



HAL
open science

Structures actives et état thermique du Piton de la Fournaise révélés par mesures magnétiques et IR aéroportées

Lydie Gailler, Philippe Labazuy, Edouard Régis, Aline Peltier, Valérie
Ferrazini

► To cite this version:

Lydie Gailler, Philippe Labazuy, Edouard Régis, Aline Peltier, Valérie Ferrazini. Structures actives et état thermique du Piton de la Fournaise révélés par mesures magnétiques et IR aéroportées. Journées Drones & Capteurs embarqués 2021, Drones & Cap', Sep 2021, Saint-Pierre-d'Oléron, France. hal-03630733

HAL Id: hal-03630733

<https://hal.science/hal-03630733>

Submitted on 5 Apr 2022

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.

Structures actives et état thermique du Piton de la Fournaise révélés par mesures magnétiques et IR aéroportées



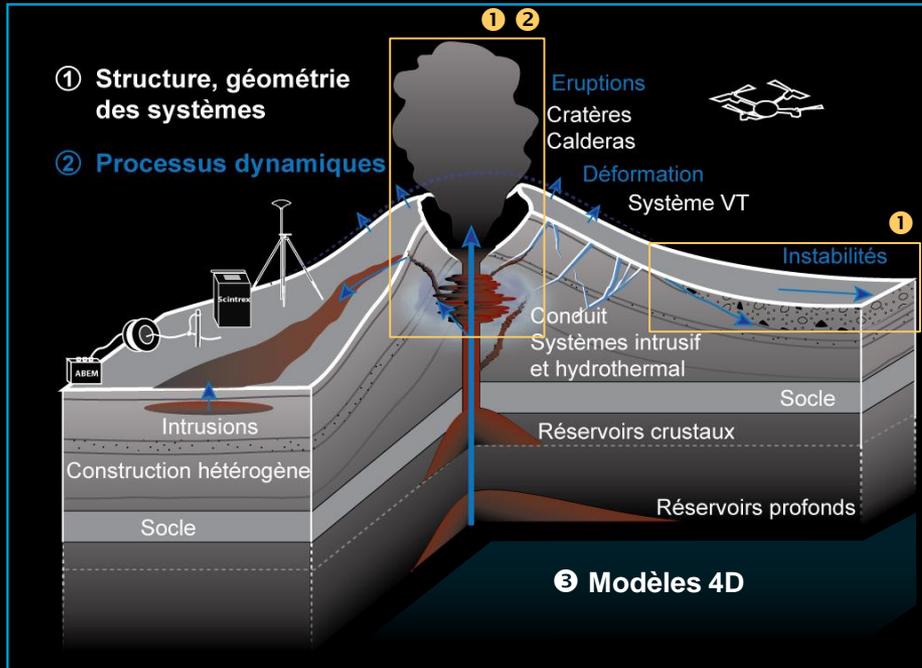
Manifestations de surface

Dynamique profonde

Hétérogénéités mécaniques

Lydie Gailler, Philippe Labazuy, Edouard Régis, Aline Peltier, Valérie Ferrazini

Imager les systèmes magmatiques: une nécessité et un challenge



① Imager les instabilités des systèmes volcaniques

⇒ Fracturation, plans de faiblesse

② Quantifier les processus physiques liés à l'activité volcanique

⇒ Zones de stockage, transferts, altération

③ Schéma 4D (fonctionnement-évolution)

⇒ 3D + composante temporelle par répétitions

⇒ Imagerie des anomalies thermiques, marqueurs de la dynamique volcanique et des processus -

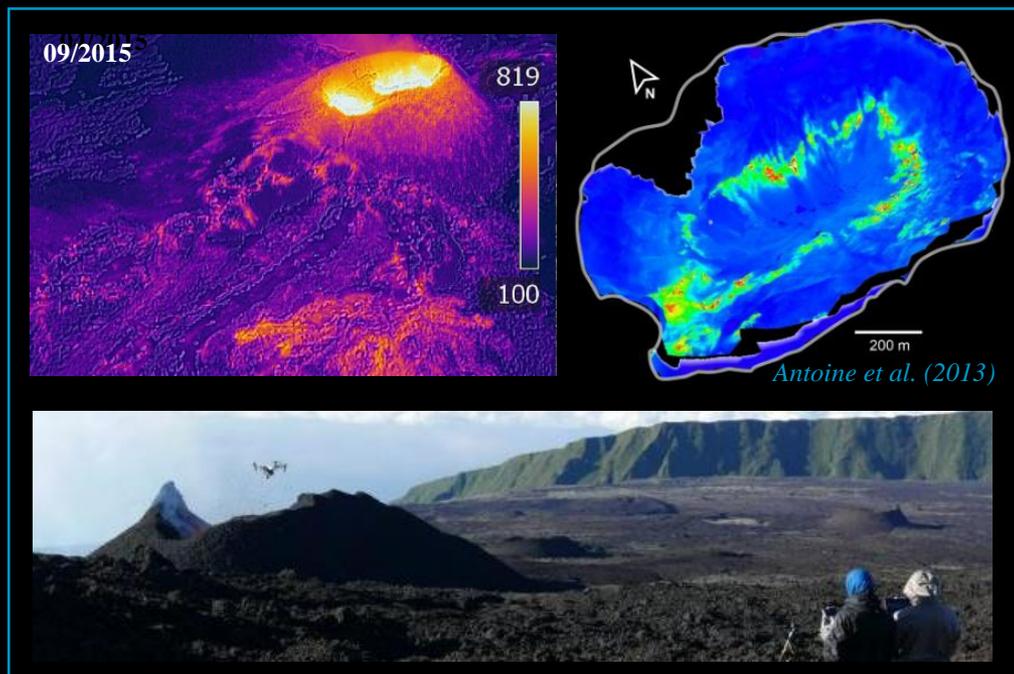
Dynamique volcanique et paramètres éruptifs

⇒ Détection des structures actives : imagerie & évolution

① IR thermique

- Flux de chaleur, anomalies thermiques -

⇒ Cartes T°C 3D en surface



Dynamique volcanique et paramètres éruptifs

⇒ Détection des structures actives : imagerie & évolution

① IR thermique

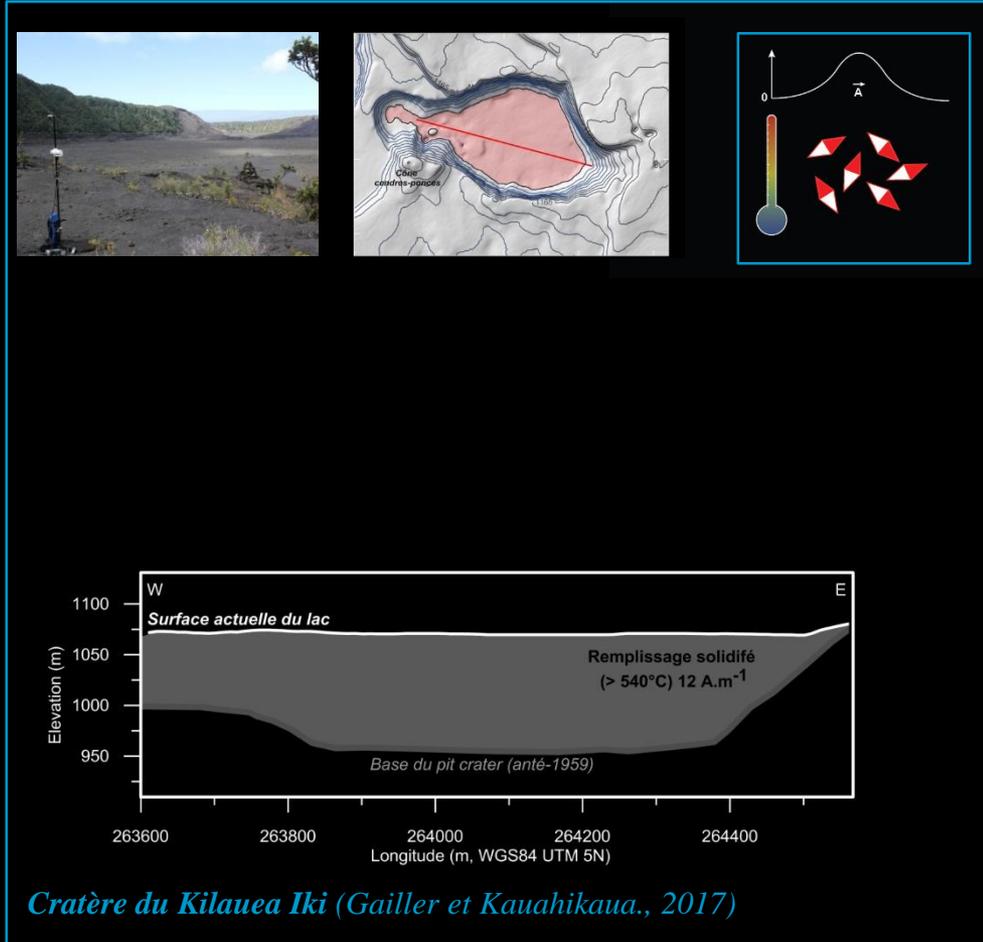
- Flux de chaleur, anomalies thermiques -

