



HAL
open science

Apports de la géophysique multi-méthodes à l'imagerie haute résolution des édifices volcaniques: Vers une modélisation spatio-temporelle 4D

Lydie-Sarah Gailler

► **To cite this version:**

Lydie-Sarah Gailler. Apports de la géophysique multi-méthodes à l'imagerie haute résolution des édifices volcaniques: Vers une modélisation spatio-temporelle 4D. *Volcanologie*. Université Clermont Auvergne (UCA), 2024. tel-04769963

HAL Id: tel-04769963

<https://hal.science/tel-04769963v1>

Submitted on 6 Nov 2024

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 4.0 International License

Dossier de synthèse de l'activité scientifique présenté pour l'obtention d'une

Habilitation à Diriger des Recherches

Apports de la géophysique multi-méthodes à l'imagerie haute résolution des édifices volcaniques : Vers une modélisation spatio-temporelle 4D

Lydie Gailler

Université Clermont Auvergne
Laboratoire Magmas et Volcans
Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand

Soutenue publiquement le 18/10/2024 après avis des rapporteurs,
devant le jury composé de :

Carol Finn (*Research Geophysicist, USGS, United States*)

Marianne Greff-Lefftz (*Professeuse des Universités, IPGP, France*)

Karim Kelfoun (*Professeur des Universités, UCA-LMV, France*)

Guy Marquis (*Professeur des Universités, EOST-UNISTRA, France*)

Erwan Thébault (*Directeur de Recherche, LMV-OPGC, France*)

SYNTHESE

Résumé-Abstract p. 3

Présentation administrative p. 5

Sont synthétisés dans cette première partie mon curriculum vitae intégrant le parcours scientifique et les différents projets associés, les activités d'enseignement et d'encadrement, les responsabilités administratives et scientifiques, ainsi que les activités de valorisation de ces travaux auprès de la communauté scientifique (article, congrès, séminaires) ou du grand public.

Exposé scientifique p. 27

Dans cette seconde partie, l'exposé scientifique est subdivisé en deux sections, de deux chapitres chacune : la première introductive et générale quant aux problématiques abordées, méthodes utilisées et développements initiés, la seconde intégrant les principaux résultats et perspectives de recherche et d'observation.

- **Le 1^{er} chapitre** présente les problématiques majeures liées à la volcanologie en insistant plus spécifiquement sur les principales étapes de mon travail, de l'acquisition, l'analyse et le traitement de la donnée à sa modélisation, pour contribuer à l'estimation du risque volcanique associé.

- **Le 2nd chapitre** s'intéresse plus en détail aux apports de la géophysique multi-méthodes à la connaissance des édifices volcaniques, et plus particulièrement aux approches gravimétriques, magnétiques et de de résistivité électrique, ainsi qu'aux sources et mécanismes de variations des paramètres physiques associés.

- **Le 3^e chapitre** intègre les principaux axes de recherche, de l'imagerie de la structure interne des édifices volcaniques à l'évolution des systèmes et au suivi de la dynamique volcanique, en passant par les développements méthodologiques et numériques, avec également quelques applications transverses.

- **Le 4^e chapitre** synthétise l'ensemble de ces travaux et ouvre sur les perspectives du projet personnel dédié à une modélisation 4D haute résolution des édifices volcaniques, par une intégration multi-méthodes et pluridisciplinaires, spatiales et temporelles.

Annexes p. 99

Compilation des articles en premier auteur et liens à l'ensemble des publications de rang A.

Résumé

La compréhension du fonctionnement d'un édifice volcanique dépend directement de notre connaissance des systèmes statiques (structure interne, contrastes lithologiques et hétérogénéités mécaniques, géométrie des systèmes magmatiques et hydrothermaux) et des processus dynamiques (évolution des structures, redistribution de masses en profondeur, instabilités), dont l'identification univoque reste un formidable défi. L'imagerie géophysique demeure particulièrement pertinente pour contraindre la géométrie et l'évolution spatio-temporelle de ces structures et processus à différentes profondeurs, dans le but d'anticiper les crises éruptives et les aléas associés. Depuis quelques décennies, des progrès technologiques et méthodologiques considérables ont permis de contribuer à répondre à des objectifs volcanologiques à la fois scientifiques, opérationnels et sociétaux majeurs. De nouvelles méthodes d'acquisition géophysiques à des altitudes variées (au sol, par satellite, et désormais par drone) et la complémentarité des approches offrent désormais la perspective d'une imagerie multi-échelles haute résolution des édifices. Les développements numériques constants permettent en parallèle d'exploiter un nombre croissant de données de plus en plus précises, à des résolutions spatio-temporelles inégalées.

Dans ce contexte, les activités de recherche présentées ici reposent sur l'étude géophysique multi-méthodes des systèmes volcaniques à différentes échelles, de l'acquisition et l'analyse détaillée à la modélisation et l'interprétation. L'un des objectifs principaux est de contribuer à renforcer la connaissance des édifices, depuis leur structure interne jusqu'à la détection, l'imagerie et le suivi des zones actives à différentes profondeurs pour en appréhender leur évolution. Ces activités évoluent constamment, portées par les innovations technologiques (avec l'exemple du développement de la composante géophysique aéroportée) mais également numériques (avec l'optimisation des approches de traitements et de modélisations). Elles s'intègrent en parallèle dans les missions des observatoires volcanologiques permettant de transposer ces approches à la surveillance opérationnelle des volcans français, en favorisant également l'apprentissage par la recherche. Les perspectives sont désormais de combiner l'ensemble de ces approches, entre mesures ponctuelles, données temps réel et répétitions, pour évoluer progressivement vers une imagerie 4D multi-paramètres, c'est-à-dire spatio-temporelle à haute résolution des édifices volcaniques.

Abstract

Understanding the workings of a volcanic edifice depends directly on our knowledge of the static systems (internal structure, lithological contrasts and mechanical heterogeneities, geometry of magmatic and hydrothermal systems) and dynamic processes (evolution of structures, redistribution of masses at depth, instabilities) involved, the unambiguous identification of which remains a formidable challenge. Geophysical imaging is particularly suited to constraining the geometry and spatio-temporal evolution of these structures and processes at different depths, with the aim of anticipating eruptive crises and associated hazards. Over the last few decades, considerable technological and methodological progress has been made to help meet major scientific, operational and societal volcanological objectives. New geophysical acquisition methods at different altitudes (on the ground, satellite-borne and now also using drones) and the complementary nature of the approaches now offer the prospect of high-resolution multi-scale imaging of edifices. At the same time, ongoing digital developments are making it possible to exploit greater amounts of increasingly precise data, at unrivalled spatio-temporal resolutions.

In this context, the research activities presented here are based on the multi-method geophysical study of volcanic systems at different scales, from acquisition and detailed analysis to modeling and interpretation. One of the main objectives is to contribute to a better understanding of the edifices, from their internal structure to the detection, imaging and monitoring of active zones at different depths, in order to understand their evolution. These methods are constantly evolving, driven by technological innovations (such as the development of airborne geophysics components) and numerical innovations (optimizing processing and modeling approaches). They are now being integrated into the monitoring operations at volcanological observatories, enabling these approaches to be used for the operational monitoring of French volcanoes, while also promoting learning through research. Important future work is to combine all these approaches, including one-off measurements, real-time data and repetitions, to produce multi-parameter 4D imaging, i.e. high-resolution spatio-temporal imaging of volcanic edifices.

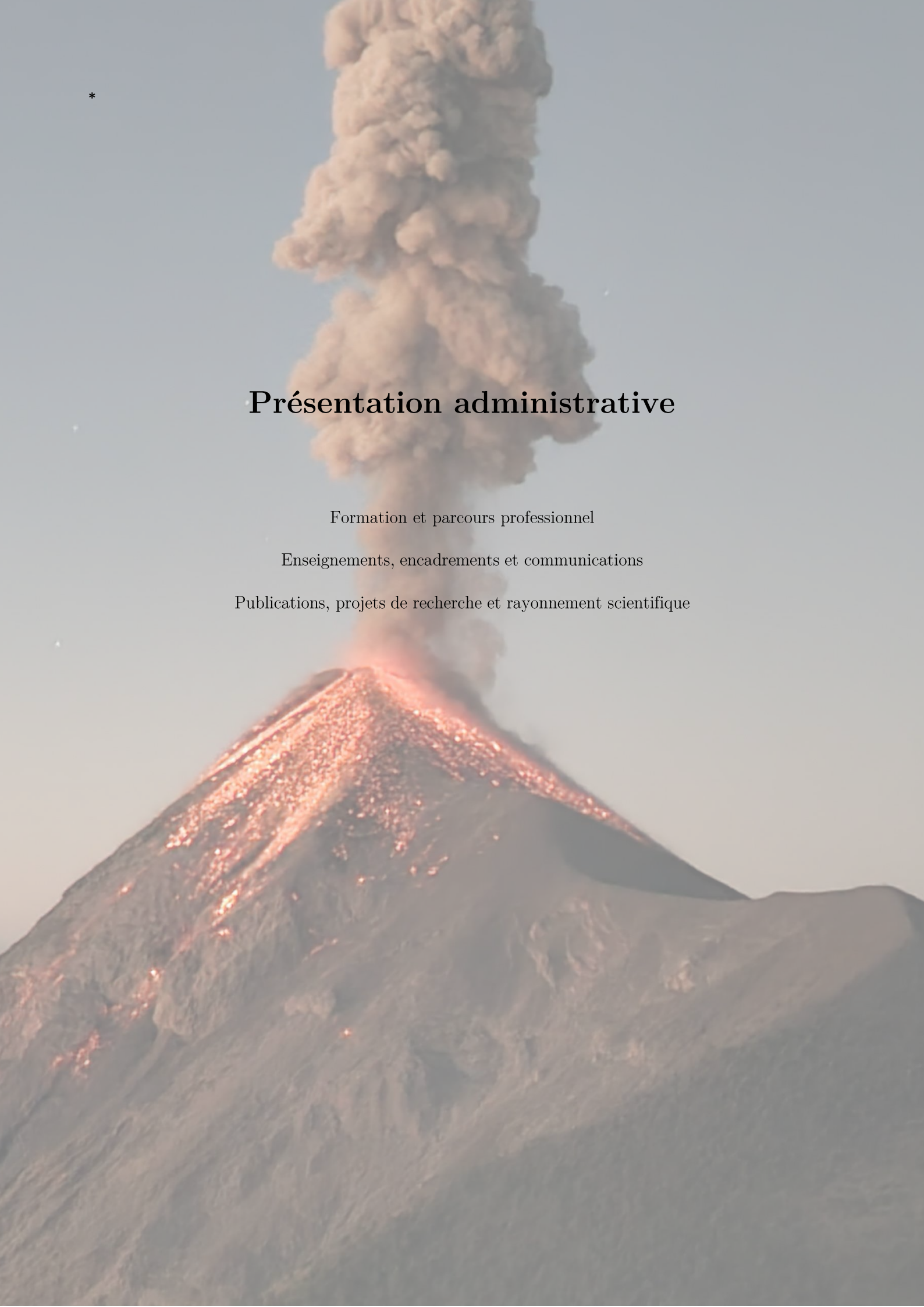
*

Présentation administrative

Formation et parcours professionnel

Enseignements, encadrements et communications

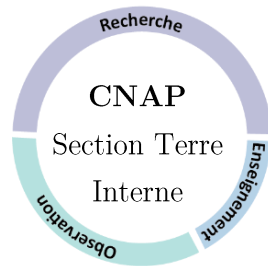
Publications, projets de recherche et rayonnement scientifique



SOMMAIRE DE LA PRESENTATION ADMINISTRATIVE

1. Formation et parcours professionnel	8
1.1. Formation universitaire	8
1.2. Parcours professionnel	8
2. Productions scientifiques.....	10
2.1. Publications de rang A	10
2.2. Autres productions	14
2.2.1. Publications de Rang C	14
2.2.2. Cartes géophysiques.....	15
2.3. Actes publiés de conférences internationales, congrès et colloques	15
2.4. Séminaires.....	19
2.5. Chapitres d'ouvrages	20
3. Encadrement et formation à la recherche.....	20
3.1. Enseignements	20
3.2. Encadrement postdoctoral	21
3.3. Encadrement doctoral.....	21
3.4. Encadrement pré-doctorat	22
3.5. Jury	22
3.6. Diffusions et animations scientifiques	23
4. Projets nationaux et internationaux.....	23
4.1. Projets terminés.....	23
4.2. Projets financés en cours.....	24
4.3. Projets en cours non financés.....	25
5. Rayonnement scientifique.....	25
5.1. Implication dans des réseaux de recherche et d'observation.....	25
5.2. Administration de la recherche et de l'enseignement	25
5.3. Contribution à des comités éditoriaux et expertise d'articles.....	25
5.4. Participation à des comités scientifiques, d'évaluation.....	26
5.5. Organisation de colloque et journées scientifiques.....	26

Nom : Gailler
Prénom : Lydie
Physicienne adjointe
 6 Avenue Blaise Pascal
 63178 Aubière
lydie.gailler@uca.fr



Université Clermont Auvergne

**Observatoire de Physique du
Globe de Clermont (UAR 833)**

**Laboratoire Magmas et Volcans
(UMR 6524) Equipe de Volcanologie**



1. Formation et parcours professionnel

1.1. Formation universitaire

- **2006-2009 : Doctorat 3^e cycle en Sciences de la Terre - Spécialité : volcanologie et géophysique**

Laboratoire Magmas et Volcans (LMV - Clermont-Ferrand, France) – Soutenue le 12/03/2010 à l'Université Blaise Pascal (UBP, désormais Université Clermont Auvergne-UCA).

Modélisation de la structure interne d'un grand système volcanique de point chaud océanique, La Réunion, par une approche géophysique multi-méthodes (Directeur de thèse : J.-F. Lénat)

- **2004-2006 : Master 1 et 2 Recherche : 'Processus Magmatiques, Métamorphiques et Volcanologie'**

Université Blaise Pascal (UBP), Laboratoire Magmas et Volcans (LMV - Clermont-Ferrand, France).

Modélisation numérique des variations gravimétriques en relation avec les intrusions de dyke - Application à l'éruption de 1998 du Piton de la Fournaise (Directrice de M2 : V. Cayol)

Etude de trois éruptions bimodales du volcan Tungurahua, Equateur (Directeurs de M1 : J.-P. Eissen et J.-L. Lepennec)

- **2003-2004 : Licence : 'Sciences de la Terre et de l'Univers'**

Université Blaise Pascal (UBP), Laboratoire Magmas et Volcans (LMV - Clermont-Ferrand, France).

- **2001-2003 : DEUG : 'Sciences de la Terre et de l'Univers'**

Université de Bourgogne (Dijon, France).

1.2. Parcours professionnel

J'ai été recrutée en tant que physicienne adjointe en octobre 2019 (CNAP, section Terre Interne) : Université Clermont Auvergne (UCA), Laboratoire Magmas et Volcans (LMV), Observatoire de Physique du Globe de Clermont (OPGC).

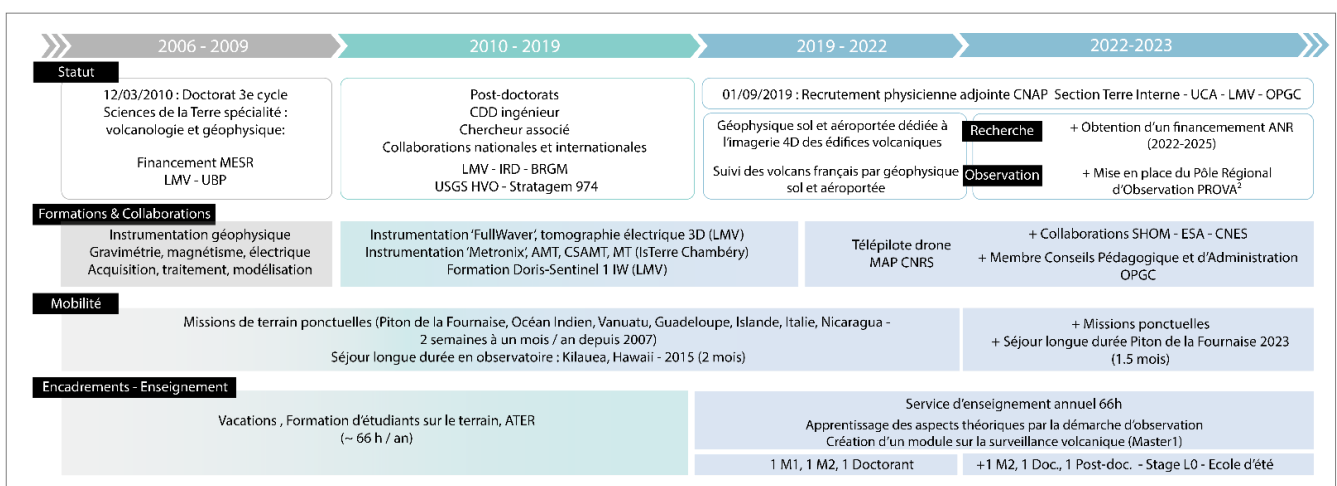
- **2019 : Post-doctorat :** Laboratoire Magmas et Volcans (LMV - Clermont-Ferrand, France)

- *La « machine » Masaya : imagerie géophysique du système d'alimentation magmatique* –

- **2018 : Post-doctorat :** Laboratoire Magmas et Volcans (LMV - Clermont-Ferrand, France)

- *Apports majeurs de la géophysique aéroportée à bord de drones pour la connaissance des édifices volcaniques* –

- **2017 : Chercheur associé** Laboratoire Magmas et Volcans (LMV - Clermont-Ferrand, France)
- *Circulation de fluides, mécanismes d'effondrement et glissement du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion)* –
- **2016 : CDD IR géophysicienne** (STRATAGEM974, 1 mois)
- *Détection de cavités par microgravimétrie (Ile Maurice)* -
- **2015 : Chercheur invité et collaborations à l'Hawaiian Volcano Observatory** (USGS-HVO, 2 mois)
- *Interprétation des données gravimétriques de la caldera du Kilauea*
- *Suivi du refroidissement du lac de lave du Kilauea Iki (1959) : apport des données magnétiques*
- *Structure, fonctionnement et propriétés d'un système magmatique actif superficiel par tomographie de résistivité électrique du cratère Halema`uma`u (Kilauea, Hawaii ; projet Clervolc, INSU)* -
- **2013-2015 : Post-doctorat :** Laboratoire Magmas et Volcans, Laboratoire de Physique Corpusculaire (LMV, LPC - Clermont-Ferrand, France)
- *Développement de la plateforme mobile pour l'étude et la surveillance des édifices volcaniques par imagerie muonique* -
- **2012-2013 : Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER , UBP, LMV**
- Clermont-Ferrand, France)
- *Développement de la géophysique multi-méthodes à l'échelle de la Chaîne des Puys* -
- *Modélisation 3D des données de résistivité du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion)* -
- **2010-2012 : Post-doctorat :** Bureau de la Recherche Géologique et Minière (BRGM - Orléans, France)
- *Apport de la géophysique multi-méthodes à la connaissance de l'Arc des Petites Antilles et du champ géothermique de Bouillante (Guadeloupe, Antilles Françaises)* -
- **2010 : Post-doctorat (2 mois) :** Laboratoire Magmas et Volcans (LMV, IRD - Clermont-Ferrand, France)
- *Etude pétrophysique d'échantillons de l'éruption de 2006 du volcan Tungurahua (Equateur) ; développement d'un protocole de comptage granulométrique et mesures au pycnomètre à eau.* -



2. Productions scientifiques

2.1. Publications de rang A

En préparation

Gailler L.S., Grace C., Boudoire G., Labazuy P., Merciecca C., Souriot T., Battaglia J., Douchain J.-M., Grunberg M., Mazet-Roux G., Thébault E., and the Prova² field team. (Submitted to Comptes-rendus de l'Académie des Sciences). Operational response to the 2021-2022 seismic swarm in the Monts-Dore volcanic province (France): structural insights from punctual surveys (1/2).

Boudoire G., **Gailler L.S.**, et al. and the Prova² field team. (Submitted to Comptes-rendus de l'Académie des Sciences). Operational response to the 2021-2022 seismic swarm in the Monts-Dore volcanic province (France): structural insights from punctual surveys (2/2).

Rafflin V., **Gailler L.**, Aumar C., Cluzel N., Gal F., Giuffrida G., Grassa F., Harris A.J.L., Kelfoun K., Liuzzo M., Souriot T., Boudoire G. (2024). Preferential fluid ascent paths revealed by coupling chemical, electrical and magnetic methods: insights for risk mitigation in a long-dormant volcanic province (Monts Dore, France).

Gailler L.S., Guillard R., Buvat S., Labazuy P., Finizola A., Rouleau E., Lénat J.F., and the ERT3D Scan4Volc team. (to be submitted). Unveiling 3D volcanoes inner structure by unique electrical resistivity experiment.

Guillard R., Gailler L.S., Labazuy P., Régis E., Thébault E., New potential of UAV magnetic prospecting for high-resolution subsurface multi-scale structural studies (in prep. For Bull. Volc).

Gailler L., Labazuy P., Donnadiou F., Vandemeulebrouck J., Dumont Q., Deroussi S., Klein A., Jessop D. E., Moune S., Bouligand C., Finizola A., Moretti R., Evolution of hydrothermal dynamics and edifice weakening of La Soufrière volcano (Guadeloupe) revealed by multi-method geophysical field surveys (to be submitted).

2024

1. **Gailler L.**, Bouligand C., Kauahikaua J., Lénat J.-F., Cluzel N. (2024). The Subsurface Structure of the Kilauea Caldera Before Its 2018 Collapse Inferred From Ground Magnetic, SP, and Temperatures Anomalies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129, e2023JB028005. <https://doi.org/10.1029/2023JB028005>.
2. Rafflin V., Boudoire G., Massaro S., Stocchi M., Costa A., Grassa F., Giuffrida G., **Gailler L.**, Liuzzo M., Planche C., Banson S., Harris A. (2024). Modelling CO₂ dispersion in the air during potential limnic eruption at the lake Pavin (France). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2024, 447, pp.108024. [ff10.1016/j.jvolgeores.2024.108024](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108024). [ffhal04466178f](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108024).

2023

3. Thébault, E.; **Gailler, L.-S.** (2023). A Quick-Look Software for In Situ Magnetic Field Modeling from Onboard Unmanned Aircraft Vehicles (UAVs) Measurements. *Remote Sens.* 2023, 15, 4549. <https://doi.org/10.3390/rs15184549>
4. Sampietro, D., Capponi, M., Thébault, E., **Gailler, L.** (2023). An enhanced view on the Mediterranean Sea crust from potential fields data. *Scientific Reports*, 13(1), 8298.

5. Sampietro D., Capponi M., Thébault E., **Gailler L.** (2023). An enhanced view on the Mediterranean Sea crust from potential fields data. *Scientific Reports*, 2023, 13, pp.8298. (10.1038/s41598-023-35282-6). (insu-04197040)
6. Sampietro D., Capponi M., Thébault E., **Gailler, L.** (2023). An Empirical Method for the Optimal Setting of the Potential Fields Inverse Problem. *Geophysical Prospecting*. 71 (2). <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13305>.
7. **Gailler L.**, Labazuy P., Régis E., Dumont Q., Froger J.L., Peltier A., Finizola A., Cayol V., Chaput M. and the ERT SlideVole Team (2023), Volcano-magnetic signals reveal rapid evolution of the inner structure of Piton de la Fournaise. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 128, e2022JB025290. <https://doi.org/10.1029/2022JB025290>.

2022

8. **Gailler L.**, Labazuy P., Régis E., Peltier A., Ferrazzini V., (2022) Active structures and thermal state of the Piton de la Fournaise summit area revealed by combined UAV magnetic and IR measurement, *Volcanica*, <https://doi.org/10.30909/vol.05.01.6174>.
9. Gerbault M., Fontaine F.J., Peltier A., Got J.L., Hassani R., Ferrazzini V., **Gailler L.**, Duputel Z. (2022). What causes the persistent seismicity below the eastern flank of Piton de la Fournaise (Réunion Island)? Elasto-plastic models of magma inflation. *JVGR*, 431. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107628>.

2021

10. **Gailler L.**, Labazuy P., Régis E., Bontemps M., Souriot T., Bacques G., Carton B. (2021). Validation of a New UAV Magnetic Prospecting Tool for Volcano Monitoring and Geohazard Assessment. *Remote Sensing* vol.13, p.894, - DOI:10.3390/rs13050894.
11. Barnoud A., Cayol V., Lelièvre P.G., Portal A., Labazuy P., Boivin P., **Gailler L.** (2021). Robust Bayesian Joint Inversion of Gravimetric and Muographic Data for the Density Imaging of the Puy de Dôme Volcano (France). *Frontiers in Earth Science* vol.8, p.575842, - DOI:10.3389/feart.2020.575842.

2020

12. Antoine R., Fauchard C., **Gailler L.**, Labazuy P., Lissak C., Lopez T., Tanguy M. (2020). Geoscientists in the sky: Unmanned Aerial Vehicles for geohazards response, *Surveys in Geophysics*. Doi : 10.1007/s10712-020-09611-7
13. Philippon M., Cornée J.-J., Münch P., van Hinsbergen D.J.J., BouDagher-Fadel M., **Gailler L.**, et al. (2020) Eocene intra-plate shortening responsible for the rise of a faunal pathway in the northeastern Caribbean realm. *PLoS ONE* 15(10): e0241000. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241000>

2019

14. **Gailler L.**, Kauahikaua J., Lénat J.F., Revil A., Gresse M., Ahmed A.S., Cluzel N., Manthilake G., Gurioli L., Johnson T., Finizola A., Delcher E. (2019). 3D electrical conductivity imaging of Halema'uma'u lava lake (Kīlauea volcano). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* vol.381, p.185-192, - DOI:10.1016/j.volgeores.2019.06.001.

2018

15. Revil A., Ghorbani A., **Gailler L.S.**, Gresse M., Panwar N., Sharma R., Cluzel N., (2018) - Electrical conductivity and induced polarization investigations at Kilauea volcano, Hawai'i. *JVGR*, 368, 31-50, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.10.014>.
16. **Gailler L.S.**, Marti A., Lénat J.F. (2018) – High resolution 3D modeling of the resistivity data of Plaine des Sables, Piton de la Fournaise (Réunion Island). *JVGR*, 356, 200–210, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.006>.
17. Soueid A., Revil A., Bouligand C., Byrdina S., Coperey A., Rocques S., Hurwitz S., **Gailler L.**, Grobde N., Viveiros F., Silva C., Jougnot D., Ghorbani A., Hogg C., Kiyani D., Rath V., Heap M. J., Grandis H., Humaida H. (2018) - 3D electrical conductivity tomography of volcanoes. *JVGR*, 356, 243-263, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.017>.
18. **Gailler L.S.**, Kauahikaua J. (2018) – The Gravity signature of basaltic fill in Kīlauea caldera, Island of Hawai'i. *GSA Books*, 538, 297-306, [https://doi.org/10.1130/2018.2538\(13\)](https://doi.org/10.1130/2018.2538(13)).

2017

19. Miallier D., Pilleyre T., Boivin P., Labazuy P., **Gailler L.**, Ricco J. (2017) – The Grand Sarcoui lava dome (Chaîne des Puys, Massif Central, France), a case study for complex monogenetic volcanism. *JVGR*, 345, 125-141, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.07.015>.
20. **Gailler L.S.**, Kauahikaua J., (2017) – Monitoring the freezing of the 1959 Kilauea Iki lava lake using surface magnetic measurements. *Bull. Volc.* 79, 40, <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1119-7>.
21. **Gailler L.S.**, Arcay D., Münch P., Martelet G., Thinon I., Lebrun (2017) – Forearc structure in the lesser Antilles inferred from depth to Curie temperature and thermo-mechanical simulations. *Tectonophysics*, 706-707, 71-90, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.03.014>.

2016

22. **Gailler L.S.**, Lénat J.F., Blakely R., (2016) – Depth to Curie temperature or magnetic sources bottom in the volcanic zone of La Réunion hot spot. *JVGR*, 324, 169-178, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.005>.

2015

23. Portal A., **Gailler L.S.**, Lénat J.F., Labazuy P., (2015) – Internal structure of a complex dome related volcanic system inferred from geophysical imaging Part I: Contribution from gravimetry and magnetism methods, *JVGR*, 320, 88-99, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.012>.
24. Ambrosino F., Anastasio A., Bross A., Béné S., Boivin P., Bonechi L., Cârloganu C., Ciaranfi R., Cimmino G., Combaret, C., D'Alessandro R., Durand S., Fehr F., Français V., Garufi F., **Gailler L.**, Labazuy P., Laktineh I., Lénat J.F., Masone V., Miallier D., Mirabito L., Morel L., Mori N., Niess V., Noli P., Pla-Dalmau A., Portal A., Rubinov P., Saracino G., Scarlini E., Strolin P., Vulpescu B., (2015) - Joint measurement of the atmospheric muon flux through the Puy de Dôme volcano with plastic scintillators and Resistive Plate Chambers detectors, *JGR Solid Earth*, 120, 7290–7307, <https://doi.org/10.1002/2015JB011969>.

2014

25. Brothelande E., Lénat J.-F., Finizola A., **Gailler, L.**, Chaput M., Dumont S., Peltier A., Bachèlery P., Barde-Cabusson S., Byrdina S., Menny P., Colonge J., Douillet G., Letort J., Merle O., Nakedau D., Garaebiti E., (2014) – Structure and dynamics of the Yenkahe resurgent dome-Yasur volcano system, Siwi caldera, Tanna Island, Vanuatu; Part I: Internal structure inferred from combined geophysical methods, *JVGR*, Special issue on SI: Vanuatu volcanoes, 322, 241-262, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.08.021>.
26. **Gailler L.S.**, Bouchot V., Martelet G., Thinon I., Coppo N., Baltassat J.M., Bourgeois B., (2014) - Contribution of multi-method geophysics to the understanding of a high-temperature geothermal province: the Bouillante area (Guadeloupe, Lesser Antilles), *JVGR*, 275, 34-50; <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.02.002>.

2013

27. **Gailler L.S.**, Martelet G., Thinon I., Bouchot V., Lebrun J.-F., Munch P., (2013) - Crustal structure of Guadeloupe Islands and the Lesser Antilles Arc from a new gravity and magnetic synthesis, *BSGF*, 184, 77-97, <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.184.1-2.77>.
28. Münch, P., J.-F. Lebrun, J.-J. Cornée, I. Thinon, P. Guennoc, B. Marcaillou, J. Begot, G. Bertrand, S. S. d. Berc, K. Biscarrat, C. Claud, L. D. Min, N. Feuillet, F. Fournier, **L. Gailler**, D. Graindorge, F. Leclerc, J.-L. Léticée, L. Marie, Y. Mazabraud, M. Melinte-Dobrinescu, P. Moissette, F. Quillevere, C. Verati, Randrianasolo A., (2013) - Pliocene-Pleistocene carbonate systems of the Guadeloupe archipelago, French Lesser Antilles: a land and sea study (the Kashallow project), *BSGF*, 184, 99-110, <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.184.1-2.99>.
29. Le Pennec, de Saulieu G., Samaniego P., Jaya D., **Gailler L.S.**, (2013) – A devastating plinian eruption at Tungurahua Volcano reveals formative occupation at CA 1100 CAL BC in Central Ecuador, *Radiocarbon* 55, 2-3, https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16225.

2012

30. **Gailler L.S.**, Lénat J.-F., (2012) - Internal architecture of La Réunion (Indian Ocean) inferred from geophysical data, *JVGR*, 221-222, 83-98, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.01.015>.

2011

31. Delcamp A. Van wyk de Vries B., James M. R., **Gailler L.**, Lebas L., (2011) - Relationship between volcano gravitational spreading and magma intrusion, *Bull. Volc.*, 74, 743-765, <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0558-9>.

2010

32. **Gailler L.S.**, Lénat J.-F., (2010) - 3D structure of the submarine flanks of La Réunion inferred from geophysical data, *JGR*, 115, B12, B12105, <https://doi.org/10.1029/2009JB007193>.

2009

33. **Gailler L.S.**, Lénat J.-F., Lambert M., Levieux G., Villeneuve N., Froger J.-L., (2009) Gravity structure of Piton de la Fournaise volcano and inferred mass transfer during the 2007 crisis, *JVGR*, 184, 31-44, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.024>.

2.2. Autres productions

2.2.1. Publications de Rang C

2024

Favennec B., Faisandier C., Chardonneau- Henneuse J., Delbey T. , de Senneville F.-D., Bonhoure D., Fer H., Gallet Y., Genevey A., **Gailler L.-S.**, Huart M., Thébault E., Vandewalle C., Visquenel-Schlosser V. (2024). Le groupement artisanal de l'Antiquité tardive de Las Cravieros à Fanjeaux (Aude) : lieu de production de poteries, de matériaux de construction et du travail du fer – deuxième rapport de la 2e triennale (2022-2024), 2023. INRAP Méditerranée. 487 p

Gailler L.-S., Thébault E., Gallet Y, Favennec B. (2024). Imagerie et prospection magnétique sur le site archéologique de Fanjeaux « Las Cravieros » (Aude). Institut national de recherches archéologiques préventives INRAP, Rapport final d'opération, pp.299-319

Thébault, E., **Gailler, L.S.**, Oehler, J. F., & Rouxel, D. (2024), Modélisation du champ MAGnétique principal par Inversion de données d'OBServatoires (MAGIOBS): étude de numérique de régularisation, Rapport technique, 30 pp, en révision.

Thébault, E., **Gailler, L.S.**, Oehler, J. F., & Rouxel, D. (2024), Modélisation du champ MAGnétique principal par Inversion de données d'OBServatoires (MAGIOBS): étude de résolution spatiale, Rapport technique, 18 pp, <https://cnrs.hal.science/OPGC/haI-04505145v1>

2023

Thébault, E., **Gailler, L. S.**, Oehler, J. F., & Rouxel, D. (2023). Modélisation du champ MAGnétique principal par Inversion de données d'OBServatoires (MAGIOBS): Etat de l'art, Rapport technique, 48 pp, <https://hal.science/hal-04505126/>.

2017

Portal A., **Gailler L.S.**, Boivin P., (2017) - Cent ans de géophysique éclairent la Chaîne des Puys, dans Des volcans aux nuages – L'observatoire de Physique de globe de Clermont-Ferrand, Revue d'Auvergne, 2, 197-216.

2015

Delcher E., · Finizola A., · Bonnier J., **Gailler L.**, (2015) - Etude structurale de la Plaine des Fougères (REUNION) par approche géophysique, Technical Report.

2020

Gailler L.S., (2010) - '*Structure interne d'un système océanique volcanique, La Réunion (Océan Indien) – Approches géophysiques*', Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans (France).

Gailler L.S., (2006) - 'Modélisation numérique des variations de gravité associées à des intrusions de dyke; Application à l'éruption de 1998 du Piton de la Fournaise', Mémoire de Master Recherche, Université Blaise Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans (France).

Gailler L.S., (2005) - '*Etude de trois éruptions bimodales du volcan Tungurahua (Equateur)*', Mémoire de Master 1, Université Blaise Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans (France).

2.2.2. Cartes géophysiques

Contribution aux données géophysiques de la carte volcanologique de la Chaîne des Puys :

Boivin P., Besson J.C., Briot D., Deniel C., Gourgaud A., Labazuy P., Langlois E., Larouzière F.D. de, Livet M., Merciecca C., Médard E., Mergoil J., Miallier D., Morel J.M., Thouret J.C., Vernet G. (2017). *Volcanologie de la Chaîne des Puys Massif Central Français*. 6e édition, bilingue. Carte 1/25 000. p.200 p., Édition Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne Château de Montlosier, Randanne, 63970 Aydat.

2.3. Actes publiés de conférences internationales, congrès et colloques

2024

Gailler L., Labazuy P., Guillard R., Buvat S., Grace C., Thébault E., Régis E, and the ERT3D Scan4Volc (2024). Active structures and thermal state of the Piton de la Fournaise summit revealed by multi-methods high resolution imaging. EGU 2024, Online presentation, 17 avril 2024.

Boudoire G., **Gailler L.**, Battaglia J., Cayol V., Deniel C., Douchain J.-M., Freville P., Gauthier P.-J., Grace C., Grunberg M., Laporte D., Medard E., Merciecca C., Labazuy L., Régis E., Souriot T., Thébault E. & the PROVA² consortium and partners (SNOs, CEA, INGV, CNR, UNIPG, UNIBAS). The 2021-2022 seismic swarm in Monts Dore (France): Processes and outlook in terms of monitoring strategies. Workshop G3FMC (Clermont-Ferrand), 2024/03/27.

2023

Thébault, E., & **Gailler, L. S.** (2023, November). Traitement, réduction et analyses in-situ des levés magnétiques aéroportés en contexte volcanique. In 1ères Rencontres Epos-France, Saint Jean Cap Ferrat (7-10 novembre 2023).

Gailler L., Labazuy P., Cayol V., Chevrel O., Donnadiou F., Fréret Lorgeril V., Gouhier M., Guillard R., Jessop D., Kelfoun K., Lénat J.F., Moune S., **Thébault E.**, and the LMV-OPGC technical and scientific team. Instrumentation in extreme environments, applications to volcanic contexts: Imaging and dynamics (Ground, UAV & in-situ measurements). Poster 1^{ères} Rencontres EPOS-France – Saint Jean Cap Ferrat (7-10 novembre 2023).

Boudoire G., **Gailler L.**, Battaglia J., Cayol V., Deniel C., Douchain J.-M., Freville P., Gauthier P.-J., Grace C., Grunberg M., Laporte D., Medard E., Merciecca C., Labazuy L., Régis E., Souriot T., Thébault E. & the PROVA² consortium and partners (SNOs, CEA, INGV, CNR, UNIPG, UNIBAS). Retour sur l'essai sismique 2021-2022 des Monts Dore (France). Workshop 1^{ère} Rencontres scientifiques sur les volcans français, CNFGG (Clermont-Ferrand), octobre 2023.

Guillard R., **Gailler L.**, Labazuy P., Régis E., Evolution of UAV magnetic prospecting in extreme environments : new insights on volcanoes spatio-temporal imaging. Poster Drones & Cap' (Drones et capteurs embarqués) – novembre 2023.

Cioliczyk D., Reninger P.-A., Bertin C., Bernard J., Merle O., Raingeard A., Martelet G., Belle P., **Gailler L.**, Labazuy P., AEM-derived watersheds in crystalline domain under volcanic cover, 8th International Airborne Electromagnetics Workshop, 2023/9/3.

Thébault E., **Gailler L.**, A quick-look software for in-situ magnetic field modelling from Unmanned Aircraft Vehicles (UAVs) magnetic field measurements. IUGG Berlin, session V09 Advanced Remote Sensing Techniques to Study Volcanic Hazards (11-20 juillet 2023).

Sampietro D., Capponi M., Thébault E., **Gailler L.**, Mediterranean Sea Crustal Structure from Potential Fields, Results of XORN Project. EGU23 11094 – 23-28 Avril 2023.

2022

Rafflin V., Boudoire G., Harris A., **Gailler L.**, Massaro S., Costa A., Stocchi M., Grassa F., Giuffrida G., Liuzzo M., Cluzel N., Gal F., Planche C., Padeloup G., Banson S., Multi-hazard assessment in a quiescent volcanic area: the case study of Lake Pavin (France) and its surroundings. Cities on Volcanoes 11. E-poster- (12-17 juin 2022).

2021

Gailler L., Régis E, Labazuy P, Structure thermique de la zone sommitale du Piton de la Fournaise révélée par mesures magnétiques et Infrarouge aéroportées. Oral workshop Drones & Cap' (Drones et capteurs embarqués) – septembre 2021.

Régis E, **Gailler L.**, Labazuy P, Bontemps M, Souriot T, Bacques G, Carton B. (2021). Mesures magnétiques par drone : Une nouvelle approche dédiée au suivi 4D des édifices volcaniques. Poster workshop Drones & Cap' (Drones et capteurs embarqués) – septembre 2021.

Régis E, **Gailler L.**, Labazuy L, Bontemps M, Souriot T, Bacques G, Moune S. Carton B. (2021). Présentation des actions R&D en instrumentation géophysique embarquée sur drone menées à l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont : Capteur multi-gaz et P1Radar. Poster workshop Drones & Cap' (Drones et capteurs embarqués) – septembre 2021.

Aumar C., Buvat S., Labazuy P., Merle O., **Gailler L.**, Donnadiou F., Souriot T., Merciecca C. (2021). 3D geological modelling in a volcanic environment with a combined geophysics - geomorphology approach: The case study of the Cheire de Côme (Puy de Dôme, France). Ecole d'été OZCAR: Observatoire de la Zone Critique: Applications et Recherches, Barcelonnette (France), Juillet 2021.

2020

Gailler L., Labazuy P., Régis E. (2020) - Airborne magnetic measurements by drone: A new approach dedicated to 4D volcanoes monitoring; Cities on Volcanoes 11 – Oral Heraklion, Crete, September 2020 – reporté cause situation sanitaire.

Philippon M., Cornee J.J., Munch P., Boudagher-Fadel Marcelle K., **Gailler L.**, Quillevere F., Leticee J.L., Boschman L., van Hinsbergen D., Lebrun J.F., Lallemand S., Marcaillou B., Schenini L., Garanti And Antithesis Teams (2020). Investigating Northern Lesser Antilles strain evolution during Eocene. Caribbean Science and Innovation Meeting 2018, Pointe-à-Pitre (Guadeloupe), 2020-02-21.

2019

Barnoud A., Cayol V., **Gailler L.**, Smittarello D., Bodart O., Dumont Q., Hrysiewicz A., Dabaghi F., Froger J.L., Peltier A., Chevrel O., Roult J., Chaput M. (2019). Towards joint modelling and inversion of surface displacements and microgravimetric temporal variations for the characterization

of eruptive sources at the Piton de la Fournaise volcano. 4èmes Rencontres Scientifiques et Techniques RESIF 2019, Biarritz (64), France.

Barnoud A., Cayol V., **Gailler L.**, Smittarello D., Bodart O., Dumont Q., Hrysiewicz A., Dabaghi F., Froger J.L., Peltier A., Chevrel O., Roult J., Chaput M. (2019). Towards joint modelling and inversion of surface displacements and microgravimetric temporal variations for the characterization of eruptive sources at the Piton de la Fournaise volcano. Workshop MDIS-2019 / Mesure de la Déformation par Imagerie Satellitaire, La Petite-Pierre (67), France.

Paris A., Heinrich P., Paris R., Guérin C., Hébert H., **Gailler L.** (2019). Numerical modelling of the December 22, 2018 Anak Krakatau landslide and the following tsunami in Sunda Strait, Indonesia. Oceans 2019, Marseille, France, 17-20/06/2019.

Peltier A., Finizola A., Delcher E., Chaput M., **Gailler L.**, Francke J., Froger J.L., Villeneuve N., Cluzel N., Del Manzo G., Soler F., Gusset R., Gonano E. (2019). Imaging the deep interior of Piton de la Fournaise. Geophysical Research Abstracts, Vol.21, EGU2019-5167, EGU General Assembly, Vienna (Austria), 7-12 April 2019.

