

Étude géophysique des environs du cratère de Vulcano, Italie

Autor(en): **Gex, Pierre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **82 (1992-1993)**

Heft 2

PDF erstellt am: **14.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-280173>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



Etude géophysique des environs du cratère de Vulcano, Italie

par

*Pierre GEX*¹

Abstract.-GEX P., 1992. Geophysical survey in the region of the crater of Vulcano, Italy. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 82.2: 157-172.

The island of Vulcano forms part of the Aeolian archipelago north of Sicily. The most recent eruption of its main crater took place in 1890, and although the volcano is dormant for the time being, fumarolic activity is intense. The aim of this paper is to test the application of different geophysical methods to the study of the active zones overlaid by pyroclastics. The self-potential method (SP) gives good results and reveals positive or negative anomalies caused principally by electrofiltration (stream potential). In the case of one profile, SP measurements repeated in consecutive years concord well in certain zones but deviate in others. The deviations are presumably due to changes in sub-surface fluid flows. An example of semi-quantitative interpretation is given for one SP profile. DC resistivity, VLF electromagnetism and ground temperature measurements were also carried out in the region of the main crater.

Résumé.-GEX P., 1992. Etude géophysique des environs du cratère de Vulcano, Italie. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 82.2: 157-172.

L'île de Vulcano, située au nord de la Sicile, fait partie de l'archipel éolien. La dernière éruption de son cratère principal remonte à 1890 et le volcan, actuellement en sommeil, présente une activité fumarolienne intense. Le but de l'article est de tester l'application de quelques méthodes géophysiques à l'étude de zones actives masquées par les dépôts pyroclastiques. La mesure des potentiels électriques spontanés (PS) fournit de bons résultats et révèle diverses anomalies positives ou négatives dues à des phénomènes d'électrofiltration. Un exemple d'interprétation semi-quantitative est donné pour l'un des profils relevés. Des mesures de résistivité électrique, d'électromagnétisme VLF et de température superficielle du sol ont également été exécutées dans la région du cratère principal. Pour l'un des profils, des mesures répétées de PS d'une année à l'autre montrent une bonne concordance dans certaines zones et des variations dans d'autres. Pour ces dernières, on peut en déduire des changements dans le régime des fluides superficiels.

¹Institut de géophysique, Université de Lausanne, BFSH2, 1015 Lausanne.

1. INTRODUCTION

L'île de Vulcano, la plus méridionale des îles éoliennes, se trouve à 25 km de la côte sicilienne. Avec Stromboli, dont les éruptions continues sont attestées depuis l'Antiquité, l'île est la seule à présenter une activité d'une certaine importance. Si le type éruptif de Stromboli ne présente qu'un danger limité, par ses décompressions pratiquement continues, Vulcano est par contre considéré comme potentiellement dangereux par la nature de son magma à haute teneur en silice et à dégazage brutal. Depuis 1890 le volcan est en sommeil avec une activité fumerollienne importante. Un nouveau réveil est donc loin d'être exclu. On imagine quelles pourraient être les conséquences d'une éruption survenant par exemple en été dans une zone où la population estivale est estimée à plusieurs milliers de personnes alors que le nombre de résidents est de 500 environ. Cette éventualité a conduit les autorités à installer quelques stations automatiques de surveillance qui transmettent continuellement par télémesure les valeurs de certains paramètres comme la température et la composition des gaz, ainsi que l'agitation sismique.

Ces conditions particulières, où l'expression «vivre sur un volcan» prend tout son sens, liées à un accès rapide et facile, en font une zone d'étude et un laboratoire naturel fascinants où plusieurs équipes poursuivent depuis de nombreuses années diverses investigations géologiques, géochimiques et géophysiques.

2. BUT DE L'ÉTUDE

Parmi les méthodes géophysiques mises en œuvre sur le site, les mesures de potentiels électriques spontanés effectuées dans le cratère principal et ses environs avaient pour but de tester la méthode et de tenter de mettre en évidence des zones actives masquées par les dépôts pyroclastiques. Sur le terrain on peut observer que certaines zones dépourvues de fumerolles, mais dans la prolongation des zones actives, présentent néanmoins quelques signes d'activité sous-jacente comme une température superficielle plus élevée ou la formation de minéraux d'altération dont la couleur gris clair contraste avec les environs. On pouvait s'attendre par conséquent à des variations physico-chimiques ou à des mouvements internes de fluides décelables par la mesure des potentiels électriques spontanés (PS). Enfin, il a été possible également de vérifier la stabilité dans le temps de certaines anomalies de PS relevées en 1989 et mesurées à nouveau lors d'une seconde campagne au printemps 1991.

Des mesures de résistivité Schlumberger (AB 40 m) ont permis de caractériser certains faciès lithologiques et de confirmer indirectement l'interprétation de certaines anomalies de PS. La méthode électromagnétique VLF a été également mise en œuvre sur certains profils de potentiels spontanés sans donner d'ailleurs les résultats espérés. Enfin des mesures de température superficielles du sol ont apporté quelques données complémentaires. Mentionnons que lors de la première campagne de 1989, des mesures de résistivités magnétotelluriques avaient été entreprises. Malheureusement, une défectuosité du capteur magnétique ayant compromis les résultats, il n'a pas été possible de les exploiter même qualitativement.

3. APERÇU GÉOLOGIQUE

Entièrement volcanique comme les six autres îles de l'archipel, l'île de Vulcano s'étend sur 21 km² et culmine à 500 m d'altitude au Monte Aria. Sa morphologie variée est due à une histoire géologique complexe dont on ne donnera ici qu'un bref résumé. Pour en savoir plus, on consultera KELLER (1980), PICHLER (1981) et FRAZZETTA *et al.* (1983). En outre FARAONE *et al.* (1986) décrivent les résultats d'un forage important implanté au pied sud-est du cratère principal et mené jusqu'à 2050 m de profondeur.

L'activité volcanique de Vulcano a débuté très probablement au Quaternaire, il y a environ 100'000 ans et les différents reliefs actuels sont les restes d'anciennes calderas partiellement effondrées, visibles surtout dans la partie sud de l'île. Les épisodes éruptifs plus récents se marquent par l'édification de plusieurs appareils tels que Faraglione, Fossa 1 et 2, Forgia Vecchia et enfin le petit cône isolé de Vulcanello qui prend naissance en 183 av. J.-C et qui ne sera rattaché à l'île principale qu'au XVI^e siècle seulement. Dès cette époque, une activité volcanique intermittente se concentre à la Fossa 2 (cratère principal actuel) pour laquelle une dizaine d'éruptions sont connues depuis le XV^e siècle. La dernière éruption date de 1888-1890 et sa description par le sismologue et volcanologue G. Mercalli a donné lieu au type «vulcanien», caractérisé par une activité surtout explosive avec projections de cendres et de bombes (notamment celles «en croûte de pain») et généralement de faibles et rares épanchements de lave.