⇒ Cartes T°C 3D en surface

② Magnétisme

- Structures d'âges et de natures différentes -
- Influence de la T°C sur l'aimantation -

⇒ Aimantation nulle ou négative
> T°C Curie (~580 °C)



Dynamique volcanique et paramètres éruptifs

⇒ Détection des structures actives : imagerie & évolution

① IR thermique

- Flux de chaleur, anomalies thermiques -

⇒ Cartes T°C 3D en surface

② Magnétisme

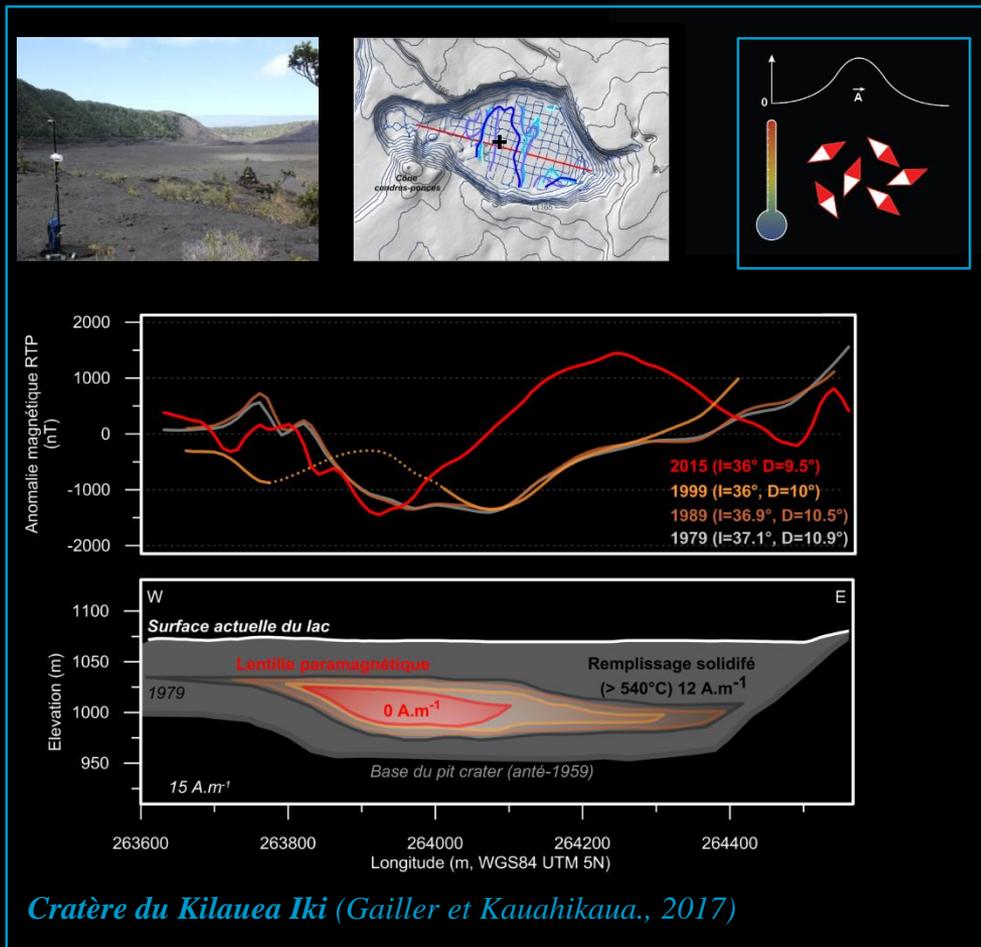
- Structures d'âges et de natures différentes -

- Influence de la T°C sur l'aimantation -

⇒ Anomalies en profondeur

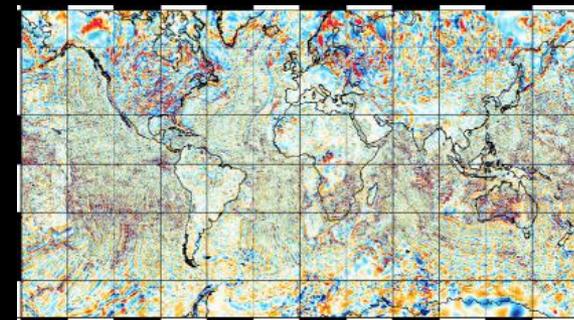
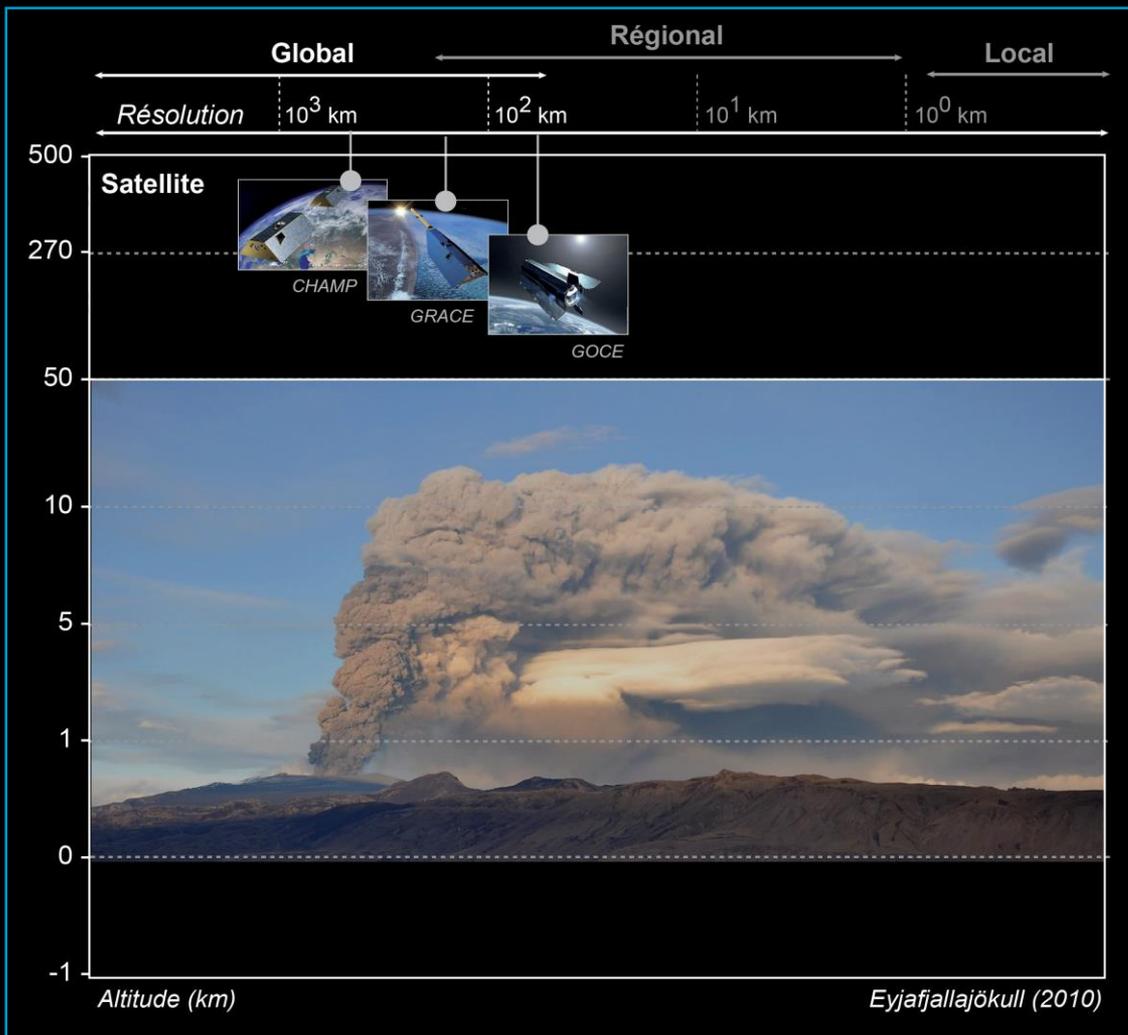
⇒ **Corrélation T°C versus A**