Peltier A., Finizola A., Delcher E., Chaput M., **Gailler L.S.**, Villeneuve N., Froger J.L., Cluzel N. (2019) - Imaging the deep interior of Piton de la Fournaise, Abstract SM4.5/GD6.13/GMPV5.19 – Geophysical imaging of volcanoes, EGU General Assembly 2019, Vienne (Autriche), 7-12 Avril 2019.

Philippon M., Cornée J.J., Leveneur E., Münch P., Bou-Dagher Fadel M., **Gailler L.**, Quillévéré F., Léticée J.L., Boschman L., van Hinsbergen D., Lallemand S., Lebrun J.F., and the GARANTI Team (2018) - Mid-Eocene thrusting in the Northern Lesser Antilles: Unraveling the eastern imprint of the Bahamas Bank collision. Poster, AGU Fall Meeting, Washington, D.C., 10-14 Décembre 2018.

2018

Peltier A., Fontaine F. J., Finizola A., Richter N., Villeneuve N., Di Muro A., Froger J.L., Got J.L., Antoine R., Delcher E., Chaput M., **Gailler L.S.**, Cluzel N., SlideVOLC project (2018) - Volcano Destabilizations: From Observations to an Integrated Model of Active Deformation; Abstract 350785, Poster, AGU Fall Meeting, Washington, D.C., 10-14 Décembre 2018.

Gailler L.S., Martí A., Lénat J.F. (2018) - Complex structure of Piton de la Fournaise and its underlying lithosphere revealed by magnetotelluric 3D inversion, EMIW2018, Helsingor (Danemark). Poster, 13-20 Août 2018.

Carloganu C. and the TOMUVOL collaboration, (2018) - Density Imaging of Puy de Dôme Volcano with Atmospheric Muons in French Massif Central as a Case Study for Volcano Muography. Oral, EGU General Assembly 2018, Geophysical Research Abstracts Vol. 20, EGU2018-18420, Vienne (Autriche), 8-13 Avril 2018.

2016

Poret M., Ricci T., Finizola A., Delcher E., Peltier A., and the Vesuvius Team ERT 2014, (2016) - Multidisciplinary investigation (ERT, CO₂, SP and T) reveals fluid circulation at Somma-Vesuvius. Poster, EGU General Assembly 2016, Geophysical Research Abstracts Vol.18, EGU2016-8778, Vienne (Autriche), 17-22 Avril 2016.

2015

Gailler L.S., Martelet G., Thion I., Münch P., Arcay D., (2015) - Depth to Curie temperature or magnetic sources bottom in the Lesser Antilles Arc volcanic area. Oral, EGU General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts Vol.17, EGU2015-6124, Vienne (Autriche), 12 – 17 Avril 2015.

Gailler L.S., Lénat J.F., Blakely R., (2015) – Curie Point Depth beneath the Reunion Island volcanic system inferred from spectral analysis of magnetic anomalies. Poster, EGU General Assembly 2016, Geophysical Research Abstracts Vol.17, EGU2015-6060, Vienne (Autriche), 12 – 17 Avril 2015.

Miallier, D., Boivin P., Pilleyre, T., Labazuy P., **Gailler L.**, Portal A., Rico, J., (2015) - Variability of the monogenetic concept exemplified by the Grand Sarcoui dome (Chaîne des Puys, France). Poster, 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Prague (République tchèque), 22 juin-2 Juillet 2015.

Portal A., **Gailler L.**, Lénat J.F., Labazuy P., (2015) - Internal structure of a complex lava dome and of its surrounding inferred from gravity and magnetic data. Oral, EGU General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts Vol.17, EGU2015-3847, Vienne (Autriche), 12-17 Avril 2015.

2014

Gailler L.S., Lénat J.F., Blakely R., (2014) – Curie Point Depth beneath the Reunion Island volcanic system inferred from spectral analysis of magnetic anomalies. Poster, Cities on Volcanoes 8, Yogyakarta (Indonésie), 9-13 Septembre 2014.

Gailler L.S., and the Tomuvol collaboration (2014) – The Tomuvol Project: Technical evolution and scientific contributions to volcanoes high resolution imaging. Oral, Cities on Volcanoes 8, Yogyakarta (Indonésie), 9-13 Septembre 2014.

Le Pennec J.-L., De Saulieu G., Samaniego P., Jaya D., **Gailler L.** (2014) – Oldest known volcanic disaster in the Andes revealed by Formative ceramics in 3 ka BP deposits at Tungurahua avolcano, Ecuador, with implications for hazard assessment. Oral, Cities on Volcanoes 8, Yogyakarta (Indonésie), 9-13 Septembre 2014.

2012

Gailler L.S., Martelet G., Thion I., Bouchot V., Lebrun J.-F., Munch P. (2012) - Crustal structure of Guadeloupe Islands and the Lesser Antilles Arc from a new gravity and magnetic synthesis. Oral, CNFGG, Clermont-Ferrand (France), 10-12 Octobre 2012.

Gailler L.S., Bouchot V., Baltassat J.M., Bourgeois B., Coppo N., Martelet G., Thion I. (2012) - Contribution of multi-method geophysics to assess the regional setting of Bouillante Geothermal Province. Oral, CNFGG, Clermont-Ferrand (France), 10-12 Octobre 2012.

Gailler L.S., Lénat J.-F. (2012) - Internal architecture of La Réunion (Indian Ocean) inferred from geophysical data. Oral, Muon and Neutrino Radiography, Clermont-Ferrand (France), 18-20 Avril 2012.

Gailler L.S., Martelet G., Thion I., Bouchot V., Lebrun J.-F., Munch P. (2012), Crustal structure of Guadeloupe Islands and the Lesser Antilles Arc from a new gravity and magnetic synthesis. Oral, Muon and Neutrino Radiography, Clermont-Ferrand (France), 18-20 Avril 2012.

2011

Gailler L.S., Bouchot V., Baltassat J.M., Bourgeois B., Coppo N., Martelet G., Thinon I. (2011) - Contribution of multi-method geophysics to assess the regional setting of Bouillante Geothermal Province. Oral, 19th Caribbean Geological Conference, Le Gosier (Guadeloupe), 21-24 mars 2011.

2010

Gailler L.S., Lénat J.-F. (2010) - Internal structure of a hot spot oceanic volcanic system, La Réunion-Geophysical approaches. Oral, ESC, Montpellier (France), 6 Septembre 2010.

Gailler L.S., Lénat J.-F. (2010) - Architecture and evolution of La Réunion inferred from geophysical data. Oral, EGU General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts Vol.12, EGU2010-4320, Vienne (Autriche), 2-7 Mai 2010.

2009

Gailler L.S., Lénat J.-F. (2009) - 3D structure of Reunion Island (Indian Ocean) inferred from geophysical data. Oral, ILP Joint Task Force Meeting, Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal (France), 5-9 octobre 2009.

2008

Gailler L.S., Lénat J.-F., Lambert M., Levieux G., Villeneuve N., Froger J.-L. (2008) - Structure and change of Piton de la Fournaise volcano inferred from gravity surveys, (Reunion Island, Indian Ocean). Poster, AGU Fall Meeting, Eos. Trans., 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract V11B-2045, San Francisco (USA), 15-19 décembre 2008.

Gailler L.S., Lénat J.-F. (2008) - Submarine structure of Reunion Island (Indian Ocean) inferred from gravity. Poster, AGU, Eos. Trans. Poster, AGU Fall Meeting, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract V11B-2046, San Francisco (USA), 15-19 décembre 2008.

2005

Van Wyk de Vries B., Wooller L., Lambart S., **Gailler L.** (2005) - Landforms and structures associated with volcano spreading. Poster, EGU General Assembly 2005, Geophysical Research Abstracts Vol.7, 03045, Vienne (Autriche), 24-29 Avril 2005.

2.4. Séminaires

L. Gailler : *Project ANR JCJC Scan4Volc - SCANNing volcanoes with ground and UAV geophysics: Toward an integrated 4D modelling of VOLCanic dynamics*, Séminaire LMV, 04/11/2021.

L. Gailler, O. Chevrel, A. Barnoud, T. Souriot, P. Labazuy : *Bilan des campagnes de mesures géophysiques 2019 (Piton de la Fournaise, Islande)*. Séminaire LMV, octobre 2019.

L. Gailler : *'Apports des méthodes géophysiques à la détection et l'imagerie des systèmes volcaniques, l'exemple d'Hawaii'*. Séminaire Laboratoire ; ISTerre Chambéry, 11/06/2019.

L. Gailler : *'Imagerie des zones actives par détermination du point de Curie'* ; Séminaire Laboratoire ; Laboratoire Magmas et Volcans, 25/09/2018.

L. Gailler : ‘*Une expérience unique de détection des systèmes magmatiques actifs par approche géophysique*’ ; Séminaire Laboratoire ; Laboratoire Magmas et Volcans, 10/05/2016.

L. Gailler : 1) Suivi du refroidissement du lac de lave du Kilauea Iki (Hawaii) par répétitions magnétiques depuis 50 ans. 2) Bilan de la campagne de tomographie de résistivité électrique dans l’environnement du lac de lave du Kilauea. Séminaires ; USGS Hawaiian Volcano Observatory, décembre 2015.

L. Gailler : ‘*Apports de la géophysique multi-méthodes à l’étude des Petites Antilles - La Guadeloupe, un témoin majeur dans l’évolution volcano-tectonique de l’Arc?*’ ; Séminaire Laboratoire ; Laboratoire Géosciences Montpellier, 28/03/2013.

2.5. Chapitres d’ouvrages

Gailler L., Lénat J.F. and F. Donnadiou (2021). Chapitre 4. La surveillance gravimétrique des volcans. Dans *Aléas et surveillance de l’activité volcanique 3* (ISTE Editions), p.235-262.

Gailler L., Lénat J.F. and Labazuy P. (2021). Chapitre 5. Surveillance électrique et électromagnétique des volcans. Dans *Aléas et surveillance de l’activité volcanique 3* (ISTE Editions), p.263-284.

Gailler L. and Lénat J.F. (2021). Chapitre 6. La surveillance magnétique des volcans. Dans *Aléas et surveillance de l’activité volcanique 3* (ISTE Editions), p.285-300.

3. Encadrement et formation à la recherche

3.1. Enseignements

2019-2024 : Service d’enseignement physicienne adjointe (66h statutaires)

Ecole de l’OPGC, UFR de Biologie, Clermont-Ferrand

- Outils géophysiques et géochimiques (CAPES-AGREG UFR Biologie : 15h/an CM/TD ; L3) Sciences de la Terre.
- Analyse de données et méthodologie de terrain, cartographie numérique (EOPGC : 36h/an terrain, TP/TD ; L3) - *Remplacé par le module géophysique en 2023.*
- Géophysique pour la géotechnique (EOPGC Master 3G : 3h/an terrain, CM/TD ; M1)
- Imagerie et télédétection (EOPGC Master MV : 1.5h/an terrain, CM/TD ; M1)
- Cartographie : des volcans aux formations superficielles (EOPGC Master MV & 3G : 6h/an terrain, TD ; M1)
- Géophysique (EOPGC Master 3G : 25h terrain; M1) – *En remplacement stage terrain en 2023 et complément 2024.*
- Création et *Co-responsable du module* Identification des stratégies de surveillance opérationnelle depuis 2022 (EOPGC Master MV : 7h/an terrain, TD ; M1)

2013-2018 : Vacances post-doctorales

Université Blaise Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans, Ecole Polytech Clermont-Ferrand, Université Montpellier II

- Géologie générale (UBP-LMV : 12 h de terrain ; L1 – toutes filières, option géologie)
- Modélisation analogique (UBP-LMV : 12 h TP-TD ; L1 – toutes filières)

- Approche géotechnique du terrain par l'étude de cas (UBP-LMV : 15 h Terrain-TP-TD ; L3)
- Pétrologie magmatique (UBP-LMV : 21 h TP ; L1 – toutes filières)
- Géophysique appliquée (UBP-LMV : 4 jours de terrain, 16 h TP-TD ; M2 Pro.: 2013 - 2015)
- Géophysique appliquée à la géothermie (Univ. Montpellier II : 4 h TP-TD ; M2 R: 2011 - 2015)
- Géophysique aéroportée (UBP-LMV : 4h présentation générale; L3, 2018)
- Introduction aux métiers de la Recherche (Université Clermont Auvergne, Laboratoire Magmas et Volcans): l'exemple de la géophysique aéroportée / L3

2012-2013 : Demi ATER

Université Blaise Pascal, Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont-Ferrand

- Modélisation analogique des processus volcanologiques (TP ; L1)
- Initiation à la géologie (Terrain, TP ; L3)
- Géophysique multi-méthodes (TD-Terrain ; M2 Pro)
- Etude macroscopique et microscopique des roches magmatiques (TP ; L1)
- Approche géotechnique du terrain par l'étude de cas (Terrain ; L3)
- 2006-2007
- Vacation doctorale : Cartographie (UBP-LMV :TP ; L3)

3.2. Encadrement postdoctoral

- Post-doctorat ANR Scan4Volc : 01/04/2023 – 30/06/2024 (UCA-LMV, S. Buvat)
'Imagerie haute résolution du Piton de la Fournaise par tomographie de résistivité électrique 3D, contribution à l'implémentation d'une base de données multi-paramètres'
Encadrement 100 %.
- Ingénieur de Recherche : 01/10/2023 – 30/09/2024 (CNRS-LMV, SHOM, P.Y. Tournigand)
'Traitement de données et calcul scientifique' *Encadrement 10%.*

3.3. Encadrement doctoral

- ANR Scan4Volc : 01/10/2022 – 30/09/2025 (UCA-LMC, R. Guillard)
'Imagerie 4D multi-paramètres de la dynamique du Piton de la Fournaise '
Encadrement 75% en collaboration avec Erwan Thébaud, Philippe Labazuy, Aline Peltier
- Projet Aérovergne : 01/10/2021 – 30/09/2024 (UCA-LMV, BRGM, D. Ciolczyk)
'Méthodologie d'analyse conjointe de données aéroportées d'électromagnétisme, magnétisme et gamma-spectrométrie, pour la caractérisation hydrogéologique du sous-sol – Application à la Chaîne des Puys'
Directeurs de thèse: Guillaume Martelet (BRGM), Olivier Merle (LMV)
Implication dans le suivi de la thèse 30%.
- Projet Degazrift : 01/10/2020 – 30/09/2023 (UCA-LMC, V. Rafflin)
'Place du dégazage de CO₂ dans la qualification de l'aléa volcanique: contraintes apportées par la modélisation numérique'
Directeurs de thèse: Guillaume Boudoire & Andrew Harris
Implication dans les aspects géophysiques complémentaires 10%.

3.4. Encadrement pré-doctorat

- 2024 : Contrat Ingénieur de Recherche en vue de l'obtention d'une thèse CIFRE (UCA-LMV-Albioma, C. Grace)

'Synthèse et inversions de 1er ordre des données géophysiques historiques disponibles sur le Piton des Neiges (Gravimétrie, Magnétisme, Magnétotellurique) - Secteurs Salazie et Cilaos'

Encadrement 100%

- 2023 : Stage de Master 2 Recherche (UCA-LMV, C. Grace)

'Suivi des variations de résistivités et des anomalies thermiques à l'aplomb des édifices volcaniques' en lien avec PROVA²

Encadrement 50% en collaboration avec Guillaume Boudoire

- 2023 : Mise en place d'un stage de L0 (mise à niveau scientifique, UCA-LMV, C. Renaud) sur une semaine

Encadrement 100%

- 2022 : Stage de Master 2 recherche (UCA-LMV, R. Guillard)

'Etude multiparamétrique de l'éruption paroxysmale d'avril 2020 du Piton de la Fournaise : Approches structurale et géophysique'.

Encadrement 75% en collaboration avec Philippe Labazuy

- 2022 : Stage de Master 1 Recherche (UCA-LMV, C. Grace)

'Apport des mesures magnétotelluriques dans la caractérisation de la structure interne du Piton de la Fournaise'.

Encadrement 75% en collaboration avec Philippe Labazuy

- 2015 : Stage de Master 1 Recherche (UBP-LMV, J. Ricco):

'Etude géophysique d'un dôme volcanique (Grand Sarcoui, Chaîne des Puys)'

Encadrement 50% en collaboration avec Didier Miallier

3.5. Jury

J'interviens en tant que membre de jury de thèse, de Master 2 au LMV depuis 2019, en remplacement ponctuel dans les comités d'attribution des bourses doctorales, ainsi que dans les comités de suivi de thèse.

- 2023-2026 : Membre du CSI (experte extérieure) de Camila Celeste Riba Pereyra (ISTerre Chambéry)

• 2024 : Membre du jury de thèse de Sophie Pailot Bonnetat en tant qu'examinatrice (UCA-LMV) : (07/06/2024). 2021 : Membre du jury de thèse d'Antoine Coperey en tant qu'examinatrice (ISTerre Chambéry) : (06/04/2021).

- 2020 : Remplaçante dans le jury de l'Ecole Doctorale pour l'équipe volcanologie

• 2018 : Jury Master 2 Recherche (UCA-LMV) : Combining ground- and ASTER-based thermal measurements to constrain fumarole field heat budgets: the case of Vulcano Fossa, 2000-2018 – *étudiant : Stefano Mannini*

3.6. Diffusions et animations scientifiques

Dans le cadre de la Graduate Track InVolec destinée à préparer la future offre de formation pédagogique, j'ai contribué en 2023, en collaboration avec G. Boudoire, à l'école d'été sur les volcans italiens dédiée à la volcanologie moderne.



L'objectif était de présenter et discuter la mise en œuvre et l'apport de différentes méthodes géophysiques sur le terrain, une intervention qui sera dans un premier temps réitérée en 2025.

Je m'investis également dans différentes actions de diffusion et de vulgarisation scientifique, en tant qu'animatrice scientifique et pédagogique dans plusieurs domaines de la volcanologie :

- Podcast pour EPOS-France et panneau informatif pour Vulcania sur l'activité sismique récente à l'aplomb des Monts Dore et les actions menées au sein du LMV et de l'OPGC (juin 2024).
- Conférence grand public sur le thème de la volcanologie, et plus précisément sur les technologies de pointe utilisées pour la recherche et la surveillance de l'activité volcanique le 30/11/2023 au Musée des Confluences à Lyon (Cellule Communication grand public et scolaire du CNRS Rhône Auvergne).
- Ateliers grand public à Vulcania, création d'un atelier drone pour la Fête de la Science à l'UCA à laquelle je participe chaque année, à l'OPGC et lors d'une journée au sommet du Puy de Dôme.
- Les drones au service de la volcanologie. Rédaction d'un article pour la revue LAVE mars 2020 (L. Gailler, P. Labazuy, E. Régis)
- Participation à l'émission 'C'est toujours pas sorcier' (2019) sur la Chaîne des Puys et l'instrumentation en volcanologie.

4. Projets nationaux et internationaux

4.1. Projets terminés

- **Projet XORN (eXperimental jOint inveRsioN project ; PI Daniele Sampietro – 2022-2023)**, un consortium regroupant le GReD et le LMV (30 k€) ainsi que l'ESA. L'objectif était de contribuer au développement de l'inversion 3D conjointe des champs gravitationnels et magnétiques au moyen d'une approche bayésienne probabiliste, en améliorant la connaissance de la croûte terrestre dans la région de la mer Méditerranée (<https://xorn-project.eu/project/>).
- **Improve** (PI Claire Bouligand, 2021-2023) : Apports combinés de l'imagerie géophysique et de l'analyse pétrophysique pour distinguer les zones actives des zones fossiles dans un système géothermique (Krafla, Islande).
- **Caprice** (PI P. Labazuy, 2018-2021, Financement FEDER) : Approche interdisciplinaire pour la caractérisation de la ressource en eau de la Chaîne des puys.
- **Projet I-Site Cap 2025 pluridisciplinaire sur le Masaya** (Nicaragua, PI : P.J. Gauthier, 2018-2022, financement I-Site CAP 2025)
- **EUROVOLC (2019-2021)**, Implication dans le WP5 (Task 5.2).

- **Huayaruuro (2018-2020)**, Collaboration franco-péruvienne LGSR, LMV, CEREMA, INGEMET) : projet pluridisciplinaire dédié à la valorisation d'anciens villages incas, enfouis durant une éruption volcanique survenue en 1600 à 80 km d'Arequipa, au Sud du Pérou.
- **GARanti (PI P. Munch, 2017-2021, financement ANR)** : Sur les traces des anciennes voies de dispersion d'espèces vers les Antilles.
- **GemGas (PI L. Lévy, 2019-2022)**, Program of Integrated Actions « Jules Verne » French – Icelandic scientific cooperation) : <https://www.gemgasresearch.com/project-life>
- **Actions incitatives OPGC**
2020-2021 Nouveau réseau de stations magnétiques permanentes au Piton de la Fournaise
2019-2020 Suivi des volcans français par géophysique multi-méthodes, sol et aéroportée
- **Participation aux actions sur projets INSU TelluS** : *Imagerie électrique du dôme de la Soufrière (J. Vandemeulebrouck)*
- **Projet IsTerre-LMV dans la continuité de l'ANR SlideVolc**: *Imager la surface de glissement du Flanc Est du Piton de la Fournaise par tomographie MT (J.L. Got)*
- **Projets CNES** du LMV (Volcadrone, 2016-2020, PI P. Labazuy), avec pour ambition de développer les technologies indispensables à la caractérisation physique et chimique in-situ des émissions volcaniques à partir de capteurs embarqués sur drone, sur sites volcaniques actifs.
- **Portage complet du projet scientifique Labex ClerVolc-Insu (28 k€)** sur le lac de lave du Kilauea (Hawaii)

4.2. Projets financés en cours

- **Projet ANR JCJC** à hauteur de 460 k€ financé au 1^{er} janvier 2022 pour les quatre prochaines années (<https://lmv.uca.fr/scan4volc/>). SCANning volcanoes with ground and UAV geophysics: Toward an integrated 4D modelling of VOLCanic dynamics
- **Projet CNES RMagEDrone dans la continuité de Volcadrone** (PI : P. Labazuy) financé depuis 2021 (environ 10 à 15 k€/an), permettant de poursuivre et renforcer cette expertise dans le domaine de la géophysique aéroportée par drones, et ainsi apporter davantage de contraintes à la connaissance et à la dynamique des édifices volcaniques, tout en exploitant les données de la mission européenne SWARM pour la réduction semi-automatisée des données magnétiques, avec une vision à plus long terme
- **Projet ANR DGMod**, PI : V. Cayol, LMV (2024-2027): Towards a new generation of joint InSAR - gravity inversions.
- **Projet MAGIOBS** : (E. Thébault, L. Gailler en collaboration avec le SHOM – 2023-2025) Modélisation du champ MAGnétique principal par Inversion de données d'OBServatoires.
- **Projet ANR Mygale**, PI Mike Heap (2022-2025) : Modelling the phYsical and chemical Gradients of hydrothermal ALteration for warning systems of flank collapse at Explosive volcanoes.

4.3. Projets en cours non financés

- **Proposition ANR**, PI G. Boudoire, LMV-UCA DarkGas : The Dark side of volcano-tectonic deGassing.

•

5. Rayonnement scientifique

5.1. Implication dans des réseaux de recherche et d'observation

En tant que Physicienne adjointe je suis impliquée dans le Service National d'Observation en Volcanologie (<https://opgc.uca.fr/volcanologie>) dans le cadre de mon service d'observation sur les Volcans Français et contribue aux liens entre différents services d'observation (Service National d'Observation en Gravimétrie, Bureau Central de Magnétisme Terrestre).

Je suis également membre de Conseils Scientifiques et de pilotage en lien avec mes thématiques de recherche et d'observations :

- Membre du conseil scientifique du pôle FormaTerre (<https://www.poletterresolide.fr/>) dédié à faciliter l'accès aux données numériques tout en fournissant des services et des outils pour les découvrir, les traiter et les analyser (pôle supervisé par le Centre National d'Etudes Spatiales-CNES).
- Membre du conseil scientifique de l'Infrastructure de Recherche EPOS-Fr (<https://www.epos-france.fr/>) dans le déploiement de l'infrastructure de recherche nationale.
- Membre du comité Terre Océan Surface Continental Atmosphère (TOSCA) pour la section Terre Solide du CNES.
- Membre du comité de pilotage du réseau CNRS « Drones & Cap' » (<https://drones-cap.cnrs.fr/>) et correspondante « Milieux extrêmes ».

5.2. Administration de la recherche et de l'enseignement

- Membre élue du Conseil Pédagogique de l'école de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC) depuis 2021.
- Membre élue du Conseil d'Administration de l'OPGC depuis 2022.
- De 2013 à 2019 j'ai été représentante du LMV à la réunion Gmob (parcs instrumentaux gravimétriques, INSU).

5.3. Contribution à des comités éditoriaux et expertise d'articles

Je participe régulièrement aux reviews de différentes revues de rang A, parmi lesquelles Journal of Geophysical Research, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Remote Sensing.

5.4. Participation à des comités scientifiques, d'évaluation

En parallèle, j'ai localement élargi mes actions d'observation au cours de l'année 2022 pour apporter une réponse opérationnelle rapide dans le cadre de l'activité sismique enregistrée dans le secteur des Monts Dore depuis novembre 2021.



Nous avons, en collaboration avec Guillaume Boudoire (UCA), créé le Pôle Régional d'Observation de l'activité Volcano-tectonique d'Auvergne et d'Ardèche (PROVA²), pour contribuer au suivi de cette activité sismique exceptionnelle comme décrit dans l'exposé scientifique.

5.5. Organisation de colloque et journées scientifiques



Je suis membre du Comité de Pilotage du réseau Drones et Capteurs depuis 2021 (<https://hal.science/DRONES-ET-CAP>) et contribue à la mise en place des journées de rencontres prévues en septembre 2025 dans le Massif Central.

Exposé scientifique

Cet exposé scientifique présente une vision intégrée de mes principaux axes d'études synthétisant l'ensemble des travaux de recherche mais également d'observations, ainsi que les perspectives de projets, dédiés à :

- ❶ Imager la structure interne des édifices volcaniques,
- ❷ Caractériser l'évolution des systèmes et suivre la dynamique éruptive,
- ❸ Tendre à une imagerie spatio-temporelle (4D) haute résolution des systèmes volcaniques.

Ces différents volets sont abordés par l'intermédiaire d'une approche géophysique multi-méthodes et multi-échelles, à la fois spatiales et temporelles, conciliant ainsi les domaines de la recherche et de l'observation, au cœur du corps des CNAP.

NB : Les citations relatives aux thématiques directement abordées dans ce mémoire sont en caractères gras, l'ensemble des publications et contributions est en parallèle référencé dans la présentation administrative.

Une Terre de volcans, de nombreuses rencontres, une réelle aventure, que traduisent parfaitement ces quelques mots symboliques à mes yeux :

“I think geophysics attracted him because he loved puzzles”

Jeri Gertz, in loving memory of Jim Kauahikaua.

Un immense puzzle autour de la volcanologie et de la géophysique, initié dès le doctorat aux côtés de Jean-François Lénat. Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches m'en a offert une rétrospective enrichissante avec de nombreuses réflexions et d'innombrables perspectives.

Je tenais à remercier les membres du jury d'avoir accepté de rapporter ce mémoire, et souhaiterais exprimer chaleureusement ces remerciements à l'ensemble des personnes qui ont contribué à tous les niveaux, de très près ou d'un peu plus loin, à la réalisation de ces travaux, pour m'avoir formée, accompagnée, soutenue et offert la liberté de pouvoir m'exprimer au fil du temps, et qui le font encore.

La liste est longue, ma reconnaissance d'autant plus grande et parfois un seul mot est porteur d'un sens profond : merci !

SOMMAIRE DE L'EXPOSE SCIENTIFIQUE

Liste des Figures.....	31
-------------------------------	-----------

Introduction et résumé sur l'originalité des recherches.....	33
---	-----------

Section 1 : problématiques majeures et apports de la géophysique

Chapitre 1. Problématiques majeures en volcanologie, mesures géophysiques et notion d'échelles	35
---	-----------

1.1. Généralités et enjeux volcanologiques.....	35
1.2. Intégration des mesures géophysiques.....	37
1.3. Notions d'échelles spatio-temporelles	38

Chapitre 2. Apports de la géophysique multi-méthodes à la connaissance des édifices volcaniques et développements récents	41
--	-----------

2.1. Principales considérations sur les variations géophysiques structurales et temporelles.....	41
2.1.1. Sources des anomalies gravimétriques et mécanismes de variations de densité	42
2.1.2. Sources des anomalies magnétiques et mécanismes de variations d'aimantation.....	43
2.1.3. Sources des contrastes de résistivité électrique et évolution des zones conductrices	44
2.2. Développements récents autour de la composante aéroportée.....	45
2.3. Modélisations numériques et contraintes associées.....	50

Section 2 : Intégration des principaux axes de recherches, synthèse et perspectives

Chapitre 3. Intégration des travaux de recherche.....	53
--	-----------

3.1. Structure interne des édifices volcaniques : architecture globale et héritage structural.....	53
3.1.1. Contrastes structuraux et lithologiques	53
3.1.2. Système volcano-tectonique régional.....	56
3.2. Détection et imagerie des zones magmatiques et hydrothermales	58
3.2.1. Relations entre hétérogénéités mécaniques et instabilités.....	61
3.2.2. Applications à l'évaluation du potentiel hydrologique et géothermique	63
3.3. Evolution des systèmes et suivi de la dynamique volcanique	64
3.3.1. Caractérisation des structures de déformations.....	64
3.3.2. Quantification des paramètres éruptifs et transferts superficiels	65
3.3.3. Suivi des zones de stockages magmatiques et hydrothermales	67
3.3.4. Apports aux stratégies de surveillance volcanique	69
3.4. Développements méthodologiques et numériques.....	72
3.4.1. Contribution à l'évolution des techniques de modélisations et protocoles dédiées.....	72
3.4.2. Implémentation de la méthode d'intercorrélation.....	74

Chapitre 4. Synthèse et perspectives du projet personnel : vers une modélisation 4D	
haute résolution des édifices volcaniques	75
4.1. Intégration multi-méthodes spatiales et temporelles	75
4.2. Développements technologiques et numériques	78
4.2.1. Renforcement des méthodes géophysiques multi-échelles	78
4.2.2. Modélisations conjointes	79
4.3. Perspectives d'applications en terme de recherche et d'observation	80
4.3.1. L'exemple du volcanisme d'Hawaii : dynamiques multi-échelles et aléas associés	80
4.3.2. Applications à d'autres cibles	83
Conclusion	84
Bibliographie	85
Annexes	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma synthétique des principales problématiques abordées.....	36
Figure 2 : Notions d'échelles et de résolution spatiales des approches géophysiques.	39
Figure 3: Échelles temporelle et spatiale des anomalies géophysiques.	41
Figure 4 : Sources et mécanismes des variations de densité.....	42
Figure 5 : Sources et mécanismes de variations d'aimantation.....	44
Figure 6 : Sources et mécanismes de variations de résistivité.....	45
Figure 7 : Implémentation des capteurs magnétiques sur drone.....	46
Figure 8 : Tests sur la caractérisation de la magnétométrie aéroportée par drone, réalisés à l'Observatoire magnétique de Chambon la Forêt.....	49
Figure 9 : Imagerie intégrée des contrastes structuraux et lithologiques.	55
Figure 10 : Imagerie des systèmes volcano-tectoniques, implications régionales et locales.....	57
Figure 11 : Imagerie des zones actives en profondeur.	58
Figure 12 : Imagerie des zones de stockages superficielles et instabilités associées.	60
Figure 13 : Relations entre anomalies magnétiques et plan de glissement dans le Cirque de Salazie.	62
Figure 14 : Variations microgravimétriques et processus de transferts de masse profonds.....	65
Figure 15 : Relations entre anomalies magnétiques et état thermique des édifices volcaniques.....	66
Figure 16 : Suivi des zones de stockages hydrothermales et instabilités majeures associées.	68
Figure 17 : Suivi des signaux volcano-magnétiques en lien avec la dynamique éruptive.	70
Figure 18 : Synthèse des activités d'observation en réponse à l'activité sismique de 2021-2022 à l'aplomb des Monts Dore.	71
Figure 19 : Développements méthodologiques et numériques.	73
Figure 20 : Application de la méthode d'intercorrélation à l'analyse des données magnétiques.....	74
Figure 21 : Synthèse des principaux objectifs et résultats acquis dans le cadre du projet ANR Scan4Volc (Piton de la Fournaise, 2022-2025).....	77
Figure 22 : Profil vertical de conductivité électrique et de température dans le manteau.....	79
Figure 23 : Perspectives d'application des travaux de recherche à la connaissance du volcanisme d'Hawaii.....	82
Figure 24 : Corrélation entre manifestations de surface, anomalies de conductivité et flux de CO ₂ suite à la période d'unrest de Vulcano en 2021.....	83

Introduction et résumé sur l'originalité des recherches

La compréhension du fonctionnement d'un édifice volcanique dépend de notre connaissance des systèmes statiques à un état initial (structure interne, contrastes lithologiques et hétérogénéités mécaniques, géométrie des systèmes magmatiques et hydrothermaux) et des processus dynamiques (évolution des structures, redistribution de masses, instabilités). L'identification univoque des processus volcaniques actifs tels que : 1) les précurseurs éruptifs, 2) les phénomènes d'instabilités (i.e. Hawaii: Lipman et al., 1988; Moore et al., 1989; Moore and Chadwick, 1995; Swanson et al., 2012; Etna: Nicolosi et al., 2014 ; Ile de la Réunion : Lénat et al., 1990, 1989), 3) les manifestations et répercussions en surface (zones d'inondations des coulées de lave, tsunamis d'origine gravitaire, aléas liés aux panaches volcaniques ; Labazuy et al., 2012; Millington et al., 2012) reste un formidable défi.

Imager un édifice volcanique actif à différentes échelles spatiales et temporelles est donc fondamental pour mieux comprendre et prévoir sa dynamique à plus ou moins long terme. L'imagerie géophysique demeure une approche particulièrement puissante pour contraindre la géométrie et l'évolution spatio-temporelle de ces structures à différentes profondeurs et suivre les effets de la grande variabilité des paramètres physiques au sein des édifices. La combinaison de plusieurs méthodes de télédétection de surface, proche surface, et satellitaire, permet en effet de discriminer les paramètres primaires des édifices et de les caractériser géologiquement et structuralement, mais également de suivre leurs dynamiques pour *in fine* anticiper les crises éruptives et les aléas associés.

Depuis quelques années, des progrès technologiques et méthodologiques significatifs ont permis de contribuer à répondre à ces objectifs à la fois scientifiques, opérationnels et sociétaux. De nouvelles méthodes d'acquisition géophysiques à des altitudes variées (au sol, par satellite, et désormais par drone) sont en effet disponibles et la complémentarité des approches offrent la perspective d'une imagerie multi-échelles (et multi-profondeurs) à haute résolution des édifices. Parmi les innovations récentes, les drones et la miniaturisation de certains capteurs devenus très performants représentent une avancée considérable pour la mesure géophysique de proche surface. La rapidité de leur déploiement, la précision de leur positionnement et leur robustesse ouvrent une voie sans précédent aux suivis pré-, syn- et post-éruptifs de manière rapide et homogène. Il devient alors possible de relier les signaux de différentes échelles et époques aux sources géophysiques et à leur évolution temporelle.

En parallèle de ces innovations techniques, l'amélioration et le développement constants des modélisations théoriques et des capacités de calcul permettent d'exploiter un nombre croissant de données de plus en plus précises, à des résolutions spatio-temporelles inégalées. Mes activités de recherche se sont ainsi régulièrement adaptées aux différents challenges et nouvelles technologies en lien avec les problématiques volcanologiques, impliquant en parallèle des applications dans d'autres domaines, comme la géothermie ou l'archéologie.

Rappelons néanmoins que l'un des verrous majeurs en Sciences de la Terre demeure le problème de la non unicité de la solution apportée par un seul type de mesures. Mes activités de recherche reposent initialement sur l'étude géophysique multi-méthodes (e.g. gravimétrie, magnétisme, résistivité électrique) des systèmes volcaniques à différentes échelles, depuis l'acquisition des données, leur calibration/validation, leur analyse détaillée (traitement du signal), leur modélisation numérique,

jusqu'à leur interprétation géophysique, géologique et structurale. Réduire toujours plus les ambiguïtés de ces interprétations nécessite fondamentalement de combiner ces méthodes avec d'autres types de données (e.g., sismicité, mesures géochimiques, imageries de surface) et via la quantification de paramètres pétrophysiques essentielle lors des processus de modélisations (**Gailler et al., 2019**).

L'une des difficultés premières a donc été de devoir développer une expertise pluridisciplinaire intégrant les spécificités des différentes mesures mises en œuvre. Ce travail a nécessité de s'intéresser premièrement aux principes théoriques sous-jacents à chaque type de mesures, mais également aux spécifications techniques des instruments et des expériences menées en conditions de terrain. Si certaines techniques sont bien documentées, d'autres souffrent néanmoins de l'absence de protocole uniformisé et d'autant de techniques que de systèmes de mesures, comme par exemple l'acquisition de mesures magnétiques par drones. J'ai donc activement contribué à son développement puis à son application en contexte volcanique (**Gailler et al., 2021**). Un travail préliminaire de validation opérationnel et de calibration est primordial pour s'intéresser dans un second temps aux processus de traitement et de modélisations des données (**Thebault and Gailler, 2023**) et fiabiliser la robustesse des interprétations. En parallèle des différentes approches géophysiques mises en œuvre, ces activités spécifiques de développement en magnétométrie aéroportée s'intègrent et s'articulent également dans les missions des observatoires volcanologiques au sein du Service National d'Observation en Volcanologie (<https://opgc.uca.fr/volcanologie>) et dans la structuration française de recherche (EPOS-France) afin de standardiser ces approches pour la surveillance opérationnelle des volcans français.

Dans ce contexte général, le premier volet de mes travaux consiste donc à caractériser la structure des édifices volcaniques par une approche intégrée en réalisant une imagerie à un 'état-0' (que l'on pourrait qualifier de modèle de base), c'est-à-dire un modèle d'architecture globale mettant en évidence les principales zones de stockage, les contrastes lithologiques et hétérogénéités mécaniques à différentes échelles spatiales. Le second volet développe l'approche dynamique via la réitération de mesures, certes moins denses, mais réalisées plus rapidement pour caractériser l'évolution temporelle de ces structures en lien avec l'activité éruptive et volcano-tectonique sur des cibles majeures.

L'objectif à terme est de propager l'évolution du modèle initial complet à partir de son état-0. Mes perspectives sont donc désormais de combiner l'ensemble de ces approches géophysiques, entre mesures ponctuelles, modèle de référence, données en temps (quasi) réel et réitérations, pour évoluer progressivement vers une imagerie spatio-temporelle à haute résolution des édifices volcaniques.

Chapitre 1. Problématiques majeures en volcanologie, mesures géophysiques et notion d'échelles

1.1. Généralités et enjeux volcanologiques

La volcanologie en contexte actif est une discipline liée à des objets complexes, animés d'une dynamique propre à chaque édifice. Parmi les très nombreuses problématiques que l'on peut aborder dans l'étude des édifices volcaniques et leurs mécanismes éruptifs, trois d'entre elles ont conditionné mes travaux qui s'articulent autour de l'aléa associé à l'activité volcanique (Fig. 1).

❶ Imagerie de la structure interne des édifices volcaniques à différentes échelles, ou 'état-0'

L'architecture globale d'un édifice, son héritage structural et la géométrie des réservoirs magmatiques et hydrothermaux, conditionnent la dynamique volcanique actuelle et future. L'imagerie à un état-0 consiste à intégrer les effets de la dynamique passée en mettant en évidence les contrastes structuraux et lithologiques profonds et à caractériser la signature des systèmes volcano-tectoniques, permettant d'identifier les zones susceptibles d'être les plus actives. En parallèle, les hétérogénéités mécaniques, en dehors des structures magmatiques et hydrothermales, sont communément le siège de grandes instabilités qui doivent être imagées (effondrements caldériques, glissements de flanc), car leur caractère en apparence 'quasi-statique' peut soudainement évoluer en une dynamique très rapide voire catastrophique (avec de possibles conséquences dévastatrices ; Kelfoun et al., 2010). L'une des difficultés de cette première étape, longue et néanmoins primordiale, est d'imager cet état global dans un contexte dynamique susceptible de modifier rapidement un modèle initial en pleine construction (Fig. 1). Néanmoins, ces perturbations ponctuelles mettent en évidence les zones où l'activité volcanique est directement liée à l'évolution des zones de stockages magmatiques et hydrothermales et sont un guide précieux pour cibler les zones prioritaires au suivi dynamique d'un édifice.

❷ Evaluation de l'évolution des systèmes et suivi de la dynamique éruptive

Cette imagerie globale et l'occurrence de certains événements éruptifs, selon les édifices et leur activité propre, permet de cibler les zones les plus dynamiques (du moins en surface). Grâce à la réitération de mesures ou au déploiement de systèmes d'imagerie et de mesures ponctuels à haute résolution spatio-temporelle sur ces cibles particulières, mieux imager la géométrie des zones de stockage devient envisageable. Une telle quantification permet d'évaluer les processus pré-, syn- et post-éruptifs, à différentes profondeurs, par la temporalité des levés géophysiques réalisés sur une même zone. La mise en évidence phénoménologique des structures de déformations en surface, la quantification des paramètres éruptifs et des transferts de fluides superficiels, le suivi de l'évolution des zones de stockages et d'instabilités en profondeur (Fig. 1) nécessitent des campagnes de terrain régulières qui sont communément fonction de l'activité de l'édifice. Cette approche a également pour objectif de contribuer à mieux anticiper les crises éruptives, puisque l'évolution des structures actives, la cartographie des anomalies géophysique et thermiques, la quantification des flux de chaleur en lien avec l'évolution des zones de stockages, comptent parmi les caractéristiques majeures associées aux transferts de magmas, précurseurs des éruptions. Cette caractérisation scientifique a également pour objectif de renforcer les stratégies opérationnelles de surveillance des édifices volcaniques, pour relier la structure interne aux manifestations de surface.

3 Construction d'un modèle 4D des systèmes volcaniques

Imager un 'état-0' tout en exploitant les événements dynamiques liés à la construction de ce modèle initial se fonde sur l'approche terrain et l'acquisition de données par différentes techniques, leurs traitements spécifiques et leurs cartographies, ainsi que sur le suivi de l'activité et la connaissance historique de l'édifice. A ce stade, disposer de mesures sensibles à des paramètres physiques multiples et à des profondeurs différentes, de qualité, d'époques, et de distributions variables, ne permet néanmoins pas d'obtenir une image volcanique au sens large. Le développement d'une approche numérique de modélisation apparaît dès lors fondamentale pour établir cette vision intégrée des relations entre structures statiques et dynamiques, profondes et superficielles, à différentes échelles, notion qui sera développée par la suite. L'imagerie spatio-temporelle multi-paramètres doit ainsi s'accompagner de modèles numériques contraints et réalistes reliant les observables à leurs paramètres physiques primaires, et doivent de surcroît être raisonnablement rapides à implémenter.

