate analysis using EM300 backscatter imagery. *Mar. Geophys. Res.*, 24(3–4), 311–327.
- Leinweber, V. T. and Jokat, W. (2012). The Jurassic history of the Africa–Antarctica corridor—new constraints from magnetic data on the conjugate continental margins. *Tectonophysics*, 530, 87–101.
- Lemoine, A., Briole, P., Bertil, D., Roullé, A., Foumelis, M., Thinon, I., et al. (2020). The 2018–2019 seismovolcanic crisis east of Mayotte, Comoros islands : seismicity and ground deformation markers of an exceptional submarine eruption. *Geophys. J. Int.*, 223(1), 22–44.
- Leroux, E., Counts, J. W., Jorry, S. J., Jouet, G., Révillon, S., et al. (2020). Evolution of the Glorieuses seamount in the SW Indian Ocean and surrounding deep Somali Basin since the Cretaceous. *Mar. Geol.*, 427, article no. 106202.
- Mahanjane, E. S. (2014). The Davie fracture zone and adjacent basins in the offshore Mozambique margin—a neo insight for the hydrocarbon potential. *Mar. Pet. Geol.*, 57, 561–571.
- Masquelet, C., Leroy, S., Delescluse, M., Chamot-Rooke, N., Thinon, I., Lemoine, A., Franke, D., Watremez, L., Werner, P., and Sauter, D. (2022). The east-Mayotte new volcano in the Comoros archipelago : structure and timing of magmatic phases inferred from seismic reflection data. *C. R. Géosci.*, 354(S2), 65–79.

- McGregor, D. (2015). History of the development of the east African rift system : a series of interpreted maps through time. *J. African Earth Sci.*, 101, 232–252.
- Medialdea, T., Somoza, L., González, F. J., Vázquez, J. T., de Ignacio, C., Sumino, H., et al. (2017). Evidence of a modern deep-water magmatic hydrothermal system in the Canary Basin (eastern central Atlantic Ocean). *Geochem. Geophys. Geosystems*, 18(8), 3138–3164.
- Mercury, N., Doubre, C., Lemoine, A., Van Der Woerd, J., Bertil, D., Hoste-Colomer, R., and Battaglia, J. (2022). Onset of a submarine eruption east of Mayotte, Comoros archipelago : the first ten months seismicity of the seismo-volcanic sequence (2018–2019). *C. R. Géosci.*, 354(S2), 105–136.
- Michon, L. et al. (2016). The volcanism of the Comoros archipelago integrated at a regional scale. In Bachèlery, P. et al., editors, *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean*, pages 333–344. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Michon, L., Famin, V., and Quidelleur, X. (2022). Evolution of the east African rift system from trap-scale to plate-scale rifting. *Earth-Sci. Rev.*, 231, article no. 104089.
- Montaggioni, L. F. and Nougier, J. (1981). Les enclaves de roches détritiques dans les Volcans d'Anjouan (Archipel des Comores), Origine et interprétation dans le cadre de l'évolution du Canal de Mozambique. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7(6), 595–601.
- Montanari, D., Bonini, M., Corti, G., Agostini, A., and Del Ventisette, C. (2017). Forced folding above shallow magma intrusions : insights on supercritical fluid flow from analogue modelling. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 345, 67–80.
