



HAL
open science

L'éruption du Tajogaite (Cumbre Vieja) à La Palma, Canaries : de l'éruption volcanique à la crise territoriale

Tony Rey, Frédéric Leone, Thomas Candela, Stéphanie Defossez, Freddy Vinet, Fleurice Parat, Monique Gherardi, Lucile Medina, Franck Lavigne, Iliona Martin, et al.

► To cite this version:

Tony Rey, Frédéric Leone, Thomas Candela, Stéphanie Defossez, Freddy Vinet, et al.. L'éruption du Tajogaite (Cumbre Vieja) à La Palma, Canaries : de l'éruption volcanique à la crise territoriale. *EchoGéo*, 2023, 10.4000/echogeo.24450 . hal-04142271

HAL Id: hal-04142271

<https://hal.science/hal-04142271v1>

Submitted on 26 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'éruption du Tajogaite (Cumbre Vieja) à La Palma, Canaries : de l'éruption volcanique à la crise territoriale

Tony Rey, Frédéric Leone, Thomas Candela, Stéphanie Defossez, Freddy Vinet, Fleurice Parat, Monique Gherardi, Lucile Medina, Franck Lavigne, Iliona Martin et Zoé Guillet



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/echogeo/24450>

DOI : [10.4000/echogeo.24450](https://doi.org/10.4000/echogeo.24450)

ISSN : 1963-1197

Éditeur

Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information géographique (CNRS UMR 8586)

Référence électronique

Tony Rey, Frédéric Leone, Thomas Candela, Stéphanie Defossez, Freddy Vinet, Fleurice Parat, Monique Gherardi, Lucile Medina, Franck Lavigne, Iliona Martin et Zoé Guillet, « L'éruption du Tajogaite (Cumbre Vieja) à La Palma, Canaries : de l'éruption volcanique à la crise territoriale », *EchoGéo* [En ligne], Sur le Vif, mis en ligne le 20 juin 2023, consulté le 23 juin 2023. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/24450> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.24450>

Ce document a été généré automatiquement le 23 juin 2023.



Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International
- CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

L'éruption du Tajogaite (Cumbre Vieja) à La Palma, Canaries : de l'éruption volcanique à la crise territoriale

Tony Rey, Frédéric Leone, Thomas Candela, Stéphanie Defossez, Freddy Vinet, Fleurice Parat, Monique Gherardi, Lucile Medina, Franck Lavigne, Iliona Martin et Zoé Guillet

Les auteurs remercient les personnes rencontrées à La Palma pour leur disponibilité : Sergio Rodriguez, maire d'El Paso ; Marcos Lorenzo, maire de Tijarafe ; Gregorio Alonso, maire de Fuencaliente ; Francisco Paz, maire de San Andrés y Sauces ; Nieves Arroyo, conseillère en environnement, changement climatique et participation citoyenne au Cabildo ; Abigail Nova, traductrice pour l'équipe, ainsi que les sinistrés (palmeros et habitants) pour leur accueil et le temps consacré aux entretiens. Le projet, coordonné par Tony Rey, a été financé par le CNRS-IRD dans le cadre de l'AAP Risques naturels 2020.

Introduction

- 1 Le 19 septembre 2021, le volcan Cumbre Vieja, officiellement rebaptisé Tajogaite en juillet 2022, est entré en éruption sur l'île de La Palma (Canaries, Espagne). Pendant plus de 14 semaines, les éruptions stromboliennes ont alterné entre des phases effusives marquées par l'épanchement d'importantes coulées de lave basaltique et des panaches de grandes quantités de cendres et de gaz. Les épanchements de lave ont recouvert de vastes surfaces, dépassant 1 200 ha de terres. Les retombées de cendres, les gaz, les séismes et les coulées ont largement contraint la vie des habitants de La Palma et perturbé le trafic aérien dont dépend ce petit territoire agricole et touristique. Les bâtiments situés dans l'axe des coulées ont subi des dommages considérables et les retombées de cendres ont détruit les activités agricoles. Si le Tajogaite n'a causé aucun décès direct, cette éruption a cependant nécessité

l'évacuation temporaire (à l'intérieur de l'île) de près de 7 000 des 83 000 habitants que compte l'île. La fin de l'éruption a été officiellement annoncée le 25 décembre 2021.

- 2 Dès le début de l'éruption, une équipe scientifique pluridisciplinaire composée de géographes, géomaticiens et pétro-chimistes a engagé un suivi de la crise éruptive afin d'en comprendre les mécanismes, les effets et d'en tirer des enseignements, conformément aux pratiques du retour d'expérience (RETEX catnat) (Wybo, 2001 ; Van Wassenhove et Garbolino, 2008 ; Rey et Defosse, 2019). Le suivi à distance, facilité par les réseaux sociaux et la grande quantité de données fournies gratuitement par les opérateurs scientifiques et techniques, a complété les informations récoltées lors de deux missions de terrain : en plein cœur de l'éruption pour la première mission (novembre 2021), puis après l'éruption pour celle de février-mars 2022. Les travaux de terrain ont été conditionnés par l'accès aux sites en dehors du périmètre interdit et ont contraint les méthodes d'investigation courantes du RETEX. Le suivi de l'éruption, de la phase de crise à la post-crise, a constitué une opportunité unique pour analyser les principaux aléas volcaniques et les phénomènes associés, leurs impacts directs et indirects, et les modalités de la gestion de crise. Ces approches se sont appuyées sur des méthodes relevant de la géographie, de la géomorphologie et de la géomatique (De Bélizal et Lavigne, 2015 ; Rey et al., 2021 ; Paris et al., 2022). Elles ont mobilisé de multiples sources de données, une revue de presse quotidienne, la recherche de ressources photographiques et de vidéos sur le réseau social twitter, des relevés de terrain et une série d'entretiens semi-directifs (en partie filmés) conduits auprès de la population et de différents acteurs locaux de la gestion de crise.

Caractéristiques du volcanisme à La Palma et chronologie de la crise volcanique de 2021

- 3 Dans l'archipel des Canaries, l'île de La Palma représente la partie émergée (730 km²) d'un volcan-bouclier complexe dominant de 6,5 km les plaines abyssales environnantes (Paris, 2002). L'île s'est formée à partir d'un point chaud composite sur une plaque à déplacement lent (Carracedo et al., 1998). Depuis 2 Ma, les dépôts pyroclastiques participent à son extension et à sa configuration actuelle (le massif de Taburiente et la dorsale du Cumbre Vieja) marquées par de grandes instabilités gravitaires et l'érosion des formations volcaniques superficielles.
- 4 Entre le 19 septembre et le 25 décembre 2021, l'île de La Palma a connu une longue crise volcanique, menaçant plus de 80 000 personnes sur l'île. Le volcan Tajogaite est situé sur la dorsale sud de l'île, entre le massif de la Taburiente et le volcan Teneguía plus au sud (illustration 1). C'est un centre éruptif de type strombolien d'orientation nord-sud, de 200 mètres de haut depuis sa base, culminant à 1 130 m d'altitude. L'éruption s'est caractérisée par l'alternance des phases effusives, phréatomagmatiques et phréatiques au travers six bouches éruptives (Romero et al., 2022), la plupart actives en même temps (illustration 2). Les événements du sud-est ont été principalement associés aux panaches de téphra et de fontaines de lave, tandis que les événements du nord-ouest ont été principalement associés aux coulées de lave (Bonadonna et al., 2022). Le total des dépôts pyroclastiques et des laves dépasse 200 millions de m³ dont 45 millions de m³ de matériaux pyroclastiques émis dans l'atmosphère (Carracedo et al., 2022). La morphologie du cône et son ouverture ont influencé les directions des écoulements de

l'éruption de 2021 en menaçant directement les principales villes de Los Llanos de Aridane ¹(20 648 hab.), El Paso (7 745 hab.) et Tazacorte (4 558 hab.).

Illustration 1 - L'île de La Palma (Canaries), ses éruptions passées et le volcan Tajogaite

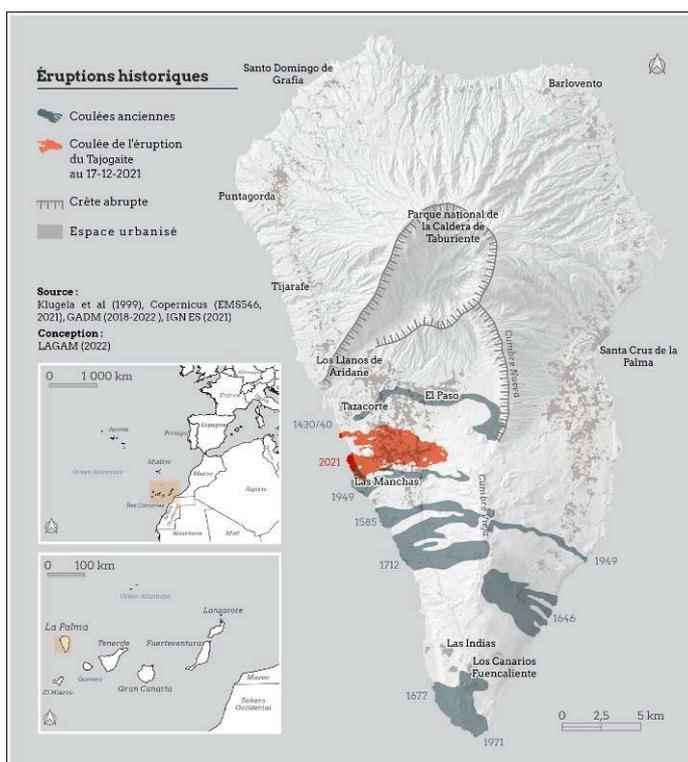


Illustration 2 - L'éruption et ses panaches de cendres vue depuis le nord (Empalme Tajuya, 05/11/21)



Cliché des auteurs, septembre 2021.

- 5 L'éruption du Tajogaite a duré 14 semaines. Elle représente une des plus longues phases éruptives historiquement observées sur l'île. Les éruptions historiques identifiées (ou qui ont fait l'objet d'observations visuelles), survenues en 1470, 1585, 1646, 1677, 1712, 1949 et 1971 (illustration 1), ont duré entre trois et 12 semaines (Hernandez-Pacheco et Valls, 1982 ; Romero-Ruiz, 1991). L'éruption de 2021 succède à deux éruptions

subaériennes, celle du San Juan en 1949 et du Teneguía en 1971 qui n'ont pas excédé cinq semaines (Hernandez-Pacheco *et al.*, 1983, Carracedo *et al.*, 2001 ; White et Schmincke, 1999 ; Klügel *et al.*, 1999). En 1971, les coulées basaltiques ont recouvert une surface terrestre de 13,5 ha et produit une plateforme maritime de 29 ha, créant ainsi de nouvelles terres accueillant aujourd'hui des cultures de bananes (Barker *et al.*, 2015). Les cendres observées dans la région du Cumbre Vieja, consécutives suite aux éruptions de 1949 et 1971, présentent des dépôts dont l'épaisseur est inférieure à 30 cm sur les crêtes, mais atteignant un à trois mètres dans les vallées et les petits bassins versants (White et Schmincke, 1999). Ces dépôts cendreux peuvent engendrer des glissements de terrain et des coulées boueuses lors des pluies. Cependant, le principal risque gravitaire identifié est celui d'un effondrement potentiel du flanc ouest du volcan, sur plusieurs kilomètres de long, dans la partie occidentale de l'île, ce qui pourrait engendrer un tsunami majeur (Ward et Day, 2001). Ce type d'événement induit, de forte magnitude et de faible fréquence, est récurrent dans l'archipel canarien (Paris, 2002).

