

APPORT DES DONNEES SAR A LA COMPREHENSION ET A LA SURVEILLANCE DES VOLCANS : EXEMPLE DU PITON DE LA FOURNAISE

J.-L. Froger¹, V. Pinel², G. Bato², M. Tridon¹, D. Smittarello², J.M. Prival¹, A. Hrysiewicz¹, V. Cayol¹, Y. Guehenneux¹

1. Laboratoire Magmas et Volcans, OPGC, Université. Blaise Pascal, CNRS, IRD, Campus Universitaire des Cézeaux, 63178 av. Blaise Pascal, 63178 Aubière cedex, France.
2. ISTERre, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, Campus Scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

Résumé

La télédétection s'est révélée au cours des deux dernières décennies comme un outil essentiel à la fois pour améliorer notre connaissance des systèmes volcaniques mais également pour assurer la surveillance des volcans actifs. En utilisant l'exemple du Piton de la Fournaise, le plus actif des volcans français, nous illustrons ici comment les données radar satellitaires (SAR), dont l'utilisation n'est pas empêchée par la présence de nuages, permettent non seulement de cartographier les dépôts éruptifs et d'estimer leur volume mais aussi de mesurer la topographie de l'édifice volcanique (avec une précision métrique) ainsi que ses déformations de surface (avec une précision atteignant quelques millimètres).

Mots-clés : volcanologie, surveillance, radar satellitaire, interférométrie radar, géodésie, coulée de lave

Abstract

Last two decades have proven that remote sensing represents a key tool to improve our knowledge of volcanic systems but also to monitor active volcanoes. Based on the specific case of Piton de la Fournaise, Reunion Island, the most active French volcanoes, we here illustrate how Synthetic Aperture Radar (SAR) data, providing information even in cloudy conditions, make it possible to map eruptive deposits, to quantify their volumes but also to estimate the volcanoes topography (with metric precision) as well as surface deformation fields (with a precision reaching a few millimeters).

Keywords : volcanology, monitoring, radar imagery, radar interferometry, geodesy, lava flow

1. Introduction

La mise en évidence d'une déflation globale de l'Etna, en Sicile, pendant une période inter-éruptive, est le premier exemple d'application, sur un volcan, de la méthode Interferometry Synthetic Aperture Radar ou InSAR (Massonnet et al., 1995). Même s'il est maintenant admis qu'une partie significative de ce signal n'était pas d'origine volcanique (Beauducel et al., 2000), cette étude pionnière a néanmoins joué un rôle de véritable catalyseur pour la communauté des géodésiens-volcanologues. Depuis, l'utilisation de la méthode InSAR en volcanologie s'est fortement développée permettant la détection de déplacements du sol sur plus de 160 volcans à la surface du globe et rendant possible des études globales et statistiques du lien effectif entre déplacements du sol et éruption volcanique (Biggs et al. 2014, Biggs & Pritchard, 2017). Les déplacements mesurés par InSAR en région volcanique sont le plus souvent directement liés à l'activité magmatique : inflation pré- ou co-éruptive induite par la mise en place de magma en profondeur, déflation co-éruptive induite par la vidange d'un réservoir magmatique, déstabilisation d'un édifice volcanique sous l'action du magma, subsidence de dépôts volcaniques récents. Toutefois certains déplacements observés sur les volcans sont d'origine hydrothermale, gravitaire ou tectonique et, à l'inverse, toutes les éruptions volcaniques ne se traduisent pas par des déplacements mesurables par InSAR. En particulier, la mesure des déplacements par InSAR n'est possible que lorsque les propriétés de rétrodiffusion du sol sont stables dans le temps (bonne cohérence) ce qui n'est pas toujours le cas si le couvert végétal est dense

(Massonnet & Feigl, 1998). La résolution temporelle de l'InSAR, même si elle s'améliore depuis quelques années (avec en particulier la mise en orbite récente des satellites européens Sentinel-1A et 1B), reste au mieux journalière ce qui est encore trop faible pour imager en détail la dynamique de certains processus transitoires rapides. Par ailleurs les perturbations du signal, induites par la troposphère, limitent la précision de l'InSAR sur les reliefs volcaniques même si des corrections statistiques, empiriques ou basées sur des modèles météorologiques peuvent être mises en œuvre pour réduire ce type d'artéfact.

Nous illustrons dans cet article l'utilisation de l'InSAR en volcanologie avec l'exemple d'un volcan bouclier basaltique associé à l'activité d'un point chaud : le Piton de la Fournaise sur l'île de la Réunion, dans l'océan Indien. Le Piton de la Fournaise est l'un des volcans les plus actifs de la planète avec une moyenne de 2 à 3 éruptions par an depuis 1998. L'essentiel des éruptions historiques ont eu lieu dans l'Enclos Fouqué-Grand Brûlé, une dépression en forme de fer à cheval allongée sur 13 km selon un axe est-ouest et ouverte à l'est sur l'océan Indien (figure 1). La partie sommitale de cette dépression est occupée par un Cône Central formé par l'accumulation des produits d'éruption et percé par les cratères Bory et Dolomieu, respectivement à l'ouest et à l'est.

