



Apport de la modélisation des déformations à la compréhension du volcanisme

Valérie Cayol

► To cite this version:

Valérie Cayol. Apport de la modélisation des déformations à la compréhension du volcanisme. Volcanologie. Université Clermont Auvergne, 2020. tel-03081057

HAL Id: tel-03081057

<https://uca.hal.science/tel-03081057>

Submitted on 18 Dec 2020

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

Ecole Doctorale de Sciences Fondamentales

Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'
Habilitation à Diriger des Recherches

présenté par **Valérie Cayol**

Chargée de recherches, CNRS
Laboratoire Magmas et Volcans
UMR 6524 Université Blaise Pascal – CNRS – IRD

Apport de la modélisation des déformations à la compréhension du volcanisme

**Soutenance prévue le 20 novembre 2020 devant le jury
composé de :**

Patrick bachelery, Pr. Émérite Université Clermont Auvergne
Cynthia Ebinger, Chair Pr., Tulane University
Marie-Pierre Doin, DR CNRS, Université Grenoble Alpes
Pascal Bernard, Physicien, Institut de Physique du Globe de Paris
Thierry Menand, McF, Université Clermont Auvergne
Christel Tiberi, DR CNRS, Université de Montpellier

Resp. Tutélaire
Rapporteuse
Rapporteuse
Rapporteur
Examineur
Présidente

Abstract

My research aims mainly at characterizing the structure and the feeding system of volcanic edifices from surface deformations. This research has led me to estimate the impact of magma injections on the stability of volcanic edifices. To reach these objectives, I am carrying out in parallel methodological developments and applications to volcanic edifices, in the context of both shield volcanoes and continental rift.

In order to better analyze the complexity of signals revealed by InSAR, I have developed numerical methods allowing the 3D modeling of displacements and stresses in homogeneous elastic media. These methods take into account complex intrusion shapes (curved quadrangular), reservoirs of various shapes and mechanical interactions between sources. I first showed the usefulness of 3D models for volcanic edifices with prominent topographies. These methods were then combined with inversions. One of the originality and one of the interests of these methods is that stress is the inverted parameter. These inversions are thus more physical, but also more informative than the commonly used methods that determine displacement distributions on the sources (the so-called kinematic methods). Nos inversions may provide information on the mechanisms at the origin of the surface displacements (sheared intrusion or fault), and on the crustal stresses (lithostatic versus extensive). Since 2013, in collaboration with mathematicians, we are developing a new class of methods for heterogeneous media based on the concept of fictitious domains, so that these methods can be fast enough to be combined with inversions. We are currently working on solving stress variations in heterogeneous media, whether the applications concern tectonics or volcanology. In order to make these methods accessible to a large community of users, I have developed an interface and a web platform (<http://www.opgc.fr/defvolc>) for on-demand computing.

Displacement analysis usually lead to non-unique models. To overcome this problem, I introduce other data such as continuous displacement measurements (GNSS), seismicity or gravity data, and I take into account the physics of the studied phenomena. Joint inversions of continuous GNSS data and InSAR data have been developed to follow the propagation of magma in an intrusion. With J. Dieterich, I have used the deformations to validate a new method of stress determination, based on seismicity rates and "rate and state" friction laws. In collaboration with physicists, a robust method of joint inversion of muographic and gravimetric data has been developed to better characterize the structure of sub-kilometer volcanic edifices. Since 2018, a new method for the joint inversion of temporal gravimetry and InSAR data for intrusions in heterogeneous 3D environments is being developed. This method will be tested on 3 eruptions that occurred at Piton de la Fournaise in 2019 and were covered by our measurements. Finally, a future project, initiated during my sabbatical year at the Cascade Volcano Observatory, will be to integrate deformation, seismicity rates and gravity variations in Bayesian inversions in order to reconcile the contradictory observations (lack of deformation but increase in gravity) made at Mt St Helens between 2010 and 2014.

Deformation inversions have been applied to the study of magma transfers. At Kilauea, I was thus able to obtain magma feeding rates over the period 1975-1983 and showed that this rate ($0.18 \text{ km}^3 / \text{an}$) was twice as high as previously estimated. At Piton de la Fournaise, with Yo Fukushima, we showed that intrusions were superficial ($<1 \text{ km}$ deep) and represented 11% of the volume supplied to the volcano. By inverting the set of InSAR data available since 2010 (Q. Dumont's thesis in progress) thanks to the OI² observation service, we show that most of the intrusions intrude in a slip loop structure, which implies that the magma is guided by pre-existing structures. Moreover, by integrating InSAR and GNSS data (thesis of D. Smittarello), we have shown that the propagation of magma was discontinuous in time, and that abrupt changes of orientation occurred, confirming the role of structural barriers. At Nyiragongo, by analyzing the eruption of January 2002 (Thesis C. Wauthier), we discovered that the eruption was associated with two dikes, one superficial,

intersecting the edifice, the other deeper, 40 km long, and extending under Lake Kivu. This analysis led to a re-estimation of the hazard given the high concentrations of dissolved gas (CH₄ and CO₂) at Lake Kivu. Finally, at Nyamuragira we evaluated that, during the 2010 eruption, the volume emitted was 10 times greater than the contraction of the reservoir. I verified that this ratio was compatible with the chemical composition of the magma and therefore its compressibility.

Analyzing the deformations of volcanoes also allowed me to study the links between magma transfers and tectonics. At Kilauea, I developed a model that takes into account the interactions between the reservoir located in the rift-zones and the detachment fault located at the interface between the sea floor and the edifice. This model provides an explanation for large earthquakes (M 7.2 1983 and M 6.9 2018) on the southern flank of the volcano. With my colleagues from the University of Reunion Island, I have explored a type of intrusion whose importance for the destabilization of volcanoes is little explored, namely sheared intrusions. This type of intrusion is always neglected in displacement data inversions. However, field studies show that most intrusions are guided by pre-existing structures, which inevitably induce shearing. Sheared intrusions could be responsible for large flank slip, such as those that occurred at Piton des Neiges, and could also play an important role on other volcanoes. Since then, in the inversions of magma intrusions, I now invert both pressures and shear stress drops. When in 2007 at Piton de la Fournaise, a 1.4 m flank slip occurred, associated with a 35 cm uplift, it was tempting to attribute it to a sheared intrusion. Nevertheless, we have shown (Marine Tridon's thesis) that this landslide was related to a fault and not to a sheared intrusion. This study shows a slow slip type behavior of the fault in 2007, and a creep type behavior afterwards. To explore this behavior, I started to use numerical codes based on the "rate and state" laws of friction to understand the temporal and spatial variations of the eastern flank slip of the Piton de la Fournaise. This is the first time that realistic friction laws are applied to the faults of a volcanic edifice. This study will allow to better explore the hazard related to the flank slip. It could be extended to the southern flank of Kilauea, or the eastern flank of Etna.

Résumé

Mes recherches visent principalement à caractériser la structure et le système d'alimentation des édifices volcaniques à partir des déformations de la surface. Ces recherches m'ont amenée à estimer l'impact des injections de magma sur la stabilité des édifices. Pour atteindre ces objectifs, je mène en parallèle des développements méthodologiques et des applications à des édifices volcaniques dans des contextes de volcans boucliers ou de rift continental.

Afin de mieux analyser les signaux complexes révélés par l'INSAR, j'ai développé des méthodes numériques permettant des modélisations 3D des déplacements et des contraintes dans des milieux élastiques homogènes. Ces méthodes prennent en compte des formes d'intrusions réalistes (quadrangulaires courbés), des réservoirs de formes variées et les interactions mécaniques entre sources. J'ai tout d'abord montré l'utilité de modélisations 3D avec topographies pour les édifices volcaniques. Ces méthodes ont ensuite été combinées à des inversions. Une des originalités et un des intérêts de ces méthodes est que ce sont les contraintes qui sont inversées. Ces inversions sont donc plus physiques, mais aussi plus informatives que les méthodes couramment utilisées qui déterminent les déplacements des sources (méthodes dites cinématiques). Nos inversions renseignent sur les mécanismes à l'origine des déplacements de la surface (intrusion cisailée ou faille), et sur les contraintes crustales (lithostatique versus extensive). Depuis 2013, en collaboration avec des mathématiciens, nous développons une nouvelle classe de méthodes pour milieux hétérogènes basée sur le concept de domaines fictifs, afin que ces méthodes puissent être assez rapides pour être utilisées dans des inversions. Nous cherchons actuellement à résoudre les variations de contraintes en milieu hétérogène, pour des applications en tectonique et en volcanologie. Afin de rendre ces méthodes accessibles à une large communauté d'utilisateurs, j'ai développé une interface et une plateforme web (<http://www.opgc.fr/defvolc>) de calcul à la demande.

L'analyse des déplacements conduit le plus souvent à des modèles non uniques. Pour palier à ce problème, j'introduis d'autres données que ce soient des données de déplacements continus (GNSS), des données de sismicité ou de gravité, et je prends en compte la physique des phénomènes étudiés. Ainsi, des inversions conjointes de données GNSS continues et de données InSAR ont été développées pour suivre la propagation du magma dans une intrusion. Avec J. Dieterich, j'ai utilisé les déformations pour valider une nouvelle méthode de détermination des contraintes, à partir des taux de sismicité et des lois de friction "rate and state". En collaboration avec des physiciens, une méthode robuste d'inversion conjointe de données de muographie et de gravimétrie a été développée afin de mieux caractériser la structure d'édifices volcaniques sub-kilométriques. Depuis 2018, une nouvelle méthode d'inversion conjointe de données de gravimétrie temporelle et de données InSAR, pour des intrusions en milieux 3D hétérogènes est développée. Cette méthode sera testée sur 3 éruptions qui se sont produites au Piton de la Fournaise en 2019 et qui ont été couvertes par nos mesures. Enfin, un projet futur, initié lors de mon année sabbatique au Cascade Volcano Observatory, sera d'intégrer les déformations, les taux de sismicité et les variations de gravité dans des inversions Bayésiennes afin de réconcilier les observations contradictoires (absence de déformation mais augmentation de gravité) faites au Mt St Helens entre 2010 et 2014.

Les inversions de déformations ont été appliquées à l'étude des transferts de magmas. Au Kilauea, j'ai ainsi pu obtenir des taux d'alimentation en magma sur la période 1975-1983 et j'ai montré que ce taux ($0.18 \text{ km}^3/\text{an}$) était deux fois plus important que celui estimé précédemment. Au Piton de la Fournaise, avec Y. Fukushima, nous avons montré que les intrusions étaient superficielles ($<1 \text{ km}$ de profondeur) et représentaient 11% du volume fournis au volcan. En inversant l'ensemble des données InSAR disponibles depuis 2010 (thèse de Q. Dumont en cours) grâce au service d'observation OI², nous montrons que la

plupart des intrusions se mettent en place dans une structure en forme de loupe de glissement, ce qui implique que le magma est guidé par des structures pré-existantes. Par ailleurs, en intégrant des données InSAR et GNSS (thèse de D. Smittarello), nous avons montré que la propagation du magma se faisait par à-coups, et que des changements brusques d'orientation se produisaient, confirmant le rôle des barrières structurales au Piton de la Fournaise. Au Nyiragongo, en analysant l'éruption de janvier 2002 (Thèse C. Wauthier), nous avons découvert que l'éruption était associée à deux dikes, l'un superficiel, recoupant l'édifice, l'autre plus profond, de 40 km de long, et s'étendant sous le lac Kivu. Cette analyse amène à ré-estimer l'aléa étant donné les fortes concentrations de gaz dissous (CH_4 et CO_2) dans le lac Kivu. Enfin au Nyamuragira nous avons évalué que, lors de l'éruption de 2010, les volumes émis étaient 10 fois supérieurs à la contraction du réservoir. J'ai vérifié que ce ratio était compatible avec la composition chimique du magma et donc sa compressibilité.

Analyser les déformations de volcans m'a aussi permis d'étudier le lien entre transferts de magma et tectonique. Au Kilauea, j'ai développé un modèle qui prend en compte les interactions entre le réservoir situé dans les rift-zones et la faille en décollement située à l'interface entre le plancher océanique et l'édifice. Ce modèle fournit une explication pour les grands séismes (M 7.2 1983 et M 6.9 2018) du flanc sud du volcan. Avec mes collègues de l'Université de la Réunion, j'ai exploré un type d'intrusion dont l'importance pour la déstabilisation des volcans est peu explorée, à savoir les intrusions cisailées. Ce type d'intrusions est toujours négligé dans les inversions de données de déplacements. Or, les études de terrain montrent que la plupart des intrusions sont guidées par des structures pré-existantes, ce qui induit forcément des cisaillements. Les intrusions cisailées pourraient être responsables des grands glissements de flancs, tels que ceux qui se sont produits au Piton des Neiges, et pourraient aussi jouer un rôle important sur d'autres volcans. Depuis, dans les inversions d'intrusions de magma, je prends maintenant en compte les pressions et les chutes de contraintes cisailantes. Lorsqu'en 2007 au Piton de la Fournaise, un glissement de flanc d'1.4 m s'est produit, associé à un soulèvement de 35 cm, il était tentant de l'attribuer à une intrusions cisailée. Néanmoins, nous avons montré (thèse de Marine Tridon) que ce glissement était lié à une faille et non à une intrusion cisailée. Ces études montrent un comportement de type glissement lent en 2007, et de type fluage après. Pour explorer ce comportement, j'ai commencé à utiliser des codes numériques basés sur les lois de friction « rate and state » pour comprendre les variations temporelles et spatiales du glissement de flanc est du Piton de la Fournaise. C'est la première fois que des lois de friction réalistes sont appliquées aux failles d'un édifice volcanique. Cette utilisation permettra de mieux explorer l'aléa lié au glissement de flanc. Elle pourrait être étendue au flanc sud du Kilauea, ou au flanc est de l'Etna.

Remerciements

J'ai eu la chance de croiser des chercheurs dont l'humanité et le talent ont été à la fois un encouragement et un modèle. Etre une femme dans un monde essentiellement masculin, n'était pas forcément facile. Si ma route n'avait pas croisé la leur, je ne suis pas sûre que je serai où je suis maintenant.

Pierre Antoine Blum, le père des fameux inclinomètres tout en quartz, qui m'a encouragé et fait confiance tout au long de ma thèse. Son regard bienveillant et rieur m'accompagne toujours.

François Henri Cornet, récemment décédé, dont j'ai particulièrement apprécié l'immense culture en mécanique des roches et fracturation hydraulique, la grande disponibilité, les encouragements à chaque nouvelle voie que j'explorais. Son indépendance, et sa persévérance dans une voie - la géothermie - à laquelle il n'a cessé de croire, parce qu'elle permettrait de fournir de l'énergie en minimisant les pollutions, sont un modèle.

James H. Dieterich a été un modèle par sa modestie. Jim a su inventer son domaine de recherche (l'étude de la friction de failles) et cherchait à faire une bonne science utile aux autres. Il avançait indépendamment des modes en suivant ses propres intuitions et ses convictions. Son soutien et son amitié m'ont particulièrement épaulés.

Mes collègues parisiens François Beauducel dont j'apprécie la volonté d'être utile, Philippe Jousset à l'enthousiasme imperturbable, mes amies sismologues, Soazig Le Begat, Eleonore Stutzmann, Veronique Farra, mes amis et collègues rencontrés à l'USGS, Giovanna Cultrera, Caroline Jullien, Rufus Catchin, Valia Baranova, Ghini Gandhok, Mike Poland, Roger Denlinger, Mike Lisowski, mes collègues Stéphanois, Sylvie Tourpin, Viviane Berton, Jean-François Moyen, Johanna Marin Carbonne, mes collègues Clermontois, Jean-Luc Froger dont j'ai apprécié la perspicacité, et la modestie et avec lequel j'ai encadré 6 thèses, Jean-François Lénat artisan de la cynergie avec Jean-Luc, Karim Kelfoun avec lequel je partage la responsabilité de l'équipe volcanologie, Lucia Gurioli, Lydie Gailler, Philippe Labazuy pour leur enthousiasme. Mon collègue et ami mathématicien Olivier Bodard, qui m'aide à explorer des voies nouvelles, et met en musique nos articles. Virginie Pinel, dont j'admire la solidité et la perspicacité. Mes collègues luxembourgeois et Belges, Nicolas D'Oreye et François Kervyn, qui poursuivent des recherches dans un pays compliqué grâce à leur persévérance et leur enthousiasme.

Les étudiants en thèse avec lesquels j'ai eu la chance de collaborer et qui m'ont aussi fait avancer, alors que je les accompagnais dans cet étrange métier qu'est la recherche : Yo Fukushima dont j'ai pu admirer la grande maturité scientifique et la créativité, Christelle Wauthier qui m'impressionnait par son organisation et sa capacité à collaborer avec des gens dispersés dans le monde, Aurélien Augier qui réinventait des mondes numériques et jonglait avec aisance avec les concepts, Marine Tridon à l'intelligence sûre et d'une si grande maturité, décédée trop jeune, Delphine Smittarello discrète, fiable et rapide, Quentin Dumont pour sa créativité et ses analyses solides.

Je dois aussi beaucoup aux post-doctorants qui ont fait ce bout de chemin avec moi : Sébastien Court un jeune mathématicien ambitieux qui poursuit une carrière brillante, Farshid Dabaghi qui manie getfem mieux que personne, et Anne Barnoud dont la perspicacité et la finesse d'analyse m'impressionnaient tout au long des 4 années où nous avons travaillé ensemble.

Merci à mes amis de tous horizons, et professions, parfois du bout du monde, dont la présence et la chaleur amènent l'énergie et l'enthousiasme qui irriguent la vie et guident mes actions.

Merci à mes chers parents, ma mère fantaisiste et poète, et mon père avide de tout comprendre.

Merci à Rodolphe, mon compagnon, amoureux et ami, près de moi avec recul, humour et amour et merci à mes chers garçons, Eliaz et Silvan, sans lesquels la vie n'aurait pas la même couleur.

Table des matières

I- Résumé de mes recherches.....	12
I.1Développements méthodologiques pour l'analyse de données de déplacement.....	13
I.1.1Développement d'une méthode d'éléments frontières pour l'analyse des déformations crustales.....	13
I.1.2Importance de la prise en compte de la topographie.....	15
I.1.3Méthode de domaines fictifs pour la modélisation rapide et précise des fractures en milieu hétérogène.....	16
I.1.4Inversion de données d'interférométrie radar afin de déterminer les géométries de dikes.....	17
I.1.5Interface pour l'inversion de déplacements de volcans.....	18
I.1.6Inversion des distributions de contraintes sur des fractures.....	19
I.1.7Inversion des déplacements associée à des sources de déformation volumiques.....	20
I.1.8Interpolation d'interférogrammes.....	21
I.1.9Influence des directions d'acquisition des données InSAR pour l'inversions.....	22
I.2Inversions conjointes.....	23
I.2.1Inversions conjointes sismicité – déformations.....	23
I.2.2Inversion conjointe muographie – gravimétrie.....	25
I.3Transferts de magma.....	26
I.3.1Etude des contraintes et des transferts de magma au Kilauea avant et pendant l'éruption du Pu'u O'o-Kupaianaha (1983).....	26
I.3.2Étude des transferts de magma au Piton de la fournaise entre 1998-2000.....	27
I.3.3Déplacements sommitaux post-éruptifs associés à l'éruption du Piton de la Fournaise d'Avril 2007.....	29
I.3.4Propagation du magma lors des intrusions au Piton de la Fournaise par l'inversion conjointe de données InSAR et GNSS.....	30
I.3.5Modélisation de l'éruption de février 2002 au Nyiragongo.....	31
I.3.6Modélisation des déplacements InSAR associés aux éruptions récentes du Nyamuragira.....	32
I.3.7Plomberie volcanique, compressibilité du magma et modélisation des contraintes au volcan du Nyamuragira, D. R. Congo.....	32
I.4Interaction mouvements de magma - tectonique.....	33
I.4.1Etude de l'influence des intrusions de dikes sur la croissance et la stabilité du Piton de la Fournaise.....	33
I.4.2Importance des intrusions cisailés pour les déplacements de flanc des volcans : Application aux volcans de la Réunion.....	34
I.4.3Déplacements co- et post-éruptifs associés au glissement du flanc est du Piton de la Fournaise d'avril 2007.....	35
II- Projet de recherches.....	40
II.1.1Détermination des distributions de contraintes sur des fractures en milieu hétérogène.....	40
II.1.2Inversion conjointe des données de déformation et de gravité.....	41
II.1.3Inversions conjointes de la déformation, gravité et sismicité.....	42
II.1.4Histoire en contraintes du flanc est du Piton de la Fournaise.....	43
II.1.5Propriétés "rate and state" de la faille du flanc est du Piton de la Fournaise et Influence des intrusions répétées de magma.....	44
EXTENDED CURRICULUM VITAE.....	47
Research.....	47
Experience.....	47
Education.....	47
Distinctions.....	47

Scientific supervision.....	48
Animation and management of research (most recent are first).....	50
Teaching and outreach.....	53
National and international collaborations.....	54
PUBLICATIONS.....	56
Bibliometry.....	56
Revue à comité de lecture.....	56
Conférences invitées dans des congrès.....	59
Actes à colloques à comité de lecture.....	61
Séminaires invités.....	61
Livres et ouvrages.....	62
Logiciels.....	62
Communications à des congrès et symposiums.....	63

I- Résumé de mes recherches

Mes recherches visent principalement à caractériser la structure et le système d'alimentation des édifices volcaniques. Je cherche aussi à estimer l'impact des injections de magma sur la stabilité des failles présentes dans les édifices. Pour atteindre ces objectifs, je m'appuie principalement sur l'interprétation de données de déformations et je mène en parallèle des développements méthodologique et des applications. Cet aller retour entre méthodes et applications me semble essentiel, les nouvelles méthodes apportent une nouvelle compréhension des phénomènes observés et l'observation des systèmes naturels suggère les développements méthodologiques nécessaires pour améliorer les analyses.

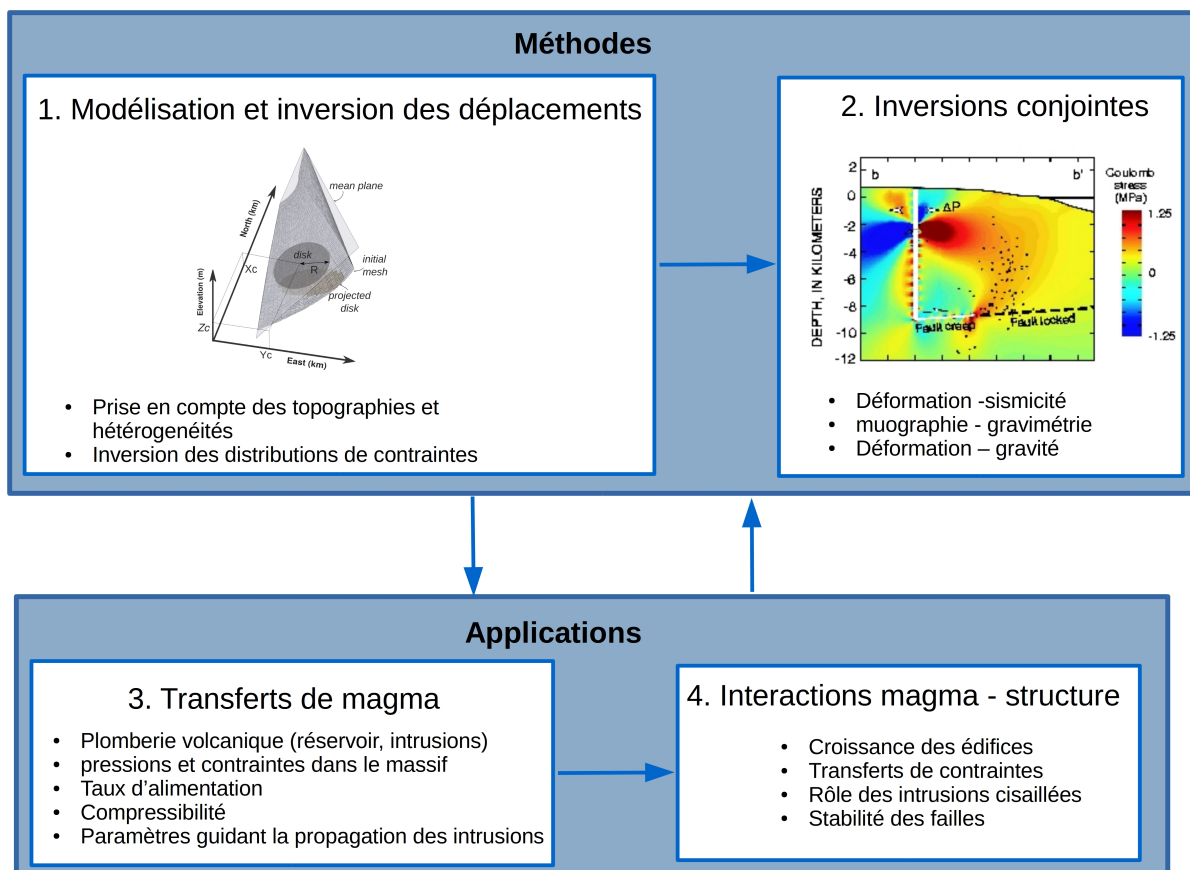


Figure 1: Lien entre les développements méthodologiques et les applications

Les études que je mène concernent 4 thématiques principales, qui correspondent aux quatre parties du résumé de mes travaux exposé ci après :

- (1) le développement de méthodes d'analyse des déformations mesurées en surface afin de déterminer les caractéristiques de leur source;
- (2) la mise au point de méthodes d'inversions permettant d'intégrer des données de déformations complémentaires (GNSS et InSAR), des données de déformation et de microsismicité, des données de muographie et de gravimétrie, et de données de déformation et de gravimétrie;
- (3) l'étude des transferts de magma ;
- (4) l'étude des interactions entre transferts de magma et tectonique.

Les cibles de ces études sont principalement le Kilauea, le Piton de la Fournaise, le Nyiragongo et le Nyamuragira.

I.1 Développements méthodologiques pour l'analyse de données de déplacement

Au début de mon doctorat en 1993, j'ai eu la chance de commencer à développer des méthodes de modélisation tri-dimensionnelles alors que l'interférométrie radar débutait et permettait d'imager les déplacements du sol sur des surfaces de dizaines à centaines de km², avec une précision centimétrique (*Massonnet et al., 1993 ; Massonnet et Briole, 1995*). Ces images montraient une complexité jusqu'alors négligée puisque les mesures ne se faisaient auparavant qu'en quelques points du sol. Ces nouvelles données donnaient accès à une meilleure compréhension des transferts de magma et de la construction des édifices volcaniques, comme du cycle sismique. Leur interprétation nécessitait de dépasser les modèles analytiques autrefois utilisés.

Dans mes recherches, je me suis plus particulièrement intéressée au comportement des édifices volcaniques, mais les méthodes que j'ai développées s'appliquent aussi bien aux excavations qu'aux réservoirs, aux fractures hydrauliques (comme les intrusions de magma) qu'aux failles. Les volcans comme les zones de failles sont associés à des reliefs proéminents, la croûte est constituée de matériaux hétérogènes, les réservoirs magmatiques comme les fractures ont des géométries complexes, les ouvertures et les glissements se font parfois sur des portions de fractures, les variations de contraintes sont variables. Aussi dans les modèles que j'ai développés ou que j'ai contribué à développer, j'ai cherché à prendre toutes ces complexités en compte.

Pour comprendre les transferts de magma et évaluer les aléas liés aux glissements de flancs ou comprendre le cycle sismique, on « inverse » les déplacements de surface. Inverser consiste à choisir un cadre théorique, dans lequel les sources de déplacements sont décrites par une série de paramètres. On détermine ensuite les combinaisons de paramètres qui expliquent le mieux les observations. Pour ce faire, on quantifie l'écart des déplacements simulés aux observations grâce à une fonction misfit, et on recherche les familles de sources qui minimisent cette fonction. Afin de pouvoir mener des inversions pour des modèles tridimensionnels, il est important de disposer de méthodes rapides. C'est le cas des méthodes d'éléments frontières et de domaines fictifs.

Dans ce chapitre j'aborderai les outils développés afin de conduire des modélisations plus informatives. Ainsi, j'expliquerai à la fois les méthodes de modélisation et les méthodes d'inversions qui ont été développées. J'expliquerai aussi les développements qui concernent spécifiquement l'inversion de données d'interférométrie radar.

La plupart de ces méthodes supposent le milieu élastique homogène. Récemment, en collaboration avec des chercheurs en mathématiques appliquées, nous avons introduit des méthodes de modélisation rapides (pour permettre les inversions) permettant la prise en compte des hétérogénéités du milieu. L'accent a été mis sur des développements de logiciels libres qui pourront être mis à disposition des chercheurs en géodésie.

I.1.1 Développement d'une méthode d'éléments frontières pour l'analyse des déformations crustales

Cette recherche avait développée pendant ma thèse (1993-1996) effectuée sous la direction de F.H Cornet à l'IPGP. La méthode a été exposée dans deux articles (Cayol et Cornet, Int. J. Rock. Mech. Min. Science, 1997 ; Cayol et Cornet, JGR, 1998). Récemment, elle a été améliorée en collaboration avec O. Bodart, du Laboratoire de Mathématiques de l'Université Clermont Auvergne (cayol et al., JGR, 2014).

Afin de permettre de modéliser en 3D de façon efficace et précise les déformations engendrées par des réservoirs et fractures (failles ou intrusions magmatiques) à la surface d'édifices volcaniques dont la topographie est réaliste, j'ai combiné deux méthodes

d'éléments frontières complémentaires. Les méthodes d'éléments frontières reposent sur une formulation intégrale (ici le théorème de réciprocité de Betti) et la superpositions de solutions analytiques. La méthode dite « directe » est basée sur des solutions élémentaires correspondant à des forces ponctuelles dans un milieu infini (Lachat et Watson, 1976), tandis que la méthode dite « des Discontinuités de Déplacements » (Crouch, 1976) est basée sur des solutions élémentaires correspondant à des sauts de déplacements pour des contraintes continues. Ces solutions correspondent à des contraintes infinies en bout d'éléments, qu'on appelle singularités, mais ces singularités sont moins importantes pour la méthode directe que pour la méthode des Discontinuités de Déplacements. Avec la méthode directe, le plus efficace et le plus précis est d'utiliser des éléments sur lesquels les déplacements sont linéaires et les points d'interpolations des solutions sont placés aux sommets des éléments. En revanche avec la méthode des Discontinuités de Déplacements le plus efficace et précis est d'utiliser des éléments constants.

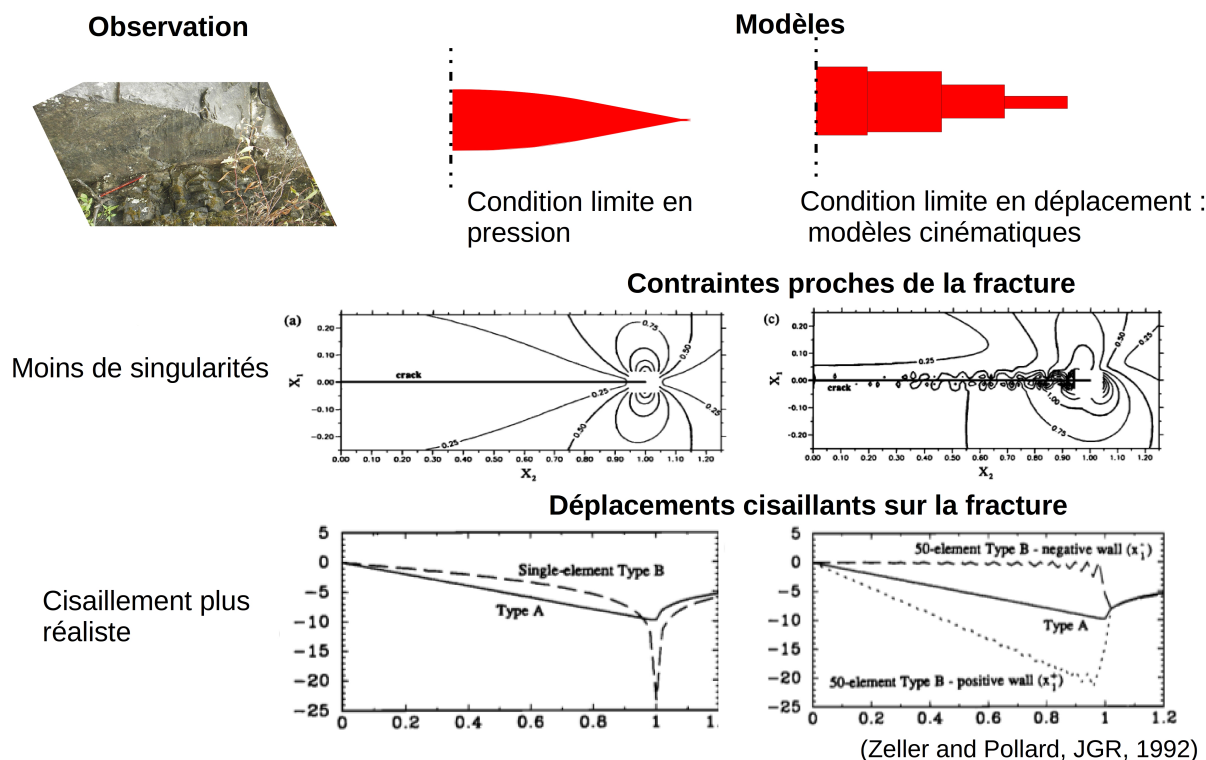


Figure 2: Avantages des conditions limites en contraintes sur les conditions limites en déplacement pour la modélisation des fractures sous pression.