Méthodes et données du RETEX

- 6 L'éruption du Tajogaite (19/09-25/12/2021) a émis des coulées de lave et d'importants panaches de cendres et de gaz induisant des risques syn-éruptifs conséquents et produisant une activité sismique continue. Afin d'estimer la distribution et l'effet des retombées aériennes lors des explosions, nous avons mesuré les épaisseurs cumulées de cendre sur l'ensemble de l'île au 05/11/2021, dans des sites non ou très faiblement remaniés (149 points exploitables). Ces mesures sont minimales du fait de la possible mobilisation des cendres par la pluie, le vent ou les activités humaines (déblaiement), et les dépôts à venir (éruption en cours). Les données acquises *in situ* ont été complétées au sein du périmètre inaccessible (parfois plusieurs mètres d'épaisseur) au moyen d'autres sources d'information tels que les témoignages d'habitants et les photographies ou vidéos en ligne. À partir des 149 points de mesures exploitables, nous avons manuellement tracé les limites de chaque isopaque, comme l'illustre la cartographie inédite des isopaques de cendres à l'échelle de l'île.
- 7 Les enveloppes modélisées (MOCAGE-accident dispersion model) du panache éruptif à différentes dates ont été fournies par le *Toulouse Volcanic Ash Advisory Centre* de Météo-France en charge de la surveillance atmosphérique de cette zone de trafic aérien². Par ailleurs, les cendres ont été échantillonnées et analysées d'un point de vue sédimentologique et pétro-chimique (réalisation de lames minces).
- 8 Les enveloppes des coulées de lave ont pu être intégrées grâce à l'imagerie spatiale et les produits SIG du Copernicus Emergency Management Service / EMSR546 (55 extensions de la coulée)³. Le degré d'endommagement des serres agricoles (trouée, effondrée, ensevelie sous la coulée) a été obtenue par photo-interprétation des images Pléiades acquises gratuitement (28/01/2021, 26/09/2021, 02/11/2021, 14/01/2022), puis retraitées (50 cm de résolution), et des vérifications du terrain. La sismicité a été extraite du site de l'Institut géographique national d'Espagne⁴. Le travail de cartographie a pu être facilité par l'accès gratuit à de nombreux référentiels topographiques et thématiques fournis gratuitement par le gouvernement espagnol et des Canaries.
- 9 Enfin, l'analyse de la presse et de la documentation, le recueil des témoignages auprès de la population et des entretiens auprès des autorités et populations ont documenté

une analyse critique de la planification de gestion de crise au regard du déroulement de la crise. L'objectif était, au-delà du bilan des impacts socio-économiques de la crise volcanique, de proposer un premier bilan des forces et faiblesses de la planification et des capacités de réponse de l'île face une crise volcanique majeure. Au total, 27 entretiens ont été menés en face-à-face par six enquêteurs français et hispanophones. Ils se sont déroulés en espagnol auprès des sinistrés rencontrés dans la zone affectée par les retombées de cendres (10 personnes), des autorités locales (maires de quatre communes et la vice-présidente du Cabildo insular) ainsi que des interlocuteurs (huit) liés au secteur agricole (agriculteurs, coopérative, agence agraire) ou au domaine de l'eau (agence de gestion de l'eau).

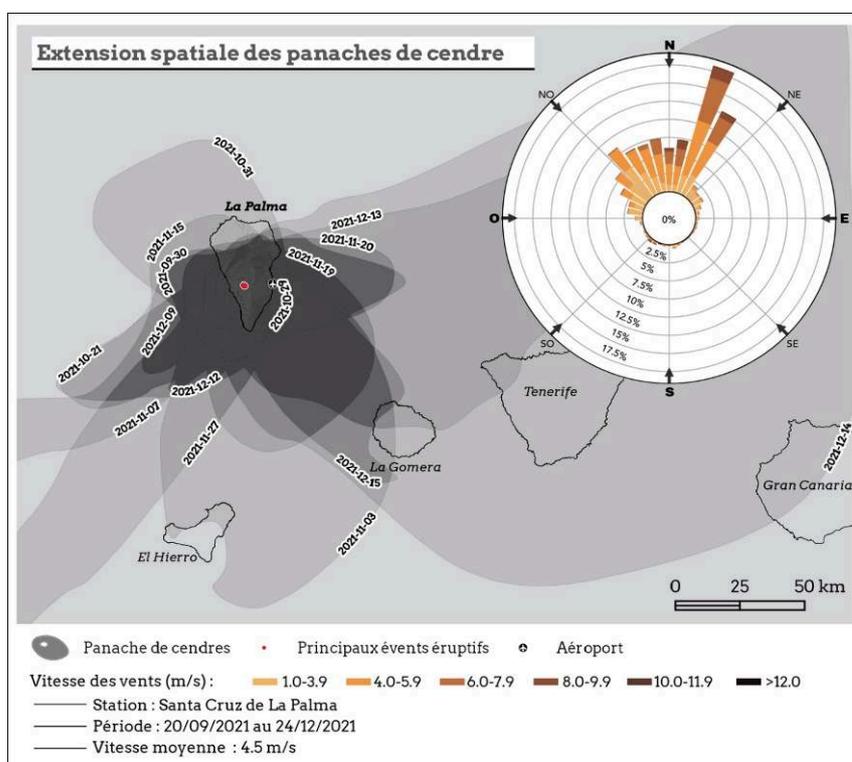
Les phénomènes éruptifs

- 10 L'éruption du Tajogaite s'est caractérisée par des séismes précurseurs modérés, suivis de panaches effusifs avec de grandes quantités de cendres et de gaz, puis des écoulements de lave sur le flanc ouest de l'île.

Un essaim sismique éloigné des événements actifs

- 11 Les séismes ont été continuellement présents tout au long des phases éruptives. Les magnitudes ont été comprises entre 3 pour les séismes de surface (7-15 km) et 5 pour les séismes profonds (30-40 km). La fréquence était relativement élevée, avec une moyenne de 93 séismes par jour durant l'éruption et un pic le 30 novembre 2021 avec 376 séismes enregistrés (illustration 3). Les premières grandes secousses se sont produites le 12 septembre 2021. Sept jours plus tard, le 19 septembre 2021, le volcan est entré en éruption. Toutefois, le centre éruptif se situe à environ 5 km au sud-est de l'essaim sismique. Ce décalage spatial et les caractéristiques hybrides des éruptions (Bonadonna et al., 2022) témoignent d'un système d'alimentation superficiel complexe de l'édifice volcanique et ont rendu difficile l'anticipation et la gestion de crise.

Illustration 4 - Quelques extensions des panaches éruptifs durant la crise



Source : IGME (2021), VAAC / Météo-France (2021), IEM (2021) - Conception : LAGAM, 2021.

Illustration 5 - Les retombées de cendres sur la route reliant San Nicolas à Tacande à environ 1,5 km du centre éruptif

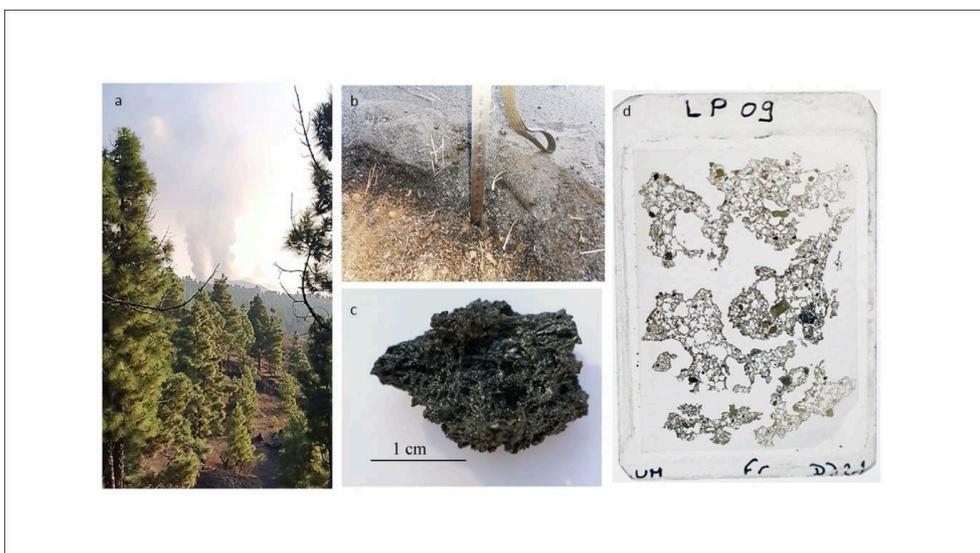


Sources : Google Street View (à gauche) ; cliché des auteurs, 2021 (à droite).

Caractéristiques des téphras

- 13 Les téphras échantillonnés se situent sur le flanc nord de la Montaña de Enrique située à moins de trois kilomètres au nord-est du centre éruptif (illustration 6a). À cette distance du volcan, l'épaisseur des dépôts volcaniques décroît et n'excède pas les dix centimètres. Les dépôts volcaniques présentés dans l'illustration 6.b reposent sur une litière composée d'écorces et d'épines de pins des Canaries, qui ne présentent pas de signes de calcination au moment du contact avec les téphras. La base du dépôt est caractérisée par une couche de scories et de lapillis grossiers (taille ~3 cm), de couleur brun-noir, à texture vitreuse, très vacuolaire, à phénocristaux de pyroxènes et amphiboles. Ce niveau correspond aux dépôts les plus grossiers de l'éruption, il a été retrouvé sur plusieurs sites, en zone distale, dans un rayon de 5 km et identifié dans la zone proximale du volcan (~1 km au sud-ouest des événements) mais présentant une épaisseur de 55 cm (Bonadonna *et al.*, 2022). Ce dépôt grossier est recouvert par des niveaux plus fins, où alternent des lits de lapillis, de couleur gris foncé, homométriques et millimétriques et des lits de cendres (verre basaltique principalement), de couleur gris clair, qui attestent d'un dynamisme important et continu (illustrations 6b et 6c). La granulométrie des téphras est à dominante fine car selon les analyses de Mata Campo *et al.* (2022), portant sur 30 échantillons, la fraction majoritaire est comprise entre 125 et 500 μm pour 50 % des échantillons, la fraction supérieure à 250 μm représentant plus de 33 % des échantillons.
- 14 L'étude des lames minces indique que le magma émis lors de l'éruption est un magma alcalin riche en sodium (présence de pyroxène calcique-sodique) de type basanite, et la présence d'eau est marquée par la cristallisation des amphiboles, ce qui est d'une part analogue aux données de Carracedo *et al.* (2022) et d'autre part souligne que la composition minéralogique du magma éjectée en 2021 est proche des éruptions historiques à La Palma (Carracedo *et al.*, 2022). Les cendres sont des basanites (magma alcalin), leur composition n'a pas changé lors de l'éruption (illustration 6d). Quant à l'amphibole et la vacuole, leur présence indique respectivement la présence d'eau dans le magma et la présence de gaz exsolvé⁵. Ces données sédimentaires et minéralogiques participent à la compréhension de l'éruption du Tajogaite et indirectement à l'évaluation de ces effets (menaces pour la santé, pollution des eaux et des sols, danger pour l'aviation, facteurs de prédisposition aux lahars).

