

INTERFEROMETRIE RADAR APPLIQUEE AUX VOLCANS : CAS DE L'ETNA ET DES CHAMPS PHLÉGRÉENS (ITALIE)

VOLCANOLOGICAL APPLICATIONS OF RADAR INTERFEROMETRY: ETNA AND PHLEGREAN FIELDS (ITALY).

P. BRIOLE^{1,2}, A. AVALLONE³, F. BEAUDUCEL^{1,4}, A. BONFORTE⁵, V. CAYOL⁷, C. DEPLUS^{6,2}, C. DELACOURT⁸, J.-L. FROGER⁷, B. MALENGREAU⁷, G. PUGLISI⁹.

¹CNRS-UMR 7580, Laboratoire de Sismologie, Institut de Physique du Globe de Paris, 4 Place Jussieu, 75005 Paris. / ²Observatoires Volcanologiques, Institut de Physique du Globe de Paris, 4 place Jussieu, 75005 Paris. / ³Università "Federico II" - Dipartimento di Scienze Fisiche, Mostra d'Oltremare Pad. 16, 80125 Napoli - Italy. / ⁴Osservatorio Vesuviano, Via Manzoni 249, 80123 Napoli - Italy. / ⁵Istituto Internazionale di Vulcanologie, Piazza Roma 2, 95123 Catania, Italy. / ⁶CNRS-UMR 7577 Laboratoire de Gravimétrie, Institut de Physique du Globe de Paris, 4 Place Jussieu, 75005 Paris. / ⁷CNRS-UMR 6524 Magmas et Volcans, CRV, Université Blaise Pascal, 5 Rue Kessler, 63000 Clermont-Ferrand. / ⁸UCBL & ENSL, Laboratoire de Dynamique de la Lithosphère, Lyon

ABSTRACT

During the last few years, the radar images collected by the European satellites ERS1 and ERS2, the Japanese satellite JERS and the Canadian satellite RADARSAT have been used with success to create interferograms. This technique has been applied for geophysical applications like co-seismic deformation mapping, volcano deformation monitoring, landslides monitoring, mining subsidence detection, glaciers monitoring. Here we report the research carried out by our group on Etna volcano (Italy) and in the area of Naples (Italy) where are located several potentially active volcanoes (Vesuvius, Ischia) and where a subsidence of the caldera of Campi Flegrei is still on going in response to the 1982-1984 seismic crisis. Etna is the volcano that has been studied first using ERS SAR interferometry. Using this method, a large scale deflation of the volcano associated with the large 1991-1993 eruption was detected in data covering the second half of the eruption. Further studies showed that the local deformation fields located in Valle del Bove (East of the volcano) where associated with the compaction of the 1986-1987 and 1989 lava fields and also partly with a subsidence of the surrounding terrain in response to the load of the new deposited material. Other local deformation fields have been identified, corresponding to the 1983, 1981 and 1971 lava fields. However, due to its strong topography, interferograms of Etna are affected by tropospheric effects. Those effects must be eliminated in order to correctly interpret the fringes pattern. The problem of the troposphere has been first investigated from its theoretical point of view and using existing local meteorological data as well as radio-soundings data. Recently, thanks to the large amount of available interferograms, another approach has been investigated, consisting in the research of a correlation fringe/elevation in the interferograms themselves. This approach, operated either in automatic mode (automatic fringe unwrapping) or in manual mode proved to be efficient for most of the coherent interferograms. After removal of the tropospheric correction, the evolution of the deformation of the volcano at large scale between 1992 and 1998 has been inferred.

The subsidence occurring during the second half of the 1992 eruption as well as the uplift preceding the 1995 unrest of the Southeast crater are visible, but their amplitude is less than previously estimated. The depth of the modelled source of subsidence/uplift related to the large scale deformation is of the order of 6 to 8 km, not well constrained by the data. The study of the correlation fringe/elevation was possible only after a detailed analysis of the spatial and temporal properties of coherence of the Etna area. Indeed, the technique of fringe unwrapping for fringe/elevation correlation analysis is possible only if the poorly coherent pixels are eliminated. A map of the most coherent pixels of the volcano was produced. The recent lava fields as well as the towns and villages surrounding the volcano are the most coherent areas. The quality of the interferograms is also enhanced when high accuracy DEM (Digital Elevation Model) are used. Using kinematic GPS data collected along more than 100 km of road around the volcano, we assessed the accuracy of several DEMs of Etna. The most accurate DEM was produced by digitising 1/25.000^e maps of Etna. This DEM does not take into account the topographic changes due to the recent eruptions. Merging other more recent DEMs corresponding to those areas, we produced an updated relatively high accuracy DEM (± 3 m) of Etna. In the Naples area, we analysed interferograms in the period 1993-1996 and show that the Campi Flegrei caldera is still subsiding at a rate of about 30 mm/year.