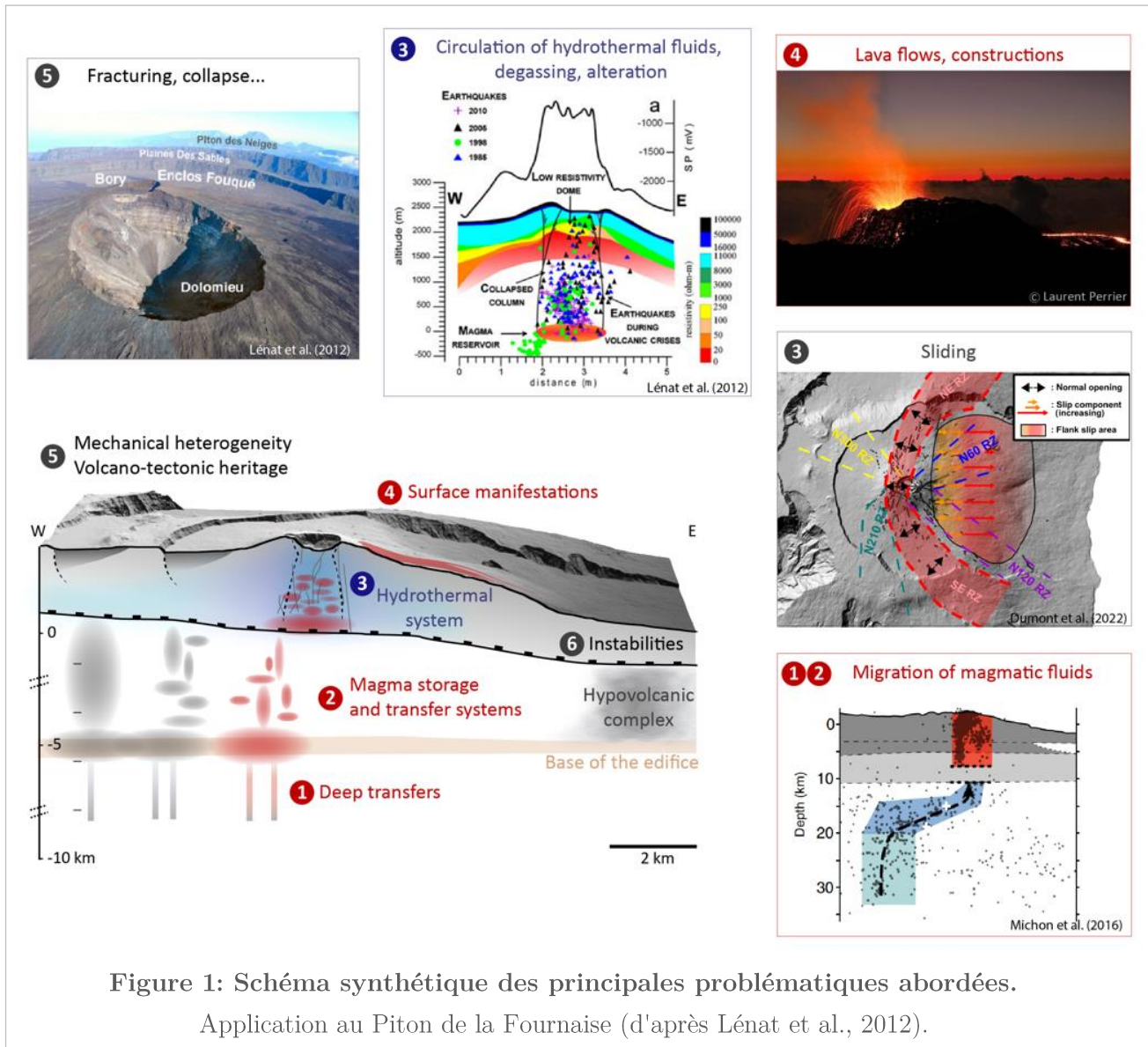


Figure 1: Schéma synthétique des principales problématiques abordées.

Application au Piton de la Fournaise (d'après Lénat et al., 2012).

1.2. Intégration des mesures géophysiques

Face à ces problématiques, mes travaux se focalisent essentiellement sur l'apport des méthodes géophysiques, demeurant des outils puissants pour la construction d'un état initial en terme de modèle d'architecture volcanique globale. Ces méthodes permettent en effet d'imager les contrastes de propriétés physiques des structures, des fluides magmatiques et hydrothermaux au sein d'un édifice volcanique, par la cartographie des structures en 1, 2, voire 3 dimensions. Pour résumer, les mesures géophysiques peuvent être 'passives' c'est-à-dire impliquant une (des) source(s) générée(s) directement par la réponse de l'édifice comme par exemple la méthode de polarisation spontanée, particulièrement sensible à la circulation de fluides en sub-surface. Sur une intégration à plus en profondeur, la gravimétrie repose sur l'imagerie des contrastes de densité en lien avec la déformation de l'édifice, sa structure et la dynamique des transferts de masse. Le magnétisme est quant à lui sensible à l'aimantation et aux contrastes d'âge, ou encore à l'état thermique des formations. L'électromagnétisme et notamment la magnétotellurie, sensible à la conductivité et donc à la présence de fluides et d'altération, offre un très bon profilage verticale structural jusqu'à de (très) grandes profondeurs. Parmi les méthodes dites 'actives', consistant à injecter un signal connu dans le sous-sol et d'en étudier la réponse, citons dans le cadre de ces travaux la méthode de résistivité électrique provoquée, également sensible à la conductivité et donc à la présence de fluides et aux contrastes lithologiques, néanmoins souvent limitée par la puissance d'injection et la géométrie du dispositif.

Le choix des méthodes mises en œuvre va donc être au premier ordre conditionné par la (ou les) problématique(s) abordée(s) et la cible volcanique elle-même. Comme toutes méthodes, elles n'informent souvent qu'indirectement sur les propriétés physiques et structurales qui nous intéressent, mettant en évidence leurs contrastes propres et néanmoins complémentaires, comme détaillé en chapitre 2. L'imagerie complète de la structure interne et l'observation de la dynamique temporelle des édifices volcaniques reste donc un véritable défi pour quantifier les processus qui régissent leur évolution, notamment les précurseurs éruptifs et les phénomènes d'instabilités. Si la géophysique est un domaine en constante évolution, sur le plan technologique l'application de nouvelles méthodes d'acquisition à des altitudes variées (au sol, par satellites et désormais par drones) offre la perspective d'une imagerie multi-échelles rapide des édifices. En parallèle de ces innovations, la mise en place de nouveaux capteurs, leur calibration, leurs performances en sensibilité et précision, et les progrès constants dans le domaine du traitement du signal garantissent une meilleure qualité de la donnée. Les améliorations renforcées ces dernières décennies ouvrent une plus grande robustesse dans les levés géophysiques au sens large, permettant des comparaisons quantitatives plus fiables entre levés à différentes époques et au travers d'instrumentations diverses. La contrepartie de ces évolutions très positives étant que les mesures sont de plus en plus sensibles à des effets géophysiques de deuxième ordre encore très mal compris (effets de site, phénomènes électrocinétiques, etc.).

Sur le plan numérique, la prise en compte d'un nombre croissant d'observables géophysiques de natures différentes doit également s'accompagner d'une augmentation des ressources de calcul. Notons également la tendance à évoluer vers des codes de modélisations communautaires et open source qui ouvrent des perspectives majeures dans l'interprétation conjointe des données et de comparaisons entre édifices 'analogues' modélisés selon des standards numériques communs.

1.3. Notions d'échelles spatio-temporelles

L'ambiguïté dans la définition d'échelle spatio-temporelle, inhérente aux problématiques énoncées, s'est invitée rapidement dans mes travaux de recherche. La quantification de cette notion d'échelles dans la mesure géophysique n'est pas un exercice trivial, car elle peut être directement déterminée à partir de la dimension spatiale des mesures et correspondre à son extension géographique et à sa résolution. Elle peut tout autant être définie dans le domaine spectral à partir de la distribution et du contenu réel de l'information intrinsèque. Par exemple, définir l'échelle spatiale à partir de l'extension d'un levé magnétique effectué à 60 mètres du sol sur une grille homogène de 1 mètre nous informe peu sur la résolution réelle de la quantité magnétique. Ainsi, les notions de spectres 1D et 2D, puis naturellement celles de lois d'échelles (ou dans certains cas autosimilarité) sont les plus pertinentes pour évaluer la reproductibilité d'un phénomène volcanique, comparer quantitativement des mesures géophysiques différentes, et réaliser des modèles numériques. Par ailleurs, les notions d'échelles spatiales et de résolutions spatiales et spectrales sont souvent confondues.

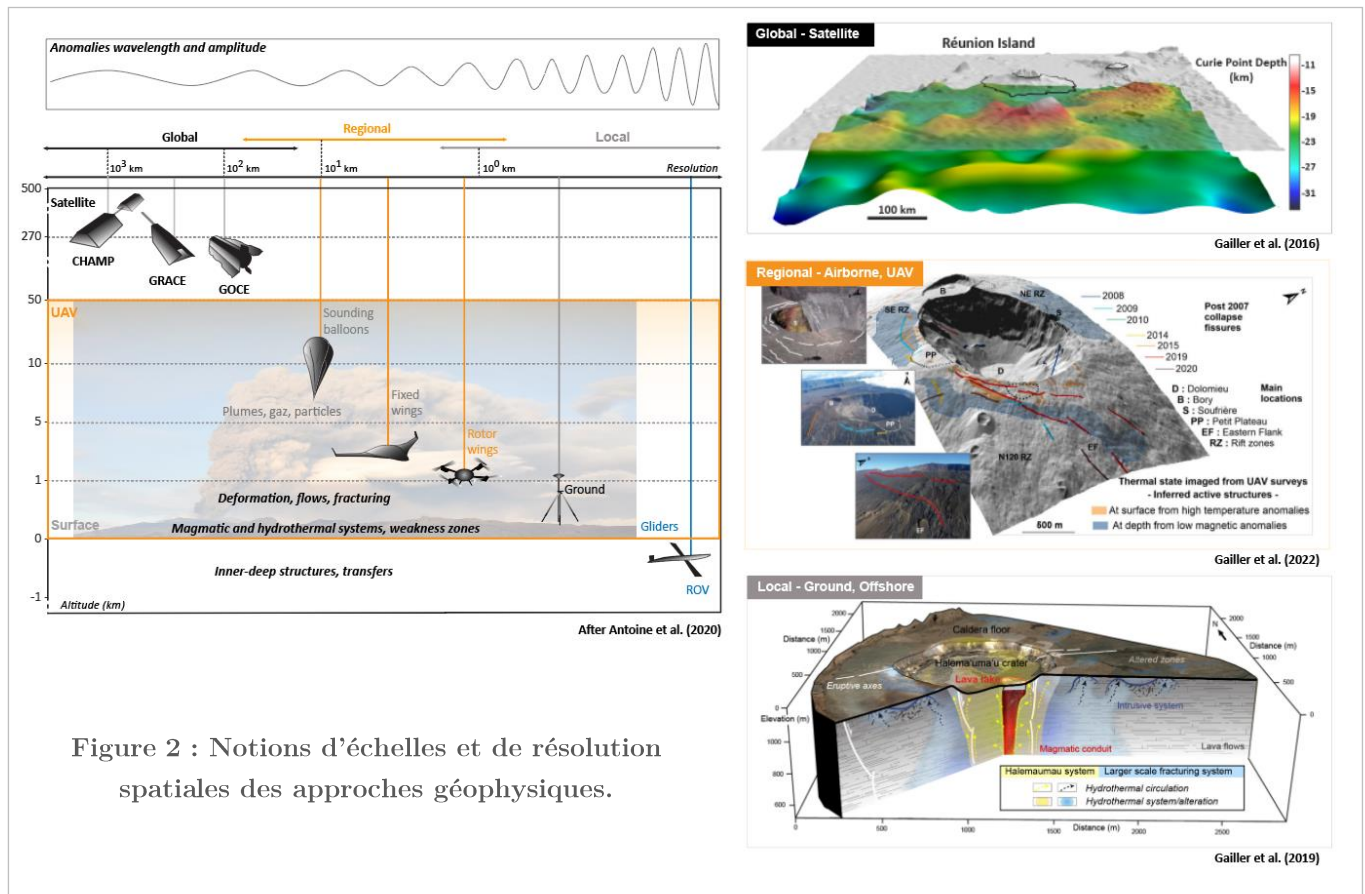
Plus concrètement, nous venons de voir que la structure interne d'un édifice volcanique est particulièrement complexe par l'histoire même de son édification, sa longévité (jusqu'à plusieurs millions d'années), les différents phénomènes qui l'ont affectée par le passé et par son extension géographique. Depuis les mécanismes profonds jusqu'aux manifestations de surface, l'objectif est d'imager les zones de transferts mantelliques aux réservoirs crustaux, ainsi que les hétérogénéités mécaniques et zones de faiblesse, autant de sources d'instabilités mécaniques et éruptives (Fig. 1). Cet objet se caractérise donc par une multitude d'échelles spatiales, latéralement et en profondeur, et bien sûr temporelles. Les amplitudes et les longueurs d'ondes des anomalies géophysiques permettent, grâce à des lois statistiques, de caractériser au premier ordre des profondeurs et des extensions de sources anomaliques dans les trois directions de l'espace, offrant une image à un instant-t et à différentes résolutions, dépendante de l'échelle d'investigation (i.e. locale ou plus régionale et désormais intermédiaire).

J'ai ainsi abordé l'étude de différentes cibles volcaniques par l'intermédiaire de cette approche multi-échelles et multi-paramètres, impliquant d'estimer dans le domaine spectral la résolution très variable des quantités physiques mesurées à partir de systèmes de mesures complémentaires dans différents contextes géodynamiques (Fig. 2). A l'échelle globale, en utilisant par exemple les mesures magnétiques satellitaires (missions européenne Swarm notamment) et les données des anomalies mondiales (Lesur et al., 2016; Maus, 2009) j'ai été amené à imager la profondeur du point de Curie à grande échelle à partir d'une analyse spectrale des anomalies magnétiques (Bhattacharyya and Leu, 1975; Spector and Grant, 1970) et à caractériser les zones magmatiques profondes (Gailler et al., 2016 ; Gailler et al., 2017).

A partir de cette 'ligne de base', je m'intéresse plus localement, par l'intermédiaire des mesures au sol parfois combinées aux levés en mer (Fig. 2), à l'imagerie de zones plus spécifiques à plus grande résolution, depuis l'imagerie des systèmes-volcaniques en surface et des hétérogénéités mécaniques plus en profondeurs (Gailler et al., 2009, 2013), jusqu'à la modélisation des zones de stockages magmatiques ou hydrothermales (Gailler et al., 2018). Les recherches associées ont notamment permis de mieux contraindre les axes préférentiels de transferts de fluides vers la surface (Gailler et al., 2019), de caractériser les sources de déstabilisations (Gailler and Kauahikaua, 2018), ou encore d'évaluer le potentiel géothermique de cibles majeures (Gailler et al., 2014).

Je cherche désormais à compléter et fusionner l'information au sol, aux altitudes aéroportées et satellitaires pour combler le 'vide spectral' entre ces deux échelles de mesures (Fig. 2), avec des levés

par drone (ou UAV pour Unmanned Aerial Vehicles) à des altitudes intermédiaires proches de la cible. En comblant ces lacunes entre les mesures locales au sol et plus globales notamment par satellite, je contribue au développement de l'acquisition de mesures rapides et précises pour contraindre toutes les profondeurs de sources, ainsi que leurs échelles spatiales latérales dans les modèles géophysiques. Les développements que j'ai initiés notamment autour de la magnétométrie par drone, couplée à l'imagerie thermique, tendent désormais à caractériser de façon homogène l'état thermique des édifices volcaniques, ainsi que la distribution des structures volcano-tectoniques actives en profondeur (Gailler et al., 2022; Guillard et al., in prep.).



Dans la continuité, la temporalité est une notion fondamentale pour caractériser l'évolution d'un édifice en fonction de sa dynamique depuis cet état 'initial'. Si le suivi 2D à haute résolution temporel reste inaccessible, il est néanmoins possible de suivre les modifications des paramètres physiques au cours du temps grâce à des répétitions, notamment par drone selon des plans de vols programmés et enregistrés. Même si leur fréquence d'exécution reste limitée à deux répétitions en moyenne par an, il s'agit d'une avancée considérable dans l'imagerie des mécanismes volcaniques et la prévention des risques avec d'importantes perspectives de développements et d'applications.

En parallèle de ces cartographies répétées, j'ai déployé sur certaines cibles des instruments de mesures continues, temporaires ou permanents (magnétomètre, station magnétotellurique au Piton de la Fournaise notamment) afin d'obtenir des séries temporelles très localisées et d'analyser l'évolution de certains paramètres géophysiques en temps quasi-réel. Je contribue notamment à ce suivi dans le cadre de mon service d'observation au Service National d'Observation en Volcanologie (SNOV) avec par

exemple comme objectif de construire de manière progressive un nouveau réseau de stations magnétiques permanentes au Piton de la Fournaise.

Avec cette définition d'échelle spatio-temporelle, envisager le suivi rapide d'édifices volcaniques sur des zones ciblées devient possible, permettant d'obtenir et de relier des signaux de différentes échelles et époques aux sources géophysiques et à leur évolution temporelle (**Gailler et al., 2023**).

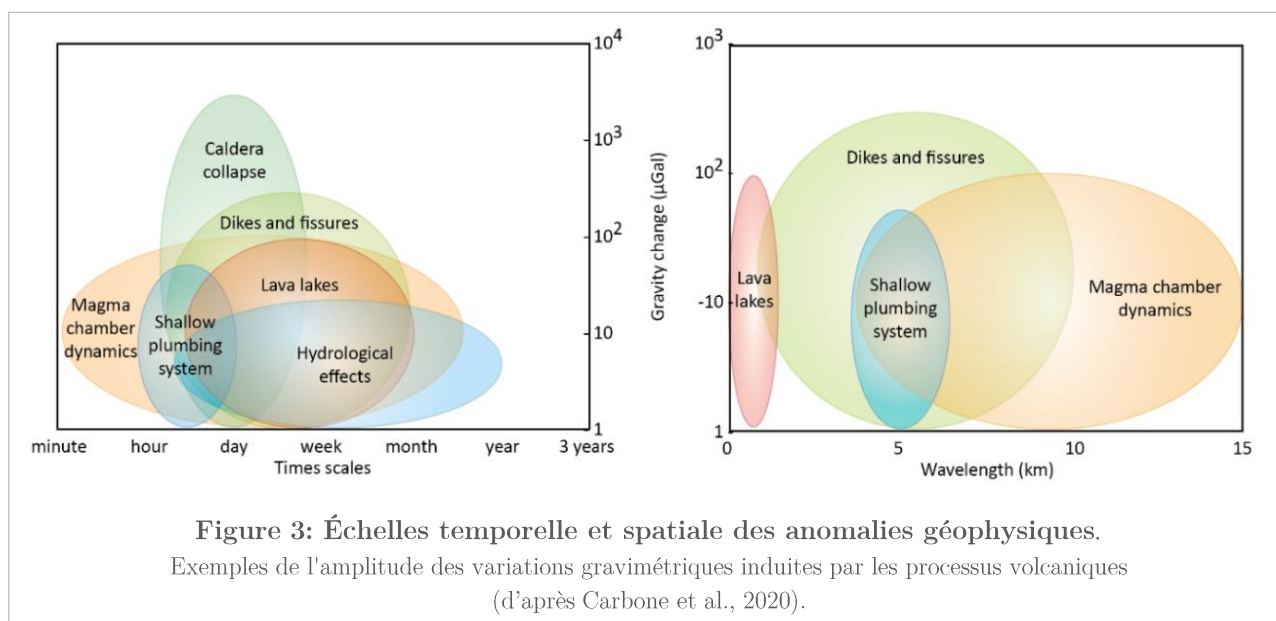
Dans la suite de cette synthèse, je présenterai donc essentiellement les travaux qui reposent sur cette méthodologie et par conséquent sur des mesures acquises au cours des campagnes de terrain que j'ai organisé ou auxquelles j'ai participé. Je discuterai également ma contribution à la magnétométrie aéroportée et aux développements techniques et instrumentaux dont j'ai assuré le suivi scientifique (et la calibration/validation) avec l'aide du Service de Développement Technique (SDT) de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC) et de l'Observatoire Magnétique de Chambon-La-Forêt.

Chapitre 2. Apports de la géophysique multi-méthodes à la connaissance des édifices volcaniques et développements récents

Mes recherches portent sur l'acquisition, le traitement et la modélisation de données géophysiques multi-méthodes, se focalisant plus particulièrement sur les approches gravimétriques, magnétiques et de résistivité électrique, considérant différentes contraintes pour en renforcer l'interprétation. L'évolution constante de ces méthodes au cours des dernières décennies ont impliqué en parallèle un volet de développements techniques, méthodologiques et numériques, contribuant ainsi au renforcement des connaissances et à la mise au point de nouvelles approches opérationnelles d'observation.

2.1. Principales considérations sur les variations géophysiques structurales et temporelles

La complexité d'un édifice volcanique, tant dans sa structure que dans son fonctionnement, est liée à de nombreux phénomènes d'édification ou de destruction, ainsi qu'à sa dynamique éruptive. Rappelons qu'il existe une grande variabilité des paramètres physiques au sein des édifices volcaniques et les approches géophysiques offrent des informations inaccessibles en surface. Mon objectif premier repose sur la caractérisation structurale par la mise en évidence des contrastes de densité, d'aimantation et de résistivité électrique principalement, pour imager la structure interne des édifices à un instant-t précédemment qualifié d'état-0 ou initial, parfois jusqu'à de grandes profondeurs selon l'échelle de détection (dépendante de l'altitude des levés par exemple pour les méthodes potentielles). La dimension temporelle permet quant à elle de suivre les mécanismes d'évolution de l'édifice et d'apporter des contraintes à la prévention volcanique, l'amplitude des variations de ces paramètres étant en premier ordre conditionnée par la dynamique des processus impliqués (i.e. de quelques minutes à plusieurs années ; Fig. 3).

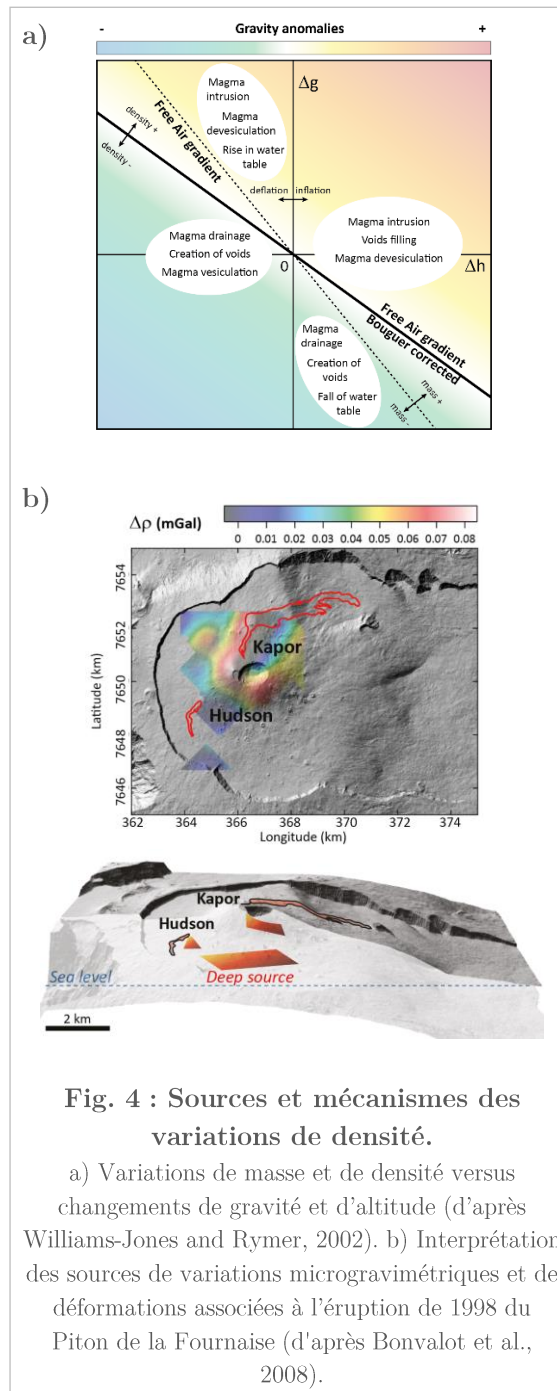


Dans le domaine spatial, si l'amplitude et la longueur d'onde des signaux renseignent sur la profondeur et l'extension des sources perturbatrices, en détecter des variations temporelles souvent très faibles (par exemple du mGal au μ Gal en gravimétrie) requiert une très grande précision sur les mesures

géophysiques pour caractériser les mécanismes en jeu et leur dynamique. De nombreux ouvrages traitent de la théorie de ces différentes méthodes géophysiques (e.g. Blakely, 1995 pour la gravimétrie et le magnétisme, Chave and Jones, 2012 pour la résistivité électrique pour ne citer qu'eux) et nous aborderons ci-après seulement leurs applications à la détection des sources d'anomalies et des mécanismes de variations impliqués.

2.1.1. Sources des anomalies gravimétriques et mécanismes de variations de densité

Pour résumer, l'approche gravimétrique s'intéresse aux perturbations du champ de pesanteur et permet d'imager la distribution des densités apparentes des sources en profondeurs (Fig. 1).



Les approches relatives permettent dans un premier temps de caractériser les variations gravimétriques structurales et d'imager les sources des anomalies de densité à un instant-t (Fig. 1). Les approches microgravimétriques et continues ont quant à elles pour objectif le suivi des variations temporelles en lien avec les mécanismes de transferts de masse en profondeur, uniquement liés au fonctionnement et à l'évolution du système étudié.

Ces mécanismes sont communément associés à des déformations de surface, nécessitant en parallèle une connaissance précise des signaux environnementaux et de coupler les mesures avec des données de déformation crustale (surveillance géodésique : GNSS, InSAR ; Fig. 4b).

Les variations microgravimétriques sont étroitement liées aux circulations de fluides magmatiques et/ou hydrothermaux, ainsi qu'aux anomalies thermiques. Elles constituent ainsi de précieux indicateurs de transport de magma vers la surface, d'intrusion, de stockage ou au contraire de vidange ou changement de vésicularité du magma qui pourront être détectables avant, pendant et après les crises volcaniques (Jachens and Eaton, 1980).

Par exemple, le transfert de magma vers des zones de stockage superficielles, la pressurisation de la chambre réalimentée (Tait et al., 1989), les intrusions le long de fractures préexistantes, génèrent une augmentation de masse, et inversement pour les phénomènes de vésiculation, de drainage et de vidange.

La mise en place de nouvelles construction en surface est également à l'origine de variations de pesanteur dépendantes de la densité et des volumes impliqués. Etroitement liés à l'activité intrusive et hydrothermale et à la présence d'hétérogénéités mécaniques, les phénomènes volcano-tectoniques sont en parallèle à l'origine de mécanismes de redistribution de masse à différentes profondeurs, et dont la dynamique varie en fonction du processus et des échelles de temps impliquées (grandes instabilités, glissements de flancs, résurgence).

2.1.2. Sources des anomalies magnétiques et mécanismes de variations d'aimantation

Le champ magnétique terrestre est généré par des phénomènes électromagnétiques complexes et nous nous intéressons ici au champ crustal, dont la source est la présence de roches d'aimantations variables dans la croûte terrestre. Les anomalies magnétiques dépendent des variations spatiales de l'aimantation totale et permettent d'en imaginer les contrastes (en intensité et/ou direction) entre les différentes formations de la croûte terrestre (Reynolds, 2011; Telford et al., 1976).

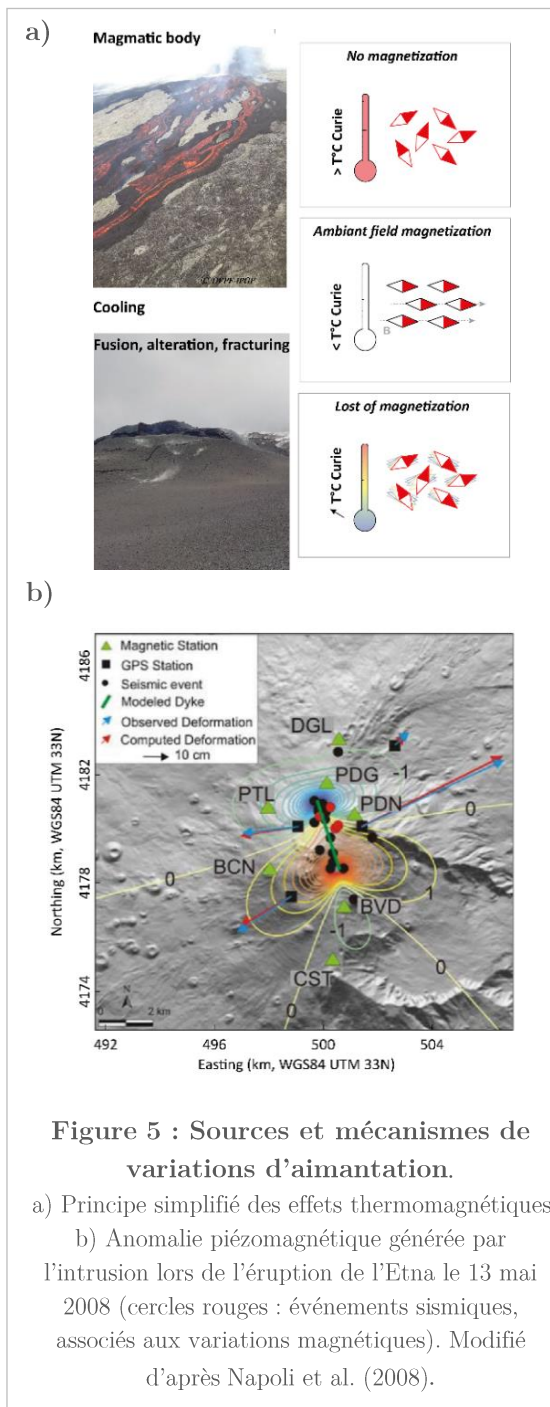
D'un point de vue théorique, cette aimantation totale apparente correspond à la somme vectorielle de :

- *L'aimantation induite*, produit de la susceptibilité magnétique par le champ d'induction magnétique terrestre locale ;

- *L'aimantation rémanente naturelle*, vecteur somme de différentes aimantations, dont l'aimantation thermorémanente (composante principale des roches volcaniques) acquise lors du refroidissement des roches sous la température du point de Curie, enregistrant la direction du champ ambiant au moment du refroidissement (Fig. 5a).

Comme pour l'approche gravimétrique, des levés ponctuels permettent de caractériser les contrastes d'aimantation et de susceptibilité magnétique pour imaginer la structure d'un édifice à différentes échelles. Des mesures continues par l'intermédiaire de stations permanentes, ainsi que la répétition des mesures dans des secteurs clés, permettent d'accéder aux variations temporelles et tenter dès lors de les relier à la dynamique volcanique. Si les roches volcaniques constituent généralement de puissants marqueurs magnétiques, il existe une grande variabilité de propriétés magnétiques selon l'âge et la composition chimique des formations, leur mode de refroidissement, leur texture, leur température ou encore leur altération (Bouligand et al., 2019; Gailler and Kauahikaua, 2017; Gailler and Lénat, 2012).

Plus en détail, une formation volcanique massive sera communément associée à une forte anomalie magnétique (positive ou négative selon la période magnétique de sa mise en place). A l'échelle d'une zone n'intégrant que des formations émises en période normale, une anomalie négative pourrait ainsi traduire la présence de formations à plus faible aimantation en profondeur (Gailler et al., 2019). En effet, les phénomènes d'altération, de fracturation et d'augmentation de température vont tendre à diminuer cette aimantation par désorganisation des minéraux magnétiques et modifier ainsi l'information acquise initialement lors de la mise en place d'une formation.



Ces considérations de premier ordre permettent d'interpréter la distribution des anomalies magnétiques en terme d'imagerie et de structure globale, c'est-à-dire fournir une image à un instant-t. Différents phénomènes physiques sont dès lors susceptibles de modifier le champ magnétique mesuré en contexte volcanique, pouvant intervenir simultanément lors de crises volcaniques (Johnston, 2006).

Les conditions thermiques élevées des intrusions magmatiques par exemple ($T > 580^{\circ}\text{C}$) génèrent communément des effets thermomagnétiques à l'origine d'une désaimantation thermique (Fig. 5a).

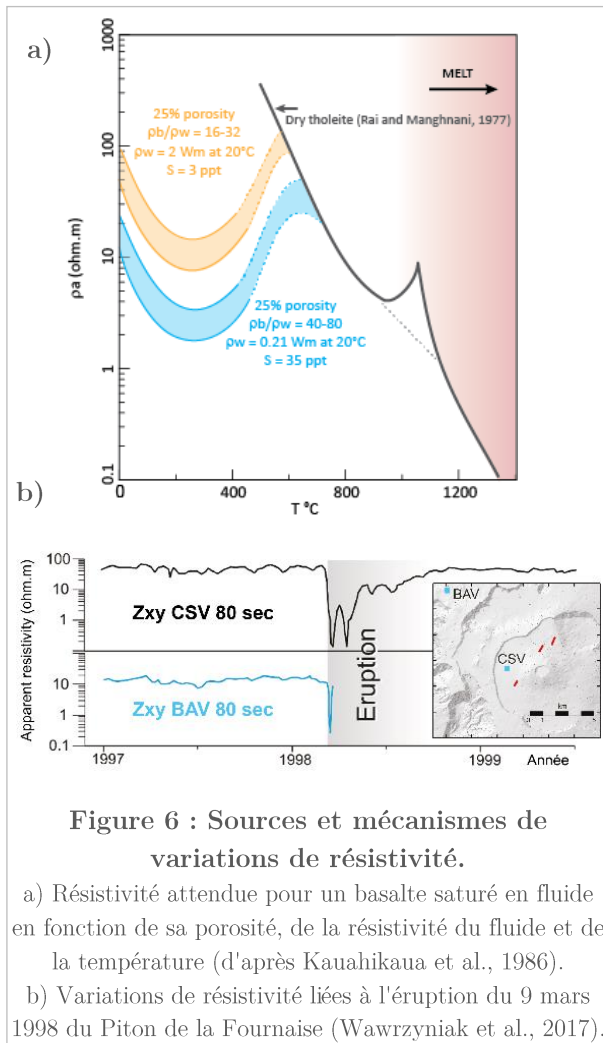
Les variations de contraintes associées à ces effets thermomagnétiques (activités magmatique et hydrothermale) et aux phénomènes volcano-tectoniques (fracturation) vont également créer des effets piézomagnétiques (Fig. 5b).

Les circulations de fluides vont en parallèle être à l'origine de variations électrocinétiques liées à la création de champs électriques et magnétiques secondaires (e.g. Fitterman, 1979; Mizutani et al., 1976; Zlotnicki and Le Mouél, 1990).

Enfin, les processus d'altération, naturelle ou hydrothermale, (transformations, dépôt de nouveaux de minéraux magnétiques) et les processus plus rapides de construction ou de destruction des volumes aimantés (mise en place de nouvelles coulées de lave, cônes/effondrements, glissements) peuvent également affecter l'aimantation de l'ensemble d'un système (Bouligand et al., 2014).

2.1.3. Sources des contrastes de résistivité électrique et évolution des zones conductrices

Les méthodes électriques ou électromagnétiques sont en parallèle particulièrement adaptées à la détection de structures actives au sein d'un édifice, car la résistivité électrique (i.e. $1/\text{conductivité}$) est un paramètre très sensible à la présence de fluides contenus dans les structures actives, fracturées et perméables. Géométrie, orientation et profondeur de ces structures actives sont autant de paramètres qui contrôlent la stabilité des systèmes. Comme pour la densité et l'aimantation, il s'agit d'un paramètre complexe, qui va dépendre des propriétés intrinsèques d'une roche avec une gamme de variation très large (Lénat, 1995; Palacky, 1988; Reynolds, 2011; Telford et al., 1976).



Ainsi, la circulation de fluides (magmatiques et/ou hydrothermaux) et l'altération hydrothermale (dissolution de minéraux et/ou dépôt de nouvelles phases minérales conductrices, arrivée de fluides minéralisés et/ou chauds, variations de porosité/perméabilité) vont tendre à diminuer la résistivité globale (1 à 100 ohm.m) comparée à celles des roches encaissantes (> 1000 ohm.m pour des formations volcaniques). L'injection de magma dans un système va donc également tendre à la création des volumes à très faible résistivité (Wawrzyniak et al., 2017; Fig. 6).

Différentes méthodes existent pour imager la distribution de la résistivité électrique à des profondeurs et échelles spatiales variées, en 1D (sondage électrique vertical, électromagnétisme dans le domaine temporel-TDEM, Magnétotellurique-MT), en 2D (Tomographie de Résistivité Électrique-ERT) et plus récemment en pseudo-3D (campagne héliportée, Dumont et al., 2019) ou 3D directe (dispositif de terrain 3D : Full Waver equipment, © Iris Instrument, Gance et al., 2018, *Gailler et al., in prep.*).

En surface, les anomalies de polarisation spontanée (PS), principalement générées par des phénomènes électrocinétiques, sont également particulièrement intéressantes pour caractériser les mouvements de fluides en lien avec l'activité hydrothermale notamment. La polarisation provoquée est en parallèle devenue un source d'information complémentaire aux données sismologiques, afin de décrypter la géométrie complexe des volcans actifs et surveiller leur systèmes hydrothermaux (Liotta et al., 2020; Revil et al., 2022). Notons enfin que si les méthodes de surveillance électrique et électromagnétique n'ont pas encore atteint un degré opérationnel comparable à celui de la surveillance sismique, voir gravimétrique et magnétiques, elles constituent néanmoins un domaine de développements prometteurs.

2.2. Développements récents autour de la composante aéroportée

Si les approches précédemment décrites concernent principalement et jusqu'à présent des mesures au sol et/ou satellitaires, la faisabilité des mesures aéroportées a été largement prouvée par le passé avec de nombreuses applications notamment en volcanologie (e.g. Galdéano et al., 1988; LeBorgne and LeMouël, 1976). Plus récemment, l'utilisation de drones comme vecteurs d'instruments géophysiques constitue désormais une avancée incontournable pour améliorer notre compréhension des systèmes volcaniques et rendre plus efficace leur surveillance (couverture homogène à faible altitude donc au plus proche des sources, suivi régulier, interventions rapides sur des zones ciblées autrement inaccessibles...). L'ensemble de mes travaux de recherche, ainsi que les différents développements que je mène autour de la géophysique sol et aéroportée, m'ont dans ce sens conduit à contribuer à un article

de revue sur les drones et capteurs embarqués notamment dans ce domaine (**Antoine et al., 2020**). Cette étude met en perspective l'utilisation des drones pour renforcer encore la recherche en volcanologie, en proposant un bilan technique et bibliographique autour des vecteurs aéroportés légers et des capteurs embarqués, dédiés aux problématiques majeures précédemment énoncées.

Au-delà de l'imagerie de surface, dans le domaine de la géophysique, si la gravimétrie mobile via des micro-électro mécanismes-MEMS (Middlemiss et al., 2021) est envisageable par exemple, seule la méthode magnétique est arrivée à un niveau de maturité et de miniaturisation suffisant pour être exploitée sur drones (ou UAV) petits porteurs, facilement déployés en contexte volcanique. La magnétométrie par drone ouvre donc un champ d'investigation particulièrement prometteur nécessitant un protocole précis en terme de mise en œuvre, d'analyse et de validation des données. Il convient de préciser que ce type de mesures est encore très largement utilisé pour la cartographie qualitative des structures d'anomalies. En contexte volcanique, cette utilisation est parfaitement pertinente mais encore insuffisante pour des études quantitatives et des ambitions de modélisation physique. Je contribue donc aux développements autour la magnétométrie aéroportée par drone, avec comme objectif des calibrations et des systèmes de corrections fournissant une mesure absolue des anomalies magnétiques d'origine volcanique (Fig. 7).

L'exemple du capteur magnétique champ total à pompage optique (QuSpin) implémenté sur vecteur léger (DJI Mavic) au SDT de l'OPGC (Fig. 7a) permet désormais d'envisager des levés magnétiques avec une couverture homogène et la perspective de répétitions rapides dédiées au suivi de l'évolution spatio-temporelle des zones actives (magmatiques, hydrothermales, plan de glissement...). J'ai réalisé les tests de validation opérationnelle (**Gailler et al., 2021 & poster p49**) avec pour objectif premier de fournir une cartographie rapide, sans compensation, des anomalies magnétiques et de leur évolution en contexte volcanique, tout en les comparant avec les anomalies thermiques (**Gailler et al., 2022**). Dans la continuité, je m'intéresse à l'implémentation d'un nouveau capteur (QuSpin gen2 ; Fig. 7b) intégrant à la fois des mesures scalaires mais également vectorielles, pour augmenter la précision des mesures et caractériser des variations volcano-magnétiques plus fines, offrant également davantage d'applications transverses comme dans le domaine de l'archéologie. Pour cette 2^e phase, l'objectif était également de déporter le capteur vers le bas pour s'affranchir de toute contamination électromagnétique liée au vecteur (Fig. 7c).

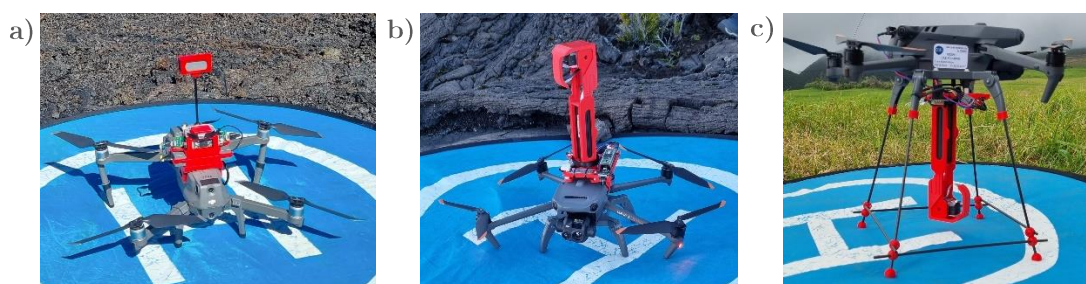


Figure 7 : Implémentation des capteurs magnétiques sur drone.

a) QuSpin génération 1 (scalaire) embarqué sur Mavic 2, b) QuSpin génération 2 (scalaire & vectoriel) sur Mavic 3, montage haut, c) QuSpin génération 2 sur Mavic 3, montage bas.