La surveillance en routine de l'activité du Piton de la Fournaise est assurée par l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise (OPVF) qui enregistre la sismicité, suit les évolutions du dégazage et effectue des mesures ponctuelles de déplacement du sol depuis les années 1980 (GNSS, distancemétrie, inclinométrie, extensométrie). Ces

mesures, initialement limitées à la zone sommitale (base et sommet du Cône Central), ont été étendues au Flanc Est du volcan après l'éruption d'avril 2007. Depuis 1998, ces mesures ponctuelles sont complétées par des cartes de déplacement du sol obtenues par InSAR et couvrant l'ensemble du volcan, dont le Flanc Est. La production de ces cartes, d'abord réalisée de façon ponctuelle, est devenue systématique à partir d'août 2003 (Froger et al., 2004) dans le cadre du service d'observation «OI²»

(Observatoire InSAR de l'Océan Indien) de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand. En exploitant les données SAR acquises en bande C par les satellites canadiens RADARSAT-1 et RADARSAT-2, les satellites européens ENVISAT et Sentinel-1, en bande X par les satellites allemands TerraSAR-X et Tandem-X et les satellites italiens de la constellation Cosmo-Skymed et en bande L par les satellites japonais ALOS et ALOS-2, OI² a pu imager les déplacements du sol produits par plus de 40 éruptions. Ce service d'observation a été labellisé en 2010 comme composante du Service National des Observations en Volcanologie de l'INSU. Les données et les interférogrammes produits dans son cadre sont intégrés dans une base de données dédiée accessible via un DATA HUB (https://www.obs.univ-bpclermont.fr/casoar/index_liste.php).

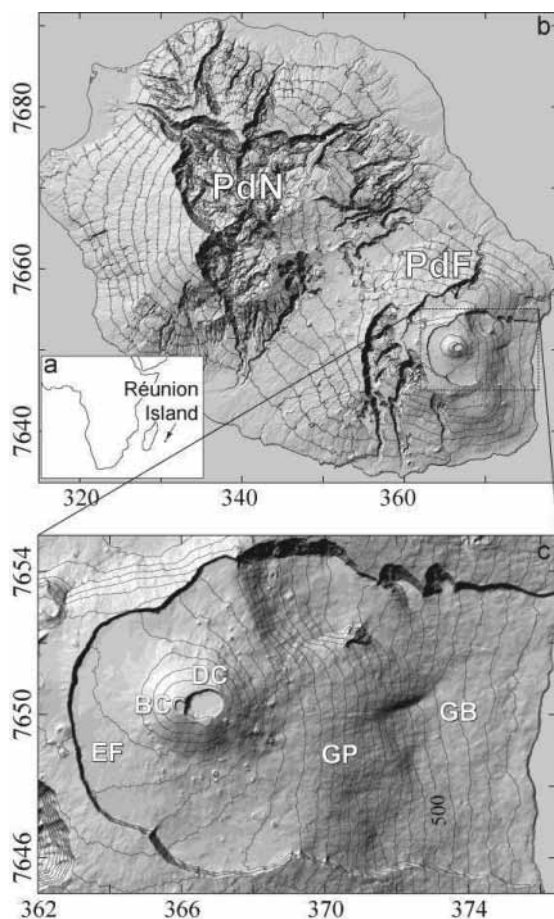


Figure 1 : a) situation de l'île de La Réunion dans l'Océan Indien ; b) situation du Piton de la Fournaise ; PdF : Piton de la Fournaise ; PdN : Piton des Neiges ; c) carte topographique

du Piton de la Fournaise (MNT stéréo-photogrammétrique IGN 1997). L'espacement des iso-contours est de 100 m. Les principales zones mentionnées dans le texte sont indiquées. EF : Enclos Fouqué ; DC : Cratère Dolomieu ; BC : Cratère Bory ; GP : Grandes Pentès ; GB : Grand Brûlé. Les coordonnées sont en km UTM (40^{ème} zone sud).

Dans la suite de l'article, nous présentons successivement différents exemples d'exploitation scientifique des données produites par OI² :

- cartographie des coulées de lave et estimation de leur volume,
- caractérisation des systèmes d'alimentation traqués à travers les déformations co-éruptives induites en surface,
- détection des déplacements lents témoins de l'évolution sur le long terme de l'édifice volcanique.

L'intégration de toutes ces observations permet de mieux appréhender les modalités par lesquelles s'opèrent la construction et la destruction de l'édifice volcanique.

2. Cartographie des coulées de lave

La mise en place de produits volcaniques, sous forme de dépôts ou d'épanchements, modifie les propriétés de rétrodiffusion du sol ce qui va avoir deux conséquences pour les images radar : une modification de l'amplitude et une perte de la cohérence interférométrique (la cohérence est essentiellement une mesure de la variabilité locale de la phase, Massonnet & Feigl, 1998). Ces deux effets peuvent être utilisés afin de cartographier les coulées de lave pendant ou après une éruption. Les informations ainsi obtenues grâce à l'imagerie radar sont particulièrement utiles dans les zones difficiles d'accès, ou bien fréquemment couvertes de nuages, là où l'imagerie optique est inutilisable (Pinel et al., 2014). Dans les zones habituellement caractérisées par une bonne cohérence interférométrique, en particulier les régions sommitales arides de certains volcans, l'utilisation de la perte de cohérence est particulièrement efficace (Zebker et al., 1996, Dieterich et al., 2012, Bato et al., 2016). Nous avons mis en œuvre cette approche pour suivre l'évolution du champ de lave produit par l'éruption d'août 2015 au Piton de la Fournaise. Cette éruption est la quatrième de l'année 2015, et la cinquième depuis l'éruption de juin 2014 qui a marqué une reprise d'activité après une période calme de presque trois ans et demi. L'éruption a commencé le 24 août 2015 à 18H50 par l'ouverture d'une fissure éruptive à mi-pente du versant sud-ouest du Cône Central. Elle s'est poursuivie sans interruption pendant 68 jours au cours desquels un vaste champ de lave s'est progressivement formé au sud de l'Enclos Fouqué, au pied du Cône Central. Au cours de cette période des images Cosmo-Skymed, TerraSAR-X/TanDEM-X, ALOS-2 et Sentinel-1 ont été acquises sur le Piton de la Fournaise. En combinant ces images avec d'autres images acquises avant l'éruption nous avons pu produire des interférogrammes qui montrent, en plus de la déformation co-éruptive, une zone très bruitée, située sur le versant sud du Cône Central et à sa base, zone dont l'étendue augmente avec la durée couverte par les interférogrammes. Sur les images de cohérence calculées à partir des interférogrammes, cette zone apparaît logiquement comme pas ou peu cohérente, ce qui indique une modification radicale des propriétés

géométriques et ou diélectriques des rétro-diffuseurs à la surface du sol (figure 2). En l'occurrence, l'épanchement des coulées de lave émises pendant l'éruption d'août 2015, sur des terrains plus anciens, induit cette modification. En exploitant ces images de cohérence nous avons pu cartographier précisément l'étendue du champ de lave à 9 dates différentes entre le début et la fin de l'éruption (figure 3) et estimer une surface finale de $4.25 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \pm 4 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ (Prival, 2016).