⇒ Mesures rapides pour l'imagerie des structures volcaniques



Capteurs géophysiques, drones et volcans

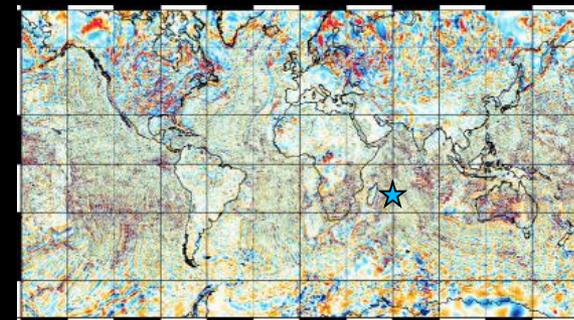
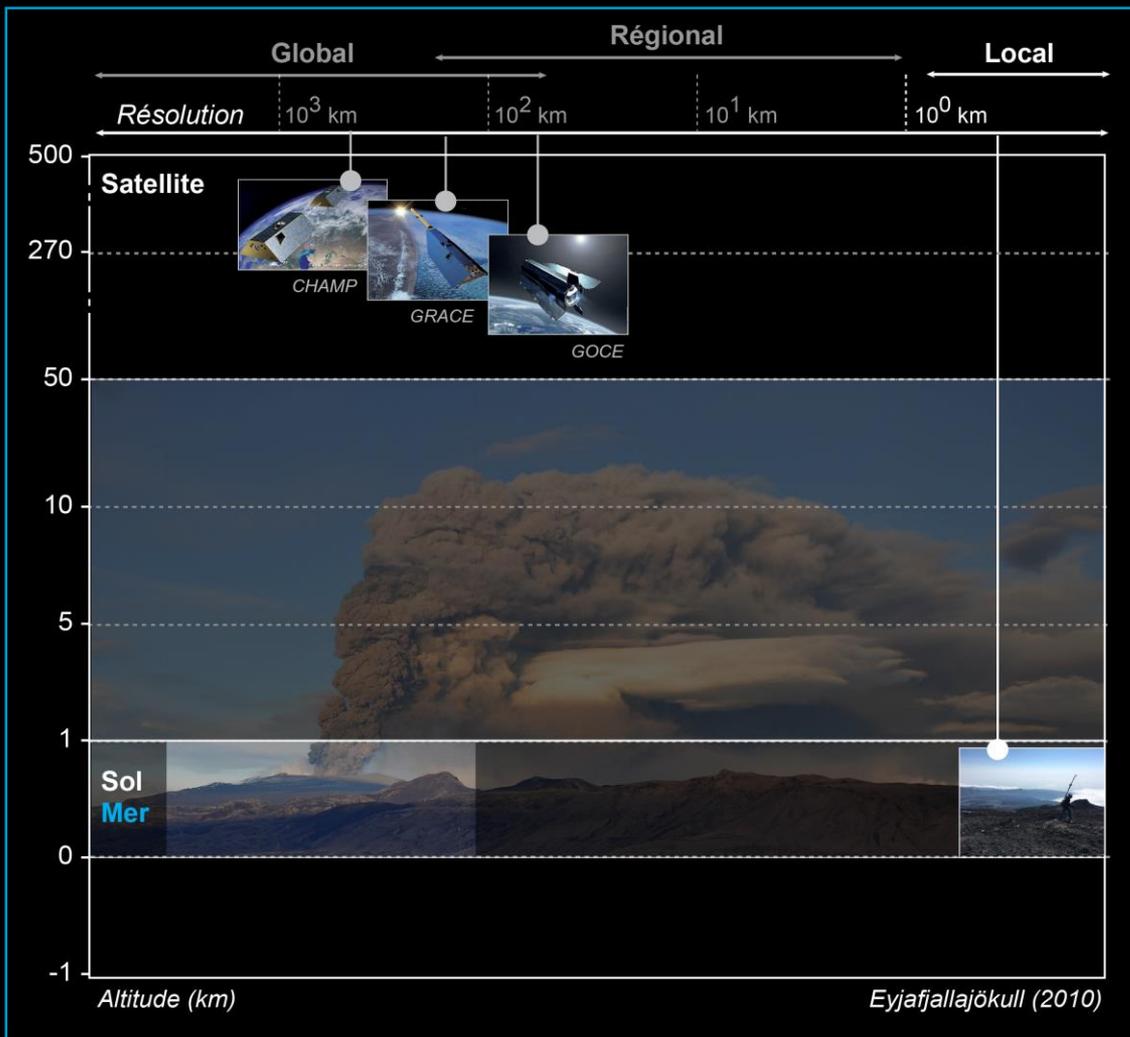
✓ Problématiques versus échelles spatio-temporelles de mesures



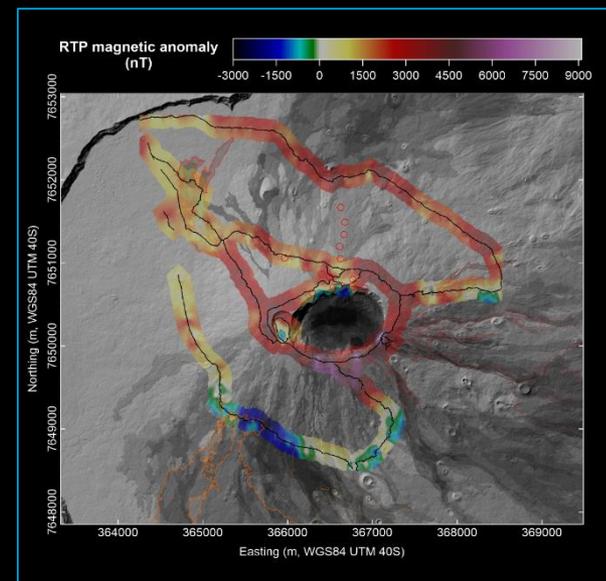
World Digital Anomaly Map (WDMAM)