L'ensemble des travaux effectués jusqu'à présent a donc consisté en différentes phases de développements, validations opérationnelles et applications en contexte volcanique actif avec différents

objectifs. Néanmoins, la magnétométrie aéroportée par drone, comme à bord de tous mobiles aimantés, présentent deux difficultés majeures : les effets magnétiques du vecteur sur les mesures (aimantation rémanente, aimantation induite et champ issu des courants de Foucault) et les problèmes de calibration et de bruit des capteurs sensu stricto. En parallèle, la dérive des mesures en lien avec la température reste à quantifier, nécessitant de procéder à l'établissement de différentes lois en milieu contrôlé. Pour résumer, corriger les effets du vecteur nécessite de quantifier :

- 1) Les angles d'attitude, c'est-à-dire trois paramètres indépendants (cap ou roulis-roll, tangage-pitch, et lacet-yaw, selon les axes X, Y et Z respectivement) d'après le formalisme communément utilisé d'estimation des angles d'Euler.
- 2) Ses effets magnétiques propres, se décomposant en un champ magnétique induit par le champ terrestre et un champ rémanent, deux termes inconnus a priori.

En conditions d'utilisation, la composante induite va dépendre de l'orientation du drone par rapport à celle du champ magnétique terrestre, de son intensité et de son signe. En fonction du cap et de l'attitude du drone, les signaux magnétiques mesurés vont donc varier en espace et en temps et introduire des variations spatiales artificielles qui se confondront avec les signaux géologiques/volcaniques. Ces variations peuvent se caractériser, par exemple, par des offsets importants entre chaque ligne de levé magnétique pour lequel la position relative du drone s'inverse par rapport à la direction fixe du champ terrestre, et la valeur de cet offset dépendra de la susceptibilité magnétique selon les trois composantes.

Concernant la calibration des capteurs sensu-stricto, différentes méthodes ont été théorisées et validées (Gavazzi et al., 2020; Munsch and Fleury, 2011; Olsen et al., 2003). Pour la calibration purement scalaire, une 'figure de mérite', dédiée à faire évoluer le vecteur dans toutes les directions, est communément réalisée avant et après la phase de mesure, sur une zone où l'évolution du champ est en théorie parfaitement connue. Cette approche particulièrement adaptée aux problématiques sur vecteur avion, reste difficile à envisager systématiquement par drone et en contexte volcanique, en lien avec la proximité de sources fortement aimantées et la nécessité d'effectuer les mesures rapidement et efficacement dû aux changements météorologiques parfois brutaux, limitant souvent les fenêtres de survols. Une alternative est de maintenir le vecteur en ordre de marche fixe en un endroit où le champ est connu (mesuré par ailleurs), et orienté dans toutes les directions afin de parcourir au mieux l'espace cap-tangage-roulis (Hardwick, 1984; Leliak, 1961).

La calibration des mesures vectorielles apparaît quant à elle encore plus complexe à formaliser précisément (orthogonalité et orientation des 3 composantes lors des changements de cap par exemple).

Ces différents aspects de calibration n'ont jusqu'à lors pas été intégrés dans le cadre des études présentées à ce stade, en lien avec l'amplitude des anomalies magnétiques considérées (i.e. plusieurs centaines à milliers de nT) et la perspective d'imagerie rapide de l'activité volcanique. Néanmoins une perspective majeure est désormais de pouvoir accéder à des signaux plus faibles et leur variation temporelle, plus précisément. Diverses améliorations sont donc en cours pour la réduire le bruit sur les données, implémenter une chaîne d'acquisition et de traitement encore plus fiable et plus précise, et permettre également d'envisager de nouvelles applications.

Dans cette perspective, une série de tests est en cours de développement à l'Observatoire magnétique de Chambon la Forêt (Fig. 8) disposant d'installations dédiées aux tests et étalonnages magnétiques notamment avec le générateur de champ magnétique (ou 'cathédrale') permettant d'accueillir des drones de petite envergure, avec différents objectifs complémentaires:

- 1) Qualifier ponctuellement et en série temporelle longue la sensibilité et la stabilité des capteurs magnétiques aéroportés, avec la mise en évidence des effets de variations temporelles, d'alimentation, de montage, d'électronique, et du drone (Fig. 8a).
- 2) Réaliser une cartographie magnétique de l'un des drones pour en caractériser plus précisément sa contamination sur les mesures et optimiser les montages (Fig. 8b).
- 3) Caractériser la réponse induite propre au drone dans la cathédrale, en générant un champ magnétique selon les trois composantes avec une décroissance par palier de 500 nT toutes les 10s, décroissance mesurée simultanément par le capteur magnétique. En présence d'un facteur de susceptibilité constant et en l'absence d'aimantation rémanente, cette décroissance doit être strictement proportionnelle dans les trois directions du champ. Il devient ainsi possible de caractériser toutes les composantes de l'aimantation induite et rémanente du drone à la distance du capteur grâce à ce dispositif, et corriger les offsets sur la mesure.

L'ensemble de ces tests permettent d'envisager l'optimisation des montages des capteurs magnétiques pour améliorer le rapport signal/bruit des mesures. Il s'agit également de définir une calibration précise des mesures aéroportées selon les différentes configurations vecteurs/capteurs mises en œuvre lors des campagnes de terrain et selon les problématiques abordées. Notons que cette phase de calibration, une fois standardisée, sera à réitérer régulièrement pour quantifier en parallèle toute dérive instrumentale.

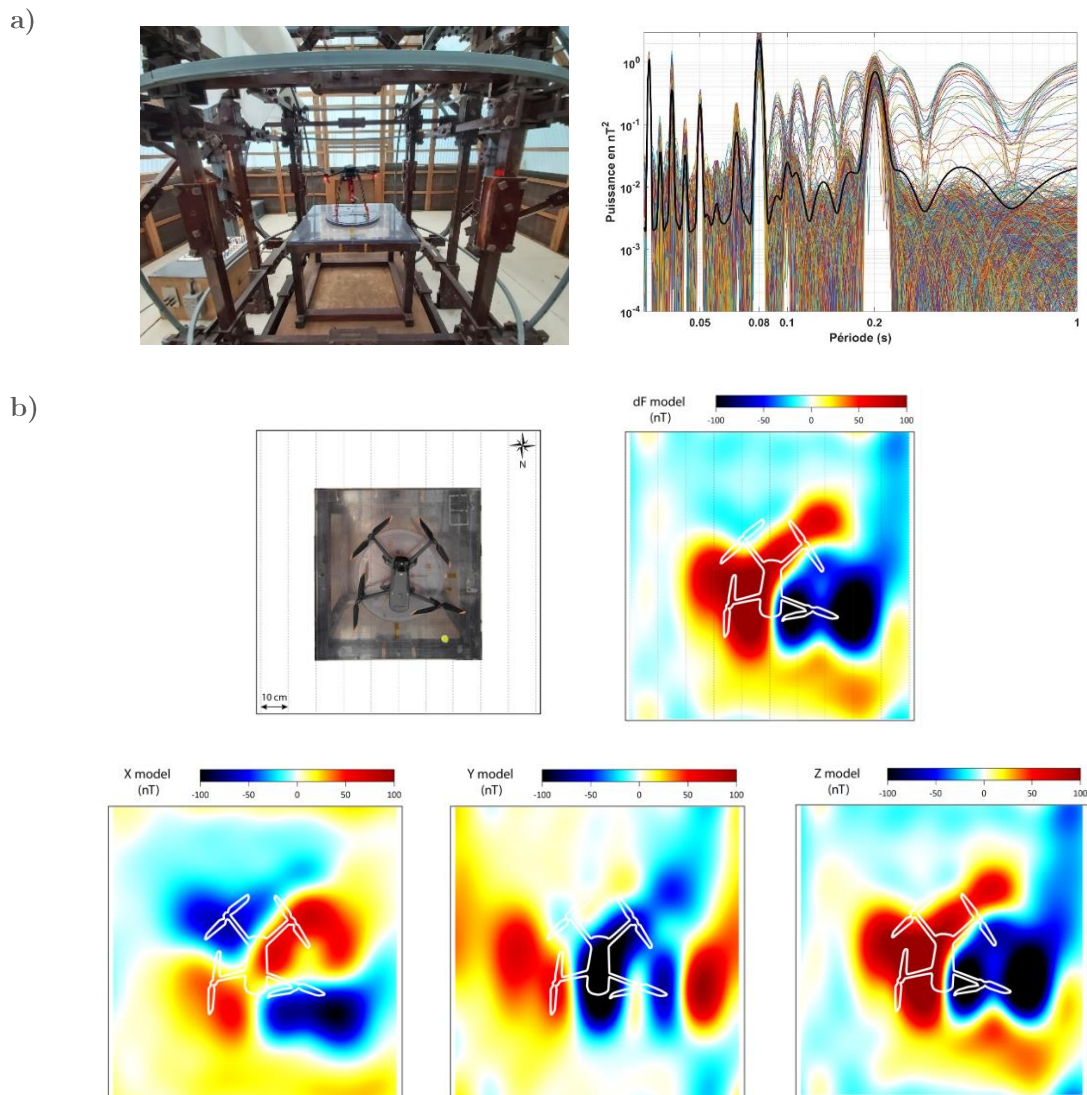


Figure 8 : Tests sur la caractérisation de la magnétométrie aéroportée par drone, réalisés à l'Observatoire magnétique de Chambon la Forêt.

a) Montage Mavic 3-QuSpin gen2 dans la 'cathédrale' (3 bobines d'Helmholtz selon le trièdre orthogonal) et analyse spectrale (fenêtre glissante de 5s) du signal magnétique associé.

b) Cartographie magnétique du drone DJI Mavic 3 (lignes de mesures réalisées par QuSpin gen2, champ total mesuré et extraction des 3 composantes par analyse en harmoniques rectangulaires ; **Thébault et Gailler, 2023**).

2.3. Modélisations numériques et contraintes associées

Au-delà de l'acquisition et du traitement, la modélisation numérique de ces données constitue une autre problématique au sein de mes travaux. Fondamentale pour assurer une interprétation fiable des paramètres géophysiques, il s'agit d'un processus complexe à différents niveaux, car par définition, tout modèle a pour objectif de fournir une répartition discrète particulière c'est-à-dire une interprétation des paramètres géophysiques (densité, aimantation, résistivité électrique) en profondeur. L'une des principales considérations à prendre en compte est le phénomène de non-unicité des solutions impliquant que 'le problème de l'interprétation quantitative des données est mathématiquement indéterminé' (Coulomb and Jobert, 1973). Quelle que soit l'approche de modélisation envisagée (directe, inverse, 1-2-3D), certaines considérations de vraisemblances géologiques sont nécessaires pour limiter l'indétermination, impliquant de restreindre à priori le champ des solutions. Cette démarche, qui peut aussi comporter une part de subjectivité, dérive d'une analyse de toutes les informations disponibles à priori. Il s'avère donc indispensable de disposer d'un ensemble d'informations, fiables et indépendantes des données géophysiques étudiées, pour entreprendre une modélisation géologiquement réaliste.

J'ai progressivement abordé différentes approches de modélisations à différentes échelles spatiales dans un premier temps, en une et deux dimensions selon le type et la couverture des données par exemple. La nécessité de prendre en compte la troisième dimension a très tôt été sous-jacente dans mes travaux car les signaux géophysiques restent considérablement influencés par la géométrie de surface, particulièrement dans le cadre de topographies volcaniques complexes. Selon les problématiques abordées, la méthode de modélisation directe a été privilégiée le long de profils en 2D, et lorsque des informations complémentaires étaient disponibles (coupes géologiques, forages, profils sismiques, etc. ; **Gailler et al., 2013**). La méthode inverse a quant à elle permis de fournir des modèles 3D, selon les lois classiques reliant les données géophysiques aux paramètres modélisés, pour déterminer à priori un domaine de vraisemblance. Pour chacune de ces approches mon objectif a été, dans la mesure du possible, de développer des modèles couplés, c'est-à-dire combinant plusieurs types de données géophysiques sous contraintes diverses. Parmi ces contraintes, au-delà des observations de terrain, citons l'apport considérable de l'imagerie visible et thermique infrarouge ainsi que la quantification des contraintes pétrophysiques (i.e. mesures des paramètres géophysiques sur échantillons en laboratoire ; **Gailler et al., 2019**).

Enfin, le développement et l'amélioration constants des codes d'inversion géophysique et des capacités numériques offrent des résolutions inégalées, permettant d'exploiter un nombre croissant de données de plus en plus précises. L'ensemble de ces aspects permettent aujourd'hui d'envisager l'élaboration de modèles 4D des systèmes volcaniques, en combinant des modélisations 3D structurales mais également temporelles issues de données de réitération, résultant d'inversions jointes ou conjointes des données géophysiques. Les principales perspectives sur ces aspects de mes activités de recherche sont abordées dans le dernier chapitre (**projet ANR Scan4Volc**).

Mesures magnétiques par drone :

Une nouvelle approche dédiée au suivi 4D des édifices volcaniques

Edouard Régis², Lydie Gailler¹, Philippe Labazuy¹, Martial Bontemps², Thierry Souriot¹, Guillaume Bacques², Bruno Carton³

¹CNRS, IRD, OPGC, Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne, F-63000 Clermont-Ferrand, France

²CNRS, Observatoire de Physique du Globe de Clermont, Université Clermont Auvergne, F-63000 Clermont-Ferrand, France

³R-GEOLIX, F-63400 Chamalières, France

Champ magnétique et Volcanologie

1 - Mise en place d'un corps magnétique



L'activité volcanique perturbe le champ magnétique terrestre (Zlotnicki et al., 1993)

Influence de la température, l'altération, la fracturation (Fig. 1)

Intérêt des mesures de l'aimantation par drone pour l'imagerie et le suivi :

- Des anomalies thermiques :
Systèmes magmatiques et hydrothermaux

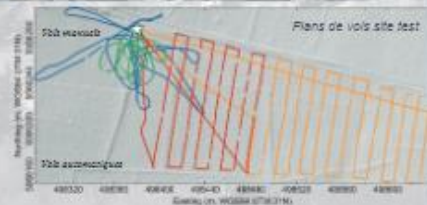
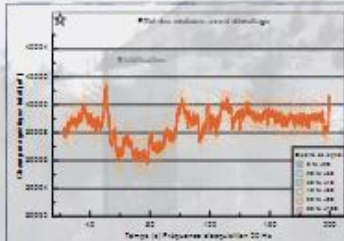
- Des hétérogénéités mécaniques :
Zones de faiblesse, instabilités

Approche aéroportée performante pour l'acquisition et l'analyse des signaux magnétiques

(Gailler et al., 2021)

Figure 1 : Activité volcanique et aimantation.

Tests et validation opérationnelle



Résolution et sensibilité du capteur aéroporté QTFM (Fig. 3)

Quantification des effets électromagnétiques, électrocinétiques (influence des moteurs) et directionnels

Volts manuels et automatiques à différentes altitudes, suivi topographique

Comparaison avec des mesures sol simultanées (GSM19)

Application sur le site du petit Puy de Dôme (Chaîne des Puy, France) (Fig. 4)

Figure 3 : Quantification de la sensibilité et de la réaction du capteur magnétique aéroporté QTFM QuSpin.

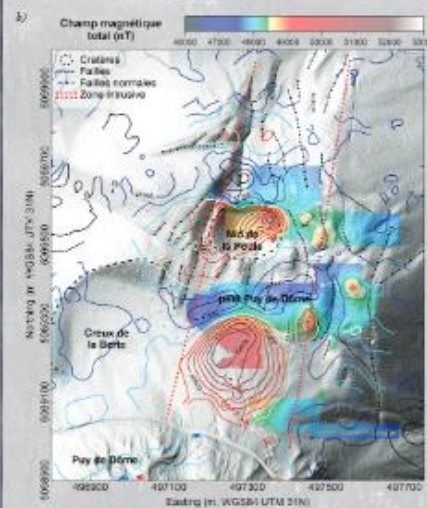
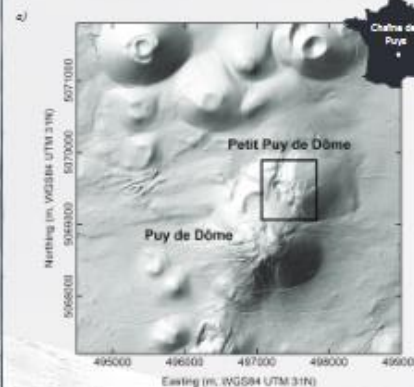


Figure 4 : a) Localisation de la zone d'étude (Lézier 0.5 m).

b) Comparaison entre mesures magnétiques aéroportées (QTFM - image) et au sol (GSM19 - contours) sur le site du petit Puy de Dôme (Chaîne des Puy, France).

Apport des mesures magnétiques aéroportées : Technologie



Déploiement contraint par la topographie
Effet Overhauser
- 8 kg - Fréquence d'acquisition 20 Hz
plusieurs km / jour, limité en conditions 'extrêmes'



Capteurs scalaires (champ total) (Fig. 2)

Haute précision -
Faible bruit intrinsèque -
Excellente résolution temporelle -

Déploiement efficace, levés homogènes
Rb à pompage optique
< 100 g - Fréquence d'acquisition 20 Hz
12 x 20 min. de vol > 10 Ha / jour

Adapté aux problématiques en contexte volcanique :
Détection des structures actives en profondeur

Figure 2 : Technologies comparées des capteurs magnétiques sol (GSM19) et aéroportés (QuSpin).

Vers un suivi 4D des édifices volcaniques

Réitérations rapides, levés sécurisés et homogènes (Fig. 5) :

Imagerie et suivi des anomalies liées aux signaux volcano-magnétiques transitoires

Evolution spatio-temporelle, 4D de l'aimantation en lien avec l'activité volcanique

Développements en cours :
Configuration multi-capteurs (IR, Radar, multi-gaz)

Session Plénière
Structure thermique de la zone sommitale du Puy de la Fournaise révélée par mesures magnétiques et Diagnostics aéroportés

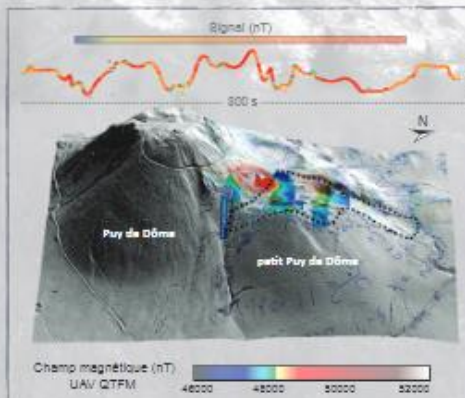


Figure 5 : Synthèse et validation de l'approche magnétique aéroportée dans l'étude des édifices volcaniques (Gailler et al., 2021).

References: Bouligand, C., Glick, J.M.G., Blakely, R.L., 2016. Distribution of buried hydrothermal alteration detected from high-resolution magnetic surveys in Yellowstone National Park. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121, 2975–2992. <https://doi.org/10.1002/2015JB010801>.
Gailler, L.-S., Labazuy, P., 2012. Inertial accelerations of La Réunion (Indian Ocean) inferred from geophysical data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 221–222. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeother.2012.01.015>.
Gailler, L., Kanahissara, J., 2007. Monitoring the cooling of the 1959 Kilauea Di lava lake using airborne magnetic measurements. *Volcanol. Geotherm. Res.* 160, 107–119. <https://doi.org/10.1007/s10464-017-1119-7>.
Gailler, L., Labazuy, P., Régis, E., Bontemps, M., Souriot, T., Bacques, G., Carton, B., Bouligand, C. (2021) – Validation of a new UAV magnetic prospecting in volcano monitoring in the Puy de la Fournaise and Piton de la Fournaise.
Zlotnicki, J., Le Nézet, H., Dubessac, J.C., Puyferron, C. and Di Lorenzo, M. (1992) - Magnetic variations on Piton de la Fournaise volcano. Volcanomagmatic signals associated with the November 6 and 29, 1987, eruptions. *JVGR*, 36, 181-196.

Chapitre 3.

Intégration des travaux de recherche

L'ensemble des approches précédemment décrites a donc pour objectif de renforcer la connaissance des édifices volcaniques à différentes échelles, avec des applications multiples sur des cibles et des phénomènes très variables. En mettant à profit le renouveau technologique et la complémentarité des méthodes géophysiques, l'essor grandissant des mesures aéroportées par drone, ainsi que les progrès constants dans les modèles d'interprétation, j'ai l'opportunité d'appliquer ces approches dans différents contextes géodynamiques et à différentes échelles, des provinces volcaniques anciennes en dormance aux systèmes caractérisés par une activité ponctuelle, cyclique ou permanente.

La nécessité d'imager la structure interne 'statique' et d'évoluer vers un suivi dynamique de ces structures à différentes échelles spatio-temporelles a été mis en évidence relativement tôt dans mes travaux de recherche (Gailler et al., 2009; Gailler, 2010). Construire un modèle initial et définir son état-0 requiert en premier ordre une connaissance intégrée de l'architecture d'un édifice et de son héritage structural en terme de contrastes structuraux et lithologiques, de système volcano-tectonique et d'imagerie des réservoirs magmatiques et hydrothermaux, pour établir les relations entre hétérogénéités mécaniques et instabilités (effondrements, glissements). Accéder à l'évolution de ces systèmes et suivre la dynamique éruptive implique dès lors de caractériser les structures de déformation, de quantifier les paramètres éruptifs et transferts superficiels, et de suivre l'évolution des zones de stockages magmatiques et hydrothermales, avec un réel apport aux stratégies de surveillance. De par mon statut de physicienne adjointe, je contribue en parallèle à l'étude et au suivi des volcans français d'Outre-Mer, dont le fonctionnement et la prédiction des éruptions demeurent de véritables enjeux sociétaux.

3.1. Structure interne des édifices volcaniques : architecture globale et héritage structural

Les édifices volcaniques sont caractérisés par une histoire complexe, évoluant généralement sur de longues échelles temporelles et dont seuls les derniers stades de croissance sont exposés. La connaissance d'un édifice, de son fonctionnement et de son évolution, nécessite donc d'étudier en détail sa structure interne pour imager ces différents stades inaccessibles en surface, à terre comme en mer. L'intégration de données géophysiques multi-méthodes et leur modélisation couplée sous contrainte de nombreuses observations géologiques et données complémentaires, permettent ainsi de contribuer à caractériser leur fonctionnement passé et actuel en abordant différentes problématiques.

3.1.1. Contrastes structuraux et lithologiques

De nombreuses études ont mis en lumière les similarités et dissemblances d'édification et de fonctionnement passé à l'échelle des boucliers basaltiques notamment (e.g. Michon et al., 2015; Poland et al., 2017), nécessitant d'accéder aux hétérogénéités profondes avec la mise en œuvre d'approches régionales et/ou dédiées à différentes profondeurs d'investigation. Une interprétation couplée des données gravimétriques, magnétiques et électromagnétiques permet notamment de fournir un modèle général des édifices à grande échelle (e.g. Ile d'Hawaii : Hildenbrand et al., 1993; Kauahikaua et al., 2000; Canaries : Araña et al., 2000; Blanco-Montenegro et al., 2008, 2003; Gottsmann et al., 2008).

Par exemple à l'échelle de l'île de la Réunion (Fig. 9a), dont seul 3% de l'histoire est accessible en surface, une telle approche a permis d'établir un nouveau scénario d'édification et d'évolution du système volcanique en 3D à grande échelle avec de nouvelles informations sur les trois édifices de l'île (**Gailler, 2010**), ainsi que sur sa croissance dans son ensemble (**Gailler and Lénat, 2010; L S Gailler and Lénat, 2012**). La reconstruction de la paléo-topographie de l'île à 780 ka (inversion magnétique Brunhes-Matuyama) a mis en évidence une paléo-île organisée autour d'un centre volcanique majeur, le Piton des Neiges mais également du Volcan des Alizés au niveau du Grand Brûlé, tous deux associés à des corps hypovolcaniques denses (Fig. 9a,b). L'identification de ces complexes est, mécaniquement parlant, particulièrement importante en terme d'évolution structurale. Si des processus volcano-tectoniques de type effondrement caldérique (Chevallier, 1979; Kieffer, 1990, 1989) ou étalement gravitaire (Oehler, 2005; Van Wyk de Vries et al., 2001) ont été invoqués pour la formation des Cirques du Piton des Neiges, leur coïncidence avec l'extension latérale du complexe intrusif hypovolcanique suggère néanmoins une relation étroite entre la topographie et la subsidence du complexe au sein de la lithosphère.

La construction du Piton de la Fournaise sur le Flanc Est a par la suite provoqué un changement majeur dans la morphologie de l'île, malgré une épaisseur importante de produits récents sous ses zones centrale et méridionale seulement. L'imagerie du complexe intrusif des premiers stades du Piton de la Fournaise dans le secteur de la Plaine des Sables a suggéré un paléo-centre décalé d'environ 1,5 km vers l'est par rapport à l'emplacement précédemment proposé. Les modèles géophysiques mettent également en évidence des empilements laviques massifs ayant comblé des dépressions volcano-tectoniques de plusieurs centaines de mètres de profondeur dans l'Enclos. Inversement, le Cône Central actif est associé à la présence de coulées de lave peu épaisses, fortement vésiculées et fracturées, constituant une zone de faiblesse considérable (Fig. 9c).

A la transition terre-mer, l'origine des plateaux côtiers peut être interprétée comme des variations du niveau de la mer ou renseigner sur des effets de subsidence de l'édifice (Moore et Clague, 1992 ; Carracedo, 1999). A la Réunion il s'agit d'une paléo-côte liée aux variations eustatiques (Oehler et al., 2008) composée d'accumulation de hyaloclastites (Fig. 9d) et de pillow lavas avec l'exemple du Massif de la Montagne au Nord qui confirme cette hypothèse (**Gailler and Lénat, 2010**).

Imager le prolongement des constructions subaériennes est également important pour mieux caractériser l'architecture d'un édifice dans son ensemble, avec l'exemple de la continuité des rift zones, zones intrusives majeures, actives en mer (Fig. 9e), mais également la découverte de constructions anciennes à grande profondeur. A l'échelle de la Réunion, au-delà de l'imagerie des vestiges sous-marins du Volcan des Alizés, la ride sous-marine de l'Etang Salé a été interprétée comme une extension du Piton des Neiges probablement alimentée par une importante rift zone (**Gailler and Lénat, 2010**). La corrélation entre le toit de ces constructions et les horizons sismiques mis en évidence dans des études antérieures, et interprétés comme la base de l'édifice volcanique (De Voogd et al., 2009; Pou Palomé, 1997), suggère l'absence de bombement lithosphérique à l'aplomb de La Réunion sous l'effet d'un sous-plaquage magmatique (Gallart et al., 1999), éclairant ainsi sur la dynamique lithosphérique. Sur les flancs immergés, les quatre excroissances sous-marines sont quant à elles principalement composées d'accumulation de dépôts d'avalanches de débris (Oehler et al., 2008), dont les contrastes de densité peuvent être corrélés avec certaines unités géologiques observées en surface. Elles nous renseignent sur les mécanismes de déstabilisation à grande échelle (**Gailler and Lénat, 2010**; Fig. 9e).

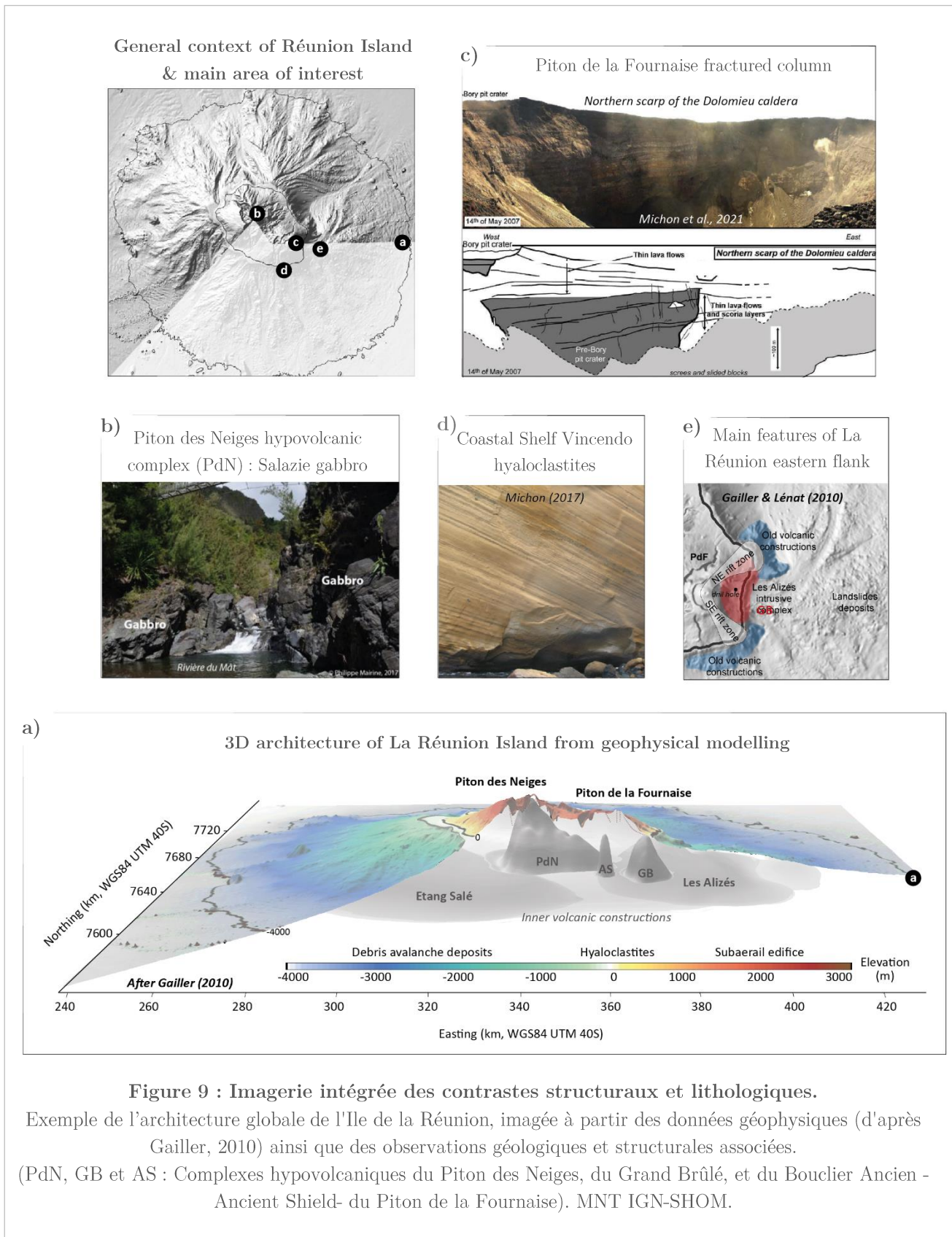


Figure 9 : Imagerie intégrée des contrastes structuraux et lithologiques.

Exemple de l'architecture globale de l'île de la Réunion, imagée à partir des données géophysiques (d'après Gailler, 2010) ainsi que des observations géologiques et structurales associées.

(PdN, GB et AS : Complexes hypovolcaniques du Piton des Neiges, du Grand Brûlé, et du Bouclier Ancien- Ancient Shield- du Piton de la Fournaise). MNT IGN-SHOM.

3.1.2. Système volcano-tectonique régional

La répercussion de ces contrastes structuraux et lithologiques à différentes profondeurs sur l'évolution des édifices peut être considérable, conditionnant l'activité volcano-tectonique telle que la fracturation et les déformations de surface à plus ou moins long terme. Au-delà des études géomorphologiques par analyse de Modèles Numériques de Terrain (MNT) par exemple, les méthodes géophysiques permettent d'imager ces systèmes qui vont, successivement, jouer un rôle dans le fonctionnement et l'évolution d'un édifice à plus ou moins long terme.

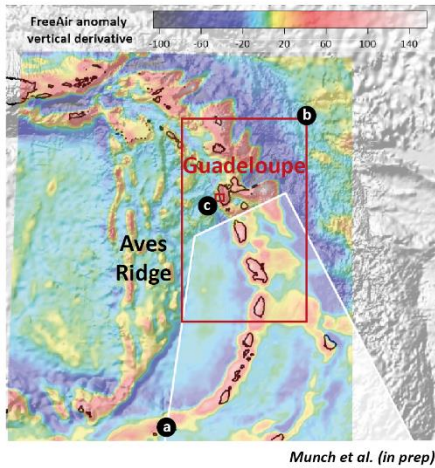
L'approche géophysique multi-méthodes s'est ainsi avérée pertinente dans un tout autre contexte géodynamique, avec l'exemple de la subduction de l'Arc des Petites Antilles (**Gailler et al., 2017**; Fig. 10a) qui s'intègre dans un système volcano-tectonique complexe caractérisé par un arc double et une dissymétrie croisée (Bouysse, 1979; Westercamp, 1979). La compilation et le traitement des données gravimétriques et magnétiques au sol, aéroportées et marines, acquises ces 40 dernières années a permis d'apporter davantage d'informations quant au fonctionnement de l'arc des Petites Antilles mais également des îles de Guadeloupe.

A grande échelle (**Gailler et al., 2013**; **Munch et al., 2013**; Fig. 10b), les nombreuses discontinuités géophysiques, cohérentes avec les principaux reliefs bathymétriques observés dans l'alignement de systèmes de failles déjà reconnus dans ce secteur, ont permis de mettre en évidence deux zones de subsidence, ainsi qu'une zone de déformation et de fracturation préférentielle de la plaque supérieure dans l'axe de la subduction (Fig. 10b). La subduction de la plaque Atlantique se répercuterait ainsi en surface sur la plaque Caraïbe et le prisme d'accrétion. L'ensemble de ces travaux a par la suite offert de nouvelles applications en caractérisant les structures compressives dans le nord de l'arrière arc et en modélisant l'épaisseur crustale et l'origine de son évolution (magmatique et tectonique, **Philippon et al., 2020**). Cette approche a permis de mettre en évidence des changements paléogéographiques qui se reflètent encore dans la biologie actuelle avec d'autres implications.

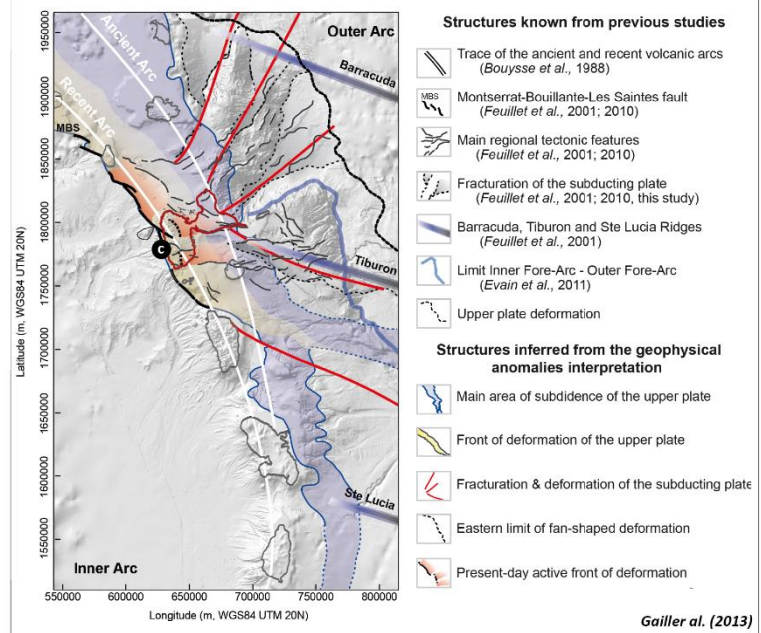
A l'échelle de l'île de Guadeloupe (**Gailler et al., 2013**), les remontées du socle volcanique modélisées à l'aplomb des plateformes carbonatées observées en surface renseignent sur la morphologie volcanique ancienne. Le centre volcanique récent altéré s'est mis en place dans une dépression en demi-graben associée au volcanisme actif de la Soufrière et dont la bordure ouest, parallèle à la direction de l'arc, est interprétée comme le front actif de déformation de la plaque Caraïbe (Fig. 10b). Ces interprétations apportent plus généralement de nouvelles contraintes quant à la formation des arcs rémanents comme la Ride d'Aves plus à l'ouest dont l'origine reste débattue.

Identifier les structures volcano-tectoniques permet également de mieux comprendre les mécanismes de circulations de fluides, depuis les zones de stockages (magmatiques et hydrothermales ; Finizola et al., 2010; **Gailler et al., 2019**) jusqu'à leurs manifestations en surface (panaches volcaniques, fumeroles, dégazage...). Citons l'exemple de la province géothermale de Bouillante (**Gailler et al., 2014**) à l'aplomb de laquelle les approches géophysiques ont mis en évidence un important contrôle structural sur la distribution des ressources géothermiques (Fig. 10c). Ces différents aspects soulignent en parallèle la pertinence d'une étude couplée entre signaux géophysiques et géochimiques, avec par exemple l'étude des variations spatiales des flux de CO₂ (Boudoire et al., 2018; Finizola et al., 2010) comme abordé par la suite.

General context of the Lesser Antilles Arc & main area of interest



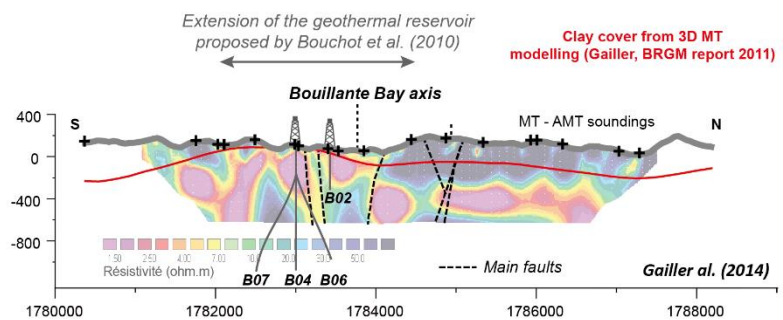
b) Interpretative structural and volcano-tectonic scheme



c) The geothermal field of Bouillante inferred from geophysical data



Hot water discharge at sea from the geothermal power plant (courtesy of B. Hira, ORMAT Bouillante) In Moretti et al. (2021).



a) Deep structure of the Lesser Antilles Arc in Guadeloupe Islands area

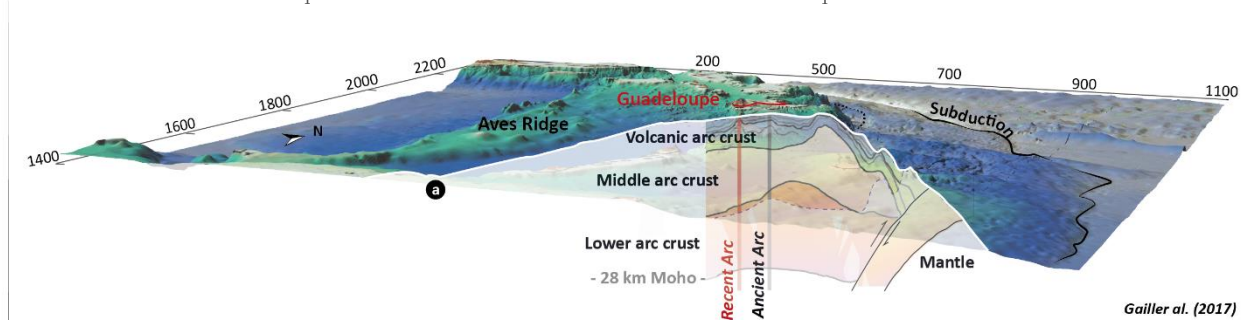
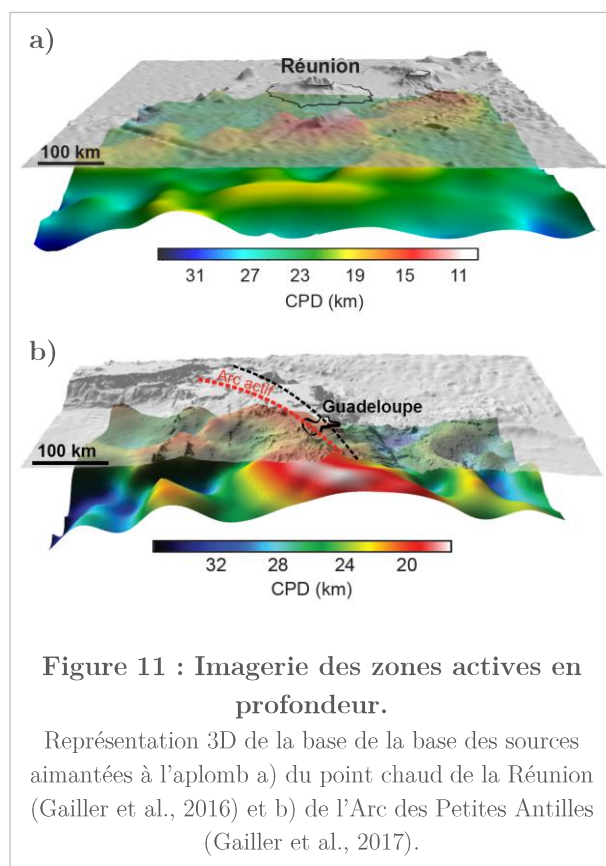


Figure 10 : Imagerie des systèmes volcano-tectoniques, implications régionales et locales. Exemple de l'apport des données géophysiques à l'imagerie du système volcano-tectonique et la structuration de l'Arc des Petites Antilles, imagerie du complexe géothermique de Bouillante (Guadeloupe).

3.2. Détection et imagerie des zones magmatiques et hydrothermales

Quantifier les phénomènes éruptifs nécessite fondamentalement de caractériser la géométrie et l'évolution des zones de stockage magmatiques et hydrothermales actives. Détecter la présence de magma à différentes profondeurs et les interactions avec les systèmes hydrothermaux est donc à la fois une nécessité mais aussi un challenge, car souvent difficile sans contraintes en surface. C'est une autre problématique majeure que j'ai abordée, pour contribuer à mieux comprendre les mécanismes de transferts de fluides et acquérir des données sur les propriétés physiques macroscopiques des systèmes magmatiques et hydrothermaux.

A grande échelle, la détermination du point de Curie (CPD, pour Curie Point Depth) basée sur une analyse spectrale (Bhattacharyya and Leu, 1975a; Spector and Grant, 1970) ou fractale (Bouligand et al., 2009; Maus and Dimri, 1996; Thébault and Vervelidou, 2023) des anomalies magnétiques, permet de détecter et imager ces zones magmatiques. Une telle surface constitue un véritable traceur de l'isotherme de Curie ($> 580^{\circ}\text{C}$) en dessous de laquelle la lithosphère est globalement paramagnétique (Mayhew et al., 1985; Wasilewski and Mayhew, 1992; Wasilewski et al., 1979) c'est-à-dire non aimantée. Cette approche est donc particulièrement intéressante pour étudier les sources profondes et l'aimantation dans divers contextes géodynamiques (lithosphère ancienne : Arnaiz-Rodríguez and Orihuela, 2013; avant-arc de subduction : Gailler et al., 2017 ; point chaud : Gailler et al., 2016). La profondeur de cette interface apparaît étroitement corrélée au contexte géologique, moins profonde à l'aplomb des zones volcaniques et géothermiques que sous les zones continentales stables ; e.g. Bhattacharyya and Leu, 1975b, 1975c; Blakely, 1988; Okubo et al., 1989, 1985; Shuey et al., 1977; Tsokas et al., 1998). J'ai mis en œuvre cette approche en domaine océanique dans deux contextes géodynamiques différents et deux cibles majeures, pour lesquelles la remontée d'une telle interface thermique peut être liée à de nombreux phénomènes en profondeur (Fig. 11).