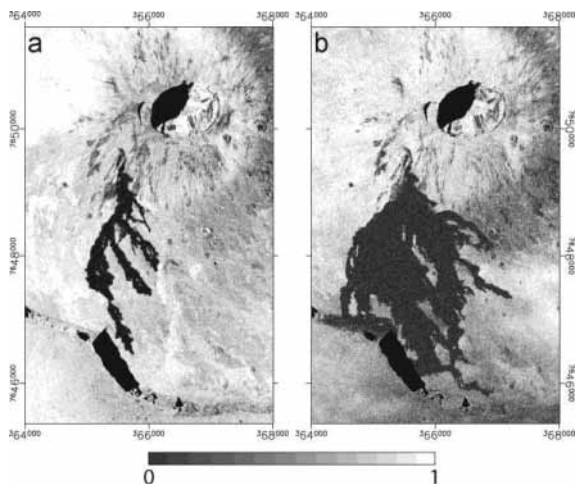


Figure 2 : a) Image de cohérence d'un interférogramme ALOS2 Spotlight Descendant couvrant une période de 14 jours entre le 15/08/2015 et le 29/08/2015 et couvrant en particulier les 5 premiers jours de l'éruption d'août 2015 au Piton de la Fournaise ; b) Image de cohérence d'un interférogramme ALOS2 Spotlight Descendant couvrant une période de 70 jours entre le 15/08/2015 et le 24/10/2015 et couvrant en particulier les 61 premiers jours de l'éruption d'août 2015. Les coordonnées sont en km UTM (40^{ème} zone sud).

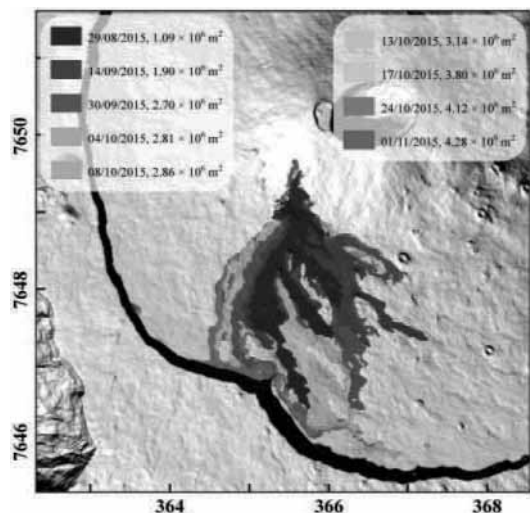


Figure 3 : Cartographie, à 9 dates différentes, de la coulée de l'éruption d'août 2015 du Piton de la Fournaise. Pour chaque date une estimation de la surface recouverte par la coulée est donnée. Les coordonnées sont en km UTM (40^{ème} zone sud).

3. Mesure de la topographie et estimation des volumes éruptifs

La topographie d'un volcan influence le trajet du magma en profondeur via son action sur le champ de contrainte à proximité de la surface. Par ailleurs, elle contrôle le trajet des écoulements volcaniques en surface. Sa connaissance est donc une donnée essentielle pour les modèles de propagation de dyke ou d'écoulement de coulées pyroclastiques. Elle est aussi primordiale pour toutes les inversions de données géophysiques (données sismiques, gravimétriques, géodésiques). Enfin la connaissance du Modèle Numérique de Terrain est requise lors de l'utilisation des données SAR pour mesurer la déformation du sol. Or la topographie d'un volcan évolue très rapidement par accumulation de dépôts éruptifs mais également par destruction partielle des reliefs sommitaux lors des phases explosives ou des effondrements de caldera. Il est donc nécessaire de mettre à jour cette information après chaque événement éruptif, ceci permet par ailleurs de quantifier les volumes de magma émis et donc d'estimer les flux éruptifs.

La topographie d'un volcan peut être quantifiée soit en utilisant une série temporelle d'images SAR acquise par un même satellite à des dates successives (repeat-path interferometry), soit en utilisant un couple de deux images acquises au même moment par 2 capteurs (single-path interferometry). La différence de phase corrigée de l'erreur orbitale entre deux images est en effet de la forme :

$$\Delta\phi = (2\pi/h_a)\delta h + (4\pi/\lambda)v\delta t + \Delta\phi_{atm} + \varepsilon \quad (1)$$

avec

$$v = (v_{EW} \ v_{NS} \ v_{UD}) \times (R_{EW} \ R_{NS} \ R_{UD})^T \quad (2)$$

où h_a est l'altitude d'ambiguïté du couple qui est inversement proportionnelle à la distance séparant les deux orbites, δh est la différence d'altitude par rapport au MNT de référence (MNT avant l'éruption) qui peut correspondre par exemple à l'épaisseur d'une coulée mise en place pendant l'éruption, λ est la longueur d'onde du signal radar et v est la vitesse de déplacement du sol dans la ligne de visée, supposée constante sur la période d'étude. v_{EW} , v_{NS} et v_{UD} sont les composantes est-ouest, nord-sud et verticale du vecteur vitesse de déplacement et R_{EW} , R_{NS} et R_{UD} sont les composantes est-ouest, nord-sud et verticale du vecteur directeur unitaire de la ligne de visée. δt est l'intervalle de temps entre les deux acquisitions, $\Delta\phi_{atm}$ est la différence de phase induite par la différence de vitesse de propagation du signal radar dans l'atmosphère entre les 2 acquisitions et ε est l'erreur résiduelle.