Capteurs géophysiques, drones et volcans

✓ Problématiques versus échelles spatio-temporelles de mesures

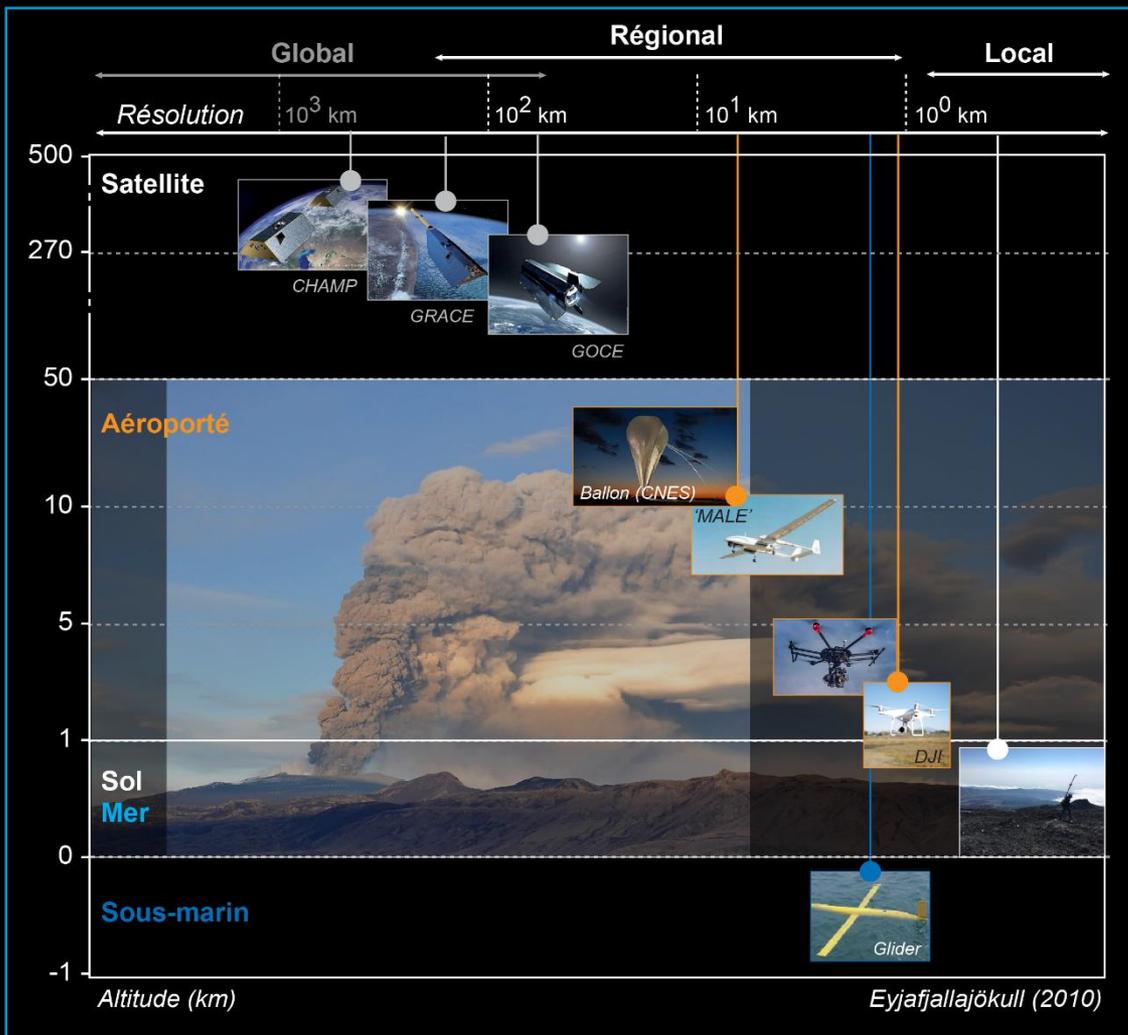


World Digital Anomaly Map (WDMAM)



Capteurs géophysiques, drones et volcans

✓ Problématiques versus échelles spatio-temporelles de mesures



⇒ Apport d'une composante aéroportée souple

- + Sécurisés
- + Rapides
- + Homogènes

Mesures magnétiques par drone:

- Paramètre aimantation -
- Température -

⇒ Haute résolution spatiale et temporelle

Capteurs géophysiques, drones et volcans

✓ Développement, implémentation et acquisitions géophysiques par drone

⇒ Sessions Posters



- Dans le cadre de ses missions d'observations et de ses activités de recherche, l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC) mène régulièrement des campagnes d'observations par drones petits ou moyens porteurs. À travers son Service de Développement Technologique (SDT), l'OPGC consacre un effort important à l'évaluation et/ou la fabrication et/ou l'intégration sur plateforme drone de nouveaux capteurs géophysiques complémentaires à ceux disponibles dans le commerce (caméras optique/IR).
- En particulier, deux actions R&D sont menées au SDT : (1) capteur multi-gaz embarqué, permettant l'échantillonnage au niveau des fumerolles volcaniques (analyses géochimiques), et de façon plus exploratoire, (2) RADAR range-doppler bande S (PIRadar - 2.4Ghz) couplé à une caméra (PI-Camera) pour des mesures de la cinématique des écoulements magmatiques à la source. Ces deux dispositifs sont conçus de façon à pouvoir être intégrés sur des supports légers (type DJI Mavic Pro 2) ou à encombrement limité (type DJI matrice 300) afin de favoriser leur déploiement sur des terrains souvent fortement accidentés et à accès limités.
- À travers ce poster, nous vous présentons ces deux dispositifs (capteurs multi-gaz et PIRadar) dans leur contexte de déploiement ainsi que les résultats de mesures préliminaires (test de faisabilité). Ces actions R&D sont encouragées et accompagnées depuis 2016 par le CNES via son programme TOSCA (projet VolcaDrone).

Capteur multi-gaz

L'analyse de la composition chimique des gaz volcaniques renseigne sur l'état physico-chimique du réservoir magmatique d'un volcan actif. L'évolution temporelle des concentrations des marqueurs chimiques peut indiquer un changement de régime de fonctionnement du volcan et permettre éventuellement l'anticipation d'une éruption imminente (Figure 1).

Cette analyse passe par l'échantillonnage des gaz émis par le volcan, idéalement au plus proche de la source, ce qui est favorisé par l'embarquement instrumental sur drone. Les marqueurs chimiques significatifs sont nombreux mais les principaux sont le SO₂, H₂S et le CO₂ ce sont ces éléments que cible le capteur Multi-gaz.

Figure 1: Chaîne de mesure du capteur Multi-gaz. (a) Prélèvement des gaz émis par le volcan. (b) Analyse des gaz émis par le capteur. (c) Transmission des données au sol.

Figure 2: Capteur Multi-gaz embarqué sur un drone.

Figure 3: Montage du capteur multi-gaz sur un drone DJI Mavic Pro 2.

Capteur PIRadar

Le capteur PIRadar est constitué d'un radar range-Doppler FMCW (2.4 GHz) associé à une caméra optique, le tout synchronisé à un récepteur GPS et d'une IMU. Le dispositif est compact, autonome et piloté à distance (Batterie comprise). PIRadar est conçu sur la base de technologies low cost (Carte Espressy Pi 3.4.8, impression 3D PLA) ce qui permet de le reproduire avec des coûts maîtrisés en cas de perte ou de casse en raison de son déploiement en milieux extrêmes (environ 2k euros / unité). Sa technologie permet enfin une grande évolutivité de ses caractéristiques et de ses fonctionnalités, permettant ainsi d'élargir son champ d'application (réseau de capteur, acquisition synchronisée, Système d'alerte, etc.).

Au terme de cette première phase de développement, ce capteur sera mis en œuvre sur des objets volcaniques actifs notamment en vue de caractériser les paramètres physiques des écoulements à plus proche de la source (débit des coulées de lave, vitesse et densité des panaches volcaniques) qui restent difficilement accessibles aujourd'hui.

Figure 4: (a) Photographie du capteur PIRadar. (b) Diagramme de l'architecture du capteur. (c) Montage du capteur sur drone. (d) Vue de nuit du capteur. (e) Montage du capteur sur drone.

Figure 5: Exemples de résultats de mesures du PIRadar. (a) Profil altimétrique et topographique du drone. (b) Altitude RTK. (c) Distance mesurée. (d) Coefficient de réflexion.



Mesures magnétiques par drone : Une nouvelle approche dédiée au suivi 4D des édifices volcaniques

Edouard Régis¹, Lydie Gailler¹, Philippe Labazuy¹, Martial Bontemps¹, Thierry Souriot¹, Guillaume Bacques², Bruno Carton³

¹ CNRS, IRD, OPGC, Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne, F-63000 Clermont-Ferrand, France
² CNRS, Observatoire de Physique du Globe de Clermont, Université Clermont Auvergne, F-63000 Clermont-Ferrand, France
³ R-GEOLIX, F-63400 Chamalières, France

Champ magnétique et Volcanologie

- Mise en place d'un camp magnétique terrestre (Lévesque et al., 2002)
- Influence de la température, l'altération, la fracturation (Fig. 1)
- Intérêt des mesures de l'altération par drone pour l'imagerie et le suivi :
 - Des anomalies thermiques : Systèmes magmatiques et hydrothermaux
 - Des hétérogénéités mécaniques : Zones de failles, instabilités

(Changé et al., 2014; Goffé et Lemer, 2012; Goffé et Kienast, 2017)

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

Tests et validation opérationnelle

Figure 6: Distribution de la sensibilité et de la validation de la mesure magnétique aéroportée (QTM).

- Résolution et sensibilité du capteur aéroporté QTM (Fig. 1)
- Quantification des effets électromagnétiques, électromécaniques (influence des mesures) et directionnels
- Vols manuels et autonomes à différentes altitudes, ainsi topographique.
- Comparaison avec des mesures sol simultanées (GEM19)

Application au site du piton Py de Dôme (Chaîne des Fy, France, Fig. 3)

Apport de mesures magnétiques aéroportées : Technologie

OSMIF GEM sys.