Les types pétrographiques qu'on rencontre sur l'île sont nombreux et variés: les roches acides dominant avec principalement rhyolites, trachytes et trachyandésites. Par contre, Vulcanello, par sa morphologie surbaissée, trahit sa composition essentiellement basaltique (téphrites à leucite). On peut noter encore deux coulées d'obsidienne sur les flancs du cratère principal, dont celle particulièrement spectaculaire du flanc nord. Enfin les dépôts pyroclastiques constituent une part importante des structures, avec notamment les tufs rouges de Fossa 1, bien visibles, et les blocs, lapillis et cendres de Fossa 2 provenant des éruptions de 1888-1890.

La succession dans le temps et l'espace des ces divers appareils éruptifs montrent une orientation N-S qui devrait correspondre à une vaste zone de fractures dans cette direction. Il est possible que cette zone se poursuive au N par l'île de Lipari, séparée de Vulcano par un détroit peu profond, large de 800 m seulement. Au cours des épisodes éruptifs les plus récents, on voit apparaître également une migration vers le sud-ouest des cratères dont certaines structures sont encore bien visibles.

Depuis son dernier paroxysme le volcan est dans une phase fumerollienne assez intense avec d'importantes variations. Les zones les plus actives se trouvent sur le bord nord du cratère principal. Une petite activité est également visible à l'intérieur du flanc sud. Les mesures de la température des fumerolles depuis 1915 à nos jours montrent des fluctuations et, ces dernières années, la tendance semble être à la hausse (BARBERI 1990). On y a relevé en 1990 sur le flanc intérieur nord du cratère principal une température de 620°C soit 70°C de plus qu'en 1989. La partie sud-est de l'isthme qui relie Vulcanello à l'île principale est aussi le siège de manifestations géothermiques avec de nombreuses sources chaudes qui sourdent dans la mer et sur la plage, où l'on peut relever une température de 95°C à quelques centimètres sous le

sable. La composition des gaz fait l'objet depuis longtemps d'études nombreuses et variées. Ici comme sur d'autres sites volcaniques, l'analyse en continu de certains constituants des fumerolles semble fournir la base la plus prometteuse pour la prévention des éruptions.

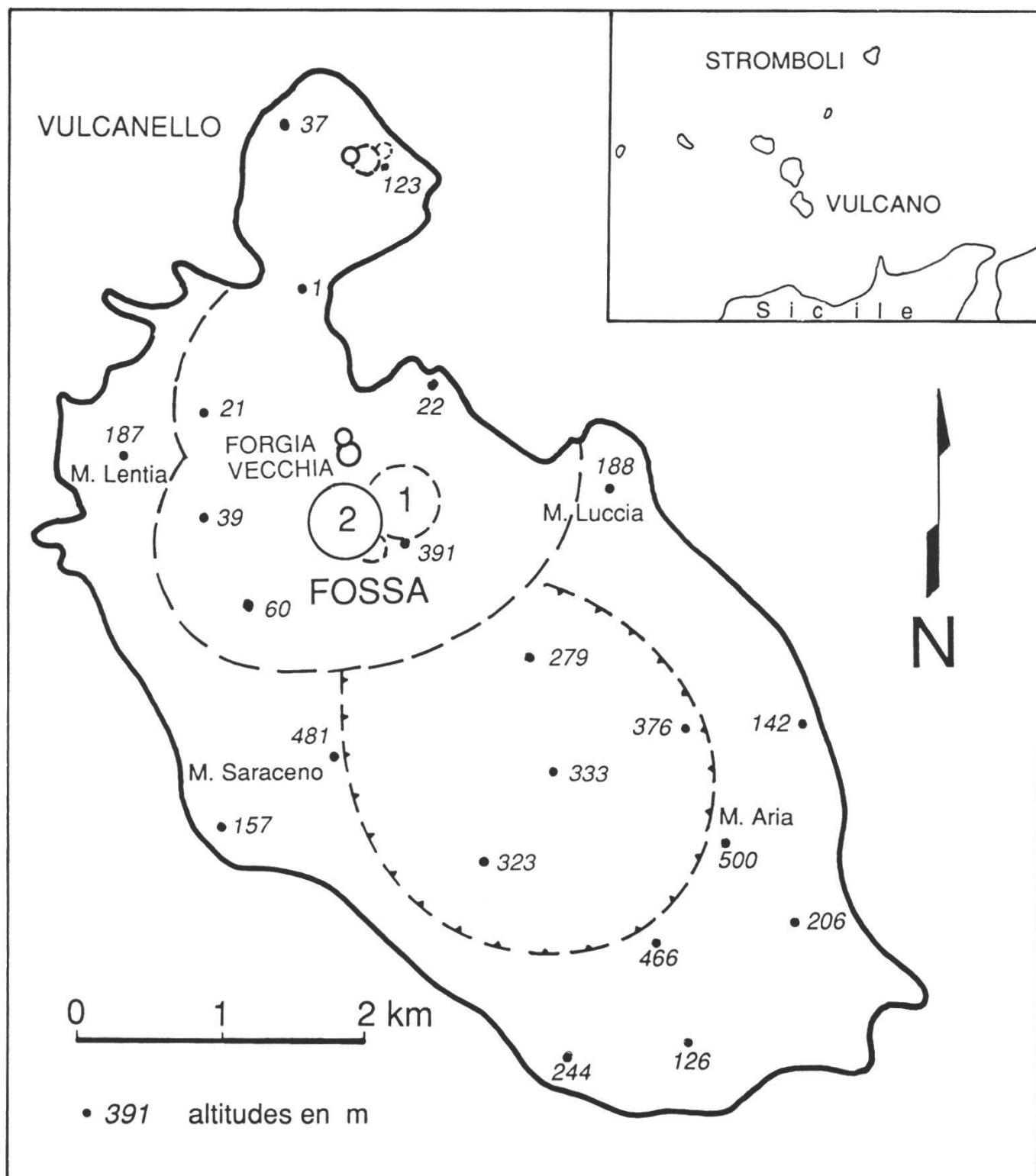


Figure 1.—Situation et carte structurale schématique de l'île de Vulcano.

4. RAPPEL SUR LES POTENTIELS SPONTANÉS

Les potentiels spontanés (PS) peuvent se diviser en trois catégories selon leur mécanisme d'origine: premièrement, les potentiels dus à des minerais métalliques ou graphitiques enfouis et dont la détection est du ressort de la prospection minière. Deuxièmement, les différences de potentiels relevées dans les forages pétroliers entre les différentes formations géologiques lors des diagraphies et enfin troisièmement, les potentiels spontanés causés par les écoulements de fluide, principalement l'eau, dans les terrains poreux et perméables. On les appelle également potentiels d'électrofiltration, en anglais «*stream potentials*». C'est à ces derniers que nous avons affaire dans les zones géothermiques ou volcaniques pour lesquelles il faut mentionner encore les potentiels thermoélectriques qui peuvent prendre naissance entre des régions du sous-sol de températures différentes. Il semble néanmoins que l'ordre de grandeur des anomalies générées par ce dernier phénomène soit très inférieur à celui dû à l'électrofiltration (CORWIN et HOOVER 1979). Les anomalies mesurables dans un contexte volcanique sont de l'ordre de quelques dizaines à plusieurs centaines de mV (MASSENET et PHAN NGOC 1985) et leur signe par rapport à une référence éloignée peut être positif ou négatif. En simplifiant beaucoup on peut dire que les anomalies positives sont en général liées à une montée de fluide, les anomalies négatives à une filtration descendante surtout par gravité. Enfin, la différence de potentiel observable entre deux points d'un corps perméable parcouru par un fluide est proportionnelle à la différence de pression entre ces points et inversement proportionnelle à la conductibilité électrique du fluide. Pour un exposé théorique clair et complet, on se référera à MORGAN *et al.* (1989).