- Mougenot, D., Recq, M., Virlogeux, P., and Lepvrier, C. (1986). Seaward extension of the east African rift. *Nature*, 321(6070), 599–603.
- Mueller, C. O. and Jokat, W. (2019). The initial Gondwana break-up : a synthesis based on new potential field data of the Africa–Antarctica corridor. *Tectonophysics*, 750, 301–328.
- Nehlig, P., Lacquement, F., Bernard, J., Audru, J.-C., Caroff, M., et al. (2013). *Notice Explicative, Carte Géologique France (1/30 000), Feuille Mayotte (1179).* BRGM, Orléans. Carte géologique par Lacquement F., Nehlig P., Bernard J., 2013.
- Omosanya, K., Johansen, S., Eruteya, O. E., and Waldmann, N. (2017). Forced folding and complex overburden deformation associated with magmatic intrusion in the Vøring Basin, offshore Norway. *Tectonophysics*, 706–707, 14–34. ISSN 0040-1951.
- Paquet, F., Jorry, S., Deplus, C., Le Friant, A., Bernard, J., et al. (2019). The Mayotte seismo-volcanic crisis : characterising a reactivated volcanic ridge from the upper slope to the abyssal plain using multibeam bathymetry and backscatter data. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, volume 2019, pages V43I–0219.
- Pelleter, A. A., Caroff, M., Cordier, C., Bachèlery, P., Nehlig, P., Debeuf, D., and Arnaud, N. (2014). Melilite-bearing lavas in Mayotte (France) : an insight into the mantle source below the Comores. *Lithos*, 208, 281–297.
- Phethean, J. J., Kalnins, L. M., van Hunen, J., Biffi, P. G., Davies, R. J., and McCaffrey, K. J. (2016). Madagascar's escape from Africa : a high-resolution plate reconstruction for the western Somali Basin and implications for supercontinent dispersal. *Geochem. Geophys. Geosystems*, 17(12), 5036–5055.
- Piqué, A., Laville, E., Chotin, P., Chorowicz, J., Rakotondraompiana, S., and Thouin, C. (1999). L'extension à Madagascar du Néogène à l'Actuel : arguments structuraux et géophysiques. J. African Earth Sci., 28(4), 975– 983.
- Quidelleur, X., Michon, L., Famin, V., Geffray, M. C., Danišík, M., Gardiner, N., Rusquet, A., and Zakaria, M. G. (2022). Holocene volcanic activity in Anjouan Island (Comoros archipelago) revealed by new Cassignol-Gillot groundmass K–Ar and <sup>14</sup>C ages. *Quart. Geochronol.*, 67, article no. 101236.
- REVOSIMA (Mayotte Volcanological And Seismological Monitoring Network) (2019–2022). Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER (IFREMER), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Data collection of the Mayotte volcanological and seismological monitoring network (V.1.0). Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP).
- REVOSIMA newsletter (2021). Bulletin REVOSIMA n°25 (janvier 2021) de l'activité sismo-volcanique à Mayotte. IPGP, Université de Paris, OVPF, BRGM, Ifremer, CNRS, January, 6th, 2021. http://www.ipgp.fr/sites/default/