- Déploiement contraint par la topographie
- Déploiement efficace, levés homogènes
- Adapté aux problématiques en contexte volcanique : Détection des structures actives et profondes

OSMIF GEM sys. 2018

OSMIF GEM sys. 2019

OSMIF GEM sys. 2020

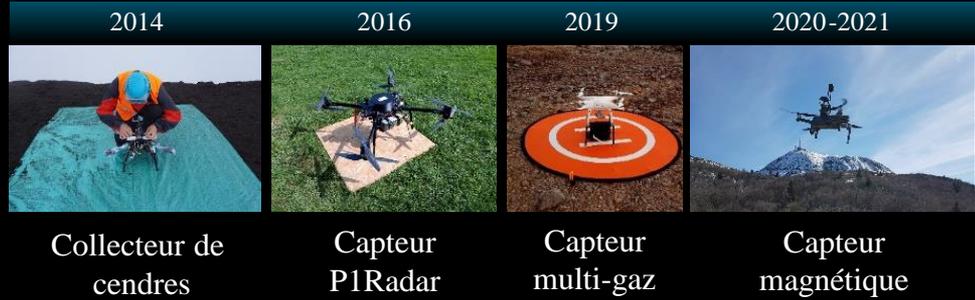
OSMIF GEM sys. 2021

Vers un suivi 4D des édifices volcaniques

- Multirésolution, rapides, levés sécurisés et homogènes (Fig. 1)
- Imagerie et suivi des anomalies liées aux signaux volcano-magnétiques transitoires
- Évaluation géo-temporelle, 4D de l'altération en lien avec l'activité volcanique
- Développements en cours : Configuration multi-capteurs (IR, Radar, multi-gaz)

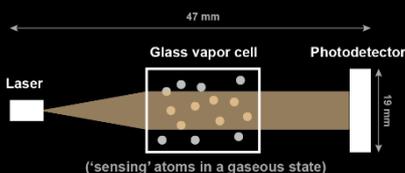
Figure 3: Analyse et validation de l'approche magnétique aéroportée au Piton de Dôme (Chaîne des Fy, France).

Figure 4: Localisation de la zone Piton de Dôme et de la chaîne des Fy. (a) Localisation de la zone Piton de Dôme et de la chaîne des Fy. (b) Localisation de la zone Piton de Dôme et de la chaîne des Fy.



Capteurs géophysiques, drones et volcans

✓ Développement, implémentation et acquisitions géophysiques par drone



Capteur magnétique champ total QuSpin QTFM

- ❶ Rb à pompage optique, faible bruit intrinsèque
- ❷ Excellente résolution temporelle
- ❸ < 200 g - Fréquence d'acquisition 20 Hz
12 x 20 min. de vol > 10 Ha/jour

Mavic Pro2 Dual

- ❶ Rapidité de mise en œuvre
- ❷ Suivi topographique
- ❸ Imagerie visible & thermique IR



⇒ Levés sécurisés, réitérations : adapté aux problématiques volcaniques

⇒ Un compromis entre autonomie, échelle de mesures et charge utile

Capteurs géophysiques, drones et volcans

✓ Développement, implémentation et acquisitions géophysiques par drone

⇒ Validation opérationnelle



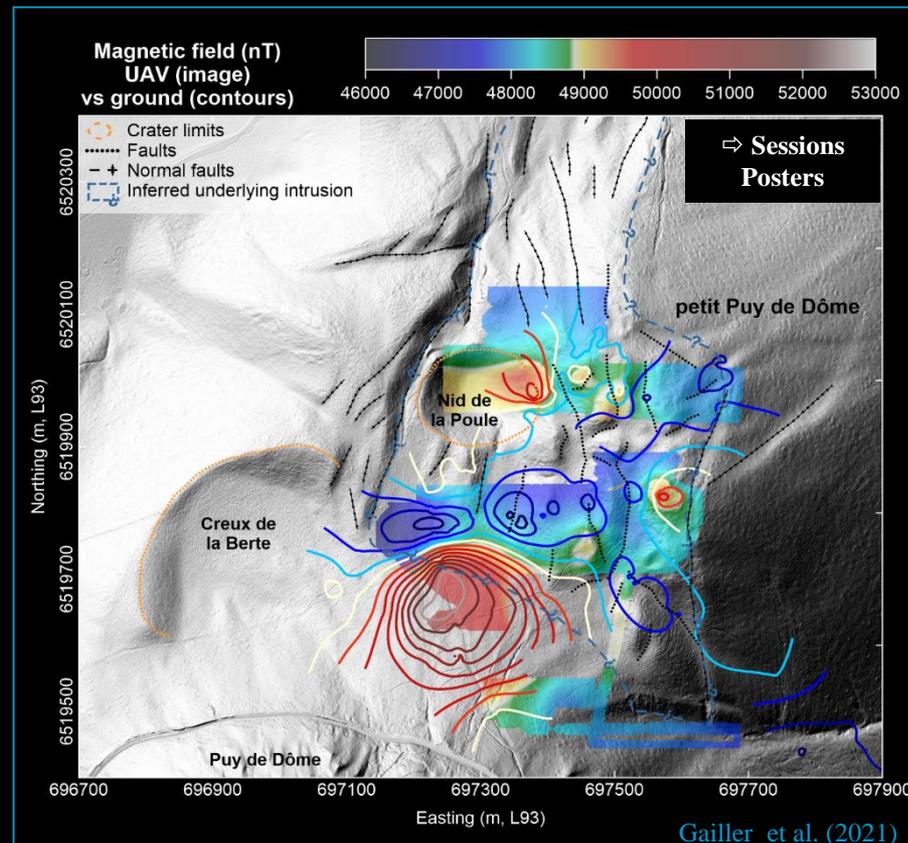
⇒ Problématiques :

① Techniques

- Effets électrocinétiques, directionnels
- Hauteur de vol
- Comparaison mesures sol

② Scientifiques

- Fortes anomalies magnétiques
- + Signature tectonique post-éruptive

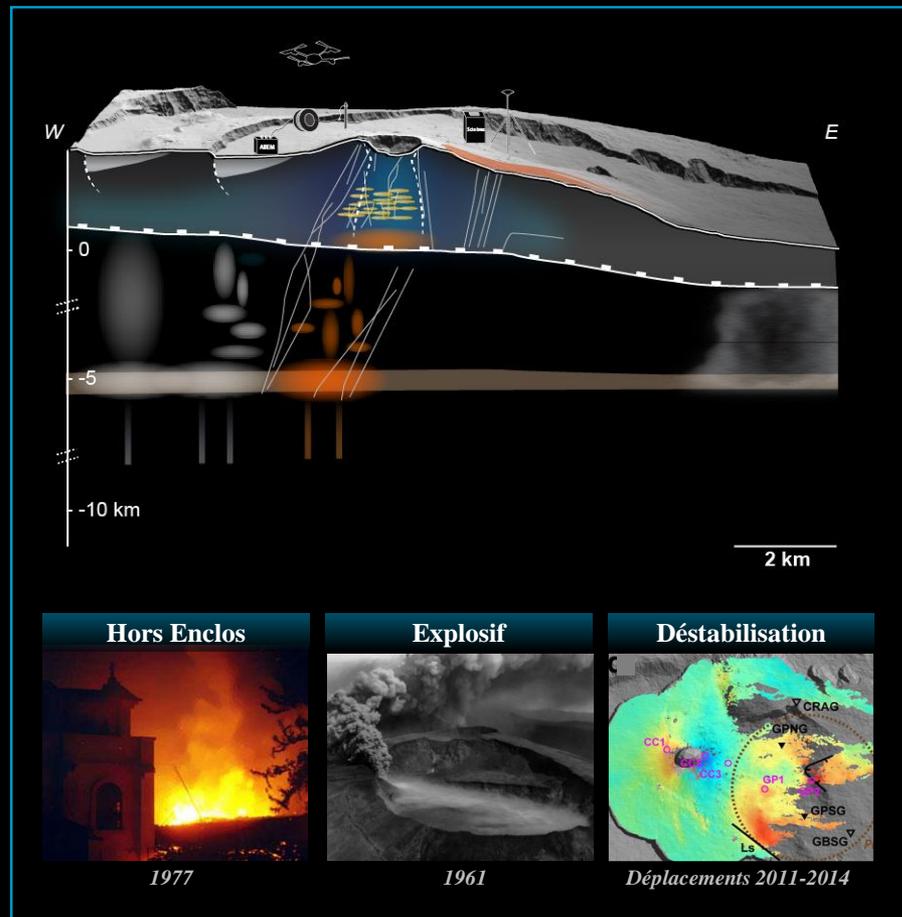
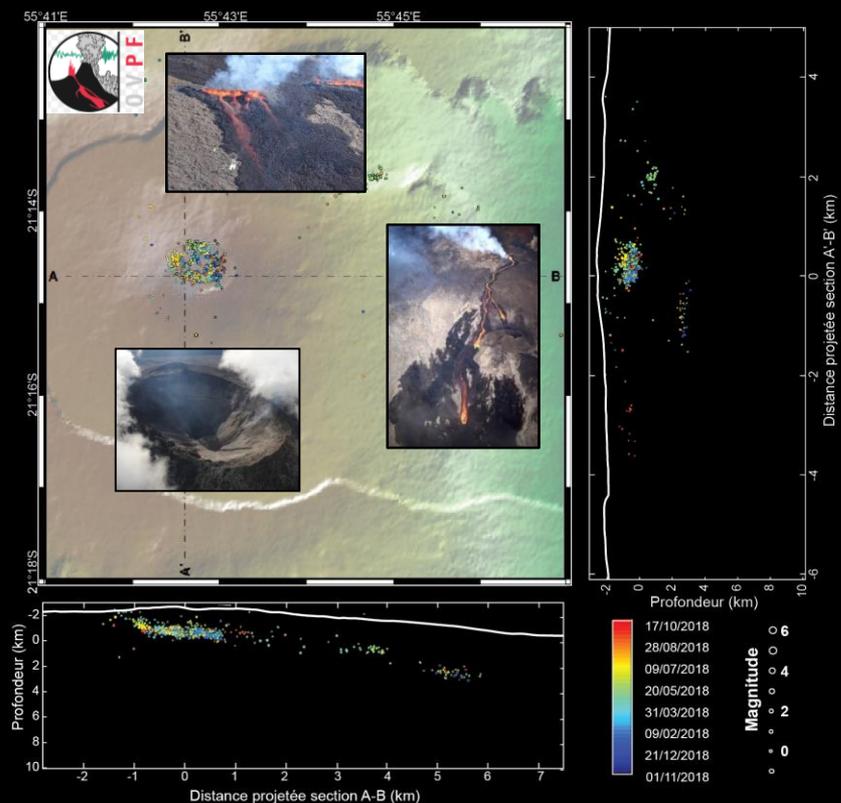