Utilisée d'abord seulement en prospection minière, la méthode PS s'applique avec succès depuis une vingtaine d'années à l'environnement volcanique et géothermique par la mesure des potentiels d'électrofiltration. Elle donne en effet de bons résultats dans la recherche des circulations de fluides, essentiellement dans les zones de fractures. On trouvera dans MASSENET et PHAN NGOC (1985) de bons exemples d'application dans la région sommitale de l'Etna ainsi que les références utiles d'autres travaux dans le même domaine.

Travaux antérieurs

Dans l'archipel éolien, seule la région des cratères actifs de Stromboli a fait l'objet d'une étude par PS (BALLESTRACCI 1982). Concernant le site de Vulcano, aucune étude avec cette méthode n'a été publiée, du moins à notre connaissance. RAPOLLA (1974) a mesuré un «vecteur champ électrique naturel» sur une dizaine de sites de l'île à l'aide de deux courtes lignes telluriques orthogonales d'où est tiré ce vecteur champ résultant. D'après son étude, les gradients les plus élevés se marquent dans les zones géothermiques les plus actives sans d'ailleurs que la direction des vecteurs offre de signification. Il semble que les résultats de ce genre de mesures, exécutées également sur les îles de Lipari et d'Ischia ainsi que dans la région des Champs Phlégréens, ne fournissent en fait que des valeurs très localisées de potentiels spontanés, peu convaincantes vu leur faible densité.

5. RÉSULTATS

5.1 Potentiels spontanés

Près de 700 mesures ont été exécutées avec un espacement de 10 m entre les stations. La figure 2 montre la situation des profils. Chacun d'eux possède sa référence électrique propre, en général à son extrémité ouest. Seuls les levés successifs du profil PS 1 sont rattachés à une référence unique, située au pied ouest du cône principal. D'une manière générale, les anomalies relevées ne sont pas toutes clairement interprétables même qualitativement et certains résultats demandent à être complétés.

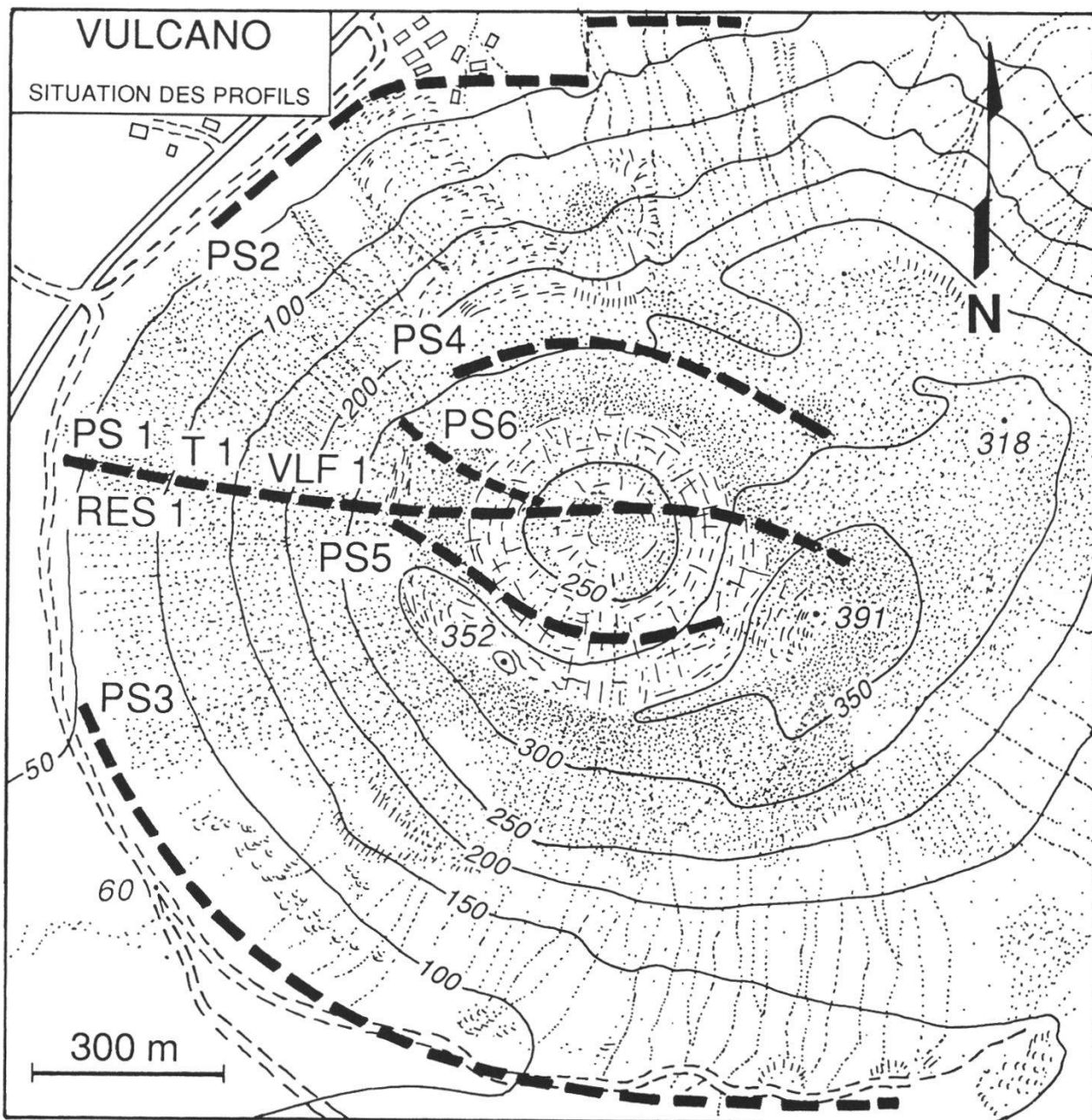


Figure 2.—Carte des environs du cratère principal (Fossa 2) et situation des profils géophysiques.