1. INTRODUCTION

L'interférométrie d'images radar obtenue à partir de données des satellites européens ERS1 et ERS2, du satellite japonais JERS ainsi que du satellite canadien RADARSAT a permis, depuis 1992, d'améliorer sensiblement la mesure des déformations à la surface de la Terre. Cette technique a été appliquée, en particulier, à l'étude des déformations associées aux tremblements de Terre (Massonnet et al., 1993), aux mouvements de terrain (Carnec, 1996 ; Carnec et al., 1996 ; Fruneau et al., 1996), au fluage des glaciers (Goldstein et al., 1993) et également à l'étude des déformations volcaniques. Dans un article de synthèse, Massonnet et Feigl (1998) font

une revue détaillée de la méthode interférométrique et de ses applications. La majorité des résultats interférométriques ont été fournis par les satellites ERS1 et ERS2. La longueur d'onde du radar utilisé par ces satellites est de 56 mm, et une frange interférométrique correspond donc à 28 mm de déplacement apparent dans la direction de visée du satellite. Les thématiques de recherche actuelles portent sur :

- l'amélioration des logiciels de calculs, de filtrage et de déroulement automatique de franges.
- l'amélioration de la connaissance des orbites des satellites (Scharoo et al., 1998).
- l'amélioration des modèles numériques de terrain utilisés pour le calculs interférométrique (Ferretti et al., 1997, Froger et al., 1999).
- l'amélioration de la correction troposphérique à appliquer aux interférogrammes bruts (Delacourt et al., 1998, Hansen, 1998 ; Beauducel et al., 1999).
- la validation sur le terrain des mesures de déformation détectées par interférométrie, en particulier à l'aide de mesures GPS ou de nivellement.
- la prise en compte de la grande densité des données d'interférométrie pour améliorer la modélisation des déformations observées ou mettre en évidence des déformations non observées préalablement.

Nous avons appliqué ces thématiques aux travaux que nous avons effectués ces dernières années sur la région de Naples (Italie) et surtout sur l'Etna où l'interférométrie radar a apporté un nouvel élan à l'étude des déformations.

2. ETNA

L'Etna (**Figure n°1**) est l'un des volcans les plus actifs du monde. Il a été l'un des premiers sites d'application de l'interférométrie radar. Grâce aux différents types de surfaces présents sur le volcan, il a pu servir de cible privilégiée pour évaluer le potentiel de la méthode. Du fait de son activité presque continue et des conditions climatiques favorables, on peut trouver dans la même image radar des régions très cohérentes (notamment les coulées de lave récentes) et des régions peu cohérentes (forêts, zone sommitale du volcan). Ceci permet à la fois la détection de déformation dans les zones favorables (Massonnet et al., 1995 ; Briole et al., 1997 ; Lanari et al., 1998) et la possibilité de conduire des travaux méthodologiques sur les problèmes et les applications de la rétro-diffusion de la radiation radar (Coltelli et al., 1996). Situé en Europe, l'Etna est également placé de façon favorable pour bénéficier d'un accès fiable et rapide aux données radar (acquisition des données à la station de Fucino en Italie). Enfin, un très grand nombre de données de terrain, géophysiques et géochimiques, provenant des systèmes de surveillance de l'Istituto Internazionale di Vulcanologia sont disponibles sur ce volcan. Depuis le début des missions ERS1/2 (à partir de 1991), l'Etna

connaît une activité soutenue et variable dans l'espace et dans le temps. Après la fin de l'éruption latérale de décembre 1991 - mars 1993 aucune activité volcanique significative n'a été observée jusqu'à la mi 1995. A cette date a débuté une phase d'activité strombolienne aux cratères sommitaux qui a d'abord intéressé seulement le cratère nord-est (NEC) puis celui de la Bocca Nuova (BNC). L'activité dans ce dernier se poursuivait encore en février 1999. Au NEC, en revanche, l'activité a pris fin à la mi 1997 après avoir montré une grande variabilité dans les manifestations éruptives : d'abord une série d'épisodes de fontaines de laves espacés de jours voire de semaines de calme absolu (1995-1996), ensuite une activité strombolienne presque continue avec coulées de lave (1996) et finalement des épisodes d'effondrement du cratère espacés par de petites explosions stromboliennes. Au même moment, fin 1996, l'activité a débuté au Cratère sud-est (SEC), d'abord strombolienne, puis accompagnée de petites coulées de lave, qui ont produit le remplissage du cratère et provoqué des débordements de lave à la fin de

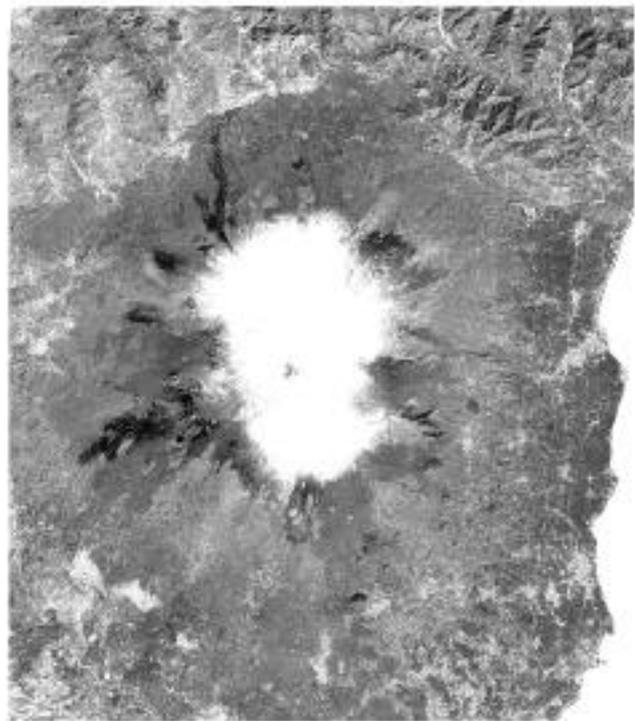


Fig. 1 : Image SPOT de l'Etna en hiver

1997. Toujours à la fin 1997 a commencé l'activité strombolienne à la Voragine (VRC) qui continuera pendant tout 1998 entraînant le remplissage du cratère.