Dans ces modèles, les contraintes plutôt que les déplacements, sont imposés car cette condition aux frontières donne des résultats plus réalistes du point de vue de la physique. Pour les fractures soumises à des pressions, cette condition aux frontières amène à des ouvertures et des cisaillements qui sont en accord avec les observations in situ, ce qui n'est pas le cas des solutions avec des conditions limites en déplacements (Zeller et Pollard, 1992). Typiquement, une pression unique permet d'obtenir des ouvertures progressives, et induits des cisaillements (Figure 2). Les singularités sont aussi moins importantes avec les méthodes utilisant des conditions limites en pression.

Mes recherches ont montré que l'utilisation de contraintes était plus informative car cette utilisation permet d'estimer le champ de contraintes dans les massifs et de déterminer la nature des sources de déplacements. Ainsi, en partant des surpressions inversées, et en faisant des hypothèses raisonnables sur les pressions de magma, il est possible de déterminer les contraintes crustales. Ce champ de contraintes s'est avéré lithostatique au Piton de la Fournaise (Cayol et Cornet, 1998), comme au Nyiragongo (Wauthier et al.,

2012), ce qui était plus étonnant étant donné le contexte extensif de rift. Au Nyiragongo, cet état de contraintes indique que les éruptions sont la conséquence de l'activité magmatique plutôt que de l'extension crustale. La nature des sources de déplacements, intrusions cisailées ou failles est aussi importante pour l'évaluation des aléas. Par exemple, les intrusions cisailées annulent la friction et sont susceptibles d'engendrer des déplacements latéraux de plus grande ampleur que des failles. Suite au déplacement de flanc et au soulèvement concomitant survenus au Piton de la Fournaise en 2007, une question était de savoir si ces déplacements résultaient d'une intrusion cisailée comme supposé au Piton de Neiges (*Famin et al., 2010 ; Berthod et al., 2016*), ou s'il s'agissait d'un glissement de faille comme mis en évidence au Kilauea (*Ando et al., 1979; Montgomery-Brown et al., 2009; Liu et al., 2018*). L'analyse des déplacements co-éruptifs en inversant simultanément les contraintes normales et cisailantes met en évidence l'action d'une faille sub-horizontale qui soulève le bloc supérieur. Ce soulèvement s'explique du fait de la faible profondeur de la faille (*Cayol et al., 2016, 2017*). Enfin, en utilisant le critère d'Akaike, *Tridon et al (2016)* montrent que, d'un point de vue statistique, les analyses reposant sur des inversions de contraintes donnent des résultats plus vraisemblables que les inversions de dislocations car ces inversions requièrent moins de paramètres.

Dans les modèles éléments frontières, mathématiquement rien n'empêche l'interpénétration de fractures. Afin d'empêcher cette interpénétration et d'obtenir une solution géologiquement plausible, une contrainte d'inégalité sur les discontinuités de déplacements a récemment été ajoutée. Cette condition est imposée par le biais de multiplicateurs de Lagrange (*Cayol et al., 2014*), car cette méthode est plus robuste (*Mijar et Aurora, 2000*) que les méthodes de pénalisations habituellement utilisées avec les méthodes éléments frontières (*Cooke, 1997*). Cette condition de non interpénétration a amélioré les interprétations faites sur le glissement de flanc de 2007 (*Tridon et al., 2016*), et sur la faille bordière de la caldera d'Ambrym, Vanuatu lors de l'éruption de 2015 (*Smittarello et al., 2019, Shreve et al., 2020*).

I.1.2 Importance de la prise en compte de la topographie

Recherche développée au cours de ma thèse et publiée dans *Geophysical Research Letter* (*Cayol et Cornet, 1998*).

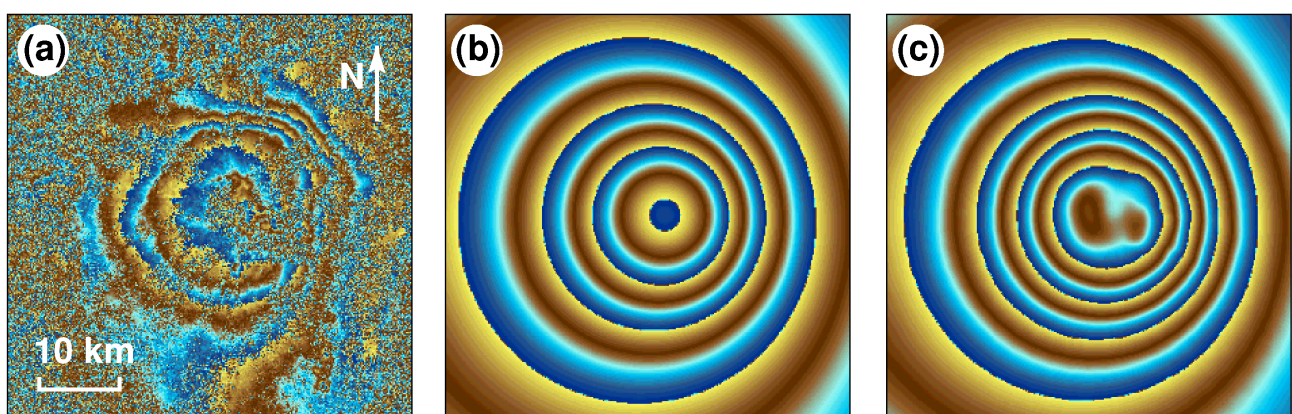


Figure 3: Comparaison des interférogrammes réel et synthétiques calculés pour l'éruption de 1991-1993 à l'Etna. Une frange va du bleu foncé au jaune et représente 28 mm de déflation. (a) Interférogramme réel mesuré par (*Massonnet et al., 1995*). (b) Interférogramme synthétique calculé par *Massonnet et al., (1995)* en utilisant la solution de source ponctuelle de *Mogi (1958)*. (c) Interférogramme synthétique calculé en utilisant la méthode mixte d'éléments frontières.

En utilisant la méthode d'éléments frontières mixtes, j'ai estimé les effets de la topographie

sur le champ de déplacements à la surface des volcans (Cayol et Cornet, 1998). J'ai montré que lorsqu'on néglige la topographie cela peut conduire à une estimation erronée de la forme du réservoir magmatique. Lorsque la pente moyenne des flancs du volcan est supérieure à 20° , on risque d'interpréter des inflations de la source comme étant des déflations. Enfin, on peut surestimer la variation de volume de la source, cette surestimation peut aller jusqu'à 50% pour des pentes de 30° . L'influence de la topographie a été illustrée par la modélisation des déformations mesurées par interférométrie radar à l'Etna lors de l'éruption de 1991-1993 (Figure 3).

I.1.3 Méthode de domaines fictifs pour la modélisation rapide et précise des fractures en milieu hétérogène

Cette étude est menée dans le cadre du Post-doctorat de Sébastien Court de 2013 à 2015 et de Farshid Dabaghi, de 2016 à 2018. Elle s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec Olivier Bodart de l'Institut Camille Jourdan à St Étienne (UMR 5208, UDL) et Jonas Koko du LIMOS (UMR 6158, UBP). Ces études ont donné lieu à deux publications (Bodart et al. *Proceedings*, 2016 et Bodart et al., *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2016).

Si on veut prendre en compte des complexités telles que des topographies, des interactions entre sources, des comportements non élastiques, ou des hétérogénéités de propriétés mécaniques non planaires, des simulations numériques doivent être employées : éléments frontières, éléments finis, etc. A ce jour peu d'inversions utilisent des modèles numériques qui prennent ces complexités en compte : les topographies sont prises en compte par des inversions utilisant des méthodes d'éléments frontières car celles-ci présentent l'avantage de ne pas nécessiter le maillage des volumes et sont donc rapides (Cayol et Cornet, 1997, 1998); les hétérogénéités et les topographies sont simultanément prises en compte par des inversions basées sur des méthodes éléments finis où, pour des raisons d'efficacité numérique, la géométrie des fractures est fixée, que ces fractures soient des failles (Tung et Masterlark, 2016) ou des intrusions de magma (Currenti et al., 2011).

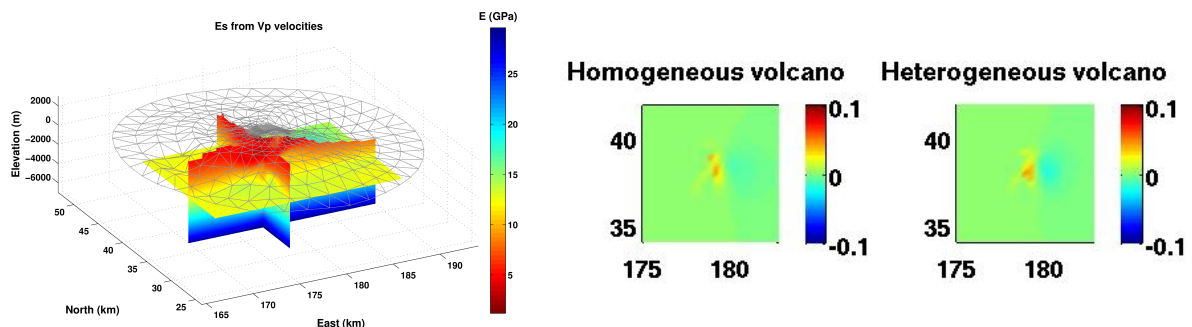


Figure 4: Comparaison des déplacements calculés pour un modèle homogène et un modèle hétérogène. (Gauche) Les paramètres élastiques sont déterminées à partir des vitesses d'ondes P (Prôno et al., 2009) en utilisant des lois empiriques pour prendre en compte les effets de la pression ambiante, et de la porosité. (Droite) Résultats pour un modèles 3D homogène calculé par éléments frontières et un modèles 3D hétérogène, correspondant aux paramètres de gauche et calculé par domaines fictifs.

Afin de prendre en compte simultanément les topographies et les hétérogénéités de matériaux dans des inversions où la géométrie et la localisation des sources sont aussi cherchées, nous proposons une méthode d'éléments finis avec domaines fictifs. Cette méthode consiste à considérer la condition sur la fracture, comme un problème d'optimisation sous contrainte. Avec ce formalisme, le même maillage est utilisé quelle que soit la configuration de la fracture, et seules les contraintes appliquées sur les éléments de fracture changent, si bien que l'assemblage est plus rapide que pour les éléments finis

classiques. Le code est entièrement développé en C++ et s'appuie sur un logiciel éléments finis libre Getfem (<http://download.gna.org/getfem/html/homepage/>). Des résultats en 2D et 3D ont été présentés illustrant la robustesse de la méthode par rapport à la géométrie considérée, ainsi que l'optimalité des erreurs de calcul. Une calcul direct au Piton de la Fournaise a également été développé indiquant que la différence moyenne entre déplacements calculés sur un volcan homogène et un volcan hétérogène est de 52 % pour l'éruption de février 2000 (Figure 4). Cette méthode doit maintenant être combinée à des inversions.

I.1.4 Inversion de données d'interférométrie radar afin de déterminer les géométries de dikes

Thèse de Yo Fukushima, que j'ai encadrée entre 2002 et 2005 au LMV. Ce travail a été publié à J. Geophys. Res. (Fukushima et al., 2005). Cette méthode a été utilisée par de nombreux collaborateurs et étudiants en thèse; Elle a été améliorée lors des thèses de Marines Tridon (2013-2017) et de Delphine Smittarello (2016-2019).

Une méthode d'inversion a été développée (Fukushima et al., 2005) afin de déterminer des modèles réalistes de dikes à partir de données d'interférométrie radar. Cette méthode est basée sur la combinaison d'une méthode d'éléments frontières 3D (Cayol et Cornet, 1997, 1998) et d'un algorithme d'inversion de proches voisins (Sambridge 1999a, 1999b). Les dikes sont représentés par des géométries proches de quadrilatères, dont le côté supérieur atteint la surface et suit la trace des fissures éruptives. Ces quadrilatères peuvent être courbés le long de l'azimut ou du pendage. L'inversion se fait en deux étapes : la recherche et l'évaluation. Pendant la recherche, la variance et la corrélation du bruit des interférogrammes sont prises en compte. L'évaluation implique le calcul des probabilités marginales et utilise pour cela l'ensemble des modèles calculés au stade de la recherche. Des tests synthétiques ont confirmé que la méthode permettait de retrouver le

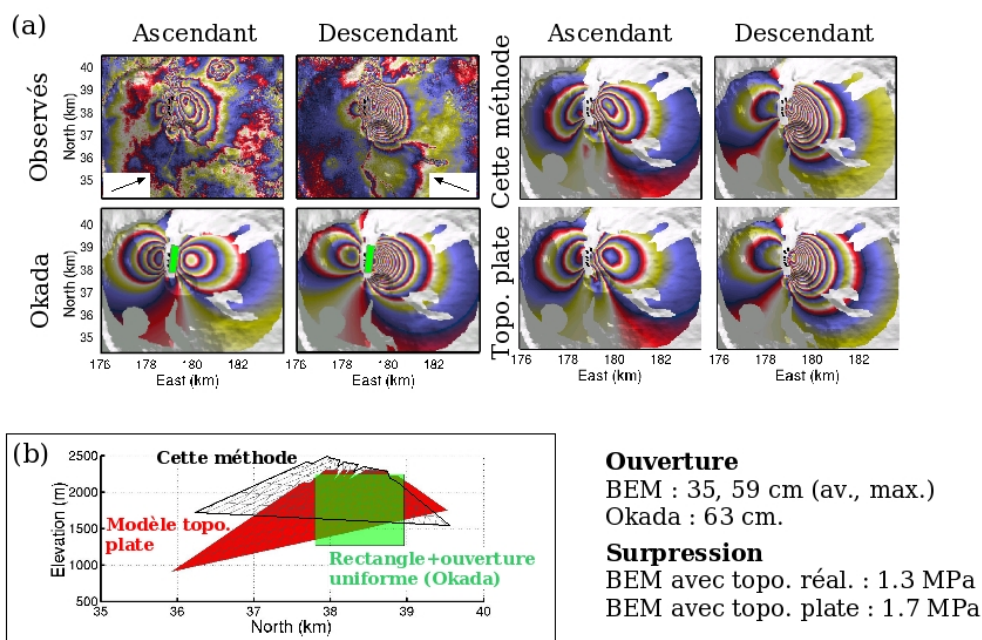


Figure 5 - Comparaison des modèles de probabilités maximales obtenus avec la méthode d'éléments frontières mixte avec topographie réaliste, le modèle d'Okada et la méthode d'éléments frontières mixte avec topographie plane. (a) Déplacements mesurés et calculés pour deux directions de visée du radar (b) Coupe Nord-Sud des géométries des dikes modélisés.

modèle initial dans des intervalles de confiance étroits. Il a aussi été montré que, négliger la topographie, conduit à une erreur d'estimation des profondeurs des dikes, et à une

surestimation des ouvertures et des surpressions (Figure 5). Pour un simple modèle analytique quadrangulaire, la surestimation de l'ouverture moyenne du dike est de 80%.

1.1.5 Interface pour l'inversion de déplacements de volcans

Cette interface a été développée au cours de 3 stages ingénieurs de 6 mois chacun, d'un stage de technicien de 4 mois, ainsi que par le recrutement d'un ingénieur pour 9 mois dans le cadre du projet Européen d'infrastructure visant à mettre en réseau les observatoire volcanologiques Européens (Eurovolc). J'ai aussi tout réécrit pour pouvoir maintenir cet outil. Une interface web permettant le lancement de calculs à la demande a aussi été développée.

Une interface a été développée afin de mettre au point et de lancer des inversions de données InSAR. L'objectif est de permettre aux non experts de déterminer la géométrie, la localisation et les variations de contraintes associées aux sources, qu'elles soient des intrusion de magmas, des réservoirs ou des failles. Les inversions sur lesquelles l'interface s'appuie (Fukushima et al., 2005 ; Tridon et al, 2016) combinent actuellement des modèles éléments frontières et des inversions de types proches voisins afin de déterminer les paramètres de modélisation non-linéaires (géométrie des sources et position) et linéaires (chute de contraintes cisailante, surpression), et de déterminer les densités de probabilités associées aux paramètres. Cette interface est modulaire et facilement adaptable à la méthode de domaines fictifs récemment développée.

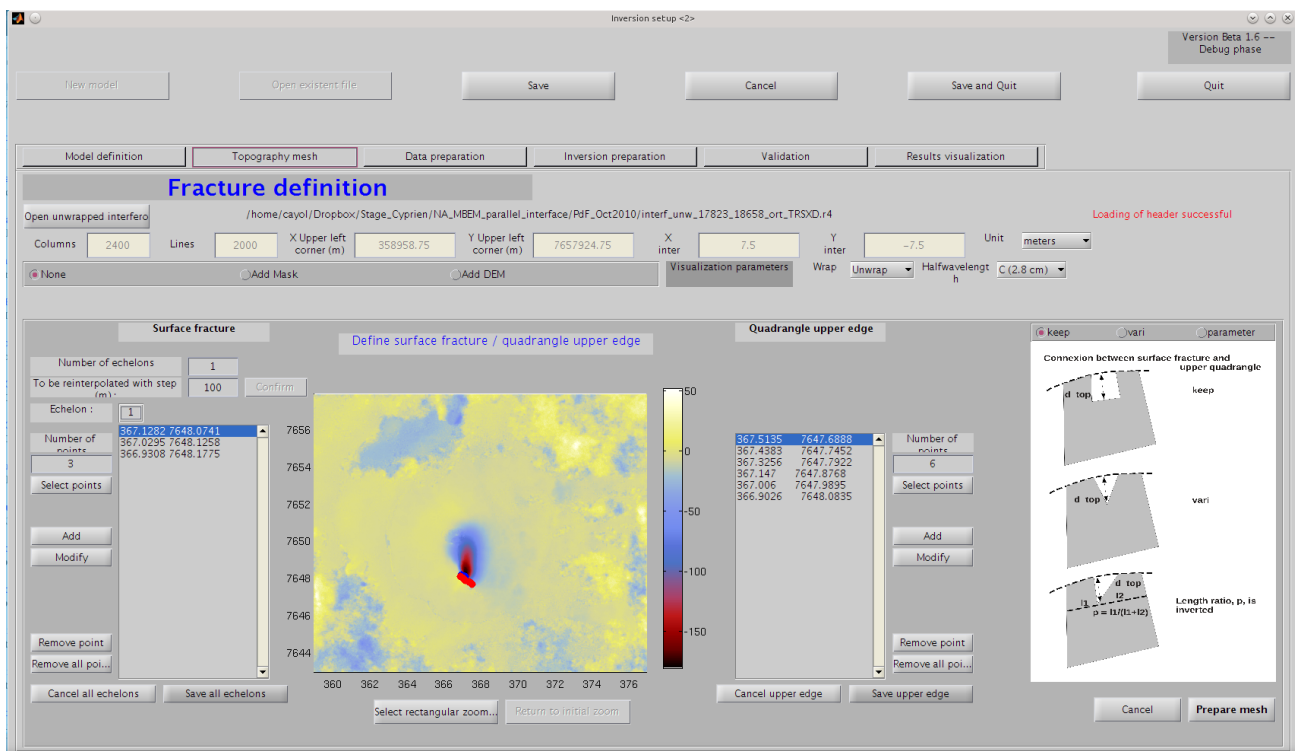


Figure 6: Interface pour la définition des inversions de données InSAR en contexte volcanique. Ici, la fenêtre permettant la définition des fractures est montrée, ainsi que les onglets correspondant aux différentes étapes.

Un gain de temps significatifs est réalisée par l'imbrication des étapes menant à la définition des inversions Ces étapes sont séparées dans des onglets qui permettent de nettement les identifier (Figure 6). Il s'agit : du sous-échantillonnage des données et de la création de matrices de covariance, de la définition des sources, de la définition des fissures en surface et de la conception d'un maillage de la surface, de la paramétrisation de l'algorithme de recherche. L'interface incorpore aussi des règles d'or de mécanique des roches et d'inversion. Enfin, des outils graphiques permettent de contrôler les différentes

étapes. L'utilisation de cette interface graphique permet de gagner un facteur 20 sur le temps de mise au point des inversions. Les inversions ont été parallélisées de façon à être lancées sur les clusters du mésocentre (utilisation de 50 processeurs simultanés), ce qui permet d'encore réduire le temps requis pour une inversion (voir <http://www.opgc.fr/defvolc>).

I.1.6 Inversion des distributions de contraintes sur des fractures

Ces études ont été l'objet de la thèse de Marine Tridon (2013-2017), de celle de Delphine Smittarello (2016-2019) et sont l'objet du post-doctorat de Farshid Dabaghi (2017-2018 et 2019-actuel). 2 articles à JGR (Tridon et al., 2016; Smittarello et al., 2019) et un article à Remote Sensing (Smittarello et al., 2019) ont été publiés sur ce sujet.

Les modèles inverses effectués jusqu'ici supposent que les contraintes sont homogènes sur les fractures. Or, la croûte terrestre est complexe : elle est hétérogène, les contraintes crustales résultent de l'histoire en contraintes, les pressions de magma comme les contraintes lithostatiques augmentent avec la profondeur, le frottement du magma sur les parois des conduits crée des gradients de pressions, les glissements de failles sont hétérogènes du fait des géométries complexes des fractures et des hétérogénéités de la friction. Dans nos modèles à contraintes imposées, les contraintes homogènes donnent des ouvertures de fractures qui augmentent progressivement des bords vers le centre des fractures, ce qui est conforme aux observations de terrain d'intrusions et aux inversions basées sur des solutions en déplacements sur les fractures (*Tung and Masterlark, 2016 ; Currenti et al., 2011*). La prise en compte des variations de contraintes sur les fractures permet de mieux comprendre la dynamique des transferts de magma et de mieux imager les hétérogénéités de glissement (donc de friction) sur les fractures. Ainsi, on améliore l'évaluation de l'aléa lié aux glissements de flancs ou aux séismes.

Plusieurs approches ont été poursuivies pour les milieux élastiques homogènes :

- *Fukushima et al. (2010)* ont tenté d'inverser des variations de pressions dont l'augmentation est linéaire avec la profondeur. Néanmoins, pour l'éruption de mars 1998, la large gamme de gradients possible indique que ce paramètre est mal contraint.
- *Tridon et al. (2016)* ont exploré des combinaisons de contraintes cisailantes et normales afin de comprendre si le glissement de flanc du Piton de la Fournaise de 2007 était lié à une intrusion de magma cisailée ou à une faille. Dans cette approche, seule une portion de faille était soumise à une variation de contraintes, qu'elle soit normale, cisailante ou mixte, le reste de la fracture se déplaçant passivement. Nous avons trouvé que l'ensemble de la faille était soumis à une variation de contraintes et qu'il n'y avait pas de déplacements passifs.
- *Smittarello et al (2019a et 2019b)*, ont développé d'autres approches pour suivre la dynamique de la propagation du magma à partir de l'inversion conjointe de données InSAR (grande résolution spatiale) et GNSS continues (grande résolution temporelle). La géométrie finale de l'intrusion est déterminée à l'aide des interférogrammes couvrant toute l'éruption. Pour suivre la dynamique de la propagation, cette géométrie est utilisée comme *a priori* pour déterminer la zone de la fracture pressurisée à partir de données GNSS. Deux méthodes ont été comparées. L'une suppose que la zone sous pression correspond à un cercle projeté sur la surface de la fracture (Figure 7a, *Smittarello et al., 2019a*), l'autre s'appuie sur la description des éléments de maillage par des graphes, c'est à dire des listes de nœuds reliés à un nœud particulier par un nombre donné de cotés d'éléments (Figure 7b, *Smittarello et al., 2019b*). Cette seconde méthode explique mieux les données GNSS et aboutit à une fissure dont l'historique d'ouverture est

plus cohérente avec le moment de l'ouverture de la fissure, déterminé par le trémor.

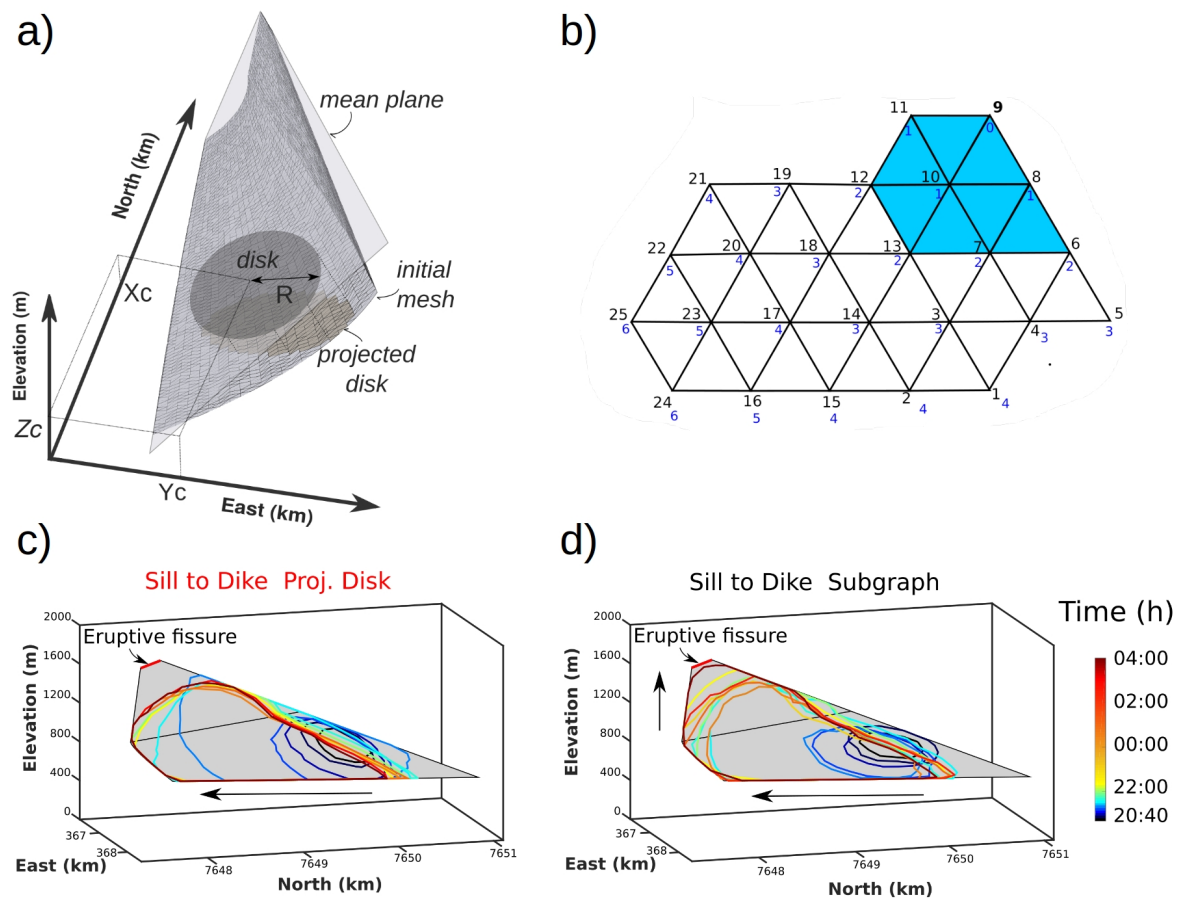


Figure 7: Détermination de la partie pressurisée d'une fracture. a) Méthode des disques projetés (Smittarello et al., 2019a). Le cercle est défini sur le plan médian de l'intrusion avant d'être projeté sur la fracture incurvée. b) Méthode des graphes. Les numéros en bleus sont la distance en nombre de cotés aux nœud 9 (Smittarello et al., 2019b). c) Propagation de l'intrusion de mai 2016 par la méthode des disques projetés. d) Propagation de l'intrusion de mai 2016 par la méthode des graphes.

Actuellement, ces recherches sont poursuivies pour des milieux hétérogènes, avec le formalisme domaines fictif présenté en section I.1.3. Ces recherches se font en collaboration avec des collègues mathématiciens.

I.1.7 Inversion des déplacements associée à des sources de déformation volumiques

Cette étude a été développée au cours de la thèse d'Aurélien Augier qui s'est déroulée de septembre 2008 à septembre 2011. Cette thèse a été co-encadrée par Jean-Luc Froger et moi-même au Laboratoire Magmas et Volcans (LMV). Aurélien n'écrivant pas l'anglais, la finalisation de cette publication repose principalement sur mes épaules. Une publication a été soumise au Journal of Geophysical Research en 2017, elle a été rejetée, et la resoumission étant encouragée. Elle devrait être re-soumise d'ici peu.

Pour des sources de déformations telles que des réservoirs magmatiques ou des systèmes hydrothermaux, les méthodes de nuages de sources ponctuelles permettent de déterminer les sources sans faire d'hypothèse sur la géométrie ou la localisation des sources (Vasco et al., 2002 ; Masterlark et al., 2004). Pour cela, la croûte est discrétisée par

des sources ponctuelles réparties régulièrement dans le milieu élastique. Une relation linéaire $\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{s}$ peut alors être établie entre l'intensité des sources $\mathbf{s}$ et les déplacements en surface $\mathbf{d}$. Afin d'obtenir des variations de volumes cohérentes entre sources voisines, une continuité entre les sources de déformations est imposée. Ici, la contrainte sur l'inversion correspond au Laplacien des amplitudes de sources, pondéré par un paramètre d'amortissement ρ^2 . On cherche donc les sources $\hat{\mathbf{s}}$, qui minimisent la fonction coût suivante :

$$F(\hat{\mathbf{s}}, \rho) = \|\mathbf{d} - \mathbf{G}\hat{\mathbf{s}}\|^2 + \rho^2 \|\mathbf{L}\hat{\mathbf{s}}\|^2.$$

Le plus souvent, les milieux considérés sont semi infinis, si bien que la topographie est négligée. Le plus souvent aussi, le paramètre de lissage ρ^2 est choisi graphiquement de façon à présenter le meilleur compromis entre misfit $\|\mathbf{d} - \mathbf{G}\hat{\mathbf{s}}\|^2$ et rugosité $\rho^2 \|\mathbf{L}\hat{\mathbf{s}}\|^2$ (Vasco *et al.*, 2002). Or, négliger la topographie induit des erreurs dans les estimations des volumes (Cayol et Cornet, 1998) et il existe parfois toute une gamme de paramètres de lissage ρ^2 présentant un compromis acceptable entre misfit et rugosité. Ces ρ^2 acceptable mènent à des déterminations de sources très différentes. L'étude développée utilise plusieurs types de sources synthétiques calculées par éléments frontières afin (i) d'estimer les effets de la topographie sur la détermination des sources et de proposer une méthode permettant de la prendre en compte; (ii) de déterminer le paramètre ρ^2 permettant de mieux expliquer les données.

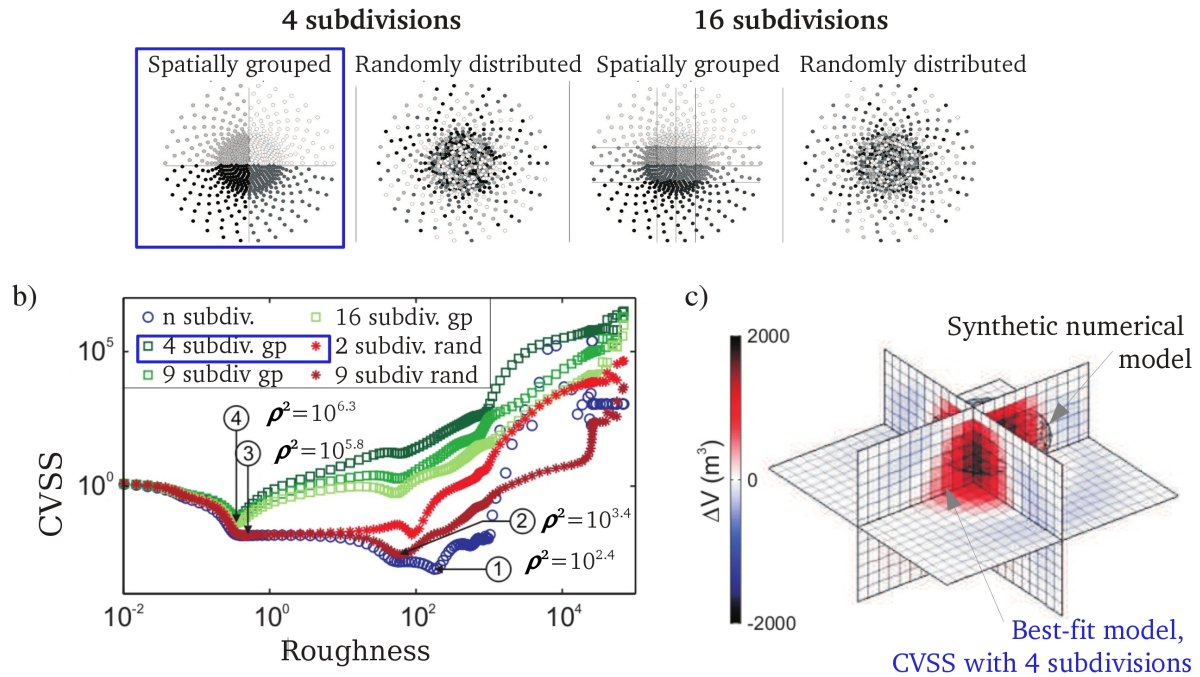


Figure 8: Détermination de la meilleure subdivision des données pour la méthode de cross-validation. a) Subdivisions des données testées. b) Courbes montrant l'ajustement des données en fonction du lissage ρ^2 pour les différentes subdivisions. c) Comparaison entre un modèle synthétique éléments frontières et les résultats de la cross-validation correspondant à 4 subdivisions des données.