Illustration 6 - Analyse de dépôts volcaniques situés à moins de trois kilomètres au nord-est du Tajogaite (19 septembre- 5 novembre 2021)



a : Site d'échantillonnage ;
 b : Dépôts de téphras accumulés lors de l'éruption ;
 c : Scories émises lors de l'éruption ;
 d : Lame mince d'une scorie vacuolaire riche en amphibole et pyroxène (largeur de la photo: 2,5 cm)
 Clichés des auteurs, 2021.

Des barrancos recouverts de cendres

- 15 La crise éruptive terminée, les cendres accumulées sur les versants et au fond des barrancos⁶ sont susceptibles d'être mobilisées par de fortes pluies. En tenant compte des isopaques et des surfaces recouvertes, nous avons estimé les volumes minimums de cendres susceptibles d'être mobilisés par les pluies dans les barrancos. Le bassin versant d'Angustias est situé au nord du centre éruptif, à l'écart des retombées de cendres massives. Si bien que malgré la taille du bassin (plus de 55 km²), les volumes de cendres mobilisables sont estimés à environ 93600 m³ (illustration 7). Le bassin de Tenisque, également très vaste (42 km²), est constitué de nombreux barrancos recouverts de cendres, susceptibles de mobiliser plus de 228 000 m³ de cendres. Enfin, le bassin de Tamanca, de taille modeste (760 000 m²), est situé au sud du centre éruptif. Son impluvium qui se positionne dans l'axe principal des retombées de cendres a piégé une grande quantité de cendres dont le volume minimal est estimé à 952 650 m³ (illustration 8). Il est difficile de proposer une valeur seuil de déclenchement étant donné les nombreux facteurs susceptibles d'influencer le déclenchement de lahars tels que la densité des cendres, les pentes, l'orientation des versants... La mobilisation des cendres nécessitera des précipitations suffisamment intenses pour déclencher un lahar. Cependant, si l'on se réfère aux dernières inondations aux Canaries (18/09/2022), des précipitations de 25 mm en un peu plus de 5 minutes ont suffi pour déclencher des crues torrentielles à Telde situés sur l'île de Gran Canaria⁷. Par contre, le passage du cyclone Hermine sur l'île de La Palma, quelques jours plus tard (25/09/2022) et malgré un record de précipitations de 65,8 mm en 24 heures, et un maximum de 14,8 mm en 60 minutes (Données AEMet : Agencia Estatal de Meteorología, station Aéroport), les pluies n'ont pas suffi à provoquer une crue des barrancos. Plus que la durée, c'est l'intensité des pluies qui est fondamentale dans le déclenchement d'une crue de

barrancos, et plus encore pour une coulée de boue. Enfin, si l'on tient compte de la variabilité interannuelle des précipitations à La Palma, les mois les plus propices à la mobilisation des cendres seraient en novembre et décembre mais de fortes pluies peuvent se produire jusqu'au mois de mars. Face à cet aléa, plusieurs villes sont ainsi directement menacées : Puerto de Tazacorte, Los Llanos de Aridane, Las Manchas et Puerto Naos.

Illustration 7 - Estimation *a minima* des volumes de cendres déposés dans les bassins versants de Angustias et Tenisque

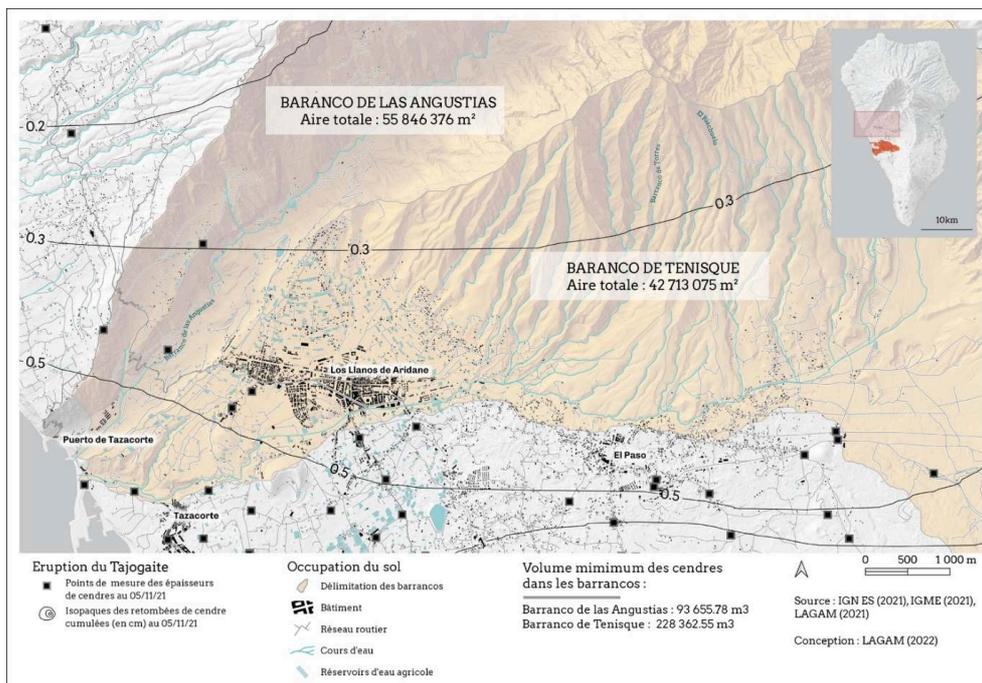
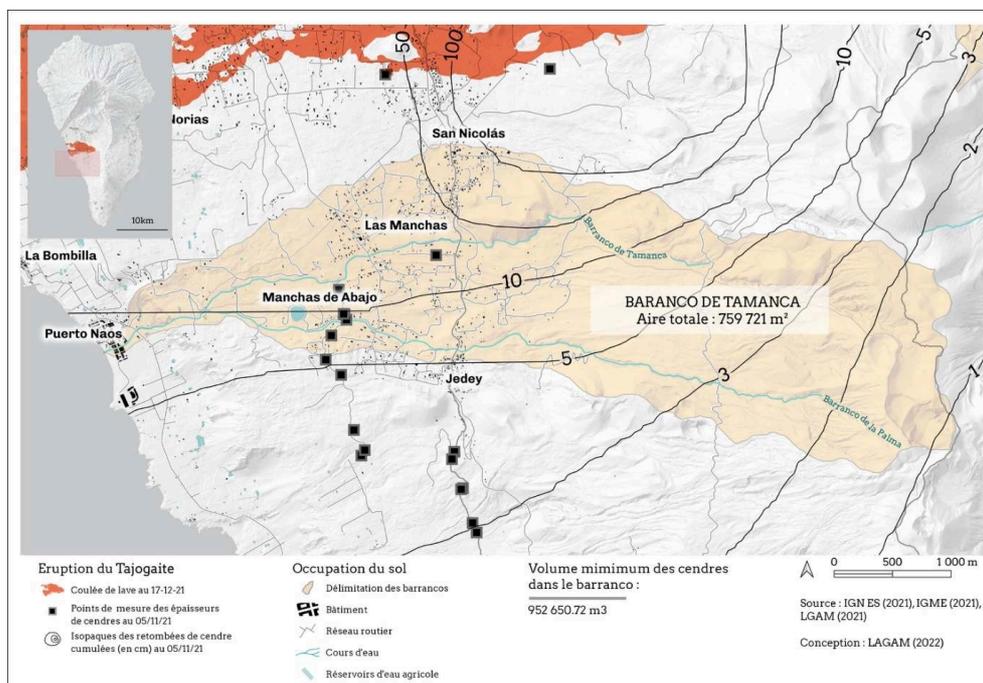


Illustration 8 - Estimation *a minima* des volumes de cendres déposés dans le bassin de Tamanca

Les gaz toxiques

- 16 La forte odeur de soufre ressentie en direct lors de l'éruption et les données fournies par INVOLCAN (Instituto Volcanológico de Canarias) indiquent des quantités importantes de dioxyde de soufre jusqu'à 4 000 m d'altitude (250 000 tonnes de SO₂ du 19/09 au 04/10/2021). Cette quantité est si importante qu'elle aurait atteint l'Afrique du Nord et les Caraïbes, plus précisément Porto Rico et la République Dominicaine, comme en témoignent les images du Copernicus Atmosphere Monitoring Service/ECMWF analysées du 20/09 au 19/10/2021⁸.
- 17 La présence de cendres et de gaz toxiques lors de l'éruption (CO₂, SO₂) a rendu la qualité de l'air extrêmement médiocre dans les zones affectées par l'éruption. Ainsi, à Los Llanos de Aridane, la qualité de l'air a atteint un niveau « extrêmement défavorable » avec une concentration de particules inférieure à 10 microns (PM10) atteignant 275 µg/m³ d'air (source INVOLCAN). Les gaz volcaniques et les concentrations de particules fines (PM10) ont provoqué de graves perturbations, obligeant à des confinements répétés de la population et à l'arrêt des activités publiques (par exemple les écoles). Au niveau du littoral, à partir du 28 septembre 2021, une coulée de lave est entrée en contact avec la mer. L'eau vaporisée a formé un brouillard nocif (le laze), composé d'acide chlorhydrique et de cendres, susceptible d'être dangereux pour les personnes se situant à proximité du lieu d'émission.
- 18 Plus de six mois après l'éruption, la qualité de l'air était mauvaise à Puerto Naos et la Bombilla (zone littorale de la commune de Los Llanos de Aridane), en raison des concentrations en dioxyde de carbone comprises entre 5 000 à 25 000 ppm. Les populations (~1 100 personnes) ont été évacuées de la zone, et ce n'est que depuis le mois de février 2023 que l'accès à Puerto Naos est possible mais non libre, selon un protocole d'accès contrôlé avec accompagnement.

Les coulées de lave

- 19 Les premières coulées se sont manifestées le 19 septembre à 14h10 (heure locale) et se sont poursuivies jusqu'au 13 décembre 2021 vers 22h. Deux phases éruptives séparées par une brève interruption le 27 septembre ont donné, dans un premier temps, un magma constitué de téphrite (pyroxène et amphibole) puis de basanite (pyroxène et olivine) ce qui est une composition analogue aux éruptions passées (Castro et al., 2022).
- 20 Émanant de six bouches éruptives, les coulées de lave se sont étendues sur près de 7 km en direction de l'ouest, passant successivement sur les municipalités d'El Paso, Los Llanos de Aridane et Tazacorte. Avançant au rythme moyen de 700 m/h (12 m d'épaisseur moyenne), elles ont considérablement modifié le paysage et progressé sur la mer édifiant deux nouveaux deltas laviques de 220 m (5,41 ha) et 520 m (43,19 ha) au nord et au sud de Tazacorte. Le plus important s'est formé après que trois deltas bien distincts se soient réunis (Carracedo et al., 2022). Au total, les coulées ont recouvert 1 240 ha et agrandi l'île de La Palma de 48,6 ha (illustrations 3 et 9).