Après deux puissantes explosions, dont au moins une sub-plinienne (Coltelli, comm. pers.) en juillet-août 1998, la VRC est redevenue calme. En revanche, l'activité au SEC a continué pendant tout 1998 et, à partir d'août, les fontaines de lave sont devenues plus fréquentes jusqu'au 4 février 1999, quand une fracture s'est

formée à la base de ce cratère donnant lieu à une coulée de lave toujours active fin février 1999. A partir de 1993, l'augmentation de l'activité volcanique a été accompagnée d'une inflation du volcan, avec un taux presque constant, comme le montrent des mesures de déformations du sol (GPS et EDM). Ceci suggère que l'activité observée aux cratères sommitaux pourrait être due à la recharge du système, impliquant probablement aussi des systèmes de stockage superficiels. Nos principaux travaux concernent :

- la validation de la précision des MNT disponibles.
- l'étude des déformations à grande longueur d'onde associées à l'éruption de 1991-1993.
- l'étude des déformations à courte longueur d'onde associées à la subsidence des coulées de 1986-1987 et 1989 en Valle del Bove.
- l'étude des déformations à courte longueur d'onde associées à la compaction de la coulée de 1991-1993 et la validation à l'aide de mesures GPS sur le terrain.
- l'étude des effets troposphériques à partir de données météorologiques acquises lors des passages du satellite.
- l'étude des effets troposphériques à partir de l'analyse intrinsèque des images (corrélation frange/altitude).
- la modélisation des déformations et l'étude de l'effet de la topographie sur la forme des interférogrammes dans le cas d'une source simple en profondeur.



Fig. 2 : Exemple de subsidence à grande longueur d'onde à l'Etna (interférogramme de la période 1992-1993).

2.1. Études des déformations à grande longueur d'onde

Le premier travail effectué en interférométrie radar sur l'Etna a concerné la mise en évidence et la modélisation de déformations à grande longueur d'onde observées sur le volcan en 1992-1993 au cours de la seconde moitié de l'éruption de 1991-1993. La subsidence à grande longueur d'onde mise en évidence par ces données (**Figure n°2**) a été interprétée comme associée à une variation de volume dans un réservoir situé à 16 ± 3 km de profondeur (Massonnet et al., 1995). Une étude plus récente consacrée à la période 1993-1995 (Lanari et al., 1998) montre que le volcan se regonfle au cours de cette période, avec une profondeur de source estimée à 6 km environ.

2.2. Étude des déformations autour des coulées de 1986-1987, 1989 et 1991-1993

Nous avons observé dans de nombreux interférogrammes la présence de franges de déformation fortement corrélées avec les coulées de lave récentes de l'Etna. Dans le cas des coulées de 1986-1987 et 1989, nous avons pu montrer qu'une partie de la déformation peut être expliquée par la subsidence encore active du champ de lave plusieurs années après la mise en place de la coulée et en partie par un effet de relaxation de l'encaissant sous l'effet de la charge du matériau nouvellement déposé. Les temps caractéristiques de ces effets dépassent 10 ans. Sur la coulée de 1991-1993, les données interférométriques suggérant une subsidence supérieure à 10 cm/an dans la région la plus épaisse de la coulée (80 à 90 m de lave, **Figure n°3**) entre 1993 et 1995, nous avons effectué en 1997 et 1998 deux campagnes de mesures GPS sur un profil de 17 points espacés d'environ 100 m au niveau le plus épais de la coulée de 1991-1993. Les résultats des mesures GPS (**Table n°1**) confirment cette subsidence, avec une amplitude atteignant 16 cm/an.

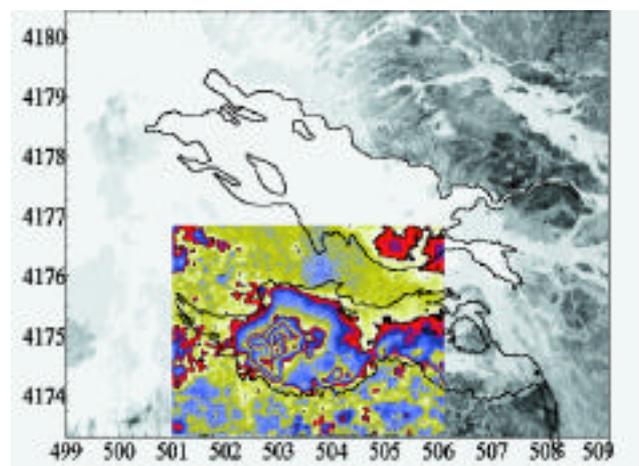


Fig. 3 : Déformations mesurées par interférométrie sur la coulée de 1991-1993 (coordonnées TM WGS84).