La méthode utilisée est une méthode de cross-validation (CVSS), qui consiste à ajuster le modèle sur un groupe de données et à tester cet ajustement sur les données omises, puis à choisir le modèle qui ajuste le mieux les données omises. Plusieurs subdivisions des données pour la méthode de cross-validation ont été testées par des tests synthétiques (Figure 8). Enfin, afin de ne prendre en compte que les sources les plus significatives, une méthode d'élimination itérative des sources est implémentée, et validée par l'utilisation du

critère d'Akaike. Ce critère permet de déterminer le nombre de paramètre permettant d'obtenir le modèle le plus vraisemblable.

Cette méthode a été initialement mise au point pour un milieu homogène. Les fonctions de Green numériques étaient calculées par éléments frontières dans un milieu homogène, les sources étant suffisamment éloignées pour ne pas interagir. Lors de mon séjour au Cascade Volcano Observatory entre 2016 et 2017, j'ai commencé à adapter la méthode aux milieux hétérogènes en calculant les fonctions de Green numériques à l'aide de la méthode de domaines fictifs.

I.1.8 Interpolation d'interférogrammes

Cette étude a été développée au cours de la thèse d'Aurélien Augier qui s'est déroulée de 2008 à 2011. Une publication est écrite pour Geophysical Research Letter. Cette publication est aussi proche d'être soumise.

Afin de complètement caractériser les champs de déplacements 3D ou de déterminer les sources de déformations, on combine les interférogrammes acquis selon plusieurs angles de visées (Wright et al., 2004). Comme ces interférogrammes couvrent des périodes inégales, leur combinaison peut être problématique quand on étudie des processus de déformations continus. Cette étude présente deux méthodes d'interpolation d'interférogrammes (linéaire et par spline cubiques Hermite) qui permettent de ramener les interférogrammes à de mêmes périodes de temps. Les deux méthodes sont appliquées aux déplacements du Piton de la Fournaise qui ont suivis l'effondrement de caldera d'avril 2007. Les déplacements interpolés obtenus sont cohérents avec les données GPS enregistrées simultanément. Avec l'interpolation d'interférogrammes, les déplacements 3D correspondant à la période post-éruptive sont déterminés avec de plus faibles incertitudes et les sources inversées ont de plus petits intervalles de confiance que celles trouvées par l'inversion des données d'origine couvrant des périodes inégales (Figure 9).

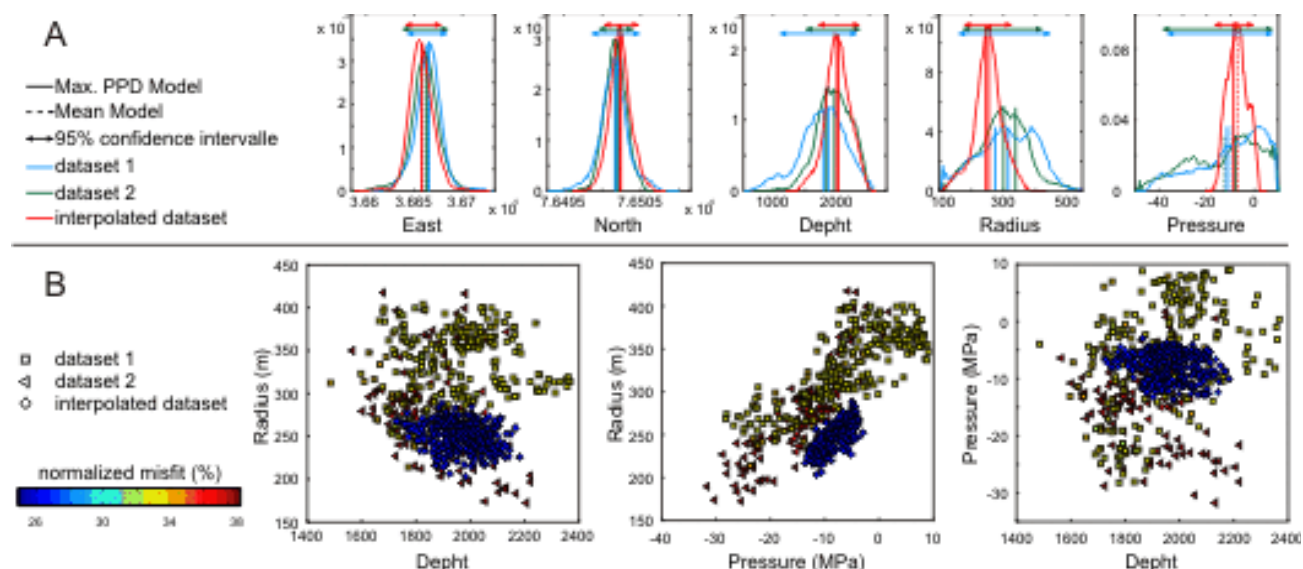


Figure 9: Comparaison des paramètres des sources déterminés en utilisant les interférogrammes interpolés et les interférogrammes originaux pour la période suivant l'effondrement de caldera d'Avril 2007. (a) Densité de probabilité a posteriori et intervalles de confiance à 95%, meilleur modèle et modèle moyen. (b) Compromis entre paramètres d'une sources sphérique.

I.1.9 Influence des directions d'acquisition des données InSAR pour l'inversions

Etude de Quentin Dumont, en thèse au Laboratoire Magmas et Volcans depuis 2018 avec Jean-Luc Froger et moi-même. Un article va être soumis à GRL, Oct. 2020.

L'amplitude des déplacements enregistrés par InSAR dépend à la fois des sources de déformation crustale et des directions d'acquisitions par les satellites munis de radar. Des tests synthétiques comparant les modèles déterminés sans pondération des directions d'acquisitions (Figure 10) montrent que ces directions peuvent biaiser les résultats. Plusieurs méthodes ont été testées afin de s'affranchir de ces biais. Une méthode se basant sur une pondération de la covariance a été comparée à une méthode utilisant les données InSAR non déroulées. Cette comparaison indique que la pondération de la covariance est aussi fiable que l'inversion de données non déroulées, et que cette méthode est plus rapide. Au Piton de la Fournaise, la pondération de la covariance permet d'obtenir un modèle plus en accord avec le contexte géologique.

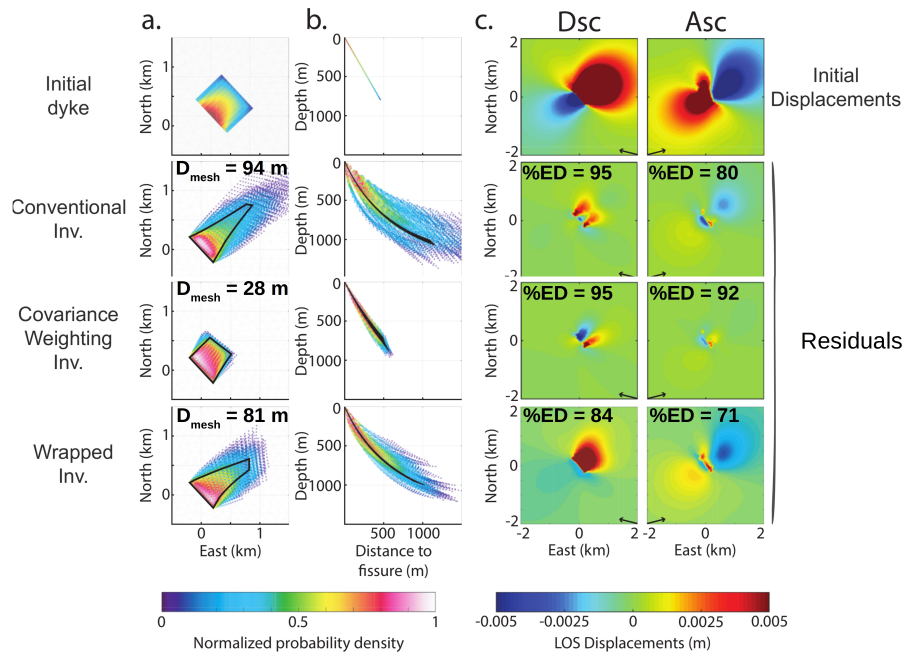


Figure 10: Influence des géométries d'acquisitions sur les modèles inverses. Les distances au maillage initial (D_{mesh}) et les % de données expliquées sont indiqués. Conventional Inv. correspond à une inversion pour laquelle les données sont pondérées par les erreurs de mesure et de modélisation, Covariance Weighting Inv. correspond à des inversions où la covariance est pondérée de façon à donner la même vraisemblance à chaque jeu de données, Wrapped Inv. à une inversion sur les données enroulées.

1.2 Inversions conjointes

Afin de mieux caractériser la structure des édifices et les sources de l'activité de surface, je développe des inversions conjointes d'observations de données différentes liées à un même processus physique. Ainsi, lorsque du magma s'injecte dans la croûte ou que des failles macroscopiques rompent, les contraintes et le champ de gravité varient. Les variations de contraintes entraînent à la fois des déformations et des glissements sur des populations de failles à l'équilibre critique, se manifestant par des microséismes. Les inversions conjointes des déformations de surface et des microséismes permettent de mieux caractériser les processus éruptifs (Dieterich et al., 2003 ; Segall et al., 2013) ou les déstabilisations de failles majeures. En outre, les déformations crustales modifient le champ de gravité que l'on peut mesurer soit par le biais de campagnes gravimétriques effectuées après les éruptions (Bonvalot et al., 2005), soit par des mesures satellites. Les recherches sur les variations conjointes déformations - gravité seront présentées dans la partie projet.

I.2.1 Inversions conjointes sismicité – déformations

Collaborations avec J. Dieterich, P. Okubo et A. Miklius de l'U.S. Geological Survey. Cette étude a été publiée dans *Nature* (Dieterich et al., 2000) et un article de l'U.S. Geological Survey Prof. Paper (Dieterich et al., 2003).

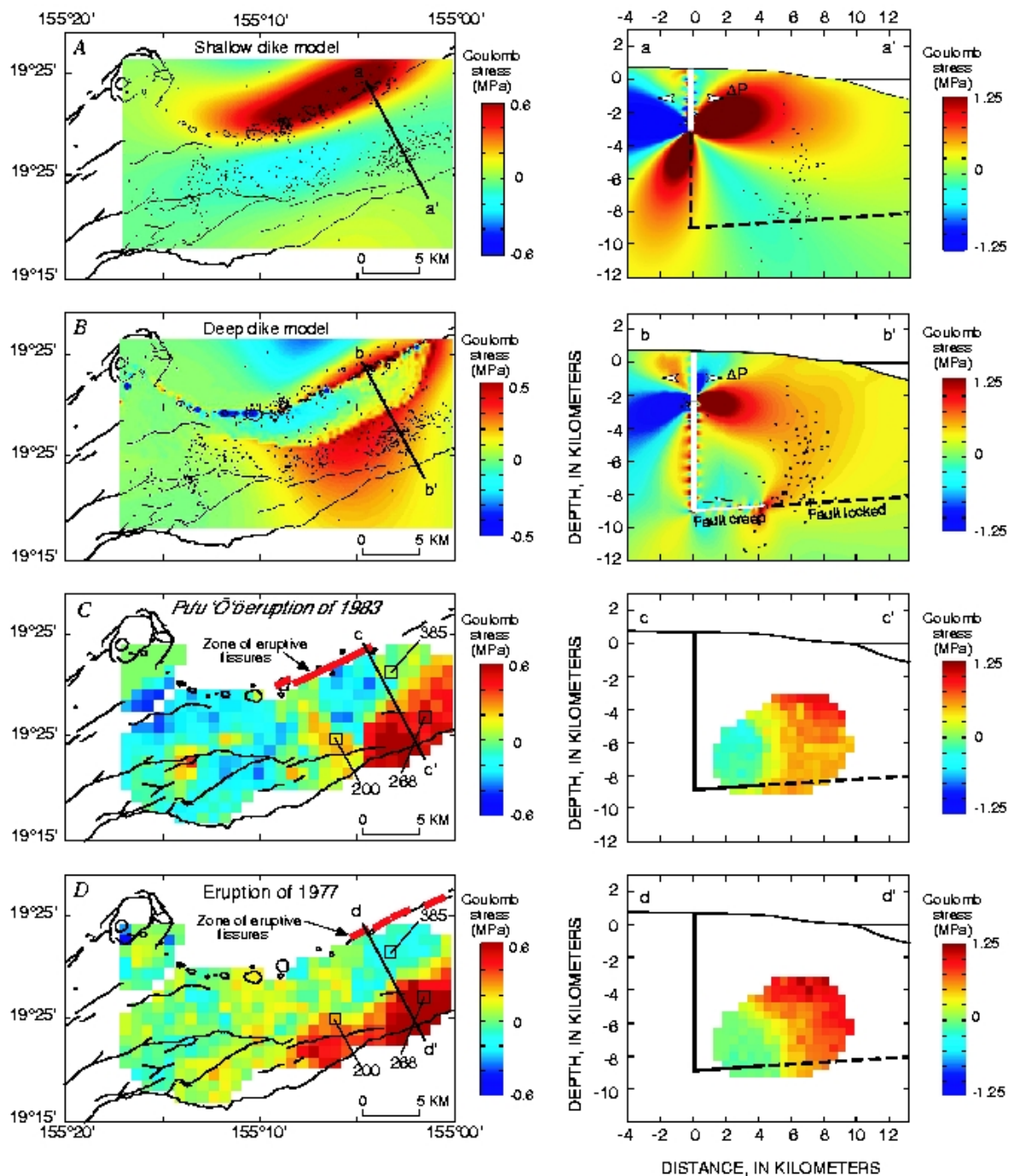


Figure 11 - Vue de dessus et en coupe des contraintes de Coulomb associées aux éruptions de rift est du Kilauea, Hawaii, USA du 13 septembre 1977 et du 3 janvier 1983. A. Contraintes calculées à partir d'un modèle de déformation correspondant à un dike superficiel. B. Contraintes calculées à partir d'un modèle de déformation correspondant à un dike se propageant verticalement depuis les zones de rift vers la surface. C. Contraintes calculées à partir des variations de taux de sismicité lors de l'éruption du Pu'u O'o en 1983. D. Contraintes calculées à partir des variations de taux de sismicité enregistrés lors de l'éruption de septembre 1977. Quand les contraintes de Coulomb sont positives les failles se rapprochent de la rupture.

Les variations de contraintes dans la croûte terrestre sont le plus souvent déterminées à partir des déformations de surface. Des observations nombreuses entre variation de contraintes et variations d'activité sismique suggèrent la possibilité d'utiliser les catalogues de sismicité pour estimer les variations de contraintes. J'ai validé une nouvelle méthode permettant de déterminer quantitativement les variations de contraintes de Coulomb¹ à partir de la microsismicité (*Dieterich et al., 2000*). Cette méthode est basée sur l'utilisation d'une formulation constitutive (*Dieterich, 1994*) décrivant la nucléation de séismes consécutive à des variations de contraintes. La loi de friction utilisée (dite "rate and State") est tirée d'observations de laboratoire (*Dieterich, 1979; Ruina, 1983*). Elle dépend du glissement, de la vitesse de glissement, de l'histoire en contraintes de la faille, et du temps. Cette méthode a été testée sur l'éruption du Pu'u O'o de 1983 car un jeu de données de déformations (distancemétrie) et de microsismicité exceptionnel était disponible. Les contraintes de Coulomb associées à la fissure éruptive ont été calculées par éléments frontières pour deux modèles d'éruption qui expliquaient aussi bien les données de déformation : un modèle d'intrusion latérale de dike superficiel (Figure 11A) et un modèle dans lequel le dike des zones de rift se propage verticalement depuis une profondeur de 3 km jusqu'en surface (Figure 11B). La comparaison de ces contraintes avec celles déduites des taux de sismicité (Figure 11C) permet de valider l'utilisation des taux de sismicité pour la détermination des changements de contraintes de Coulomb (*Dieterich et al., 2000*). Cette comparaison permet aussi de définir le mécanisme éruptif au Kilauea : les dikes en surpression se propagent verticalement depuis le réservoir des zones de rift jusqu'en surface, plutôt que latéralement, puisque les contraintes déterminées par l'inversion de la microsismicité sont en accord avec ce mécanisme (*Dieterich et al., 2003*). Ce modèle est cohérent mécaniquement avec un modèle de déformation établi pour la période 1976-1983 (voir section I.3.1).

En utilisant cette méthode pour étudier l'histoire de la mise en contraintes du volcan, nous trouvons que les taux de contraintes ont diminué d'un facteur 5, probablement au début de l'éruption du Pu'u O'o. Ces variations de contraintes sont cohérentes avec une diminution du volume de magma stocké dans les zones de rift après le début de l'éruption du Pu'u O'o. Enfin, il apparaît que les séismes ayant suivi cette éruption se sont vraisemblablement produits sur les mêmes segments de failles (*Dieterich et al., 2003*).

I.2.2 Inversion conjointe muographie – gravimétrie

Cette étude a été menée dans le cadre du Post-doctorat d'Anne Barnoud effectué entre septembre 2016 et fin août 2018, en collaboration avec C. Carloganu du Laboratoire de Physique Corpusculaire (UMR 6533), Université Clermont Auvergne. Elle a donné lieu à deux publications à GJI (Barnoud et al., 2019; Lelievre et al., 2019). Un article Barnoud et al., 2020 est en révision mineure pour Scientific Report .

Les données de muographie et de gravimétrie sont deux mesures indépendantes sensibles aux distributions de densité. L'inversion gravimétrique permet de déterminer des variations de densité 3D mais le processus inverse est mal posé amenant à des solutions non uniques. La muographie fournit, quant à elle, des images 2D de la densité intégrée grâce à la détection de muons atmosphériques de haute énergie traversant l'édifice volcanique. Plusieurs images muographiques selon différents points d'observations peuvent être utilisées pour reconstruire les distributions de densité, mais leur nombre est généralement limité par l'instrumentation et les contraintes de terrain.

1 Les contraintes de Coulomb sont définies par $\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma_n)$ où $\Delta\tau$ est la variation de contraintes cisailantes sur un plan de rupture donné (positive dans le sens du glissement) et $\Delta\sigma_n$ est la variation de contraintes normales (positive en compression). μ est le coefficient de friction effectif (inclus la pression de fluides dans les pores). Il est ici égal à 0.35.

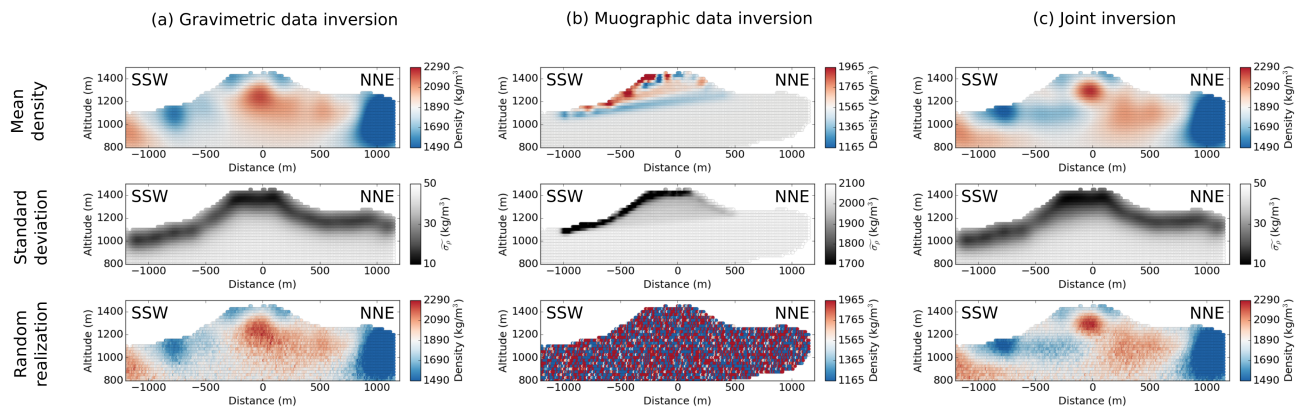


Figure 12: Apport des inversions conjointes à la détermination des densités. Cas du puy de Dôme. Les densités (haut) et les écarts types *a posteriori* (bas) sont représentés sur une section verticale. a) Inversion des données de gravimétries b) Inversion des données de muographie, 1 point de vue. c) Inversion conjointe des données de gravité et de muographie. Les figures du bas représentent des réalisations aléatoires de la distribution *a posteriori*.

L'inversion conjointe des données gravimétriques et muographiques vise à améliorer la résolution de l'inversion de chaque technique (Jourde et al., 2015). Un schéma d'inversion linéaire avec un formalisme bayésien (Tarantola, 2005) est utilisé. Cette approche prend en compte les erreurs sur les données et une information *a-priori* sur la distribution de densité avec une pondération par une matrice de covariance permettant l'obtention de modèles lisses. Le résultat de l'inversion dépend de deux hyperparamètres : l'écart-type sur la densité *a-priori* et la longueur de la corrélation. Les inversions conjointes réalisées sur le volcan Usu, Japon (Nishiyama et al., 2014) exploraient systématiquement les hyperparamètres pour un test synthétique correspondant à une distribution de densité particulière. Tandis, que les inversions réalisées sur la Soufrière de la Guadeloupe (Rosas-Carbajal et al., 2017) pondéraient les termes de la matrice de covariance par une fonction dépendant de la profondeur pour les données gravimétriques et de la distance au télescope à muons pour les données muoniques. Ici, nous explorons les deux hyperparamètres de manière systématique et nous comparons les méthodes des L-curves (détermination du meilleur compromis entre fonction coût et lissage du modèle) et la Cross-Validation Sum of Squares (meilleure prédiction de données omises) pour les optimiser. L'application de l'inversion conjointe au puy de Dôme montre que la technique permet de préciser l'enracinement du dôme 200 m sous le sommet (Figure 12).

1.3 Transferts de magma

Ces études visent à établir des bilans de volumes de magma, et à comprendre comment le magma s'injecte dans la croûte, par quels chenaux, avec quelles pressions, et à quels taux. Un des objectifs est de comprendre quels sont les paramètres physiques et mécaniques qui guident la propagation du magma dans les édifices (hétérogénéités de propriétés mécaniques, intrusions préexistantes).

1.3.1 Etude des contraintes et des transferts de magma au Kilauea avant et pendant l'éruption du Pu'u O'o-Kupaianaha (1983)

Collaborations avec J. Dieterich, P. Okubo et A. Miklius de l'U.S. Geological Survey. Cette étude a été publiée à Sciences en 2000 et un U.S. Geological Survey Prof. paper en 2003.

Après le séisme de M7.2 en 1975 et avant l'éruption du Pu'u O'o de 1983, les déformations du Kilauea furent les plus rapides jamais enregistrées, avec des taux de déplacements

atteignant 25 cm/an au niveau de la caldera sommitale du volcan. La modélisation par éléments frontières (Cayol et al, 2000) montre que ces déformations sont cohérentes avec l'inflation d'un dike situé sous les zones de rift qui entraîne le fluage d'une faille subhorizontale située sous le flanc sud (figure 13). Les taux de magma transmis au volcan sont estimés à 0.18 km³ par an, ce qui est deux fois plus important que les estimations précédentes (Swanson, 1972; Dzurisin, 1984), mais ce qui s'explique par le fait que notre modèle prend en compte l'ensemble des déformations de la rift zone. En ajoutant les volumes de magma stockés dans le volcan aux volumes de magma émis en surface, j'ai pu estimer que l'on pouvait étendre notre estimation à la période 1961-1991.

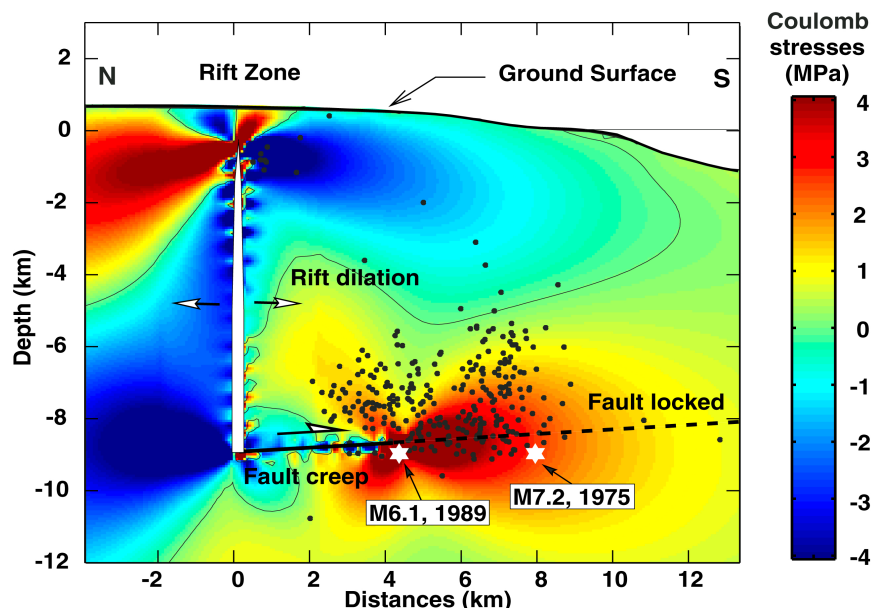


Figure 13: Contraintes de Coulomb et séismes de $M \geq 1.5$ entre 1976 et 1982. La section verticale recoupe l'Est de la rift zone. La partie de la faille qui flue est représentée par un trait continu, tandis que la partie bloquée est représentée par des pointillés. Les plans de rupture potentiels considérés sont subhorizontaux et sont tels que les contraintes de Coulomb positives indiquent que le glissement du flanc sud vers la mer est facilité.

Le taux annuel d'ouverture du rift est de 40 cm/an, ce qui est cohérent avec l'ouverture du dike de 2.1 m mesurée en surface au moment de l'éruption du Pu'u O'o en 1983. Ceci suggère que l'éruption résulte de l'accumulation de magma dans le réservoir en forme de dike depuis le séisme de 1975. Enfin, ce modèle fournit une explication mécanique à la production de séismes au large de la rift zone (figure 13) : la zone de fluage de la faille est telle que les contraintes de Coulomb sont maximum à l'endroit où la microsismicité est la plus élevée; la portion de la faille bloquée correspond à la zone qui s'est rompue lors des séismes de 1975 et 1989.

I.3.2 Étude des transferts de magma au Piton de la fournaise entre 1998-2000

Cette recherche a été menée durant le doctorat de Yo Fukushima, que j'ai encadré entre 2002 et 2005 au LMV. Ce travail a été effectué en collaboration avec P. Durand et D. Massonnet au CNES. Un article est paru en Novembre 2010 au Journal of Geophysical Research (Fukushima et al., 2010).

Les cinq éruptions survenues de 1998 à Juin 2000 au Piton de la Fournaise ont été analysées (Fukushima et al., 2010) par la combinaison d'une méthode numérique de modélisation et d'un algorithme d'inversion de proches voisins (Fukushima et al., 2005). La plupart des dikes déterminés ont un pendage vers le mer de 65°. Le dike associé à la première éruption du cycle (mars 1998) s'enracine au niveau de la mer, 2000 m sous la

surface du sol, tandis que les dikes suivants sont situés à moins de 1000 m sous la surface (Figure 14). Les dikes sont tous situés au dessus des essaims sismiques. L'absence de microsismicité au niveau des intrusions peut être expliquée par les contraintes lithostatiques, déterminées par l'analyse de l'éruption de 1983 (Cayol et Cornet, 1998). Le volume des dikes représente 11% du volume de lave émis, ce qui montre que la croissance exogène domine la croissance du volcan, et s'inscrit bien dans un contexte d'intrusions mise en place dans une croûte aux contraintes lithostatiques (Rubin et al., 1990). De façon générale, les dikes sont allongés horizontalement. Ceci est cohérent avec les observations visuelles et les données d'inclinométrie continues (Peltier et al., 2005) qui indiquent que les fissures éruptives se propagent depuis la région sommitale vers l'aval du volcan.

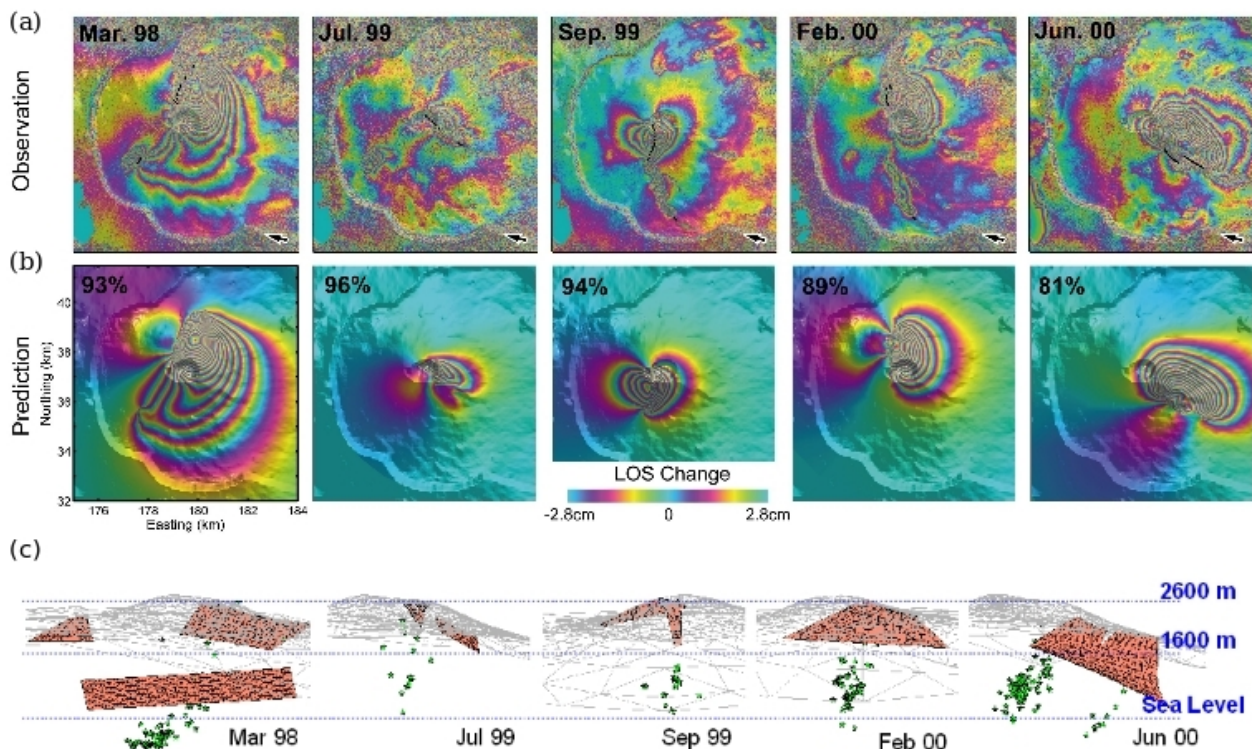


Figure 14 - Meilleurs modèles obtenus à partir des interférogrammes RADARSAT-1 pour les éruptions survenues de 1998 à 2000. (a) Interférogrammes calculés. Une frange représente 2.8 cm de déplacement vers le satellite. La projection horizontale de la direction Terre-satellite est indiquée par la flèche. (b) Interférogrammes correspondant aux modèles qui expliquent le mieux les données au sens des moindres carrés. Les pourcentages de données expliqués sont indiqués. (c) Coupes Nord-Sud montrant les dikes qui expliquent le mieux les données. Les micro-séismes pré-éruptifs sont montrés par des étoiles vertes.

Avant les éruptions, des essaims sismiques, parfois allongés verticalement, se produisent à des profondeurs variant entre le niveau de la mer et la base des fractures déterminées grâce aux données InSAR. Simultanément aux essaims sismiques, des variations d'inclinaisons sont enregistrées. Ces deux types de signaux sont dus au passage du magma. Nous avons montré qu'un conduit ayant la forme d'une fissure allongée verticalement pouvait expliquer l'amplitude du signal d'inclinaison, tandis qu'un conduit en forme de cylindre ne le pouvait pas. Ce conduit n'est pas visible sur les données d'interférométrie soit parce qu'il est trop étroit, soit parce qu'il se referme après le passage du magma. Le transfert du magma se fait donc verticalement en profondeur et

latéralement, plus superficiellement.