files/ipgp\_1er\_bulletin\_info\_sismo\_volcanique\_mayotte-cor.pdf.

Rinnert, E., Feuillet, N., Fouquet, Y., Jorry, S. J., Thinon, I., and Lebas, E. (2019). MD228/MAYOBS.

- Roach, P., Milsom, J., Toland, C., Matchette-Downes, C., Budden, C., Riaroh, D., and Houmadi, N. (2017). Neo evidence supports presence of continental crust beneath the Comoros. In *Pesgb/Hgs Africa Conference, August, 2017.*
- Roche, V., Leroy, S., Guillocheau, F., Revillon, S., Ruffet, G., Watremez, L., et al. (2021). The Limpopo Magma-rich transform margin, south Mozambique—2: implications for the Gondwana breakup. *Tectonics*, 40(12), article no. e2021TC006914.
- Roche, V. and Ringenbach, J.-C. (2022). The Davie fracture zone : a recorder of continents drifts and kinematic changes. *Tectonophysics*, 823, article no. 229188.
- Roig, J.-Y., Tucker, R. D., Peters, S. G., Delor, C., and Théveniaut, H. (2012). Carte géologique de la république de Madagascar à 1 / 1 000 000. Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar, 1 color sheet.
- Rolandone, F., Poort, J., Masquelet, C., Leroy, S., Thinon, I., Lemoine, A., and Paquet, F. (2022). Heat flow measurements in the northern Mozambique channel. *C. R. Géosci.*, 354(S2), 35–46.
- Sanchez, G., Merle, R., Hinschberger, F., Thinon, I., and Girardeau, J. (2019). Post-spreading deformation and associated magmatism along the Iberia–Morocco Atlantic margins : insight from submarine volcanoes of the Tore-Madeira Rise. *Mar. Geol.*, 407, 76–93.
- Saurel, J. M., Jacques, E., Aiken, C., Lemoine, A., Retailleau, L., Lavayssière, A., et al. (2022). Mayotte seismic crisis : building knowledge in near real-time by combining land and ocean-bottom seismometers, first results. *Geophys. J. Int.*, 228(2), 1281–1293.
- Sauter, D., Ringenbach, J. C., Cannat, M., Maurin, T., Manatschal, G., and Mcdermott, K. G. (2018). Intraplate deformation of oceanic crust in the west Somali basin : insights from long-offset reflection seismic data. *Tectonics*, 37, 588–603.
- Segoufin, J. and Patriat, P. (1980). Existence d'anomalies Mésozoïques dans le Bassin de Somalie. Implications Pour Les Relations Afrique–Antarctique–Madagascar. *C. R. Acad. Sci. Sér. IIa : Sciences De La Terre Et Des Planètes*, 291b, 85–88.
- Senkans, A., Leroy, S., d'Acremont, E., Castilla, R., and Despinois, F. (2019). Polyphase rifting and break-up of the central Mozambique margin. *Mar. Pet. Geol.*, 100, 412–433.
- Stamps, D. S., Kreemer, C., Fernandes, R., Rajaonarison, T. A., and Rambolamanana, G. (2021). Redefining east African rift system kinematics. *Geology*, 49(2), 150–155.
- Stamps, D. S., Saria, E., and Kreemer, C. (2018). Geodetic strain rate model for the east African rift system. *Sci. Rep.*, 8(1), article no. 732.
- Stevens, D. E., McNeill, L. C., Henstock, T. J., Delescluse, M., Chamot-Rooke, N., and Bull, J. M. (2020). A complete structural model and kinematic history for distributed deformation in the Wharton basin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 538, article no. 116218.
- Talwani, M. (1962). Gravity measurements on HMS Acheron in south Atlantic and Indian Oceans. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 73(9), 1171–1182.
- Thinon, I., Lemoine, A., Feuillet, N., Michon, L., Leroy, S., et al. (2020a). ANR COYOTES project (Comoros, maYotte : vOlcanism, TEctonics and Seismicity). In *AGU Fall Meeting Abstracts 2020-Online*, volume 2020, pages V040–0003.
- Thinon, I., Leroy, S., and Lemoine, A. (2020b). SISMAORE cruise, RV Pourquoi Pas?
- Tsekhmistrenko, M., Sigloch, K., Hosseini, K., and Barruol, G. (2021). A tree of Indo–African mantle plumes imaged by seismic tomography. *Nat. Geosci.*, 14(8), 612–619.
- Tzevahirtzian, A., Zaragosi, S., Bachèlery, P., Biscara, L., and Marchès, E. (2021). Submarine morphology of the Comoros volcanic archipelago. *Mar. Geol.*, 432, article no. 106383.
- Vormann, M., Franke, D., and Jokat, W. (2020). The crustal structure of the southern Davie Ridge offshore northern Mozambique—a wide-angle seismic and potential field study. *Tectonophysics*, 778, article no. 228370.
- Vormann, M. and Jokat, W. (2021). The crustal structure of the Kerimbas basin across the offshore branch of

the east African Rift System. Geophys. J. Int., 226(3), 2073-2102.

Weatherall, P., Marks, K. M., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., et al. (2015). A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth Space Sci.*, 2(8), 331–345.

Wessel, P., Sandwell, D. T., and Kim, S. S. (2010). The global seamount census. Oceanography, 23(1), 24-33.

- Wright, J. B. and McCurry, P. (1970). The significance of sandstone inclusions in lavas of the Comores Archipalago, M.F.J. Flower and D.F. Strong : (Earth Planet. Sci. Lett. 7 (1969) 47–50). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 8, 267–268.
- Zinke, J., Reijmer, J. J., Taviani, M., Dullo, W. C., and Thomassin, B. (2005). Facies and faunal assemblage changes in response to the Holocene transgression in the Lagoon of Mayotte (Comoro Archipelago, SW Indian Ocean). *Facies*, 50(3–4), 391–408.
- Zinke, J., Reijmer, J. J. G., Thomassin, B. A., Dullo, W. C., Grootes, P. M., and Erlenkeuser, H. (2003). Postglacial flooding history of Mayotte lagoon (Comoro archipelago, southwest Indian Ocean). *Mar. Geol.*, 194(3–4), 181–196.