⇒ 1^{ère} campagne en contexte actif : Piton de la Fournaise

Application au Piton de la Fournaise

⇒ Une cible volcanique prioritaire

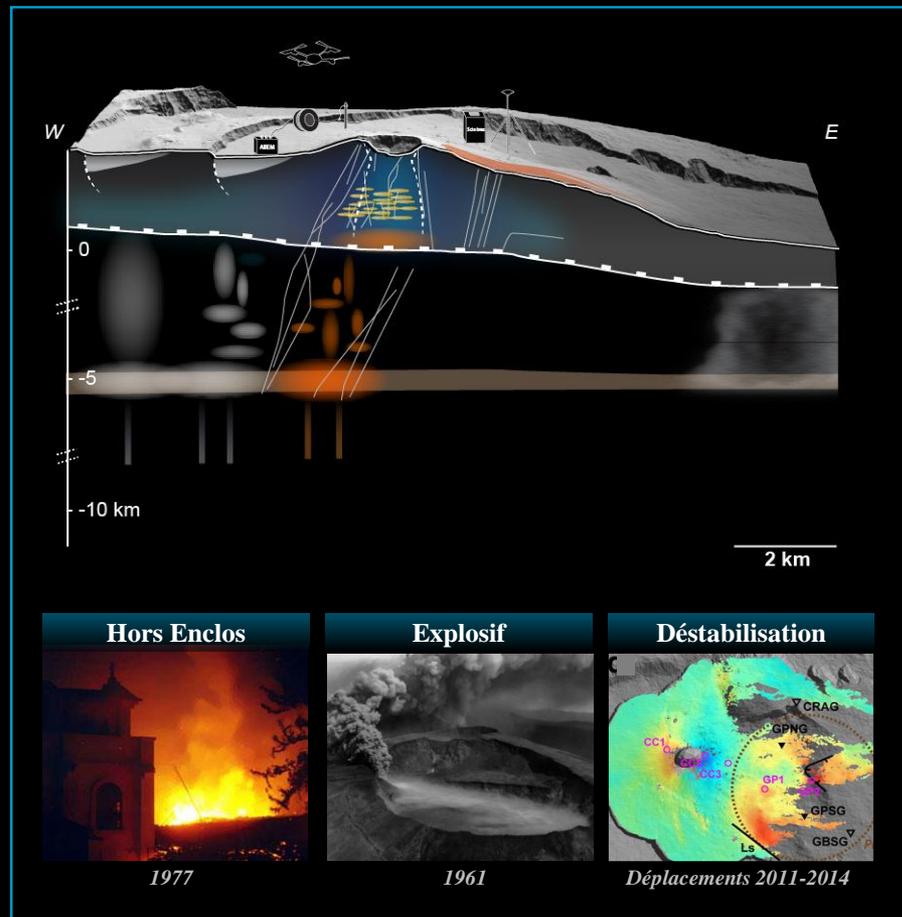
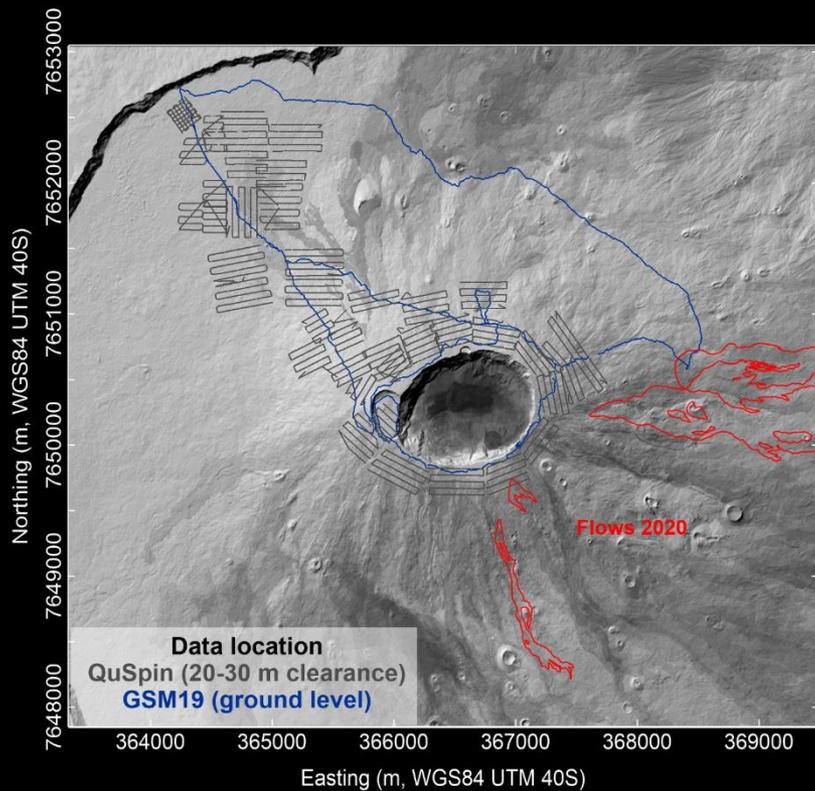
Piton de la Fournaise (Réunion)



Application au Piton de la Fournaise

⇒ **Campagne de magnéto-tellurique propriétaire** (novembre 2020)

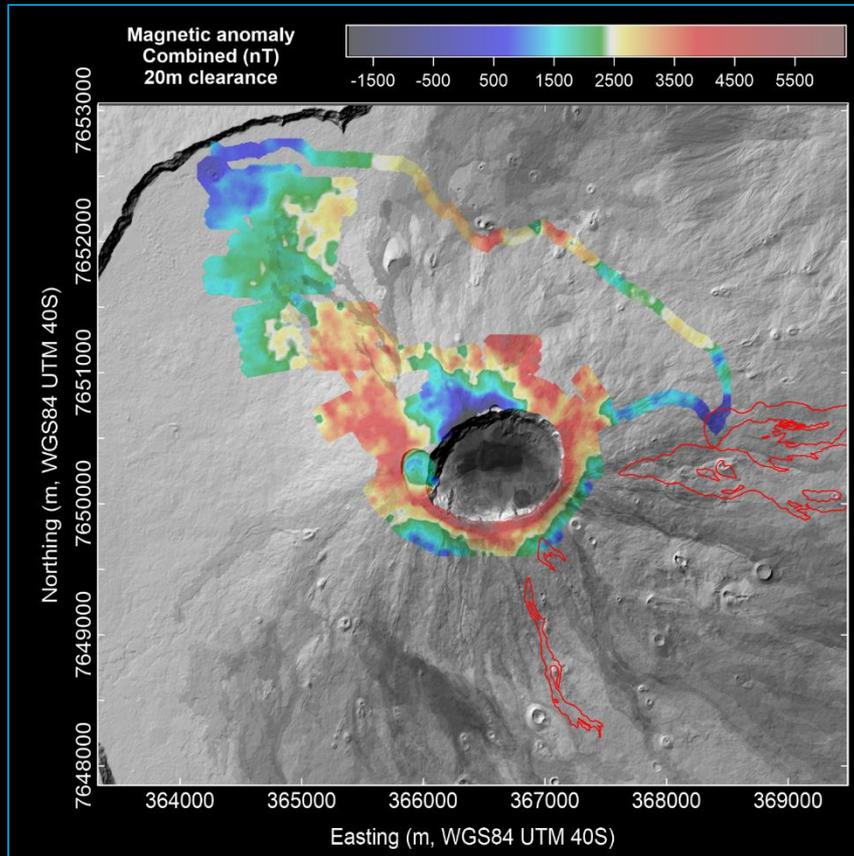
Vols automatiques - Suivi topographique à 20 m d'altitude