Le changement de la direction de transfert du magma est mécaniquement cohérent avec un niveau d'équilibre du magma (niveau de flottabilité neutre) situé au niveau des fissures éruptives superficielles. Ce niveau d'équilibre pourrait correspondre à une zone de stockage superficiel du magma dans l'édifice. Après quelques heures, les éruptions se focalisent en un seul événement du fait du refroidissement du magma, et de l'abrasion du conduit par l'écoulement de magma. Les débits observés en surfaces sont compatibles avec un conduit cylindrique d'un rayon d'un mètre.

I.3.3 Déplacements sommitaux post-éruptifs associés à l'éruption du Piton de la Fournaise d'Avril 2007

Cette étude a été développée au cours de la thèse d'Aurélien Augier. C'est une application de la méthode de nuages de sources ponctuelles présentée plus haut, qui devrait être resoumise à Journal of Geophysical Research.

Entre le 30 mars et le 1er mai 2007, le piton de la Fournaise a connu une crise éruptive majeure caractérisée par un volume émis parmi les plus importants du siècle et par un effondrement du cratère sommital sur plus de 300 m de profondeur. Les déplacements du sol associés à cette éruption ont été mesurés par plus de 350 interférogrammes calculés à partir de données acquises selon plusieurs directions par les satellites ENVISAT (une frange = 2.8 cm) et ALOS (une frange = 11.5 cm). Des séries temporelles (Lundgren and Usai, 2001) ont été calculées pour plusieurs angles de visées afin de suivre l'évolution des déplacements du volcan après l'éruption. On observe que les déplacements concentriques de la partie sommitale persistent à des taux décroissants pendant plus d'une année après la fin de l'éruption. L'analyse des déplacements sommitaux post-éruptifs a été faite selon deux méthodes. Une première méthode, décrite en section I.1.7, permet de s'affranchir des *a-priori* sur la géométrie des sources de déformations. Cette méthode, qui combine la superposition de sources ponctuelles à un critère de lissage, a été utilisée afin de déterminer l'évolution spatiale et temporelle de ces sources. Une seconde méthode suppose une source unique de déplacements, et combine des modélisations élastostatiques et des inversions de type Monte-Carlo (Fukushima et al., 2005).

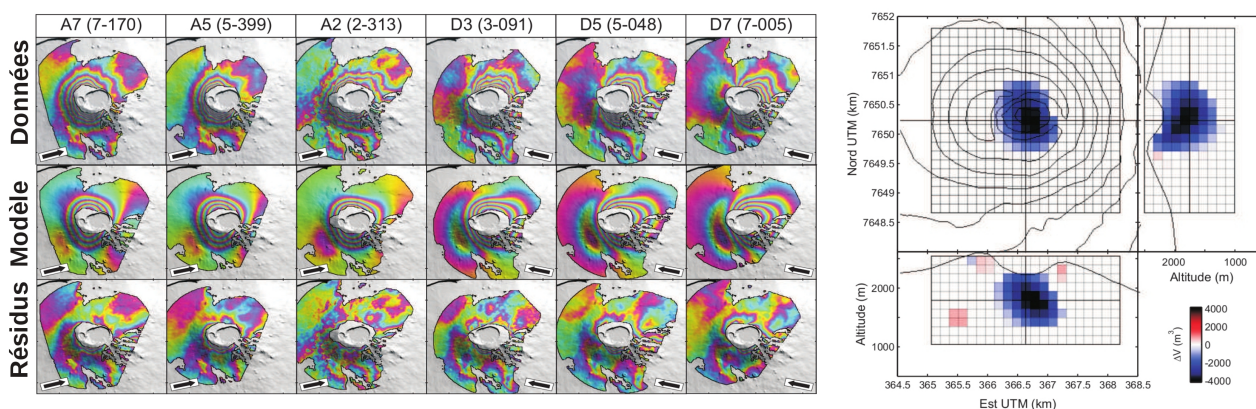


Figure 15: Méthode de nuages de sources ponctuelles appliquée à la période de déflation de mai 2007 - juillet 2008 du Piton de la Fournaise. 3 interférogrammes ascendants et 3 interférogrammes descendants ont été inversée simultanément.

Les mêmes résultats ont été obtenus par les deux méthodes : la source est très superficielle (Figure 15) et elle conserve la même géométrie au cours du temps. Cette source est située au même endroit que le système hydrothermal décrit par des mesures électriques et électro-magnétiques (Lénat et al., 2000). Cette étude montre aussi que la

diminution de volume s'atténue avec le temps. Ce résultat, ainsi que les anomalies thermiques (Urai et al., 2007) et l'intense activité fumerolienne (Gouhier et al. 2011) observées après l'effondrement, indiquent que ces déplacements sont probablement dus au réajustement du système hydrothermal après que la perméabilité des roches intracaldérique ait été accrue par l'effondrement.

I.3.4 Propagation du magma lors des intrusions au Piton de la Fournaise par l'inversion conjointe de données InSAR et GNSS

Thèse de Delphine Smittarello qui s'est déroulée en 2016-2019 au laboratoire IsTerre de l'université de Savoie, sous la direction de Virginie Pinel et moi-même. L'application au Piton de la Fournaise se fait en collaboration avec Aline Peltier directrice de l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise. Les modélisations analogiques ont été menées avec Francesco Maccaferri de GFZ à Postdam. Cette étude aboutit à deux publications (Smittarello et al., 2019a et 2019b). Une autre est en préparation sur les modélisations analogiques.

Le magma stocké sous les volcans basaltiques est transporté en se propageant dans des intrusions planaires, conduisant à des éruptions fissurales lorsque les intrusions intersectent la surface. Cette propagation est un processus instable et complexe contrôlé par l'interaction magma-croûte. Au Piton de la Fournaise (La Réunion, France), les intrusions partent de la zone sommitale et se font quasiment à vitesse constantes, si bien que les durées d'intrusions dépendent linéairement de la distance entre le sommet et les fissures éruptives. En outre, certaines intrusions n'amènent pas à des éruptions. L'éruption de mai 2016 a été exceptionnelle par la lenteur relative du processus intrusif, ce qui a permis une acquisition InSAR alors que l'intrusion était en cours de propagation. La méthode utilisée pour suivre la propagation du magma à partir de l'inversion conjointe de données InSAR et GNSS est celle présentée en section I.3.4. L'intrusion imagée à partir de données InSAR consiste en un sill de 2700 m de long situé à 800 m d'altitude, relié à la fissure éruptive par un dike sub-vertical de 880 m (Figure 16).

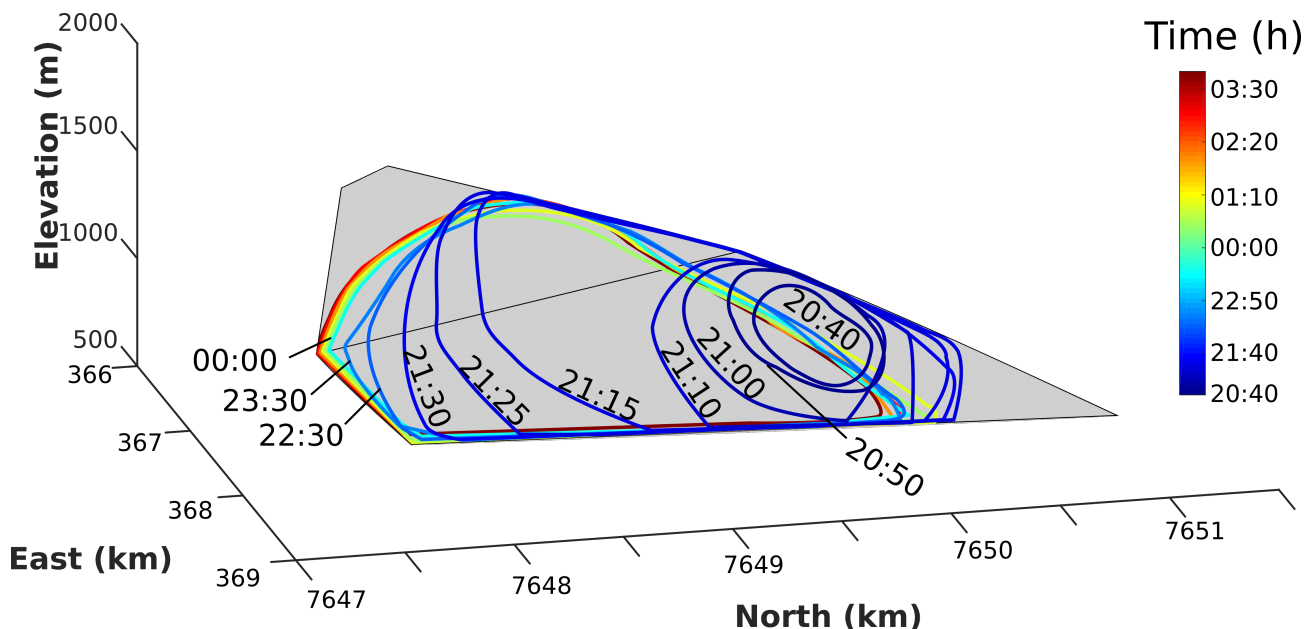


Figure 16: Dynamique de la propagation tirée de l'inversion conjointe des données InSAR et GNSS. La zone de pression (une couleur par pas de temps) correspond à un disque projeté sur la géométrie a-priori déterminée par l'inversion de données InSAR couvrant toute l'éruption.

Les inversions temporelles montrent que la partie horizontale de l'intrusion s'ouvre

quelques dizaines de minutes après le début de la crise. L'intrusion stagne ensuite pendant 4 heures, tandis que son volume augmente progressivement, jusqu'à ce que la dernière partie de l'intrusion se propage verticalement, alimentant l'éruption. La propagation par à-coups et le changement final de direction indiquent la présence de barrières structurales. Nous proposons deux mécanismes, qui auraient pu aider à surmonter ces barrières et favoriser l'éruption : l'accumulation de gaz magmatique ou, comme souvent observé au Piton de la Fournaise, un glissement de flanc vers l'est éventuellement activé par la mise en place de la partie sub-horizontale de l'intrusion.

I.3.5 Modélisation de l'éruption de février 2002 au Nyiragongo

Thèse et master 2 de Christelle Wauthier. J'ai encadré Christelle lors de son master 2 effectué au LMV en 2007. La thèse de Christelle a été effectuée de 2007 à 2011 (bourse de 4 ans) au Muséum d'Afrique Centrale de Tervuren et à l'université de Liège. Cette thèse a été co-encadrée par François Kervyn, Géologue dans ce Musée et moi même. Un article est parue dans le Journal of Geophysical Research (Wauthier et al., 2012).

Le 17 janvier 2002, une fissure éruptive de 17 kilomètres s'est ouverte sur le flanc sud du volcan du Nyiragongo (République démocratique du Congo) atteignant la ville de Goma et son aéroport. Les déplacements InSAR associés à cet événement montrent un champ de déplacements complexe, résultant probablement de la combinaison d'activités magmatique et tectonique. Ces déplacements sont inversés en prenant en compte deux sources simultanément, l'une associée à la fissure éruptive est un dike, l'autre peut être soit un réservoir (de magma ou de gaz), une faille ou un dike. Nous montrons que le modèle qui ajuste le mieux les données et qui est le plus probable correspond à deux dikes subverticaux. L'un est un dike peu profond associé à la fissure éruptive, l'autre est un dike profond de 40 km de long situé à moitié sous le lac Kivu (Figure 17).

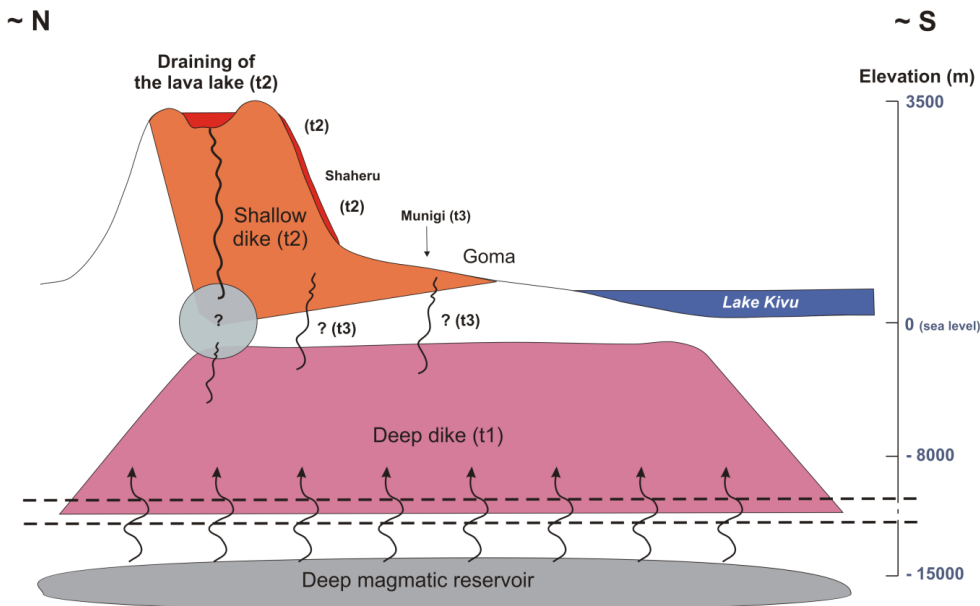


Figure 17: Système d'alimentation en magma sous le Nyiragongo et le nord du lac Kivu et chronologie possible pour l'éruption déterminée d'après l'analyse des données interférométriques. La figure n'est pas à l'échelle.

Ceci indique que l'interaction du magma et du gaz (méthane et dioxyde de carbone) dissout dans le lac doit être considéré comme un aléa potentiel pour les éruptions futures. Ce modèle est cohérent avec les données géochimiques (Tedesco et al., 2007), qui montrent que les fissures éruptives au nord ont été alimentées par le magma du lac de cratère et une source superficielle sous le sommet du volcan, tandis que les fissures au

sud ont été alimentées par une source plus profonde. Les calculs de transfert de contraintes montrent que l'injection du dike profond a probablement induit l'injection du dike superficiel. Cette injection profonde pourrait avoir induit la sismicité pré-éruptive, ainsi que le trémor observé pendant les 11 mois qui ont précédé l'éruption.

I.3.6 Modélisation des déplacements InSAR associés aux éruptions récentes du Nyamuragira

Cette étude a été réalisée lors du doctorat de Christelle Wauthier effectué de 2007 à 2011. Un article est paru dans le Journal de la Geological Society of London (Wauthier et al., 2013).

Le volcan bouclier du Nyamuragira (République Démocratique du Congo), dans la branche Ouest du rift Est Africain, est le volcan le plus actifs d'Afrique puisqu'il connaît en moyenne une éruption tous les 2 ans. En raison de la situation politique instable du pays, peu de réseaux de surveillance sont installés. Depuis 1996, une surveillance spatiale régulière des déplacements du volcan est effectuée. Les éruptions de 1996, 2002, 2004, 2006 et 2010 ont été analysées par l'inversion simultanée des interférogrammes acquis en orbite ascendante et descendante par une méthode combinant des modélisations 3D et des inversions de types Monte Carlo (Fukushima et al., 2005). Les déplacements associés à ces éruptions correspondent à des dikes et deux éruptions (2006 et 2010) ont impliqué le réservoir situé sous la caldera sommitale. Les déplacements inter-éruptif ont été analysés par une méthode InSAR multi-temporelle. Nous proposons que la plomberie de Nyamuragira consiste en un réservoir profond (~25 km de profondeur) alimentant un réservoir superficiels (~4 km de profondeur) ; les éruptions proximales sont alimentées par le réservoir superficiel, tandis que les éruptions distales sont alimentées par le réservoir profond.

I.3.7 Plomberie volcanique, compressibilité du magma et modélisation des contraintes au volcan du Nyamuragira, D. R. Congo.

Cette étude fait suite à la thèse de C. Wauthier, soutenue en 2011. Cet article est paru dans une issue spéciale du journal Remote Sensing (Wauthier et al., 2015).

Les modélisations 3D des données InSAR de l'éruption de janvier 2010 au Nyamuragira indiquent que le magma issu d'un réservoir superficiel (3.5 km sous le sommet), s'est injecté dans deux dikes sub-verticaux situés sous le sommet et le flanc sud-est. Le ratio du volume émis (intrudé et érupté) et de la diminution de volume du réservoir est de 9.3, ce qui est cohérent avec la restauration de la pression du réservoir par l'exsolution du CO₂ dissous. Une expression analytique a été déterminée pour le ratio volume intrudé/érupté, qui prend en compte les variations de volume du réservoir induites par l'exsolution, ainsi que la totalité des volumes émis, ce qui complète l'expression établie par *Rivalta et Segall (2008)* où seulement les volumes intrudés étaient pris en compte. En utilisant la composition précise du magma, nous estimons une compressibilité du magma de $1.9-3.2 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$, ce qui donne un ratio volume émis/variation volume réservoir de 6.5-10.1, cohérent avec notre estimation géodésique. Une analyse des contraintes normales indique que l'intrusion de 2010 pourrait avoir encouragé l'ascension du magma depuis un réservoir profond le long d'un l'axe N45°, amenant à l'éruption de 2011-2012.

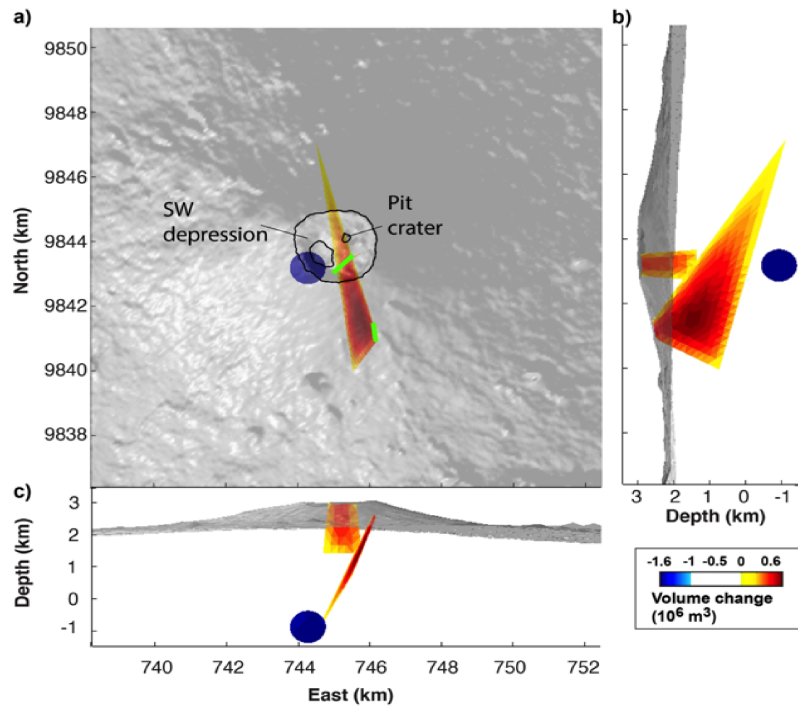


Figure 18: Meilleur modèle associé à l'éruption du Nyamuragira de 2010. Les variations de volumes sont indiquées par des codes couleurs.

I.4 Interaction mouvements de magma - tectonique

I.4.1 Etude de l'influence des intrusions de dikes sur la croissance et la stabilité du Piton de la Fournaise

Collaboration avec Laurent Michon, de l'Université de la Réunion et de l'Institut de Physique du Globe de Paris. Un article est paru à Journal of Volcanology et Geothermal Research (Michon et al., 2009).

Des modèles numériques par éléments frontières (Cayol et Cornet, 1998) ont été utilisés pour étudier (1) la relation entre les injections répétées de dikes dans les zones de rift N25-30° et N120° et la croissance du cône central, (2) les interactions entre ces injections et les réseaux de fractures observées sur le volcan, (3) les contraintes induites par les injections dans la rift zone N25-30° sur la rift zone N120° (Michon et al., 2009). Les résultats suivants sont obtenus (1) les injections de dikes dans les zones de rift induisent une augmentation des pentes des flancs est et sud-est, tandis que le flanc ouest subit peu de déformation (Figure 19a). Ces variations de pentes sont en accord avec les observations (Figure 19b) ce qui suggère que les pentes résultent de la croissance endogène du volcan le long des zones de rift. (2) Des études de géologie structurales montrent l'existence d'une zone de failles orientée N55-65° à l'est du cône central. Des calculs des contraintes de Coulomb indiquent que les injections de dikes dans les zones de rift peuvent réactiver ces failles, mais qu'elles ne les ont probablement pas créées. (3) Finalement, j'ai calculé les variations contraintes principales associées aux injections de magma dans les zones de rift N25-30° et j'ai montré que les injections de dikes dans les zones de rift N25-30° encouragent les injections de dikes dans la rift zone N120°.

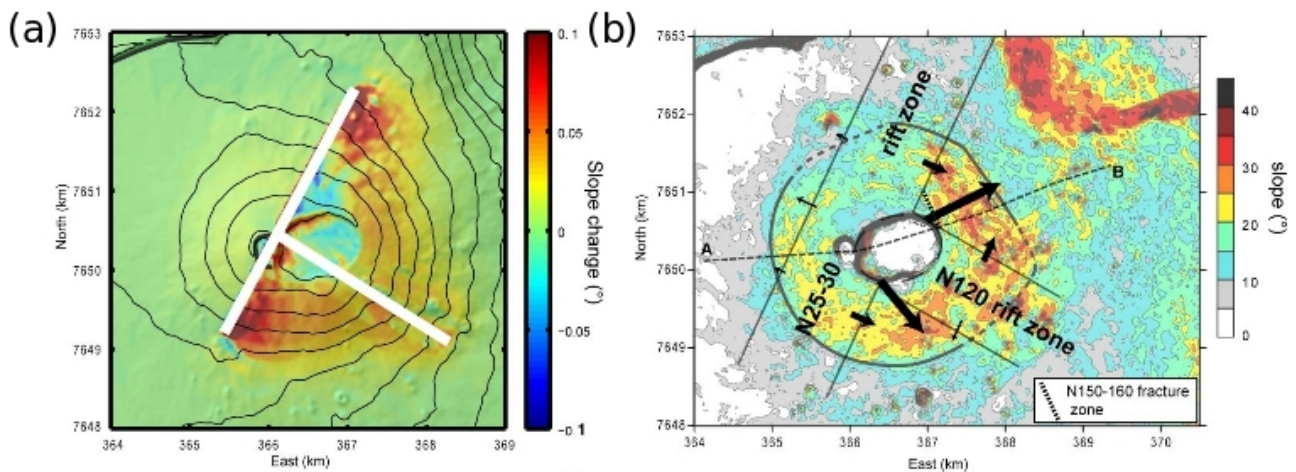


Figure 19: a) Variations de pentes déterminées par la modélisation d'intrusions de dikes dans les zones de rift N25-30° et N120°. Les projections des dikes en surface sont représentées par des lignes blanches épaisses. Les lignes fines sont les lignes de contours représentées tous les 100 m. b) Carte des pentes déduite d'un modèle numérique de terrain.

I.4.2 Importance des intrusions cisailées pour les déplacements de flanc des volcans : Application aux volcans de la Réunion

Collaboration avec Thibault Catry, Laurent Michon et Vincent Famin de l'Université de la Réunion, ainsi que Claudia Romagnoli de l'Université de Bologne (Italie). Un article a été publié au *Journal of Geophysical Research* (Cayol et al., 2014).

Des études de terrain récentes menées au Piton des Neiges (Famin et Michon, 2010; Chaput et al., 2014) indiquent que les intrusions de magma le long de discontinuités pré-existantes peuvent induire des déstabilisations des flancs des volcans par le jeu conjugué d'ouvertures et de cisaillements de fractures. Nous utilisons des modèles 3D pour comparer la capacité des intrusions (ouverture pure), des intrusions cisailées (ouverture et cisaillement) et des failles (cisaillement pur) à générer des déplacements de flanc sur les volcans (Figure 20). Nous supposons que les cisaillements résultent des contraintes anisotropes d'un édifice soumis à la gravité, et qu'il se produisent lorsque les intrusions de magma ne sont pas perpendiculaires à une des contraintes principale. Une telle situation se rencontre lorsqu'il existe des discontinuités pré-existantes ou des contrastes de propriétés mécaniques, ou lorsque les contraintes changent de direction avec la profondeur. En explorant les déplacements de surface et les variations de contraintes pour une large gamme d'anisotropies de contraintes et de pendages de fractures, nous déterminons qu'à la différence des ouvertures, les cisaillements sont indépendants de la profondeur des fractures et que ceux-ci sont maximums pour les pendages intermédiaires. Comme les intrusions induisent l'ouverture des fractures, ils annulent la friction, et permettent la relaxation totale des contraintes cisailantes. Ceci fait des intrusions les structures de glissement les plus efficaces. En utilisant ce modèle, nous déterminons que le cisaillement associé au sill situé à la base de l'avalanche de débris du Piton des Neiges est de 3.7 m. En utilisant notre modèle de façon inverse, nous formulons un arbre de décision permettant de déterminer les caractéristiques des fractures et de l'anisotropie des contraintes à partir des ratios de déplacements de surface. En appliquant cette méthode au glissement de flanc est de 1.4 m, mesuré au début de l'éruption du Piton de la Fournaise d'Avril 2007, nous déterminons que la fractures responsable de ce glissements était probablement une faille à pendage vers l'est superficielle. Bien que peu d'inversions

d'intrusions de magma prennent en compte les cisaillement, la prépondérance sur le terrain d'intrusions guidées par des structures pré-existante indique qu'il est important de chercher à déterminer non seulement les surpressions associées aux intrusions, mais aussi les chutes de contraintes cisailantes.

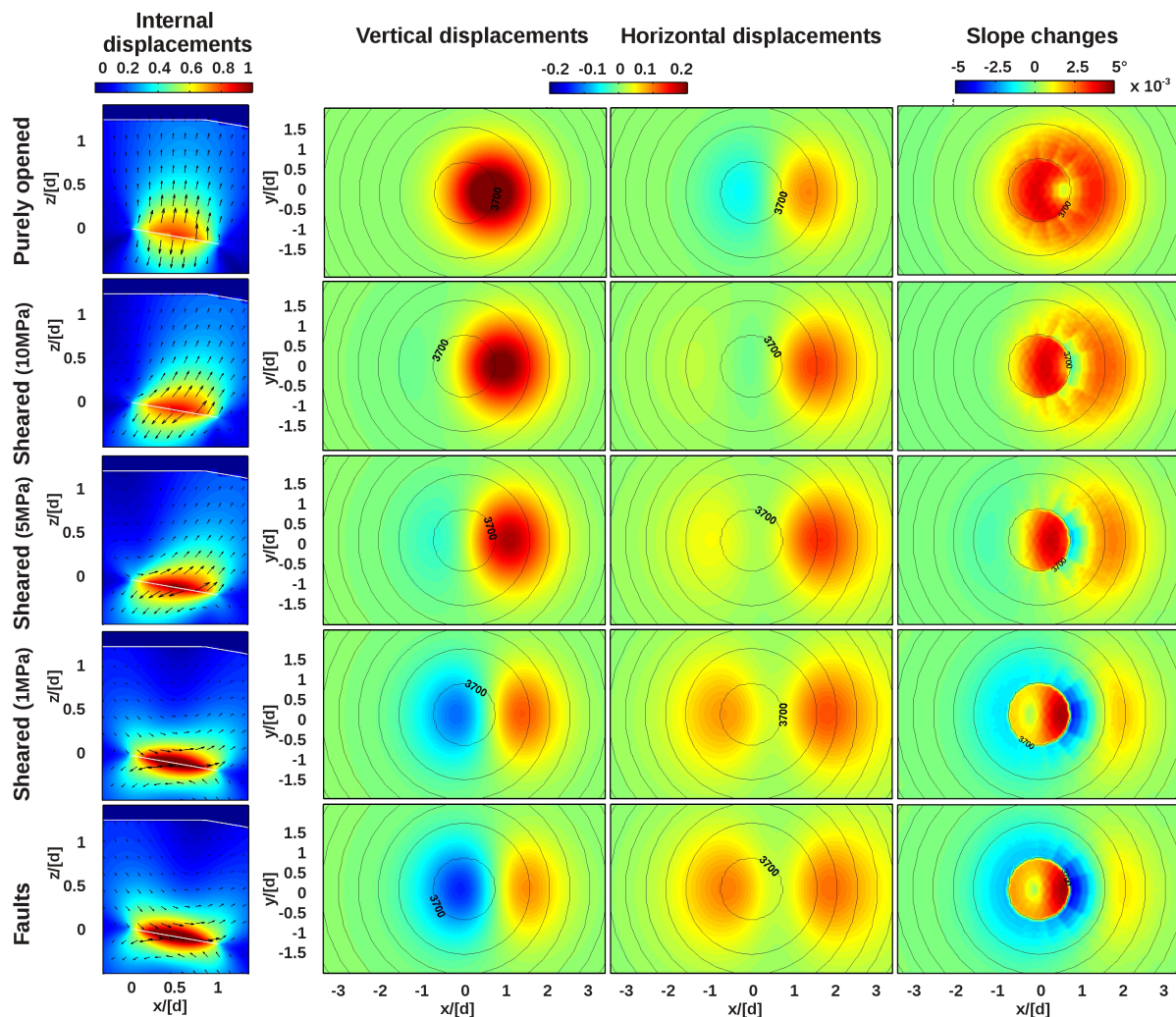


Figure 20: Déplacements internes, externe, et variations de pentes a-dimensionnels associés à différentes fractures (pendage 10°) allant de l'intrusion à la faille, en passant par des intrusions cisillées de pressions décroissantes (le ration contrainte horizontale sur verticale est $\sigma_h/\sigma_v = 0.6$). Les lignes de niveau sont représentées tous les 500 m.

I.4.3 Déplacements co- et post-éruptifs associés au glissement du flanc est du Piton de la Fournaise d'avril 2007

Thèse de Marine Tridon débutée en septembre 2013. Marine est décédée en avril 2017 du fait d'une longue maladie. Ce travail a été poursuivi lors de mon séjour au Cascade Volcano Observatory pendant lequel j'ai initié une collaboration avec K. Richards Dinger et James Dieterich de UC Riverside. Un article a été publié sur les déformations post-éruptive (Tridon et al., JGR, 2016), un autre est en préparation sur les déformations co-éruptives.

L'éruption du Piton de la Fournaise en avril 2007 a été la plus grande crise éruptive du 20 et 21ème siècle pour le volcan. L'InSAR montre que cette éruption était associées à un glissement vers l'est atteignant 1.4 m (Froger et al., 2015) et que le déplacement se poursuit depuis (Chen et al., 2017). Un soulèvement co-éruptif et une subsidence post-

éruptive ont également été observés. Bien qu'il soit généralement admis que le déplacement des flancs des volcan sont induits par des failles, nous avons testé si ce déplacement de flanc pouvait avoir été induit par le cisaillement d'un sill, comme observé sur le volcan voisin, le Piton des Neiges (*Famin et Michon, 2010*). Les déplacements du flanc est survenus en avril 2007 et l'année suivante ont été inversés par une méthode combinant éléments frontières et inversions de Monte Carlo. La géométrie de la fracture considérée est un quadrangle incurvé soumis à des variations de contraintes normales et cisallantes. Le déplacement post-éruptif est bien expliqué par le glissement et la fermeture d'une grande fracture sub-parallèle à la topographie (5 km sur 8 km, Figure 21c). La quantité de fermeture est trop importante et le temps de fermeture trop court pour s'expliquer par la contraction thermique d'un sill (*Tridon et al., 2016*). L'analyse des déplacements co-éruptifs indique qu'ils peuvent être créés par le cisaillement pur (sans aucune surpression) sur une petite portion (2 km par 2 km) de cette fracture (Figure 21b). Le soulèvement observé résulte entièrement du plissement des roches situées au dessus de la structure cisailée.

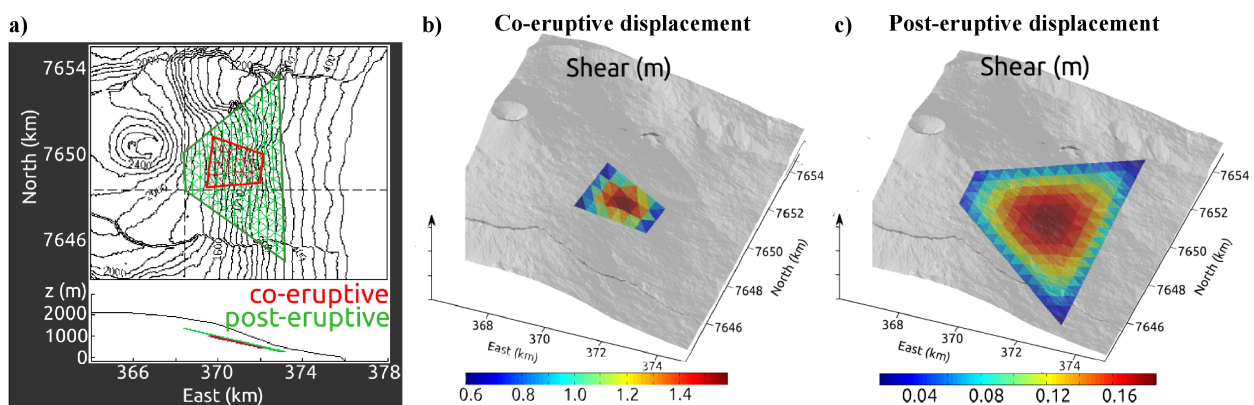


Figure 21: a) Modèles de fracture permettant d'expliquer les déplacements de flanc est co- et post-éruptifs. b) Cisaillement responsable des glissements co-éruptifs. c) Cisaillements responsables des glissements post-éruptifs.