Impacts directs et indirects de l'éruption du Tajogaite

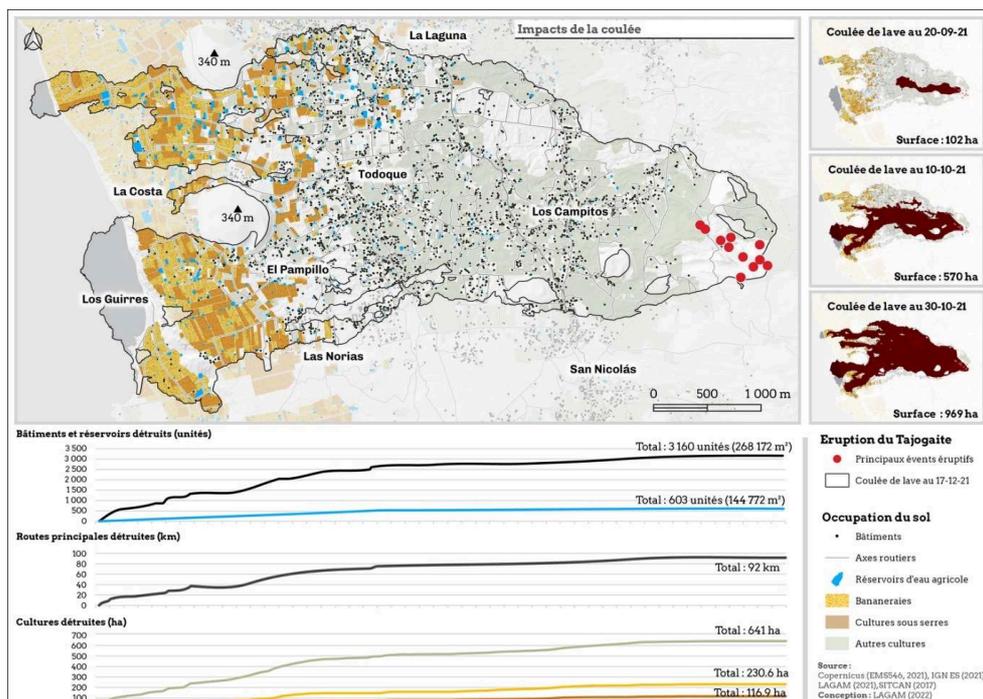
- 21 Les phénomènes volcaniques, en particulier les coulées et les cendres, ont eu de lourdes conséquences à La Palma. Les coulées ont entraîné la destruction directe de bâtiments, de réseaux et de surfaces agricoles considérables. Les cendres ont également eu des effets destructeurs surtout sur l'agriculture, en particulier les cultures de bananes, principale richesse agricole de l'île. Au-delà des destructions matérielles, l'éruption a fortement affecté l'économie touristique de l'île via la perturbation des transports terrestres et aériens. Toutefois, l'éruption peut avoir un effet positif à moyen terme en augmentant la notoriété de l'île.

La destruction des habitations et des réseaux routiers

- 22 Six mois après l'éruption, 1 676 bâtiments étaient officiellement déclarés endommagés par les coulées de lave (illustration 9), dont près de 80 % d'habitations (données du Cabildo insulaire de La Palma). Les secteurs agricole et industriel représentent respectivement 10,7 % et 4,5 % des bâtiments endommagés. Cependant, nos propres calculs sur SIG aboutissent à un total de 3 160 unités bâties recouvertes par la lave (27 hectares de surface au sol détruites), chiffre qui diffère des données officielles fondées sur le registre cadastral. Parmi ces bâtiments, une centaine de logements de vacances proposés à la location ont été entièrement détruits.
- 23 La lave a également affecté 92 km de voies diverses, déconnectant en particulier l'axe routier principal entre El Paso et Los Canarios situé au sud de l'île. La perte d'accessibilité a entraîné le redéploiement du trafic routier de l'autre côté de l'île. Les temps de parcours se sont ainsi considérablement rallongés. Par exemple, pour effectuer le trajet entre Las Manchas et El Paso, qui ne durait qu'une dizaine de minutes (7,5 km) avant l'éruption, il fallait lors de l'éruption plus de 1h20 (60 km) en passant par Santa Cruz. Désormais, une nouvelle route a été creusée dans les coulées de lave (toujours en travaux en octobre 2022) réduisant à une trentaine de minutes le trajet direct entre Las Manchas et El Paso.

- 24 Quant aux retombées de cendres, elles ont eu peu d'effets dommageables sur les toitures, hormis dans la zone proximale du volcan où des habitations ont été totalement encendrées. On a pu relever un seul bâtiment principal au toit effondré (le gymnase de Las Manchas), ainsi que trois pergolas et deux toits de petites constructions annexes. Ces toits effondrés étaient constitués de couvertures planes et en tôle, alors que la majorité des habitations de l'île sont couvertes de tuiles ou de dalles en béton.

Illustration 9 - Coulées de lave et les principaux dommages associés

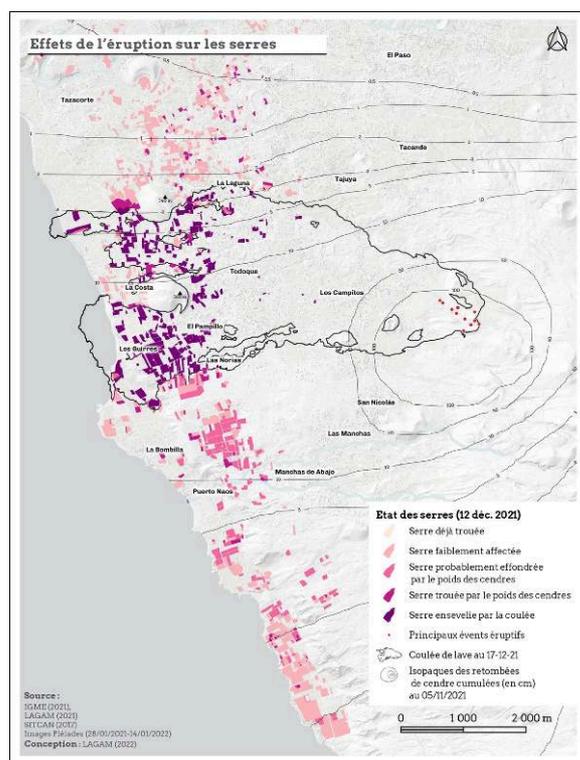


Endommagement des infrastructures agricoles et des récoltes

- 25 L'agriculture de l'île de La Palma est dominée par la banane. En 2020, l'Instituto Canario de Estadística (ISTAC) recensait 6 876,4 hectares cultivés, soit 1 % de l'occupation du sol (7 % de bananeraies et 3 % d'autres types de cultures). La production de bananes représentait 149 000 tonnes (10 % du PIB de l'île) et concernait 7 000 à 8 000 emplois suivant les saisons (CincoDias, 13/10/2021⁹). Mais la part de PIB insulaire liée au commerce de la banane peut atteindre 50 % en intégrant l'ensemble des emplois dérivés. La banane fait partie du patrimoine culturel canarien et bénéficie d'une appellation d'origine contrôlée (boc-a-2011-025-502). Moins de 2 % de la production de bananes est consommée sur l'île.
- 26 D'après les données du *Cabildo de La Palma*, 370 hectares de cultures ont été recouverts par les coulées de lave, dont 229 ha de bananeraies, 68 ha de vignes et 27 ha d'avocatiers, et 624 ha par les cendres (respectivement 412 ha, 128 ha et 84 ha), en premier lieu sur les communes de Tzacorte (54 %), Los Llanos de Aridane (35 %) et El Paso (11 %). D'après nos analyses, les coulées de lave ont recouvert 603 réservoirs agricoles et 641 ha de cultures diverses dont 230,6 ha de bananeraies et 117 ha de serres agricoles abritant majoritairement des bananiers (illustration 9). Les coulées de lave ont entraîné une perturbation importante des réseaux viaire et d'irrigation. Elles ont

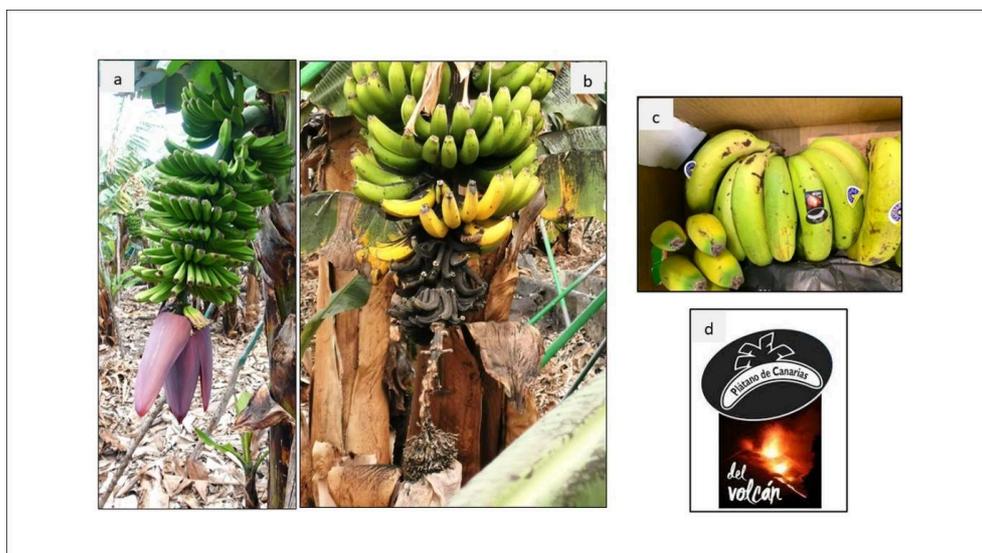
en particulier détruit des chemins agricoles, des canaux d'irrigation et des réservoirs d'eau, portant un préjudice direct à l'agriculture et privant d'eau le quartier de Las Manchas. Par ailleurs, l'accumulation des cendres sur les serres couvertes de bâches en mailles de nylon a provoqué des dommages considérables que nous avons analysés par photo-interprétation d'images satellitaires post-éruption (illustration 10). Les serres sont soit trouées, soit effondrées, avec un seuil d'endommagement significatif à partir de 3 cm de dépôts de cendres. On retrouve particulièrement sinistré le secteur de Las Manchas au sud-ouest du volcan, là où les dépôts de cendres ont été les plus épais.