Pt	TM - Est	TM - Nord	Altitude	dE	dN	dU
1	502445.724	4174219.980	1826.643	2	-12	-8
2	502485.721	4174232.791	1819.542	11	5	-26
3	502540.786	4174256.310	1811.853	32	14	-53
4	502605.987	4174306.132	1810.824	27	22	-79
5	502652.082	4174366.749	1806.931	19	15	-98
6	502762.644	4174503.704	1780.341	31	24	-78
7	502836.292	4174576.113	1782.278	33	26	-151
8	502913.704	4174630.401	1784.534	-2	50	-141
9	502939.793	4174815.139	1774.183	-11	-26	-167
10	502906.036	4174905.272	1768.112	-5	20	-99
11	502916.692	4175005.560	1762.942	12	-5	-65
12	502964.582	4175115.927	1745.833	-10	0	-57
13	502979.805	4175242.650	1726.039	-21	-6	-48
14	502964.148	4175368.763	1722.626	26	1	-23
15	502926.074	4175465.056	1724.843	28	-13	-38
16	502999.300	4175608.714	1723.628	-1	-10	7
ref	502426.756	4173577.654	2074.455	0	0	0

Table 1 : Coordonnées TM 1997 (ellipsoïde WGS84) des points mesurés en Ville del Bove en 1997 et en 1998, ainsi du point de référence (SCAO - Schiena del Asino) et déplacements 1997-1998. Les altitudes sont sur l'ellipsoïde. SCAO a été positionné dans le système ITRF94 par rapport au point IGS de Matera. Les déplacements sont exprimés en millimètres. La déformation est maximale (16.7 cm en un an) au niveau du point le plus épais de la coulée.

2.3. Modélisation des déformations

La première modélisation des déformations à grandes longueur d'onde a été effectuée par Massonnet et al. (1995) à partir d'un modèle de source ponctuelle en demi espace infini élastique (Mogi, 1958). Cette modélisation conduit à une estimation peu précise de la profondeur de la source (± 3 km) et ne permet pas d'expliquer précisément la forme de l'interférogramme. En utilisant une méthode numérique par éléments frontières, un modèle 3D prenant en compte la topographie réelle du volcan a été calculé dans le cas d'une source sphérique (Cayol et Cornet, 1998). Cette modélisation a permis de réduire les incertitudes sur la profondeur de la source (16 ± 1 km sous le sommet de l'édifice) et d'expliquer l'aplatissement des déplacements vers le sommet de l'édifice (Figure 7d). Ce modèle 3D élastique n'explique cependant les observations qu'au premier ordre. L'asymétrie marquée de la géométrie des franges à grande longueur d'onde n'est pas reproduite. Nous discutons plus loin le rôle possible des effets troposphériques dans la géométrie des franges.

2.4. Validation de la précision des MNT

L'activité volcanique s'accompagne de déformations à courte longueur d'onde (injections de dyke, subsidence de coulées). Pour que l'interférométrie radar puisse permettre de détecter de telles déformations, une des conditions est de disposer d'un Modèle Numérique de Terrain

(MNT) suffisamment précis pour que des résidus topographiques ne bruent pas l'interférogramme. En effet, l'amplitude et la longueur d'onde de résidus topographiques peuvent être du même ordre que ceux des variations liées à des déformations près de dykes. Nous avons mené une étude systématique de la précision de huit MNT de l'Etna à partir d'un levé GPS cinématique effectué en Avril 1998. La première étape de l'étude a consisté à ramener les huit MNT dans un système géographique commun (x, y : coordonnées kilométriques TM WGS84, z : altitudes en mètres par rapport à l'ellipsoïde WGS84) compatible avec celui des données GPS (ITRF94). L'écart entre les coordonnées WGS84 et l'ITRF94 est inférieur à 1 m et donc petit par rapport à la précision attendue des MNT. La seconde étape a consisté à calculer l'écart type des résidus obtenus en faisant la différen-

MNT	Méthode	L. ILLS.
ISTAR-1	Stéréophotogrammétrie SPOT	16 m
UCL-SPOT	Stéréophotogrammétrie SPOT	9 m
GNV-25	Photogrammétrie + digitalisation	5 m
IRECE	Déroulement d'interférogrammes	10 m
POLIMI-1	Déroulement d'interférogrammes	8 m
POLIMI-2	Idem + MNT GNV-25	7 m
Pareschi-DEM	Digitalisation de cartes	3 m
UBP-VDB	Digitalisation de cartes	13 m

Table 2

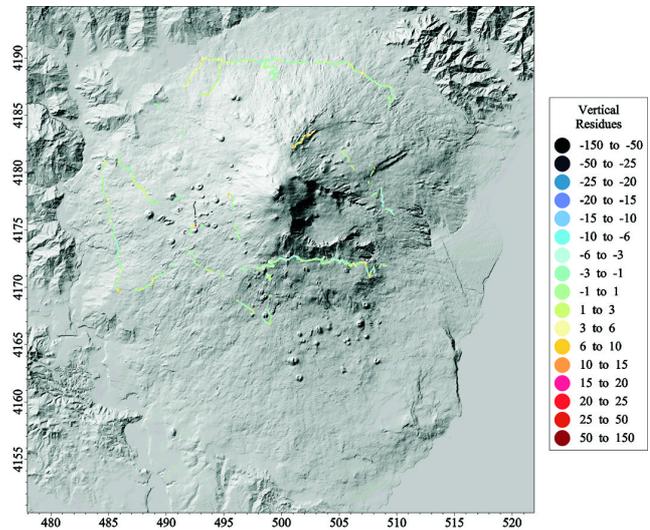


Fig. 4 : Validation du MNT Pareschi à partir de données de GPS cinématique

ce des valeurs d'altitude données par les mesures GPS avec les valeurs d'altitude données par chacun des huit MNT (environ 12 000 valeurs de résidus ramenées à environ 2 000 valeurs après interpolation). L'écart type ainsi calculé est probablement un bon estimateur de la qualité globale d'un MNT. La Figure n°4 montre l'emplacement des 12 000 mesures GPS sur la représentation ombrée du MNT ayant le plus faible écart type.