Références

- Ando, M. (1979). The Hawaii earthquake of November 29, 1975: Low dip angle faulting due to forceful injection of magma. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B13), 7616-7626.
- Augier A., V. Cayol and J.-L. Froger, Improving the interpretation of continuous processes with interferogram temporal interpolation, à resoumettre à *Journal of Geophys. Res.*
- Barnoud A., V. Cayol, V. Niess, C. Cârloganu, P. Lelièvre, P. Labazuy E. Le Ménédeu (2019), Bayesian joint muographic and gravimetric inversion applied to volcanoes, *Geophysical Journal International*, Volume 128, Issue 3, P. 2179-2194, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz300>
- Barnoud A., V. Cayol, P. Lelièvre, A. Portal, P. Labazuy, P. Boivin, L. Gailler (2020), Robust Bayesian joint inversions of muographic and gravimetric data for the density imaging of Puy de Dôme volcano (France), Minor revision mineures for *Frontiers in Earth Science*.
- Berthod, C., Famin, V., Bascou, J., Michon, L., Ildefonse, B., & Monié, P. (2016). Evidence of sheared sills related to flank destabilization in a basaltic volcano. *Tectonophysics*, 674, 195-209.
- Bodart, O., V. Cayol, S. Court, J. Koko (2016), XFEM based fictitious domain method for linear elasticity model with crack, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 38(2), 219-246, doi: 10.1137/15M1008385.
- Bodart O., V. Cayol, S. Court*, J. Koko (2016), Fictitious domain method for fracture models in elasticity, *Progress in industrial mathematics at ECMI 2014*, Editors G. Russo, V. Capasso, G. Nicosia, V. Romano, Springer International Publishing, 22, ISBN 978-3-319-23412-0, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-23413-7>.
- Bodart, O., V. Cayol, F. Dabaghi and J. Koko (2018), Fictitious domain method for an inverse problem in volcanoes, sous presse pour les proceedings of the *25th International Domain Decomposition Conference, DD XXV*, in St. John's, Newfoundland, Canada, July 23-27.
- Bonvalot, S., Remy, D., Deplus, C., Diamant, M., & Gabalda, G. (2008). Insights on the March 1998 eruption at Piton de la Fournaise volcano (La Reunion) from microgravity monitoring. *Journal of Geophysical*

Research: Solid Earth, 113(B5).

- Cayol, V., et F. H. Cornet, 3D Mixed Boundary Elements for Elastic Deformation Field Analysis, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **34**, 275-287, 1997.
- Cayol, V. and F.H. Cornet (1998), Effect of Topography on the interpretation of the deformation field of prominent volcanoes - Application to Etna, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1979-1982.
- Cayol, V., et F. H. Cornet, 3D (1998), Modeling of the 1983-1984 Eruption at Piton de la Fournaise Volcano, Réunion Island, Indian Ocean, *J. Geophys. Res.*, **103**, 18,025-18,037.
- Cayol V., T. Catry, L. Michon, M. Chaput, V. Famin, O. Bodart, J. L. Froger, C. Romagnoli (2014), Sheared sheet intrusions as mechanism for lateral flank displacement on basaltic volcanoes: Application to Réunion Island volcanoes, *J. Geophys. Res.*, **119**, doi:10.1002/2014JB011139.
- Cayol V., M. Tridon, J.-L. Froger, A. Augier, P. Bachelery (2016), Inversion of Coeval Shear and Normal Stress of Piton de la Fournaise Flank Displacement, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, Calif. U.S.A..
- Cayol, V., M. Tridon, J.-L. Froger, A. Augier (2017), Inversion of Coeval Shear and Normal Stress of Piton de la Fournaise Flank Displacement, *IAVCEI Scientific Assembly*, Portland, Oregon, USA.
- Chaput, M., Famin, V., & Michon, L. (2014). Deformation of basaltic shield volcanoes under cointrusive stress permutations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(1), 274-301.
- Chaput, M., Pinel, V., Famin, V., Michon, L., & Froger, J. L. (2014). Cointrusive shear displacement by sill intrusion in a detachment: A numerical approach. *Geophysical Research Letters*, 41(6), 1937-1943.
- Currenti, G., Napoli, R., & Del Negro, C. (2011). Toward a realistic deformation model of the 2008 magmatic intrusion at Etna from combined DInSAR and GPS observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 312(1-2), 22-27.
- Crouch, S. L. (1976). Solution of plane elasticity problems by the displacement discontinuity method. I. Infinite body solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 10(2), 301-343.
- Cooke, M. L. (1997). Fracture localization along faults with spatially varying friction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B10), 22425-22434.
- Famin, V. and L. Michon (2010), Volcano destabilization by magma injections in a detachment, *Geology*, 38, 3, 219-222.
- Dieterich, J. H. (1979). Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2161-2168.
- Dieterich, J. (1994). A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B2), 2601-2618.
- Dieterich, J., Cayol, V., & Okubo, P. (2000). The use of earthquake rate changes as a stress meter at Kilauea volcano. *Nature*, 408(6811), 457-460.
- Dieterich, J. H., Cayol, V., & Okubo, P. (2003). Stress Changes Before and During the Pu 'u 'O'6. *US Geological Survey professional paper*, 1676(1676), 187.
- Dzurisin, D., Koyanagi, R. Y., & English, T. T. (1984). Magma supply and storage at Kilauea Volcano, Hawaii, 1956–1983. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 21(3-4), 177-206.
- Froger, J. L., Famin, V., Cayol, V., Augier, A., Michon, L., & Lénat, J. F. (2015). Time-dependent displacements during and after the April 2007 eruption of Piton de la Fournaise, revealed by interferometric data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 296, 55-68.
- Fukushima Y., V. Cayol and P. Durand (2005), Finding realistic dike models from interferometric synthetic aperture radar data: The February 2000 eruption at Piton de la Fournaise, *J. Geophys. Res.*, **110**, B03206, doi: 10.1029/2004JB003268.
- Fukushima, Y., Cayol, V., Durand, P., & Massonnet, D. (2010). Evolution of magma conduits during the 1998–2000 eruptions of Piton de la Fournaise volcano, Réunion Island. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B10).
- Gouhier, M., & Coppola, D. (2011). Satellite-based evidence for a large hydrothermal system at Piton de la Fournaise volcano (Reunion Island). *Geophysical Research Letters*, 38(2).
- Jourde, K., Gibert, D., & Marteau, J. (2015). Improvement of density models of geological structures by fusion of gravity data and cosmic muon radiographies. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 4, 177-188.
- Lachat, J. C., & Watson, J. O. (1976). Effective numerical treatment of boundary integral equations: a formulation for three-dimensional elastostatics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 10(5), 991-1005.
- Lelièvre P. G., A. Barnoud, V. Niess, C. Cârloganu, V. Cayol and C. G. Farquharson (2019), Joint inversion methods with relative doffset correction for muon tomography and gravity data, with application to volcano imaging, *Geophysical Journal International*, Volume 218, Issue 3, Pages 1685–1701, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz251>.
- Liu, C., Lay, T., & Xiong, X. (2018). Rupture in the 4 May 2018 MW 6.9 earthquake seaward of the Kilauea east rift zone fissure eruption in Hawaii. *Geophysical Research Letters*, 45(18), 9508-9515.
- Lundgren, P., Usai, S., Sansosti, E., Lanari, R., Tesauro, M., Fornaro, G., & Berardino, P. (2001). Modeling surface deformation observed with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B9), 19355-19366.
- Maccaferri, F., D. Smittarello, V. Pinel, V. Cayol (2019), On the propagation path of magma-filled dikes and

- hydrofractures: the competition between external stress, internal pressure, and crack length, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 2064–2081. <https://doi.org/10.1029/2018GC007915>.
- Massonnet, D., Briole, P., & Arnaud, A. (1995). Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, 375(6532), 567–570.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433), 138–142.
- Masterlark, T., & Lu, Z. (2004). Transient volcano deformation sources imaged with interferometric synthetic aperture radar: Application to Seguam Island, Alaska. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B1).
- Michon, L., Cayol, V., Letourneur, L., Peltier, A., Villeneuve, N., & Staudacher, T. (2009). Edifice growth, deformation and rift zone development in basaltic setting: Insights from Piton de la Fournaise shield volcano (Réunion Island). *Journal of volcanology and geothermal research*, 184(1-2), 14–30.
- Montgomery-Brown, E. K., Segall, P., & Miklius, A. (2009). Kilauea slow slip events: Identification, source inversions, and relation to seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B6).
- Mijar, A. R., & Arora, J. S. (2000). Review of formulations for elastostatic frictional contact problems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 20(3), 167–189.
- Mogi K. (1958). Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Earthq Res Inst*, 36, 99–134.
- Nishiyama, R., Tanaka, Y., Okubo, S., Oshima, H., Tanaka, H. K. M., & Maekawa, T. (2014). Integrated processing of muon radiography and gravity anomaly data toward the realization of high-resolution 3-D density structural analysis of volcanoes: Case study of Showa-Shinzan lava dome, Usu, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(1), 699–710.
- Peltier, A., Ferrazzini, V., Staudacher, T., & Bachèlery, P. (2005). Imaging the dynamics of dike propagation prior to the 2000–2003 flank eruptions at Piton de La Fournaise, Reunion Island. *Geophysical Research Letters*, 32(22).
- Prôno, E., Battaglia, J., Monteiller, V., Got, J. L., & Ferrazzini, V. (2009). P-wave velocity structure of Piton de la Fournaise volcano deduced from seismic data recorded between 1996 and 1999. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184(1-2), 49–62.
- Rivalta, E., & Segall, P. (2008). Magma compressibility and the missing source for some dike intrusions. *Geophysical Research Letters*, 35(4).
- Rubin, A. M. (1990). A comparison of rift-zone tectonics in Iceland and Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, 52(4), 302–319.
- Rosas-Carbajal, M., Jourde, K., Marteau, J., Deroussi, S., Komorowski, J. C., & Gibert, D. (2017). Three-dimensional density structure of La Soufrière de Guadeloupe lava dome from simultaneous muon radiographies and gravity data. *Geophysical Research Letters*, 44(13), 6743–6751.
- Ruina, A. (1983). Slip instability and state variable friction laws. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B12), 10359–10370.
- Sambridge, M. (1999a). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—I Searching a parameter space.. *Geophysical Journal International*, 138(3), 727–746.
- Sambridge, M. (1999b). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—II. Appraising the ensemble. *Geophysical Journal International*, 138(3), 727–746.
- Segall, P., Llenos, A. L., Yun, S. H., Bradley, A. M., & Syracuse, E. M. (2013). Time-dependent dike propagation from joint inversion of seismicity and deformation data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(11), 5785–5804.
- Smittarello, D., Shreve, T., Grandin, R., Cayol, V., Pinel, V., Delgado, F.² Morishita Y. (2019) Caldera ring-faulting during the 2015 Ambrym dike intrusion and the search for the missing deflation source, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, U.S.A.
- Smittarello, D., Cayol, V., Pinel, V., Peltier, A., Froger, J.-L., & Ferrazzini, V. (2019a). Magma propagation at Piton de la Fournaise from joint inversion of InSAR and GNSS. *Journal of Geophysical Research*, 124, 1361–1387, <https://doi.org/10.1029/2018JB016856>
- Smittarello, D., V. Cayol, V. Pinel, J.-L. Froger, A. Peltier, Q. Dumont (2019b), Combining InSAR and GNSS to track magma transport at basaltic volcanoes, Invited publication at *Remote sensing*, vol.11, p.2236, DOI: [10.3390/rs11192236](https://doi.org/10.3390/rs11192236).
- Swanson, D. A. (1972). Magma supply rate at Kilauea Volcano, 1952–1971. *Science*, 175(4018), 169–170.
- Tarantola, A. (2005). *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation* (Vol. 89). siam.
- Tedesco, D., Vaselli, O., Papale, P., Carn, S. A., Voltaggio, M., Sawyer, G. M., ... & Tassi, F. (2007). January 2002 volcano-tectonic eruption of Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B9).
- Tung, S., & Masterlark, T. (2016). Coseismic slip distribution of the 2015 Mw7. 8 Gorkha, Nepal, earthquake from joint inversion of GPS and InSAR data for slip within a 3-D heterogeneous Domain. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(5), 3479–3503.
- 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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(11), 7846–7866.

- Urai, 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. *Geophysical Research Letters*, 34(22).
- Vasco, C. W., C. Wicks Jr, K. Karasaki and O. Marques (2002), Geodetic imaging: reservoir monitoring using satellite interferometry, *Geophys. J. Int.*, **149**, 555-571.
- Watanabe, T., Masuyama, T., Nagaoka, K., & Tahara, T. (2002). Analog experiments on magma-filled cracks. *Earth, planets and space*, 54(12), 1247-1261.
- Wauthier, C., Cayol, V., Kervyn, F., & d'Oreye, N. (2012). Magma sources involved in the 2002 Nyiragongo eruption, as inferred from an InSAR analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B5).
- Wauthier, C., Cayol, V., Poland, M., Kervyn, F., d'Oreye, N., Hooper, A., ... & Smets, B. (2013). Nyamulagira's magma plumbing system inferred from 15 years of InSAR. *Geological Society, London, Special Publications*, 380(1), 39-65.
- Wauthier, C., V. Cayol, B. Smets, N. d'Oreye, F. Kervyn (2015), Magma pathways and their interactions inferred from InSAR and stress modeling at Nyamulagira Volcano, D.R. Congo, *Remote Sensing*, **7**, 15179-15202, doi:10.3390/rs71115179.
- Zeller, S. S., & Pollard, D. D. (1992). Boundary conditions for rock fracture analysis using the boundary element method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B2).

II- Projet de recherches

Afin d'améliorer la détermination des sources d'activité volcanique et de mieux prévoir les éruptions et les glissements de flancs, je propose d'améliorer les inversions de déformations et d'intégrer dans les modèles des données physiques et géophysiques de nature différentes. La pluridisciplinarité, qu'elle soit au sein des géosciences, en liens avec d'autres domaines de la physique ou avec les mathématiques, est un des leitmotiv de l'activité de recherche que je développe. Mes projets méthodologiques concernent (i) le développement de méthodes pour l'inversion des déplacements de fractures (failles ou intrusions) en milieu hétérogène, qui permettent la prise en compte de variations de contraintes non-homogènes, (ii) les inversions conjointes de données de gravité et de données de muographie afin de mieux déterminer la structure des édifices, (iii) les inversions conjointes de données de déformation, et de micro-gravimétrie, (iv) les inversions conjointes déformation, gravité et microsismicité, (v) l'influence des intrusions sur la stabilité des édifices lorsqu'ils sont recoupés par des failles aux propriétés « rate and state ». Les applications de ces méthodes me permettront d'étudier (i) la structure des volcans, (ii) le système d'alimentation et les transferts de magma, (iii) l'effet des transferts de magma sur la stabilité des édifices. Les volcans sur lesquels je travaillerai seront le Piton de la Fournaise, en liens avec la tâche d'observation labellisée OI², qui a permis l'acquisition des déplacements InSAR associées à toutes les éruptions survenues depuis 1998 et sur le Mont St Helens en liens avec mon détachement au Cascade Volcano Observatory de 2016-2017. Ces deux volcans sont emblématiques de comportements effusifs et explosifs, et sont associés à des comportements mécaniques très différentes, liés aux topographies, à leur mode de construction, à la longévité des systèmes d'alimentation, et aux viscosités des magmas émis.

II.1 Détermination des distributions de contraintes sur des fractures en milieu hétérogène

Projet en collaboration avec Olivier Bodart de l'Institut Camille Jourdan (ICJ) à St Étienne (UMR 5208, UDL) et Jonas Koko du LIMOS (UMR 6158, UBP). Ce projet est mené par Farshid Dabaghi, actuellement en post-doctorat à l'ICJ qui travaille sur ce sujet depuis 2016. Il bénéficie d'une bourse CNES (1 an renouvelable) depuis septembre 2019. Un proceeding de la 25th International Domain Decomposition Methods Conference a été publié et un article pour Computational Geoscience devrait être soumis prochainement.

Cette étude vise à déterminer les distributions de contraintes sur des intrusions de magmas ou des failles afin que l'approche développée soit utile à la fois aux volcanologues et aux sismologues. Pour résoudre des variations de contraintes dans des milieux hétérogènes 3D, on peut procéder comme on le fait pour résoudre les déplacements dans les inversions cinématiques, c'est à dire en résolvant un problème de moindre carrés régularisé par l'ajout d'une norme ou d'un lissage Laplacien (*Barrientos et Ward, 1986 ; Harris and Segall, 1987, Jonsson et al., 2002*). De même que *Currenti et al. (2011)* pour les intrusions de magma et *Tung et Masterlark (2016)* pour les failles, le système linéaire caractérisant la solution peut être construit par la sommation de solutions numériques élémentaires. Néanmoins, ces systèmes linéaires sont très coûteux à construire pour les méthodes d'éléments finis. Afin d'accélérer les calculs, les mathématiciens résolvent ces problèmes différemment, en utilisant une formulation de type contrôle optimal, basée sur l'équation du modèle physique avant sa discrétisation. En collaboration avec des collègues mathématiciens, une méthode alternative s'appuyant sur le formalisme de domaines fictifs précédemment développé (Bodart et al., 2016) a été mise au point. A partir de l'écriture d'un Lagrangien faisant intervenir la fonction coût, le

lissage, et la formulation faible du problème physique, on explicite des conditions d'optimalité. Ces conditions d'optimalité sont ensuite discrétisées, aboutissant à un algorithme qui fait intervenir un problème adjoint. Cet algorithme a été testé pour des pressions et pour des vecteurs contraintes quelconques sur des fractures synthétiques (Bodart et al., 2020). La stabilité des inversions est actuellement testée avec des solutions synthétiques bruitées. Cet algorithme doit maintenant être adapté aux données INSAR, où seules les déplacements dans la direction satellite sont connues et où ces données présentent des lacunes du fait de la végétation ou des topographies. Les applications concerneront le suivi des intrusions de magma, en reprenant l'étude de Smittarello et al. (2019) sur l'éruption de mai 2016, et l'inversion des variations des contraintes associées à des failles (séisme de M7.9 de Gorkha en 2015, Grandin et al., 2015).

II.2 Inversion conjointe des données de déformation et de gravité

Projet en collaboration avec Anne Barnoud, qui a été bénéficiaire d'une bourse CNES entre 2018 et 2020. Des crédits PNTS et Clervolc ont aussi été attribués à ces recherches et ont permis de mener des campagnes de mesures au Piton de la Fournaise. Anne est actuellement ingénieur de recherches dans l'entreprise Magellium (Toulouse). Nous prévoyons un co-encadrement de thèse afin de poursuivre ces développements et applications.

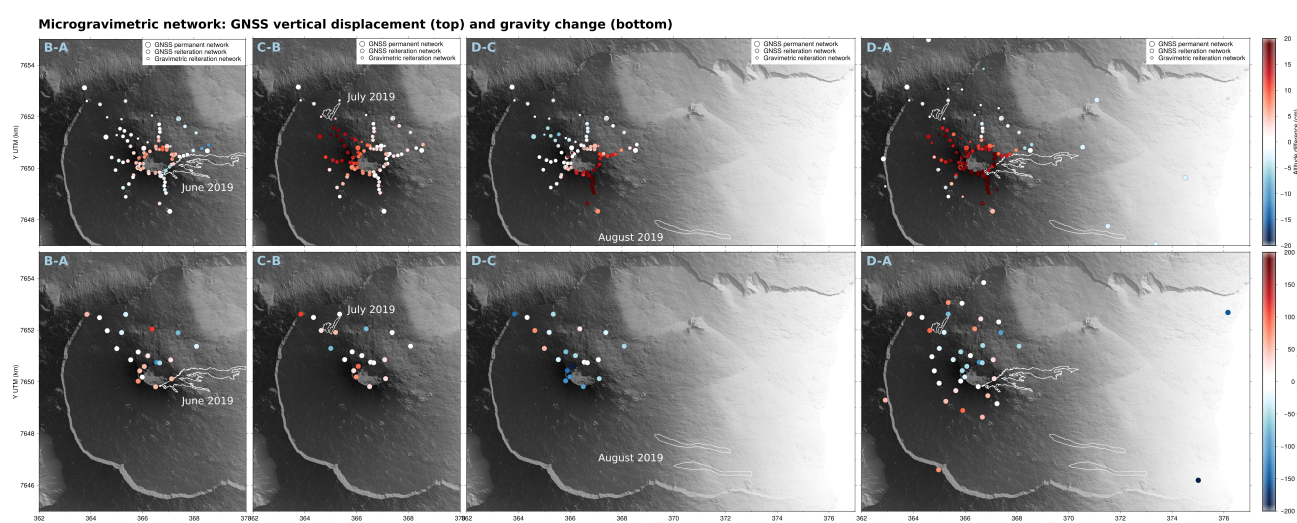


Figure 22: Déplacement et variation de la gravité associés aux éruptions de juin, juillet et août 2019 du Piton de la Fournaise.

Les données de déplacements et de gravimétrie apportent des informations complémentaires, sur les volumes et les densités des fluides impliqués dans l'activité volcanique. La plupart des simulations s'appuient des modèles homogènes, semi-infinis (Battaglia et al., 2008). Néanmoins, les modèles numériques montrent que négliger les hétérogénéités du milieu et la topographie amène à des interprétations erronées (Charco et al., 2007 ; Currenti et al., 2007). Jusqu'à présent ces modèles étaient trop coûteux numériquement pour être utilisés dans des inversions. Ce projet se propose de combiner les méthodes de domaines fictifs pour milieux hétérogènes 3D (Bodart et al., 2016), à des modélisations d'anomalies de densités afin de mettre à disposition de la communauté des géophysiciens des outils pour l'inversion conjointe de données de gravimétrie et de déplacements en milieu hétérogène 3D. Pour combiner déformations et gravimétrie, nous suivons l'approche de Bonafede et Mazzanti (1998). L'application se fera sur le volcan du Piton de la Fournaise. En effet, ce volcan bénéficie d'acquisitions InSAR et GNSS systématiques, et il connaît des éruptions fréquentes. Au printemps 2019, un réseau de mesures micro gravimétriques a été ré-installé (précédente installation en 1998). Ce réseau a permis de suivre les 3 éruptions qui se sont produites en juin, juillet et août 2019.

Les premiers résultats montrent que les données de déplacements sont sensibles aux intrusions de magma dans des fractures tandis que les mesures gravimétriques sont surtout sensibles aux mouvements de fluides en profondeur.

II.3 Inversions conjointes de la déformation, gravité et sismicité

Ce projet est une collaboration avec Roger Denlinger, sismologue et mathématicien au Cascade Volcano Observatory (CVO), Mike Lisowski spécialisé en géodésie à CVO, Maurizio Battaglia spécialisé en gravimétrie basé à Menlo Park et Weston Thelen, sismologue en charge à CVO. Il a été initié lors de mon séjour au Cascade Volcano Observatory en 2016-2017.

La plupart du temps, les données de types différents sont analysées séparément ou seulement comparées qualitativement, ce qui laisse des ambiguïtés sur la nature, la localisation et la géométrie des sources d'activité volcaniques. Peu d'études quantitatives ont analysé deux de ces types de données, aucune n'a inclus les 3 types de données afin de déterminer les variations de contraintes. Il est conceptuellement et numériquement possible d'inclure ces 3 types de données, en utilisant des inversions pour obtenir un unique modèle physique et en quantifiant les solutions statistiquement à l'aide de probabilités Bayésiennes. Je propose de développer une telle méthode sur les données du Mont St Hélens enregistrées au cours de l'éruption de dôme de 2004-2008. Les inversions de déformation s'appuieront sur les codes pour milieux 3D hétérogènes de *Bodart et al. (2016)*. Afin d'améliorer la résolution des inversions en profondeurs, ces inversions seront combinées avec des inversions de sismicité qui s'appuieront sur la formulation constitutive de *Dieterich (1994)*. Cette formulation permet de reproduire la réponse non-linéaire de la sismicité à des variations de contraintes, ainsi que sa variation temporelle. Utilisée sur des éruptions du Kilauea, elle a permis de démontrer que les déformations et la sismicité résultaient d'une propagation verticale du magma depuis les zones de rift (*Dieterich et al., 2003*). La méthode développée par Anne Barnoud et moi-même sera utilisée pour inverser gravimétrie et déformations. Les 3 types de données seront utilisés dans des inversions Bayésiennes, qui permettront de prendre en compte les incertitudes sur les modèles ainsi que des *a-priori* sur les paramètres de modélisation (*Tarantola, 2005*). L'application se fera sur les données du Mont St Helens, en activité entre 2004 et 2008. Le mont St Helens est équipé de 22 sismomètres et de 22 GPS continus, ainsi que de 4 sismomètres et dilatomètres de forage. Entre 2010 et 2014, 3 campagnes de mesures gravimétriques ont eu lieu, qui indiquent une recharge du système d'alimentation magmatique, sans déformation associée (*Battaglia et al., 2018*). Les inversions conjointes permettront de comprendre ces signaux paradoxaux.

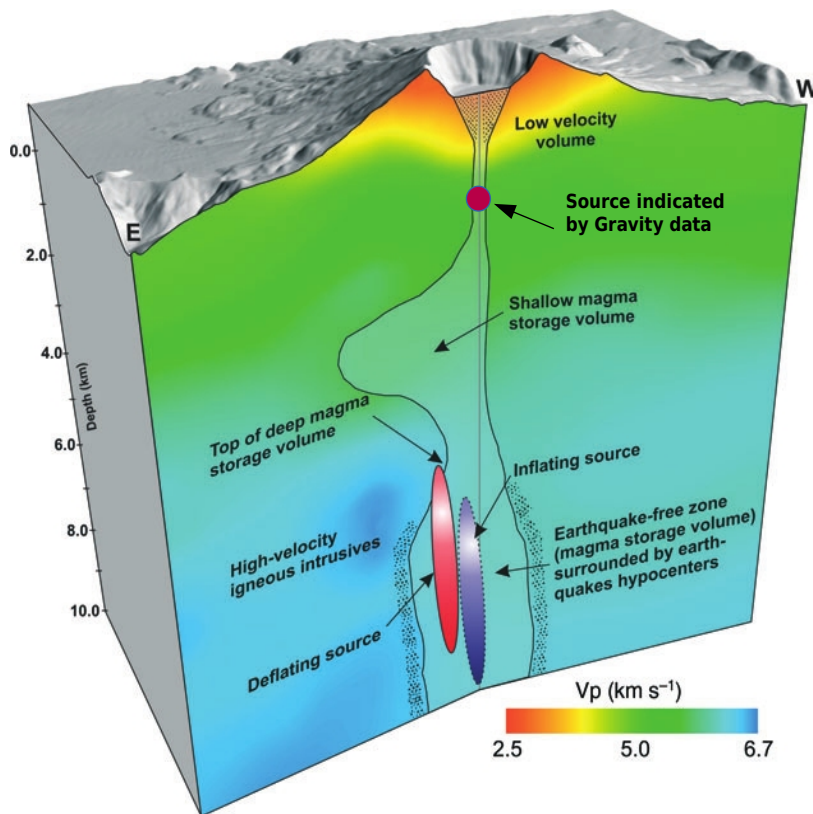


Figure 23: Coupe est-ouest du Mont Saint H  lens montrant les sources déterminées par modélisation des données GPS sur la période 2004-2010. Les vitesses d'ondes P, déterminées par tomographie sismique sont aussi indiquées (Waite et Moran, 2009). La source mise en évidence par les données de gravité est indiquée (Battaglia et al., 2015). La figure est adaptée de Polano et al., 2012.

II.4 Histoire en contraintes du flanc est du Piton de la Fournaise

  tude de Quentin Dumont en thèse au Laboratoire Magmas et Volcans depuis 2018 avec Jean-Luc Froger et moi-même.

L'enregistrement systématique des déplacements du piton de la Fournaise depuis 1998 montrent une cyclicité dans les éruptions. Ainsi, les éruptions distales (   plus de 5 km du sommet) succèdent aux éruptions sommitales et proximales, et les éruptions de flanc nord alternent avec les éruptions de flanc sud. Ces éruptions ont un impact sur la stabilité du volcan, comme l'a rappelé l'éruption d'avril 2007. Afin de comprendre comment et où les contraintes s'accumulent dans le volcan, les éruptions de flanc sont systématiquement analysées par une méthode combinant éléments frontières et domaines fictifs. Les intrusions considérées peuvent avoir des courbures. L'analyse des éruptions survenues entre 2010 et 2020 montrent que toutes les injections se font le long d'une direction préférentielle en forme de cuillère, dont la géométrie est typique d'un glissement gravitaire. Les augmentations de contraintes de Coulomb expliquent l'alternance des sites éruptifs, ainsi que l'éruption hors rift zone d'août et octobre 2019.

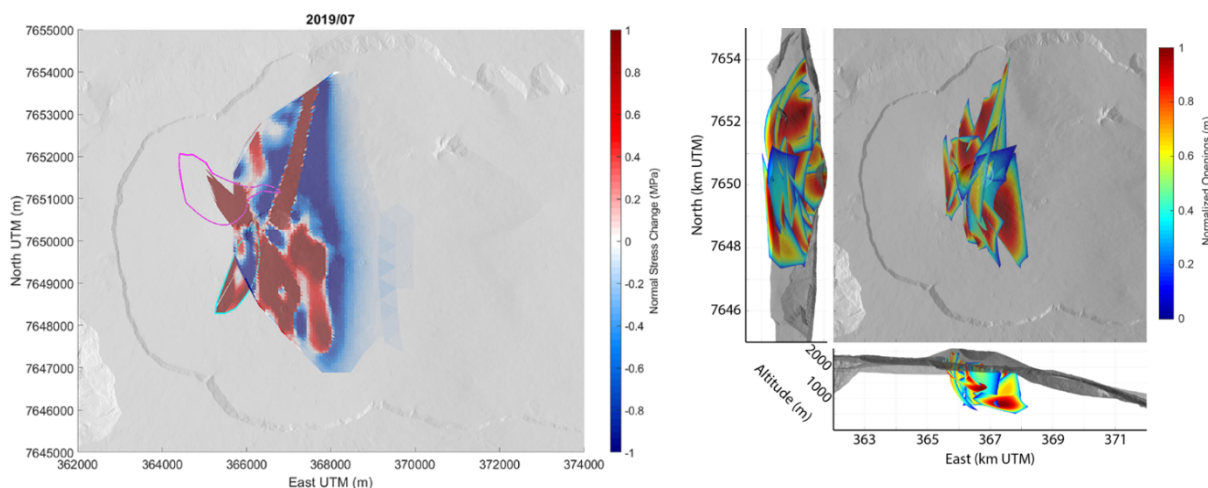


Figure 24 - Modélisations des 14 éruptions qui se sont produites entre 2010 et 2020. (Gauche) Contraintes normales. (Droite) Géométries et ouvertures.

II.5 Propriétés "rate and state" de la faille du flanc est du Piton de la Fournaise et Influence des intrusions répétées de magma

Étude initié lors de mon séjour aux États Unis. Ce projet est une collaboration avec Keith Richards Dinger, de l'UC. Riverside, CA, USA. Keith devrait venir passer un mois au LMV au cours de l'année 2021 (crédits du programme WOW de l'I-Site CAP 2025), et Quentin Dumont et moi-même devrions y aller deux semaines en 2021, si les conditions sanitaires le permettent. Ce type d'étude pourrait aussi être conduit sur l'Etna et le Kilauea. C'est un projet très novateur qui pourrait donner lieu à une ANR ou une ERC synergie.

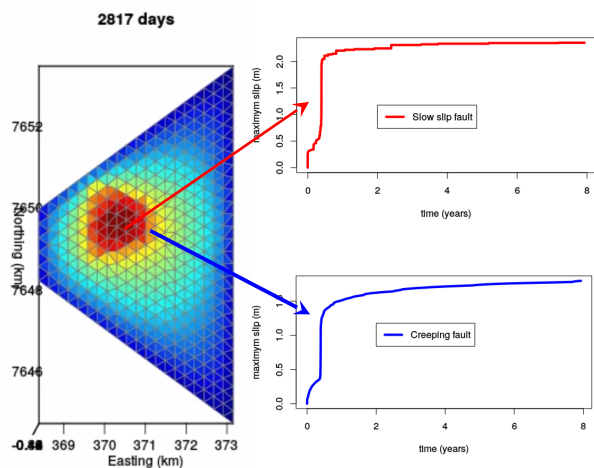


Figure 25: Déplacements sur la faille du flanc est du Piton de la Fournaise. L'origine temporelle est avril 2007. La courbe en rouge représente les déplacements de l'élément de fracture le plus rapide de l'aspérité, et celle en bleu le déplacement de l'élément de fracture le plus rapide de la zone qui flue.