Illustration 10 - Intensité des dommages sur les serres agricoles (coulées et retombées de cendres)



- 27 Durant l'éruption, les agriculteurs ont quotidiennement nettoyé les bananiers pour réduire l'action abrasive et thermique des cendres. Le projet Extension Agraria du Cabildo de La Palma a démontré qu'en l'absence d'entretien, les cendres se logent à l'intérieur du pseudo-tronc empêchant l'ouverture des feuilles, essentielles à l'ouverture du bourgeon¹⁰. Les régimes de bananes déjà développés pendant l'éruption ont été dégradés par les cendres (abrasion et transport), notamment au niveau de la partie externe des fruits (illustration 11). Les bananes étaient alors recouvertes de taches noires, les régimes les moins abîmés ont cependant pu être commercialisés sous le label *plátano de canarias del volcán* afin de sensibiliser les consommateurs (illustration 11).

Illustration 11 – Comparaison entre un régime sain (a) et une inflorescence touchée par les cendres du Tajogaite (b) ; bananes commercialisées sous l'étiquette *Plátano de canarias del volcàn* (c et d)



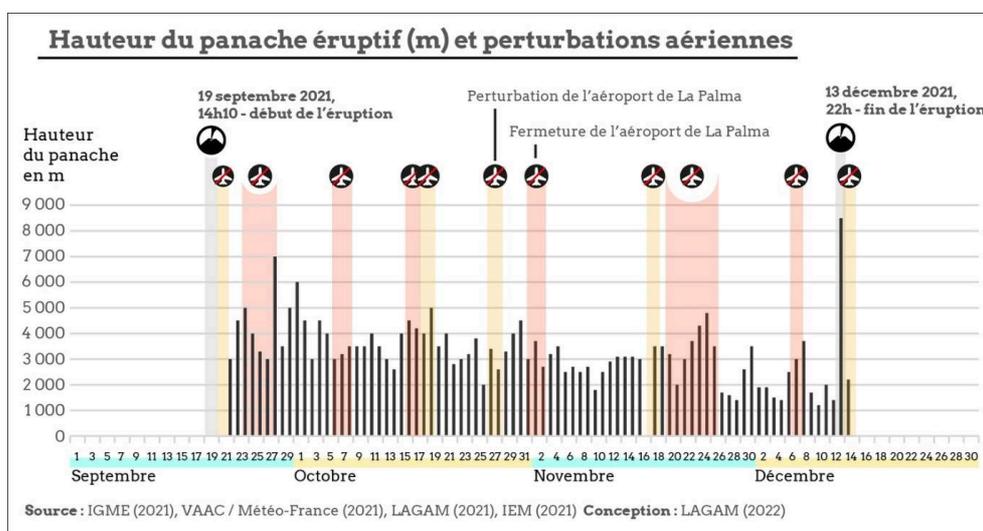
Clichés des auteurs, 2021.

- 28 Les conséquences de l'éruption se traduisent par une nette baisse des exportations de bananes depuis septembre 2021 qui s'élevaient à 11 900 t et sont passées à 4 700 t en décembre 2021. En comparaison, la production s'élevait à 10 000 t en septembre 2020 mais est restée à 9 800 t en décembre 2020.
- 29 Plusieurs agriculteurs interrogés ont témoigné de leur inquiétude sur les rendements agricoles pour les années à venir et estiment qu'il faudra au moins trois ans avant que les parcelles retrouvent leur niveau de production avant éruption.

Perturbations du trafic aérien et effets sur le tourisme

- 30 Les conséquences les plus importantes sur les réseaux de transport sont liées à la perturbation du trafic aérien. L'aéroport de La Palma a connu des phases d'ouverture et de fermeture selon l'intensité et l'orientation du panache éruptif du Tajogaite. Le Volcanic Ash Advisory Centre de Toulouse¹¹ a émis 320 avertissements pour l'aviation en précisant la hauteur du panache éruptif et la dispersion des cendres. Selon les données de la compagnie Binter, l'aéroport de Santa Cruz de La Palma a été fermé pendant 21 jours auxquels s'ajoutent huit jours de perturbation (changements d'horaire, retards) (illustration 12). Les incertitudes de vol ont été très nombreuses, avec des vols fréquemment annulés par les compagnies aériennes. Les gros porteurs furent dans leur majorité détournés vers l'aéroport de Tenerife. L'option résidait alors dans un vol petit porteur ou un déplacement via les transporteurs maritimes. La saison touristique a été perturbée mais il est trop tôt pour quantifier la diminution. Le flux de touristes drainé par l'éruption est réel¹² mais faible au regard des quelque 260 000 touristes qui avaient fréquenté l'île en 2019.

Illustration 12 - Perturbations du trafic aérien et hauteurs du panache de cendres à La Palma.



La couleur rose correspond aux fermetures, la couleur jaune aux perturbations.

Des effets immédiats, différés et ...positifs

- 31 L'exposition médiatique pendant la crise éruptive a entraîné un gain de notoriété et des effets positifs à moyen et long terme. Au niveau national et européen, la crise volcanique a permis une identification de l'île, au moins temporairement, notamment en la distinguant de Palma de Majorque. Les catastrophes naturelles suscitent toujours la curiosité touristique pendant un événement ou dans les années qui suivent ce dernier, participant parfois au processus de reconstruction (Hernandez, 2008 ; Picquout, 2013 ; Martinez, 2019). Alors même que les touristes se pressaient pour contempler les coulées de lave pendant l'éruption, depuis juin 2022, des excursions sont organisées au plus près des cratères par des agences touristiques (en dehors du périmètre interdit et par conséquent des zones sinistrées). Cette forme de tourisme pourrait contribuer à une relance économique de l'île, autour du géotourisme (Hernández et al., 2022). C'est la fascination des volcans mais aussi la solidarité qui ont attiré les touristes plus qu'un tourisme macabre défini comme des « pratiques touristiques pour lesquelles la visite des sites de mort ou de dévastation constitue le but premier du voyage » (Hernandez, 2008).

Autorités et populations au cœur de la gestion de la crise éruptive : limites et leviers

- 32 Le risque volcanique aux Canaries fait l'objet d'une planification de gestion de crise élaborée, mais qui a montré ses limites sur certains aspects. À partir de l'analyse de la presse et de la documentation, du recueil de témoignages (échanges informels) et d'entretiens semi-directifs (à partir d'une grille d'entretien), l'analyse a porté sur le décalage entre la planification de gestion de crise et la réalité en insistant sur les aspects de la crise non prévus ou sous-estimés.

Une éruption prévue

- 33 Les habitants de La Palma avaient bien conscience de vivre sur une île à volcanisme actif. Les dernières éruptions marquantes, celle de 1949 pour San Juan et de 1971 pour Teneguia, restent dans les mémoires. Nombreux sont ceux qui peuvent encore témoigner de l'éruption de 1971, vécue dans la joie comme un véritable spectacle (un numéro spécial de la presse sorti en 2021 revenait sur cette éruption spectaculaire). Les coulées de lave n'avaient recouvert que des zones naturelles et offraient un spectacle accessible, aucune mesure de sécurité n'ayant été mise en place. Lors de cette éruption, la radio *La Voix de La Palma* avait joué un rôle de premier plan dans la diffusion de l'information à la population, en bénéficiant d'un assouplissement de la censure des autorités franquistes et en ayant été relayée par beaucoup de radioamateurs de l'île (Carrascosa Puertas, 2016). En 2021, ce sont les médias TV nationaux qui ont couvert l'événement en continu, ainsi que les réseaux sociaux par lesquels l'information s'est diffusée quasiment en temps réel. Une constante a été, dans les deux cas, la diffusion simultanée des informations outre-atlantique, notamment au Venezuela où vivent nombre de migrants ou de descendants de *Palmeros* inquiets pour leur famille.
- 34 Ce caractère relativement bénin des éruptions volcaniques récentes dans la mémoire collective explique la prise de conscience tardive de la nécessité d'une formalisation de la gestion de crise. La gestion des crises volcaniques aux Canaries est régie depuis 2018 par le PEVOLCA ou Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias, mis en place et piloté par l'institut volcanologique des Canaries (INVOLCAN), chargé de la surveillance des volcans canariens. Ce plan prévoit les mesures d'information de la population, d'évacuation ou de confinement et de sécurisation des périmètres dangereux. Il coordonne les actions de la gendarmerie, de l'armée, de la protection civile et des autorités nationales, régionales et locales.
- 35 La mise en vigilance des autorités s'est faite progressivement au cours de la semaine du 11 au 18 septembre 2021. Le plan a été activé le 13 septembre 2021 suite à différents précurseurs éruptifs suivis en temps réel. Par le biais d'un site web mis à jour quotidiennement¹³, les populations étaient informées du niveau de danger grâce à un *semaforo* (niveau de vigilance) gradué du vert (continuez vos activités journalières) au rouge (évacuez la zone). Le 16 septembre, la presse, dont le journal *Diario de avisos*, évoquait une éruption potentielle. La certitude d'une éruption imminente s'est accompagnée d'une incertitude quant à la localisation de l'événement et à la date exacte.
- 36 Les premières réunions la semaine précédant l'éruption ont apporté des informations de préparation à des évacuations préventives. Dès la veille de l'éruption, les personnes dépendantes ont été évacuées. Ainsi, même si l'éruption a pu surprendre (les prévisions évoquaient une éruption dans les semaines à venir), les populations averties avaient préparé des affaires personnelles en cas d'évacuation. Cette planification a sans nul doute évité des dommages corporels ou matériels.

La gestion de crise : du prévisible à l'imprévisible

- 37 Le 19 septembre à 15h heures locales, alors qu'une équipe de télévision dépêchée sur place filme le volcan pour évoquer cette crise à venir, le Tajogaite est entré en éruption en direct à la télévision¹⁴. L'information a été diffusée très rapidement et les

responsables et les habitants l'ont appris par les médias sociaux (en particulier Whatsapp). Le maire d'El Paso était en train de visiter des habitants d'El Paraiso pour les préparer à évacuer lorsqu'est survenue l'éruption à quelques kilomètres au nord dans le secteur de Tacande.

Une gestion de crise centrée sur la protection des personnes

- 38 Le jour de l'éruption (19/09), le PEVOLCA passe la vigilance de jaune à rouge sans passer par le niveau orange, ce qui déconcerte les gestionnaires de crise locaux. La vigilance rouge s'accompagne de la prise en main de la gestion de crise par le gouvernement canarien, puis par le gouvernement espagnol. Le premier Ministre Pedro Sanchez est venu sur l'île dès le lundi 20 septembre et y est revenu par la suite à sept reprises jusqu'en décembre 2021.
- 39 Les opérations de sécurité civile prévues par le PEVOLCA ont été mises en place : évacuations des zones menacées, sécurisation de périmètres, limitation des accès, etc. (illustrations 13 et 14). Une zone d'exclusion terrestre et maritime liée aux coulées de lave mais également aux retombées de cendre et à l'émanation des gaz toxiques est mise en place dès les premiers jours. La *Guardia civil* est déployée sur le territoire pour veiller au respect de l'interdiction de pénétrer dans la zone ou d'y autoriser certains résidents en cas de baisse d'activité. Une dizaine de passages de contrôle sont identifiés (routes barrées) autour de cette zone d'exclusion (illustration 14). La rupture de ces accès a perturbé les déplacements sur cette partie de l'île, rallongeant les trajets d'une heure au moins. Excepté le CECOPIN (Centro de Coordinación Operativa Insular) situé à Brena Alta (Santa Cruz), les postes de commandement avancés étaient positionnés à El Paso à proximité du volcan. Dans cette zone, des locaux ont également été affectés pour l'accueil des animaux domestiques et d'élevage ainsi que pour le mobilier des personnes évacuées qui, rappelons-le, ont trouvé refuge majoritairement chez leurs proches.