Le profil PS 1 est le plus intéressant car il présente d'une part des anomalies très nettes et d'autre part il a été exécuté à deux reprises, avec un intervalle de 2 ans entre les levés. Long de 1300 m, il débute au pied ouest du cône principal et passe par le centre du cratère. Les profils de potentiels montrent plusieurs anomalies caractéristiques (fig. 3). Une première remarque s'impose: les deux levés exécutés avec un intervalle de 2 ans sont cohérents, les anomalies se retrouvent sur l'un et sur l'autre avec une amplitude semblable, à l'exception de l'anomalie négative mesurée sur le flanc ouest du cône, fortement marquée en 1989. Il semble raisonnable d'attribuer ces anomalies à l'électrofiltration des eaux de pluie descendant par gravité dans un sol formé d'une épaisse couche de cendres et de lapillis très perméables. Ces cendres recueillent les eaux de pluie qui ruissellent sur les tufs rouges eux-mêmes pratiquement imperméables. Il est vraisemblable que le profil mesuré en mars 1989 corresponde à une période consécutive à des pluies de printemps plus importantes. Mentionnons à ce propos que la pluviométrie hivernale est comprise entre 300 et 500 mm. Cette anomalie de PS négative ne semble donc pas être due à une activité volcanique. Les températures du sol relevées dans cette zone sont d'ailleurs banales (T 1 sur la figure 3). L'électrofiltration se marque encore d'une manière plus générale sur la portion du profil correspondant au flanc ouest du cône, sous forme d'une nette tendance négative en fonction de l'altitude. Ce gradient négatif, phénomène très général dû à l'électrofiltration naturelle de pente, vaut dans notre cas environ $-0,2$ mV/m. En extrapolant cette valeur à l'ensemble du profil, on peut définir plus précisément l'amplitude et la polarité des anomalies par rapport à un nouvel axe du zéro (non représenté sur la figure 3), lui-même fonction de la différence d'altitude entre chaque point de mesure et la base origine du profil.

L'anomalie positive relevée sur le flanc intérieur ouest du cratère correspond à une zone d'anciennes fumerolles. Les émanations gazeuses y sont très faibles et rares mais par place la température du sol, mesurée à 20 cm sous la surface, peut atteindre plus de 50°C . Les potentiels positifs sont probablement générés par une filtration ascendante d'un front de condensats de vapeur sous pression qui pénètre dans les fractures et les interstices des dépôts pyroclastiques. Les potentiels étant notamment inversement proportionnels à la conductibilité du fluide, nous avons recueilli quelques condensats de fumerolles dans cette zone pour obtenir un ordre de grandeur de ce paramètre. Les 4 échantillons mesurés donnent des valeurs de 40 à 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (250 à 8 ohm-m) à 25°C . Ces conductibilités sont donc parfaitement compatibles avec la genèse de potentiels d'électrofiltration et reflètent la teneur prépondérante en vapeur d'eau des fumerolles. Cette zone à potentiels positifs a fait l'objet de vérifications partielles en octobre 1991 et 1992. Les résultats sont représentés au bas de la figure 4. Si l'ordre de grandeur du maximum de l'anomalie, voisin de $+100$ mV, est conservé, sa forme subit des fluctuations dont l'interprétation reste délicate. Il est vraisemblable que des changements d'activité du réseau de fractures, à quelques dizaines de mètres sous la surface, puissent entraîner ces variations. Les observations de surface montrent d'ailleurs d'une année à l'autre d'importants changements dans la géométrie de certaines fissures fumerolliennes. Cette partie du flanc intérieur ouest du cratère devrait donc correspondre à une zone active en profondeur. Deux profils supplémentaires (PS 5 et PS 6) menés dans les environs ont confirmé cette hypothèse comme on le verra plus loin.

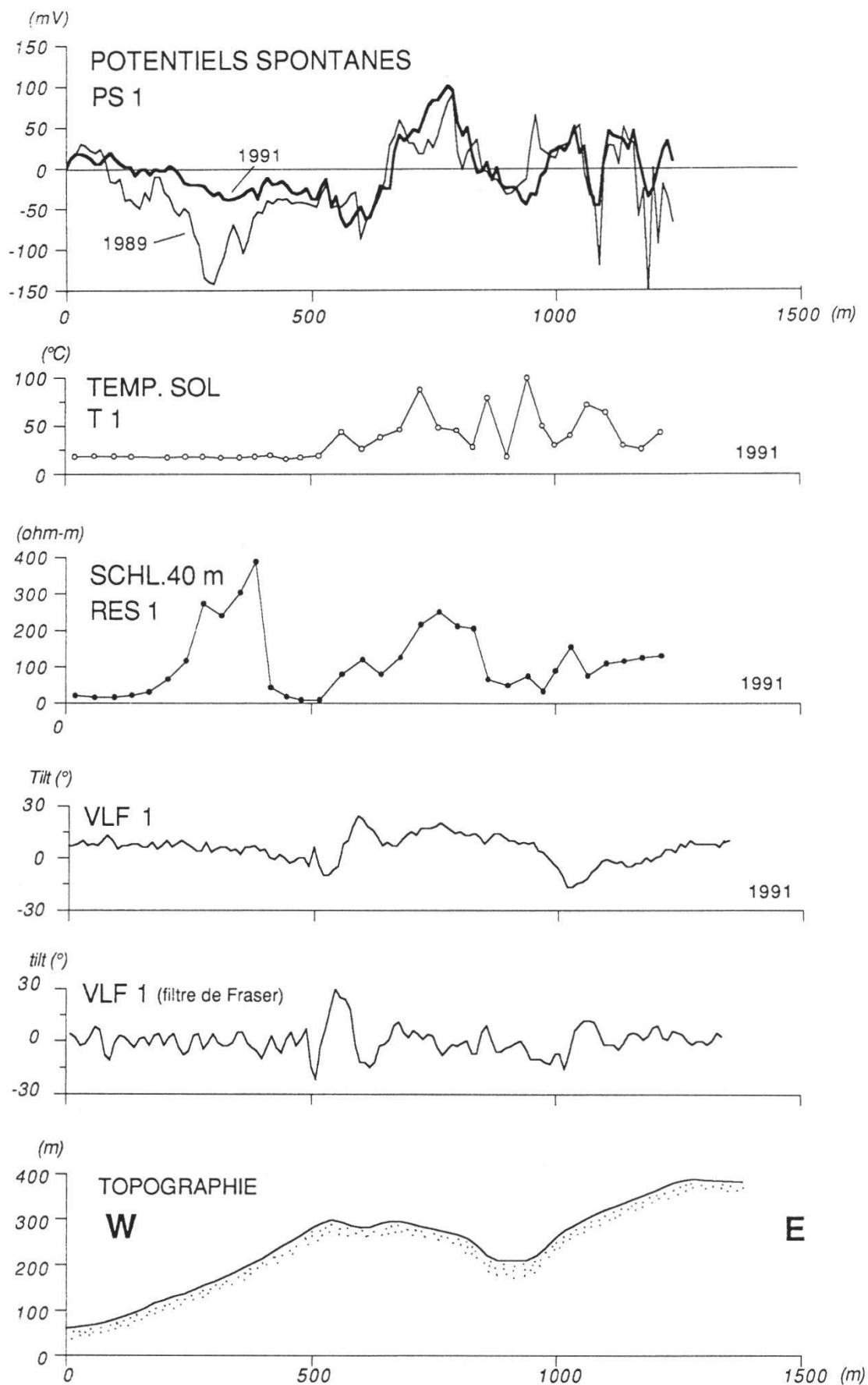


Figure 3.—Comparaison des levés 1989-1991 du profil PS 1 et résultats des mesures de température, résistivité et électromagnétisme VLF exécutées sur le même profil.