Les données bathymétriques montrent que l'île de la Réunion connaît des déstabilisations de flancs répétées, certaines mobilisant des volumes de 100 km^3 (Oehler et al., 2008 ; Le Friant et al., 2011). Ces déstabilisations peuvent engendrer des tsunamis destructeurs (Kelfoun et al., 2010). Il est donc primordial de comprendre ce qui déclenche ces déstabilisations. On utilise les géométries de la portion de faille sub-parallèle à la topographie déterminée par Tridon et al., 2016 pour les périodes co et post-éruptive (section I.4.3), les chutes de contraintes inversées, avec des lois de friction "rate and state" (Richards-Dinger et Dieterich, 2012) pour comprendre le lien causal entre glissement soudain co-éruptif et glissement lent post-éruptifs. Nos résultats préliminaires montrent que la zone qui a glissé de 1.4 m correspond à une aspérité (comportement de type "rate weakening", où plus le glissement se poursuit et plus il est facilité), tandis que la zone qui a glissé lentement par la suite correspond à une zone de fluage (comportement

de type "rate strengthening" où plus le glissement se poursuit et plus il est difficile). En utilisant les observations temporelles, les résultats des inversions de données InSAR et les taux de déplacements indiqués par les données GNSS, on détermine les paramètres constitutifs des différentes parties de la faille du flanc est. Ces modélisations préliminaires ont montré que pour anticiper les déstabilisations du flanc est, il était important de comprendre l'histoire en contraintes de ce flanc, laquelle dépend des intrusions répétées. L'étude précise du glissement de flanc devra aussi prendre en compte les glissements récents de flanc survenus en octobre 2019 et en octobre 2020. Ces glissements devront être confirmés par des modélisations. Ils permettront probablement de mieux identifier les paramètres constitutifs des différentes portions de la faille du flanc est, et de rendre nos modèles plus fiables.

Références

- Ambrosino, F., Anastasio, A., Bross, A., Béné, S., Boivin, P., Bonechi, L., ... & D'Alessandro, R. (2015). Joint measurement of the atmospheric muon flux through the Puy de Dôme volcano with plastic scintillators and Resistive Plate Chambers detectors. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(11), 7290-7307.
- Battaglia, M., M Lisowski, D. Dzurisin, M. Poland, S. Schilling, A. Diefenbach, J. Wynn (2015), Mass Intrusion at Mount St. Helens (WA) from Temporal Gravity Variations, *American Geophysical Union*, Fall meeting, San Francisco, U.S.A.
- Bodart, O., V. Cayol, S. Court, J. Koko, A fictitious domain method based on the ideas of XFEM for a linear elasticity model involving a crack, *Applied mathematics and Computation*, accepted, Jan. 2016.
- Barnoud A., V. Cayol, V. Niess, C. Cârloganu, P. Lelièvre, P. Labazuy E. Le Ménédeu, Bayesian joint muographic and gravimetric inversion applied to volcanoes, *Geophysical Journal International*, Volume 128, Issue 3, P. 2179-2194, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz300>, 2019.
- Battaglia, M., Gottsmann, J., Carbone, D., & Fernández, J. (2008). 4D volcano gravimetry. *Geophysics*, 73(6), WA3-WA18.
- Bonafede, M., & Mazzanti, M. (1998). Modelling gravity variations consistent with ground deformation in the Campi Flegrei caldera (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 81(1), 137-157.
- Cayol, V., et F. H. Cornet, 3D Modeling of the 1983-1984 Eruption at Piton de la Fournaise Volcano, Réunion Island, Indian Ocean, *J. Geophys. Res.*, **103**, 18,025-18,037, 1998.
- Charco, M., Luzón, F., Fernández, J., Tiampo, K. F., & Sánchez-Sesma, F. J. (2007). Three-dimensional indirect boundary element method for deformation and gravity changes in volcanic areas: Application to Teide volcano (Tenerife, Canary Islands). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B8).
- Currenti, G., Del Negro, C., & Ganci, G. (2007). Modelling of ground deformation and gravity fields using finite element method: an application to Etna volcano. *Geophysical Journal International*, 169(2), 775-786.
- Dieterich, J. (1994). A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B2), 2601-2618.
- Dieterich, J. H., Cayol, V., & Okubo, P. (2003). Stress changes before and during the Pu'u'O'o-Kupaianaha eruption. *US Geol. Surv. Prof. Pap*, 1676, 187-202.
- Kelfoun, K., Giachetti, T., & Labazuy, P. (2010). Landslide-generated tsunamis at Réunion Island. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4).
- Lelièvre P. G., A. Barnoud, V. Niess, C. Cârloganu, V. Cayol and C. G. Farquharson, Joint inversion methods with relative doffset correction for muon tomography and gravity data, with application to volcano imaging, *Geophysical Journal International*, Volume 218, Issue 3, September 2019, Pages 1685–1701, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz251>.
- Le Friant, A., Lebas, E., Clément, V., Boudon, G., Deplus, C., De Voogd, B., & Bachèlery, P. (2011). A new model for the evolution of La Réunion volcanic complex from complete marine geophysical surveys. *Geophysical Research Letters*, 38(9).
- Nishiyama, R., Tanaka, Y., Okubo, S., Oshima, H., Tanaka, H. K. M., & Maekawa, T. (2014). Integrated processing of muon radiography and gravity anomaly data toward the realization of high-resolution 3-D density structural analysis of volcanoes: Case study of Showa-Shinzan lava dome, Usu, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(1), 699-710.
- Oehler, J. F., Lénat, J. F., & Labazuy, P. (2008). Growth and collapse of the Reunion Island volcanoes. *Bulletin of Volcanology*, 70(6), 717-742.
- Palano, M., Guarrera, E., & Mattia, M. (2012). GPS ground deformation patterns at Mount St. Helens (Washington, USA) from 2004 to 2010. *Terra nova*, 24(2), 148-155.
- Richards-Dinger, K., & Dieterich, J. H. (2012). RSQSim earthquake simulator. *Seismological Research Letters*, 83(6), 983-990.
- Tarantola, A. (2005). *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. Society for

Industrial and Applied Mathematics.

Waite, G. P., & Moran, S. C. (2009). V P structure of Mount St. Helens, Washington, USA, imaged with local earthquake tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182(1), 113-122.

EXTENDED CURRICULUM VITAE

Valérie CAYOL, Born in St Etienne, France, on 21 march 1968

CNRS Research fellow

Volcanology group of Laboratoire Magmas and Volcanoes (LMV)

Tel: 33 (0)4 73 34 67 69 or 04 77 48 15 36

v.cayol@opgc.fr

Civil partnership contract

Two children : Eliaz born in december 2000 and Silvan born in July 2003

Parental leave : part time work (80%) from November 2003 to November 2006

Research

Topics:

- Development of methods for the analysis of deformation and seismicity data (boundary elements, fictitious domain methods, point source superposition, inversion methods)
- Study of the transfer and storage of magma
- Study of the interactions between magma movements and faults
- Study of the influence of intrusions on flank stability

Targets: Piton de la Fournaise volcano (Réunion Island, France), Nyiragongo and Nyamulagira volcanoes (Democratic Republic of Congo), Kilauea Volcano (Hawaii, U.S.A.), Soufriere Hills volcano (Montserrat, West Indies).

Experience

- 2016-2017 : Long term mission thanks to a Fullbright Researcher Fellowship, Cascade Volcano Observatory, Vancouver, Washington, U.S.A.
- 1998-present : CNRS Research Fellow, Laboratoire Magmas et Volcans (LMV), Université Clermont Auvergne, France.
- Post-doctorat at LMV. Sujet : Calcul par interférométrie radar et modélisation des déplacements de l'Etna.
- 1996-1997: Post-Doctorat, U.S. Geological Survey, Menlo Park, USA. Subject : joint inversion of seismicity and deformations to determine Coulomb stress changes.

Education

- 1996 Ph. D. in Geophysics, Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), Mention très honorable avec Félicitations. Subject : 3D elastostatic analysis of volcanic edifices by mixed boundary elements.
- 1992 Master in Geophysics, IPGP, Mention Assez Bien.
- 1991 Engineering Degree, Université de Technologie de Compiègne, France.

Distinctions

- 2020: Editor's citation for excellence in refereeing for Geophysical Research Letter (for 2019)
- 2016-2017: 6 months Fullbright grant for a sabbatical at the Cascade Volcano Observatory

- 2014: Second price of the protography contest of volcanoes night (La Noche de Los Volcanes), La Palma Research S.L., 100 Euros !

Scientific supervision

Engineers Training periods: Supervision of 3 student preparing an engineer degree

- 6 months in 2012 : Philippe Hermite in a training for ISIMA engineering school at UCA. Development of an interface for the modelling of ground displacements. Funding : Clervolc.
- 6 months in 2013 and 6 months in 2014 : Cyprien cattelain in a training for INSA engineering school in Lyon University. Development of an interface for the modelling of ground displacements. Funding : Clervolc.
- Octobre 2018-mars 2019 : Clement Dupland, student at the IUT of computation at UCA. Development of a web platform DefVolc for the interpretation of volcano deformation. Funding : european project Eurovolc.

Master Recherche : Supervision of 7 master students

- January to June 2006 : Lydie Gailler. «3D joint modelling of microgravity and displacement data ». Lydie is now an associate physicist at LMV. 6th best student of her master.
- January to June 2007 : Christelle wauthier « Study of the InSAR displacement associated to the 2202 Nyiragongo eruption ». Co-supervision with J.L. Froger. Third best student of her master.
- January to June 2007 : Fabien Albino "InSAR monitoring of the Central Volcanic Zone". Co-supervision with J.L. Froger. Second best student of his master.
- January to June 2008 : Aurelien Augier « Study of displacement associated with the 2007 Piton de la Fournaise caldera collapse event ». Co-supervision (50%) with J.L. Froger. Best student of his master.
- February to June 2012 : Attibaud Kouassi. « Applicability of Fictitious domain methods for elastostatics ». Ranked best student of his master in applied mathematics at UCA.
- February to June 2013 : Sarah Menassian « Applicability of displacement tomography methods for the study of magma intrusions ». Co-supervision (50%) with J.-L. Froger. Now at the U.S. Environmental Protection Agency.
- February to June 2016 : Alexis Hrusiewicz « Use of Numerical Modelling to determine the origin of surface displacement associated to Lastrria Gordon del Azufre between 1996 and 2010 ». Ranked best student of his master.
- Février - Juin 2017 : Quentin Dumont « Link between eruptions and flank displacement at Piton de la Fournaise ». Co-supervision (50%) with J.-L. Froger. Funding : I-Site CAP20-25. Best student of his master.

Doctorats : Supervision and co-supervision of 11 PhD students

- 1998-1999 : Olivier Roche « Modelling of caldera formation ». Co-supervision (20%)

with T. Druitt and B. van Wyk de Vries Olivier is now a Director de Recherche IRD at LMV.

- 1999-2004 : Fabien Ranvier « Numerical modelling of flank movements at Etna (Sicilia, France) evidenced by InSAR ». Co-supervision (50%) with J.-L. Froger. Fabien is now employed in »responsable service Diagnostics d'Ouvrages chez Sol » at the company Solution Das.
- 2002-2005 : Yo Fukushima « Magma transfers at Piton de la Fournaise volcano determined par 3D modelling of InSAR data between 1998 and 2000 ». Co-supervision (90%) with J. F. Lénat. Yo is now Associate Professor at the International Resaearch Institute of Disatser Science at the Tohoku University, Japan.
- 2004-2006 : Pierre Tinard « Characterization and modelling of InSAR ground displacements associated to the volcanic activity of Piton de la Founaise 2003-2007 » . Co-supervision (50%) with J.-L. Froger. Pierre is now employed at the Caisse central de Réassurance.
- 2007-2011 : Christelle Wauthier « nSAR applied to the Study of active volcanic and seismic areas in africa ». Co-supervision 80%) with F. Kervyn and N. D'Oryeye. Chrsitelle is now assiatant professor at Pennsylvania State University, Pennsylvania, U.S.A.
- 2008-2011 : Aurélien Augier « Study of the 2007 Piton de la Fournaise eruption from InSAR and GNSS data, development and application of a modelling procedure ». Co-supervision (50%) with J.L. Froger . Aurelien is now professeur agrégé in preparatory school for Higher Education in Tours.
- 2009-2011 : Thibault Catry « Magma injections and destabilization of basaltic volcanoes : a numerical study ». Co-supervision (30%) with L. Michon, V. Famin and C. Romagnoli. Thibault is research engineer at IRD in Montpellier. Bourse Franco Italienne.
- 2012-2017 : Marine Tridon « Co and post eruptive displacement associated to the 2007 eruption ». Co-supervision (60%) with J.-L. Froger and P. Bachelery. Marine Died in 2017 after a long desease.
- 2016-2019 : Delphine Smittarello « Propagation of basaltic intrusions : Analog modelling and tracking by inversion of displacement data ». Co-supervision (50%) with V. Pinel. Delphine was selected for a post-doctorate at INGV Catania, but the delay for the start is unknown because of Coronavirus.
- 2016 – 2019 : Alexis Hrysiewicz « Use of InSAR to characterize the displacement associated with lava flows at Piton de la Fournaise ». Co-supervision (10%) with J. L. Froger and T. Menand. Alexis is now on a post-doctorate at University College ine Dublin, Ireland.
- 2018-present : Quentin Dumont « Modelling of the link between eruption and flank displacements at Piton de la Fournaise ». Co-supervision (70%) with J.L. Froger et R. Paris.

Post-Doctoral researchers and engineers: Collaborations with 5 researchers

- 2003 : Nicolas Fournier. Correction of atmospheric effects on InSAR data using 3D

atmospheric models. Nicolas is a researcher and the volcanology team leader at GNS Science New Zealand Crown Research Institute. Funding : Multimo European Project.

- 2008-2009 : Pierre Tinard. Use of multi sensor InSAR data to characterize displacement of Piton de la Fournaise volcano. Co-supervision (50%) with. J.-L. Froger. Pierre is now employed at the Caisse central de Réassurance. Funding : CNES post doctoral fellowship.
- 2013 – 2015 : Sébastien Court. Development of a fictitious domain method for fractures submitted to homogeneous stress change embedded in an heterogeneous medium. Co-supervision (20%) with O. Bodart (Laboratory of mathematics at UCA) and Jonas Koko (LIMOS, UCA). Sébastien is now an associate professor at Innsbruck University (Austria). Funding : ClerVolc Laboratory of Excellence.
- 2016 - present : Farshid Dabaghi. Determination of stress distributions on fractures embedded in an heterogenous medium. Co-supervision (20%) with O. Bodart (Intitute Camille Jourdan, UMR 6620, Lyon University). Funding : ClerVolc Laboratoire of Excellence.
- 2016 -2018 : Anne Barnoud. Density imaging of puy de Dôme volcano through the Bayesian joint inversion of gravity and muography data. Co-supervision (70%) with C. Cârloganu. Funding : ClerVolc Laboratoire of Excellence.
- 2018-2020 : Anne Barnoud. Bayesian joint inversion of microgravity and InSAR data with application to Piton de la Founaise 2019 eruptions. Anne is now working as an engineer at the company Magellium. Funding : CNES post-doctoral fellowship.

Animation and management of research (most recent are first)

Grants obtained

- 2020 Pi of an Clervolc project “Influence of intrusions on the stability of Piton de la Fournaise eastern Flank”, 3 k€.
- 2020: PI of an INSU Aleas project “Influence of intrusions on the stability of Piton de la Fournaise eastern Flank”, 4 k€.
- 2019: Co-PI (PI A; Barnoud) of a project of the “Programme National de Télédétection Spatiale” (PNTS) “Joint inversion and modelling of deformation and gravity changes associated to volcanic eruptions of Piton de la Fournaise volcano, 18.5 k€
- 2018-2021: participation to the European integrating and opening infrastructures of European Interest H2020 EUROVOLC « European Network of Observatories and Research Infrastructures for Volcanology », 35 k€.
- 2017-2018: Co-PI (PI Virginie Pinel and E. Rivalta) of a Campus France Project with the German Center for Geosciencesn GFZ, Postdam, Germany (Procope program), “Mdelling of magma transport through the crust”, 6 k€.
- 2016-2018: Support from the Clervolc labex for the Post-doctorate of A. Baroud, 95 k€.
- 2016-2018: Support from the Clervolc labex for the Post-doctorate of F. Dabaghi, 95 k€.

- 2016: INSU Aleas project “Tracking the propagation of basaltic intrusions through the inversion of deformation data at Piton de la Fournaise volcano”. 5 k€.
- 2016: Fullbright Researcher Grant for a project on « Improving volcanic source determination by Bayesian joint inversion of deformation, seismic and gravity data », at the Cascade Volcano Observatory, Vancouver, USA, 45 k€.
- 2013: INSU Aleas project “Flank displacement associated to the 2007 Piton de la Founaise eruption” 4 k€.
- 2013-2015 : Support from the Clervolc labex for the Post-doctorate of S. Court. 95 k€.
- 2012-2014: 4 grants from the Clervolc Labex for training periods of masters and engineer students 12 k€.
- 2007-2010 : participant (PI F. Kervyn, Royal Museum for Central Africa MRAC, Belgium, N. D'Orey, National Museum of Natural History, Luxembourg) to the GORISK project funded by the Belgium Federal Science Policy and by the National Research Fund of Luxembourg.
- 2007 : Support for the acquisition of a data and computation server in the framework of Observatoire de Physique du Globe de Clermont (OPGC) internal project and of the volcanology group at LMV. 25 k€.
- 2005-2008 : Participant (PI F. Kervyn, MRAC, Belgium, N. D'Orey, National Museum of Natural History, Luxembourg) to the Belgium Federal Science Policy project “Study and Monitoring of Active African Volcanes by InSAR”.
- 2007-2009 : Co-PI with J.L. Froger (PI O. Merle, LMV) of the ANR Volcarisk “Evaluation of hazard on a hot spot volcano in the Indian Ocean, Réunion Island”. 13.5 k€ for our work package.
- 2005-2007 : Co-Pi (PI J.L. Froger) of a PNTS project “Toward an operational monitoring of volcanic activity. Exemple of Piton de la Fournaise. 80 k€ for the project.
- 2001-2004 : Co-PI (PI : J. Neuberg, U. Leeds) European project Multimo « Multi-Disciplinary monitoring, Modelling and Forecasting of Volcanic Hazard ». 100 k€ for my work package
- 1999-2001 : PI of a PNRN project « Flank displacement hazard at Piton de la Fournaise from a structural, numerical and analog approach » 120 kfrancs.

Scientific responsibilities, steering boards (most recent first)

- 2020 : Head of the volcanology group at LMV.
- 2019 – present : member of the COMET (Center for Observation and Modelling and Earthquakes, Volcanoes and Tectonics) advisory group.
- 2019 – present : Member the scientific committee of Clervolc, coordinator of theme 2 on the internal structure and the deformation of volcanic edifices.
- 2018-present: Elected member of the scientific committee of OPGC.
- 2017 – present : member of the scientific committee of the CNRS-INSU TelluS-ALEA project call.
- 2011-2016: in charge of the computer commission of LMV, 5 meetings a year to articulate the needs of researchers with human and material ressources.

- 2011 – 2013 : member of the Steering committee of a Belgium Federal Science Policy Office (Belspo) project on Earth observation VI-X : Study and monitoring of Virunga volcanoes using Tandem-X.
- 2007-2016 : member of the scientific committee of Vulcania, St Ours.
- 1988-2000 : elected member of the advisory board of Laboratory Magmas and Volcanoes

Jurys

- 2019: member of a recruiting jury for an assistant professor position at the Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP).
- 2010 : member of a recruiting jury for an assistant professor position at the Internal Geophysics and tectonophysics of Université de Savoie.
- 2007 : member of a recruiting jury for a engineer for Institute of Research and Development (IRD), Paris.
- 2002-2007 : member of the recruiting committee for the 35-36 section of Université de Savoie
- 2002, 2012 : Permanent member of the LMV master jury « magmatic and metamorphic processes - volcanology»
- Examiner for PhD thesis:
 - 2013: Anne Obermann (Advisors M. Campillo and E. Larose) “Monitoring the elastic properties of the crust: numerical analysis and applications using ambient seismic noise”, Université Joseph Fourier - Grenoble;
 - 2011: Agathe Schmidt (Advisor J.R. Grasso) “Which predictibility for volcanic eruptions”, Université Joseph Fourier - Grenoble;
 - 2011: Andrew Toombs (advisor G. wadge) « Volcano-Tectonic Deformation and Lava Flow Subsidence Modelling using InSAR data at Nyamuragira Volcano, D. R. Congo”, University of Reading, United Kingdom.
 - 2011: Fabien Albino (Advisor V. Pinel) “Modelling of crust-magma interactions : application to storage units and conduits of andesitic volcanoes”, Université de Savoie (2011)
 - 2009: Paola Traversa (Advisor J.R. Grasso) “Seismic response to magma forcing”, Université Joseph Fourier - Grenoble;
 - 2007: Aline Pektier (Advisors P. Bachelery, T. Staudacher) “monitoring, modelling and avolution of injection processes at Piton de la Fournaise (Réunion Island) from cross analysis of deformation, geochemical and structural data” at the University of Reunion Island;

Seminars and Conference organisation

- 2019: member of the organization committee of the *ForM@Ter MDIS workshop (Mesure de Déformations par Imagerie Spatiale)*, La Petite Pierre.
- 2017: Co-organization (with J.-L. Froger) of the *ForM@Ter MDIS workshop (Mesure de Déformations par Imagerie Spatiale)*, Besse-enChandesse
- 2016 : member of the organization committee of the *GEOMOD conference on numerical and analog modelling applied to matel and crustal deformation*,

Montpellier, France.

- 2015 : member of the organization committee of the *ForM@Ter MDIS workshop (Mesure de Déformations par Imagerie Spatiale)*, Autrans, France.
- 2012 : member of the program committee of the *AGU Chapman conference "Hawaiian volcanoes, from source to surface"* (<http://www.agu.org/meetings/chapman/2012/>), Hawaii, USA
- 2011 : Member of the scientific committee of the *spring school at Les Houches "Extraction and Fusion of Information for Displacement measurement from SAR Imagery"* (<http://www.efidir.fr>), Les Houches.
- 2005 : Organisation of a session "*New monitoring techniques applied to active volcanoes*" at the *European Geophysical Union*.
- 2005 : Organisation of a scientific day on Piton de la Fournaise at LMV
- 2001-2004 : organisation of LMV weekly seminars

Reviews and Editorial activity

- Reviews for national and international research agencies : *NSF, Icelandic Research fund, the LMV Labex Clervolc, the Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble Labex, the Fulbright commission* (16 researcher projects and 5 doctoral projects), *ANR*.
- Reviews for journal : *Nature Geoscience, Nature scientific Report, Nature communications, Geophysical Research Letter, Journal of Geophysical Research, Journal of Volcanology and geothermal Research, Bulletin of Volcanology, PAGEOPH, Journal of Geodynamics*
- Co-editor with R. Carrey, D. Weiss et M. Poland of an *AGU monograph "Hawaiian volcanoes from source to surface"* following the *Chapman conference, Hawaiian volcanoes from source to surface* released in 2015.

Teaching and outreach

Teaching

Year	Description and University	Type	Public	Nb hours/yr
2018-2020	Numerical modelling: introduction to the finite element method	Lecture + PW	Master	3 + 7
2013-2016	Geomechanics : Elasticity, LMV, Université Blaise Pascal	Lecture + tutorial	Master	2 + 3
2011, 2015-2016	Research methodology : numerical modelling and inversions, LMV, Université Blaise Pascal	Lecture + PW ¹	Master	3 + 9
2004-2016	Deformation and seismicity – case of Piton de la Fournaise Volcano, LMV, Université Blaise Pascal	Lecture	Master	3

¹ Practical work

2002	Geophysics for future high school teachers Université Jean Monnet, St Etienne	Lecture	Undergrad	6
1995-1996	Numerical Modelling	Tutorials	Master	20
1993-1996	Rock mechanics	Tutorials	Master	20-40

Outreach

- 2018: Animation about volcanoes for the elementary school of Rive de Giers.
- 2017: hlp during the Mt St Helens field work for the IAVCEI meeting that took place in Portland, USA.
- 2013: Guest at the *Oullins Scientific Film Festival* for a debate about the film "Memoire de Volcans by F. de Riberolles, Oullins, France
- 2007: Animation about volcanoes for 4 classes of the elementary school of Villeboeuf le Haut in Saint-Etienne.
- 2006 : Invited Seminar « Apports de la télédétection spatiale à la connaissance du Piton de la Fournaise » at the Meeting « La Réunion face aux risques naturels : gouvernance locale et coopération régionale », St Denis, La Réunion.
- 2004 ; présentation of my researcher activity at LMV to a high school class.

National and international collaborations

Collaborations

- **CNES** : Radaraat data of Piton de la Fournaise. P. Durand et D. Massonnet collaborated during the doctorates of Yo Fukushima and Pierre Tinard (*Fukushima et al., 2005 and 2010*).
- **IPGP** : (1) Modelling of eruptions at Piton de la Fournaise. (*Peltier et al., 2009*). Integration of GNSS and InSAR data (*Smittarello et al., 2019a and 2019b*) ; (2) Study on the construction of Piton de la Fournaise (*Michon et al., 2009*) ; (3) Influence of sheared sills (*Cayol et al., 2014*) ; (3) Modelling of displacement and stress at Ambrym, Vanuatu (*Shreve et al., 2020*) ;
- **ISterre Chambéry , German Research Centre for Geosciences at GFZ** : Understanding of the propagation of intrusions (*Smittarello et al., 2019a and 2019b ; Maccaferri et al., 2019*)
- **Laboratoire of Mathématiques, Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes at UCA, Institut Camille Jourdan at Université de Lyon** : Fictitious domains for realistic and rapid inversion of ground displacements (*Bodart et al., 2016 ; 2018*)
- **USGS, USA** : (1) **Menlo Park** : Kilauea deformation (Cayol et al., 2000), rate and state friction (*Dieterich et al., 2000, 2003*) ; (2) **Cascade Volcano Observatory** : Cluster methode for joint inversions (ongoing with R. Denlinger).
- **UC Riverside, USA** : rate and state friction for flank displacement (K. Richards-Dinger, J. Dieterich).

- **National Museum of Natural History, Luxembourg, Royal Museum for Central Africa, Belgique, Penn State University, USA** : study of InSAR displacement of Nyiragongo and Nyamuragira (*Wauthier et al., 2012, 2013, 2015*).

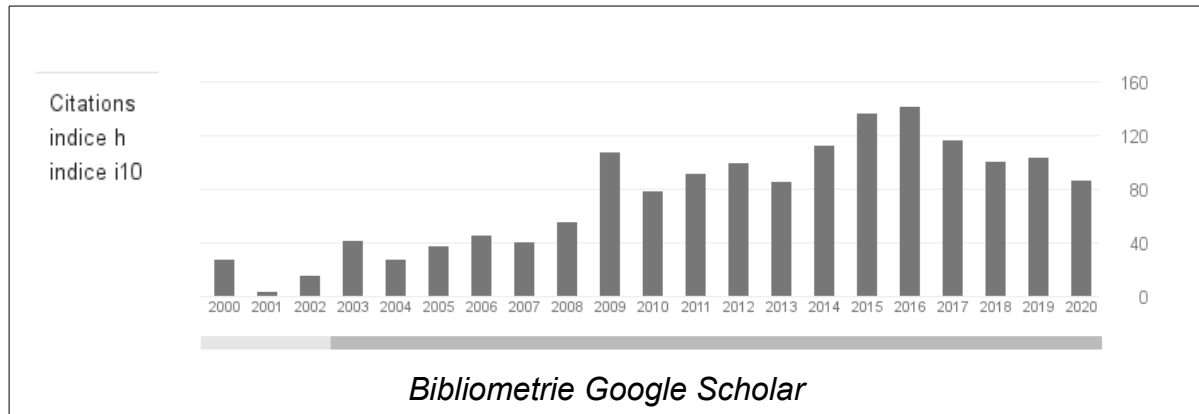
Journeys in other laboratories

- Feb-March 2000 : 3 weeks at the Hawaii Volcano Observatory. Study of the interactions between magma intrusions and microearthquakes at Kilauea. Collaboration with J. Dieterich, A. Miklius and A. Okamura.
- November 2001 : two weeks at the USGS Menlo Park. Study of the interactions between magma intrusions and microearthquakes at Kilauea. Collaboration with J. Dieterich.
- August 2016 – August 2017 : long term mission on a Fulbright researcher grant at the Cascade Volcano Observatory (Vancouver, Washington, USA). Determination of the source of déformation, seismicity and gravity change from clusters of point sources. Collaboration with R. Denlinger.
- May 2017 : Journey at UC Riverside (California). Analysis of flank displacements at Kilauea using faults with rate and state friction. Collaboration with J. Dieterich and K. Richards Dinger.