A l'aplomb du point chaud de La Réunion (Gailler et al., 2016), les sources aimantées se prolongent bien au-dessus de l'interface croûte-manteau dans certaines zones. La profondeur de la base de ces sources traduit donc l'effet thermique du point chaud (Fig. 11a), avec plusieurs discontinuités corrélées aux zones de fractures majeures à l'échelle de la plaque.

Dans la zone de subduction de l'Arc des Petites Antilles (Gailler et al., 2017), une importante remontée de la base des sources aimantées est mise en évidence au niveau de l'arc actif. Des simulations thermo-mécaniques 2D de la zone de subduction ont permis de tester l'hypothèse de serpentinisation du domaine avant-arc, corrélée aux anomalies géophysiques (Blakely et al., 2005). Dans la partie centrale de l'arc, l'épaisseur magnétique crustale serait plus faible que l'épaisseur de la croûte estimée par la profondeur du Moho, en accord avec la déformation active de l'avant-arc interne (Fig. 11b).

A plus faible profondeur, j'ai pu contribuer à apporter des éléments de réponse à cette problématique lors d'une mission longue durée sur le Kilauea à l'Hawaiian Volcano Observatory (HVO-USGS, 2015 ; Fig. 12a). L'ouverture en 2008 d'un nouvel événement dans le cratère sommital Halema`uma`u offrait en effet l'opportunité unique d'accéder en champ proche au système magmatique, caractérisé par la présence d'un piston de lave visible à la profondeur oscillante (200 m de profondeur en moyenne), une explosivité périodique et un dégazage important. Cette véritable fenêtre magmatique a offert la possibilité d'étudier par méthodes géophysiques : 1) la géométrie d'un conduit, 2) les propriétés physiques macroscopiques du magma (résistivité et densité dans cette étude), 3) les relations avec les structures environnantes (système hydrothermal, système volcano-tectonique) et 4) les relations avec d'autres signaux magmatiques et/ou hydrothermaux comme les signaux sismiques longue période et très longue période enregistrés dans la même zone (Dawson and Chouet, 2014).

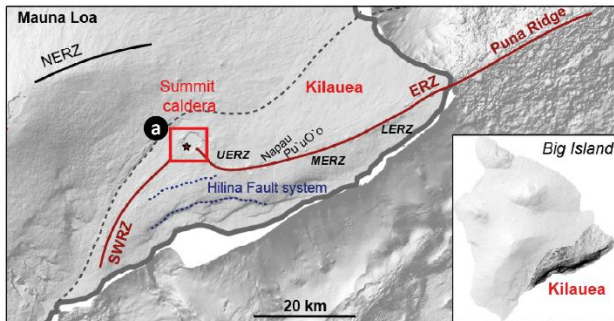
La campagne de tomographie de résistivité électrique 2D de grande ampleur réalisée en 2015 a permis de modéliser en 3D la conductivité du lac de lave et du système hydrothermal environnant avec différentes implications (Fig. 12b ; **Gailler et al. Soumis ; Soueid Ahmed et al., 2018**).

Depuis la crise majeure qui a considérablement affecté le Kilauea en 2018 (vidange du lac de lave et subsidence de la caldera ; Fig. 12b), ce projet a offert un jeu de données désormais unique avec de nombreuses études récentes et encore en cours (<https://www.usgs.gov/media/images/airborne-electromagnetic-and-magnetic-aem-survey-over-kilauea-caldera-july-28-2022-4>).

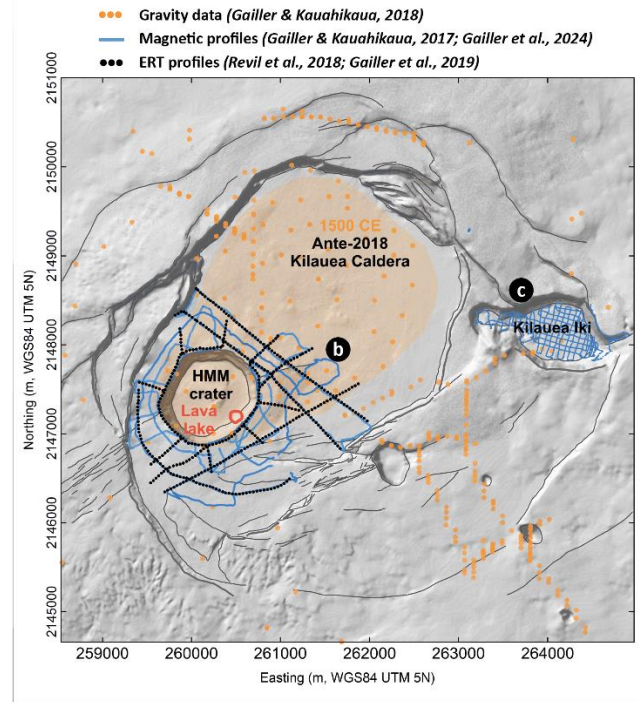
En parallèle, les levés magnétiques menés à l'échelle du lac de lave du Kilauea Iki (Hawaii), un cratère comblé par une épaisseur de lave de 150 m environ en 1959, ont contribué à démontrer que l'étude des anomalies magnétiques permet de détecter la persistance d'une lentille magmatique ($> 540\text{ °C}$; Keller et al., 1979) à faible profondeur (**Gailler et Kauahikaua., 2017** ; Fig. 12c) comme détaillé par la suite.

La combinaison de tels levés géophysiques à haute résolution interprétés sous contraintes géologiques et physiques reste donc l'un des outils les plus puissants pour quantifier les aléas associés à de nombreux autres édifices (Finn et al., 2001). En effet, corps magmatiques et altération hydrothermale constituent des zones de faiblesse majeurs à diverses profondeurs et d'extension variable au sein des édifices volcaniques, influençant également le développement de l'activité volcano-tectonique.

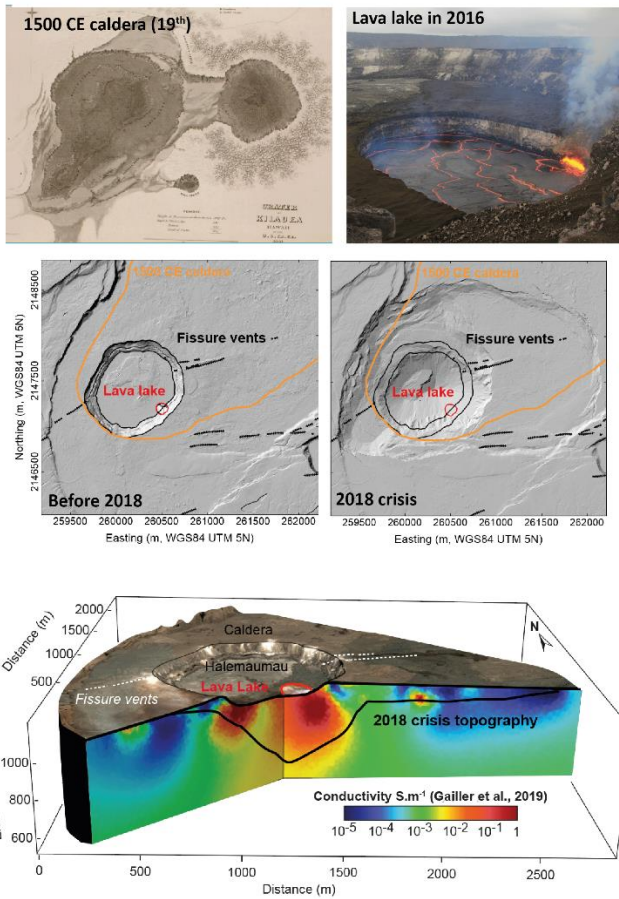
General context of Kilauea volcano & main area of interest



a) Synthesis of the geophysical dataset before the 2018 crisis



b) Kilauea's caldera until the 2018 eruptive crisis & 3D conductivity imaging of the lava lake



c) Synthetic sketch of the 2015's thermal state of Kilauea Iki lava lake from magnetic modelling

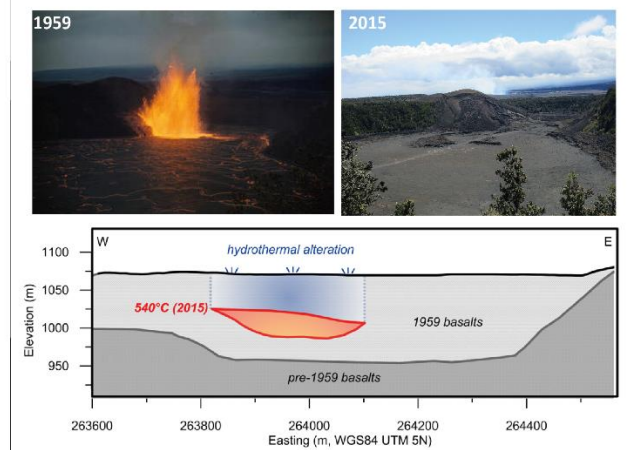


Figure 12 : Imagerie des zones de stockages superficielles et instabilités associées.

Apport des données géophysiques à : (a) l'imagerie du système magmatique et hydrothermal de la zone sommitale du Kilauea (b), la détection du corps magmatique encore actif à l'aplomb de l'ancien lac de lave du Kilauea Iki (c), la caractérisation des zones d'instabilité associées (photos © USGS, MNT opentopo).

3.2.1. Relations entre hétérogénéités mécaniques et instabilités

Les différents systèmes et structures précédemment décrits comptent parmi les principales sources d'hétérogénéités mécaniques pouvant être à la fois le résultat et le siège de déstabilisations majeures au sein des édifices. Si les mécanismes d'effondrement et/ou de glissement sont multiples et leurs processus encore largement débattus, l'imagerie géophysique peut apporter de nouvelles contraintes quant à leur origine à différentes échelles. En effet, les zones mécaniquement actives sont associées à des variations plus ou moins rapides de divers paramètres géophysiques, tels que la résistivité, l'aimantation, la densité. Par exemple, la résistivité peut permettre d'estimer la teneur en eau et donc la porosité, pour évaluer l'endommagement d'une structure parfois à grande profondeur. En parallèle la variation spatiale de l'aimantation peut être reliée à la présence d'hétérogénéités au sein des édifices (structures d'âges différents, altération ; **Gailler et Lénat, 2010** ; **Gailler et al., 2016** ; **2017**). Les contrastes de densité renseignent quant à eux sur les mécanismes de transfert de masse et les volumes impliqués (**Gailler et al., 2009**).

a) Effondrements

La charge gravitationnelle d'un édifice, les complexes hypovolcaniques et intrusifs, la fracturation héritée et la présence de plans de faiblesse en profondeur, sont autant de sources pouvant induire une déformation et des instabilités tout au long de l'évolution d'un édifice. De tels systèmes sont clairement observés dans les édifices anciens érodés, grâce aux études géophysiques, ou encore déduits des grands événements caldériques comme à Hawaï, aux Canaries ou aux Galápagos. Si l'analyse de la géométrie et des indicateurs cinétiques des failles, ainsi que la caractérisation des instabilités de surface (par modélisation analogique par exemple, **Delcamp et al., 2012**) ne sont pas suffisantes pour contraindre les mécanismes sources, les approches géophysiques apportent des informations supplémentaires en profondeur, permettant de mieux contraindre les champs de déformation (comme ceux obtenus à partir de la surveillance géodésique).

Que ce soit à grande échelle avec les grands épisodes caldériques ou dans une moindre mesure avec la formation de pit crater, les phénomènes d'effondrements sont des processus récurrents, voir cycliques dans l'histoire de bon nombre d'édifices volcaniques. La caldera du Kilauea à Hawaii en est un exemple particulièrement marquant, les évidences géologiques suggérant au moins deux cycles explosifs majeurs au cours des derniers 2200 ans (e.g. Swanson et al., 2014). La modélisation des données gravimétriques en 2D et 3D (**Gailler and Kauahikaua, 2018**) a permis de reconstruire la morphologie de la caldera de 1500 CE avant son remplissage ultérieur et sa nouvelle phase d'effondrement récente (Fig. 12 a,b). La corrélation entre l'extension de cette caldera historique avec la distribution des zones fumeroliennes et anomalies thermiques observées en surface confirme une forte influence de la fracturation héritée sur la circulation des fluides hydrothermaux. Plus récemment, la crise éruptive majeure qui a affecté le Kilauea en 2018 a engendré un nouvel effondrement caldérique de la zone sommitale (Neal et al., 2019). Les données magnétiques acquises avant cet épisode ont mis en évidence la présence d'un important volume de faiblesse mécanique dont la géométrie, la profondeur et l'extension corrélaient dans une certaine mesure avec celle de l'effondrement (**Gailler et al., 2024**).

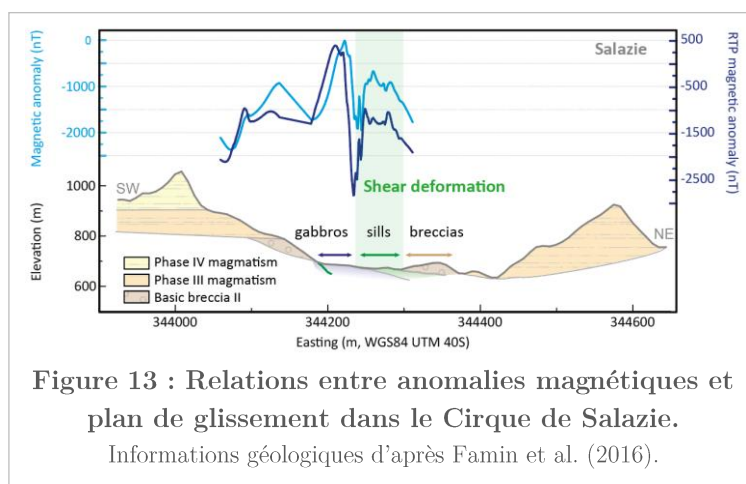
Les approches géophysiques s'avèrent donc fondamentales pour imager les zones de faiblesse majeures, siège de futures instabilités et de transferts de fluides préférentiels qui pourraient influencer les processus volcano-tectoniques futurs.

b) Glissements

Le développement des instabilités mécaniques au sein d'un édifice est également à l'origine de processus récurrents de glissements de flancs au cours de leur croissance et évolution, affectant tout type d'édifice quel que soit leur contexte géodynamique (e.g. St Helens : Lipman et Mullineaux 1981 ; Hawaii : Moore et al. 1989, 1994 ; Canaries : Ablay et Hrlimann 2000 ; Krastel et al. 2001 ; Petites Antilles : Deplus et al. 2001 ; Le Friant 2001; Ile de la Réunion : Dumont et al., 2022; Labazuy, 1991; Tridon et al., 2016).

Au Piton de la Fournaise par exemple, l'effondrement de flanc est un aléa majeur comme en témoignent les études bathymétriques avec des dépôts d'avalanche de débris pouvant atteindre 100 km³ jusqu'à 80 km au large sur les flancs immergés (Oehler et al., 2004). Je m'intéresse plus particulièrement au plan de glissement actif mis en évidence sous le Flanc Est du Piton de la Fournaise (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.e**), ayant déjà généré par le passé un effondrement partiel de l'édifice (Poland et al., 2017). La sismicité persistante enregistrée à l'aplomb de ce flanc, à la fois entre et pendant les événements éruptifs, renseigne déjà quant à la stabilité mécanique de l'édifice (**Gerbault et al., 2022**). Les données InSAR associées à 'l'éruption du siècle' en 2007 ont par ailleurs mis en évidence des déplacements inhabituellement importants associés à ce glissement (Froger et al., 2015). Depuis, les données de déformations InSAR et GNSS confirment la persistance de cette dynamique (Chen et al., 2017; Peltier et al., 2015; Poland et al., 2017) qui s'accélère avec l'activité magmatique. Leurs modélisations ont suggéré la présence d'une zone intrusive et un plan de faille en profondeur, formant une structure en cuillère vers la mer (Dumont et al., 2022; Tridon et al., 2016). A la transition terre-mer, cette structure est localisée à l'aplomb du complexe hypovolcanique des Alizés, une hétérogénéité lithologique majeure dont le toit pourrait en parallèle constituer une surface de décollement et de déstabilisation vers l'est. Afin de mieux comprendre la stabilité du Flanc Est du Piton de la Fournaise, des études géophysiques complémentaires s'avèrent nécessaires pour évaluer les propriétés mécaniques de l'édifice, ainsi que leur évolution en lien avec la dynamique éruptive.

Une étude exploratoire a donc été menée sur le plan de détachement majeur mis en évidence sur le flanc nord du Piton des Neiges dans le Cirque de Salazie (Famin et Michon, 2010). Profondément érodé, ce dernier donne accès à un imposant empilement de sills, siège d'une importante déformation cisailante qui aurait joué un rôle majeur dans la déstabilisation de l'édifice.



Il constitue dans ce sens un très bon analogue au plan de glissement du Flanc Est du Piton de la Fournaise.

L'étude des anomalies magnétiques à petite échelle dans ce secteur met clairement en évidence des contrastes majeurs à la transition entre les gabbros associés au complexe hypovolcanique, l'accumulation de sills associés à la zone de cisaillement et les brèches de déstabilisation (Fig. 13).

3.2.2. Applications à l'évaluation du potentiel hydrologique et géothermique

Au-delà de la structure et du fonctionnement des édifices, une autre application concerne l'exploration géophysique pour la caractérisation de ressources hydrologiques et géothermiques dans des contextes géologiques et géodynamiques très variés (zone de points chauds, subductions insulaires ou continentales, tectonique extensive, provinces volcaniques anciennes).

Les zones volcaniques sont en effet particulièrement favorables au développement de champs géothermiques à différentes enthalpies dont l'exploitation constitue un véritable enjeu sociétal. Si les manifestations hydrothermales de surface constituent souvent les premiers indices à l'éventuelle présence de réservoirs en profondeur, les méthodes géophysiques sont particulièrement efficaces pour détecter les zones affectées par la présence de fluides et l'altération hydrothermale (Wright et al., 1985), et interpoler les informations obtenues plus localement en forage. Par exemple, les liens entre signaux géophysiques et objets géologiques associés aux transferts géothermiques m'ont permis de fournir un modèle conceptuel du système géothermal de Bouillante en Guadeloupe, avec un important contrôle tectonique sur l'activité géothermale de la province dans son ensemble (Gailler et al., 2014; Fig. 10c).

Par ailleurs, les édifices éteints et les provinces volcaniques anciennes en dormance présentent un potentiel hydrologique et géothermique parfois considérable. Leur étude demeure néanmoins difficile par l'absence de mémoire collective des phénomènes passés, ainsi que par la rareté ou même l'absence des phénomènes naturels pouvant être observés. Bon nombre d'entre eux constituent d'excellents proxy aux édifices actifs, de par leurs similarités en termes de structures et de fonctionnement, permettant dès lors d'en améliorer la connaissance et l'exploitation des ressources. Concernant la rareté des phénomènes naturels pouvant être étudiés, le dégazage est souvent la seule manifestation d'une activité magmatique et/ou hydrothermale résiduelle (e.g. Battani et al., 2010), nécessitant une attention particulière non seulement pour le suivi des processus volcano-tectoniques (Boudoire et al., 2018), mais également en terme des ressources profondes avec un réel enjeu environnemental et sociétal. La cartographie géophysique des structures favorables au dégazage diffus permet de dépasser les limites imposées par les techniques conventionnelles de mesure (directe), en imageant les zones perméables et fracturées associées aux remontées de fluides en surface. Les travaux auxquels je contribue à l'échelle du Massif Central (Rafflin et al., 2024; Rafflin et al., in prep), sur le fonctionnement et l'histoire éruptive de différentes provinces volcaniques récentes (Chaîne des Puys) et moins récentes (Sancy/Monts-Dore), sont en relation directe avec les dégazages de surface, la sismicité profonde, et offrent des contraintes sur le potentiel hydrogéologique et géothermique régional (Aumar, 2022; France et al., 2016; Martel et al., 2013).

Combiner les approches géophysiques (e.g. résistivité, chargeabilité, polarisation spontanée, magnétiques, thermiques) et géochimiques (e.g. CO₂, SO₂) permet donc de mieux caractériser l'origine des transferts de fluides afin de délimiter l'extension des systèmes hydrothermaux, hydrologiques et géothermiques. En parallèle, caractériser la direction et la dynamique des circulations hydrothermales (e.g. Ishido, 2004; Revil et al., 2011; Villasante-Marcos et al., 2014) offre la possibilité d'établir des modèles thermodynamiques, fondamentaux dans la connaissance des ressources profondes (Gresse et al., 2017).

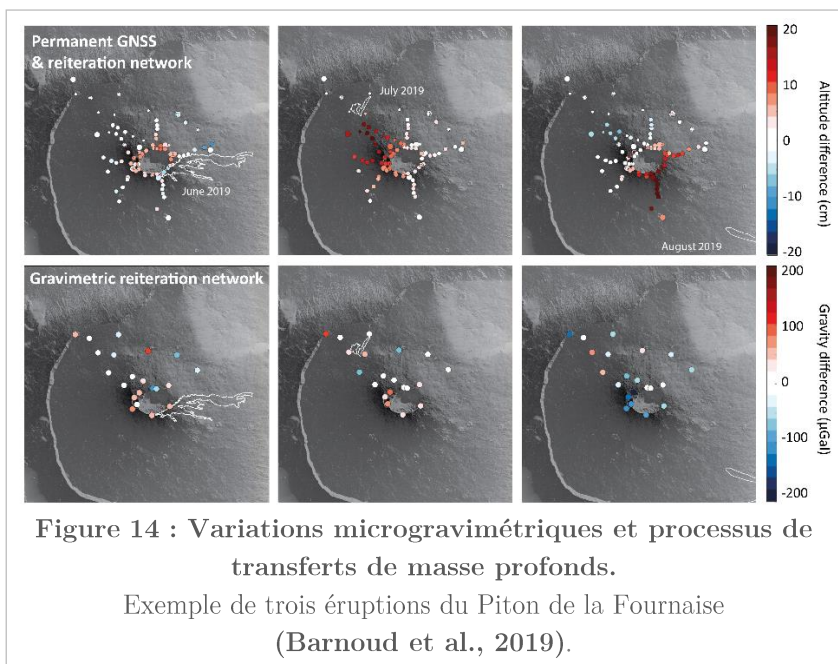
3.3. Evolution des systèmes et suivi de la dynamique volcanique

Le 2^e volet de mes activités repose sur un suivi temporel de ces différentes structures et systèmes, pour en caractériser l'évolution en lien avec l'activité éruptive et la dynamique des processus volcaniques impliqués. Cette évolution temporelle va être associée à des variations plus ou moins rapides des paramètres géophysiques, et deux approches peuvent être mises en œuvre pour les quantifier dans des secteurs clés, par l'intermédiaire de séries temporelles et/ou de répétitions des mesures.

3.3.1. Caractérisation des structures de déformations

L'évolution des structures de déformations est l'une des caractéristiques majeures associées aux transferts de magmas, précurseurs des éruptions. La mise en place de corps magmatiques en profondeur, leur réalimentation ou leur vidange, induisent à plus ou moins long terme des déformations de surface enregistrées par les réseaux permanents des observatoires (extensomètres, inclinomètres, GNSS), mesurées par répétition au sol, mais également par télédétection satellitaire (InSAR, SO OI²). Ces déformations s'accompagnent de l'activation ou réactivation de structures en surface qui doivent être imagées (e.g. fracturation, effondrement). L'imagerie visible haute résolution grâce aux données Lidar ou la photogrammétrie à bord de drones présente un large potentiel dans le suivi de ces processus dynamiques en surface (Derrien et al., 2015). L'objectif est désormais de combiner ces acquisitions aériennes haute résolution avec les approches géophysiques, pour imager, rapidement et précisément, les variations des paramètres géophysiques associés aux structures actives en profondeur sur des zones ciblées et les relier aux déformations de surface.

La répétition des mesures géophysiques (avant et après une éruption notamment) permet ainsi de mieux comprendre et d'imager en 3D l'évolution des structures observées en surface, en lien avec l'activité volcanique. La compilation de données géophysiques antérieures et leur comparaison avec des jeux de données post-éruptifs permet parfois d'aller au-delà d'une étude statique. J'ai par exemple étudié la dynamique éruptive du Cône Central du Piton de la Fournaise à partir des variations gravimétriques associées à l'éruption du siècle en 2007 qui a conduit à l'effondrement du cratère Dolomieu sur 350 m de profondeur. L'émission de $\sim 120 \times 10^6$ m³ de lave (Michon et al., 2007; Urai et al., 2007) a engendré un changement significatif dans la distribution de masse de l'édifice, détecté dans les données gravimétriques relatives anté et post-effondrement. Le déficit de masse observé suite à cet événement volcano-tectonique majeur a été interprété par la création du nouveau cratère Dolomieu seul, ou par les effets combinés du cratère, de la fracturation de la colonne entre la surface et le réservoir magmatique, et le drainage de ce réservoir (**Gailler et al., 2009**). Si cette étude a mis en lumière les limitations inhérentes aux approches relatives en terme de précision, j'ai récemment contribué à la réinstallation du nouveau réseau microgravimétrique du Piton de la Fournaise (Barnoud et al., 2019; Bonvalot et al., 2008; Fig. 14) pour mieux caractériser les déformations de surface et les transferts de masse en profondeur associés à la dynamique de l'édifice dans son ensemble. L'intense activité du Piton de la Fournaise en 2019, avec trois éruptions sur les périodes de mesures, n'a pas permis de répéter l'ensemble du réseau entre chaque phase éruptive, soulignant les limitations de l'approche en terme de rapidité d'exécution de la mesure géophysique en contexte très actif. Néanmoins, analyser conjointement déplacements et changements de gravité peut permettre de déterminer les sources à l'origine des variations de signaux, discriminer entre fluides magmatiques/hydrothermaux et gaz volcaniques (Battaglia et al., 2008) et mettre en évidence les mécanismes de recharge ou vidange magmatique comme évoqué dans le chapitre 2.



Les deux premières éruptions ont été caractérisées par des variations de gravité positives indiquant un apport magmatique au sein du réservoir sommital, tandis que la dernière éruption a été associée à une variation négative suggérant la vidange de ce réservoir.

La gravimétrie compte donc parmi les méthodes les plus pertinentes dans le suivi des transferts de masse en profondeur au cours du temps (Carbone et al., 2013).

Malgré ce fort potentiel, la gravimétrie temporelle n'est pas complètement adoptée notamment en raison des coûts instrumentaux, de la complexité des mesures en terrain volcanique, mais également de leur très grande sensibilité influencée par de nombreux paramètres et des très faibles variations liées aux processus volcaniques. Différents projets de développement sont en cours et seront discutés par la suite.

3.3.2. Quantification des paramètres éruptifs et transferts superficiels

Un autre enjeu majeur pour mieux appréhender la dynamique des éruptions est la quantification des paramètres éruptifs, tels que le flux de chaleur et donc les anomalies thermiques associées. L'imagerie infrarouge (IR) thermique présente par exemple un très fort potentiel dans l'imagerie des zones volcaniques, entre cartographie des anomalies de température, mouvements de fluides, et quantification des flux de chaleur associés, en combinant observations thermiques et analyses topographiques, avec différentes échelles de détection des zones actives (magmatiques, hydrothermales, fumeroliennes, Calvari et al., 2004, 2005; James et al., 2006).

Les données magnétiques sont en parallèle particulièrement intéressantes pour leur comparaison à l'imagerie thermique de surface, car il existe une forte influence de la température sur les l'aimantation des roches en sub-surface (perte d'aimantation liée aux transferts de chaleur, altération hydrothermale) comme précédemment décrit (Bouligand et al., 2014; Gailler et Kauahikaua, 2017; Gailler and Lénat, 2012). Les campagnes récentes menées notamment sur la zone sommitale du Piton de la Fournaise ont contribué à valoriser le potentiel des mesures rapides du champ magnétique dans l'imagerie des anomalies thermiques et des hétérogénéités mécaniques (Gailler et al., 2022).

Un autre aspect de mes travaux de recherche repose dans ce sens sur un suivi régulier du champ magnétique dont j'ai contribué à démontrer la faisabilité à bord de drones pour :

- Cartographier les manifestations de surface par une analyse structurale et thermique détaillée, et imager les zones préférentielles de transferts de fluides.
- Etudier la dynamique interne à partir des signaux volcano-magnétiques.

- Etablir le lien avec l'état thermique et les zones de fragilités mécaniques grâce à la complémentarité entre les différentes approches envisagées.

Par exemple, l'analyse combinée des acquisitions magnétiques et IR thermiques a permis de mieux comprendre l'évolution en profondeur de l'activité sommitale du Piton de la Fournaise depuis l'effondrement du cratère Dolomieu (Gailler et al., 2022). Cette comparaison (Fig. 15a) a mis en évidence les structures encore actives en profondeur d'un point de vue magmatique, hydrothermal ou mécanique, avec des zones d'activité thermique majeure (rift zone SE, Flanc Est), d'altération et de haute perméabilité (pit-cratère de la Soufrière), et une zone de résistance mécanique potentiellement faible (potentiellement en lien avec le plan de glissement du Flanc Est). Ces observations peuvent ainsi être utilisées pour imaginer les axes préférentiels de transferts de fluides futurs, en fournissant également des contraintes sur les processus de diffusion et de refroidissement. Il s'agit donc d'une approche prometteuse dans la surveillance des risques volcaniques avant, pendant et après les éruptions.

En effet, de nombreuses études ont montré que les mesures de champ magnétique terrestre sont perturbées par l'activité volcanique (e.g. Zlotnicki, 1986; Zlotnicki and Le Mouél, 1988 ; Zlotnicki et al., 1993). L'analyse de l'aimantation en temps quasi réel, ou par séries de réitérations, apporte donc des contraintes sur l'imagerie et évolution spatio-temporelle de ces axes de transferts de fluides. Etudier l'influence des signaux volcano-magnétiques au travers de séries de réitération de mesures magnétiques au sol a par exemple permis d'aborder plus en détail l'évolution des structures actives et de la dynamique du Piton de la Fournaise (2017-2020, Gailler et al., 2023). Les variations d'anomalies magnétiques significatives enregistrées le long d'un profil de référence au nord du cratère Dolomieu ont été modélisées en 2D par période de réitération, avec comme contrainte initiale la distribution des résistivités électriques en profondeur. La comparaison avec les modélisations des données de déformations InSAR (Dumont et al, 2022) a confirmé que la désaimantation des structures était étroitement liée à la dynamique intrusive, avec de forts effets thermiques et électrocinétiques dus à l'activité magmatique non seulement en surface mais aussi plus en profondeur, le long des principaux axes de transferts magmatiques (Fig. 15b).

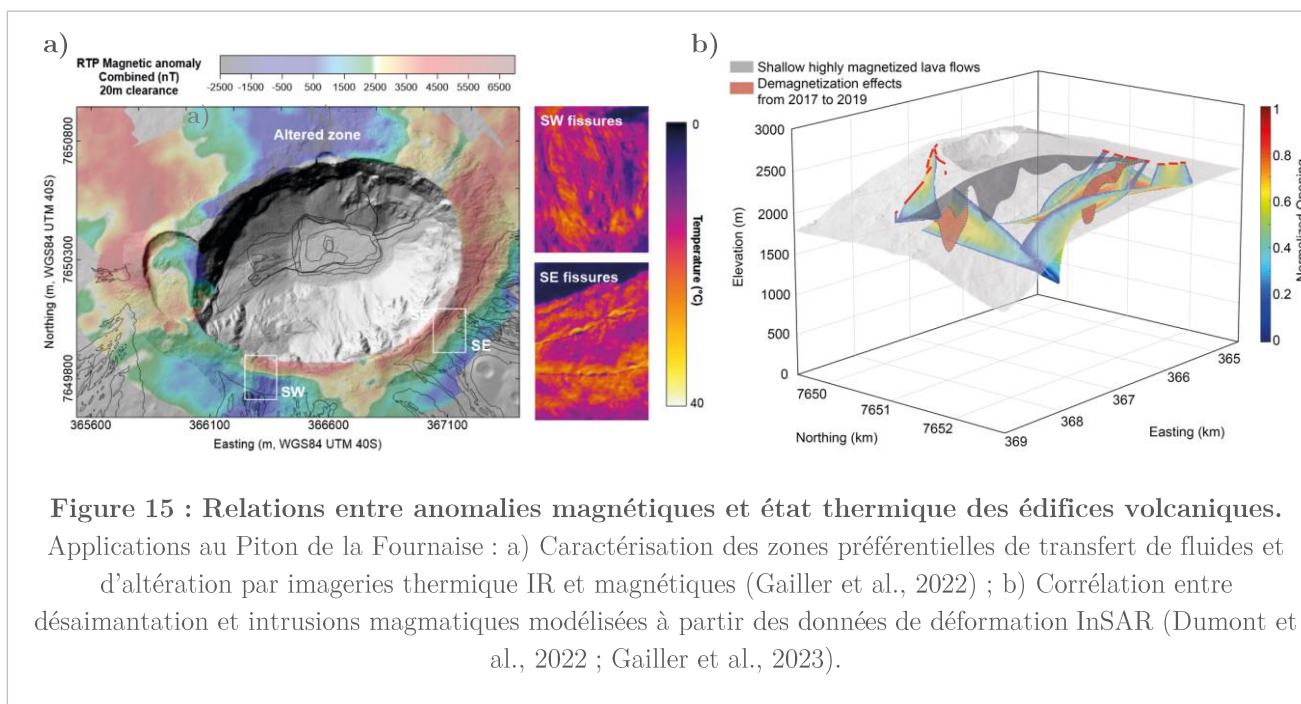


Figure 15 : Relations entre anomalies magnétiques et état thermique des édifices volcaniques.

Applications au Piton de la Fournaise : a) Caractérisation des zones préférentielles de transfert de fluides et d'altération par imageries thermique IR et magnétiques (Gailler et al., 2022) ; b) Corrélation entre désaimantation et intrusions magmatiques modélisées à partir des données de déformation InSAR (Dumont et al., 2022 ; Gailler et al., 2023).

Cette étude confirme la pertinence de la détection des anomalies de résistivité et d'aimantation et la quantification de leur l'évolution spatio-temporelle dans l'imagerie des systèmes. Elle a également permis de soulever d'autres problématiques portant sur la complexité et l'étendue des processus de diffusion thermique associés aux intrusions magmatiques.

3.3.3. Suivi des zones de stockages magmatiques et hydrothermales

Plus en profondeur et une fois imagées à un instant-t, suivre l'évolution des zones de stockage magmatiques et hydrothermales est également une problématique fondamentale pour mieux contraindre la dynamique des réservoirs, l'interaction entre les systèmes et les mécanismes de transferts superficiels associés. Quantifier l'évolution des anomalies magnétiques et de l'aimantation au cours du temps est ici aussi particulièrement intéressant pour suivre la dynamique des zones de stockage. La validité d'une telle approche peut être démontrée avec l'études des lacs de lave, considérés comme des analogues de petites chambres magmatiques et offrant ainsi une opportunité unique d'étudier l'évolution et la solidification du magma. L'expérience menée depuis 1979 à l'échelle de l'ancien lac de lave du Kilauea Iki (Hawaii) a contribué à démontrer que la réitération de levés magnétiques au cours du temps permet de suivre son refroidissement (et donc la variation de volume du réservoir encore thermiquement actif; **Gailler et Kauahikaua., 2017**). L'évolution de cette lentille magmatique modélisée en 2D (Fig. 12c) est en accord avec les données de forages réalisés à différentes époques et avec un modèle thermique (dérivé de Turcotte and Schubert, 2014) de solidification du lac de lave.

En parallèle, le suivi de l'évolution spatio-temporelle des systèmes hydrothermaux est essentiel pour quantifier leur instabilité, les mécanismes d'altération, les interactions eau-magma et l'ensemble des risques associés (i.e. éruptions phréatiques, phréato-magmatiques, fragilisation mécanique d'un édifice). Les dômes volcaniques sont particulièrement affectés par cette dynamique, entre phases extrusives et explosives dues à l'activité magmatique et/ou hydrothermale, dont les conséquences peuvent être catastrophiques. La Soufrière de Guadeloupe est dans ce sens une cible majeure compte tenu de son activité passée et de la phase de réactivation initiée depuis début 2018, comme en témoignent l'augmentation de la sismicité et l'évolution de la dynamique hydrothermale (augmentation du débit de gaz, modification notable de la composition des gaz fumeroliens ; i.e. Moretti et al., 2020). Comprendre l'évolution spatio-temporelle du système hydrothermal associé est donc fondamental pour mieux appréhender l'évolution de l'activité et les aléas associés (éruption phréatique ou phréatomagmatique, rupture de flanc et déstabilisation à grande échelle). Dans ce contexte et en amont des événements de 2018, l'édifice a fait l'objet de diverses expériences géophysiques qui ont porté sur l'imagerie 1) des circulations hydrothermales et 2) des hétérogénéités mécaniques pouvant conduire à l'accumulation de fluides et générer des instabilités de flanc majeures. Des levés magnétiques sol acquis sur le sommet et les flancs de la Soufrière de Guadeloupe ont permis d'identifier un important volume de matériaux altérés au sein du dôme (Bouligand et al., 2016), compatible avec le système hydrothermal imagé en tant que corps conducteur par Rosas-Carbajal et al. (2017).

Dans la continuité, j'ai contribué à la réalisation d'un levé géophysique multi-méthodes postérieur à la réactivation récente de l'édifice, intégrant des réitérations de mesures de résistivité électrique, de polarisation spontanée et de magnétisme à l'échelle du dôme et de son flanc sud. Les données de résistivité électriques confirment l'évolution d'une zone préférentielle de transferts de fluides sur laquelle le dôme est susceptible de glisser (Fig. 16a). En parallèle, la réitération des levés magnétiques anté- et post-réactivation a permis d'identifier l'évolution d'un signal de forte amplitude et grande longueur

d'onde associé au système hydrothermal adossé à une faille majeure, la faille de la Ty (*Gailler et al., in prep*). Associés aux données d'observation, ces levés ont pour objectif de contribuer à mieux comprendre l'évolution spatio-temporel du système hydrothermal, avec l'existence de nombreux phénomènes transitoires qui incitent à un suivi géophysique à haute résolution spatiale et temporelle de la Soufrière de Guadeloupe.

Dans un autre contexte, je suis également impliquée dans l'imagerie géophysique du système d'alimentation magmatique du Masaya, ainsi que dans la caractérisation du système hydrothermal du volcan Mombacho au Nicaragua. Plus particulièrement, ce dernier est caractérisé par deux cicatrices de glissement de terrain (van Wyk de Vries and Francis, 1997) et une grande instabilité actuelle avec, ici encore, de nombreux enjeux sociétaux. La cicatrice sud abrite un champ fumerolien très actif dont l'activité a nettement augmenté en 2020, détruisant une importante zone forestière (Fig. 16b). Ce champ, principalement riche en CO₂ et H₂S présente des apports de fluides magmatiques au sein du système hydrothermal (Garofalo et al., 2007) avec un risque d'éruption phréatique et magmatique potentielle, qui pourrait également déclencher un nouveau glissement de terrain. Nous avons réalisé une première cartographie des anomalies magnétiques au sol en 2024 à l'échelle de la zone sommitale hydrothermalisée et du secteur d'instabilité principale dans son prolongement. L'objectif était dans un premier temps d'imager l'extension du système hydrothermal, caractériser les transferts de fluides et définir les zones d'hétérogénéités mécaniques susceptibles de favoriser de futurs glissements de terrain. Des levés complémentaires magnétiques et thermiques IR aéroportés par drone sont désormais envisagés pour mieux caractériser et suivre l'évolution temporelle du système dans son ensemble.

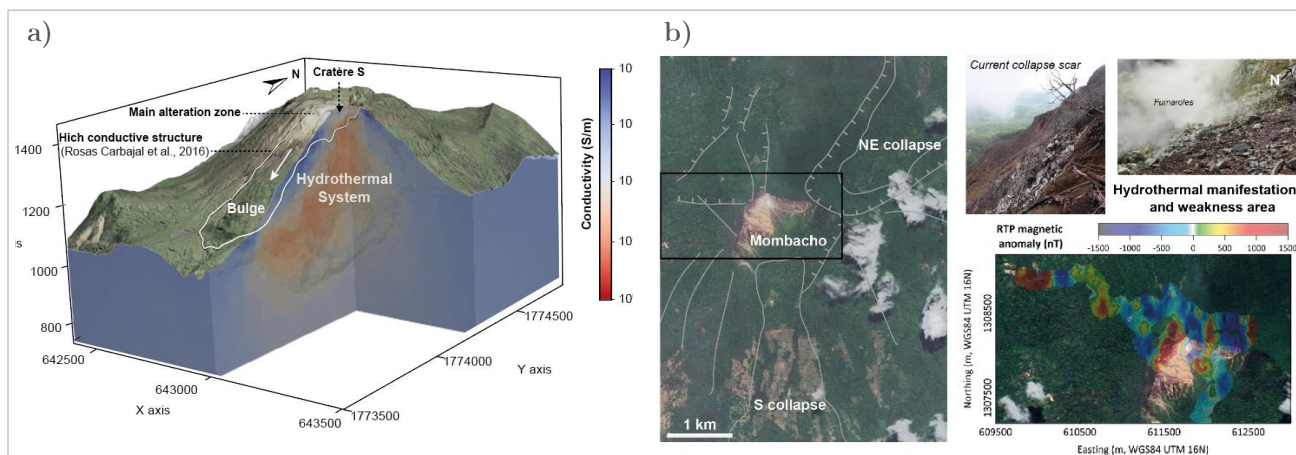


Figure 16 : Suivi des zones de stockages hydrothermales et instabilités majeures associées.

a) Modèle de conductivité électrique 3D de la Soufrière de Guadeloupe postérieur à sa réactivation en 2018 (Gailler et al. in prep). b) Cartographie magnétique de la zone altérée du Mombacho (Nicaragua) et corrélation avec les manifestations de surface et axes de faiblesse.

Le suivi de l'évolution de ces zones de stockages magmatiques et hydrothermales demeure néanmoins souvent contraint par la résolution spatiale des levés, se traduisant par des limites d'investigation en terme de profondeurs de sources. Face à ces limitations, de nombreuses études récentes s'intéressent à la surveillance des édifices volcaniques par magnétotellurie temporelle (Hill et al., 2023) pour mieux suivre les variations de conductivités liés aux mouvements de fluides magmatiques et/ou hydrothermaux à plus grande profondeur (> 10 km). Je m'implique dans le développement et l'utilisation de cette approche complémentaire à différentes échelles (Grace, 2022).

3.3.4. Apports aux stratégies de surveillance volcanique

L'ensemble de ces travaux souligne l'importance d'un suivi géophysique multi-paramètres des édifices volcaniques en combinant différentes approches spatiales et temporelles. Qu'il s'agisse de l'instabilité d'un édifice volcanique, de la dynamique d'un système magmatique ou hydrothermal ou des mécanismes de transfert, l'objectif est d'apporter un maximum de contraintes sur la géométrie, la profondeur et l'évolution des structures actives. Mettre en œuvre des méthodes adaptées et complémentaires, dédiées à un suivi temporel et/ou régulier avec une couverture homogène des édifices volcaniques, a également pour objectif de renforcer les données d'observatoires pour mieux appréhender les précurseurs de l'activité volcanique. En parallèle, la quantification des paramètres pétrophysiques, ainsi que la complémentarité des réseaux géochimiques et géophysiques demeure fondamentale dans la détection et le suivi des processus magmatiques et/ou tectoniques (Padron et al., 2008).