En « repeat-path interferometry », l'utilisation d'une grande série d'acquisitions permet de réduire le terme de phase induit par l'atmosphère et de séparer par inversion la différence de phase produite par l'épaisseur de la coulée (δh) et la différence de phase induite par le déplacement du sol en particulier du fait de la subsidence de la coulée par compaction. La détermination de la topographie est dans ce cas limitée aux zones cohérentes. L'incertitude sur la mesure d'épaisseur est fonction du nombre d'images

utilisées et des altitudes d'ambiguïté des couples utilisés, des valeurs plus faibles permettant de mieux caractériser l'épaisseur. En « single-path interferometry », les termes de déplacement du sol et d'erreur atmosphérique sont nuls. De plus, la cohérence est généralement très bonne de sorte que l'épaisseur de la coulée peut théoriquement être estimée correctement avec un seul couple d'images.

Nous avons testé ces deux approches pour estimer le volume de la coulée de lave qui s'est épanchée sur le Flanc Sud du Cône Central du Piton de la Fournaise pendant l'éruption d'octobre 2010 (Bato et al., 2016). Pour appliquer la méthode « repeat-path interferometry », nous avons utilisé un jeu de 412 interférogrammes Cosmo-Skymed couvrant la période février 2011 - décembre 2013 et offrant une grande diversité de sensibilité à la topographie et aux déplacements du sol. A partir de ces interférogrammes nous avons produit une carte des déplacements EW, une carte des déplacements verticaux et une carte isopaque de la coulée d'octobre 2010. La carte isopaque nous a alors permis d'estimer le volume géométrique de la coulée à $3.97 \pm 0.48 \times 10^6 \text{ m}^3$ (1σ) équivalent à un volume de roche dense de $1.77 \pm 0.75 \times 10^6 \text{ m}^3$ (1σ) en supposant une

vésicularité moyenne de la lave de $55.46 \pm 13.53\%$ (1σ). La méthode « single-path interferometry » a ensuite été appliquée en exploitant un jeu d'une quarantaine d'interférogrammes bistatiques TanDEM-X. Au cours de la mission TanDEM, les satellites radar TerraSAR-X et TanDEM-X du DLR ont été configurés pour voler en formation et fonctionner en couple, l'un des deux satellites émettant le signal radar et les deux enregistrant ensuite, simultanément mais sous des points de vue légèrement différents, le signal rétrodiffusé par la surface du sol. Le volume géométrique obtenu pour la coulée d'octobre 2010 à partir de ces interférogrammes TanDEM-X est de $4.10 \pm 0.21 \times 10^6 \text{ m}^3$ (1σ) équivalent à un volume de roche dense de $1.83 \pm 0.65 \times 10^6 \text{ m}^3$ (1σ , figure 4). Les deux approches donnent donc des volumes remarquablement proches. Tandis que la première permet de caractériser non seulement l'épaisseur de la coulée, mais aussi les déplacements associés, la seconde présente l'avantage de ne nécessiter que quelques interférogrammes et donc de pouvoir être mise en œuvre rapidement après une éruption, pour peu que des données « single-path » soient disponibles (ce qui n'est pas très fréquent actuellement).

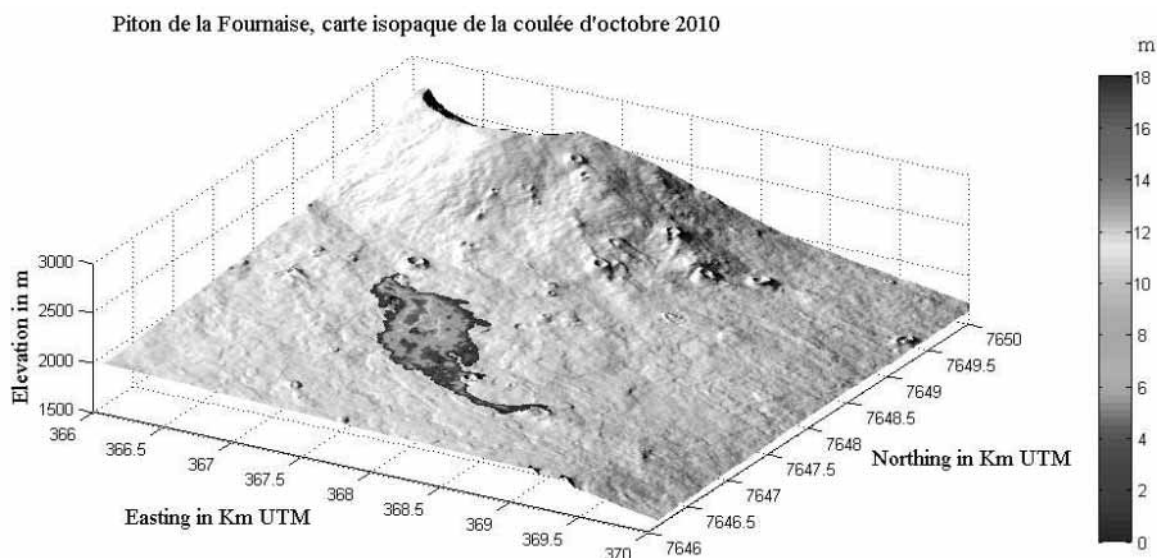


Figure 4 : Carte isopaque de la coulée d'octobre 2010 produite en appliquant l'approche « single-path interferometry » à partir de données TanDEM. Les iso-épaisseurs sont représentées en couleur sur le Modèle Numérique de Terrain ombré.