VOIR CAHIER COULEUR

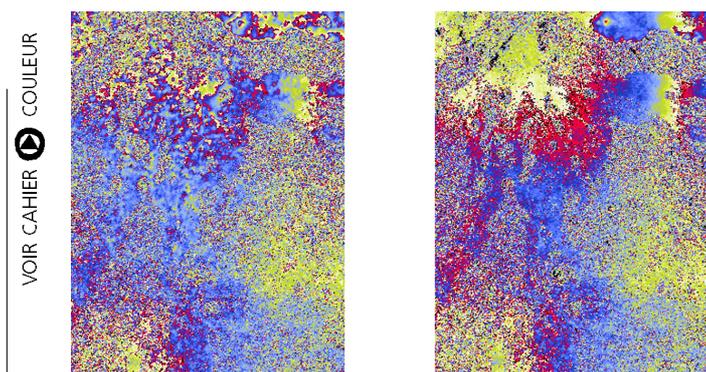


Fig. 5 : Amélioration d'un interférogramme par utilisation d'un MNT plus précis. (a) calcul avec le MNT ISTAR-1 (gauche), (b) calcul avec le MNT Pareschi (droite).

La **Figure n°5** montre une portion du même interférogramme calculé avec les MNT ayant le plus fort écart type (ISTAR-1) et le plus faible écart type (Pareschi). On peut noter la diminution du bruit haute fréquence sur le second interférogramme. Nous présentons dans la **Table n°2** les huit MNT testés en précisant leur origine, leur mode de réalisation et le résultat du calcul d'écart type. Le meilleur MNT global est obtenu à partir de la numérisation de courbes de niveaux des cartes au 1/25 000^e disponibles sur l'Etna. Il a été remplacé par des MNT plus récents dans les régions de coulées récentes de façon à disposer d'un MNT de référence actuel pour l'ensemble de l'Etna. La précision du MNT résultat est de l'ordre de ± 3 m.

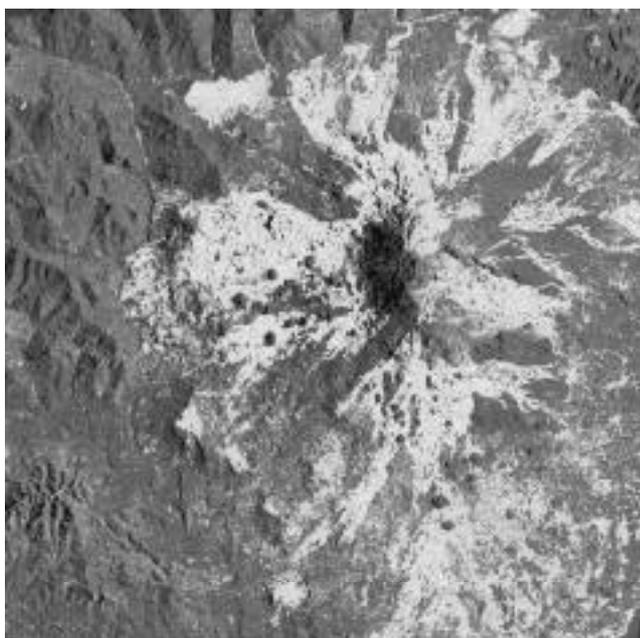


Fig. 6 : Masque de cohérence obtenu par combinaison de 221 interférogrammes (1992-1998). L'échelle va de blanc (très cohérent) à noir (pas cohérent). Les coulées de lave récentes et les agglomérations sont bien mises en évidence.

2.5. Cohérence des images SAR sur l'Etna

La cohérence d'un interférogramme peut se définir à partir de l'inverse du gradient spatial de phase. Elle traduit, pour chaque point de l'image, la probabilité de retrouver une valeur de phase proche sur les pixels alentours. Elle reflète la variabilité de l'état de surface du sol et est utilisée dans de nombreux travaux pour caractériser les réflecteurs naturels. Nous avons sélectionné 221 interférogrammes de la période 1992 à 1998, et avons calculé une carte de cohérence pour chacun d'eux. La sommation de ces cartes fournit une "carte de cohérence collective" (**Figure n° 6**) qui représente la persistance de cohérence sur le long terme (Beauducel et al., 1999). Contrairement aux cartes de cohérence individuelles, la carte collective présente une haute résolution grâce aux nombreuses sommations. On y distingue la géométrie des coulées de lave récentes ou non couvertes de végétation, les zones habitées et les routes avec une précision spatiale pratiquement égale à 40 m (taille du pixel de nos images). Nous avons utilisé cette carte pour sélectionner et classer les pixels des interférogrammes de l'Etna. Cela a permis de masquer de façon automatique les images, pour ne conserver que les valeurs de phase valides et ainsi réduire à quelques milliers le nombre de données utilisées dans les modèles, contre les 3 millions de valeurs originales bruitées (voir **Figure n°7b**).

D'autre part, environ 800 pixels ont montré entre 98 % et 100 % de maintien de cohérence sur la période considérée ; ceux-ci sont interprétés comme "réflecteurs permanents" et pourront être localisés sur le terrain de façon à participer aux études plus fondamentales des ondes radar.