Gailler L., Labazuy P., Régis E., et al. (soumis)

Application au Piton de la Fournaise

⇒ **Campagne magnétique et IR aéroportée** (novembre 2020)



Gailler L., Labazuy P., Régis E., et al. (soumis)



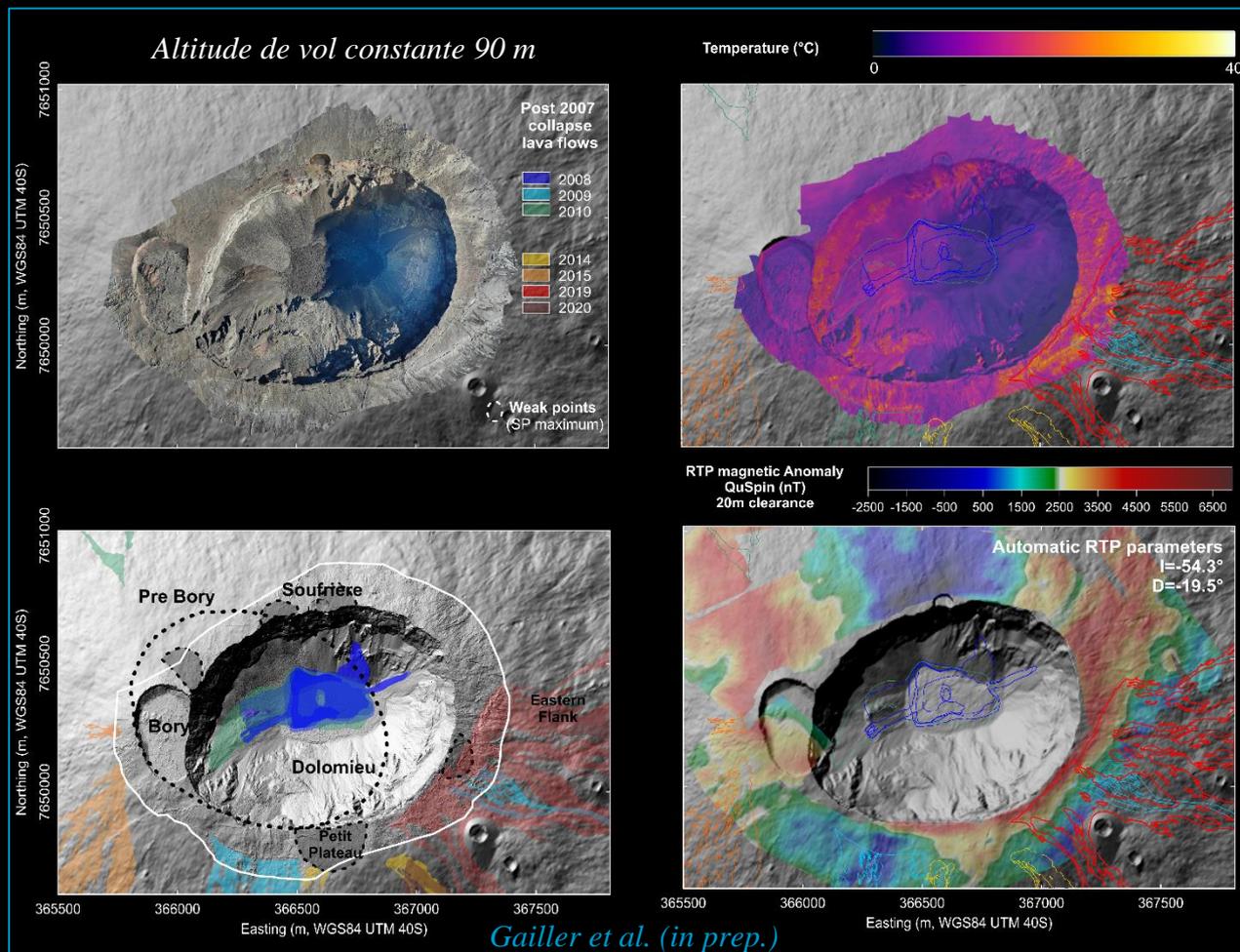
Corrélation données sol-drone

- Sommet -
- Zones d'intrusions préférentielles -
- Hétérogénéités et glissements -

⇒ **Couverture haute résolution homogène**
Informations structurales & état thermique

Application au Piton de la Fournaise

⇒ **Campagne magnétique et IR aéroportée** (novembre 2020)



Analyse multispectrale du sommet

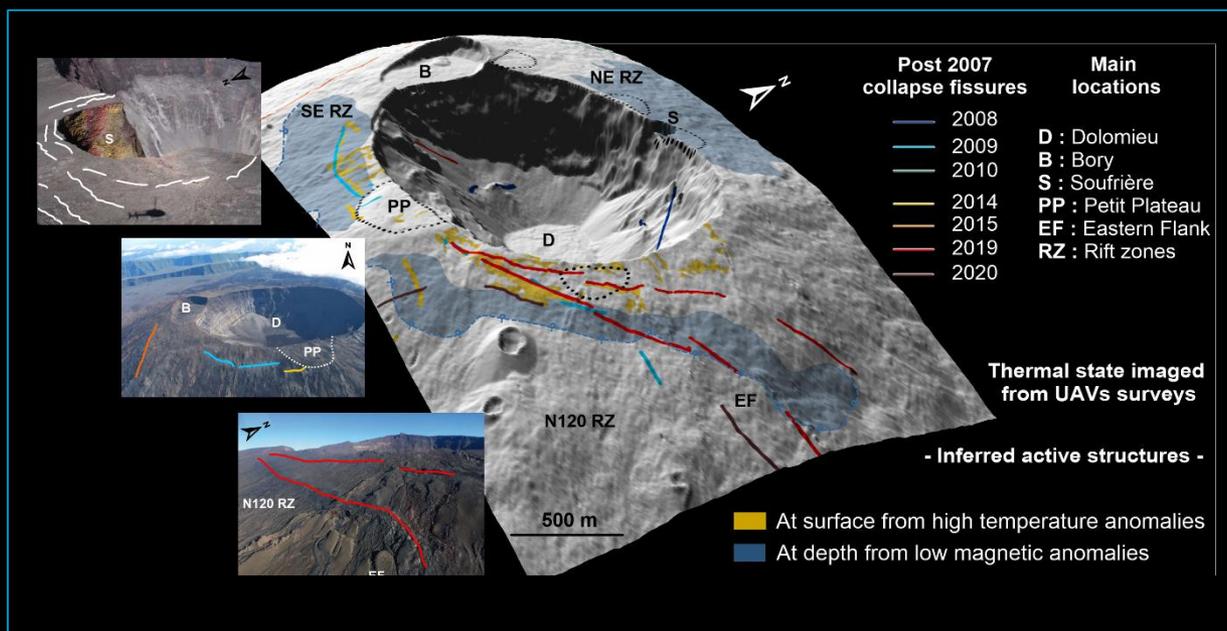
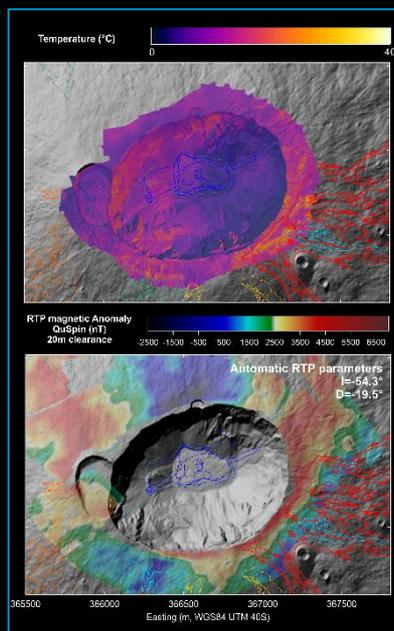
- Orthophoto -
- DEM 14 cm -
- IR -