4. Mesure des déplacements co-éruptifs et caractérisation du système d'alimentation magmatique

La période récente (juin 2014 à septembre 2016) a été une période faste, non seulement du point de vue de l'activité du Piton de la Fournaise avec 7 éruptions (juin 2014, février 2015, mai 2015, juillet 2015, août 2015, mai 2016 et septembre 2016) mais aussi du point de vue de la quantité et de la diversité des images radar qui ont été acquises pendant cette période sur le Piton de la Fournaise par les différentes agences spatiales. Pour chaque éruption nous avons pu calculer entre 4 et 10 interférogrammes indépendants (en termes de géométrie de prise de vue, de

période couverte ou de longueur d'onde radar) et ainsi bénéficier d'une forte redondance dans la mesure des déplacements co-éruptifs. Cette redondance a été exploitée pour obtenir les trois composantes est-ouest, nord-sud et verticale des déplacements en inversant les mesures unidirectionnelles fournies par les interférogrammes (figure 5, voir Peltier et al., 2017 pour le détail des traitements).

Les incertitudes obtenues sur ces trois composantes pour les quatre éruptions de 2015 sont respectivement comprises entre 4.7 et 6.2 mm, 28.7 et 40.7 mm, et 5.9 et 9.5 mm (Peltier et al., 2017).

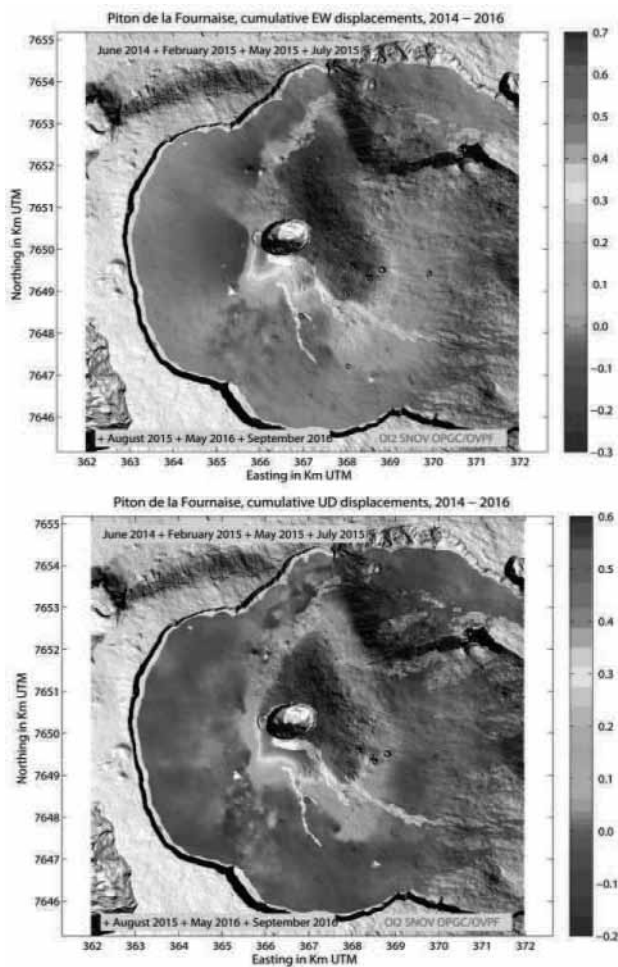


Figure 5 : Carte des déplacements cumulés (en m) es-ouest (en haut) et verticaux pour les sept éruptions survenues au Piton de la Fournaise entre juin 2014 et septembre 2016.

La précision de la composante nord-sud est toujours plus faible que celle des deux autres composantes du fait de la très faible inclinaison du plan orbital des satellites radar par rapport au plan méridien. Sur la totalité de la période considérée, les cartes de déplacements cumulés montrent que les déplacements affectent surtout les versants est et nord-est du Cône Central alors que la partie ouest de l'Enclos Fouqué n'est pratiquement pas affectée. Les déplacements verticaux cumulés atteignent un maximum de 60 cm et les déplacements horizontaux cumulés dépassent 70 cm vers l'est. Ces observations illustrent bien le caractère mobile du Flanc Est du Piton de la Fournaise alors que le Flanc Ouest, bloqué à l'ouest par des reliefs plus anciens, paraît plus stable.

Les interférogrammes ou les cartes des déplacements est-ouest, nord-sud et verticaux peuvent être exploités pour aller encore plus loin dans notre compréhension des processus contrôlant l'activité et l'évolution des volcans. En inversant ces déplacements mesurés à la surface, et en posant un certain nombre d'hypothèses sur les propriétés mécaniques du milieu, il est possible en effet