Les potentiels relevés sur le fond du cratère sont voisins de zéro. Il s'agit d'une zone froide formée d'une épaisse couche de cendres, d'éboulis et de débris de pente.

Enfin dans la dernière partie du profil, en montant le flanc intérieur est, on voit réapparaître trois anomalies positives, moins étendues que la précédente, dont l'amplitude vaut environ 80 mV. Le sol de cette zone présente également par place des températures de l'ordre de 50°C. On rencontre ensuite deux anomalies négatives étroites, à fort gradient dont l'origine est difficile à éclaircir. Il peut s'agir de zones à alunite, minéral assez courant des anciennes zones fumerolliennes, et qui donne lieu parfois à de fortes anomalies négatives dont on connaît quelques exemples dans la littérature (KRUGER et LACY 1949, PARKER GAY 1967). Selon ces auteurs, les potentiels mesurés seraient dus à une dissymétrie chimique liée à la production d'acide sulfurique provenant de l'altération du minéral.

Le profil PS 2, long d'environ 900 m, présente une large zone faiblement positive puis une tendance négative assez forte vers l'est (fig. 4). La partie positive révèle peut-être une zone active relativement profonde, recouverte par des dépôts pyroclastiques. L'anomalie négative, elle, présente des flancs très raides et est assez énigmatique: il est difficile de lui attribuer une origine par électrofiltration. Sur le terrain cette zone est caractérisée par un sol avec d'anciens dépôts fumerolliens blancs, parfois gypseux, recouverts par la végétation. Il se pourrait que ces dépôts renferment également des concentrations d'alunite, qui peuvent générer de fortes anomalies comme on l'a vu plus haut.

Le profil PS 3 a été levé au pied sud du cône principal, approximativement selon une horizontale sur 1500 m (fig. 4). L'amplitude des signaux est faible et le bruit provenant des hétérogénéités du sol est clairement visible, notamment dans le premier tiers du profil relevé dans une zone d'arbustes clairsemés alors que le profil se poursuit sur un sol de cendres et de lapillis, dépourvu de toute végétation. La tendance générale du potentiel est nette malgré les fluctuations dues au bruit: on y distingue un large positif, qui pourrait là encore correspondre à une zone géothermique relativement profonde. L'anomalie négative de la fin du profil coïncide avec une zone d'infiltration liée à la confluence d'un cours d'eau temporaire.

L'allure du profil PS 4 est complexe avec plusieurs anomalies à fort gradient. Ce profil, levé déjà en 1989, avait fait l'objet d'une vérification immédiate au vu de son aspect chaotique. Le résultat de ce contrôle, non représenté, montre une bonne concordance des anomalies principales. Les quelques écarts de détail s'expliquent par les habituels potentiels parasites de contact propre à chaque point de mesure, ces derniers ne coïncidant pas avec ceux du levé initial. L'interprétation, même qualitative, d'un tel profil n'est pas aisée. La position de l'axe du zéro semble correcte, la base étant implantée dans une zone calme constituée de tufs rouges. Enfin la quasi-horizontalité du profil n'introduit pas de composante parasite due à l'électrofiltration naturelle de pente. Si l'anomalie positive correspond bien à une zone active à petites fumerolles visible, les anomalies à fort gradient restent énigmatiques. S'agit-il encore ici d'hétérogénéités locales du sol dues par exemple à la présence de dépôts d'alunite ? La fin du profil se marque par un plateau positif qui coïncide avec la plus importante zone fumerollienne de Fossa 2. Celle-ci s'étend de manière discontinue du flanc intérieur nord du cratère jusqu'à la