De la crise à la post-crise

- 43 Ainsi, la gestion de la crise dans sa durée et sa diversité a dépassé largement les attendus de la planification. Les élus locaux ont dû pallier le manque de matériel (lits, vêtement, outils de nettoyage...) et de personnels (accueil des évacués...). La solidarité informelle a pleinement joué. Les 14 maires de l'île et le Cabildo étaient reliés par un groupe de discussion Whatsapp qui a permis d'organiser l'entraide. L'interconnaissance des acteurs locaux a été un élément déterminant de la gestion de crise comme cela est observé habituellement en pareil cas (Lumbroso *et al.*, 2011).
- 44 Par ailleurs, la reconstruction post éruption a suscité des inquiétudes qui sont loin d'être réglées sur le relogement définitif des personnes évacuées, l'allocation de terrain aux personnes dont les propriétés ont été ensevelies, et sur le devenir en général des espaces volcanisés (Ferrer Valero *et al.*, 2022). L'éruption du Tajogaite a bouleversé le système insulaire bien plus que ne l'avaient fait les éruptions précédentes de 1949 et 1971 (illustration 15). Face à la perte de leur maison, de leur environnement et de leurs repères, la convalescence sera longue (García Hernández, 2021 ; Pulido et Delgado, 2022).

Illustration 15 - Matrice SWOT (Strengths - Weaknesses - Opportunities - Threats) de l'éruption Tajogaite sur l'île de La Palma

INTERNES	<ul style="list-style-type: none"> Préparation et anticipation (PEVOLCA) Forte médiatisation Réseaux sociaux informels (population et gestionnaires) Interconnaissances des gestionnaires Auto-relogement majoritairement interne (90%) Connaissance et conscience du risque Solidarité Pas de décès (jusqu'au 19/11/2021) 	<ul style="list-style-type: none"> Incertitudes spatiales et temporelles Aspects imprévus de la gestion de crise (cendres, animaux, émotionnel...) Impacts socio-économiques (tourisme, banane, communications extérieures...) Rupture des communications sur le versant occidental de l'île L'insularité (rupture des communications aéroportuaires) Peu de foncier disponible (relocalisation)
	FORCES	FAIBLESSES
EXTERNES	<ul style="list-style-type: none"> Reconstruire rapidement Libérer du foncier Reloger au plus près des anciennes habitations Publicité pour l'île : "tourisme volcanique" Fertilisation des sols Réorganisation du réseau routier et amélioration de l'accessibilité territoriale Renforcement de la surveillance et de la prévention 	<ul style="list-style-type: none"> Durée de la crise Incertitudes sur la prise en charge financière des dommages et reconstruction Traumatismes individuels et collectifs Politisation de la post crise et de la reconstruction Indisponibilité du foncier Risques sanitaires (population et animaux) Zonage actuel des risques inondations inadapté à la réorganisation du réseau hydrographique suite aux coulées de lave Reprise de l'éruption Pollution des sols et des nappes phréatiques
	OPPORTUNITÉS	MENACES

Conception : LAGAM, 2023

Conclusion

- 45 L'éruption du Tajogaite de 2021 a surpris par sa localisation du centre éruptif – que les précurseurs envisageaient plus au sud – et par sa durée (trois mois) qui en fait la plus longue éruption connue historiquement sur l'île. L'activité strombolienne a été marquée par des phases effusives engendrant des coulées de lave, accompagnées de

fortes émissions de cendres et de gaz et d'une activité sismique de moyenne intensité mais continue. Si les habitants de La Palma ont été les premiers affectés par l'éruption, l'ensemble de l'archipel canarien a subi la perturbation du système de transport.

- 46 La crise a suscité une production massive de données scientifiques, souvent en temps réel, ce qui représente une opportunité pour le chercheur menant un retour d'expérience, mais peut engendrer la confusion et des difficultés en termes de suivi, de tri, de traitements, et de recoupement d'information en cours de crise. La masse d'informations produite par les volcanologues témoigne du fort investissement des géosciences sur ce type d'événement. Elle a enrichi les connaissances sur la complexité des aléas volcaniques, mettant l'accent sur la forte incertitude temporelle des phénomènes éruptifs, incertitude qui s'est révélée être le paramètre le plus complexe à gérer dans la crise. Ce retour d'expérience intégré visait à dresser un bilan aussi complet que possible de la crise volcanique en détaillant et reliant les aspects purement volcanologiques et les impacts socio-économiques. L'analyse montre combien la gestion de crise a été affectée par les incertitudes spatio-temporelles des phénomènes éruptifs : localisation imprécise de l'éruption, variabilité spatio-temporelle du nuage de cendres et des émanations gazeuses, suivi de la progression des coulées de lave, menace sismique...
- 47 La crise a affecté directement plus de 7 000 personnes évacuées de leurs habitations et même au-delà (sans qu'il soit possible de le quantifier) pour les effets indirects. Cette diversité des dommages et conséquences interroge la planification de gestion de crise. Cette dernière, notamment au travers du PEVOLCA, était centrée sur la mise en sécurité des personnes. En ce sens, elle a atteint ses objectifs puisque l'on ne déplore aucune victime directe de l'éruption. En revanche, elle laisse démunis les acteurs locaux de la gestion de crise (Cabildo, maires, habitants...) qui ont dû faire face à des effets inattendus ou sous-estimés de l'éruption comme la gestion des cendres, des gaz et de leurs conséquences sanitaires, la prise en charge des personnes évacuées, la perturbation des transports ou les conséquences économiques sur les filières agricoles. De même, la planification initiale n'englobait pas les aspects post-crise liés à la réhabilitation des espaces et des personnes impactés, car « si la gestion de crise est de plus en plus anticipée, la reconstruction l'est rarement » (Moatty *et al.*, 2017) - une assertion commune à de nombreux événements. Malgré les dispositifs réglementaires et financiers mis en place, les problèmes subsistent et augurent une reconstruction longue et coûteuse.
- 48 Enfin, à l'échelle territoriale, le retour d'expérience a montré les forces et faiblesses d'un territoire insulaire face à une crise longue et multiforme (Komorowski *et al.*, 2016). Cette éruption a touché plus profondément le territoire que ne l'avaient fait les éruptions précédentes. Elle a imposé une révision et un élargissement de la planification de gestion de crise. L'île était préparée à une crise de sécurité civile mais pas à une crise territoriale longue, multiforme et multi-phasée. Le manque de ressources alternatives (hébergements, personnels, réserves foncières...) et les problèmes d'accessibilité ont été partiellement compensés par une forte cohésion territoriale intra-insulaire (interconnaissance des acteurs de gestion de crise, solidarité des populations) et supra-insulaire (soutien de l'archipel et du gouvernement central espagnol). La phase de reconstruction peut permettre de bâtir des solutions et des anticipations sur la gestion de crise au sens large intégrant tous les impacts de l'éruption et de la post crise (problème foncier, économique, social, *etc.*) (García

Rodríguez et Fernández Hernández, 2023). Elle rend possible un renforcement de la résilience insulaire face à ce type de phénomène qui ne manquera pas de se produire dans un avenir plus ou moins lointain.

BIBLIOGRAPHIE

- Azorin-Molina C., Vicente-Serrano S.M., McVicar T.R., Revuelto J., Jerez S. and López-Moreno J.-I., 2017. Assessing the impact of measurement time interval when calculating wind speed means and trends under the stilling phenomenon. *Int. J. Climatol.*, vol. 37, n° 1, p. 480-492.
- Bonadonna, C., Pistolesi, M., Biass, S., Voloschina, M., Romero, J., Coppola, D., *et al.*, 2022. Physical characterization of long-lasting hybrid eruptions: The 2021 Tajogaite eruption of Cumbre Vieja (La Palma, Canary Islands). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, n° 127.
- Barker A., Troll V., Carracedo J. and Nicholls P., 2015. The magma plumbing system for the 1971 Teneguia eruption on La Palma, Canary Islands. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, n° 170, p. 1-21.
- Carrascosa Puertas L., 2016. Julio Antonio Yanes Mesa (2010): El Periodismo y la cohesión territorial del Archipiélago. *RIHC. Revista Internacional De Historia De La Comunicación*, vol. 1, n° 6, p. 124-129.
- Carracedo J.C., Troll V. R., Day J. M. D., Geiger H., Aulinas M., Soler V., *et al.*, 2022. The 2021 eruption of the Cumbre Vieja volcanic ridge on La Palma, Canary Islands. *Geology Today*, n° 38, p. 94-107.
- Carracedo J.C., Rodríguez-Badiola E., Guillou H., De la Nuez Pestana J., Pérez Torrado F.J., 2001. Geology and volcanology of La Palma and el Hierro, Western Canaries. *Estudios Geológicos*, vol. 57, n°5-6, p. 175-273.
- Carracedo J.C., Day S. J., Guillou H., *et al.*, 1999. Giant Quaternary landslides in the evolution of La Palma and El Hierro, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, n° 94, p. 169-190.
- Carracedo J.C., Day S., Guillou H., *et al.*, 1998. Hotspot volcanism close to a passive continental margin: the Canary Islands. *Geological Magazine*, vol. 135, n° 5, p. 591-604.
- Castro J.M., Feisel Y., 2022. Eruption of ultralow-viscosity basanite magma at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands. *Nature Communications*, n° 13.
- De Bélizal E., Lavigne F., 2015. Approche des environnements volcaniques en géographie : méthodes et échelles. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 21, n° 3, p. 201-204.
- Ferrer Valero N., Vegas Salamanca J., Galindo Jiménez I., Lozano G., 2022. Metodología para la valoración patrimonial del nuevo volcán de La Palma en el contexto del volcanismo histórico de Canarias. *Geotemas* [En ligne], vol. 19, p. 37-40. URL: https://sge.usal.es/archivos/GEO_TEMAS/Geo_temas19.pdf