⇒ **Contraintes aux données magnétiques**

⇒ **Interprétation couplée T°C / Aimantation**

Application au Piton de la Fournaise

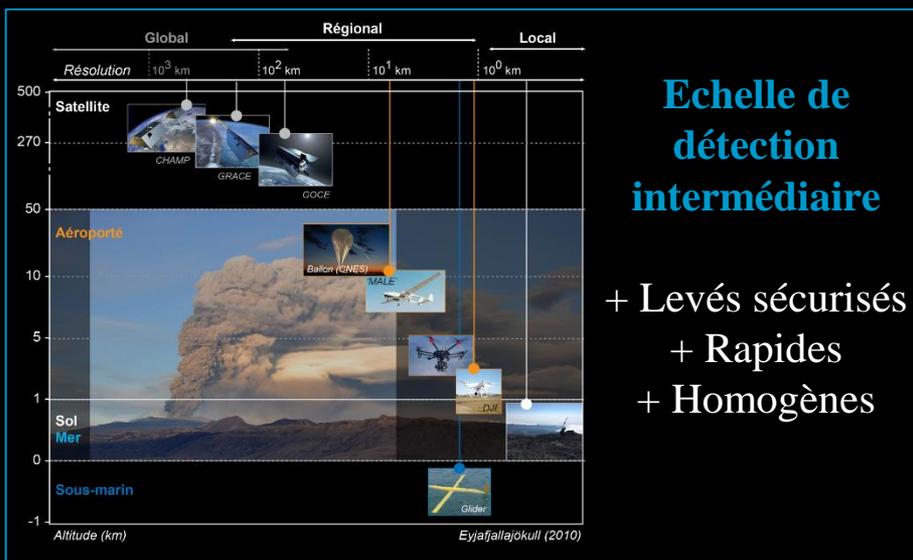
⇒ Campagne magnétique et IR aéroportée (novembre 2020)



⇒ Zones préférentielles de transfert de magma
 ⇒ Surface (IR) & profondeur (A)

Conclusions et perspectives

⇒ Méthodologie et Instrumentation



Echelle de détection intermédiaire

- + Levés sécurisés
- + Rapides
- + Homogènes

Evolution vers une configuration multi-capteurs

- Drone gros porteurs
- Développement autour de la gravimétrie mobile

⇒ Approche multiparamétrique, répétitions

⇒ Evolution spatio-temporelles des dynamismes volcaniques

⇒ Quantification des aléas

Implémentation d'un capteur magnétique

Aimantation versus température

Suivi de l'état thermique en surface et en profondeur

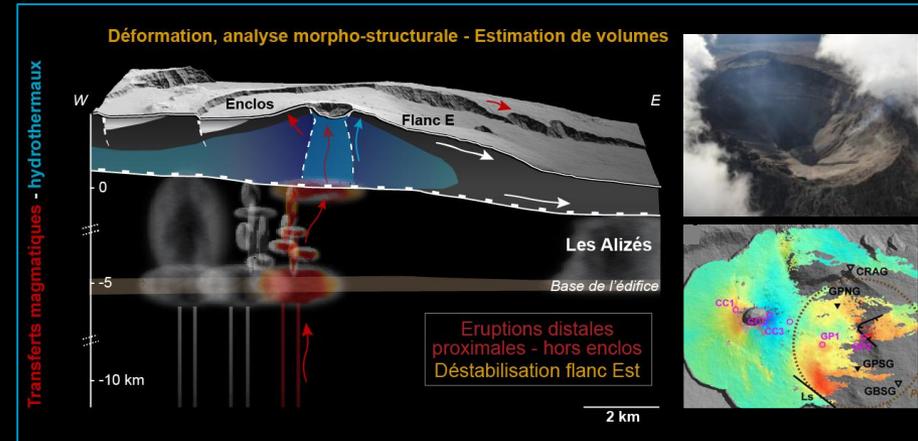


Conclusions et perspectives

⇒ Cibles et problématiques

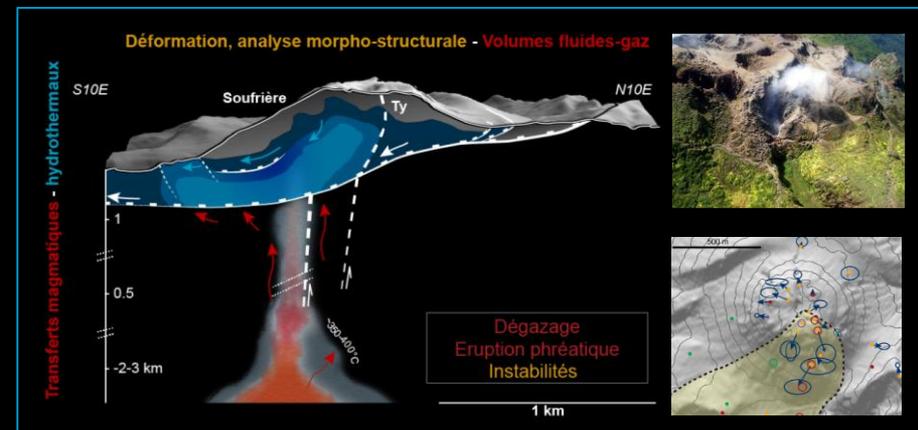
⇒ Compléter la couverture du Piton de la Fournaise

Perspective d'une modélisation 4D & multi-paramètres



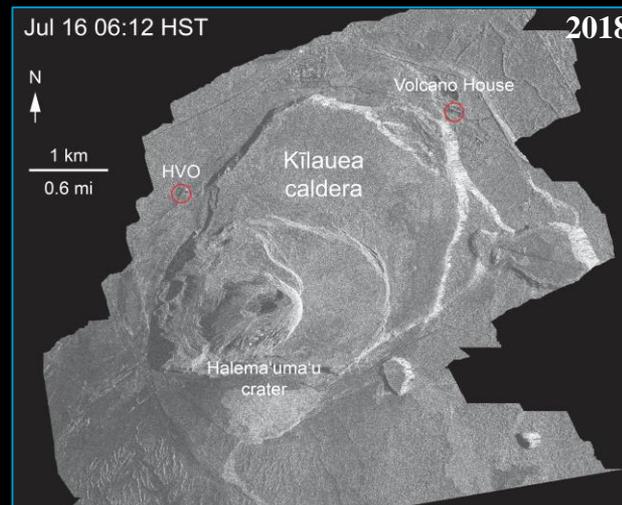
⇒ Réactivation des Volcans Antillais

Connaissance des systèmes hydrothermaux et de leur évolution



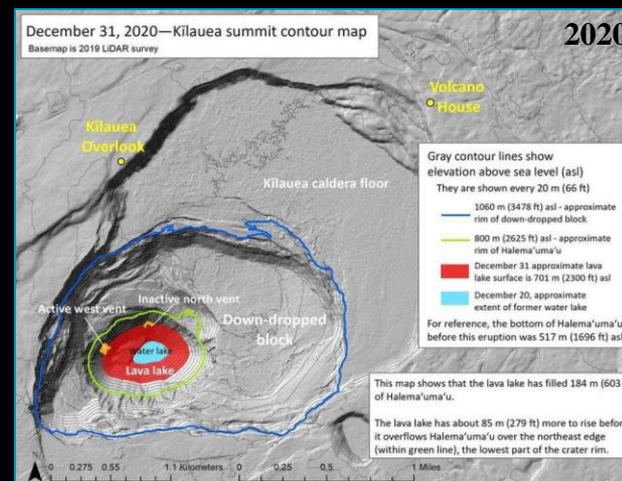
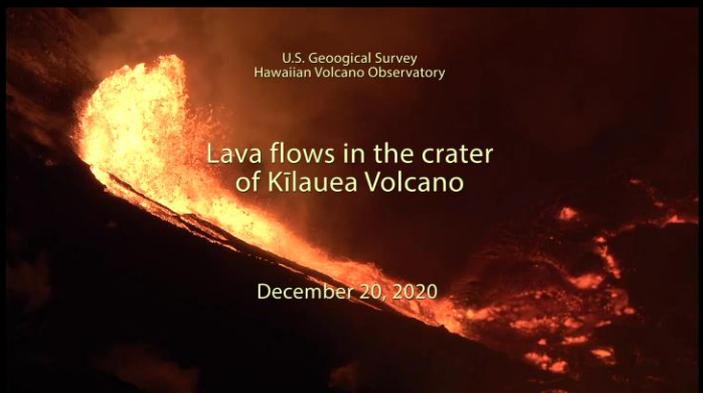
Conclusions et perspectives

⇒ Cibles et problématiques



Kilauea 2018 : l'éruption du siècle

SCIENCE
 Why Hawaii's Newest Eruption Makes Volcanologists Nervous



⇒ Géométrie, interaction entre systèmes magmatiques et hydrothermaux



Merci de votre attention