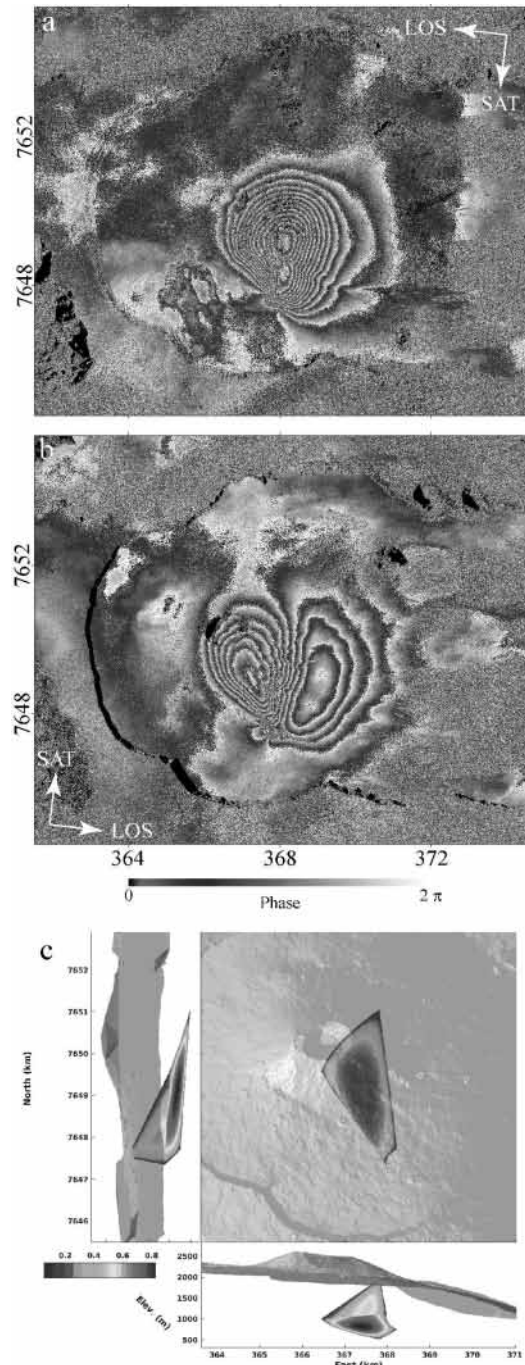


Figure 6 : Eruption de mai 2016 au Piton de la Fournaise: a) Interférogramme co-éruptif Sentinel-1 Stripmap Descendant couvrant une période de 48 jours entre le 20/04/2016 et le 07/06/2016 ; b) Interférogramme co-éruptif Sentinel-1 Stripmap Ascendant couvrant une période de 12 jours entre le 25/05/2016 et le 06/06/2016 ; c) Modèle d'intrusion magmatique obtenu par inversion des déplacements de surface mesurés à partir des données InSAR. Le taux d'ouverture de l'intrusion, en mètre, est donné par l'échelle de couleur. Les coordonnées sont en km UTM (40ème zone sud).

d'obtenir des informations sur la géométrie des sources et sur le volume de magma intrudé dans le milieu encaissant.

On pourra utiliser des modèles analytiques simulant des géométries de source simples dans une rhéologie élastique (le modèle de Mogi (Mogi, 1958) pour une source sphérique, le modèle d'Okada (Okada, 1985) pour une intrusion planaire, etc ...). Ces modèles aux nombres de paramètres limités facilitent l'inversion mais ils ne permettent pas de prendre en compte correctement des géométries de source complexes, les effets de la topographie, des hétérogénéités des propriétés physiques de l'édifice volcanique ou des rhéologies complexes. Certaines de ces complexités peuvent en revanche être modélisées au moyen de méthodes numériques. En particulier, la méthode des Eléments Frontières combinée à une inversion statistique est très efficace pour imager la géométrie des intrusions magmatiques (Cayol et Cornet, 1998, Froger et al., 2004, Fukushima et al., 2005). Dans le cas de l'éruption de mai 2016, au Piton de la Fournaise, l'utilisation de cette méthode pour modéliser les déplacements co-éruptifs, mesurés à partir d'interférogrammes Sentinel-1, a permis de montrer que la source des déplacements est une intrusion qui s'est d'abord propagée horizontalement sous le Flanc Sud-est du Cône Central à partir d'une origine située à une profondeur d'environ 500 m au-dessus du niveau de la mer, à l'aplomb du Dolomieu, pour se verticaliser ensuite dans la partie finale de sa trajectoire (figure 6).

5. Etude de la croissance et de la stabilité d'un édifice volcanique

Comme nous l'avons montré précédemment, les données SAR permettent à la fois de quantifier les volumes de magma mis en place en profondeur via la déformation de surface induite, et les volumes de magma émis en surface par cartographie et quantification des épaisseurs de coulées. Ces données constituent donc un outil unique pour caractériser le mode de croissance d'un édifice volcanique. Or ce mode de croissance va conditionner la stabilité de l'édifice volcanique. Par ailleurs, les instabilités de pente potentiellement générées par la croissance de l'édifice volcanique peuvent être mises en évidence et quantifiées grâce aux mesures de glissement de flanc obtenues par InSAR comme ce fut le cas pour l'éruption d'avril-mai 2007 au Piton de la Fournaise. Du 30 mars au 1^{er} avril 2007, le Piton de la Fournaise a connu une crise éruptive majeure caractérisée par le volume de lave émise le plus important des ^{xx}e et ^{xxi}e siècles ($240 \times 10^6 \text{ m}^3$) et par l'effondrement du cratère Dolomieu sur plus de 300 m de hauteur. Cet événement a été imagé à plusieurs reprises par les satellites radar ENVISAT-ASAR et ALOS-PALSAR. A partir des données enregistrées à bord des satellites, et récupérées par le service OI², une série d'interférogrammes a été produite (figure 7). Puis ces interférogrammes ont été utilisés pour calculer les composantes est-ouest et verticale des déplacements qui se sont produits sur l'ensemble de l'édifice, pendant la crise éruptive (figure 8) et dans les mois qui ont suivi.

Les résultats obtenus révèlent que des déplacements d'une ampleur inhabituelle ont affecté le Cône Central et le Flanc Est du Piton de la Fournaise pendant la crise éruptive et que ces déplacements se sont poursuivis

pendant au moins une année après la fin de la crise éruptive avec une amplitude décroissante (Froger et al., 2015a, Froger et al., 2015b).