VULCANO

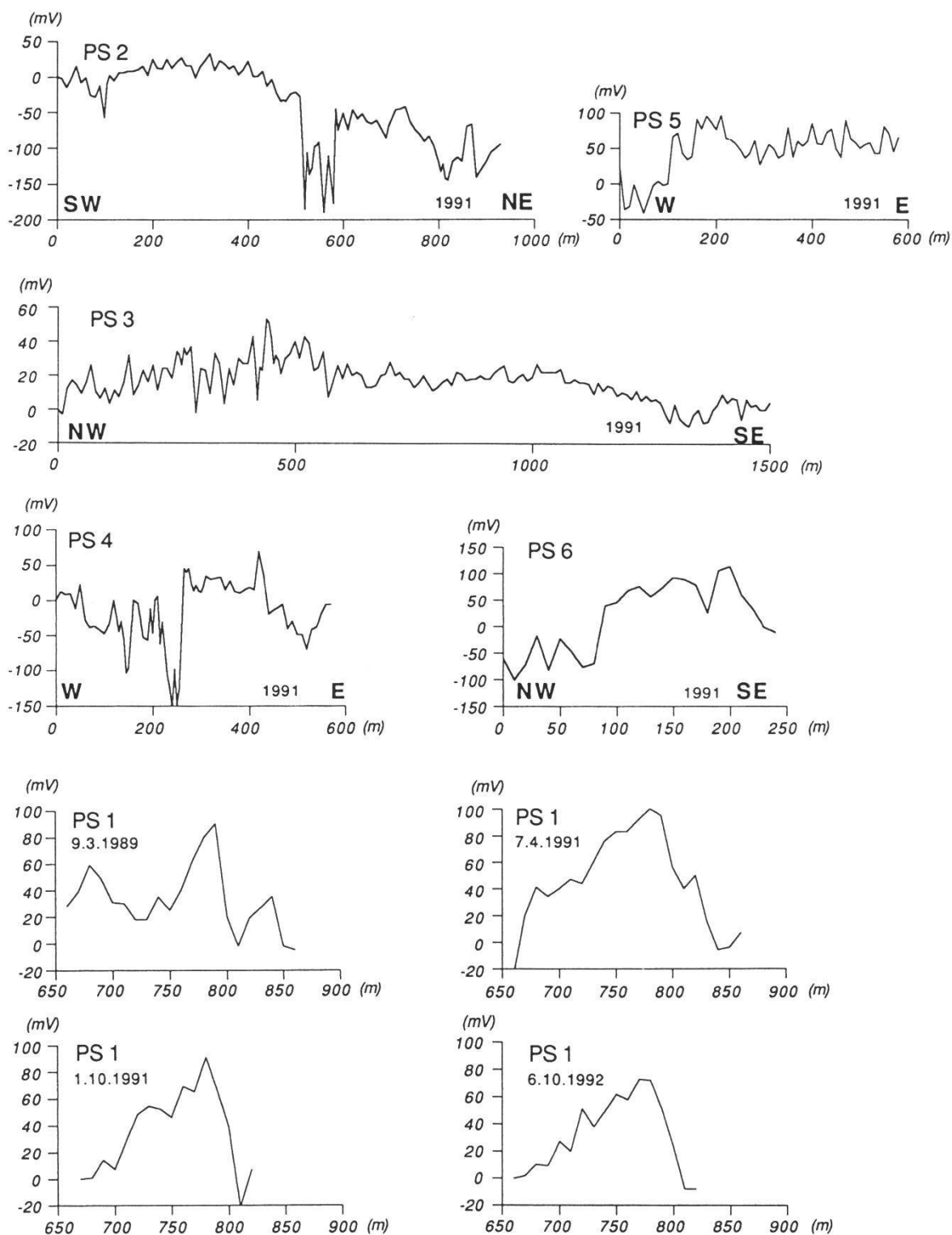
Profils de
potentiel spontané

Figure 4.—Profils de potentiel spontané PS 2 à PS 6. Evolution dans le temps de l'anomalie positive centrale de PS 1; les valeurs d'abscisses sont compatibles avec celles du profil complet du haut de la figure 3.

partie supérieure de Forgia Vecchia et se caractérise par un ensemble de roches très fracturées et intensément transformées par les émanations gazeuses chaudes. Cette importante zone de fracture menace de s'effondrer et, depuis 1991, un dispositif de protection (pare-avalanche) a été installé plus bas, au niveau du sentier d'accès, pour protéger les habitations du pied du volcan.

Sur le flanc intérieur sud du cratère principal, le profil PS 5 a été mesuré sur environ 600 m. Bien que les fluctuations de la courbe soient relativement importantes, on y distingue nettement une anomalie positive dans sa partie ouest (fig. 4). Plus loin, le potentiel ne se rétablit pas au voisinage de zéro mais fluctue aux environs de + 50 mV. L'anomalie de la partie ouest du profil est à mettre en relation avec celle du profil précédent PS 1 qui présente des caractéristiques semblables (étendue, signe, amplitude).

Le court profil complémentaire PS 6 (fig. 4) confirme l'anomalie positive du flanc intérieur ouest. L'anomalie relevée est très semblable à celle de PS 5..

Essai d'interprétation semi-quantitative des anomalies de PS

Pour la plupart des méthodes géophysiques, l'interprétation quantitative des anomalies de PS est indirecte et se fonde sur l'assimilation du corps perturbateur à une forme géométrique simple. Cette simplification s'accompagne encore d'une simulation raisonnable du phénomène mesuré. Si les anomalies positives relevées en terrain volcanique semblent être dues principalement à une électrofiltration «*per ascensum*», le mécanisme exact de leur genèse dans le sous-sol n'est pas clair. De nombreuses questions subsistent comme la présence ou non de deux pôles de signes contraires, la distribution des potentiels ou des charges électriques dans la portion du sous-sol soumise à la percolation des fluides, etc. Diverses approches du problème de l'interprétation ont été proposées, notamment par FITTERMAN (1983) et SILL (1983) et on en trouvera des applications dans AUBERT et LIMA (1986) et THANASSOULAS et LAZOU (1990), ce dernier cas plus particulièrement orienté vers l'étude d'un champ géothermique. Une discussion plus complète des problèmes liés à l'interprétation quantitative sortant du cadre de cet article, nous nous en tiendrons à l'essentiel.

Seul le grand profil est-ouest PS 1 (1989) a fait l'objet d'une tentative d'interprétation semi-quantitative. L'examen du profil (fig. 3) montre que les anomalies positives sont le plus souvent symétriques et simples, parfois plus larges et formées d'une juxtaposition de plusieurs pics plus étroits. En l'absence d'autres profils parallèles suffisamment longs, il est difficile d'apprécier l'extension latérale de ces anomalies: il peut s'agir de zones actives isolées ou au contraire de zones allongées analogues du point de vue géophysique à un filon minéralisé. Par exemple, l'anomalie positive principale du profil PS 1 semble due à une zone active discontinue étirée dans le sens Nord-Sud sur près de 300 m. Le manque d'informations plus précises rendant illusoire une modélisation plus élaborée, les anomalies ont été simulées à l'aide de modèles monopolaires tels que sources ponctuelles ou simples lignes de pôles finies. Seul le profil synthétique obtenu à l'aide de l'approximation de la source ponctuelle a été retenu. Pour une telle source, le potentiel en fonction de la distance x est donné par la relation suivante:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \times \frac{1}{\sqrt{x^2 + h^2}}$$

avec V (volt), potentiel par rapport à l'infini, ρ (ohm-m) résistivité du milieu encaissant, I (A) intensité du courant et h (m) profondeur de la source. Il faut noter que l'étalement de l'anomalie varie rapidement avec la profondeur h de la source. Le paramètre $x_{1/2}$ (distance x à laquelle le potentiel est tombé à la moitié de sa valeur maximale) vaut dans ce cas simplement $\sqrt{3} \cdot h$. La figure 5 montre le profil théorique dû aux sources représentées sur la coupe topographique. Le calcul fournit également le produit ρI qui donne une idée de l'«intensité» du mécanisme des anomalies. Si pour une source ponctuelle l'interprétation de la profondeur est donc simple et univoque, il en va tout autrement pour la simple ligne de pôles finie qui pourrait simuler une zone active allongée. Son expression du potentiel en fonction de la distance x vaut:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \times \ln \left(\frac{x^2 + h^2 + L^2 + L}{x^2 + h^2 + L^2 - L} \right)$$

avec L (m) demi-longueur de la ligne de pôles et I (A/m) intensité du courant par unité de longueur. L'étude de cette fonction montre que pour une longueur $2L$ donnée, $x_{1/2}$ ne change que très peu en fonction de h jusqu'à des valeurs de h comparables à celle de L . Pour une profondeur h fixée, c'est l'effet de la variation de L qui devient prépondérant. Dans le cas de nos profils, le manque d'information sur l'extension latérale des anomalies rend le paramètre L peu utile et l'interprétation avec la ligne de pôles n'a pas été retenue.