2.6. Étude des effets troposphériques

La précision de l'interférométrie différentielle pour la détection des mouvements de surface se trouve limitée par les effets atmosphériques. Une modification des conditions atmosphériques dans la couche basse de l'atmosphère (troposphère) entre les instants d'acquisition des images induit une variation du trajet de l'onde radar, se traduisant par une rotation de phase sur l'interférogramme. Dans les régions à fort relief, cet effet est critique car la rotation de phase d'origine troposphérique dépend de l'altitude de chaque point. Le système de franges parasites n'est plus uniforme pour toute l'image et peut masquer le signal géophysique. Nous avons développé un modèle permettant de simuler l'effet troposphérique à partir de données météorologiques (humidité, pression, température) acquises en quelques points de l'image (Delacourt, 1997). L'application de ce modèle a permis d'améliorer la précision sur la mesure des déformations du volcan lors de l'éruption de 1991-93 sur l'Etna (Delacourt et al., 1998). Les corrections troposphériques différentielles mises en évidence dans notre étude pouvaient atteindre deux franges soit l'équivalent de 56 mm de déformation.

Dans le cadre de cette étude, nous avons trouvé une subsidence maximum de 13 ± 3 mm/mois de l'ensemble du volcan durant la deuxième moitié de l'éruption de 1991-1993, un arrêt de la déformation un mois avant la fin de l'éruption, puis une phase de gonflement (3 mm/mois) dans les mois suivants. Par la suite, nous avons cherché à réaliser une correction troposphérique

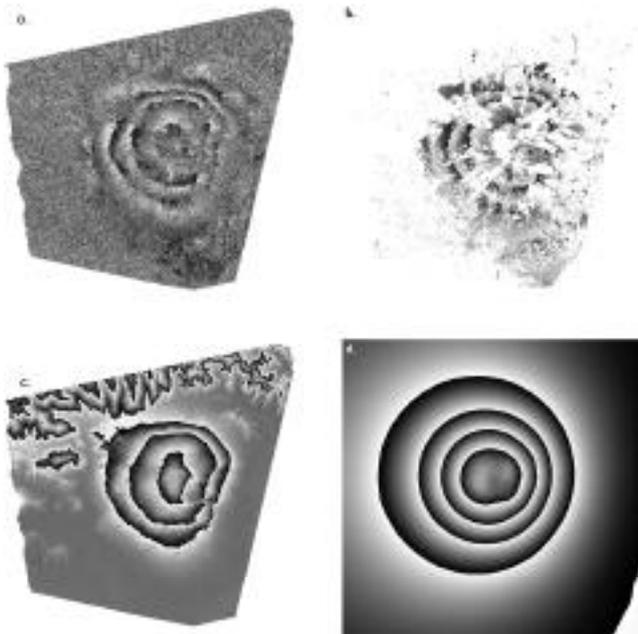


Fig. 7 : (a) interférogramme de l'Etna (septembre 1992 – octobre 1993), (b) interférogramme après application du masque de cohérence, (c) modèle de correction météorologique basé sur l'analyse de corrélation franges/altitude, (d) modèle de déformation supposant une source sphérique en profondeur et prenant en compte la topographie (Cayol and Cornet, 1998). On voit qu'un modèle de troposphère stratifiée permet de reproduire certaines observations (ici jusqu'à 3.8 franges) mieux que ne le fait un modèle de déformation tridimensionnel. L'interprétation des déformations du volcan doit donc impérativement tenir compte des effets troposphériques.

des interférogrammes à partir d'une éventuelle corrélation phase-relief extractible de l'image elle-même. L'inversion simultanée d'un modèle de déformation et de troposphère stratifiée, appliquée à 221 interférogrammes de la période 1992-1998, a confirmé les variations temporelles de délais troposphériques trouvées par l'étude précédente, tout en montrant que ces effets pouvaient dépasser 3 franges (Figure n°7). Les conclusions de cette étude (Beauducel et al., 1999) suggèrent que la majeure partie la plus importante des franges observées à grande longueur d'onde sur l'Etna depuis 1992 pourraient être d'origine troposphérique. Il s'agirait d'un résultat allant à l'encontre des conclusions des travaux précédents. Une confrontation détaillée avec les données GPS disponibles est en cours afin de corroborer ou non ces nouveaux résultats. L'étude des effets atmosphériques se révèle ainsi primordiale dans l'interprétation des données SAR.

3. CHAMPS PHLÉGRÉENS

La caldeira des Champs Phlégréens a été l'objet de deux importants phénomènes de soulèvement, le dernier durant la période 1982-1984, et a ensuite repris un régime de subsidence. Six interférogrammes de Naples couvrant l'intervalle 1993-1996 ont été calculés (Avallone et al., 1999). Bien que l'altitude d'ambiguïté des couples sélectionnés soit élevée, la cohérence des interférogrammes n'a pas de relation avec l'intervalle de temps considéré ni avec la saison durant laquelle les images ont été acquises. L'interférogramme le plus cohérent (Figure n°8), correspondant à la période 14 février 1993 - 3 avril 1996. Il montre que le centre de la caldeira des Champs Phlégréens, a été l'objet d'une subsidence de trois franges (84 mm). Ce résultat est en accord avec la valeur de 32 mm/an obtenue par nivellement dans la même zone durant la même période (Osservatorio Vesuviano, 1998). Un modèle de déformation utilisant le formalisme de Mogi (1958) indique une source de déflation localisée à