L'analyse des données InSAR, combinée avec d'autres données géophysiques et avec diverses observations de terrain, a permis de proposer un modèle conceptuel pour expliquer les déplacements du Flanc Est. Dans ce modèle, il est proposé que les déplacements pourraient avoir été produits par une intrusion dans les Grandes Pentes. Lors de sa propagation vers la surface, cette intrusion se serait injectée dans une surface de détachement préexistante et l'aurait activée induisant le glissement vers l'est du Flanc Est sur presque 1.5 m. Ce glissement a pu alors favoriser la migration du magma depuis la zone de stockage principale, sous le Cône Central, jusqu'au site de l'éruption distale d'avril 2007 au pied sud-est des Grandes Pentes (Froger et al., 2015a ; Froger et al., 2015b).

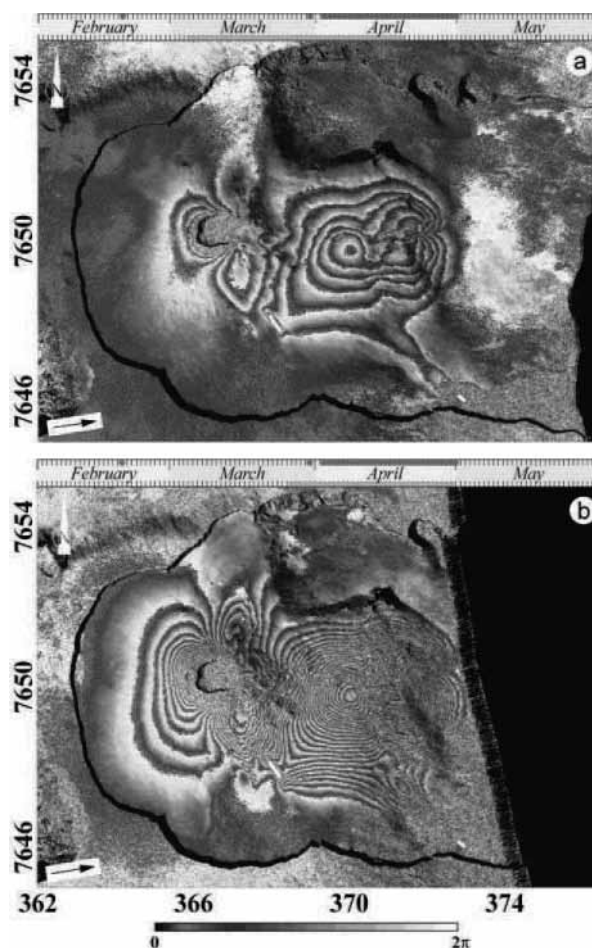


Figure 7 : a) Interférogramme ascendant PALSAR (bande L) couvrant une période de 46 jours entre le 04/03/2007 et le 19/04/2007. b) Interférogramme ascendant ASAR (bande C) couvrant une période de 35 jours entre le 26 mars et le 30 avril 2007. Les coordonnées sont en km UTM (40^{ème} zone sud). Les graduations en haut des figures montrent les périodes d'activité volcanique, en rouge, et les périodes couvertes par les interférogrammes, en cyan. Modifié d'après Froger et al., 2015a.

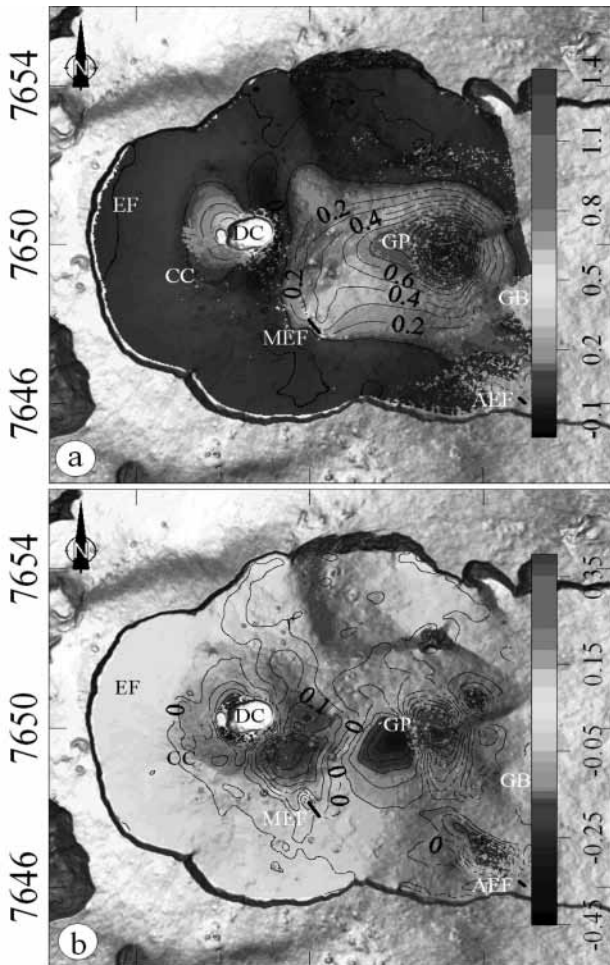


Figure 8 : a) Déplacements co-éruptifs (mars-avril 2007) drapés sur un Modèle Numérique de Terrain ombré. a) Composante est-ouest. b) Composante verticale. L'intervalle entre les iso-contours est de 0.1 m. Les déplacements ont été inversés en utilisant deux interférogrammes PALSAR ascendants, deux interférogrammes ASAR ascendants et un interférogramme ASAR descendant. Les coordonnées sont en km UTM (40ème zone sud). Modifié d'après Froger et al., 2015a.

En 2007, le réseau GNSS de l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise ne s'étendait pas dans la zone des Grandes Pentes. Les mesures de déplacement obtenues sur cette zone à partir des données InSAR du service OI² ont donc été les premières et les seules observations apportant la preuve directe d'un large mouvement de flanc affectant l'est du Piton de la Fournaise. Ces observations sont un élément fort en faveur des travaux antérieurs qui ont proposé que la structure Enclos Fouqué – Grandes Pentes – Grand Brûlé résulterait d'une succession de déstabilisations de flanc vers l'est (Lénat et al., 1990; Labazuy, 1996; Lénat et al., 2001). Depuis 2007, le réseau GNSS de l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise a été étendu dans le Flanc Est et cette zone est surveillée attentivement à partir des données GNSS continues et des données InSAR.