- García Hernández A. M., 2021, Refugiados en tierra propia. A Propósito de la situación de "duelo social" ocasionado por el Volcán de la Cumbre Vieja en La Palma. *Ene (revista de enfermería)* [En ligne], vol. 15, n° 3. URL : <https://scielo.isciii.es/pdf/ene/v15n3/1988-348X-ene-15-03-1344.pdf>
- García Rodríguez J., Fernández Hernández C. (dir.), 2023, *La Palma, una isla de oportunidades. Repensando el futuro a partir de la crisis volcánica*. Fundación Fyde Caja Canarias – Servicio de Estudios Economicos y Sociales, 426 p.
- Hernández-Pacheco A., Valls M.C., 1982. The historic eruptions of La Palma Island (Canarias). *Arquipelago, Revista da Universidade dos Açores, Série Ciências da Natureza*, n° 3, p. 83-94.
- Hernández-Pacheco A., De la Nuez J., 1983. Las extrusiones salicas del Sur de la Isla de La Palma (Canarias). *Estudios Geológicos*, n° 39, p. 3-30.
- Hernández W., Dóniz-Páez J., Pérez M. N., 2022. Urban Geotourism in La Palma, Canary Islands, Spain. *Land* [En ligne], vol. 11, n° 8. URL: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/8/1337> - DOI: <https://doi.org/10.3390/land11081337>
- Hernandez J., 2008. Le tourisme macabre à La Nouvelle-Orléans après Katrina : résilience et mémorialisation des espaces affectés par des catastrophes majeures. *Norois* [En ligne], n° 208, 2008/3. URL : <http://norois.revues.org/index2208.html> - DOI: DOI : <https://doi.org/10.4000/norois.2208>
- Klügel A., Schmincke H.U., White J. D. L., Hoernle K. A., 1999. Chronology and volcanology of the 1949 multi-vent rift-zone eruption on La Palma (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, n° 94, p. 267-282.
- Komorowski J.-C., Morin J., Jenkins S., Kelman, I., 2016. Challenges of volcanic crises on small islands states [Disponible sur HAL]. In Bird D., Fearnley C., Haynes K., Jolly G., McGuire B. (ed.), *Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication*. Springer Verlag, p. 353-37. URL: <https://hal.science/hal-03961061>
- Lumbroso D., Stone K. and Vinet F., 2011. An assessment of flood emergency plans in England and Wales, France and the Netherlands. *Natural Hazards*. vol. 58, n° 1, p. 341-363.
- Martinez A., 2019. Un espace social « viable » dans un environnement « à risque » ? Réinstallation post-catastrophe et relations à l'espace sur le volcan Merapi (Java, Indonésie). *Moussons* [En ligne], n° 34, p. 141-167. URL: <http://journals.openedition.org/moussons/5495> - DOI: <https://doi.org/10.4000/moussons.5495>
- Masson D. G., Watts A. B., Gee M. J. R., et al., 2002. Slope failures on the flanks of the Canary Islands. *Earth-Science Reviews*, vol. 57, n° 1-2, p. 1-35.
- Mata Campo M. P., Casado B.O., Del Moral González B., Mediato J. F., Bellido Martín E., Castillo Carrión M., et al., 2022. Composición del material piroclástico de la erupción de 2021 en Cumbre Vieja (Isla de La Palma). *Macla: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, n° 26, p. 116-117.
- Moatty, A., Gaillard, J.-C., Vinet, F., 2017. Du désastre au développement - From disaster to development: les enjeux de la reconstruction post-catastrophe, *Annales de Géographie*, vol. 714, p. 169-194.
- Müller S., 2021. Volcano tourism erupts on La Palma. *Deutsche Welle (DW)* [En ligne], 29/10/2021. URL: <https://www.dw.com/en/volcano-tourism-erupts-on-la-palma/a-59654458>
- Paris R., Bani P., Chevrel O., Donnadiou F., Eychenne J., et al., 2022. Évaluation, zonage et modélisation des aléas volcaniques. In Lénat J.-F. (dir.), *Aléas et surveillance de l'activité volcanique 1. Approches géologiques et historiques*, ISTE éditions, p. 159-192.

- Paris R., 2002. *Rythmes de construction et de destruction des édifices volcaniques de point chaud : l'exemple des îles Canaries (Espagne)* [Disponible sur HAL]. Sciences de l'homme et sociétés. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 376 p. URL: https://theses.hal.science/tel-00123713/file/Doctorat_2002.pdf
- Picquout, A., 2013. *Impacts géographiques de l'éruption de 2010 du volcan Merapi, Java, Indonésie*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- Pulido F.R., Delgado B.F.J., 2022. La Palma, un volcán sin nombre y sin olvido. *Norte de Salud Mental*, vol. 18, n° 66, p. 11-21.
- Pulido C.O., 2021. El plátano de Canarias se aferra al mercado interno. Las exportaciones del sector más golpeado por el volcán son mínimas La erupción del Cumbre Vieja amenaza 8.000 empleos. *El País*, 13/10/2021.
- Rey T., Leone F., Defossez S., Gherardi M., Parat F., 2021. Volcanic hazards assessment of oldoinyo lengai in a data scarcity context (Tanzania). *Territorium. Revista Portuguesa de riscos prevenção e segurança*, n° 28 (II), p. 69-81.
- Rey T., Defossez S., 2019. *Retours d'expériences post-catastrophes naturelles*. Presses universitaires de la Méditerranée, 88 p.
- Romero J. E., Burton M., Cáceres F., Taddeucci J., Civico R., Ricci T., et al. 2022. The initial phase of the 2021 Cumbre Vieja ridge eruption (Canary Islands): Products and dynamics controlling edifice growth and collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 431.
- Romero-Ruiz, C., 1991, *Las manifestaciones volcanicas historicas del archipiélago Canario*, Tomo I. Gobierno de Canarias, Consejeriia de Política Territorial, El Cedro, S.L., 695 p.
- Van Wassenhove W., Garbolino E., 2008. *Retour d'expérience et prévention des risques. Principes et méthodes*. Paris, Lavoisier, 72 p.
- Ward S. N., Day S. J., 2001. Cumbre Vieja volcano-potential collapse and tsunamis at La Palma, Canary Islands. *Geophys. Geophysical Research Letters* [En ligne], vol. 28, n° 17, p. 3397-3400. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2001GL013110> - DOI: <https://doi.org/10.1029/2001GL013110>
- White James D.L., Schmincke H.U., 1999. Phreatomagmatic eruptive and depositional processes during the 1949 eruption on La Palma (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 94, n° 1, p. 283-304.
- Wybo J.L., 2001. Risky Business-Accidents happen: Good risk management is about making sure you learn from them. *Tomorrow*, n° 100, p. 72-73.

Sitographie

- Cabildo La Palma. URL: <https://www.cabildodelapalma.es/es/direcciones>
- Copernicus. Europe's eyes on Earth. Emergency Management Service. URL: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR546>
- Copernicus. Europe's eyes on Earth. CAMS monitors transport of SO2 from La Palma volcano. URL : <https://atmosphere.copernicus.eu/cams-monitors-transport-so2-la-palma-volcano>
- France 24. *Espagne : un volcan entre en éruption sur l'île de La Palma aux Canaries*, 19/09/2021. URL: https://www.youtube.com/watch?v=xMMBtteAscU&ab_channel=FRANCE24

Instituto Canario de Estadística. Gobierno de Canarias. URL: https://www3.gobiernodecanarias.org/istac/statistical-visualizer/visualizer/collection.html?resourceType=collection&agencyId=ISTAC&resourceId=C00014A_000001

Instituto Geográfico Nacional, España. URL: <https://www.ign.es/web/ign/portal>

Météo France. La Palma. URL: <https://vaac.meteo.fr/volcanoes/la-palma/>

Riesgo volcánico. Punto informativo unificado del Cabildo Insular de La Palma. URL: <https://riesgovolcanico-lapalma.hub.arcgis.com/>

NOTES

1. Données de population 2020, site de Urbistat International [entreprise spécialisée dans les études de marché au niveau européen]. URL: <https://ugeo.urbistat.com/>

2. URL : <http://vaac.meteo.fr/>

3. URL : <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR546>

4. URL : <http://www.ign.es/web/ign/portal>

5. **Vacuolaire** : structure des roches montrant de petites cavités (vacuoles), dues à la présence de bulles de gaz durant leur solidification ;

phénocristaux de pyroxènes : minéraux ferromagnésiens (Mg, Fe, Ca) de grandes tailles

amphiboles : minéraux ferromagnésiens et calciques, hydroxylés, en prisme plus ou moins allongé ;

exsolution : séparation de constituants initialement dissous dans une phase homogène, en une nouvelle phase dispersée au sein de la phase initiale, par ex, eau dans un liquide silicaté (magma).

6. Les barrancos sont des formes de ravinement sur les flancs d'un volcan, les formes d'érosion les plus marquantes sont de grandes vallées encaissées.

7. Données météorologiques AEMet. URL: <https://www.aemet.es/es/portada>

8. URL: <https://atmosphere.copernicus.eu/cams-monitors-transport-so2-la-palma-volcano>

9. CincoDías, 13/10/2021. El plátano de Canarias se aferra al mercado interno [En ligne]. URL: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/10/11/companias/1633943013_994756.html

10. URL : <https://www.cabildodelapalma.es/es/direcciones>

11. URL: <https://vaac.meteo.fr/volcanoes/la-palma/>

12. Cf. site du *Deutsche Welle* (DW). URL: <https://www.dw.com/en/volcano-tourism-erupts-on-la-palma/a-59654458>

13. Cabildo Insular de La Palma. URL : <https://riesgovolcanico-lapalma.hub.arcgis.com/>

14. Cf. Images de France 24 sur Youtube. URL: https://www.youtube.com/watch?v=xMMBtteAscU&ab_channel=FRANCE24

15. Le 13 novembre, un homme autorisé à se rendre dans la zone interdite décède en raison d'une intoxication par du monoxyde de carbone et du sulfure d'hydrogène.

RÉSUMÉS

Le 19 septembre 2021, le volcan Cumbre Vieja (renommé depuis Tajogaite) entre en éruption sur l'île de La Palma (Canaries). Un mois après l'éruption, une équipe pluridisciplinaire a mené un diagnostic géomorphologique, géographique et socio-environnemental *in situ* complété par le suivi à distance de la gestion de crise et des impacts de l'éruption. Les répercussions des coulées de lave et des retombées de cendres ont conduit à l'évacuation de plus de 7 000 personnes, ont affecté lourdement et durablement les secteurs agricole et touristique, imposant une recomposition territoriale. L'analyse de la gestion de crise révèle que l'éruption a surpris par sa localisation et sa durée ; l'île était préparée à une crise éruptive mais pas à une crise territoriale longue, multiforme et multi-phasée.

On 19 September 2021, the Cumbre Vieja volcano (renamed Tajogaite) erupted on the island of La Palma (Canary Islands). One month after the eruption, a multidisciplinary team conducted an *in situ* geomorphological, geographical and socio-environmental diagnosis to complement the remote monitoring of the crisis management and impacts of the eruption. The impacts of the lava flows and the ash fallout led to the evacuation of more than 7,000 people, had a heavy and lasting impact on the agricultural and touristic sectors, and imposed a territorial reorganisation. The analysis of the crisis management reveals that the eruption surprised by its location and duration; the island was prepared for an eruptive crisis but not for a long, multiform and multiphase territorial crisis.

INDEX

Keywords : eruption, damage, vulnerability, mapping

Mots-clés : éruption, dommage, vulnérabilité, cartographie

Thèmes : Sur le Vif

AUTEURS

TONY REY

Tony Rey, tony.rey@univ-montp3.fr, est professeur des universités, Université Paul Valéry Montpellier 3, UR LAGAM (Laboratoire de géographie et aménagement de Montpellier). Il a récemment publié :

- Rey T., Chevret C., Candela T. et Robustelli M., 2022. Leçons tirées de la crue torrentielle catastrophique du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie (Alpes-Maritimes, France). *Physio-Géo* [En ligne], vol. 17. URL: <http://journals.openedition.org/physio-geo/14922>

- Tramis M., Rey T. et Leone F., 2022. La relocalisation, une stratégie d'adaptation aux risques côtiers : les leçons tirées des projets aux Antilles françaises. *Études caribéennes* [En ligne], vol. 53. URL: <http://journals.openedition.org/etudescaribeennes/24309>- Rey T., Frédéric Leone F.,

Defossez S., Gherardi M., Fleurice Parat, 2021. Volcanic hazards assessment of oldoinyo lengai in a data scarcity context (Tanzania). *Territorium*, n° 28, p. 69-81.