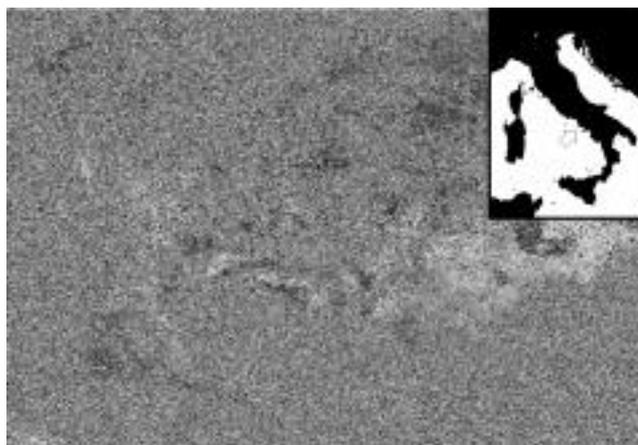


Fig. 8 : Interférogramme de la région napolitaine (14 février 1993 au 3 avril 1996). On observe environ trois franges de déflation sur la zone des Champs Phlégréens.

2.7 km de profondeur, centrée en mer à environ 700 m au sud-ouest du port de Pozzuoli. La géométrie et l'extension superficielle du champ de déformation, obtenu par l'interférométrie différentielle font apparaître une allure et une longueur d'onde identiques à ceux observés lors de la phase d'inflation entre 1982 et 1984. Cela suggère la présence d'une région source unique dans laquelle se localisent à la fois les moteurs de l'inflation de 1982-1984 et de la déflation. La précision du résultat interférométrique est significativement inférieure à la précision classique des nivellements, mais la couverture superficielle est plus dense. La validation réciproque des observations nivellement et interférométriques aux Champs Phlégréens renforce considérablement notre connaissance des barres d'erreur sur les mesures interférométriques. L'existence conjointe des deux types de données permet de caler en absolu les franges. La valida-

tion des données interférométriques ainsi réalisée, la mise en œuvre de calculs de modélisation 3D plus raffinés que précédemment devient possible.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce papier ont été soutenus par le CNRS-INSU (programmes PNRN et PNTS), la Commission Européenne (projet DGXII Madviews, ENV-CT96-0294) et l'ESA (projet Empedocle).

RÉFÉRENCES

- Arnaud, A., Etude et analyse des artefacts dans la construction de l'image interférométrique radar, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1997.
- Avallone, A., P. Briole, C. Delacourt, A. Zollo and F. Beauducel, Subsidence of Campi Flegrei (Italy) detected by SAR interferometry, submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 1999.
- Baldi P., S. Bonvalot, P. Briole and M. Marsella, Digital photogrammetry and kinematic GPS for monitoring volcanic areas, submitted to *Geophys. J. Int.*, 1999.
- Beauducel, F., P. Briole and J.L. Froger, SAR interferometry fringes observed on Mount Etna: Real deformation or tropospheric artefact?, submitted to *J. Geophys. Res.*, 1999.
- Briole, P., D. Massonnet and C. Delacourt, Post-eruptive deformation associated with the 1986-87 and 1989 lava flows of Etna detected by radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1,37-40, 1997.
- Carnec, C., Interférométrie SAR différentielle, Application à la détection des mouvements de terrain, Thèse de l'Université Paris VII, 1996.
- Carnec, C., D. Massonnet, and C. King, Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3579-3582, 1996.
- Cayol, V., Analyse élastostatique tridimensionnelle du champ de déformation des édifices volcaniques par éléments frontières mixtes, Thèse de l'Université Paris VII, 1996.
- Cayol, V. and F.H. Cornet, Effects of topography on the interpretation of the deformation field of prominent volcanoes. Application to Etna, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1979-1982, 1998.
- Cayol, V., J.L. Froger and P. Briole, Two-dimensional modelling of the time-dependant displacement associated with the 1989 Etna lava flow, in EU-DGXII-MADVIEWS final report, 1999.
- Coltelli, M., Fornaro G., Franceschetti G., Lanari R., Migliaccio M., Moreira J. R., Papathanassiou P., Puglisi G., Riccio D., Schwabish M., SIR-C/X-SAR Multifrequency Multipass Interferometry: a new Tool for Geological Interpretation, *J. Geoph. Res.*, E12, 23127-23148, 1996.
- Delacourt, C., Détection et analyse de mouvements de surface par interférométrie différentielle, Thèse de l'Institut de Physique du Globe de Paris, 1997.
- Delacourt, P. Briole and J. Achache, Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography. Application to Etna, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2849-2852, 1998.
- Ferretti, A., C. Prati and F. Rocca, Multibaseline InSAR DEM Reconstruction: the Wavelet Approach, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, to be published
- Ferretti, A., Monti Guarnieri, C. Prati and F. Rocca, Multi-Baseline Interferometric Techniques and Applications, Proc. FRINGE 96 Workshop – Zurich, 1996, <http://www.gco.unizh.ch/rsl/fringe96/>
- Ferretti, A., C. Prati, F. Rocca and A. Monti Guarnieri, Multi-baseline SAR Interferometry for automatic DEM reconstruction, Proc. 3rd ESR Symposium, Florence, 1997, <http://florence97.ers-symposium.org/>
- Froger, J.-L., P. Briole, A. Arnaud and G. Puglisi, Use of ERS Tandem interferograms to improve Digital Elevation Model. Example of Mt Etna, Italy, submitted.
- Froger, J.-L., P. Briole, C. Delacourt, A. Arnaud, G. Puglisi, C. Deplus and F. Obrizzo, Short wavelength deformation of Etna revealed by five years of SAR interferometry, *Bull. Volc.*, en préparation, 1999.
- Froger, J.-L., B. Malengreau et P. Briole, Etude qualitative des Modèles Numériques de Terrain disponibles sur le Mont Etna, <http://www.obs/terre/insar/rest/empe/index.html>, 1999.
- Fruneau, B., J. Achache and C. Delacourt, Observation and modeling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry, *Tectonophysics*, 265, 181-190, 1996.
- Goldstein, R.M., H. Engelhardt, B. Kamb and R. Frolich, Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream, *Science*, 262, 1525-1534, 1993.
- Hansen, R., Assessment of the role of Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry, Delft University Press, DEOS Report n° 98.1, 1998.
- Harris, A., A. J. L., Blake, S., Rothery, D. A. and N.F. Stevens, A chronology of the 1991 to 1993 Etna eruption using AVHRR data: implications for real time thermal volcano monitoring, *J. Geophys. Res.*, 102, 7985-8003, 1997.
- Lanari, R., P. Lundgren, and E. Sansosti, Dynamic Deformation of Etna Volcano observed by Satellite Radar Interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1541-1544, 1998.
- Lu, Z., R. Fatland, M. Wyss, S. Li, J. Eichelberer, J. Dean, and J. Freymueller, Deformation of New Trident volcano measured by the ERS-1 SAR interferometry, Katmai National Park, Alaska, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 695-698, 1997.
- Lu, Z., D. Mann and J. Freymueller, Satellite interferometry measures deformation at Okmok volcano, *EOS*, 79, 39, 461-470, 1998.
- Lu, Z. and J. Freymueller, Synthetic aperture radar (SAR) interferometry coherence analysis over Katmai volcano group, Alaska, *J. Geophys. Res.*, in press, 1999.
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, 138-142, 1993.
- Massonnet, D., P. Briole and A. Arnaud, Deflation of mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375, 567-570, 1995.