6. Conclusion

La mise en place du service OI² et l'augmentation récente de la quantité et de la qualité des données SAR fournies par les agences spatiales a permis d'améliorer significativement notre connaissance du système d'alimentation superficiel du Piton de Fournaise et son interaction dynamique avec l'édifice volcanique. Le Piton de la Fournaise constitue certainement une cible idéale pour développer les outils de traitement et d'interprétation qui permettront à terme d'espérer effectuer une surveillance opérationnelle de l'activité volcanique depuis l'espace. La principale limitation de l'InSAR étant sa relativement faible résolution temporelle, il est nécessaire de coupler ces observations avec des données GNSS Haute Résolution pour accéder à la dynamique du système.

Références

- Bato, M. G., Froger, J. L., Harris, A. J. L., Villeneuve, N., 2016, *Monitoring an effusive eruption at Piton de la Fournaise using radar and thermal infrared remote sensing data: insights into the October 2010 eruption and its lava flows* in Harris, A. J. L., De Groeve, T., Garel, F. & Carn, S. A. (eds) *Detecting, Modelling and Responding to Effusive Eruptions*. Geological Society, London, Special Publications, 426
- Beauducel, F., Briole, P., Froger, J.L., 2000. *Volcano wide fringe in ERS synthetic aperture radar interferograms of Etna (1992-1998): Deformation or tropospheric effect?* Journal of Geophysical Research: Solid Earth 105, 16,391-16,402.
- Biggs, J., Ebmeier, S. K., Aspinall, W. P., Lu, Z. Pritchard, M. E., Sparks, R.S.J. and Mather, T. A., 2014. *Global link between deformation and volcanic eruption quantified by satellite imagery*, Nature
- Biggs, J., Pritchard M. E., 2017. *Global volcano monitoring: What does it mean when volcanoes deform?* In: Elements 13.1, pp. 17–22.
- Cayol, V., and F. H. Cornet (1998), Three-dimensional modelling of the 1983–1984 eruption at Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island, J. Geophys. Res., 103, 18,025–18,037.
- Dietterich, H.R., Poland, M.P., Schmidt, D.A., Cashman, K.V., Sherrod, D.R., & Espinosa, A.T. (2012). Tracking lava flow emplacement on the east rift zone of Kīlauea, Hawai'i, with synthetic aperture radar coherence. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13, (17 pp.).
- Froger, J.-L., Y. Fukushima, P. Briole, T. Staudacher, T. Souriot, and N. Villeneuve (2004), The deformation field of the August 2003 eruption at Piton de la Fournaise, Reunion Island, mapped by ASAR interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L14601, doi:10.1029/2004GL020479.
- Froger, J.-L., Famin, V., Cayol, V., Augier, A., Michon, L. & Lenat, J.-F. 2015a. Time-dependent displacements during and after the April 2007 eruption of Piton de la Fournaise, revealed by interferometric data interferometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 296, 55–68.

- Froger, J.-L., V., Cayol, V., Famin, V. 2015b. The March-April 2007 Eruptions of Piton de la Fournaise as Recorded by Interferometric. In book: Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean, Active Volcanoes of the World, Chapter: 16, Publisher: Springer-Verlag, Editors: P. Bachèlery, J.F. Lenat, A. di Muro, L. Michon, pp .271-286
- Fukushima, Y., Cayol, V., Durand, P., 2005. Finding realistic dyke models from interferometric synthetic aperture radar data: the February 2000 eruption at Piton de la Fournaise. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 110.
- Labazuy, P. 1996. Recurrent landsliding events on the submarine flank of Piton de La Fournaise volcano (Reunion Island) in *Geological Society London Special Publications* 110 : 295-306.
- Lénat, J-F, Bachèlery, P., 1990. Structure et fonctionnement de la Zone Centrale du Piton de la Fournaise. In book: volcanisme de la Réunion, monographie, Publisher : Centre de Recherches Volcanologiques, Editors: Lénat, pp. 257-296.
- Lénat, J-F, Gibert-Malengreau, B. Galdeano, A. 2001. *A new model for the evolution of the volcanic island of Réunion (Indian Ocean)* *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 106(B5) : 8645-8664 react-text: 62.
- Massonnet, D., Briole, P., Arnaud, A., 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature* 375, pp. 567–570.
- Massonnet, D., Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.* 36 (4), pp. 441–500.
- Mogi, K., 1958. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo* 36, pp. 99–134.
- Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 75, 1,135–1,154.
- Peltier, A, Froger, J.-L., Villeneuve, N., Catry, T., 2017. *Assessing the reliability and consistency of InSAR and GNSS data for retrieving 3D-displacement rapid changes, the example of the 2015 Piton de la Fournaise eruptions*, In *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 344, 2017, Pages 106-120, ISSN 0377-0273,
- Pinel, V., Poland, M., Hooper, A., 2014. Volcanology: Lessons learned from Synthetic Aperture Radar imagery, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, pp. 81-113.
- Prival, 2016. *Cartographie d'une coulée de lave et estimation de sa surface à partir d'images de cohérence radar - L'éruption d'août 2015 du Piton de la Fournaise*, Rapport de Master 1 Recherche, Laboratoire Magma et Volcans.
- Zebker, H.A., Rosen, P.A., Hensley, S., & Mouginiis-Mark, P.J. (1996). Analysis of active lava flows on Kilauea volcano, Hawaii, using SIR-C radar correlation measurements. *Geology*, 24, pp. 495–498.