Dans le cadre de mes tâches d'observation au sein du Service National d'Observation en Volcanologie (ST-ANO-1), je contribue à mettre en place un suivi opérationnel des édifices par approches géophysiques, sol et aéroportées à bord de drones, au sein des observatoires volcanologiques. Ces approches font désormais partie intégrante des 10 services d'observation de l'OPGC et viennent en renforcer 2 des 4 groupes méthodologiques. Initialement dédié au volet UAV avec le développement des mesures géophysiques aéroportées, ce dernier est désormais complété par un volet in-situ avec les données géophysique multi-méthodes acquises au sol. Ces deux volets représentent une évolution indispensable dans le suivi des édifices et provinces volcaniques, la quantification des processus dynamiques liés à la dynamique volcano-tectonique et à l'activité éruptive.

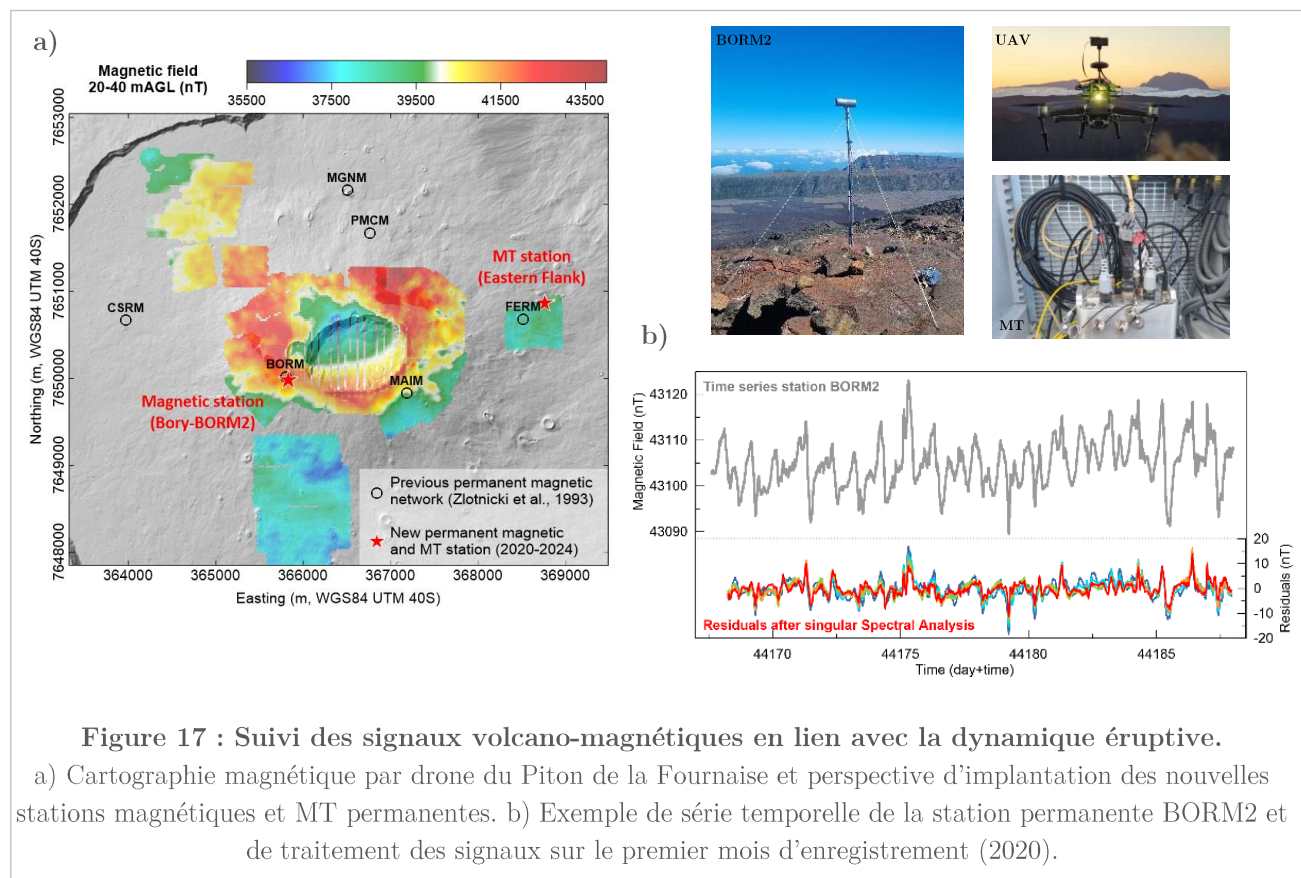
a) L'exemple du Piton de la Fournaise

La surveillance des volcans français d'Outre-Mer est une mission nationale, la compréhension de leur fonctionnement et la prévision des éruptions étant de véritables enjeux sociétaux. A l'échelle du Piton de la Fournaise, les mesures magnétiques aéroportées par drone (Fig. 17a), réalisées une à deux fois par an sur chaque nouveau site éruptif ou sous la forme de répétitions, combinées à la photogrammétrie et thermogrammétrie (i.e. imagerie thermique IR), permettent d'imager les conséquences de l'activité sur la structure et la stabilité de l'édifice (évolution morphologique en surface, état thermique et création de nouveaux axes de faiblesse en profondeur).

En parallèle, je contribue à la réinstallation d'un réseau de stations magnétiques permanentes dans des secteurs clés de l'édifice (Fig. 17a). En effet, le premier réseau, installé en 1985 avec 7 stations de mesures en continu, avait permis d'observer des signaux volcano-magnétiques en période éruptive dans les premières phases d'activité (crises sismiques et intrusives) pouvant précéder une éruption de quelques jours ou semaines (Zlotnicki et al., 1993). L'objectif est désormais d'apporter de nouvelles séries temporelles du champ magnétique dédiées au suivi de l'activité du Piton de la Fournaise pour contribuer à caractériser :

- **L'activité sommitale** (station BORM2 installée en décembre 2020 ; (Fig. 17b) pour suivre des transferts magmatiques en profondeur et depuis le réservoir sommital.
- **L'évolution lente de la RZ N120** (station PMCM), car la répétition des mesures magnétiques de 2017 à 2019 a mis en évidence des modifications importantes en profondeur en lien avec les éruptions dans l'axe de cette rift-zone.

• **L'évolution du Flanc Est** (station FERM), car la récurrence des éruptions à l'échelle de ce flanc a engendré d'importantes modifications en surface et probablement en profondeur, dans l'axe du plan de glissement dans le secteur des Grandes Pentes.



L'installation récente (2022) de l'observatoire magnétique permanent par le Bureau Central de Magnétisme Terrestre (BCMT) dans un secteur isolé de l'édifice offre désormais une référence et une ligne de base pour caractériser les variations temporelles de champ magnétique potentiellement enregistrées à l'échelle du Piton de la Fournaise à travers ce nouveau réseau (Fig. 17c).

En parallèle, un suivi dynamique à plus grande profondeur s'avère fondamental et la magnétotellurie (MT) est particulièrement adaptée à cet objectif, comme démontré à l'échelle du Piton de la Fournaise lors de l'éruption de 1998 (Wawrzyniak et al., 2017; Fig. 6b). Les séries temporelles enregistrées de 1996 à 1999 ont en effet mis en évidence des variations de résistivité syn-éruptives avec une diminution majeure enregistrée 5 jours avant le début de l'éruption. Les résultats ont également montré une variabilité directionnelle permettant de modéliser les effets de l'intrusion en profondeur. Dans la continuité une station MT a été installée en mai 2024 sur le Flanc Est de l'édifice (Fig. 17b) pour une durée de 6 mois à 1 an, dans le but de suivre les variations de résistivité liées aux mécanismes de circulation de fluides mais également la stabilité de l'édifice en amont du plan de glissement à l'échelle de ce secteur clé.

Ces approches sont également destinées à être appliquées ponctuellement aux autres volcans d'outre-mer français, notamment dans le cadre de la réactivation de la Soufrière de Guadeloupe en 2018 et de la Montagne Pelée en Martinique en 2019 (cf § 4.3.1.).

b) Plus localement, à l'échelle de provinces volcaniques en dormance

J'ai localement élargi ces actions d'observation dans le cadre de l'activité sismique à l'aplomb du secteur des Monts Dore dans le Massif Central. En effet, des essais sismiques (moins d'une centaine d'évènements sismiques avec une occurrence de quelques jours à quelques semaines) ont été enregistrés en 1979, 1980, 1983, 1984, 2008, 2013 (Battaglia and Douchain, 2017) et plus récemment en 2021-2022 (*Gailler et al., Boudoire et al., in prep*).

Ce dernier a été remarquable par le nombre de séismes détectés (BCSF-RENASS) mais également par la longévité de l'activité sismique. Cette situation particulière a nécessité une réaction opérationnelle rapide. J'ai co-créé avec Guillaume Boudoire la création, avec le soutien logistique de l'OPGC, le Pôle Régional d'Observation de l'activité Volcano-tectonique d'Auvergne et d'Ardèche (PROVA²) pour contribuer au suivi de cette activité sismique exceptionnelle.

Les objectifs sont multiples :

- 1) Promouvoir des programmes d'observation de l'activité volcano-tectonique sur le territoire local
- 2) Structurer les mesures et enregistrements acquis sur le territoire en base de données et métadonnées
- 3) Déployer une réponse opérationnelle complémentaire en cas de variations d'activité significative
- 4) Promouvoir la recherche et la formation basées sur la richesse géologique du territoire local
- 5) Renforcer la présence du LMV-OPGC sur le territoire auprès des acteurs locaux et des populations
- 6) Répondre aux demandes d'informations émanant des organismes publics.

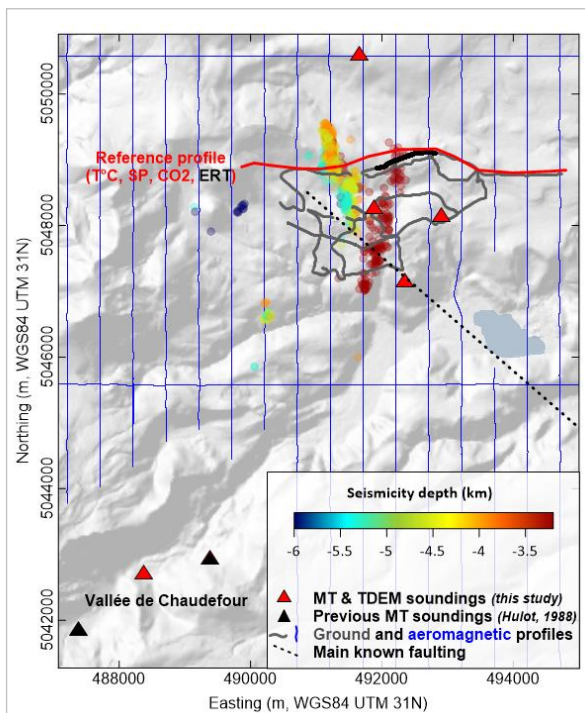


Figure 18 : Synthèse des activités d'observation en réponse à l'activité sismique de 2021-2022 à l'aplomb des Monts Dore.

Nous avons structuré le suivi de l'activité, son comité de pilotage et contribuons activement aux différentes actions d'observations sur le secteur. Cette action d'observation est également coordonnée avec l'école de l'OPGC afin de bénéficier d'observations complémentaires réalisées par les étudiants de notre formation. Je contribue ainsi à la thématique imagerie géophysique par la mise en œuvre de levés magnétiques au sol et par drone, de profils polarisation spontanée et de tomographie de résistivité électrique 2D, de sondages 1D et séries temporelles MT, avec également le déploiement d'une station GNSS temporaire (Fig. 18). Différents volets de communications sont régulièrement menés pour informer les populations, et généré un lien étroit avec la préfecture et le Service Départemental d'Incendie et de Secours du Puy-de-Dôme (SDIS-63) et la DDT63. Cette structuration concertée a permis la rédaction de projet et de conventions régionales que j'ai co-portées pour le renforcement de l'instrumentation permanente sur le territoire Clermontois.

Les instruments acquis suivent les spécifications et rentreront dans le réseau EPOS-FR (anciennement RESIF/RENAG) pour le suivi national et en particulier celui de ce secteur sismogène.

L'ensemble de ces actions opérationnelles permettent ainsi de contribuer à la mutualisation des compétences et des données à différentes échelles avec une diffusion plus ouverte des produits de recherche et d'observation (données brutes, valorisées, mais également outils de traitement et de modélisation comme décrit ci-après).

3.4. Développements méthodologiques et numériques

3.4.1. Contribution à l'évolution des techniques de modélisations et protocoles dédiées

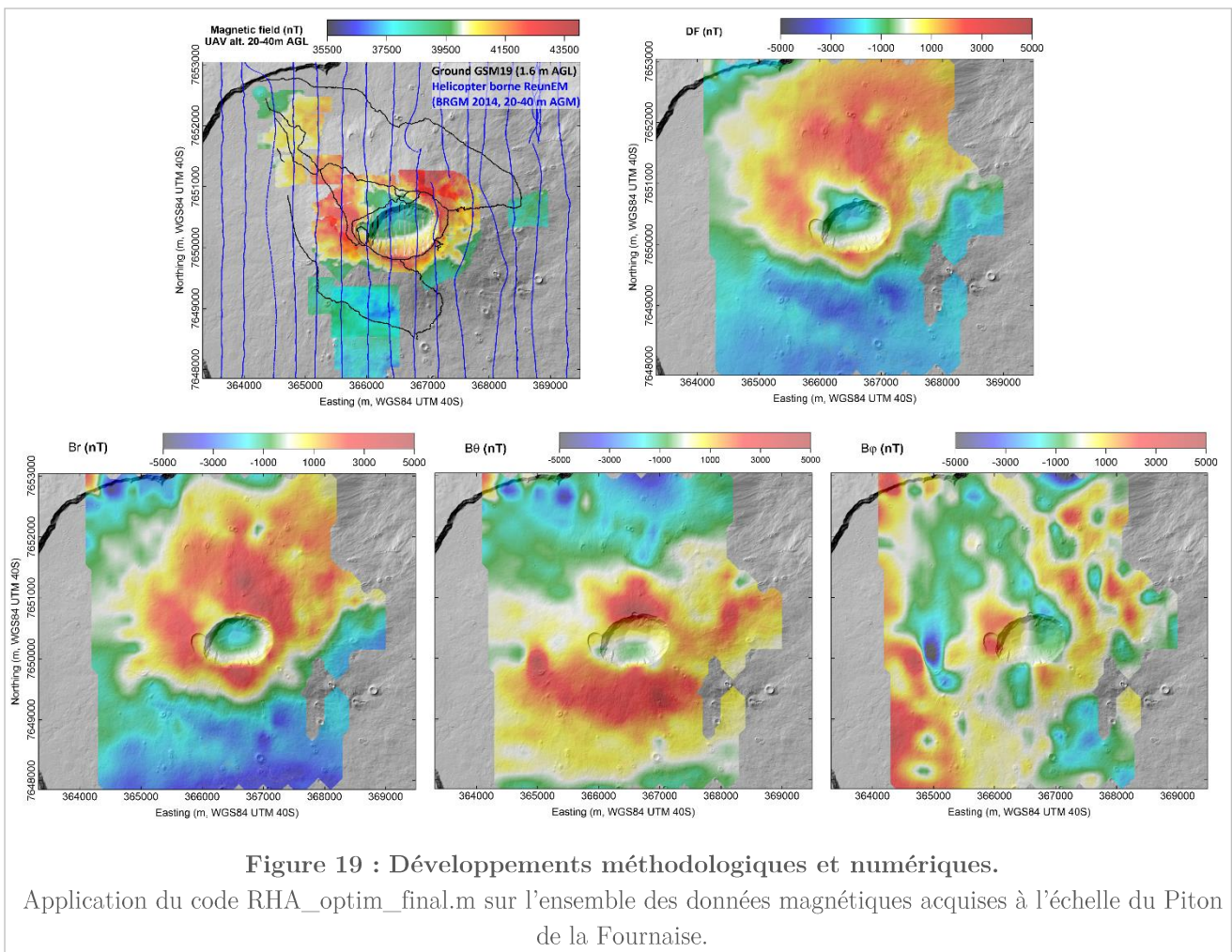
Au-delà de l'acquisition, du traitement, de la réduction et de l'interprétation des données, l'implémentation des techniques de modélisations est primordiale pour progresser vers des solutions logicielles optimisées adaptées à chaque type de données, open source et évolutives, et aboutir à une intégration multi-paramètres. Coupler les approches et les interpréter conjointement est fondamental pour contraindre au mieux la géométrie des structures et quantifier leur évolution, impliquant notamment le développement de méthodes d'inversion robustes basées par exemple sur un formalisme bayésien et adaptées aux spécificités des différents types de données (Barnoud et al., 2021). La principale exigence pour l'inversion bayésienne est, au-delà de la précision, l'efficacité du calcul du problème direct pour converger rapidement vers une solution unique.

Rappelons par exemple que si les mesures géophysiques par drone constituent une véritable avancée en terme de rapidité de déploiement et d'homogénéité des levés face à la réalité terrain notamment, leur mise en place requiert une rigueur certaine dans l'acquisition et la modélisation numérique des données. Optimiser l'implémentation des capteurs, adapter les plans de vol (altitude versus espacement entre lignes de vol, suivi topographique) va régir la qualité des données et donc leur interprétation, nécessitant la mise au point de protocoles de traitement rapides dédiés. Comme détaillé dans le chapitre 2, la magnétométrie par drone reste un défi car différentes sources de bruit peuvent contaminer les mesures et générer des erreurs de mesure liées à l'électronique, aux conditions météorologiques et topographiques (vent, suivi topographique pouvant engendrer des variations temporelles du champ magnétique par modification de la vitesse de rotation des moteurs). Une autre source d'ambiguïté provient du fait que le vecteur lui-même génère incontestablement des courants secondaires induits lorsqu'il évolue dans le champ magnétique terrestre ambiant. Enfin, lorsque l'objectif de la magnétométrie est de cartographier les sources magnétiques internes de la croûte terrestre, le champ magnétique géophysique est tel que les variations diurnes et/ou rapides des champs magnétosphériques se superposent aux bruits internes. Les techniques de correction des données restent donc particulièrement complexes en contexte volcanique, nécessitant fondamentalement de contrôler et d'évaluer rapidement, et ce in-situ, la qualité d'un levé et sa cohérence avec les relevés adjacents ou antérieurs.

Ces problèmes spécifiques ont conditionné le développement d'un algorithme rapide permettant des corrections de données de premier ordre et la visualisation directe des mesures brutes du champ magnétique parfois inégalement distribuées (Fig. 19). Parmi les nombreuses approches utilisables (voir Schott and Erwan, 2010 pour une revue), la série de Fourier en double harmonique rectangulaire est apparue comme la plus pertinente pour aborder les problèmes régionaux dans un processus semi-automatique avec un nombre limité de difficultés numériques.

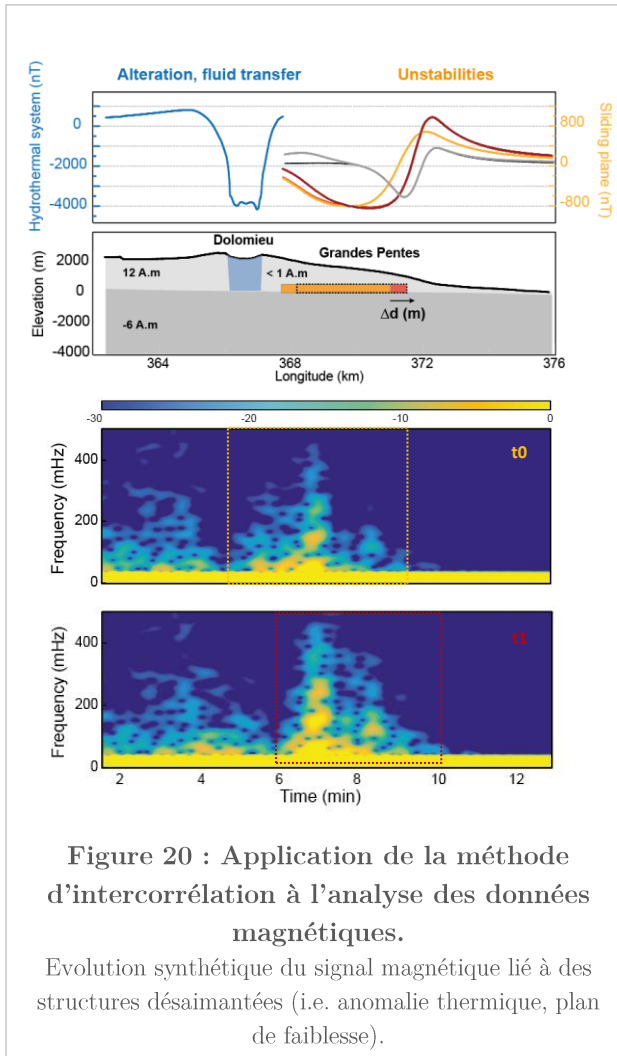
Plus en détail, l'algorithme (**Thebault and Gailler, 2023**) permet une modélisation rapide des anomalies magnétiques vectorielles (B_r , B_θ et B_ϕ) du champ crustal à partir de la mesure du module d'intensité (dF ; Fig. 19). Cette approche est particulièrement utile pour les interprétations structurales horizontales et pour une meilleure délimitation des structures en profondeur. La version discrète du code numérique, en termes de fonctions trigonométriques, a ainsi présenté un intérêt pour la réduction automatique des données acquises à différentes altitudes, avec l'exemple des mesures magnétiques par drones. Il permet désormais d'envisager des corrections semi-automatiques rapides (i.e. écarts aux points de croisements, effets de cap et de traînée) sans algorithme de compensation au préalable. Cette approche s'est avérée concluante pour garantir la cohérence d'un levé sur le terrain notamment dans le cadre de réitérations et assurer le succès d'une mission dans son ensemble, mais également à terme de combiner des levés acquis à différentes altitudes, époques et de résolutions variables.

Il sera complété par un module d'estimation de susceptibilité équivalente intégrée en cours de développement, avec à plus long terme l'objectif d'évoluer vers une inversion 3D. Il a également vocation à être adapté à d'autres expériences géophysiques, impliquant divers paramètres à différentes échelles et en considérant de multiples hypothèses, permettant dans la continuité d'envisager des inversions bayésiennes conjointes.



3.4.2. Implémentation de la méthode d'intercorrélation

Initialement utilisée pour l'interprétation des données sismiques, la méthode d'intercorrélation ou interspectrale apparait quant à elle prometteuse dans l'interprétation des séries de données de réitérations magnétiques pour atteindre directement 1) le décalage spatial entre signaux consécutifs et 2) la fonction de transfert entre ces signaux très semblables, perturbés par un bruit décorrélé.



Je m'intéresse à ces développements théoriques et algorithmiques pour décrire plus précisément les variations temporelles des paramètres physiques au sein des édifices volcaniques, à partir des de la modélisation des sources en termes d'aimantation équivalente (i.e. évolution spatiale d'une structure désaimantée en fonction de la dynamique volcanique). Des modèles théoriques et simplifiés en 2D et 3D ont permis de quantifier la résolution de l'approche et de valider le code d'analyse numérique (Fig. 20). Elle a pour objectif d'être appliquée aux données réitérations des mesures magnétiques, mais également aux séries temporelles magnétiques et magnétotelluriques sur le Piton de la Fournaise, tout en exploitant les séries temporelles de stations de référence.

La finalité est de suivre l'évolution de la dynamique de l'édifice volcanique dans son ensemble et de contribuer à l'élaboration de modèles d'évolution des sources (i.e. zones de stockages magmatiques et hydrothermales, plan de faiblesse) au sein de l'édifice, comme décrit plus en détail dans le dernier chapitre en lien avec les perspectives du projet personnel.

Cette approche novatrice en cours de développement dans le domaine de l'analyse des variations de signaux magnétiques et électromagnétiques pourrait ainsi constituer un apport important à la modélisation des processus à toutes les profondeurs en exploitant les données sol, aéroportées, sur des échelles spatio-temporelles inégalées dans un tel contexte.

Chapitre 4.

Synthèse et perspectives du projet personnel : Vers une modélisation 4D haute résolution des édifices volcaniques

Les méthodes géophysiques offrent donc de nombreux éléments de réponse aux problématiques précédemment énoncées, car l'importante variabilité des propriétés physiques au sein des édifices volcaniques permet 1) la discrimination des structures et 2) la quantification de leur évolution en lien avec la dynamique volcanique. Si chaque méthode géophysique présente ses propres limites, l'interprétation des données doit néanmoins offrir une connaissance précise et quantitative en terme de contrastes de paramètres physiques. Il est en parallèle essentiel d'évaluer et optimiser la qualité des données pour considérer leur poids dans les modèles numériques. La finalité est de tendre vers une imagerie 4D (e.g. spatio-temporelle) à haute résolution des édifices, impliquant la complémentarité entre plusieurs méthodes géophysiques à différentes échelles et altitudes pour coupler les paramètres et les interprétations, tout en considérant un maximum de contraintes complémentaires (géologiques, pétrophysiques, géochimiques...).

4.1. Intégration multi-méthodes spatiales et temporelles

Corréler plusieurs observables ouvre la perspective de multiples applications dans le domaine de la volcanologie, entre analyse géomorphologique et structurale rapide, détection d'anomalies thermiques, évolution des structures de déformations, imagerie des zones de stockage et mécanismes de transferts de fluides, estimations des volumes impliqués, et contribution à la prévention des aléas volcaniques. Il est donc fondamental de fusionner un maximum d'observations spatio-temporelles, c'est à dire les interpréter conjointement pour contribuer à la construction de modèles contraints des édifices, afin d'améliorer la compréhension des phénomènes volcaniques et en assurer le suivi. L'ensemble de mes travaux et leur évolution selon les problématiques détaillées dans le chapitre 3 ont conduit à l'obtention d'un financement ANR (2022-2025) dans le cadre du projet jeune chercheur SCANning volcanoes with ground and UAV geophysics: Toward an integrated 4D modelling of VOLCanic dynamics (<https://lmv.uca.fr/scan4volc/>; Fig. 21). Ce projet s'inscrit pleinement dans la continuité de mes recherches et activités d'observation, résumant les perspectives à court et moyen termes du projet personnel, dont l'objectif majeur consiste à implémenter des approches géophysiques récentes et innovantes (tomographie de résistivité 3D et conductivité profonde, magnétométrie par drone, mesures temporelles et réitérations) dédiées à une modélisation intégrée des systèmes volcaniques. Il se focalise sur le Piton de la Fournaise, volcan laboratoire et cible majeure en termes d'objectifs à la fois scientifiques et sociétaux, en effet caractérisé par une grande diversité de dynamismes et de phénomènes volcaniques avec notamment :

- Une importante activité éruptive avec une à plusieurs éruptions par an (jusqu'à 5 en 2019) associées à des intrusions différentes, impliquant des géométries très variables dans le système d'alimentation magmatique (Peltier et al., 2009) et d'importantes déformations de surface (Dumont et al., 2024).
- Un système hydrothermal très actif sous le Cône Central avec le risque d'éruptions phréatomagmatiques, dont 17 recensées à l'intérieur du cratère Dolomieu depuis le 18^e siècle (Villeneuve and Bachèlery, 2006).

- Le risque d'éruptions en dehors de l'Enclos Fouqué, en zones habitées (éruptions type 1977 ; Villeneuve and Bachèlery, 2006).
- Un plan de glissement actif sous le Flanc Est (Poland et al., 2017) impliquant le risque de tsunamis (Kelfoun et al., 2010) avec l'occurrence d'un ou plusieurs effondrements partiels de l'édifice par le passé (Lénat and Labazuy, 1990).

Plus en détail, SCAN4VOLC est structuré en trois Work Packages (WP) complémentaires, chacun d'entre eux construit pour répondre à l'une des problématiques abordées précédemment.

Le WP1 est consacré à l'imagerie géophysique multi-méthodes à haute résolution du Piton de la Fournaise en utilisant les avancées récentes dans le domaine de la géophysique. Au cœur de ce volet principal, une tomographie de résistivité électrique 3D innovante et de grande ampleur (équipement FullWaver © Iris Instruments ; Gance et al., 2018) a été réalisée en mai 2023 sur l'ensemble du Cône Central. Les objectifs étaient multiples impliquant, outre l'imagerie haute résolution des zones conductrices témoins des structures actives, de caractériser en 3D les transferts de fluides associés par l'intermédiaire de mesures de chargeabilité et de polarisation spontanée. Cette mission a constitué un réel challenge scientifique et technique à une telle échelle et dans un contexte aussi résistant, impliquant 17 personnes de différents instituts et organismes, la mise en place de 28 dipôles de réception et 40 km de câble d'injection de courant, sur zone de 8 km² environ (Fig. 21a). L'exploitation des données a par la suite impliqué un important volet de traitement du signal sur la base des développements numériques précédemment initiés. Le modèle de résistivité final (*Gailler et al., in prep*), construit avec 31% des données (soit environ 1250 mesures distribuées de manière homogène) offre une image 3D haute résolution de l'édifice jusqu'à 800-1000 m de profondeur, complétant ainsi les études précédentes et notamment les données du levé hélicoptéré ReunEM mis en œuvre par le BRGM en 2014 (Dumont et al., 2019; Martelet et al., 2014) ainsi que le modèle 2D de référence présenté dans le chapitre 1 (Lénat et al., 2012). Cette imagerie est également complétée par des sondages MT 1D pour fournir des contraintes sur la distribution des résistivités électriques à grande profondeur (i.e. plusieurs dizaines de kilomètres).

En parallèle, les levés photogrammétriques menés régulièrement dans des secteurs clés permettent d'imager l'évolution de l'édifice en surface (i.e. éruptions récentes, évolution du système de fracturation ; Fig. 21b) mais également de mettre à jour les modèles numériques de terrain nécessaires à la planification des vols par drones. L'imagerie magnétique haute résolution et thermique IR par drone a quant à elle pour objectif de caractériser la géométrie des zones de faiblesse et l'état thermique de l'édifice en profondeur, en lien avec l'activité magmatique et hydrothermale (Fig. 21b). Les répétitions des mesures magnétiques, ainsi que les séries temporelles magnétiques et magnétotelluriques dans des secteurs d'intérêt majeur contribuent par ailleurs à quantifier l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'édifice à différentes échelles (zones de stockage, transferts de fluides, instabilités mécaniques ; Fig. 21c).

Le WP2 vise à atteindre cet objectif majeur de modélisation 4D de l'ensemble des données grâce à une approche multiparamétrique intégrée impliquant : 1) des approches de modélisations numériques dédiées, 2) des contraintes issues de mesures en laboratoire sur les propriétés physiques d'échantillons (i.e. résistivité, aimantation, susceptibilité magnétique, porosité, perméabilité) et 3) des paramètres pluridisciplinaires issus d'observations et de recherches complémentaires (i.e. données de déformation, sismicité, dégazage en surface). La finalité est d'aboutir, au-delà des interprétations couplées, à des modélisations conjointes avec un maximum de contraintes pour des interprétations fiables et réalistes.

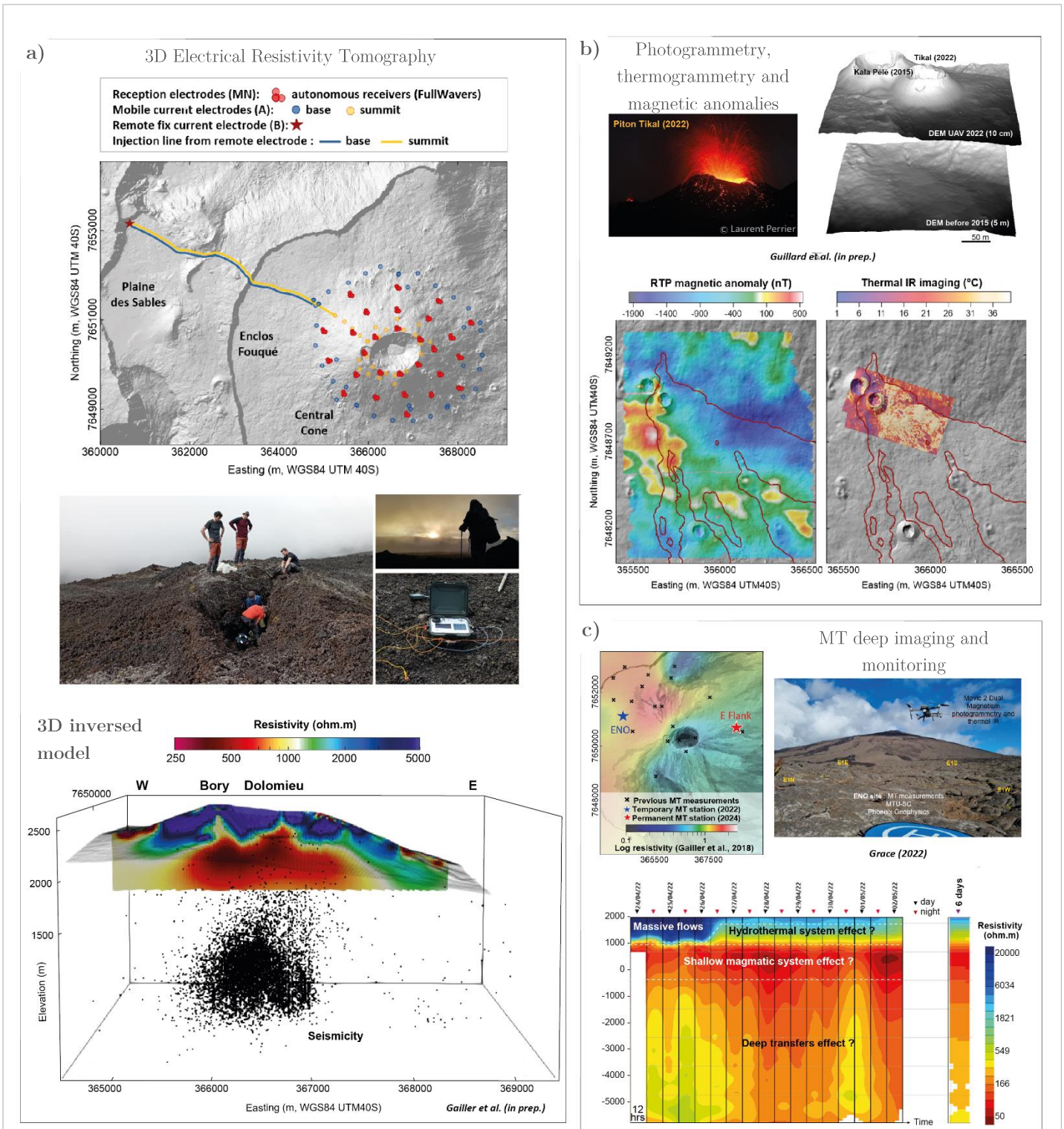


Figure 21 : Synthèse des principaux objectifs et résultats acquis dans le cadre du projet ANR SCAN4VOLC (Piton de la Fournaise, 2022-2025).

a) Campagne de tomographie de résistivité électrique 3D (avril-mai 2023 ; Gailler et al., in prep.). b) Photogrammétrie, imagerie thermique IR, cartographie et suivi des anomalies magnétiques par drone (exemple de l'éruption de septembre 2022, Piton Tikal ; Guillard in prep.). c) Imagerie et perspective de² suivi des structures profondes par magnétotellurie (Grace, 2022).

Le WP3 se concentre sur l'aspect communautaire, via la communication, la diffusion et le transfert d'expertise concernant l'évaluation des aléas et des risques en relation avec la dynamique magmatique et hydrothermale au sens large, et les mécanismes en profondeur (axes de transferts préférentiels, instabilités). L'objectif est de tirer parti de l'expertise des sciences sociales, fondamentale pour mieux prévoir les répercussions des crises volcaniques. Les connaissances acquises tout au long du projet sont régulièrement transférées à la communauté scientifique afin de renforcer les connaissances sur d'autres volcans dans le monde. A plus long terme, une telle approche pourrait ainsi contribuer à implémenter les algorithmes de deep-learning sur diverses cibles à travers le monde.

Les résultats actuels mettent progressivement en lumière le potentiel de nouvelles applications des méthodes géophysiques dans le domaine de l'imagerie des édifices et du suivi de la dynamique volcanique, notamment dans le cadre des travaux de post-doctorat (S. Buvat), de doctorat (R. Guillard) et de master (C. Grace) associés (Fig. 21).

Les perspectives de ce projet s'inscrivent dans une orientation stratégique nationale (ANR, CNES, INSU) et locale (I-SITE CAP 20-25) visant à promouvoir et à développer des axes de recherche et de collaboration avec en parallèle différentes collaborations internationales (USGS, INETER). Dans la continuité, au cours des prochaines années, je souhaiterais donc poursuivre ces recherches autour de l'imagerie 4D des édifices volcaniques, en s'appuyant sur des approches multidisciplinaires, ainsi que des innovations technologiques et numériques comme tenté de le faire jusqu'à présent.

4.2. Développements technologiques et numériques

4.2.1. Renforcement des méthodes géophysiques multi-échelles

Dans la continuité de la démarche de développement instrumental autour des mesures aéroportées par drone, évoluer vers une configuration multi-capteurs est une perspective majeure, nécessitant la mise en place de méthodologies innovantes et complémentaires. J'ai contribué à démontrer la pertinence des mesures magnétiques par drone et leur corrélation avec l'imagerie thermique IR et souhaite poursuivre les travaux initiés dans ce domaine. L'un des objectifs majeurs à court terme est de poursuivre le développement et la standardisation de la calibration des capteurs magnétiques aéroportés pour améliorer encore la précision des mesures, comme détaillé dans le chapitre 2 (§ 2.2.).

Concernant l'imagerie des manifestations de surface, de nombreux développements technologiques ont donné naissance à de nouvelles catégories d'imageurs hyperspectraux et multispectraux avec diverses perspectives d'applications. Si l'imagerie hyperspectrale par télédétection satellitaire s'avère particulièrement intéressante pour le suivi des panaches volcaniques (Arias et al., 2019) et des phénomènes de dégazage (Smekens and Gouhier, 2018), les approches multispectrale et hyperspectrale peuvent également être utilisées pour détecter des contrastes de lithologies et donc les phénomènes d'altérations (Kereszturi et al., 2018). La résolution grandissante et la miniaturisation des capteurs permet d'envisager de combiner ces approches par drone pour renforcer la caractérisation des structures de surface, en parallèle de l'imagerie visible et thermique IR. Plus en profondeur, pour l'imagerie des structures et processus internes, il est nécessaire de combiner la magnétométrie par drone à d'autres approches géophysiques pour corrélérer des observables complémentaires. Le potentiel de la gravimétrie temporelle dans le suivi des édifices volcaniques a été abordé précédemment, mais cette dernière reste un véritable challenge pour accéder à de très faibles variations dans des conditions environnementales souvent défavorables dans de tels contextes. Si les mesures gravimétriques sont très précises à la résolution de 1 km (gravimétrie absolue : 0.01 mGal, 10^{-7} m/s² et gravimétrie relative : 1 μGal, 10^{-8}

m/s²), elles sont surtout réalisées ponctuellement et en mode statique pour des approches structurales. La continuité de la mesure à haute résolution spatiale et en suivi temporel régulier demeure ainsi une réelle problématique et un véritable défi pour l'instrumentation de l'extrême. Néanmoins, de nombreux développements et projets offrent des perspectives majeures autour de la gravimétrie mobile dans lesquelles je souhaite m'investir. Dans ce cadre, j'ai récemment intégré le projet GRAVIMOB (AUV ; <https://campagnes.flotteoceanographique.fr/campagnes/18001367/fr/>) qui s'adosse à plusieurs programmes de recherche et d'observation dans les domaines de la géodésie, de la géophysique marine, de la géophysique terrestre, du littoral et de la volcanologie, et également du spatial avec le soutien du CNES. Plus en détail, GRAVIMOB est un gravimètre vectoriel capable de mesurer les trois composantes Est, Nord, verticale de la pesanteur ou, de façon équivalente, l'intensité de la pesanteur et les deux composantes angulaires de la déviation de la verticale (De Saint-Jean, 2008). L'objectif est désormais d'envisager son implémentation sur drone en parallèle du capteur magnétique notamment, en suivant le même protocole de tests et validation opérationnelle puis d'application en contexte actif initié pour la magnétométrie.

4.2.2. Modélisations conjointes

Parmi les objectifs scientifiques envisagés notamment dans le cadre du projet SCAN4VOLC, évoluer vers des modélisations conjointes en utilisant la complémentarité des approches géophysiques apparaît comme un véritable challenge. Par exemple, magnétisme, gravimétrie et magnéto-tellurie sont des méthodes passives complémentaires reliées à différentes propriétés du sous-sol et exploitant un signal naturel continu, contrairement à la sismicité et aux déformations, plus transitoires, qui nécessitent un suivi permanent. Un certain nombre de développements ont été initiés autour des techniques d'analyses de mesures et de modélisations numériques de ces différentes approches séparément, avec la mise en place d'algorithmes originaux d'inversion. Citons par exemple l'algorithme développé dans le cadre du projet ESA '1D Electrical conductivity and temperature profiles in the mantle' pour le calcul d'un profil radial probabiliste de la conductivité électrique dans le manteau terrestre.

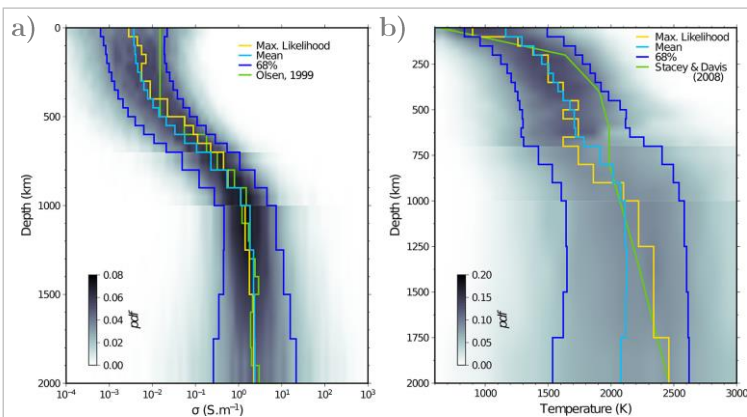


Figure 22 : Profil vertical de conductivité électrique et de température dans le manteau.

- a) Estimation du profil de température à partir de la conductivité électrique et de données minéralogiques.
- b) Densité de probabilité du profil vertical de conductivité électrique des minéraux du manteau terrestre.

Cette technique d'inversion bayésienne 1D (Fig. 22) repose sur un algorithme (Civet et al., 2021) qui a fait l'objet de modifications théoriques et opérationnelles pour être interprétable en termes de températures (Verhoeven et al., 2021). Les développements numériques effectués notamment dans le cadre du projet Européen « XORN » permettent désormais d'envisager des inversions conjointes de structures à partir de mesures des champs magnétiques et de gravité, pour lesquelles l'imagerie des contrastes verticaux de conductivité apportés par la MT notamment est essentielle.