FRÉDÉRIC LEONE

Frédéric Leone, frederic.leone@univ-montp3.fr, est professeur des universités, Université Paul Valéry Montpellier 3 et directeur de l'UR LAGAM (Laboratoire de géographie et

aménagement de Montpellier) ; Il a récemment publié :

- Candela T., Leone F., 2022. Saint-Martin (Antilles). Cartographie intégrée d'un territoire cycloné. Poster Colloque final de restitution de l'appel à projets Ouragans 2017, 21 & 22 novembre 2022, Champs-sur-Marne. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03854235>
- Rey T., Leone F., Defossez S., Gherardi M., Parat F., 2021. Volcanic Hazards Assessment of Oldoinyo Lengai in a data scarcity context (Tanzania). *Territorium*, n° 28, p. 69-81.
- Leone F., Komorowski J., Gherardi-Leone M., Lalubie G., 2019. Integrating spatial accessibility in the design of volcano evacuation plans in the French West Indies (Guadeloupe and Martinique). *Journal of Applied Volcanology*, vol. 8.

THOMAS CANDELA

Thomas Candela, candela@riscrises.com, est responsable R&D à RISCRISES et chercheur associé au LAGAM - Université Paul Valéry Montpellier 3. Il a récemment publié :

- Candela, T., Leone F., Péroche M., 2022. Cartographier un territoire « cycloné » : Saint-Martin après le passage de l'ouragan Irma (Antilles du Nord, sept. 2017). *Mappemonde. Revue trimestrielle sur l'image géographique et les formes du territoire* [En ligne], n° 134. URL: <http://journals.openedition.org/mappemonde/7730> - DOI: <https://doi.org/10.4000/mappemonde.7730>
- Candela T., Péroche M., Sallaberry A., Rodriguez N., Leone F., 2022. Visualizing Post-Disaster Damages On Maps: A User Study. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 36, n° 7, p. 1364-1393.
- Candela T., Rosset P., Chouinard L., 2021. A quantitative approach to assess seismic vulnerability of touristic accommodations : case study in Montreal, Canada, *GeoHazards* [En ligne], vol., n° 2, p. 137-152. URL: <https://www.mdpi.com/2624-795X/2/2> - DOI: <https://doi.org/10.3390/geohazards2020008>

STÉPHANIE DEFOSSEZ

Stéphanie Defossez, stephanie.defossez@univ-montp3.fr, est maître de Conférences, Université Paul Valéry Montpellier 3, UR LAGAM (Laboratoire de géographie et aménagement de Montpellier). Elle a récemment publié :

- Defossez S., Rey T., Leone F., Gherardi M., Vinet F., Candela T., Péroche M., Cécé R., Bernard D., 2022. Capacités de relèvement d'un territoire insulaire français face à un ouragan extrême : Retour d'expérience sur l'ouragan Irma à Saint-Barthélemy (Petites-Antilles). *Les Cahiers d'Outre-Mer* [En ligne], n° 284, p. 471-508. URL: <http://journals.openedition.org/com/13368> - DOI: <https://doi.org/10.4000/com.13368>
- Defossez S., Gherardi M., 2021. Responses of populations for coping with an extreme event: Saint-Martin and Saint-Barthélemy in the wake of hurricane Irma [Disponible sur HAL]. *Territorium : Revista da Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança*, n° 28(II), p.43-54. URL : <https://hal-univ-montpellier3-paul-valery.archives-ouvertes.fr/LAGAM/hal-03282045v1>
- Duvat V.K.E., Volto N., Stahl L., Moatty A., Defossez S., Desarthe J., Grancher D., Pillet V., 2021. Understanding interlinkages between long-term Trajectory of Exposure and Vulnerability, path dependency and cascading impacts of disasters in Saint-Martin (Caribbean) [Disponible sur HAL]. *Global Environmental Change*, n° 67. URL: <https://hal.science/hal-03134983/document>

FREDDY VINET

Freddy Vinet, freddy.vinet@univ-montp3.fr, est professeur des universités, Université Paul Valéry Montpellier 3, UR LAGAM (Laboratoire de géographie et aménagement de Montpellier). Il a récemment publié :

- Vinet F., Cheral J.P., Weiss K., Lewandowski M., Boissier L., 2022. La mortalité liée aux

inondations en région méditerranéenne française (1980–2020). Flood related mortality in the French Mediterranean region (1980–2020). *LHB - Hydroscience journal* [En ligne], vol. 108, n° 1. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/27678490.2022.2097022> - DOI: <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2097022>

- Papagiannaki K., Petrucci O., Diakakis M., Kotroni V., Aceto L., Bianchi C., Brázdil R., Grimalt Gelabert M., Inbar M., Kahraman A., Kılıç O., Krahn A., Kreibich H., Llasat M.C., Llasat-Botija M., Macdonald N., Madruga de Brito M., Mercuri M., Pereira S., Řehoř J., Rossello Geli J., Salvati P., Vinet F., Zêzere J. L., 2022. Developing a large-scale dataset of flood fatalities for territories in the Euro-Mediterranean region, FFEM-DB. *Scientific Data* [En ligne], vol. 9. URL: <https://www.nature.com/articles/s41597-022-01273-x> - DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01273-x>

- Monteil Ch., Foulquier P., Defossez S., Peroche M., Vinet F., 2022. Rethinking the share of responsibilities in disaster preparedness to encourage individual preparedness for flash floods in urban areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102663>

FLEURICE PARAT

Fleurice Parat, fleurice.parat@umontpellier.fr, est maître de conférences HDR, membre de l'Unité Géosciences Montpellier, Université Montpellier. Elle a récemment publié :

- Cosme M., Bernardoff O., Hély C., Tiberi C., Parat F., Gautier S., Treydte A., Colombo G., Ceppi S., Pommereau F., Gaucherel C., 2023. Risk assessment and recovery trajectories of a social-ecological system after a volcanic eruption. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 92.

- Rey T., Leone F., Defossez S., Gherardi M., Parat F., 2021. Volcanic hazards assessment of Oldoinyo Lengai in a data scarcity context (Tanzania). *Territorium Revista Portuguesa de riscos prevenção e segurança*, vol 28(II), p. 69-81.

- Ouabid M., Raji O., Dautria J.-M., Bodinier J.-L., Parat F., El Messbahi H., Garrido C.J., Ahechach Y., 2021. Petrological and geochemical constraints on the origin of apatite ores from Mesozoic alkaline intrusive complexes, Central High-Atlas, Morocco [Disponible sur HAL]. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 136. URL: <https://hal.science/hal-03437822>

MONIQUE GHERARDI

Gherardi Monique, monique.gherardi@univ-montp3.fr, est ingénieur d'études, Université Paul Valéry Montpellier 3, UR LAGAM (Laboratoire de géographie et aménagement de Montpellier). Elle a récemment publié :

- Rey T., Leone F., Defossez S., Gherardi M., Parat F., 2021. Volcanic hazards assessment of oldoinyo lengai in a data scarcity context (Tanzania). *Territorium Revista Portuguesa de riscos prevenção e segurança*, vol 28(II), p. 69-81.

- Defossez S., Rey T., Leone F., Gherardi M., Vinet F., Candela T., Péroche M., Cécé R., Bernard D. (2022). Capacités de relèvement d'un territoire insulaire français face à un ouragan extrême : Retour d'expérience sur l'ouragan Irma à Saint-Barthélemy (Petites-Antilles). *Les Cahiers d'Outre-Mer* [En ligne], n° 284, p. 471-508. URL: <http://journals.openedition.org/com/13368> - DOI: <https://doi.org/10.4000/com.13368>

- Desse M., Gherardi M., Charrier S., 2020. Adaptation aux cyclones et au risque de submersion marine dans les communes littorales de Guadeloupe. *EchoGéo* [En ligne], n° 51. URL: <http://journals.openedition.org/echogeo/19207> - DOI: <https://doi.org/10.4000/echogeo.19207>

LUCILE MEDINA

Medina Lucile, lucile.medina@univ-montp3.fr, est professeure des universités, Université Paul Valéry Montpellier 3, UR LAGAM (Laboratoire de géographie et aménagement de

Montpellier). Elle a récemment publié :

- Medina L., Torras R., 2021. *Extractivismos y fronteras*. Présentation. *TRACE Procesos Mexicanos y Centroamericanos*, n°80, p. 5-20.
- Medina L., Rodríguez T., 2021. Las fronteras centroamericanas, reflejo de las dinámicas regionales desde la independencia: Una trayectoria marcada por conflictos y cooperación. *Revista Anuario de Estudios Centroamericanos* [En ligne], vol. 47. URL: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/anuario/article/view/49737/49859> - DOI: <https://doi.org/10.15517/aeca.v47i0.49737>
- Medina L., Rodríguez T., 2021. L'insertion de l'Amérique centrale dans le marché mondial : ancienneté et effets des logiques capitalistes sur les territoires. *L'Information géographique*, vol. 85, p 75-92.

FRANCK LAVIGNE

Lavigne Franck, franck.lavigne@univ-paris1.fr, est professeur des universités, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, LGP (Laboratoire de géographie physique). Il a récemment publié :

- Guillet S., Corona S., Oppenheimer C., Lavigne F., Khodri M., Ludlow F., Sigl M., Toohey M., Atkins P., Yang Z., Muranaka T., Horikawa N., Stoffel M., 2023. Lunar eclipses illuminate timing and climate impact of medieval volcanism. *Nature*, n° 616, p. 90-95.
- Malawani M.N., Lavigne F., Sastrawan W.J., Jamaluddin, Sirulhaq A., Sri Hadmoko D., 2022. The 1257 CE cataclysmic eruption of Samalas volcano (Indonesia) revealed by indigenous written sources: Forgotten kingdoms, emergency response, and societal recovery. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 432, article 107688.
- Lavigne F., Morin J., Wassmer P., Weller O., Kula T., Maea A.V., Kelfoun K., Mokadem F., Paris R., Malawani M.N., Faral A., Benbakkar M., Saulnier-Copard S., Vidal C.M., Tu'I'afitu T., Kitekei'aho F., Trautmann M., Gomez C., 2021. Bridging Legends and Science: Field Evidence of a Large Tsunami that Affected the Kingdom of Tonga in the 15th Century. *Frontiers in Earth Sciences*, vol. 9.

ILIONA MARTIN

Iliona Martin, ilionamalemartin@gmail.com, est étudiante en master Gestion des catastrophes et des risques naturels, Université Paul Valéry Montpellier 3.

ZOÉ GUILLET

Guillet Zoé, guilletzoe@gmail.com, est étudiante en master Dynamique des milieux et risques, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.