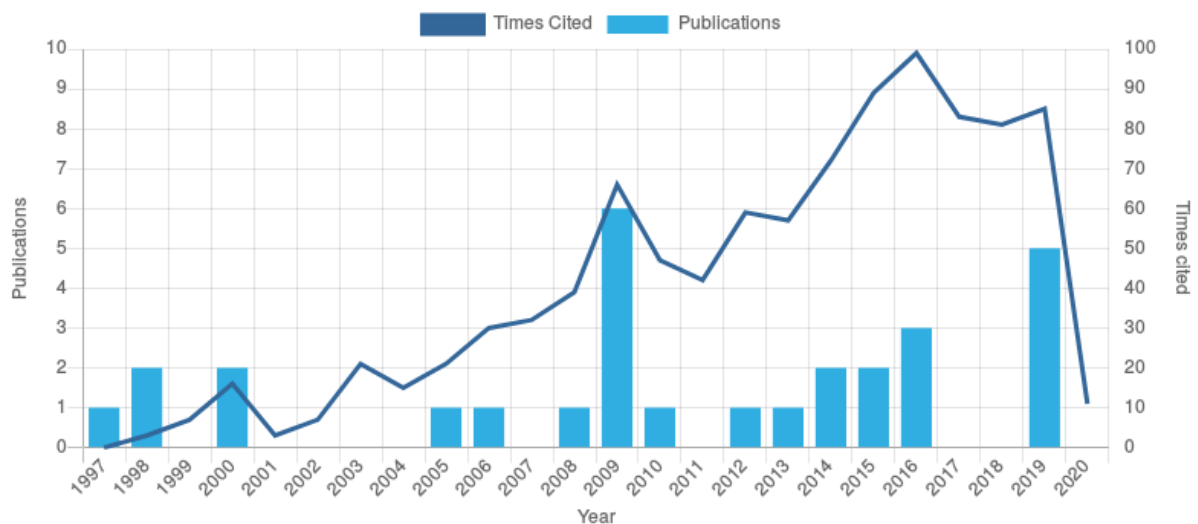
PUBLICATIONS

Bibliometry

- Google scholar, in sept. 2020



- Web of Science



PUBLICATIONS IN WEB OF SCIENCE	SUM OF TIMES CITED	H-INDEX	AVERAGE CITATIONS PER ITEM	AVERAGE CITATIONS PER YEAR
29	985	16 [®]	34.0	42.8

Revues à comité de lecture

1. **Cayol, V.**, et F. H. Cornet, 3D Mixed Boundary Elements for Elastic Deformation Field Analysis, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **34**, 275-287, 1997. **121 citations**
2. **Cayol, V.** and F.H. Cornet, Effect of Topography on the interpretation of the deformation field of prominent volcanoes - Application to Etna, *Geophys. Res. Let.*, **25**, 1979-1982, 1998. **157 citations**
3. **Cayol, V.**, et F. H. Cornet, 3D Modeling of the 1983-1984 Eruption at Piton de la Fournaise Volcano, Réunion Island, Indian Ocean, *J. Geophys. Res.*, **103**, 18,025-

- 18,037, 1998. **85 citations**
4. Briole, P., A. Avallone, F. Beauducel, A. Bonforte, **V. Cayol**, C. Deplus, C. Delacourt, J.-L. Froger, B. Malengreau, G. Puglisi, Interférométrie radar appliquée aux volcans : cas de l'Etna et des champs Phlégréens (Italie), *Comité National Français de Géodésie et Géophysique, Rapport quadrienal 1995-1998*, 121-128, 1999.
 5. **Cayol, V.**, J. Dieterich., A. Okamura et A. Miklius, High Magma Storage Rates Before the 1983 Eruption of Kilauea, Hawaii, *Science*, **288**, 2343-2346, 2000. **115 citations**
 6. Dieterich, J., **V. Cayol** et P. Okubo, The use of earthquake rate changes as a stress-meter at Kilauea volcano, *Nature*, **408**, 457-460, 2000. **192 citations**
 7. Dieterich J., **V. Cayol**, and P. Okubo, Stress Changes Before and During the Pu'u 'O'o-Kupaianaha Eruption, *U.S. Geological Survey Prof. Paper*, **1676**, 187-201, 2003. **26 citations**
 8. Fukushima Y., **V. Cayol** and P. Durand, Finding realistic dike models from interferometric synthetic aperture radar data: The February 2000 eruption at Piton de la Fournaise, *J. Geophys. Res.*, **110**, B03206, doi: 10.1029/2004JB003268, 2005. **163 citations**
 9. Green, D. N., J. Neuberg, and **V. Cayol**, Shear stress along the conduit wall as a plausible source of tilt at Soufrière Hills volcano, Montserrat, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L10306, doi:10.1029/2006GL025890, 2006. **46 citations**
 10. Peltier A., V. Famin, P. Bachèlery, **V. Cayol**, Y. Fukushima, T. Staudacher, Cyclic magma storages and transfers at Piton de La Fournaise volcano (La Reunion hotspot) inferred from deformation and geochemical data, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **270**, 2-4, 180-188, doi:10.1016/j.epsl.2008.02.042, 2008. **95 citations**
 11. Michon L., **V. Cayol**, L. Letourneur, A. Peltier, N. Villeneuve, T. Staudacher, Edifice growth, deformation and rift zone development in basaltic setting: insights from Piton de la Fournaise shield volcano (Réunion Island, Indian Ocean). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **184**, 14-30, doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.11.002, 2009. **32 citations**
 12. Peltier, A., T. Staudacher, P. Bachèlery, **V. Cayol**, Formation of the April 2007 caldera collapse at Piton de La Fournaise volcano: insights from GPS data, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, **184**, 152-163, doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.09.009, 2009.
 13. Peltier A., Hurst T, Scott B., **Cayol V.**, Structures involved in the vertical deformation at Lake Taupo (New Zealand) between 1979 and 2007: New insights from numerical modelling, *J. Geophys. Res.*, **181**, 173-184, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.01.017, 2009.
 14. Battaglia J. and **V. Cayol**, A comment on "Hidden dykes detected on Ultra Long Period seismic signals at Piton de la Fournaise volcano ?" by Houlié N. and Montagner J.-P., *Earth Planet. Sc. Lett.*, **287**, 1-2, 284-287, doi:10.1016/j.epsl.2009.06.023, 2009.
 15. Fukushima, Y., **V. Cayol**, P. Durand, and D. Massonnet, Evolution of magma conduits during the 1998-2000 eruptions of Piton de la Fournaise volcano, Réunion Island, *J. Geophys. Res.*, **115**, B10204, doi:10.1029/2009JB007023, 2010. **65 Citations**
 16. Wauthier, C., **V. Cayol**, F. Kervyn and N. d'Oreye, Magma sources involved in the 2002 Nyiragongo eruption, as inferred from an InSAR analysis, *J. Geophys. Res.*, **117**, doi:10.1029/2011JB008257, 2012. **66 citations**
 17. Froger, J.-L., T. Souriot, N. Villeneuve, T. Rabaute, P. Durand, **V. Cayol**, A. Di Muro, T. Staudacher and B. Fruneau, Apport des données TerraSAR-X pour le suivi de l'activité du Piton de la Fournaise, *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 197, 86-101, 2012.
 18. Wauthier C., **V. Cayol**, M. Poland, F. Kervyn, N. d'Oreye, A. Hooper, S. Samsonov, K. Tiampo, B. Smets, Nyamulagira's Magma Plumbing System Inferred from 15

- Years of InSAR, *Geol. Soc. London Special Publications: Remote Sensing of Volcanoes and Volcanic Processes: Integrating Observation and Modelling*, 380, doi:10.1144/SP380.9, 2013. **34 citations**
19. Remy, D., Froger, J. L., Perfettini, H., Bonvalot, S., Gabalda, G., Albino, F., **Cayol, V.**, Legrand, D., De Saint Blanquat, M., Persistent uplift of the Lazufre volcanic complex (Central Andes): New insights from PCAIM inversion of InSAR time series and GPS data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, DOI: 10.1002/2014GC005370, 2014.
 20. **Cayol V.**, T. Catry, L. Michon, M. Chaput, V. Famin, O. Bodart, J. L. Froger, C. Romagnoli, Sheared sheet intrusions as mechanism for lateral flank displacement on basaltic volcanoes: Application to Réunion Island volcanoes, *J. Geophys. Res.*, **119**, doi:10.1002/2014JB011139, 2014
 21. Froger J.-L., V. Famin V., **V. Cayol**, A. Augier, L. Michon; J-F Lénat, Time-dependent displacements during and after the April 2007 eruption of Piton de la Fournaise, revealed by interferometric data, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **296**, p.55-68, doi:[10.1016/j.jvolgeores.2015.02.014](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.02.014), 2015.
 22. Wauthier, C., **V. Cayol**, B. Smets, N. d'Oreye, F. Kervyn, Magma pathways and their interactions inferred from InSAR and stress modeling at Nyamulagira Volcano, D.R. Congo, *Remote Sensing*, **7**, 15179-15202, doi:10.3390/rs71115179, 2015. **15 citations**
 23. Bodart O., **V. Cayol**, S. Court and J. Koko, XFEM based fictitious domain method for linear elasticity model with crack, *SIAM Journal on Scientific Computing*, **38**(2), 219-246, doi: 10.1137/15M1008385, 2016.
 24. Tridon, M., **V. Cayol**, J-L. Froger, A. Augier, and P. Bachèlery, Inversion of coeval shear and normal stress of Piton de la Fournaise flank displacement, *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, doi: 10.1002/2016JB013330, 2016.
 25. Maccaferri, F., D. Smittarello, V. Pinel, **V. Cayol**, On the propagation path of magma-filled dikes and hydrofractures: the competition between external stress, internal pressure, and crack length, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 2064–2081. <https://doi.org/10.1029/2018GC007915>, 2019.
 26. Smittarello, D., **Cayol, V.**, Pinel, V., Peltier, A., Froger, J-L., & Ferrazzini, V. (2019). Magma propagation at Piton de la Fournaise from joint inversion of InSAR and GNSS. *Journal of Geophysical Research*, 124, 1361– 1387, <https://doi.org/10.1029/2018JB016856>
 27. Barnoud A., **V. Cayol**, V. Niess, C. Cârloganu, P. Lelièvre, P. Labazuy E. Le Ménèdeu, Bayesian joint muographic and gravimetric inversion applied to volcanoes, *Geophysical Journal International*, Volume 128, Issue 3, P. 2179-2194, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz300>, 2019.
 28. Lelièvre P. G., A. Barnoud, V. Niess, C. Cârloganu, **V. Cayol** and C. G. Farquharson, Joint inversion methods with relative doffset correction for muon tomography and gravity data, with application to volcano imaging, *Geophysical Journal International*, Volume 218, Issue 3, September 2019, Pages 1685–1701, <https://doi.org/10.1093/gji/ggz251>.
 29. Froger J.-L., V. Pinel, M-G. Bato, M. Tridon, D. Smittarello, J-M. Prival, A. Hrysiewicz, **V. Cayol**, Y. Guehenneux, Apport des données SAR à la compréhension et à la surveillance des volcans ; exemple du Piton de la Fournaise, *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 219-220, 2019.
 30. Smittarello, D., **V. Cayol**, V. Pinel, J.-L. Froger, A. Peltier, Q. Dumont, Combining InSAR and GNSS to track magma transport at basaltic volcanoes, Invited publication at *Remote sensing*, vol.11, p.2236, DOI:[10.3390/rs11192236](https://doi.org/10.3390/rs11192236), 2019.
 31. Barnoud* A., **V. Cayol**, P. Lelièvre, A. Portal, P. Labazuy, P. Boivin, L. Gailler, Robust Bayesian joint inverions of muographic and gravimetric data for the density imaging of Puy de Dôme volcano (France), Minor revision for *Frontiers in Earth Science*, August 2020.

32. Shreve T., R. Grandin, D. Smittarello, **V. Cayol**, V. Pinel, Y. Morishita, What triggers caldera ring-fault subsidence at Ambrym volcano? Insights from the 2015 dike intrusion and eruption, in revisions for JGR, Sept. 2020.
33. Dumont Q., V. Cayol, J.-L. Froger, Mitigating biased inversions resulting from viewing geometries in InSAR, to be submitted to *Geophysical Research Letter*, 2020.
34. Bodart O. V. Cayol, F. dabaghi, and J. Koko, An inverses problem in an elastic domain with a crack : a fictitious domain approach, to be submitted to *Computational Geosciences*.
35. Smittarello D. V. Pinel, F. Maccaferri, E. Rivalta, S. Furst, V. cayol, Characterizing the physical properties of gelatin, a classic analog for the brittle elastic crust, insight from numerical modelling. to be submitted to *Tectonophysics*.

Conférences invitées dans des congrès

1. **Cayol, V.**, Dieterich J. H., Okubo, P., **Invitée**, Stresses Associated to the Onset of the Pu'u 'O'o-Kupaianaha Eruption, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., Décembre 2003.
2. Fukushima, Y., **V. Cayol**, P. Durand, **Invitée**, Finding realistic dike models from Insar Data: Applications to 1998-2000 eruptions at Piton de la Fournaise, *RSPSoc Annual Meeting*, Portsmouth, G.B., Septembre 2005.
3. Fukushima, Y., **V. Cayol**, **Invité**, :Geometry of magmatic conduits at Piton de la Fournaise, *European Geophysical Union*, Vienne, Autrice, Avril 2006.
4. **Cayol, V.**, Y. Fukushima, P. Tinard, J.-L. Froger, Ph. Durand, T. Souriot et D. Massonnet, Apports de la télédétection spatiale à la connaissance du Piton de la Fournaise, *La Réunion face aux risques naturels : gouvernance locale et coopération régionale*, St Denis de la Réunion, septembre 2006.
5. Tinard. P., **Cayol V.**, Froger J.-L., Fukushima Y., **Invité** New Insights on Piton de la Fournaise Volcanic Activity Inferred from a Multiple Swath InSAR Monitoring (La Réunion Island), *Assemblée Générale de l'IAVCEI*, Reykjavik, Islande, août 2008.
6. **V. Cayol**, C. Wauthier, N. D'Oreye, F. Kervyn, **Invitée**, Deformation modelling from multiswath InSAR data at Nyiragongo and Nyamulagira volcano, Workshop, *Evaluating, Monitoring and Communicating Volcanic and Seismic Hazards in East Africa*, Trieste, Italie, 17-28 August 2009.
7. **V. Cayol**, J.-L. Froger, Y. Fukushima, A. Augier, Ph. Durand et D. Massonnet, **Invitée**, Apports de l'interférométrie radar à la connaissance du Piton de la Fournaise, *Ecole thématique cnrs "Identification à partir de mesures de champs -application à la mécanique des matériaux et des structures"*, Clermont-Ferrand, Juin 2009.
8. **Cayol V.**, Augier A., et J.L. Froger, **Invitée**, Apports de l'interférométrie radar à l'étude de l'éruption de mars-avril 2007 au Piton de la Fournaise, *Colloque autour de l'ANR EFIDIR*, Aussois, 1-3 avril 2010.
9. Wauthier C., **V. Cayol**, F. Kervyn, and N. d'Oreye, **Invitée**, Nyiragongo Volcano 2002 Eruption Constrained by Multibeam InSAR Data, *European Geoscience Union General Assembly 2011*, Vienna, Austria, 3-8 April 2011.
10. **Cayol, V.**, Wauthier C., F. Kervyn and N. d'Oreye, **Invitée**, Magma driven extension in an immature continental rift based on InSAR observations of Nyiragongo Volcano in 2002, 96th Journées Luxembourgeoises de Géophysique, 24-25 novembre 2011.
11. **Cayol V.**, **Invitée**, Tracking intrusions from deformations with applications to Piton de la Fournaise and Nyiragongo, *"MEMOVOLC meeting, Anticipating volcanic eruptions"*. Feb. 2015, Pisa.
12. **Cayol V.**, **Invitée**, Detecting intrusions from deformations with applications to Piton de la Fournaise and Nyiragongo, *Earth Flow Seminars*, Oslo, Norvège, juin 2016.
13. **Cayol, V.**, A. Augier, S. Court, J.-L. Froger, S. Menassian, Improved Cluster of Volume Strain Method Applied to Volcano Deformation, *IAVCEI 2017 Scientific*

Assembly, Portland, USA, aout 2017.

14. **Cayol**, V., Smittarello D., V. Pinel, A. Peltier, J.-L. Froger, **Invitée**, Propagation of magma associated to Piton de la Fournaise eruptions from joint inversion of InSAR and GNSS data, *26ème Réunion des Sciences de la Terre*, Lille, France. Nov., 2018.
15. **Barnoud A.**, Cayol V., Niess V., Cârloganu C., Lelièvre P., Labazuy P. & Le Ménédeu E., **Invitée**, Inversion jointe de données muographiques et gravimétriques avec un formalisme Bayésien. Application au puy de Dôme. *Colloque G2 Resif*, Montpellier, Nov 2018.
16. **Cayol V.**, C. Wauthier, N. D'Oreye, F. Kervyn, M. Tridon, J.L. Froger, **Invitée** : Assets of determining stress changes from InSAR displacement at Kivu and Reunion, *100th Journées Luxembourgeoise de Géodynamique, Focus on the Kivu Region*, EGCS, Luxembourg 27-28 mars 2019.
17. **Cayol V.**, C. Wauthier, N. D'Oreye, F. Kervyn, M. Tridon, J.L. Froger, **Invitée** : Assets of determining stress changes from InSAR displacement with examples from the Kivu Volcanic Region and Piton de la Fournaise volcano, *COMET annual meeting*, York, U.K., Juin 2019.
18. Cayol, V., Smittarello, D., Pinel, V., Peltier A., Froger J.L., **Invitée** : Combining InSAR and GNSS to model magma transport during the May 2016 eruption of Piton de la Fournaise Volcano (La Réunion Island), JpGU, Juil., 2020.

Actes à colloques à comité de lecture

1. Bonvalot, S., J.L. Froger, D. Remy, K. Bataille, **V. Cayol**, J. Clavero, D. Comte, G. Gabalda, K. Gonzales, L. Lara, J. Naranjo, D. Legrand, O. Macedo, P. Mothes, A. Pavez, C. Robin, Application of INSAR interferometry and geodetic surveys for monitoring Andean volcanic activity : first results from ASAR-ENVISAT data, *International Symposium on the géodynamics of the Andes*, Barcelone, Espagne, Septembre 2005.
2. d'Oreye N., Kervyn F., **Cayol V.**, Wauthier C., and the GVO team, InSAR monitoring of the Nyiragongo – Nyamuragira volcanoes (DR of Congo), Study of the Nyiragongo January 2002 and NYamulagira November 2006 eruptions, *Proceedings of the ESA Envisat Symposium 2007*, Montreux, Suisse, 22-27 avril 2007 (<http://earth.esa.int/workshops/envisatsymposium/proceedings/sessions/4B4/462685do.pdf>).
3. d'Oreye N., Kervyn F., Calais E., **Cayol V.**, Fernández J., Frischknecht C., Gonzales P., Heleno S., Oyen A. and Wauthier C., Systematic InSAR monitoring of African active volcanic zones: what we have learned in two years, or an harvest beyond our expectations, *Proceedings of the second workshop on USE of Remote Sensing Techniques for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas (USEReST 2008)*, Naples, Italy, November 11-14, 2008.
4. Wauthier C., A. Oyen, P. Marinkovic, **V. Cayol**, J. Fernández, P. Gonzalez, R. F. Hanssen, F. Kervyn, N.d'Oreye, M. Shirzaei, T. R. Walter, L-band and C-band InSAR Studies of African Volcanic Areas. *IGARSS (2) 2009*: 210-213, 2009.
5. Wauthier, C., **V. Cayol**, F. Kervyn, and N. d'Oreye, Modeling of InSAR displacements related with the January 2002 eruption of Nyiragongo volcano , *Proceeding of the 26th ECGS Workshop concerning Active Volcanism and Continental Rifting*, 2009.
6. Wauthier, C., **V. Cayol**, F. Kervyn, d'Oreye, N. Modeling of InSAR displacements related with the January 2002 eruption of Nyiragongo volcano, *Cahier du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, vol.29, 115-128, 2010.
7. Bodart O., **V. Cayol**, S. Court*, J. Koko, Fictitious domain method for fracture models in elasticity, *Progress in industrial mathematics at ECMI 2014*, Editors G. Russo, V. Capasso, G. Nicosia, V. Romano, Springer International Publishing, 22, ISBN 978-3-319-23412-0, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-23413->

[7](#), 2016

8. Bodart, O., **V. Cayol**, F. Dabaghi and J. Koko, Fictitious domain method for an inverse problem in volcanoes, *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XXV Series: Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, Editors Haynes, R., MacLachlan, S., Cai, X.-C., Halpern, L., Kim, H.H., Klawonn, A., Widlund, O. Vol. 138, ISBN, Springer International Publishing, 498 p., <http://www.ddm.org/DD25/Proc-25.php>, 2020.

Séminaires invités

1. 1998: *Département de Sismologie de l'IPGP*;
2. 1998: *LGIT à Grenoble*;
3. 1999: *Laboratoire de Dynamique Terrestre et Planétaire de l'Observatoire Midi Pyrénées, Toulouse*;
4. 2002: *Laboratoire de Mécanique des Roches de l'IPGP*;
5. 2003: *Département de Géophysique de l'Université de Leeds*;
6. 2009: *LGIT à Grenoble*;
7. 2014: *Laboratoire de Géosciences Réunion, IPGP, Université de la Réunion*;
8. Avril 2017: *Department of Geosciences, Pennsylvania State University, State College, PA, USA, Flank Displacement at Reunion Island*;
9. Avril 2017: *Department of Earth and Atmospheric Sciences at Cornell University, Ithaca, NY, USA, Flank Displacement at Reunion Island*;
10. Mai 2017: *Department of Earth Sciences, University of Oregon, Eugene, OR, USA, Flank Displacement at Reunion Island*;
11. Mai 2017: *US Geological Survey, Cascade Volcano Observatory, Vancouver, WA, USA, Flank Displacement at Reunion Island*;
12. Mai 2017: *Department of Earth Sciences, U.C. Riverside, Riverside, CA, Flank Displacement at Reunion Island*;
13. November 2018: *Ecole Normale Supérieure de Paris, Paris, Flank Displacement at Piton de la Fournaise*;
14. Février 2019: *Laboratoire de Géologie, Université Lyon 1, Lyon, Flank Displacement at Piton de la Fournaise*;

Livres et ouvrages

1. Carey R., **V. Cayol**, M. Poland, D. Weis (Editors), *Hawaiian Volcanoes, From Source to Surface, Geophysical Monograph Series, vol. 208*, Wiley, 600p., ISBN: 978-1-118-87204-8, DOI: 10.1002/9781118872079, Feb. 2015.
2. Froger J. L., **V. Cayol**, V. Famin, The March-April 2007 eruption of Piton de la Fournaise as recorded by interferometric data, In: P. Bachèlery, Lénat, J.-F., Di Muro, A., Michon, L. (Editors), *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean: Piton de la Fournaise and Karthala. Active Volcanoes of the World*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg, 428p., ISBN 978-3-642-31394-3, 2016.

Logiciels

Cayol, V., F.H. Cornet, J.H. Curran, B.T. Corkum, S. Shah, Mixed boundary elements for 3D elastostatic calculations, 1992-2000.

Cayol, V. et al., Defvolc (<https://www.opgc.fr/defvolc/>) logiciel permettant la modélisation inverse des déplacements de surface qu'ils soient induits par des fractures (failles ou

intrusions de magmas) ou des réservoirs magmatiques. Un service de calcul à la demande est aussi fourni pour les utilisateurs enregistrés. Cette plateforme a été mise en place dans le cadre du projet de Networking Eurovolc (2018-2021). Il est encore en cours d'évaluation par les partenaires du projet. Il a vocation à devenir un code communautaire pour les observatoires volcanologiques.

Le logiciel éléments frontières a été utilisé pour des publications indépendantes des miennes par :

1. F. Beauducel (Physicien Adjoint en détachement IRD en Indonésie, *Institut de Physique du Globe de Paris, IGP*),
2. J.-L. Froger (Maitre de conférence, Laboratoire Magmas et Volcans, l'*Université Clermont Auvergne*, France)
3. D. Remy (Ingénieur de Recherches, Géosciences Environnement, Université P. Sabatier, Toulouse)
4. Y. Fukushima et ses étudiants (Chercheur au *International Research Institute of Disaster Science Tohoku University*, Japon),
5. A. Peltier (Physicienne adjointe à L'*Institut de Physique du Globe de Paris*, directrice de l'*Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise*)
6. C. Wauthier et ses étudiants (Chercheuse, *Penn State University*, Pennsylvania, U.S.A).
7. Tara Shreve (Doctorante, *Equipe de Tectonique et Mécanique de la Lithosphère, IGP*, Paris).
8. Jurgen Neuberg et David Green (*University of Leeds*, Royaume Uni)

Communications à des congrès et symposiums

1. **Cayol, V.**, et F. H. Cornet, 3D Elastic Deformation Field Analysis of Volcanic Structures with Mixed Boundary Elements, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., décembre 1995.
2. **Cayol, V.**, et F. H. Cornet, 3D Analysis of the effects of topography on the deformation field of volcanic structures using mixed boundary elements, *European Geophysical Society*, La Haye, Pays-Bas, 1996.
3. **Cayol, V.**, et F. H. Cornet, Analyse par éléments frontières mixtes des déformations du Piton de la Fournaise liées à l'éruption de 1983-1984, *Assemblée générale du Comité National Français de Géophysique et Géodésie*, Paris, 1996.
4. **Cayol, V.**, et F. H. Cornet, 3D Elastostatic Analysis of the Deformation Field Associated to the 1983-84 Eruption of Piton de la Fournaise (Réunion Island, France), *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., décembre, 1996.
5. **Cayol, V.**, J. Dieterich et P. Okubo, Inversion conjointe sismicité - déformations au Kilauea, *Réunion des Sciences de la Terre*, Brest, Avril 1998.
6. **Cayol, V.**, J. Dieterich et P. Okubo, Use of earthquakes and deformations as remote sensing stress meters, *European Geophysical Society*, Nice, Avril 1998.
7. **Cayol, V.**, J. Dieterich, A. Okamura, A. Miklius, High Rates of Flank Deformation Prior to the 1983 eruption of Kilauea, Hawaii, *Workshop "Mouvements actuels de la surface terrestre et des massifs rocheux : mesure et interprétation"*, *Ecole de Physique des Houches*, Octobre, 1998.
8. **Cayol, V.**, J. Dieterich, A. Okamura, A. Miklius, High Rates of Flank Deformation Prior to the 1983 eruption of Kilauea, Hawaii, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., Décembre 1998.
9. **Cayol, V.**, J. Dieterich, and P. Okubo, Inversion de la microsismicité induite par des variations de contraintes : Cas de l'éruption du Kilauea de 1983, *Workshop "Fractures - Transport dans les fractures"*, Carry le Rouet, juin 1999.
10. **Cayol, V.**, J. Dieterich, and P. Okubo, Modélisation de la sismicité et de la

- déformation associées aux volcans actifs : l'éruption du Kilauea de 1983, *Congrès General de la Société Française de Physique*, Clermont-Ferrand, juillet 1999.
11. Ranvier F., **V. Cayol**, J.-L. Froger et T. Souriot, Numerical modelling of large flank collapse at Mount Etna, *European Geophysical Union*, Nice, Avril, 2001.
 12. Ranvier F., **V. Cayol**, J.-L. Froger et T. Souriot, Numerical modelling of ground deformation Revealed at Mount Etna by ERS, *European Union of Geosciences*, Strasbourg, Avril, 2001.
 13. Dieterich J. H. , **V. Cayol** and P. Okubo, Inversion of Earthquake Rates for Stress Changes, Part 1: Inversion method and validation tests, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., Décembre 2001.
 14. Okubo, P. G., J. H. Dieterich, **V. Cayol**, Inversion of earthquake rates for stress changes, Part 2: Comprehensive inversions for stress changes at Kilauea and Mauna Loa Volcanoes, Hawaii, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., Décembre 2001.
 15. Ranvier F., **V. Cayol**, J.-L. Froger and T. Souriot, Numerical Modelling of displacements revealed at Mount Etna by ERS SAR interferometry, *Colloque "Volcanisme explosif en zone de subduction"*, Martinique, May 2002.
 16. Ranvier F., **V. Cayol**, J.-L. Froger and T. Souriot, Numerical modelling of large scale flank displacements at mount Etna revealed by ERS sar interferometry, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., Décembre 2002.
 17. **Cayol, V.** and R. Herd, Anelastic deformation on Montserrat, *European Geophysical Union*, Nice, Avril 2003.
 18. Fukushima, Y., P. Durand and **V. Cayol**, Seaward Displacements at Piton de la Fournaise Measured by Radar Interferometry between 1998 and 2000, *European Geophysical Union*, Nice, Avril 2003.
 19. **Cayol, V.**, Dieterich J. H., Okubo, P., A. Miklius and A. Okamura, Inversion of deformations and microseismicity in order to determine stresses associated to the onset of the Pu'u 'O'o eruption, *European Geophysical Union*, Nice, Avril 2004.
 20. **Cayol, V.**, Green, D. and J. Neuberg, Location of the source of deformations and hybrid Earthquakes cycles at Montserrat, *European Geophysical Union*, Nice, Avril 2004.
 21. Fukushima, Y., **V. Cayol** and P. Durand, Finding and appraising possible dike models from InSAR data: Application to the eruptions at Piton de la Fournaise Volcano, *European Geophysical Union*, Nice, Avril 2004.
 22. **Cayol, V.**, J. Dieterich, P. Okubo, A. Miklius and A. Okamura, Stresses Associated to the Onset of the Pu'u Oo-K'upaianaha Eruption, *Assemblée Générale de l'IAVCEI*, Pucon, Chili, Novembre 2004.
 23. **Cayol, V.**, D. Green and J. Neuberg, Location of the source of deformations and hybrid earthquakes cycles at Montserrat, *Assemblée Générale de l'IAVCEI*, Pucon, Chili, Novembre 2004.
 24. Fukushima, Y., **V. Cayol**, P. Durand, Finding and appraising possible dike models from InSAR data: Application to the eruptions at Piton de la Fournaise, *Assemblée Générale de l'IAVCEI*, Pucon, Chili, Novembre 2004.
 25. Fournier, N., **V. Cayol**, J.-L. Froger, W. Wobrock, 2004. Atmospheric artefacts in InSAR. *Assemblée Générale de l'IAVCEI*, Pucon, Chili, Novembre 2004.
 26. Ranvier, F. **V. Cayol**, J.-L. Froger, 3D Numerical Modelling of Etna flank movements observed by radar interferometry, *Assemblée Générale de l'IAVCEI*, Pucon, Chili, Novembre 2004.
 27. Fukushima, Y., **V. Cayol**, and P. Durand, 3D modelling of InSAR data using a mixed boundary element method: Estimation of dike intrusion models associated with eruptions at Piton de la Fournaise, *Geodetic Society of Japan*, Tokyo, Japon, Décembre 2004.
 28. Fukushima, Y., **V. Cayol**, and P. Durand, 3D modelling of InSAR data using a mixed boundary element method: Estimation of dike intrusion models associated

- with eruptions at Piton de la Fournaise, *Volcanological Society of Japan*, Shizuoka, Japon, Décembre 2004.
29. Fukushima, Y., **V. Cayol**, P. Durand, Finding realistic dike models from Insar Data: Applications to 1998-2000 eruptions at Piton de la Fournaise, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., Décembre 2004.
 30. Tinard, P., J.-L. Froger, Y. Fukushima, **V. Cayol**, P. Briole, T. Staudacher, T. Souriot, One and a Half Year of INSAR Monitoring of Volcanic Activity at Piton de la Fournaise, Réunion Island, With ASAR-ENVISAT Data, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., Décembre 2004.
 31. Tinard, P., J.-L. Froger, P. Briole, T. Staudacher, **V. Cayol**, Y. Fukushima, T. Souriot, Two years of InSAR monitoring of volcanic activity at Piton de la Fournaise (Réunion Island) using ENVISAT-ASAR data, *Use of remote sensing techniques for monitoring volcanoes and seismogenetic areas (ESA, INGV & IREA)*, Naple, Italie, juin 2005.
 32. Bonvalot, S., J.L. Froger, D. Remy, K. Bataille, **V. Cayol**, J. Clavero, D. Comte, G. Gabalda, K. Gonzales, L. Lara, J. Naranjo, D. Legrand, O. Macedo, P. Mothes, A. Pavez, C. Robin, Application of INSAR interferometry and geodetic surveys for monitoring Andean volcanic activity : first results from ASAR-ENVISAT data, *International Symposium on the geodynamics of the Andes*, Conference Paper, Barcelone, Espagne, Septembre 2005.
 33. Kervyn, F., N. D'Orey, J. Fernandez, S. Ayonghe, B. Bajope, **V. Cayol**, J. Durieux, G. Ernst, B. Faria, J. Fonseca, E. Mbede, A. Mruma, E. Pirard., The SAMAAV project: InSAR Analysis and Monitoring of Active African Volcanoes using ERS and ENVISAT data, *RSPSoc Annual Meeting*, Portsmouth, G.B., Septembre 2005.
 34. Tinard P., J.-L. Froger, P. Briole, T. Staudacher, **V. Cayol**, Y. Fukushima, T. Souriot, Two years of INSAR Monitoring of Volcanic Activity at Piton de la Fournaise (Réunion Island) using ASAR-ENVISAT Data, *RSPSoc Annual Meeting*, Portsmouth, G.B., Septembre 2005.
 35. Tinard P., J.-L. Froger, P. Briole, T. Staudacher, **V. Cayol**, Y. Fukushima, T. Souriot, Two years of InSAR monitoring of volcanic activity at Piton de la Fournaise (Réunion Island) using ENVISAT-ASAR data, Toward an operational InSAR monitoring of volcanic activity ? *Fringe 2005 Workshop*, ESA ESRIN, Frascati, Italie, December 2005.
 36. Fukushima, Y., P. Durand, **V. Cayol**, D. Massonnet, Complex Dike Intrusions at Piton de la Fournaise Revealed by Numerical Modeling of InSAR Data, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., Décembre 2005.
 37. Tinard P., J.-L. Froger, P. Briole, T. Staudacher, **V. Cayol**, Y. Fukushima, T. Souriot, Two years of InSAR monitoring of volcanic activity at Piton de la Fournaise (Réunion Island) using ENVISAT-ASAR data, Toward an operational InSAR monitoring of volcanic activity, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., December 2005.
 38. Fukushima, Y., **V. Cayol**, **SOLICITED** : Geometry of magmatic conduits at Piton de la Fournaise, *European Geophysical Union*, Vienne, Autrice, Avril 2006.
 39. Fukushima, Y., and **V. Cayol**, Geometry of magmatic conduits at Piton de la Fournaise, *Japan Geoscience Union Meeting*, Chiba, Japan, Mai 2006.
 40. Fukushima, Y., **V. Cayol**, P. Durand, and D. Massonnet, Transferts de magma au Piton de la Fournaise par la modélisation 3D de données d'interférométrie radar, *Journée KALIDEOS / ISLE_Reunion*, Toulouse, France, juin 2006.
 41. Fukushima, Y., **V. Cayol**, P. Durand, and D. Massonnet, **Invité**, Complex dike emplacements at Piton de la Fournaise revealed by InSAR and their implications on the magma transfer mechanism, Western Pacific Geophysics Meeting, Beijing, China, Juillet 2006.
 42. Tinard P., J.-L. Froger, P. Briole, T. Staudacher, **V. Cayol**, Y. Fukushima, T.