Ces différents héritages ouvrent donc la perspective d'un algorithme 3D original, avec des applications multiples sur n'importe quelle cible volcanique à travers le monde.

4.3. Perspectives d'applications en terme de recherche et d'observation

L'objectif est également de se focaliser sur d'autres cibles majeures pour contribuer à mieux comprendre la structure et la dynamique des édifices volcaniques au sens large. Pour illustrer ces applications, j'ai choisi de me focaliser principalement sur le volcanisme d'Hawaii (Fig. 23) qui constitue un exemple essentiel dans la compréhension de l'ensemble des phénomènes magmatiques, volcaniques et tectoniques à différentes échelles spatiales et temporelles (e.g. Ribe and Christensen, 1999).

4.3.1. L'exemple du volcanisme d'Hawaii : dynamiques multi-échelles et aléas associés

a) Sources et dynamique régionale profondes

Comme décrit précédemment, caractériser la structure thermique profonde est fondamentale pour mieux comprendre la dynamique volcanique globale passée, actuelle et future des édifices et la relier aux manifestations de surface. Face à cette problématique et à de telles échelles spatiales, l'estimation de la profondeur de Curie à partir des anomalies magnétiques est une approche pertinente que je souhaite continuer à développer. Corréler cette estimation avec les données sismiques, les modèles de profondeur du Moho et les flux de chaleurs (e.g. Fox Maule et al., 2005; Vervelidou and Thébault, 2015) permettra d'accéder à des contraintes supplémentaires quant à la dynamique du volcanisme à différentes échelles et dans différents contextes géodynamiques.

Par exemple, le volcanisme de point chaud demeure l'une des manifestations volcaniques mondiales les plus distinctives et celui d'Hawaii, actif depuis plus de 80 millions d'années, en est sans aucun doute l'image la plus probante (Fig. 23a). De nombreuses études portant sur la dynamique des fluides, la géochimie et la géodynamique se sont focalisées sur ce système complexe (Farnetani and Hofmann, 2010; Ribe and Christensen, 1999; Vidal and Bonneville, 2004). Associé au mouvement de la plaque Pacifique, il a donné naissance au système Chaîne des Empereurs-Ride d'Hawaii marqué par un changement abrupte d'orientation de 60°, l'Hawaiian-Emperor Bend (HEB) dont l'origine reste largement débattue entre : 1) un changement majeur dans la direction du mouvement de la plaque vers 47 Ma (Gordon et al., 1978; Sharp, W.D., Clague, 2006; Torsvik et al., 2017), 2) un simple déplacement du point chaud vers le sud hérité de la dynamique mantellique (Hassan et al., 2016; Steinberger et al., 2004; Tarduno et al., 2009; Tarduno and Cottrell, 1997; Tarduno, 2003), ou 3) une combinaison de ces deux effets (O'Connor et al., 2015, 2013). Cette chaîne présente donc une structure complexe héritée d'une longue histoire en lien avec la dynamique profonde avec également une importante fracturation de surface. Déterminer la profondeur de Curie serait ici particulièrement pertinent pour mieux caractériser une histoire thermique complexe et les implications sur les manifestations de surface, en terme de volcanisme mais également de tectonique régionale (Fig. 23a).

Notons qu'une telle approche constitue également une perspective intéressante à court terme à l'échelle de provinces volcaniques en dormance et plus particulièrement à l'aplomb du Massif Central dans le contexte des actions menées dans le cadre de Prova² pour une meilleure connaissance du système à grande échelle.

b) Processus dynamiques superficiels et aléas associés

La crise éruptive majeure qui a affecté le Kilauea en 2018 (vidange du lac de lave sommital, subsidence de la caldera) a confirmé la nécessité de mieux imager la stabilité de l'édifice et les interactions entre les systèmes magmatiques et hydrothermaux. J'ai précédemment contribué à démontrer le potentiel des méthodes de résistivité électrique et magnétiques dans la détection de ces structures à l'échelle du Kīlauea (fort contraste de résistivité magma-encaissant, diminution de la résistivité sous l'effet de circulations hydrothermales, Gailler et al., 2019; Soueid Ahmed et al., 2018; désaimantation en profondeur, Gailler et al., 2024) offrant ainsi une image globale, un état-0 antérieure à cette crise.

Au Kilauea, les modèles issus du levé électromagnétique aéroporté récent (Bedrosian et al., 2023) ont permis d'imager la structure complexe de l'édifice dans sa partie sommitale et le long de ses rift zones, mais également le long de failles propices à l'effondrement et au glissement de son flanc sud. Dans la continuité, combiner l'ensemble des données disponibles (tomographie de résistivité électrique, levés magnétiques, MT) permettrait de renforcer l'imagerie de l'édifice à différentes profondeurs, de la base de la croûte à la surface. L'objectif serait en parallèle de transposer les approches mises en œuvre dans le cadre du projet SCAN4VOLC sur le Piton de la Fournaise pour caractériser l'évolution de l'édifice en lien avec la dynamique actuelle (Fig. 23a).

Si l'effondrement caldérique récent et l'importante dynamique éruptive actuelle ne permettent plus, à l'heure actuelle, d'envisager des mesures au sol, la répétition de mesures magnétiques par drone semble incontournable pour caractériser l'état thermique de l'édifice en profondeur, mieux comprendre l'évolution des zones de stockage, ainsi que les relations entre le système sommital et l'activité le long des rift zones. A terme, en envisageant un système stabilisé, la mise en œuvre d'une tomographie de résistivité électrique 3D avec l'instrumentation Full Waver offrirait une image jusqu'à 1000 m de profondeur pour mieux contraindre l'évolution de la géométrie des zones de stockage suite à la crise de 2018 (Fig. 23b).

Par ailleurs, le flanc Sud du Kilauea est un exemple caractéristique d'instabilité comme en témoignent les études structurales et les déformations de surface (Denlinger and Morgan, 2014). La localisation en double différence des séismes a permis de mettre en évidence un plan de décollement (à 8-9 km de profondeur ; Got and Okubo, 2003; Got et al., 2008, 1994), dont les déplacements ont été précisés par le réseau GNSS (Brooks et al., 2006; Owen et al., 1995). L'approche MT, ponctuelle sous la forme d'un profil ou temporelle, permettrait de confirmer ou infirmer l'existence d'une zone conductrice à de telles profondeurs (Fig. 23c), comme on peut l'attendre d'un tel plan de glissement (Gailler et al., 2018). Imager sa géométrie permettrait de mieux estimer la stabilité du flanc, notamment au niveau du grand escarpement de Hilina Pali, susceptible de rompre en un gigantesque glissement gravitaire (Moore et al., 1994, 1989) et donc de générer un important tsunami dont les simulations peuvent être envisagées par le code VolcFlow (Kelfoun et al., 2010; Fig. 23c).

En parallèle, étudier les variations des anomalies magnétiques au cours du temps permettrait potentiellement de mieux caractériser l'évolution temporelle de cette zone d'instabilité par intercorrélations. Mettre en place des levés magnétométriques par drone, sous la forme de répétitions à différentes altitudes, pourrait potentiellement apporter davantage de contraintes quant à la dynamique éruptive et les instabilités mécaniques, en lien avec la déformation de l'édifice dans son ensemble.

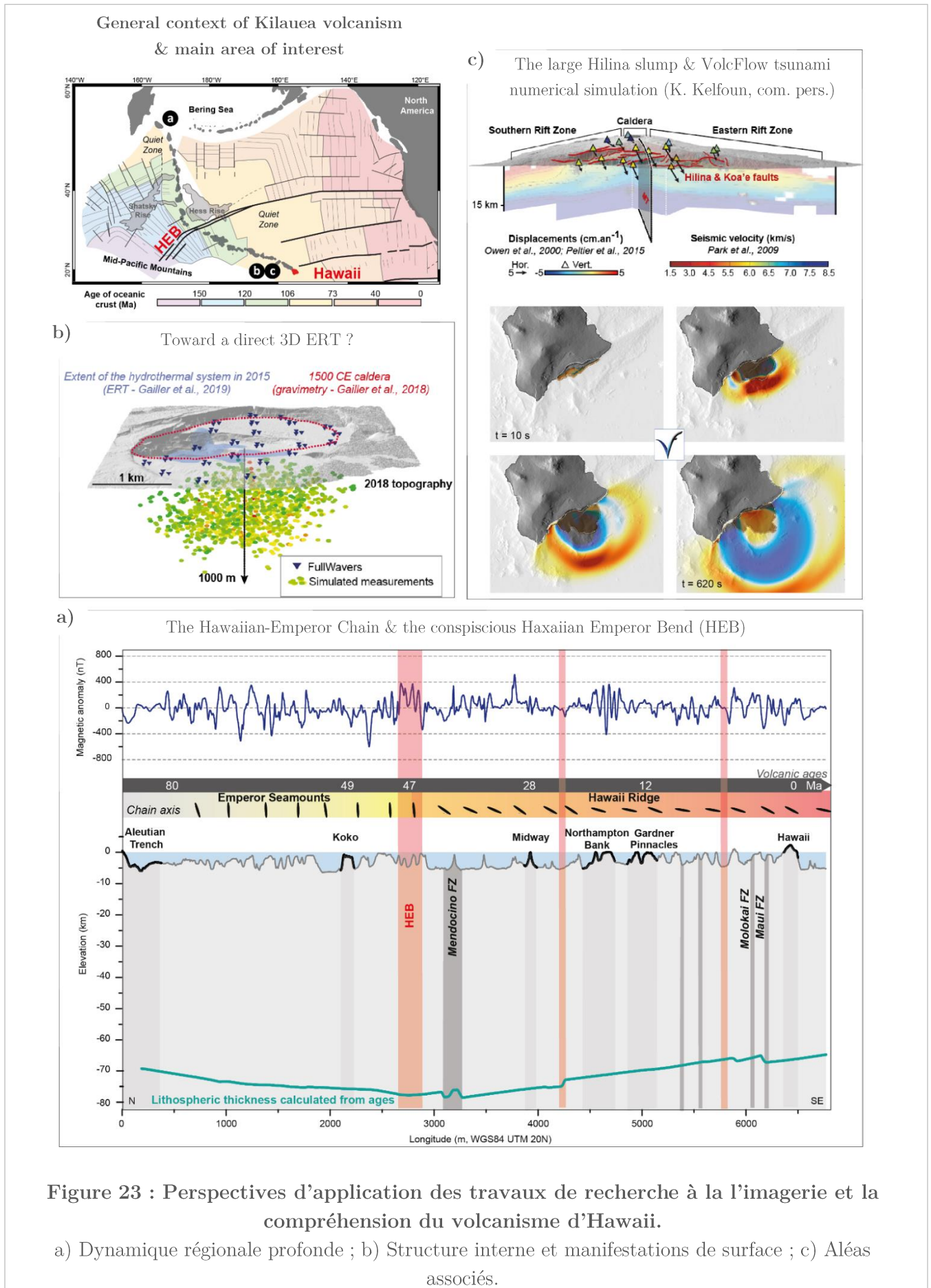


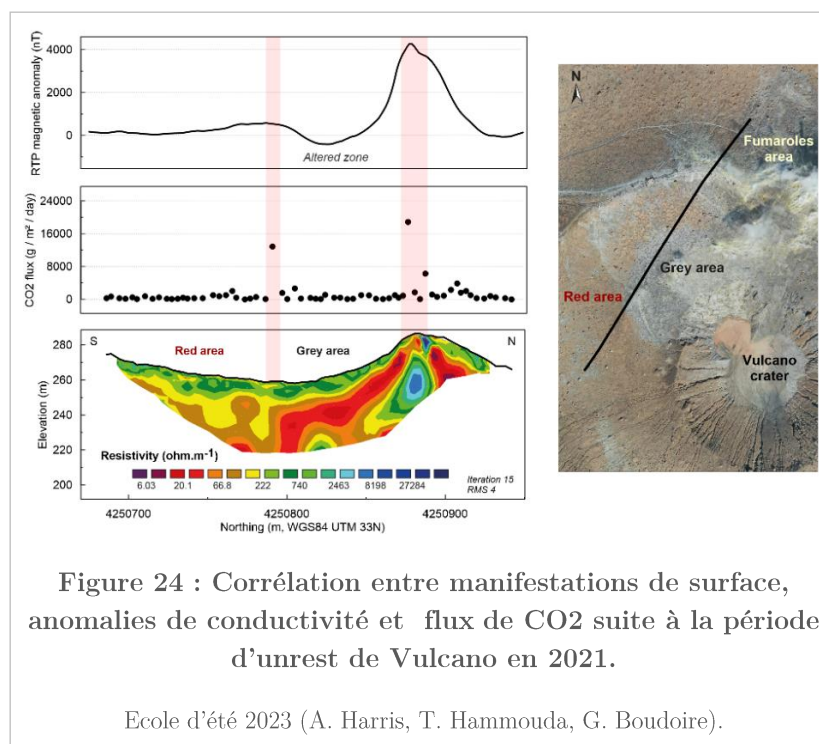
Figure 23 : Perspectives d'application des travaux de recherche à la l'imagerie et la compréhension du volcanisme d'Hawaii.

a) Dynamique régionale profonde ; b) Structure interne et manifestations de surface ; c) Aléas associés.

4.3.2. Applications à d'autres cibles

Les volcans antillais sont également des cibles majeures à plusieurs titres, de par leur histoire éruptive, et leur reprise d'activité récentes. La réactivation du système hydrothermale de la Soufrière de Guadeloupe en 2018 a ainsi appelé à renforcer le suivi du système hydrothermal dans son ensemble. En parallèle des données d'observatoire et dans la continuité des campagnes géophysiques précédentes (notamment celle menée par le LMV-ISTerre en 2019; *Gailler et al. in prep.*), l'objectif est d'investiguer plus en détail l'évolution spatio-temporelle de la zone hydrothermale au sein du dôme et de caractériser l'évolution de la zone d'instabilité majeure à l'échelle du flanc Sud (Fig. 16a). Depuis 2019, la Montagne Pelée en Martinique connaît également une phase de réactivation avec une augmentation considérable du taux de sismicité, probablement en lien avec une perturbation du système hydrothermal. Dans ce contexte également, il est primordial de contribuer aux recherches autour de ce phénomène, par l'intermédiaire de méthodes adaptées dont nous avons démontré le potentiel.

Les volcans italiens apparaissent également comme des cibles privilégiées, avec l'exemple de l'Etna, l'un des volcans les plus actifs d'Europe avec de nombreuses phases paroxysmales dont la compréhension de la dynamique globale reste un challenge majeur (Freret-Lorgeril et al., 2021), tout comme le Stromboli et son activité récente. En parallèle, l'augmentation considérable de la sismicité à l'aplomb des Champs Phlégréens, système volcanique actif le plus étendu de la région méditerranéenne dans une zone densément peuplée, appelle également à un suivi haute résolution. L'ensemble de ces perspectives intègre en parallèle une dimension pédagogique, avec l'exemple des travaux initiés dans le cadre de l'école d'été 'Working on active volcanoes : learning the tools of modern volcanology'.



La mise en place de méthodes géophysiques notamment sur Vulcano, suite à l'enregistrement d'une période d'unrest au cours de l'été 2021, et plus récemment à l'été 2024, s'est en effet avérée particulièrement intéressante dans la caractérisation du système hydrothermal en profondeur en relation avec les mécanismes de dégazage en surface et leurs implications, comme en témoigne notamment la corrélation entre les informations issues du profil de tomographie de résistivité électrique et flux de CO₂ le long d'un profil de référence (Pailot-Bonnetat, 2024 ; Fig. 24).

Les cibles sont donc nombreuses, et la combinaison de stratégies pluridisciplinaires, au sol, par drone et satellite, leur modélisation couplée puis conjointe, pourrait fournir des informations considérables et renforcer les stratégies d'étude et de surveillance dans des contextes volcaniques variés et à différentes échelles.

Conclusion

Les travaux de recherche présentés ici reposent donc principalement sur les apports de la géophysique multi-méthode à la connaissance des édifices volcaniques, depuis leur structure interne jusqu'à la détection, l'imagerie et le suivi des zones actives à différentes profondeurs pour en appréhender leur évolution. L'application de ces approches s'articule plus particulièrement autour d'un triptyque qui demeurent de véritables challenges scientifiques et techniques entre :

- Acquisition, développements méthodologiques, traitement et analyse de données géophysiques multi-méthodes complémentaires.
- Modélisations multi-échelles, spatiales (locales, globales et régionales) et temporelles (données ponctuelles, répétitions et séries temporelles).
- Interprétation des modèles en terme de structure interne et de dynamique volcanique dans son ensemble.

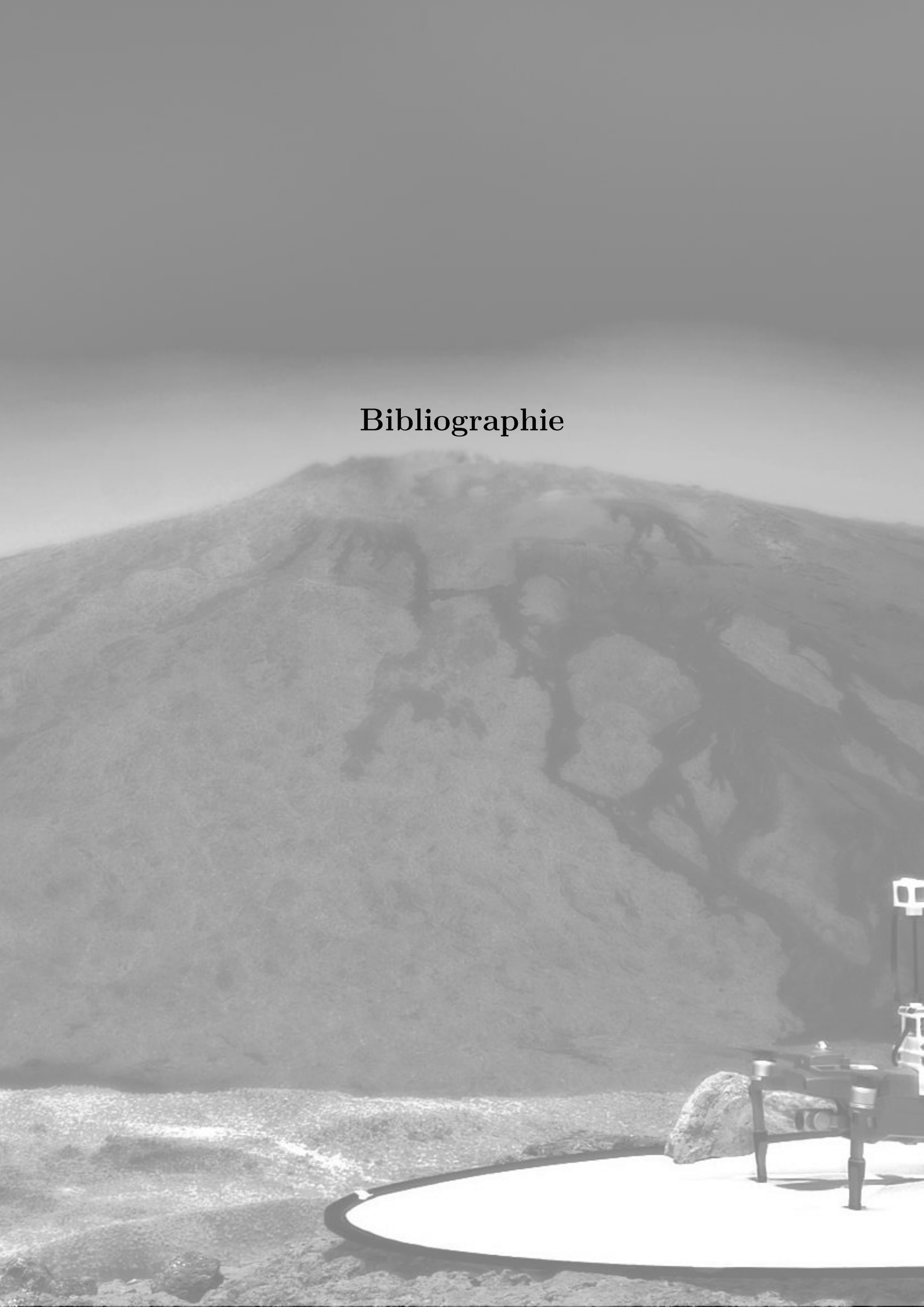
Les objectifs principaux sont d'établir un modèle d'architecture globale mettant en évidence les principales zones de stockage, les contrastes lithologiques et hétérogénéités mécaniques à différentes échelles spatiales, et de caractériser l'évolution d'un état-0 au cours du temps en lien avec l'activité éruptive, hydrothermale et volcano-tectonique. Les travaux engagés et les perspectives à plus ou moins long terme sont désormais d'évoluer progressivement vers une imagerie 4D multi-paramètres, c'est-à-dire spatio-temporelle à haute résolution des édifices volcaniques, nécessitant fondamentalement de :

- Combiner divers observables pour les interpréter conjointement avec un maximum de contraintes (géologiques, géochimiques, pétrologiques et physiques).
- Mettre en œuvre des protocoles de terrain dédiés selon les cibles (nature et profondeur des sources) et les problématiques (imagerie globale, dynamique des processus impliqués).
- Développer des approches numériques adaptées et évolutives (traitement des signaux, analyse quantitative, modélisations couplées spécifiques et/ou conjointes).

L'essor considérable des approches géophysiques depuis plusieurs décennies, tant en terme de progrès technologiques (avec l'exemple de la miniaturisation des capteurs, composante aéroportée) et de ressources numériques (capacité de calcul, intégration d'un volume croissant de données), ouvre en effet des perspectives de développements et d'applications multiples dans le domaine de la volcanologie.

Les applications transverses sont en parallèles croissantes, comme la contribution à l'évaluation des ressources (hydrogéologiques et géothermiques) du sous-sol en contexte volcanique avec un réel enjeu environnemental, ou encore les apports à la prospection archéologique.

Bibliographie



- A**ntoine, R., Lissak, C., Lopez, T., Tangy, M., Gailler, L., Labazuy, P., Fauchard, C., 2020. Geoscientists in the sky: Unmanned Aerial Vehicles for geohazards response. *Surv. Geophys.*
- Araña, V., Camacho, A.G., García, A., Montesinos, F.G., Blanco, I., Vieira, R., Felpeto, A., 2000. Internal structure of Tenerife (Canary Islands) based on gravity, aeromagnetic and volcanological data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 103 (1–4), 43–64.
- Arias, L., Cifuentes, J., Marín, M., Castillo, F., Garcés, H., 2019. Hyperspectral imaging retrieval using MODIS satellite sensors applied to volcanic ash clouds monitoring. *Remote Sens.* 11. <https://doi.org/10.3390/rs11111393>
- Arnaiz-Rodríguez, M.S., Orihuela, N., 2013. Curie point depth in Venezuela and the Eastern Caribbean. *Tectonophysics* 590, 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.004>
- Aumar, C., 2022. Chaîne des Puys: Implications hydrogéologiques pour les bassins versants de la Veyre et de Côme. Université Clermont Auvergne.
- B**arnoud, A., Cayol, V., Gailler, L., Smittarello, D., Bodart, O., Dumont, Q., Hrysiewicz, A., Dabaghi, F., Froger, J.L., Peltier, A., Chevrel, O., Roult, J., Chaput, M., 2019. Towards joint modelling and inversion of surface displacements and microgravimetric temporal variations for the characterization of eruptive sources at the Piton de la Fournaise volcano, in: 4èmes Rencontres Scientifiques et Techniques RESIF. Biarritz.
- Barnoud, A., Cayol, V., Lelièvre, P.G., Portal, A., Labazuy, P., Boivin, P., Gailler, L., 2021. Robust Bayesian Joint Inversion of Gravimetric and Muographic Data for the Density Imaging of the Puy de Dôme Volcano (France). *Front. Earth Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.575842>
- Battaglia, J., Douchain, J.M., 2017. Réseaux sismologiques d’Auvergne. *Rev. Auvergne.* 389–406.
- Battaglia, M., Gottsmann, J., Carbone, D., Fernandez, J., 2008. 4D volcano gravimetry. *Geophysics* 73, WA3–WA18. <https://doi.org/10.1190/1.2977792>
- Battani, A., Deville, E., Faure, J.L., Jeandel, E., Noirez, S., Tocqué, E., Benoît, Y., Schmitz, J., Parlouar, D., Sarda, P., 2010. Geochemical Study of Natural CO₂ Emissions in the French Massif Central: How to Predict Origin, Processes and Evolution of CO₂ Leakage Étude géochimique des émissions naturelles de CO₂ du Massif Central: origine et processus de migration du gaz. *Oil Gas Sci. Technol.* 65, 615–633.
- Bedrosian, P.A., Finn, C.A., Crosbie, J., Peterson, D.E., Kauahikaua, J., MacQueen, P., 2023. Imaging volcanic systems via multi-scale electromagnetic imaging, in: 8 Th International Airborne Electromagnetics Workshop, 3-7th September 2023, Fitzroy Island. p. 4.
- Bhattacharyya, B.K., Leu, L.-K., 1975a. Anomalies, Spectral analysis of gravity and magnetic due to two-dimensional structures. *Geophysics* 40, 993–1001.
- Bhattacharyya, B.K., Leu, L.-K., 1975b. Analysis of magnetic anomalies over Yellowstone National Park: mapping of Curie point isothermal surface for geothermal reconnaissance. *Geophys. Res. Lett.* 80, 4461–4465.
- Bhattacharyya, B.K., Leu, L.K., 1975c. Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to two-dimensional structures. *Geophysics* 40, 993–1013.
- Blakely, R.J., 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511549816>
- Blakely, R.J., 1988. Curie temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada. *J. Geophys. Res.* 93, 11,817– 11,832.
- Blakely, R.J., Brocher, T.M., Wells, R.E., 2005. Subduction-zone magnetic anomalies and implications for hydrated forearc mantle. *Geol. Soc. Am.* 33, 445–448.

- Blanco-Montenegro, I., Nicolosi, I., Pignatelli, A., Chiappini, M., 2008. Magnetic imaging of the feeding system of oceanic volcanic islands: El Hierro (Canary Islands). *Geophys. J. Int.* 173, 339–350. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03723.x>
- Blanco-Montenegro, I., Torta, J.M., Garcia, A., Araña, V., 2003. Analysis and modelling of the aeromagnetic anomalies of Gran Canaria (Canary Islands). *Earth Planet. Sci. Lett.* 206, 601–616. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01129-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01129-9)
- Bonvalot, S., Remy, D., Deplus, C., Diament, M., Gabalda, G., 2008. Insights on the March 1998 eruption at Piton de la Fournaise volcano (La Réunion) from microgravity monitoring. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JB005084>
- Boudoire, G., Finizola, A., Di Muro, A., Peltier, A., Liuzzo, M., Grassa, F., Delcher, E., Brunet, C., Boissier, P., Chaput, M., Ferrazzini, V., Gurrieri, S., 2018. Small-scale spatial variability of soil CO₂ flux: Implication for monitoring strategy. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 366, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.10.001>
- Bouligand, C., Glen, J.M.G., Blakely, R.J., 2014. Distribution of buried hydrothermal alteration deduced from high-resolution magnetic surveys in Yellowstone National Park. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 2595–2630. <https://doi.org/10.1002/2013JB010802>.Received
- Bouligand, C., Glen, J.M.G., Blakely, R.J., 2009. Mapping Curie temperature depth in the western United States with a fractal model for crustal magnetization. *J. Geophys. Res.* 114, B11104. <https://doi.org/10.1029/2009JB006494>
- Bouligand, C., Hurwitz, S., Vandemeulebrouck, J., 2019. Heat and Mass Transport in a Vapor - Dominated Hydrothermal Area in Yellowstone National Park , USA: Inferences From Magnetic , Electrical , Electromagnetic , Subsurface Temperature , and Diffuse CO₂ Flux Measurements *Journal of Geophysical Research : S.* <https://doi.org/10.1029/2018JB016202>
- Bouysse, P., 1979. Caractères morphostructuraux et évolution géodynamique de l'arc insulaire des Petites Antilles (Campagne Arcantel). Orléans.
- Brooks, B.A., Foster, J.H., Bevis, M., Frazer, L.N., Wolfe, C.J., Behn, M., 2006. Periodic slow earthquakes on the flank of Kīlauea volcano, Hawai'i. *Earth Planet. Sci. Lett.* 246, 207–216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.035>
- C**arbone, D., Antoni-Micollier, L., Hammond, G., de Zeeuw - van Dalssen, E., Rivalta, E., Bonadonna, C., Messina, A., Lautier-Gaud, J., Toland, K., Koymans, M., Anastasiou, K., Bramsiepe, S., Cannavò, F., Contrafatto, D., Frischknecht, C., Greco, F., Marocco, G., Middlemiss, R., Ménoret, V., Noack, A., Passarelli, L., Paul, D., Prasad, A., Siligato, G., Vermeulen, P., 2020. The NEWTON-g Gravity Imager: Toward New Paradigms for Terrain Gravimetry. *Front. Earth Sci.* 8, 1–17. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.573396>
- Carbone, D., Poland, M.P., Patrick, M.R., Orr, T.R., 2013. Continuous gravity measurements reveal a low-density lava lake at Kīlauea Volcano, Hawai'i. *Earth Planet. Sci. Lett.* 376, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.06.024>
- Chave, A.D., Jones, A.G., 2012. *The magnetotelluric method: theory and practice*, Cambridge. ed. New York.
- Chen, Y., Remy, D., Froger, J.L., Peltier, A., Villeneuve, N., Darrozes, J., Perfettini, H., Bonvalot, S., 2017. Long-term ground displacement observations using InSAR and GNSS at Piton de la Fournaise volcano between 2009 and 2014. *Remote Sens. Environ.* 194, 230–247. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.038>
- Chevallier, L., 1979. Structures et évolution du volcan Piton des Neiges, Ile de la Réunion. Leurs relations avec les structures du Bassin des Mascareignes, Océan Indien occidental. Thèse d'Université, Univ. de Grenoble, France.
- Civet, Francois, Thébault, Erwan, Verhoeven, Olivier, Langlais, Benoit, Civet, Francois, Thébault, Erwan,

Verhoeven, Olivier, Langlais, Benoit, Electrical, D.S., Civet, F, Thébault, E, Verhoeven, O, Langlais, B, Saturnino, D., 2021. Electrical conductivity of the Earth ' s mantle from the first Swarm magnetic field measurements To cite this version : HAL Id : hal-02328708 Electrical conductivity of the Earth ' s mantle from the first Swarm magnetic field measurements. <https://doi.org/10.1002/2015GL063397.1>.

Coulomb, J., Jobert, G., 1973. *Traité de Géophysique interne*. Masson (Ed) Tome 1.

Dawson, P., Chouet, B., 2014. Characterization of very-long-period seismicity accompanying summit activity at Kīlauea Volcano, Hawai'i: 2007-2013. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.04.010>

De Saint-Jean, B., 2008. Etude et développement d ' un système de gravimétrie mobile.

De Voogd, B., Deplus, C., Sisavath, E., Depuiset, F., Mercier, M., 2009. Vertical movements of the oceanic lithosphere above La Réunion hotspot. *Geophys. Res. Abstr. EGU Gen. Assem. 2009 11*, EGU2009-5754–3.

Delcamp, A., van de Vries, B.W., James, M.R., Gailler, L.S., Lebas, E., 2012. Relationships between volcano gravitational spreading and magma intrusion. *Bull. Volcanol.* 74. <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0558-9>

Denlinger, R.P., Morgan, J.K., 2014. Instability of Hawaiian Volcanoes. *Charact. Hawaiian Volcanoes*, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1801 149–176.

Derrien, A., Villeneuve, N., Peltier, A., Beauducel, F., 2015. Retrieving 65 years of volcano summit deformation from multitemporal structure from motion: The case of Piton de la Fournaise (La Réunion Island). *Geophys. Res. Lett.* 42, 6959–6966. <https://doi.org/10.1002/2015GL064820>

Dumont, M., Peltier, A., Roblin, E., Reninger, P.A., Barde-Cabusson, S., Finizola, A., Ferrazzini, V., 2019. Imagery of internal structure and destabilization features of active volcano by 3D high resolution airborne electromagnetism. *Sci. Rep.* 9, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54415-4>

Dumont, Q., Cayol, V., Froger, J., Peltier, A., 2022. major destabilization structure revealed by 22 years of satellite imagery at Piton de la Fournaise. *Nat. Commun.* 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30109-w>

Dumont, Q., Cayol, V., Froger, J.L., 2024. Is stress modeling able to forecast intrusions and slip events at Piton de la Fournaise volcano? *Earth Planet. Sci. Lett.* 626. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118494>

Famin, V., Michon, L., 2010. Volcano destabilization by magma injections in a detachment. *Geol.* 38, 219–222.

Farnetani, C.G., Hofmann, A.W., 2010. Dynamics and internal structure of the Hawaiian plume. *Earth Planet. Sci. Lett.* 295, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.04.005>

Finizola, A., Ricci, T., Deiana, R., Cabusson, S.B., Rossi, M., Praticelli, N., Giocoli, A., Romano, G., Delcher, E., Suski, B., Revil, A., Menny, P., Di Gangi, F., Letort, J., Peltier, A., Villasante-Marcos, V., Douillet, G., Avaré, G., Lelli, M., 2010. Adventive hydrothermal circulation on Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) revealed by geophysical and geochemical approaches: Implications for general fluid flow models on volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 196, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.07.022>

Finn, C.A., Sisson, T.W., Deszcz-Pan, M., 2001. Aerogeophysical measurements of collapse-prone hydrothermally altered zones at Mount Rainier volcano. *Nature* 409, 600–603. <https://doi.org/10.1038/35054533>

Fitterman, D. V., 1979. Theory of electrokinetic-magnetic anomalies in a faulted half-space. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 84, 6031–6040. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JB084iB11p06031>

France, L., Demacon, M., Gurenko, A.A., Briot, D., 2016. Oxygen isotopes reveal crustal contamination and a large, still partially molten magma chamber in Cha[^]ne des Puys (French Massif Central). *Lithos* 260, 328–338. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.05.013>

- Freret-Lorgeril, V., Bonadonna, C., Corradini, S., Donnadieu, F., Guerrieri, L., Lacanna, G., Marzano, F.S., Mereu, L., Merucci, L., Ripepe, M., Scollo, S., Stelitano, D., 2021. Examples of multi-sensor determination of eruptive source parameters of explosive events at mount etna. *Remote Sens.* 13. <https://doi.org/10.3390/rs13112097>
- Froger, J., Famin, V., Cayol, V., Augier, A., Froger, J., Famin, V., Cayol, V., Augier, A., Michon, L., 2015. Time-dependent displacements during and after the April 2007 eruption of Piton de la Fournaise , revealed by interferometric data. *J. Volcanol Geotherm. Res.* 296, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.02.014>
- Gailler, L.-S., Bouchot, V., Martelet, G., Thinon, I., Coppo, N., Baltassat, J.-M., Bourgeois, B., 2014. Contribution of multi-method geophysics to the understanding of a high-temperature geothermal province: The Bouillante area (Guadeloupe, Lesser Antilles). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 275. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.02.002>
- Gailler, L.-S., Lénat, J.-F., 2010. Three-dimensional structure of the submarine flanks of La Réunion inferred from geophysical data. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 115. <https://doi.org/10.1029/2009JB007193>
- Gailler, L.-S., Lénat, J.-F., Blakely, R.J., 2016. Depth to Curie temperature or bottom of the magnetic sources in the volcanic zone of la Réunion hot spot. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 324. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.005>
- Gailler, L.-S., Lénat, J.-F., Lambert, M., Levieux, G., Villeneuve, N., Froger, J.-L., 2009. Gravity structure of Piton de la Fournaise volcano and inferred mass transfer during the 2007 crisis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 184. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.024>
- Gailler, L.-S., Martelet, G., Thinon, I., Bouchot, V., Lebrun, J.-F., Münch, P., 2013. Crustal structure of Guadeloupe islands and the Lesser Antilles arc from a new gravity and magnetic synthesis. *Bull. la Soc. Geol. Fr.* 184.
- Gailler, L.-S., Martí, A., Lénat, J.-F., 2018. Complex structure of Piton de la Fournaise and its underlying lithosphere revealed by magnetotelluric 3D inversion. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.006>
- Gailler, L., Arcay, D., Münch, P., Martelet, G., Thinon, I., Lebrun, J.-F., 2017. Forearc structure in the Lesser Antilles inferred from depth to the Curie temperature and thermo-mechanical simulations. *Tectonophysics* 706–707. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.03.014>
- Gailler, L., Bouligand, C., Kauahikaua, J., Lénat, J.F., Cluzel, N., 2024. The Subsurface Structure of the Kīlauea Caldera Before Its 2018 Collapse Inferred From Ground Magnetic, SP, and Temperatures Anomalies. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 129, 1–22. <https://doi.org/10.1029/2023JB028005>
- Gailler, L., Kauahikaua, J., 2017. Monitoring the cooling of the 1959 Kīlauea Iki lava lake using surface magnetic measurements. *Bull. Volcanol.* 79. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1119-7>
- Gailler, Lydie, Kauahikaua, J., Lénat, J.-F., Revil, A., Gresse, M., Ahmed, A.S., Cluzel, N., Manthilake, G., Gurioli, L., Johnson, T., Finizola, A., Delcher, E., 2019. 3D electrical conductivity imaging of Halema'uma'u lava lake (Kīlauea volcano). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 381, 185–192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.06.001>
- Gailler, L., Kauahikaua, J., Lénat, J.-F., Revil, A., Gresse, M., Ahmed, A.S., Cluzel, N., Manthilake, G., Gurioli, L., Johnson, T., Finizola, A., Delcher, E., 2019. 3D electrical conductivity imaging of Halema'uma'u lava lake (Kīlauea volcano). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 381. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.06.001>
- Gailler, L., Labazuy, P., Dumont, Q., Froger, J., Peltier, A., Finizola, A., Cayol, V., Chaput, M., Régis, E., 2023. Volcano-Magnetic Signal Reveals Rapid Evolution of the Inner Structure of Piton de la Fournaise. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 128, 1–14. <https://doi.org/10.1029/2022jb025290>
- Gailler, L., Labazuy, P., Régis, E., Bontemps, M., Souriot, T., Bacques, G., Carton, B., 2021. Validation of a

- new UAV magnetic prospecting tool for volcano monitoring and geohazard assessment. *Remote Sens.* 13, 1–10. <https://doi.org/10.3390/rs13050894>
- Gailler, L., Labazuy, P., Régis, E., Peltier, A., Ferrazzini, V., 2022. Active structures and thermal state of the Piton de la Fournaise summit area revealed by combined UAV magnetic and IR measurements. *Volcanica* in press.
- Gailler, Lydie, Labazuy, P., Régis, E., Peltier, A., Ferrazzini, V., 2022. Active structures and thermal state of the Piton de la Fournaise summit revealed by combined UAV magnetic and thermal infrared measurements. *Volcanica* 5, 61–74. <https://doi.org/10.30909/vol.05.01.6174>
- Gailler, L.S., 2010. Structure interne d'un système océanique volcanique, La Réunion (Océan Indien) – Approches géophysiques. Université Blaise Pascal-Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont-Ferrand.
- Gailler, L.S., Kauahikaua, J., 2018. The Gravity signature of basaltic fill in Kīlauea caldera, Island of Hawai'i, in: *GSA Books*. pp. 538, 297–306. [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/2018.2538\(13\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/2018.2538(13)).
- Gailler, L.S., Lénat, J.F., 2012. Internal architecture of La Réunion (Indian Ocean) inferred from geophysical data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 221–222. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.01.015>
- Gailler, L S, Lénat, J.F., 2012. Internal architecture of La Réunion (Indian Ocean) inferred from geophysical data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 221–222, 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.01.015>
- Gailler, L.S., Martelet, G., Thinon, I., Bouchot, V., Lebrun, J.F., Münch, P., 2013. Crustal structure of Guadeloupe islands and the Lesser Antilles arc from a new gravity and magnetic synthesis. *Bull. la Soc. Geol. Fr.* 184, 77–97.
- Galdéano, A., Lénat, J.-F., Lalanne, F.-X., 1988. Carte magnétique de l'île de la Réunion.
- Gallart, J., Driad, L., Charvis, P., Sapin, M., Him, A., Diaz, J., de Voogd, B., Sachpazi, M., 1999. Perturbation to the lithosphere along the hotspot track of La Réunion from an offshore-onshore seismic transect. *J. Geophys. Res., B, Solid Earth Planets* 104, 2895–2908.
- Gance, J., Leite, O., Texier, B., Bernard, J., Truffert, C., 2018. The Fullwaver systems: Distributed network of autonomous devices for deep 3D electrical resistivity and induced polarization survey. *Egu* 20, 12569.
- Garofalo, K., Tassi, F., Vaselli, O., Delgado-Huertas, A., Tedesco, D., Frische, M., Hansteen, T.H., Poreda, R.J., Strauch, W., 2007. Fumarolic gases at Mombacho volcano (Nicaragua): Presence of magmatic gas species and implications for volcanic surveillance. *Bull. Volcanol.* 69, 785–795. <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0108-z>
- Gavazzi, B., Bertrand, L., Munsch, M., Mercier de Lépinay, J., Diraison, M., Géraud, Y., 2020. On the Use of Aeromagnetism for Geological Interpretation: 1. Comparison of Scalar and Vector Magnetometers for Aeromagnetic Surveys and an Equivalent Source Interpolator for Combining, Gridding, and Transforming Fixed Altitude and Draping Data Sets. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 125. <https://doi.org/10.1029/2019JB018870>
- Gerbault, M., Fontaine, F.J., Peltier, A., Got, J.L., Hassani, R., Ferrazzini, V., Gailler, L., Duputel, Z., 2022. What causes the persistent seismicity below the eastern flank of Piton de la Fournaise (la Réunion Island)? Elasto-plastic models of magma inflation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 431. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107628>
- Gordon, R. G., Cox, A. & Harter, C.E., 1978. Absolute motion of an individual plate estimated from its ridge and trench boundaries. *Nature* 274, 752–755.
- Got, J.-L., Okubo, P., 2003. New insights into Kilauea's volcano dynamics brought by large-scale relative relocation of microearthquakes. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 108. <https://doi.org/10.1029/2002jb002060>
- Got, J.L., Frechet, J., Klein, F.W., 1994. Deep fault plane geometry inferred from multiplet relative relocation beneath the south flank of Kilauea. *J. Geophys. Res.* 99. <https://doi.org/10.1029/94jb00577>