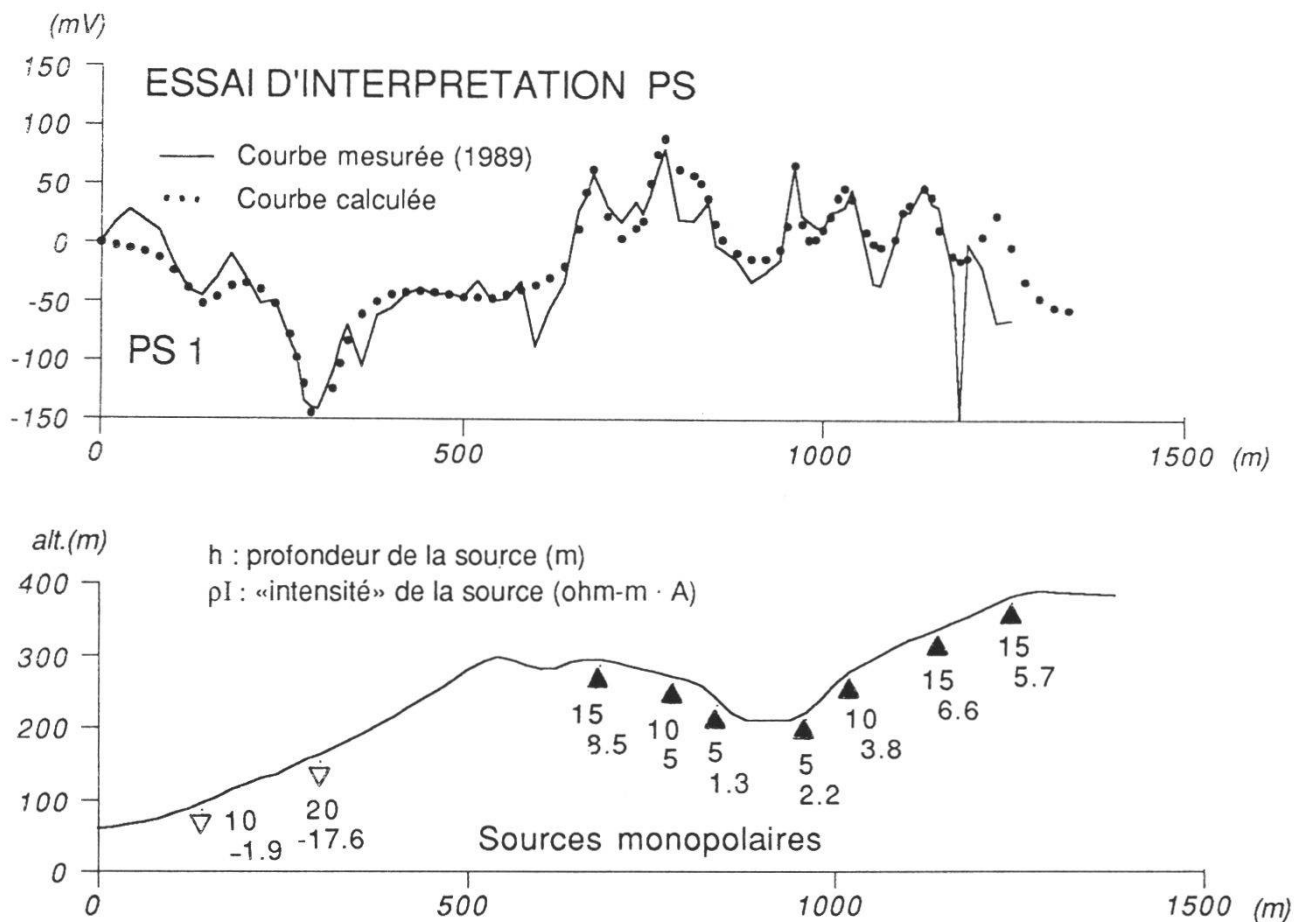


Figure 5.—Interprétation semi-quantitative des anomalies du profil PS 1 (1989) par sources ponctuelles monopolaires (triangles sur la coupe topographique).

5.2 Electromagnétisme VLF

Par sa légèreté et sa simplicité de mise en œuvre, la méthode VLF offre de nombreux avantages en prospection. Fondée sur l'étude des perturbations (inclinaison et déphasage) d'un champ électromagnétique fourni par de puissants émetteurs militaires de radiocommunications, cette technique nécessite simplement un récepteur couvrant la bande de 15 à 25 kHz (Very Low Frequency). Les perturbations du champ primaire sont induites par les contrastes de conductibilité électrique de certaines parties du sous-sol. Cependant, dans le cadre de notre étude, la topographie complexe rend les résultats éventuels obscurs; le vecteur champ primaire, normalement horizontal sur un terrain horizontal homogène, s'incline plus ou moins suivant l'allure du relief et la conductibilité du sol. Une correction est théoriquement possible, selon l'abaque de EBERLE (1981) par exemple, en admettant une conductivité uniforme pour le terrain considéré. L'expérience montre cependant que dans notre cas cette simplification est abusive et qu'une simple soustraction de l'effet théorique du relief ne clarifie pas l'allure du profil. L'application du filtre classique de FRASER (1969) est plus convaincante, comme le montre la figure 3. Avec les conventions de signe de l'inclinaison adoptées dans le levé, les points d'inflexion («cross-over») se marquent par une anomalie positive. Il faut signaler d'ailleurs que l'effet secondaire de ce filtre est de mettre surtout en évidence les anomalies dont la largeur vaut environ cinq fois le pas d'échantillonnage, ce dernier valant 10 m dans notre cas. Les résultats ne montrent que deux anomalies, l'une correspondant au petit vallon de la lèvre ouest du cratère et l'autre au milieu du flanc intérieur est. Seule cette dernière paraît exempte d'un effet local de relief, mais sa faible amplitude ne permet pas de conclusion sûre.

5.3 Résistivité électrique

Des mesures de résistivité au moyen d'un dispositif Schlumberger (traîné AB 40 m) ont été réalisées sur le grand profil est-ouest PS 1, avec un pas de 40 m. Le choix de cette longueur de ligne résulte d'un compromis entre un dispositif maniable par deux opérateurs seulement et une profondeur d'investigation suffisante. L'utilisation de cette méthode, d'une application laborieuse dans une topographie tourmentée, permet de caractériser efficacement les différents faciès lithologiques ou structuraux. Le début du profil (fig. 3), où les dépôts pyroclastiques anciens sont colonisés par la végétation, se marque par une résistivité basse, inférieure à 25 ohm-m. A la cote 100 environ apparaît une formation meuble et instable de cendres et de lapillis provenant de la dernière éruption de 1890. Epaisse d'une dizaine de mètres environ, cette masse de cendres semble s'être également accumulée par glissement sur la forte pente des tufs rouges qui, eux, affleurent dès la cote 220. La porosité élevée de ce terrain, liée à une forte perméabilité, doit permettre une désaturation facile et entraîner une augmentation de sa résistivité. Les valeurs de 250 à 300 ohm-m observables sur cette portion du profil s'expliquent très vraisemblablement par ce phénomène. Rappelons que, d'après la loi d'Archie, une saturation s'abaissant de 100 % à 30 % suffit à décupler la résistivité d'une formation, les autres paramètres étant supposés constants.