- Massonnet, D. and K.L. Feigl, Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Rev. Geophys.*, 36, 441-500, 1998.
- Mogi, K., Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 36, 99-134, 1958.
- Mouginis-Mark, P. J. and H. Garbeil, Digital topography of volcanoes from radar interferometry: an example from Mt Vesuvius, Italy, *Bull. Volcanol.*, 55, 566-570, 1993.
- Osservatorio Vesuviano, Rendiconti dell'attività di sorveglianza, gennaio 1998.
- Sansosti, E., M. Tesauro, R. Lanari, G. Fornaro, G. Puglisi, G. Franceschetti, M. Coltelli, Digital Elevation Model Generation Using Ascending and Descending ERS-1/ERS-2 Tandem Data, to be published in *Int. J. Remote Sensing*, 1999.
- Scharoo, R., P.N.A.M. Visser and G.J. Mets, Precise orbit determination and gravity field improvement for ERS satellites, *J. Geophys. Res.*, 103, C4, 8113-8127, 1998.
- Sigmundsson, F., H. Vadon, and D. Massonnet, Readjustment of the Krafla spreading segment to crustal rifting measured by Satellite Radar Interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1843-1846, 1997.
- Sigmundsson, F., P. Durand and D. Massonnet, Opening of an eruptive fissure and seaward displacement at Piton de la Fournaise volcano measured by RADARSAT satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, in press.
- Stevens, N.F., J.B. Murray and G. Wadge, The volume and shape of the 1991-93 lava flow field at Mount Etna, Sicily, *Bull. Volcanol.*, 58, 449-454, 1997.
- Stevens, N.F., Lava flow volume and geomorphology from SAR interferometry, PhD thesis, University of Reading, UK, 1988.
- Thatcher, W. and D. Massonnet, Crustal deformation at Long Valley caldera, eastern California, 1992-1996 inferred from satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2519-2522, 1997.
- Tarayre, H., Extraction de Modèles Numériques de Terrain par interférométrie radar satellitaire : algorithme et artéfacts atmosphériques, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 47-63, 1996.
- Wadge, G., J. Achache, A. Ferretti, P.W. Francis, J. Morley, J.P. Muller, C. Prati, F. Rocca, N.F. Stevens, M. Upton and C.A. Williams, Volcano Monitoring Using Interferometric SAR, Proc. 2nd ERS Symposium, Florence 17-21 March 1997, ESASP-414, 469-473, 1997.
- Williams, C.A. and G. Wadge, The effects of topography on magma chamber deformation models: Application to Mt. Etna and radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1549-1552, 1998.
- Zebker, H. A., C. L. Werner, P. A. Rosen and S. Hensley, Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing*, 32, 823-836, 1994.
- Zebker, H. A., P. A. Rosen and S. Hensley, Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *J. Geophys. Res.*, 102, B4, 7547-7563, 1997.
- Wicks, Jr. C., W. Thatcher and D. Dzurisin, Migration of fluids beneath Yellowstone caldera inferred from satellite radar interferometry, *Science*, 282, 458-462, 1988.