- Souriot, New Insights in the Dynamic of the Volcanic Processes at Piton de la Fournaise Volcano (Reunion Island) Using ENVISAT-ASAR Data, *AGU Fall Meeting*, San Francisco, Décembre 2006.
43. d'Oreye, N., Kervyn, F., Fernandez, J., **Cayol, V.**, InSAR Monitoring of the Nyiragongo - Nyamuragira Volcanoes (Democratic Republic of Congo), Study of the nyiragongo january 2002 and Nyamuragira November 2006 eruptions, *Envisat symposium*, Montreux, *Envisat symposium*, Montreux, Suisse, Avril 2007
 44. Albino F, Froger JL, Remy D, Bonvalot S, Gonzales K, **Cayol V**, Souriot T, Monitoring volcanic activity in Central Andes with INSAR interferometry, *XXIV IUGG General Assembly*, Perugia, Italy 2007
 45. d'Oreye N., F. Kervyn **V. Cayol**, C. Wauthier and the SAMAAV team, Ground deformations associated to the Nyiragongo 2002 and the Nyamulagira 2006 eruptions (DR Congo) revealed by InSAR, *IUGG ,XXIV General Assembly*, Perugia, Italy, july 2007.
 46. Wauthier C., **V. Cayol**, F. Kervyn and N. D'Oreye, Modelling of InSAR displacements related with the January 2002 eruption of Nyiragongo volcano (DRC), Active Volcanism and Continental Rifting, *26th ECGS Workshop*, Luxembourg, November 2007.
 47. d'Oreye N., **V. Cayol**, F. Kervyn and the GVO team, The november 2006 Nyamulagira eruption revealed by InSAR, Active Volcanism and Continental Rifting, *26th ECGS Workshop*, Luxembourg, November 2007.
 48. **Cayol, V.**, N. d'Oreye, and F. Kervyn, InSAR displacements associated to the November 2006 eruption of nyamulagira, *Fringe 2007 Workshop*, ESA ESRIN, Frascati, Italie, November 2007.
 49. Froger J._L., Y. Fukushima, P. Tinard, **V. Cayol**, T. Staudacher and T. Souriot, First multi sensor InSAR monitoring of an eruptive crisis: the April 2007 eruption at Piton de la Fournaise from ASAR and ALOS-PALSAR data, *Fringe 2007 Workshop*, ESA ESRIN, Frascati, Italie, November 2007.
 50. D'Oreye N., A. Oyen, C. Wauthier, E. Calais, **V. Cayol**, F. Kervyn, E. Mbede and E. Sariah, The lake Natron (Tanzania) July 2007 rifting event revealed by InSAR, *Fringe 2007 Workshop*, ESA ESRIN, Frascati, Italie, November 2007.
 51. Tinard P., J.-L. Froger, **V. Cayol**, Y. Fukushima, P. Briole, T. Staudacher and T. Souriot, Continuous InSAR Monitoring of Piton de la Fournaise Volcano (La Reunion Island): Four Years of Magmatic Transfers Revealed, *Fringe 2007 Workshop*, ESA ESRIN, Frascati, Italie, November 2007.
 52. Wauthier C., **V. Cayol**, Nicolas d'Oreye and F. Kervyn, Modeling of InSAR displacements related with the January 2002 eruption of Nyiragongo volcano (DRC), *Fringe 2007 Workshop*, ESA ESRIN, Frascati, Italie, November 2007.
 53. Tinard P., J-L Froger, **V. Cayol**, P. Briole, Y. Fukushima, T. Staudacher and T. Souriot, Continuous InSAR Monitoring of Piton de la Fournaise Volcano (La Reunion Island): Four Years of Magmatic Transfers Revealed, *European Geophysical Union*, Vienne, Autrice, Avril 2008.
 54. d'Oreye, N., Calais, E., Oyen, A., Wauthier, C., **Cayol, V.**, Delvaux, D., Smets, B., Sariah, E., Kervyn, F., A continental rifting event revealed by InSAR: The Lake Natron (Tanzania) 2007 seismo-magmatic crisis, *European Geophysical Union*, Vienne, Autrice, Avril 2008.
 55. Peltier A. T. Hurst, B. Scott and **V. Cayol**, Structures involved on the vertical deformation at Lake Taupo (New Zealand) between 1979 and 2007: New investigations from numerical modelling, *Assemblée Générale de l'IAVCEI*, Reykjavik, Islande, août 2008.
 56. Augier A., Cayol V., Froger J.-L., Fukushima Y., Mora O. and Tinard P., InSAR monitoring and modelling of the Piton de la Fournaise april 2007 caldera collapse, *Assemblée Générale de l'IAVCEI*, Reykjavik, Islande, août 2008.

57. **Cayol V.**, D'Oreye N., Kervyn F. and the GVO Team, InSAR displacements associated to the November 2006 Nyamuragira eruption, *Assemblée Générale de l'IAVCEI, Reykjavik*, Islande, août 2008.
58. Wauthier C., **Cayol V.**, Kervyn F. and D'Oreye N., Modeling of InSAR displacements related with the January 2002 eruption of Nyiragongo volcano (DRC), *Assemblée Générale de l'IAVCEI, Reykjavik*, Islande, août 2008.
59. d'Oreye N., Kervyn F., Calais E., **Cayol V.**, Fernández J., Frischknecht C., Gonzales P., Heleno S., Oyen A. and Wauthier C., Systematic InSAR monitoring of African active volcanic zones: what we have learned in two years, or an harvest beyond our expectations, *Second workshop on USE of Remote Sensing Techniques (USEReST) for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas*, Naples, Italy, November 11-14, 2008.
60. Augier A., J. L. Froger, **V. Cayol**, Y. Fukushima, P. Tinard, T. Souriot, O. Mora, T. Staudacher, P. Durand, B. Fruneau, N. Villeneuve, The April 2007 eruption at Piton de la Fournaise, Réunion Island, imaged with ENVISAT-ASAR and ALOS-PALSAR data, , *Second workshop on USE of Remote Sensing Techniques (USEReST) for Monitoring Volcanoes and Seismogenic Areas*, Naples, Italy, November 11-14, 2008.
61. d'Oreye N., F. Kervyn, E. Calais, **V. Cayol**, J. Fernández, C. Frischknecht, P. Gonzalez, S. Heleno, A. Oyen and C. Wauthier, Three years of systematic ground deformation monitoring of active African volcanoes performed at the National Museum of Natural History of Luxembourg, *First edition of the Luxembourg Earth Observation day*, Luxembourg, November 2008.
62. **Cayol**, V. N. D'Oreye, F. Kervyn, C. Wauthier, GVO team, InSAR displacements associated to the November 2006 Nyamulagira eruption, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Cape town, South Africa, July 2009.
63. Wauthier, C. A. Oyen, P. Marinkovic, **V. Cayol**, J. Fernandez, J. P. Gonzales, R. Hanssen, F. Kervyn, N. d'Oreye, M. Shirzaei, T. R. Walter, *Invitée*, L-Band contribution to C_Band InSAR studies of African Volcanic areas, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Cape town, South Africa, 12-17 July 2009.
64. d'Oreye, N., E. Calais, **V. Cayol**, J. Fernández, C. Frischknecht, P. Gonzalez, S. Heleno, F. Kervyn, P. Marinkovic, A. Oyen, C. Wauthier, Seismic and volcanic activity in Africa monitored by InSAR, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Cape town, South Africa, July 2009.
65. Wauthier, C. **V. Cayol**, F. Kervyn, N. d'Oreye, The January 2002 eruption of Nyiragongo volcano (DRC) captured by InSAR, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Cape town, South Africa, July 2009.
66. Augier A., J.-L. Froger, **V. Cayol**, Post-eruption displacements of the central cone (Réunion), Study with inSAR datas and modelisation, *ILP Joint Task Force Meeting*, Clermont-Ferrand, France, 5-9 Octobre 2009
67. Froger, J.-L., T. Souriot, A. Augier, V. Cayol and S. Byrdina. VOLInSAR-PF, Service d'Observation InSAR multicapteurs sur le Piton de la Fournaise. *Journées utilisateurs Kalideos*, CNES, Saint Pierre, La Réunion, 16-20 novembre 2009.
68. Augier A., **V. Cayol**, J.-L. Froger, T. Staudacher et T. Souriot, The April 2007 eruption at Piton de la Fournaise, Réunion Island, images with ENVISAT-ASAR and ALOS-PALSAR data, *Proc. of 5th ESA Fringe2009 workshop*, ESA-ESRIN, Frascati, Italie, 30 November-4 December 2009.
69. Wauthier, **V. Cayol**, F. Kervyn and N. d'Oreye, The January 2002 eruption of Nyiragongo volcano (DRC) captured by InSAR, *Proc. of 5th ESA Fringe2009 workshop*, ESA-ESRIN, Frascati, Italie, 30 November-4 December 2009.
70. **Cayol**, V., N. d'Oreye, F. Kervyn, C. Wauthier and the GVO team, InSAR displacements associated to the November 2006 Nyamulagira eruption, *Proc. of 5th*

ESA Fringe2009 workshop, ESA-ESRIN, Frascati, Italie, 30 November-4 December 2009.

71. Froger JL, Souriot T, Augier A, Cayol V., Byrdina S (2010) VOLInSAR-PF, Service d'Observation InSAR multicapteurs sur le Piton de la Fournaise. *Colloque « Les Satellites Grand Champ pour le suivi de l'environnement, des ressources naturelles et des risques »*, UBP-OPGC, Clermont-Ferrand, 21-22 janvier 2010.
72. Catry T., **V. Cayol**, V. Famin, L. Michon, C. Romagnoli and M. Chaput, Dike and sill injections: what is the most likely trigger of volcano flank collapse, *European Geophysical Union*, Vienne, Autrice, Avril 2010.
73. Wauthier, C., V. Cayol, F. Kervyn and N. d'Oreye, Nyiragongo Volcano 2002 Eruption Constrained by Multibeam InSAR Data, *European Geophysical Union*, Vienne, Autrice, Avril 2010.
74. **Cayol V.**, Augier A, Froger JL (2010) Apports de l'interférométrie radar à l'étude de l'éruption de mars-avril 2007 au Piton de la Fournaise. *Colloque autour de l'ANR EFIDIR*, Aussois, 1-3 avril 2010
75. **Cayol V.**, C. Wauthier, N. D'Oreye, F. Kervyn and the GVO Team, InSAR displacements associated with the november 2006 and January 2010 Nyamuragira eruptions, *Cities of Volcanoes*, Tenerife (Canary Island, Spain), mai 2010.
76. Froger J.-L., Augier A., **Cayol V.**, and T. Souriot, Some considerations about the April 2007 eruption at Piton de la Fournaise suggested by InSAR data, *Collapse Calderas Workshop* (La Réunion, France), 4-9 octobre 2010
77. Augier, A., **Cayol V.**, Froger J.-L., Post-eruptive displacements of the April 2007 eruption at Piton de la Fournaise, Réunion Island, from InSAR data, *Collapse Calderas Workshop* (La Réunion, France), 4-9 octobre 2010.
78. Catry T., **V. Cayol**, L. Michon, M. Chaput, V. Famin, C. Romagnoli, Co-intrusive shear stress triggers flank collapse on basaltic volcanoes, *Collapse Calderas Workshop* (La Réunion, France), 4-9 octobre 2010.
79. Froger, J.-L., T. Souriot, A. Augier, V. Cayol and S. Byrdina. VOLInSAR-PF, Service d'Observation InSAR multicapteurs sur le Piton de la Fournaise. *Journées utilisateurs Kalideos*, CNES, Saint Pierre, La Réunion, 16-20 novembre 2010.
80. Froger, J.-L., T. Souriot, Ph. Durand, N. Villeneuve, B. Fruneau, A. Augier, **V. Cayol**, S. Byrdina, Sept années de surveillance InSAR de l'activité du Piton de la Fournaise, résultats et perspectives, *Colloque CNFG2 2010 Topographie et Déformations multi-échelles, reflets d'une Terre dynamique (Le Mans)*, 22-23-24 Novembre 2010.
81. Augier, A., **V. Cayol**, J.-L. Froger, T. Staudacher and T. Souriot, Post-eruptive InSAR displacements associated with the April 2007 Piton de la Fournaise eruption, Réunion Island, from InSAR data, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., décembre 2010.
82. **Cayol V.**, C. Wauthier, N. D'Oreye, F. Kervyn, and the Gvo Team, InSAR displacements associated with the november 2006 and January 2010, Nyamuragira eruptions, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., décembre 2010.
83. Wauthier, **C Cayol**, V Hooper, A Kervyn, F Marinkovic, P D'Oreye, N Poland, M P., Activity of Nyiragongo and Nyamulagira Volcanoes (Dem. Rep. of Congo) Revealed Using Geological, Geophysical and InSAR data, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., décembre 2010.
84. N. d'Oreye, C. Wauthier, F Kervyn, **V. Cayol**, A. Shuler, P. González, A. Oth, B. Smets, L. Bagalwa, G. Ekström, D. Kavotha, F. Lukaya, S. Samsonov, The seismo-tectonic context of the Kivu Basin and the associated hazards, *Workshop on Lake Kivu Monitoring and Development of its gas resource*, Gisenyi, Rwanda, February 7-10, 2011.
85. Wauthier C., **V. Cayol**, F. Kervyn, and N. d'Oreye, Nyiragongo Volcano 2002 Eruption Constrained by Multibeam InSAR Data, *European Geoscience Union General Assembly 2011*, Vienna, Austria, 3-8 April 2011.

86. **V. Cayol**, A. Augier, J-L. Froger, and Thierry Souriot, Improving the determination of volumetric sources from InSAR data, *Fringe2011 workshop "Advances in the science an applications of SAR Interferometry from ESA and 3rd party missions"*, Frascati, Italie, 19-23 Septembre 2011.
87. Remy D., J.-L. Froger, H. Perfetini, **V. Cayol**, Joint inversion of INSAR and GPS time series: Application to the monitoring of ground motions related to volcanic and tectonic activity, *Fringe2011 workshop "Advances in the science an applications of SAR Interferometry from ESA and 3rd party missions"*, Frascati, Italie, 19-23 Septembre 2011.
88. Wauthier C., **V. Cayol**, F. Kervyn, and N. d'Oreye, Nyiragongo Volcano 2002 Eruption Constrained by Multibeam InSAR Data, *William Smith Meeting 2011*, « Remote sensing of volcanoes & volcanic processes: integrating observation and modelling », London, United Kingdom, 2011, 4-5 October 2011.
89. **Cayol V.**, Wauthier C., F. Kervyn and N. d'Oreye, Magma driven extension in an immature continental rift based on InSAR observations of Nyiragongo Volcano in 2002, *Invitée, 96th Journées Luxembourgeoises de Géophysique*, Luxembourg City, Luxembourg, 24-26 novembre 2011
90. d'Oreye N., S. Samsonov, **V. Cayol**, C. Wauthier and F. Kervyn, Two Decades of InSAR Observations in the Kivu Basin, Western Branch of East African Rift, *Magmatic Rifting and Active Volcanism Conference*, Addis Ababa, Ethiopia 11-13 Janvier 2012.
91. **Cayol V.**, C. Wauthier, F. Kervyn and N. d'Oreye, Magma driven extension in an immature continental rift, based on InSAR observations of Nyiragongo Volcano in 2002, *Magmatic Rifting and Active Volcanism Conference*, Addis Ababa, Ethiopia 11-13 Janvier 2012.
92. Wauthier C., **V. Cayol**, F. Kervyn, N. d'Oreye, Nyiragongo Volcano Eruption, 2002, as Constrained by InSAR data, *Magmatic Rifting and Active Volcanism Conference*, Addis Ababa, Ethiopia 11-13 Janvier 2012.
93. Froger J.-L., M. G. Bato, T. Souriot, N. Villeneuve, Ph. Durand, **V. Cayol**, A. Di Muro, T. Staudacher, B. Fruneau, High-resolution interferometric monitoring of Piton de la Fournaise with Cosmo SkyMed Data, *ESA Meeting, Agence Spaciale Italienne*, Rome, March 2012.
94. **Cayol V.**, J.-L. Froger¹, A. Augier¹, Y. Fukushima^{1*}, M. G. Bato¹, N. Villeneuve², T. Souriot¹, Use of InSAR at Piton de la Fournaise, *Undervolc Meeting*, Paris, March 2012.
95. **Cayol V.**, C. Wauthier, F. Kervyn, N. D'Oreye, Magma assisted extension in an immature continental tift, based on InSAR observations of Nyamuragira and Nyiragongo Volcanoes. *AGU Chapman conference, Hawaiian volcanoes from source to surface*, Waikoloa, Hawaii, USA, 20-24 August 2012.
96. Froger J.-L., **V. Cayol**, A. Augier, M. G. Bato, N. Villeneuve, T. Souriot, S. Menassian, B. Eschbach, Ph. Durand, T. Staudacher, A. Di Muro, B. Fruneau, T. Rabaute, C. Tinel, Nine years of InSAR monitoring of Piton de la Fournaise: Results and Perspectives. *AGU Chapman conference, Hawaiian volcanoes from source to surface*, Waikoloa, Hawaii, USA, 20-24 August 2012.
97. Wauthier, C., **V. Cayol**, F. Kervyn and N. D'oreye, Magma Sources involved in the 2002 Nyiragongo Eruption, as inferred from an InSAR Analysis, *AGU Chapman conference, Hawaiian volcanoes from source to surface*, Waikoloa, Hawaii, USA, 20-24 August 2012.
98. D'Oreye N, F. Albino, **V. Cayol**, P. Gonzalez, F. Kervyn, S. Samsonov, B. Smets, C. Wauthier, LM Bagalwa, N Mashagiro, A. Muhindo, M. Syauswa. Volcano monitoring in the Virunga Volcanic Province, DR Congo. *Proc. GeoPRISMS East African Rift System (EARS)*, Morristown NJ, USA, 25 – 27 October 2012.
99. **Cayol V.**, A. Augier, J-L. Froger, and T. Souriot, Improving the determination of volumetric sources from InSAR data, *Colloque du CNFGG, Mesure et*

- Modélisation en Volcanologie*, Clermont-Ferrand, Oct. 2012.
100. Wauthier, C., D. Roman, M. Poland, A. Miklius, A. Hooper, Y. Fukushima, **V. Cayol**, Modeling the behavior of Kilauea's southwest rift zone using InSAR, GPS, and seismic data, *Assemblée Générale de l'IAVCEI, Kagoshima*, Japan, July 2013.
 101. **Cayol V.**, C. Cattelain, C. Gouinaud, Ph. Hermite, J.L. Froger, An interface for the joint inversion of sources geometry and stress changes, Atelier [Form@ter](#) *Mesure de Déformations par Imagerie Spatiale*, Autrans, Oct. 2013.
 102. **Cayol V.**, C. Wauthier, F. Kervyn and N. D'oreye, Magma assisted extension in an immature continental rift, based on InSAR observations of Nyamuragira and Nyiragongo Volcanoes, *Meeting on Active Volcanism and Continental Rifting with special focus on the Kivu rift zone*, Gisenyi, Rwanda, Nov. 2013.
 103. Wauthier C., D. C. Roman, M. P. Poland, A. Miklius, A.J. Hooper, Y. Fukushima, **V. Cayol**, Magma-tectonic interactions at Kilauea volcano revealed by the modeling of geodetic and seismic data, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., décembre 2013.
 104. Court S., Bodart O., **Cayol V.** and J. Koko, Finite element methods for imposing jump boundary conditions with a fictitious domain approach, *Congrès National d'Analyse Numérique*, Carry-Le-Rouet, Avril 2014.
 105. Court S., Bodart O., **Cayol V.** and J. Koko, Fictitious domain methods for fracture models in elasticity, *European Conference on Mathematics for Industry*, Taormine, Italie, June 2014.
 106. Tridon, M., **V. Cayol**, J.-L. Froger, A. Augier, Magma propagation and atypical eruptions at Piton de la Fournaise volcano (Réunion Island) : the april 2007 eruption", *Nemoh school "Inverse methods in geophysics and volcanology"*, Dublin, August 31 to September 5, 2014
 107. **Cayol**, V. T. Catry, L. Michon, M. Chaput, V. Famin, O. Bodart, J. L. Froger, C. Romagnoli, Sheared sheet intrusions as mechanism for lateral flank displacement on basaltic volcanoes: Application to Réunion Island volcanoes, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., décembre 2014.
 108. Wauthier, C., D. Roman, M. Poland, A. Miklius, A. Hooper, Y. Fukushima, **V. Cayol**, Deformation Sources in Kilauea's Southwest Rift Zone Inferred from the Modeling of Geodetic and Seismic Data, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., décembre 2014.
 109. Court S., O. Bodart, **V. Cayol** and J. Koko, Fictitious Domain Methods for Fracture Models in Elasticity, *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., décembre 2014.
 110. **Cayol V.**, Invitée, Tracking intrusions from deformations with applications to Piton de la Fournaise and Nyiragongo, *MEMOVOLC meeting, Anticipating volcanic eruptions*, Pisa, Feb. 2015.
 111. Wauthier, C. D. Roman, M. Poland, A. Miklius, A. Hooper, Y. Fukushima, **V. Cayol**, Magma-Tectonic Processes in Kilauea's Upper Rift Zones Revealed by the Modeling of Geodetic and Volcano-Tectonic Seismic Datasets, *Fringe 2015 workshop "Advances in the science and applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop"*, Frascati, Italie, Mars 2015.
 112. Tridon. M., **V. Cayol** and J.L. Froger, Modeling the eastern flank displacement of Piton de la Fournaise volcano (Réunion Island) observed by InSAR after the April 2007 eruption, *Fringe 2015 workshop "Advances in the science and applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop"*, Frascati, Italie, Mars 2015.
 113. Kervyn F., d'Oreye N., Albino F., Derauw D., **Cayol V.**, Arjon A., Nobile A., Ten years of InSAR in the Virunga: results and perspectives, *Fringe 2015 workshop "Advances in the science and applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop"*, Frascati, Italie, Mars 2015.
 114. Bato M. G., J.L. Froger, M. Tridon, **V. Cayol**, A. Harris, N. Villeneuve, InSAR

- Mapping of displacements and lava flows related to recent eruptions (2010-2014) at Piton de la Fournaise, *Fringe 2015 workshop "Advances in the science and applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop"*, Frascati, Italie, Mars 2015.
115. **Cayol, V. C.** Cattelain, C. Gouinaud, J. L. Froger, Interface for the joint inversion of sources geometries, locations and stress changes, *Fringe 2015 workshop "Advances in the science and applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop"*, Frascati, Italie, Mars 2015.
 116. **Cayol V.**, Interface pour la préparation rapide d'inversions et application à l'éruption du Piton de la Fournaise d'octobre 2010, *Journée thématique sur l'île de la Réunion du Service National des Observatoires Volcanologiques*, Paris, Avril 2015.
 117. Tridon M., **V. Cayol**, J.-L. Froger et P. Bachelery, Modélisation du glissement du flanc Est du Piton de la Fournaise observé par InSAR après l'éruption d'avril 2007, *Journée thématique sur l'île de la Réunion du Service National des Observatoires Volcanologiques*, Paris, Avril 2015.
 118. **Cayol V.**, Sill as a trigger for lateral flank displacements, *Workshop Université Blaise Pascal - University of British Columbia - Simon Fraser University*, Juin 2015.
 119. Bodart O., S. Court, **V. Cayol** and J. Koko, Moving interfaces in Finite Element Methods: A fictitious domain approach, *13th US National Congress on Computational Mechanics*, San Diego, CA, 26-30 juillet 2015.
 120. Bodart O., **V. Cayol**, S. Court, J. Koko, Méthode de domaines fictifs pour l'inversion des déformations en milieu hétérogène, *Atelier ForM@Ter MDIS (Mesure de Déformations par Imagerie Spatiale)*, Autrans, Oct. 2015.
 121. Tridon, M., **V. Cayol**, J.-L. Froger, A. Augier, Modelling the Eastern Flank displacement of Piton de la Fournaise volcano (Réunion Island) observed by InSAR after the April 2007 eruption, *Atelier ForM@Ter MDIS (Mesure de Déformations par Imagerie Spatiale)*, Autrans, Oct. 2015.
 122. Tridon, M., **V. Cayol**, J.-L. Froger, A. Augier, Sheared Sill Triggers Large Flank Displacements at Piton de la Fournaise Volcano (Réunion Island), *American Geophysical Union*, San Francisco, U.S.A., décembre 2015.
 123. Geirsson, H., B. Smets, N. D'Oreye, **V. Cayol**, S. Samsonov, F. Kervyn, Source processes of near-field deformation accompanying recent lava lake level decrease at Nyiragongo, DR. Congo, *European Geophysical Society*, Avril 2016.
 124. Augier A., **Cayol V.**, Froger J.-L., Menassian S., Improved Cluster Method Applied to the InSAR data of the 2007 Piton de la Fournaise eruption, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, U.S.A., Dec 2016.
 125. Niess V., A. Barnoud, E. Le Ménédeu, **V. Cayol**, C. Carloganu, Density Imaging of Puy de Dôme Volcano by Joint Inversion of Muographic and Gravimetric Data, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, U.S.A., Dec 2016.
 126. **Cayol V.**, M. Tridon, J.-L. Froger, A. Augier, P. Bachelery, Inversion of Coeval Shear and Normal Stress of Piton de la Fournaise Flank Displacement, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, Calif. U.S.A., 12-16 Dec 2016.
 127. Froger J.-L., **V. Cayol**, M. Tridon, M. G. Bato, D. Remy, Y. Chen, D. Smittarello, V. Pinel, J.-M. Prival, N. Villeneuve, A. Peltier, A. Augier, S. Rivet, Y. Guehenneux, Indian Ocean InSAR OBSERVATORY (oi²) – Routine Interferometric Monitoring of a VOLCANIC ISLAND, *Fringe 2017 workshop "Advances in the science and applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop"* Helsinki, juin 2017.
 128. Le Corvec, N., T. Menand, J.-L. Froger and **V. Cayol**, Incremental growth of magma reservoirs: Insights on the room problem through the use of finite element models, *IAVCEI Scientific Assembly*, Portland, Oregon, USA, August 2017.
 129. **Cayol, V.**, A. Augier, S. Court, J.-L. Froger,, S. Menassian, **Invited**, Improved Cluster of Volume Strain Method Applied to Volcano Deformation, *IAVCEI Scientific*

- Assembly, Portland, Oregon, USA, August 2017.
130. **Cayol, V.**, M. Tridon, J.-L. Froger, A. Augier, Inversion of Coeval Shear and Normal Stress of Piton de la Fournaise Flank Displacement, *IAVCEI Scientific Assembly*, Portland, Oregon, USA, August 2017.
 131. Hrysiewicz, A., J.-L. Froger , T. Menand 1 , **V. Cayol** InSAR characterization of displacements related to lava flows at Piton de la Fournaise, [*MDIS-Form@ter*](#) Workshop, Besse en Chandesse, Octobre 2017.
 132. Le Corvec, N., T. Menand, J.-L. Froger and **V. Cayol**, Incremental growth of magma reservoirs: Insights on the room problem through the use of finite element models, [*MDIS-Form@ter*](#) Workshop, Besse en Chandesse, Octobre 2017.
 133. Froger J.-L., **V. Cayol** , M. Tridon , M. G. Bato, D. Remy, Y. Chen, D. Smittarello, V. Pinel, A. Hrysiewicz, J.-M. Prival, N. Villeneuve, A. Peltier, A. Augier, S. Rivet, Y. Guehenneux, Indian Ocean InSAR Observatory (OI2) – Routine Interferometric Monitoring of a Volcanic Island, the Piton de la Fournaise, [*MDIS-Form@ter*](#) Workshop, Besse en Chandesse, Octobre 2017.
 134. Tridon M., **V. Cayol**, J.-L. Froger 1, K. Richards-Dinger, J. Dieterich, Piton de la Fournaise Flank Displacement during the March-April 2007 eruption, [*MDIS-Form@ter*](#) Workshop, Besse en Chandesse, Octobre 2017.
 135. Smittarello D., **V. Cayol**, V. Pinel, A. Peltier, J.-L. Froger, Basaltic intrusions propagation modeling based on InSAR and GNSS data, application to the May 2016 eruption of Piton de la Fournaise Volcano (La Réunion Island), [*MDIS-Form@ter*](#) Workshop, Besse en Chandesse, Octobre 2017.
 136. Lelievre P. , A. Barnoud, C. Cârloganu, **V. Cayol**, C. Farquharson and V. Nies, Joint inversion of gravity and muon tomography data on unstructured meshes, *European Geophysical Society meeting*, Vienne, Autriche, 2018.
 137. Barnoud, A., **V. Cayol**, V. Niess, C. Cârloganu, P. Lelièvre and E. Le Ménédeu, Joint muographic and gravimetric data inversion for the 3D density imaging of volcanoes with a Bayesian formalism and a systematic exploration of inversion hyperparameters, *European Geophysical Society meeting*, Vienne, Autriche, 2018.
 138. Bodart O., F. Dabaghi, **V. Cayol** and J. Koko, An optimal control problem based on a fictitious domain method for inversion of the pressure contribution on the crack in the volcanic concepts, *25th International Domain Decomposition Methods Conference*, St Johns, Newfoundland, Canada, July 2018.
 139. Smittarello D., **V. Cayol**, V. Pinel, A. Peltier, J.-L. Froger, Basaltic Magma Propagation: Insight from Inversion of InSAR and GNSS data of the May 2016 Piton de la Fournaise eruption, *Cities of Volcanoes*, Naples, Italie, Sept. 2018.
 140. **Cayol V.**, M. Tridon, J.-L. Froger, K. Richards- Dinger, J. Dieterich, Piton de la Fournaise Flank Displacement following the March 2007 eruption, *Cities of Volcanoes*, Naples, Italie, Sept. 2018.
 141. Pinel V., F. Maccaferri, E. Rivalta, C. Michaut, D. Smitarello, A. Carrara, V. Cayol, What controls the arrival of magma at the surface? Interplay between buoyancy and crustal stress field, *Cities of Volcanoes*, Naples, Italie, Sept. 2018.
 142. Smittarello D., **V. Cayol**, V. Pinel, A. Peltier, J.-L. Froger, Propagation of magma associated to Piton de la Fournaise eruptions from joint inversion of InSAR and GNSS data, *19th General assembly of Wegener*, Grenoble, France. Sept., 2018.
 143. Cayol V., M. Tridon, Froger J.-L., K. Richards-Dinger, J. Dieterich, and A. Augier, Piton de la Fournaise Flank Displacement following the March 2007 eruption, *19th General assembly of Wegener*, Grenoble, France. Sept., 2018.
 144. Dumont. Q., V. Cayol et J.-L. Froger, Link between flank slip and eruptions at Piton de la Fournaise volcano (La Réunion), *19th General assembly of Wegener*, Grenoble, France. Sept., 2018.
 145. Maccaferri F., Smittarello D., Pinel V., **Cayol V.**, On the propagation path of magma-filled dykes and hydrofractures: the competition between external stress,

- internal pressure, and crack length, *Geomod Conference*, Barcelona, Spain, Oct. 2018.
146. **V. Cayol**, D. Smittarello, V. Pinel, A. Peltier, J.-L. Froger, **Invitée**, Propagation of magma associated to Piton de la Fournaise eruptions from joint inversion of InSAR and GNSS data, *26ème Réunion des Sciences de la Terre*, Lille, France. Nov., 2018.
 147. **Barnoud A.**, **Cayol V.**, Niess V., Cârloganu C., Lelièvre P., Labazuy P. & Le Ménédeu E., **Invitée**, Inversion jointe de données muographiques et gravimétriques avec un formalisme Bayésien. Application au puy de Dôme, *Colloque G2 Resif*, Montpellier, Nov 2018.
 148. Maccaferri F., Smittarello D., Pinel V., **Cayol V.**, On the propagation path of magma-filled dykes and hydrofractures: the competition between external stress, internal pressure, and crack length, *EGU General Assembly*, Avril, 2019.
 149. Smittarello D., V. Pinel, F. Maccaferri, and **V. Cayol**, Velocity variations of a propagating dyke in presence of an external stress field: insights from analogue models, *EGU General Assembly*, Avril, 2019.
 150. Dabaghi F., O. Bodart, **V. Cayol**, J. Koko, Determination of fracture pressure distribution based on fictitious domain, [*MDIS-Form@ter*](#) Workshop, La Petite-Pierre, Octobre 2019.
 151. Barnoud A., **V. Cayol**, F. Dabaghi., O. Bodart, L. Gailler, D. Smittarello, 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, *MDIS-Form@ter* Workshop, La Petite-Pierre, Octobre 2019.
 152. Dabaghi F., Bodart O., Cayol V., Koko J., Determination of fracture pressure distribution based on fictitious domain, *Workshop MDIS-2019 / Mesure de la déformation par Imagerie Satellitaire*, La Petite-Pierre (67), France.
 153. Dumont Q., **V. Cayol**, J.-L. Froger, Orbital pass weighting of InSAR data for displacement inversion: Application to Piton de la Fournaise eruption, [*MDIS-Form@ter*](#) Workshop, La Petite-Pierre, Octobre 2019.
 154. Smittarello D., **V. Cayol**, V. Pinel, J.L. Froger, Combining InSAR and GNSS to model magma transport during the May 2016 eruption of Piton de la Fournaise Volcano (La Réunion Island), *MDIS-Form@ter* Workshop, La Petite-Pierre, Octobre 2019.
 155. 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. 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.
 156. Pinel V., D. Smittarello, F. Maccaferri, E. Rivalta, **V. Cayol**, Stress field control on magma path and velocity, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, U.S.A., Dec 2019.
 157. Smittarello, D., Shreve, T., Grandin, R., **Cayol, V.**, Pinel, V., Delgado, F.² Morishita Y. Caldera ring-faulting during the 2015 Ambrym dike intrusion and the search for the missing deflation source, *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, U.S.A., Dec 2019.
 158. Barnoud A., **V. Cayol**, P. Lelièvre, V. Niess, C. Cârloganu, and E. Le Ménédeu, Bayesian joint inversion of muographic and gravimetric data for the 3D imaging of volcanoes, case study of the Puy de Dôme, *EGU General Assembly*, Avril, 2020.
 159. Cayol V., F. Dabaghi, Y. Fukushima, M. Tridon, D. Smittarello, O. Bodart, J-L Froger, DefVolc: Interface and web service for fast computation of volcano displacement, *EGU General Assembly*, Avril, 2020.

160. **Cayol, V.**, Smittarello, D., Pinel, V., Peltier A., Froger J.L., Combining InSAR and GNSS to model magma transport during the May 2016 eruption of Piton de la Fournaise Volcano (La Réunion Island), *JpGU Virtual Meeting*, Juil., 2020.
161. Cayol V., F. Dabaghi, Y. F., M. Tridon, D. Smittarello, Olivier Bodart, Jean-Luc Froger, DefVolc: Interface and web service for fast computation of volcano displacement, *JpGU Virtual Meeting*, Juil., 2020.