- Got, J.L., Monteiller, V., Monteux, J., Hassani, R., Okubo, P., 2008. Deformation and rupture of the oceanic crust may control growth of Hawaiian volcanoes. *Nature* 451, 453–456. <https://doi.org/10.1038/nature06481>
- Gottsmann, J., Camacho, A.G., Martí, J., Wooller, L., Fernández, J., García, A., Rymer, H., 2008. Shallow structure beneath the Central Volcanic Complex of Tenerife from new gravity data: Implications for its evolution and recent reactivation. *Phys. Earth Planet. Inter.* 168, 212–230.
- Grace, C., 2022. Apport des mesures magnétotelluriques dans la caractérisation de la structure interne du Piton de la Fournaise. Clermont-Ferrand.
- Gresse, M., Vandemeulebrouck, J., Byrdina, S., Chiodini, G., Revil, A., Johnson, T.C., Ricci, T., Vilardo, G., Mangiacapra, A., Lebourg, T., Grangeon, J., Bascou, P., Metral, L., 2017. Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography of the Solfatara Crater (Italy): Implication for the Multiphase Flow Structure of the Shallow Hydrothermal System. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122, 8749–8768. <https://doi.org/10.1002/2017JB014389>
- H**ardwick, C.D., 1984. Important design considerations for inboard airborne magnetic gradiometers. *Geophysics* 49, 2004–2018.
- Hassan, R., Müller, R.D., Gurnis, M., Williams, S.E., Flament, N., 2016. A rapid burst in hotspot motion through the interaction of tectonics and deep mantle flow. *Nature* 533, 239–242.
- Hildenbrand, T.G., Rosenbaum, J.G., Kauahikaua, J.P., 1993. Aeromagnetic Study of the Island of Hawaii. *J. Geophys. Res.* 98, 4099–4119.
- Hill, G., Moorkamp, M., Avram, Y., Hogg, C., Mateschke, K., Gahr, S., Schultz, A., Bowles-Martinez, E., Peacock, J., Karcioğlu, G., Chen, C., Cimarelli, C., Carrichi, L., Ogawa, Y., 2023. Probing the 4D evolution of active magmatic systems through magnetotelluric monitoring, in: EGU General Assembly 2023. Vienna, Austria, pp. EGU23-2969. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2969>
- I**shido, T., 2004. Electrokinetic mechanism for ‘W’-shaped self-potential profile on volcanoes. *Geophys. Res. Lett.* 31. <https://doi.org/10.1029/2004GL020409>
- J**achens, R.C., Eaton, G.P., 1980. Geophysical observations of Kilauea volcano, Hawaii, 1. temporal gravity variations related to the 29 November, 1975, $M = 7.2$ earthquake and associated summit collapse. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 7, 225–240. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(80\)90031-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(80)90031-1)
- Johnston, M., 2006. Volcano-Electromagnetic Effects. *Encycl. Geomagn. Paleomagn.*
- K**auahikaua, J., Hildenbrand, T., Webring, M., 2000. Deep magmatic structures of Hawaiian volcanoes, imaged by three-dimensional gravity models. *Geology* 28, 883–886.
- Kelfoun, K., Giachetti, T., Labazuy, P., 2010. Landslide-generated tsunamis at Réunion Island. *J. Geophys. Res.* 115, 17. <https://doi.org/10.1029/2009JF001381>
- Kereszturi, G., Schaefer, L.N., Schleiffarth, W.K., Procter, J., Pullanagari, R.R., Mead, S., Kennedy, B., 2018. Integrating airborne hyperspectral imagery and LiDAR for volcano mapping and monitoring through image classification. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 73, 323–339. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.006>
- Kieffer, G., 1990. Grands traits morphologiques de l’île de la Réunion, in: Lénat, J.F. (Ed.), *Le Volcanisme de La Réunion*. Monographie. Centre de Recherches Volcanologiques, Clermont-Ferrand, pp. 75–114.
- Kieffer, G., 1989. La formation des cirques du Piton des Neiges (La Réunion). *Bull. Ass. Géogr. Fr.* 5, 361–370.
- L**abazuy, P., 1991. Instabilités au cours de l’évolution d’un édifice volcanique en domaine intraplaque océanique: le Piton de la Fournaise (île de la Réunion). Approche pluridisciplinaire à partir des données de campagnes marines. Thèse d’Université, Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

- Labazuy, P., Gouhier, M., Harris, A., Guéhenneux, Y., Hervo, M., Bergès, J.C., Cacault, P., Rivet, S., 2012. Near real-time monitoring of the April-May 2010 Eyjafjallajökull ash cloud: an example of a web-based, satellite data-driven, reporting system. *Int. J. Environ. Pollut.* 48, 262–272. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2012.049673>
- LeBorgne, E. and LeMouél, J.L., 1976. Le levé aéromagnétiques des Antilles françaises, observations magnétiques. *Publ. IGP, n°26*, 25 p. *J. Geophys. Res.* 79, 324.
- Leliak, P., 1961. Identification and Evaluation of Magnetic-Field Sources of Magnetic Airborne Detector Equipped Aircraft. *Inst. Radio Eng. Trans., Aerosp. Navig. Electr* 8, 95–105.
- Lénat, J.-F., Bachèlery, P., Galdéano, A., Labazuy, P., Rousset, D., Vincent, P., 1990. Structure and morphology of the submarine flank of an active basaltic volcano : Piton de la Fournaise (Réunion Island, Indian Ocean). *Oceanol. Acta* 10, 211–223.
- Lénat, J.F., 1995. Geoelectrical methods in volcano monitoring, in: McGuire, W., Kilburn, C.R.J., Murray, J.B. (Eds.), *Monitoring Active Volcanoes: Strategies, Procedures and Techniques*. UCL Press, London, pp. 248–274.
- Lénat, J.F., Bachèlery, P., Merle, O., 2012. Anatomy of Piton de la Fournaise volcano (La Réunion, Indian Ocean). *Bull. Volcanol.* 74, 1945–1961. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0640-y>
- Lénat, J.F., Labazuy, P., 1990. Morphologies et structures sous-marines de la Réunion, in: Lénat, J.F. (Ed.), *Le Volcanisme de La Réunion*. Monographie. Centre de Recherches Volcanologiques, Clermont-Ferrand, pp. 43–74.
- Lénat, J.F., Vincent, P., Bachèlery, P., 1989. The off-shore continuation of an active basaltic volcano: Piton de la Fournaise (Réunion Island, Indian Ocean); structural and geomorphological interpretation from sea beam mapping. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 36. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(89\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(89)90003-6)
- Lesur, V., Hamoudi, M., Choi, Y., Dymant, J., Thébaud, E., 2016. Building the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) 1. *Geomagnetism. Earth, Planets Sp.* 68. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0404-6>
- Liotta, D., Brogi, A., Ruggieri, G., Rimondi, V., Zucchi, M., Helgadóttir, H.M., Montegrossi, G., Friðleifsson, G.Ó., 2020. Fracture analysis, hydrothermal mineralization and fluid pathways in the Neogene Geitafell central volcano: insights for the Krafla active geothermal system, Iceland. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 391, 106502. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.11.023>
- Lipman, P., Normark, W., Moore, J., Wilson, J., Gutmacher, C., 1988. The Giant Submarine Alikea Debris Slide, Mauna Loa, Hawaii. *J. Geophys. Res.* 93, 4279–4299.
- M**artel, C., Champallier, R., Prouteau, G., Pichavant, M., Arbaret, L., Balcone-Boissard, H., Boudon, G., Boivin, P., Bourdier, J.L., Scaillet, B., 2013. Trachyte phase relations and implication for magma storage conditions in the chaîne ne des puys (French Massif Central). *J. Petrol.* 54, 1071–1107. <https://doi.org/10.1093/petrology/egt006>
- Martelet, G., Reninger, P.A., Perrin, J., Deparis, J., 2014. Acquisition géophysique hélicoptérée de l'île de La Réunion. *Rapp. BRGM* 90.
- Maule, C.F., Purucker, M.E., Olsen, N., Mosegaard, K., 2005. Heat flux anomalies in Antarctica revealed by satellite magnetic data. *Science* 309, 464–7. <https://doi.org/10.1126/science.1106888>
- Maus, S., 2009. Earth Magnetic Anomaly Grid Released. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 90, 239. <https://doi.org/10.1029/2009EO280003>
- Maus, S., Dimri, V., 1996. Depth estimation from the scaling power spectrum of potential fields? *Geophys. J. Int.* 124, 113–120. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06356.x>
- Mayhew, M.A., Johnson, B.D., Wasilewski, P., 1985. A review of problems and progress in studies of satellite

- magnetic anomalies. *J. Geophys. Res.* 90, 2511–2522.
- Michon, L., Ferrazzini, V., Di Muro, A., Villeneuve, N., Famin, V., 2015. Rift zones and magma plumbing system of Piton de la Fournaise volcano: How do they differ from Hawaii and Etna? *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 303, 112–129. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.031>
- Michon, L., Staudacher, T., Ferrazzini, V., Bachèlery, P., Marti, J., 2007. April 2007 collapse of Piton de la Fournaise: A new example of caldera formation. *Geophys. Res. Lett.* 34. <https://doi.org/10.1029/2007GL031248>
- Middlemiss, R.P., Campsie, P., Cunningham, W., Douglas, R., McIvor, V., Hough, J., Rowan, S., Paul, D.J., Prasad, A., Hammond, G.D., 2021. A MEMS gravimeter with multi-axis gravitational sensitivity 1–30.
- Millington, S.C., Saunders, R.W., Francis, P.N., Webster, H.N., 2012. Simulated volcanic ash imagery: A method to compare NAME ash concentration forecasts with SEVIRI imagery for the Eyjafjallajökull eruption in 2010. *J. Geophys. Res. Atmos.* 117. <https://doi.org/10.1029/2011JD016770>
- Mizutani, H., Ishido, T., Yokokura, T., Ohnishi, S., 1976. Electrokinetic phenomena associated with earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 3, 365–368. <https://doi.org/10.1029/GL003i007p00365>
- Moore, J.G., Chadwick, W.W., 1995. Offshore geology of Mauna Loa and adjacent areas Hawaiï, in: Rhodes, J.M., Lockwood, J.P. (Eds.), *Mauna Loa Revealed: Structure, Composition, History and Hazards*. AGU Monogr., 92, pp. 21–44.
- Moore, J.G., Clague, D.A., Holcomb, R.T., Lipman, P.W., Normark, W.R., Torresan, M.E., 1989. Prodigious submarine landslides on the Hawaiian Ridge. *J. Geophys. Res.* 94, 17465–17484.
- Moore, J.G., Normark, W.R., Holcomb, R.T., 1994. Giant hawaiian landslides. *Annu. Rev. Earth. Planet. Sci.* 22, 119–144.
- Moretti, R., Komorowski, J.C., Ucciani, G., Moune, S., Jessop, D., de Chabalier, J.B., Beauducel, F., Bonifacie, M., Burtin, A., Vallée, M., Deroussi, S., Robert, V., Gibert, D., Didier, T., Kitou, T., Feuillet, N., Allard, P., Tamburello, G., Shreve, T., Saurel, J.M., Lemarchand, A., Rosas-Carbajal, M., Agrinier, P., Le Friant, A., Chaussidon, M., 2020. The 2018 unrest phase at La Soufrière of Guadeloupe (French West Indies) andesitic volcano: Scrutiny of a failed but prodromal phreatic eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 393, 106769. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106769>
- Munch, P., Lebrun, J.-F., Cornée, J.-J., Thinon, I., Guennoc, P., Marcaillou, B.J., Begot, J., Bertrand, G., De Berc, S.B., Biscarrat, K., Claud, C., De Min, L., Fournier, F., Gailler, L., Graindorge, D., Léticée, J.-L., Marie, L., Mazabraud, Y., Melinte-Dobrinescu, M., Moissette, P., Quillévéré, F., Verati, C., Randrianasolo, A., 2013. Pliocene to Pleistocene carbonate systems of the Guadeloupe archipelago, french lesser antilles: A land and sea study (the KaShallow project). *Bull. la Soc. Geol. Fr.* 184.
- Munsch, M., Fleury, S., 2011. Scalar, vector, tensor magnetic anomalies: measurement or computation? *Geophys. Prospect.* 59, 1034–1045. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2011.01007.x>
- N**apoli, R., Currenti, G., Negro, C. Del, Greco, F., Scandura, D., 2008. Volcanomagnetic evidence of the magmatic intrusion on 13th May 2008 Etna eruption. *Geophys. Res. Lett.* 35, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008GL035350>
- Neal, C.A., Brantley, S.R., Antolik, L., Babb, J.L., Burgess, M., Calles, K., Cappos, M., Chang, J.C., Conway, S., Desmither, L., Dotray, P., Elias, T., Fukunaga, P., Fuke, S., Johanson, I.A., Kamibayashi, K., Kauahikaua, J., Lee, R.L., Pekalib, S., Miklius, A., Million, W., Moniz, C.J., Nadeau, A., Okubo, P., Parcheta, C., Patrick, M.R., Shiro, B., Swanson, D.A., Tollett, W., Trusdell, F., Younger, E.F., Zoeller, M.H., Montgomery-Brown, E.K., Anderson, K.R., Poland, M.P., Ball, J.L., Bard, J., Coombs, M., Dietterich, H.R., Kern, C., Thelen, W.A., Cervelli, P.F., Orr, T., Houghton, B.F., Gansecki, C., Hazlett, R., Lundgren, P., Diefenbach, A.K., Lerner, A.H., Waite, G., Kelly, P., Clor, L., Werner, C., Mulliken, K., Fisher, G., Damby, D., 2019. The 2018 rift eruption and summit collapse of Kīlauea Volcano. *Science* (80-

.). 363, 367–374.

Nicolosi, I., Caracciolo, F.D., Branca, S., Ventura, G., Chiappini, M., 2014. Volcanic conduit migration over a basement landslide at Mount Etna (Italy). *Sci. Rep.* 4. <https://doi.org/doi:10.1038/srep05293>.

O'Connor, J.M., Hoernle, K., Dietmar Müller, R., Morgan, J.P., Butterworth, N.P., Hauff, F., Sandwell, D.T., Jokat, W., Wijbrans, J.R., Stoffers, P., 2015. Deformation-related volcanism in the Pacific Ocean linked to the Hawaiian-Emperor bend. *Nat. Geosci.* 8, 393–397. <https://doi.org/10.1038/ngeo2416>

O'Connor, J.M., Steinberger, B., Regelous, M., Koppers, A.A.P., Wijbrans, J.R., Haase, K.M., Stoffers, P., Jokat, W., Garbe-Schönberg, D., 2013. Constraints on past plate and mantle motion from new ages for the Hawaiian-Emperor Seamount Chain. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 14, 4564–4584. <https://doi.org/10.1002/ggge.20267>

Oehler, J.-F., 2005. Les déstabilisations de flanc des volcans de l'île de La Réunion. Mise en évidence, implications et origines. Thèse d'Université, Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

Oehler, J.-F., Labazuy, P., Lénat, J.-F., 2004. Recurrence of major flank landslides during the last 2-Ma-history of Reunion Island. *Bull. Volc.* 66, 585–598.

Oehler, J., Lénat, J., Labazuy, P., 2008. Growth and collapse of the Reunion Island volcanoes 717–742. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0163-0>

Okubo, Y., Graf, R.J., Hansen, R.O., Ogawa, K., Tsu, H., 1985. Curie point depths of the Island of Kyushu and surrounding areas, Japan. *GEOPHYSICS* 50, 481–494. <https://doi.org/10.1190/1.1441926>

Okubo, Y., Tsu, H., Ogawa, K., 1989. Estimation of Curie point temperature and geothermal structure of island arcs of Japan. *Tectonophysics* 159, 279–290. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90134-0](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90134-0)

Olsen, N., Primdahl, F., Tøffner-Clausen, L., Sabaka, T., Brauer, P., Merayo, J., Jørgensen, J., Nielsen, O., Primdahl, F., Léger, J.M., Risbo, T., 2003. Calibration of the Ørsted vector magnetometer. *Earth, Planets Sp.* 55, 11–18. <https://doi.org/10.1186/BF03352458>

Owen, S., Segall, P., Freymueller, J., Mikijus, A., Denlinger, R., Árnadóttir, T., Sako, M., Bürgmann, R., 1995. Rapid Deformation of the South Flank of Kilauea Volcano, Hawaii. *Science* (80-.). 267, 1328–1332. <https://doi.org/10.1126/science.267.5202.1328>

Pailot-Bonnetat, S., 2024. Thermodynamique des systèmes hydrothermaux. Université Clermont Auvergne.

Palacky, G.J., 1988. Resistivity characteristics of geologic targets, in: Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Soc. Expl. Geophys., Tulsa. pp. 53–130.

Peltier, A., Bachèlery, P., Staudacher, T., 2009. Magma transport and storage at Piton de La Fournaise (La Réunion) between 1972 and 2007: A review of geophysical and geochemical data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 184, 93–108.

Peltier, A., Got, J.L., Villeneuve, N., Boissier, P., Staudacher, T., Ferrazzini, V., Walpersdorf, A., 2015. Long-term mass transfer at Piton de la Fournaise volcano evidenced by strain distribution derived from GNSS network. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 1874–1889. <https://doi.org/10.1002/2014JB011738>

Philippon, M., Cornée, J.-J., Münch, P., Van Hinsbergen, D.J.J., BouDagher-Fadel, M., Gailler, L., Boschman, L.M., Quillevere, F., Montheil, L., Gay, A., Lebrun, J.F., Lallemand, S., Marivaux, L., Antoine, P.-O., 2020. Eocene intra-plate shortening responsible for the rise of a faunal pathway in the northeastern Caribbean realm. *PLoS One* 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241000>

Poland, M.P., Peltier, A., Bonforte, A., Puglisi, G., 2017. The spectrum of persistent volcanic flank instability: A review and proposed framework based on Kilauea, Piton de la Fournaise, and Etna. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 339, 63–80. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.004>

Pou Palomé, S., 1997. Structure et évolution de l'édifice volcanique du point chaud de la Réunion: Traitement

et interprétation des profils de sismique réflexion de la campagne REUSIS. Thèse d'Université, Univ. de Pau.

- R**afflin, V., Boudoire, G., Massaro, S., Stocchi, M., Costa, A., Grassa, F., Giuffrida, G., Gailler, L., Liuzzo, M., Planche, C., Banson, S., Harris, A., 2024. Modelling CO₂ dispersion in the air during potential limnic eruption at the lake Pavin (France). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 447, 108024. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108024>
- Revil, A., Finizola, A., Ricci, T., Delcher, E., Peltier, A., Barde-Cabusson, S., Avard, G., Bailly, T., Bennati, L., Byrdina, S., Colonge, J., Di Gangi, F., Douillet, G., Lupi, M., Letort, J., Tsang Hin Sun, E., 2011. Hydrogeology of Stromboli volcano, Aeolian Islands (Italy) from the interpretation of resistivity tomograms, self-potential, soil temperature and soil CO₂ concentration measurements. *Geophys. J. Int.* 186, 1078–1094. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05112.x>
- Revil, A., Qi, Y., Panwar, N., Gresse, M., Grandis, H., Sharma, R., Géraud, Y., Chibati, N., Ghorbani, A., 2022. Induced polarization images alteration in stratovolcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 429. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107598>
- Reynolds, J.M., 2011. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley Sons.
- Ribe, N.M., Christensen, U.R., 1999. The dynamical origin of Hawaiian volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.* 171, 517–531. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00179-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00179-X)
- Richards Mark A., G., W., R., 1988. Deflection of plumes by mantle shear flow: experimental results and a simple theory. *Geophys. J.* 94, 367–376.
- Rosas-Carbajal, M., Komorowski, J.C., Nicollin, F., Gibert, D., 2016. Volcano electrical tomography unveils edifice collapse hazard linked to hydrothermal system structure and dynamics. *Sci. Rep.* 6. <https://doi.org/10.1038/srep29899>
- S**chott, J.-J., Erwan, T., 2010. Modelling the Earth's Magnetic Field from Global to Regional Scales. pp. 229–264. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9858-0_9
- Sharp, W.D., Clague, D.A., 2006. 50-Ma Initiation of Hawaiian-Emperor Bend Records Major Change in Pacific Plate Motion. *Science* (80-). 313, 1281–1284.
- Shuey, R.T., Shellinger, D.K., Tripp, A.C., Alley, L.B., 1977. Curie depth determination from aeromagnetic spectra. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 50, 75–101.
- Smekens, J.F., Gouhier, M., 2018. Observation of SO₂ degassing at Stromboli volcano using a hyperspectral thermal infrared imager. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 356, 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.02.018>
- Soueid Ahmed, A., Revil, A., Byrdina, S., Coperey, A., Gailler, L., Grobbe, N., Viveiros, F., Silva, C., Jougnot, D., Ghorbani, A., Hogg, C., Kiyan, D., Rath, V., Heap, M.J., Grandis, H., Humaida, H., 2018. 3D electrical conductivity tomography of volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.017>
- Spector, A., Grant, F.S., 1970. Statistical model for interpreting aeromagnetic data. *Geophys.* 35, 293–302.
- Steinberger, B., Sutherland, R., O'Connell, R.J., 2004. Prediction of Emperor-Hawaii seamount locations from a revised model of global plate motion and mantle flow. *Nature* 430, 167–173. <https://doi.org/10.1038/nature02660>
- Swanson, D.A., Rose, T.R., Fiske, R.S., McGeehin, J.P., 2012. Keanakāko'i Tephra produced by 300 years of explosive eruptions following collapse of Kilauea Caldera in about 1500 CE. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 215–216, 8–25. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.11.009>
- Swanson, D.A., Rose, T.R., Mucek, A.E., Garcia, M.O., Fiske, R.S., Mastin, L.G., 2014. Cycles of explosive and

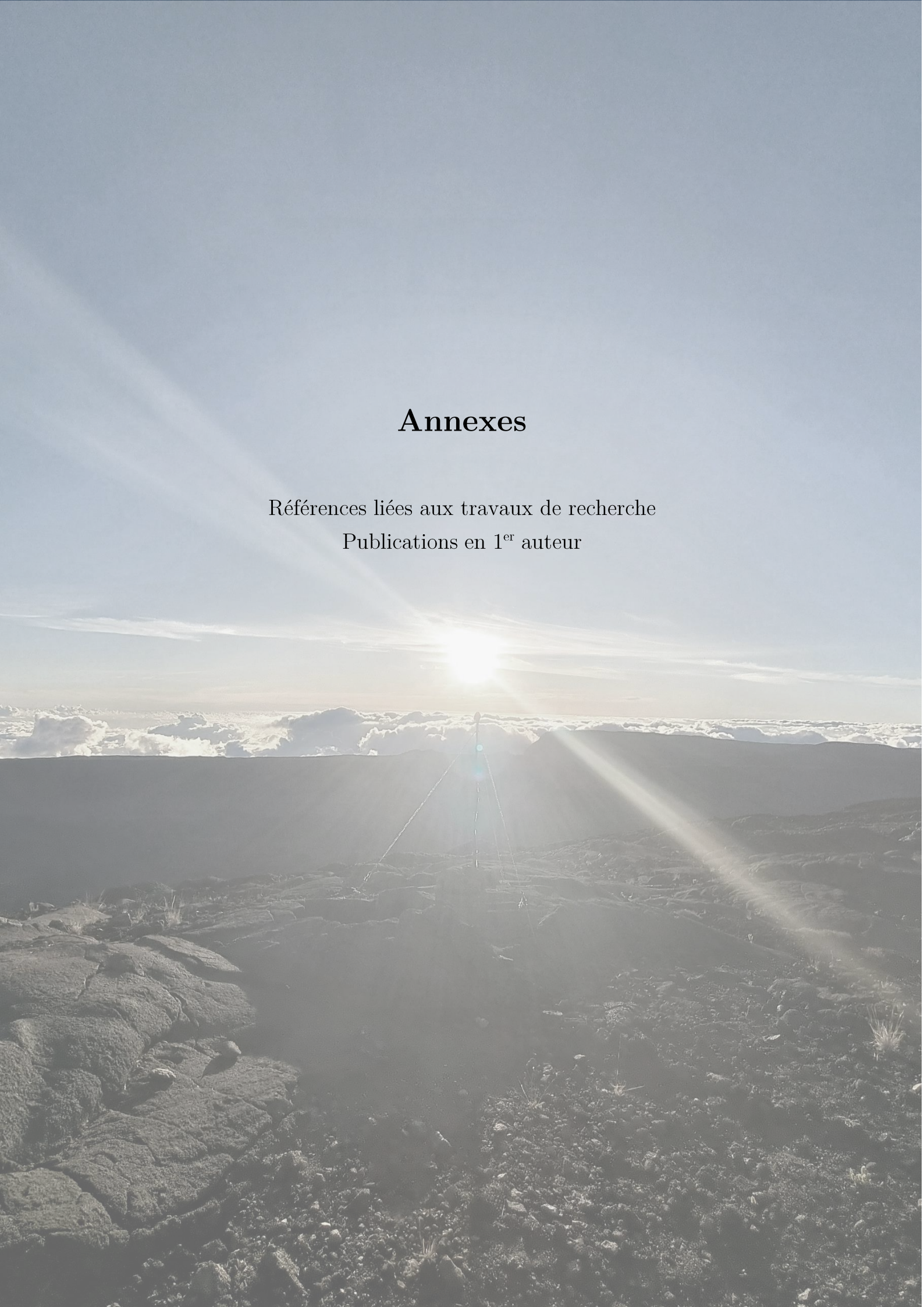
effusive eruptions at Kīlauea Volcano, Hawai'i. *Geology* 24, 631–634. <https://doi.org/10.1130/G35701.1> (IP-055751)

- T**ait, S., Jaupart, C., Vergnolle, S., 1989. Pressure, gas content and eruption periodicity of a shallow, crystallising magma chamber. *Earth Planet. Sci. Lett.* 92, 107–123. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90025-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90025-3)
- Tarduno, J., Bunge, H.P., Sleep, N., Hansen, U., 2009. The bent Hawaiian–Emperor hotspot track: inheriting the mantle wind. *Science* (80-.). 324, 50–53.
- Tarduno, J. a., Cottrell, R.D., 1997. Paleomagnetic evidence for motion of the Hawaiian hotspot during formation of the Emperor seamounts. *Earth Planet. Sci. Lett.* 153, 171–180. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00169-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00169-6)
- Tarduno, J.A. et al., 2003. The Emperor Seamounts: A record of southward motion of the Hawaiian hotspot plume in Earth's mantle. *Science* (80-.). 301, 1064–1069.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A., 1976. *Applied Geophysics*, in: *Geological Magazine*. Cambridge University Press, London, Cambridge.
- Thebault, E., Gailler, L.-S., 2023. A Quick-Look Software for In Situ Magnetic Field Modeling from Onboard Unmanned Aircraft Vehicles (UAVs) Measurements. *Remote Sens.* 15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15184549>
- Thébault, E., Vervelidou, F., 2023. A statistical spatial power spectrum of the Earth ' s lithospheric magnetic field To cite this version: HAL Id: hal-03655955 A statistical spatial power spectrum of the Earth ' s lithospheric magnetic ... eld.
- Torsvik, T.H., Doubrovine, P. V., Steinberger, B., Gaina, C., Spakman, W., Domeier, M., 2017. Pacific plate motion change caused the Hawaiian-Emperor Bend. *Nat. Commun.* 8, 1–12. <https://doi.org/10.1038/ncomms15660>
- Tridon, M., Cayol, V., Froger, J.L., Augier, A., Bachèlery, P., 2016. Inversion of coeval shear and normal stress of Piton de la Fournaise flank displacement. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121, 7846–7866. <https://doi.org/10.1002/2016JB013330>
- Tridon, Marine, Cayol, V., Froger, J.L., Augier, A., Bachèlery, P., 2016. Inversion of coeval shear and normal stress of Piton de la Fournaise flank displacement. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121, 7846–7866. <https://doi.org/10.1002/2016JB013330>
- Tsokas, G., Hansen, R.O., Fyticas, M., 1998. Curie Point Depth of the Island of Crete (Greece). *Pure appl. Geophys.* 152, 747–757.
- Turcotte, D.L., Schubert, G., 2014. *Geodynamics* 3rd edition.
- U**rai, M., Geshi, N., Staudacher, T., 2007. Size and volume evaluation of the caldera collapse on Piton de la Fournaise volcano during the April 2007 eruption using ASTER stereo imagery. *Geophys. Res. Lett.* 34, L22318. <https://doi.org/doi:10.1029/2007GL031551>
- V**an Wyk de Vries, B., Cecchi, E., Robineau, B., Merle, O., Bachèlery, P., 2001. Factors Governing the Volcano-Tectonic Evolution of La Reunion Island: a Morphological, Structural and Laboratory Modelling Approach, in: *EUG XI*, 8-12th April 2001. Strasbourg.
- van Wyk de Vries, B., Francis, P.W., 1997. Catastrophic collapse at stratovolcanoes induced by gradual volcano spreading. *Nature* 387, 387–390.
- Verhoeven, O., Thébault, E., Saturnino, D., Houliez, A., Langlais, B., 2021. Electrical conductivity and temperature of the Earth's mantle inferred from Bayesian inversion of Swarm vector magnetic data. *Phys. Earth Planet. Inter.* 314. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2021.106702>

- Vervelidou, F., Thébault, E., 2015. Global maps of the magnetic thickness and magnetization of the Earth's lithosphere.
- Vidal, V. and Bonneville, A., 2004. Variations of the Hawaiian hot spot activity revealed by variations in the magma production rate. *J. Geophys. Res.* 109, B03104. <https://doi.org/10.1029/2003JB002559>
- Villasante-Marcos, V., Finizola, A., Abella, R., Barde-Cabusson, S., Blanco, M.J., Brenes, B., Cabrera, V., Casas, B., De Agustín, P., Di Gangi, F., Domínguez, I., García, O., Gomis, A., Guzmán, J., Iribarren, I., Levieux, G., López, C., Luengo-Oroz, N., Martín, I., Moreno, M., Meletlidis, S., Morin, J., Moure, D., Pereda, J., Ricci, T., Romero, E., Schütze, C., Suski-Ricci, B., Torres, P., Trigo, P., 2014. Hydrothermal system of Central Tenerife Volcanic Complex, Canary Islands (Spain), inferred from self-potential measurements. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 272, 59–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.12.007>
- Villeneuve, N., Bachèlery, P., 2006. Review of volcanic eruption typology at the Piton de la Fournaise, processes and hazards. *Cybergeo Eur. J. Geogr.* <https://doi.org/https://doi.org/10.4000/cybergeo.2536>
- W**asilewski, P. and Mayhew, M.A., 1992. The Moho as a magnetic boundary revisited. *Geophys. Res. Lett.* 19, 2259–2262.
- Wasilewski, P., Thomas, H.H., Mayhew, M.A., 1979. The Moho as a magnetic boundary. *Geophys. Res. Lett.* 6, 541–544.
- Wawrzyniak, P., Zlotnicki, J., Sailhac, P., Marquis, G., 2017. Resistivity variations related to the large March 9, 1998 eruption at La Fournaise volcano inferred by continuous MT monitoring. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 347, 185–206. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.09.011>
- Westercamp, D., 1979. Diversité, contrôle structural et origines du volcanisme récent dans l'arc insulaire des Petites Antilles. *Bull. Bur. Rech. Géol. Min. Fr.* IV, 211–226.
- Williams-Jones, G., Rymer, H., 2002. Detecting volcanic eruption precursors: A new method using gravity and deformation measurements. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 113, 379–389. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00272-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00272-4)
- Wright, P.M., Ward, S.H., Ross, H.P., West, R.C., 1985. State-of-the-art geophysical exploration for geothermal resources. *Geophysics* 50, 2666–2696.
- Z**lotnicki, J., Delmond, J.C., Pambrun, C., Delorme, H., 1993. Magnetic variations on Piton de la Fournaise volcano . Volcanomagnetic signals associated with the November 6 and 30 , 1987 , eruptions 56.
- Zlotnicki, J., Le Mouél, J.L., 1990. Possible electrokinetic origin of large magnetic variations at La Fournaise volcano. *Nature* 343, 633–636. <https://doi.org/10.1038/343633a0>

Annexes

Références liées aux travaux de recherche
Publications en 1^{er} auteur



Références liées à l'ensemble des travaux de recherche

Par ordre chronologique et liens HAL associés

Gailler L.S., Lénat J.-F., Lambert M., Levieux G., Villeneuve N., Froger J.-L., (2009) Gravity structure of Piton de la Fournaise volcano and inferred mass transfer during the 2007 crisis, *JVGR*, 184, 31-44, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.024>.

HAL
ARCHIVES-ouvertes.fr

Gailler L.S., Lénat J.-F., (2010) - 3D structure of the submarine flanks of La Réunion inferred from geophysical data, *JGR*, 115, B12, B12105, <https://doi.org/10.1029/2009JB007193>.

HAL
ARCHIVES-ouvertes.fr

Delcamp A. Van wyk de Vries B., James M. R., **Gailler L.**, Lebas L., (2011) - Relationship between volcano gravitational spreading and magma intrusion, *Bull. Volc.*, 74, 743-765, <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0558-9>.

HAL
ARCHIVES-ouvertes.fr

Gailler L.S., Lénat J.-F., (2012) - Internal architecture of La Réunion (Indian Ocean) inferred from geophysical data, *JVGR*, 221-222, 83-98, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.01.015>.

HAL
ARCHIVES-ouvertes.fr

Le Pennec, de Saulieu G., Samaniego P., Jaya D., **Gailler L.S.**, (2013) – A devastating plinian eruption at Tungurahua Volcano reveals formative occupation at CA 1100 CAL BC in Central Ecuador, *Radiocarbon* 55, 2-3, https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16225.

HAL
ARCHIVES-ouvertes.fr

Münch, P., J.-F. Lebrun, J.-J. Cornée, I. Thion, P. Guennoc, B. Marcaillou, J. Begot, G. Bertrand, S. S. d. Berc, K. Biscarrat, C. Claud, L. D. Min, N. Feuillet, F. Fournier, **L. Gailler**, D. Graindorge, F. Leclerc, J.-L. Léticée, L. Marie, Y. Mazabraud, M. Melinte-Dobrinescu, P. Moissette, F. Quillevere, C. Verati, Randrianasolo A., (2013) - Pliocene-Pleistocene carbonate systems of the Guadeloupe archipelago, French Lesser Antilles: a land and sea study (the Kashallow project), *BSGF*, 184, 99-110, <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.184.1-2.99>.

HAL
ARCHIVES-ouvertes.fr

Gailler L.S., Martelet G., Thion I., Bouchot V., Lebrun J.-F., Munch P., (2013) - Crustal structure of Guadeloupe Islands and the Lesser Antilles Arc from a new gravity and magnetic synthesis, *BSGF*, 184, 77-97, <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.184.1-2.77>.

HAL
ARCHIVES-ouvertes.fr

Gailler L.S., Bouchot V., Martelet G., Thion I., Coppo N., Baltassat J.M., Bourgeois B., (2014) - Contribution of multi-method geophysics to the understanding of a high-temperature geothermal province: the Bouillante area (Guadeloupe, Lesser Antilles), *JVGR*, 275, 34-50; <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.02.002>.

HAL
ARCHIVES-ouvertes.fr

Brothelande E., Lénat J.-F., Finizola A., **Gailler, L.**, Chaput M., Dumont S., Peltier A., Bachèlery P., Barde-Cabusson S., Byrdina S., Menny P., Colonge J., Douillet G., Letort J., Merle O., Nakedau D., Garaebiti E., (2014) – Structure and dynamics of the Yenkahe resurgent dome-Yasur volcano system, Siwi caldera, Tanna Island, Vanuatu; Part I: Internal structure inferred from combined geophysical methods, *JVGR*, Special issue on SI: Vanuatu volcanoes, 322, 241-262, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.08.021>.

HAL
ARCHIVES-ouvertes.fr

Ambrosino F., Anastasio A., Bross A., Béné S., Boivin P., Bonechi L., Cârloganu C., Ciaranfi R., Cimmino G., Combaret, C., D'Alessandro R., Durand S., Fehr F., Français V., Garufi F., **Gailler L.**, Labazuy P., Laktineh I., Lénat J.F., Masone V., Miallier D., Mirabito L., Morel L., Mori N., Niess V., Noli P., Pla-Dalmau A., Portal A., Rubinov P., Saracino G., Scarlini E., Strolin P., Vulpescu B., (2015) - Joint measurement of the atmospheric muon flux through the Puy de Dôme volcano with plastic scintillators and Resistive Plate Chambers detectors, *JGR Solid Earth*, 120, 7290–7307, <https://doi.org/10.1002/2015JB011969>.

HAL
RECHERCHES SCIENTIFIQUES

Portal A., **Gailler L.S.**, Lénat J.F., Labazuy P., (2015) – Internal structure of a complex dome related volcanic system inferred from geophysical imaging Part I: Contribution from gravimetry and magnetism methods, *JVGR*, 320, 88-99, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.012>.

HAL
RECHERCHES SCIENTIFIQUES

Gailler L.S., Lénat J.F., Blakely R., (2016) – Depth to Curie temperature or magnetic sources bottom in the volcanic zone of La Réunion hot spot. *JVGR*, 324, 169-178, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.005>.

HAL
RECHERCHES SCIENTIFIQUES

Gailler L.S., Arcay D., Münch P., Martelet G., Thion I., Lebrun (2017) – Forearc structure in the lesser Antilles inferred from depth to Curie temperature and thermo-mechanical simulations. *Tectonophysics*, 706-707, 71-90, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.03.014>.

HAL
RECHERCHES SCIENTIFIQUES

Gailler L.S., Kauahikaua J., (2017) – Monitoring the freezing of the 1959 Kilauea Iki lava lake using surface magnetic measurements. *Bull. Volc.* 79, 40, <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1119-7>.

HAL
RECHERCHES SCIENTIFIQUES

Miallier D., Pilleyre T., Boivin P., Labazuy P., **Gailler L.**, Ricco J. (2017) – The Grand Sarcoui lava dome (Chaîne des Puys, Massif Central, France), a case study for complex monogenetic volcanism. *JVGR*, 345, 125-141, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.07.015>.

HAL
RECHERCHES SCIENTIFIQUES

Gailler L.S., Kauahikaua J. (2018) – The Gravity signature of basaltic fill in Kilauea caldera, Island of Hawai'i. *GSA Books*, 538, 297-306, [https://doi.org/10.1130/2018.2538\(13\)](https://doi.org/10.1130/2018.2538(13)).

Soueid A., Revil A., Bouligand C., Byrdina S., Coperey A., Rocques S., Hurwitz S., **Gailler L.**, Grobde N., Viveiros F., Silva C., Jougnot D., Ghorbani A., Hogg C., Kiyani D., Rath V., Heap M. J., Grandis H., Humaida H. (2018) - 3D electrical conductivity tomography of volcanoes. *JVGR*, 356, 243-263, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.017>.

Revil A., Ghorbani A., **Gailler L.S.**, Gresse M., Panwar N., Sharma R., Cluzel N., (2018) - Electrical conductivity and induced polarization investigations at Kilauea volcano, Hawai'i. *JVGR*, 368, 31-50, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.10.014>.

HAL
RECHERCHES SCIENTIFIQUES

Gailler L.S., Marti A., Lénat J.F. (2018) – High resolution 3D modeling of the resistivity data of Plaine des Sables, Piton de la Fournaise (Réunion Island). *JVGR*, 356, 200–210, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.006>.

HAL
RECHERCHES SCIENTIFIQUES

Gailler L., Kauahikaua J., Lénat J.F., Revil A., Gresse M., Ahmed A.S., Cluzel N., Manthilake G., Gurioli L., Johnson T., Finizola A., Delcher E. (2019). 3D electrical conductivity imaging of Halema'uma'u lava lake (Kilauea

volcano). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* vol.381, p.185-192, - DOI:10.1016/j.volgeores.2019.06.001.

HAL

Philippon M., Cornée J.-J., Münch P., van Hinsbergen D.J.J., BouDagher-Fadel M., **Gailler L.**, et al. (2020) Eocene intra-plate shortening responsible for the rise of a faunal pathway in the northeastern Caribbean realm. *PLoS ONE* 15(10): e0241000. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241000>

HAL

Antoine R., Fauchard C., **Gailler L.**, Labazuy P., Lissak C., Lopez T., Tanguy M. (2020). Geoscientists in the sky: Unmanned Aerial Vehicles for geohazards response, *Surveys in Geophysics*. Doi : 10.1007/s10712-020-09611-7

7

HAL

Barnoud A., Cayol V., Lelièvre P.G., Portal A., Labazuy P., Boivin P., **Gailler L.** (2021). Robust Bayesian Joint Inversion of Gravimetric and Muographic Data for the Density Imaging of the Puy de Dôme Volcano (France). *Frontiers in Earth Science* vol.8, p.575842, - DOI:10.3389/feart.2020.575842.

Publications\Barnoud et al., 2021 - Frontiers.pdf

HAL

Gailler L., Labazuy P., Régis E., Bontemps M., Souriot T., Bacques G., Carton B. (2021). Validation of a New UAV Magnetic Prospecting Tool for Volcano Monitoring and Geohazard Assessment. *Remote Sensing* vol.13, p.894, - DOI:10.3390/rs13050894.

HAL

Gerbault M., Fontaine F.J., Peltier A., Got J.L., Hassani R., Ferrazzini V., **Gailler L.**, Duputel Z. (2022). What causes the persistent seismicity below the eastern flank of Piton de la Fournaise (Réunion Island)? Elasto-plastic models of magma inflation. *JVGR*, 431. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107628>.

HAL

Gailler L., Labazuy P., Régis E., Peltier A., Ferrazzini V., (2022) Active structures and thermal state of the Piton de la Fournaise summit area revealed by combined UAV magnetic and IR measurement, *Volcanica*, <https://doi.org/10.30909/vol.05.01.6174>.

HAL

Gailler L., Labazuy P., Régis E., Dumont Q., Froger J.L., Peltier A., Finizola A., Cayol V., Chaput M. and the ERT SlideVolc Team (2023), Volcano-magnetic signals reveal rapid evolution of the inner structure of Piton de la Fournaise. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 128, e2022JB025290. <https://doi.org/10.1029/2022JB025290>.

HAL

Sampietro D., Capponi M., Thébault E., **Gailler L.** (2023). An Empirical Method for the Optimal Setting of the Potential Fields Inverse Problem. *Geophysical Prospecting*. 71 (2). <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13305>.

HAL

Sampietro D., Capponi M., Thébault E., **Gailler L.** (2023). An enhanced view on the Mediterranean Sea crust from potential fields data. *Scientific Reports*, 2023, 13, pp.8298. (10.1038/s41598-023-35282-6). (insu-04197040)

HAL

Thébault, E.; **Gailler, L.-S.** (2023). A Quick-Look Software for In Situ Magnetic Field Modeling from Onboard Unmanned Aircraft Vehicles (UAVs) Measurements. *Remote Sens.* 2023, 15, 4549. <https://doi.org/10.3390/rs15184549>



Raffin V., Boudoire G., Massaro S., Stocchi M., Costa A., Grassa F., Giuffrida G., **Gailler L.**, Liuzzo M., Planche C., Banson S., Harris A. (2024). Modelling CO₂ dispersion in the air during potential limnic eruption at the lake Pavin (France). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2024, 447, pp.108024. [ff10.1016/j.jvolgeores.2024.108024](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108024). [ffhal04466178f](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04466178).



Gailler L., Bouligand C., Kauahikaua J., Lénat J.-F., Cluzel N. (2024). The Subsurface Structure of the Kīlauea Caldera Before Its 2018 Collapse Inferred From Ground Magnetic, SP, and Temperatures Anomalies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129, e2023JB028005. <https://doi.org/10.1029/2023JB028005>.