L'entrée dans la formation des tufs rouges, très poreuse et imperméable, se marque par une chute spectaculaire de la résistivité entre 10 et 20 ohm-m. A l'affleurement, ces tufs d'une granulométrie très fine se désagrègent facilement sous le marteau. Ils sont souvent légèrement humides, même en surface, et leur saturation paraît complète. Les propriétés physiques d'une formation du même genre (tufs friables de Oak Spring, Nevada) ont été étudiées par KELLER (1960). La porosité de ces tufs vaut en moyenne 35%, et la loi d'Archie déduite de nombreuses mesures sur échantillons saturés est la suivante: $\rho = 1,5 \cdot \rho_w \cdot \phi^{-2,2}$, où ρ est la résistivité de la roche, ρ_w la résistivité de l'eau d'imbibition et ϕ la porosité. En admettant pour nos tufs rouges cette même loi, avec les mêmes porosité (35%) et résistivité ρ_w (1,6 ohm-m) proposées par KELLER (1960), on obtient 24 ohm-m pour la résistivité de la roche, en accord avec nos valeurs mesurées sur le terrain.

Le profil de résistivité se poursuit avec des valeurs voisines de 100 ohm-m explicables par un terrain plus hétérogène de cendres, blocs et petites bombes datant de l'éruption de 1890. Apparaît ensuite une anomalie d'environ 100 m de large caractérisée par des résistivités entre 200 et 250 ohm-m et qui coïncide parfaitement avec l'anomalie positive de PS décrite précédemment et un secteur où la température superficielle du sol s'élève par place à plus de 50°C. Ces conditions devraient entraîner à première vue un abaissement de la résistivité. L'explication semble être plutôt la suivante: les potentiels spontanés positifs indiquent, on l'a vu précédemment, une montée d'un front de condensation entraîné par une surpression de vapeur à travers un ensemble de roches fracturées et perméables. Ces fractures probablement en partie désaturées élèvent la résistivité de la roche. De plus, il est vraisemblable que la chaleur élevée du sous-sol favorise l'évaporation de l'eau des pores de la roche, du moins sur les derniers mètres avant la surface. L'application de la loi d'Archie nous montre qu'il suffit que la roche perde 50% de son eau d'imbibition pour que sa résistivité initiale de 100 ohm-m puisse s'élever à 200 ohm-m et ceci même en prenant en compte la baisse de résistivité due à l'élévation de température de la fraction restante de l'eau d'imbibition.

Le fond du cratère, composé d'une couche épaisse de cendres et de matériaux d'altération, se manifeste par des résistivités faibles de l'ordre de 50 ohm-m. La fin du profil, en montant le flanc intérieur est du cône, se marque par des valeurs voisines de 100 ohm-m, semblables à celles relevées sur les terrains hétérogènes à blocs et lapilis de la crête et de la petite combe ouest du cratère.

6. CONCLUSIONS

Dans le cadre de cette étude préliminaire, il apparaît que la méthode PS est bien adaptée au site de Vulcano, tant par les résultats qu'elle fournit que par sa facilité de progression dans une topographie difficile. Les anomalies positives sont souvent bien individualisées et peuvent sans ambiguïté être interprétées comme l'effet de circulations montantes de fluides dans le sous-sol, même sous une certaine épaisseur de dépôts pyroclastiques. Parmi les anomalies négatives, certaines s'expliquent par des phénomènes classiques d'électro-filtration par gravité dans des formations très poreuses et perméables comme par exemple les cendres volcaniques de la base du cône au début du grand profil PS 1. D'autres potentiels négatifs dus à une filtration descendante

paraissent dans certains cas prendre naissance de part et d'autre d'une zone positive où la condensation finale de vapeurs ascendantes finit par créer également une circulation vers le bas d'eau froide reprise par gravité en bordure des zones chaudes. Nos profils mesurés sur Vulcano ne montrent pourtant rien de semblable. D'autres anomalies négatives enfin, comme celle du profil PS 2 de la base nord du cône, restent énigmatiques. On pourrait invoquer l'effet d'une concentration d'alunite, minéral sensé créer des zones à forts potentiels négatifs. Le rôle exact de ce sulfate reste obscur, d'autant plus que CORWIN et HOOVER (1979) signalent des cas de concentrations d'alunite qui ne génèrent aucune anomalie électrique. Bien que ce minéral soit présent sur le site de Vulcano et ait été autrefois l'objet d'une exploitation économique, une dizaine d'échantillons pris à 20 cm de profondeur, sur le flanc intérieur ouest du cratère, dans la croûte d'altération fumerollienne, analysés par diffraction de RX, n'ont pas révélé la présence d'alunite. Même si ces anomalies négatives ne paraissent pas présenter d'intérêt au sens volcanologique, le problème mérite une étude spécifique tant géophysique que minéralogique, et le profil PS 2 à la base nord du cône présente les caractéristiques favorables pour ce genre d'investigations.

Une cartographie plus détaillée par PS des environs du cratère principal de Fossa 2 permettrait sans doute de donner une image plus complète des zones «subactives» voisines de celles à fumerolles visibles. L'anomalie positive à grande longueur d'onde relevée au pied sud du cône (profil PS 3) mériterait une vérification et des compléments sous forme de profils parallèles. Enfin, l'enregistrement continu des potentiels spontanés positifs, caractéristiques de certains secteurs, dont celui du flanc intérieur ouest, permettrait d'observer d'éventuelles variations sur de longues périodes. Pour l'acquisition et le stockage automatiques des données à intervalles réguliers, quelques «loggers» miniatures autonomes pourraient être installés sur le site pour 6 mois ou plus. Le problème technique majeur auquel on doit s'attendre est l'instabilité dans le temps des électrodes enfouies dans un sol chimiquement très agressif.

La méthode VLF ne semble guère adaptée au site: d'une part la topographie trop variée perturbe constamment l'horizontalité du champ primaire et d'autre part les zones actives masquées se marquent généralement par une résistivité plus élevée que celle des terrains environnants. Seuls des conducteurs bien marqués pourraient se détecter par cette méthode comme le montrent les résultats obtenus par ZABLOCKI (1978) sur des fissures magmatiques et des tunnels de lave. Le traîné électrique Schlumberger donne par contre de bons résultats grâce à des contrastes de résistivités suffisants pour cette méthode, de l'ordre de 1 à 5. Pourtant, la nécessité de disposer de 4 personnes pour assurer un rendement normal des mesures est un inconvénient majeur pour une application systématique lors d'une étude importante.

REMERCIEMENTS

La campagne de mesures de 1989 n'aurait pu être menée à bien sans la collaboration amicale de Chr. Talon. En plus, c'est à son enthousiasme et à sa connaissance des phénomènes volcaniques que je dois mon intérêt pour le site de Vulcano et l'idée de cette étude. Je remercie également S. Gex pour son aide infatigable lors des nombreuses mesures exécutées durant la deuxième campagne de 1991. Enfin, je suis reconnaissant à mon collègue Ph. Thélin qui a bien voulu examiner les diagrammes RX de mes échantillons, ainsi qu'à L. Dufresne qui s'est chargée de leur préparation.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT M. et LIMA E., 1986. Hydrothermal activity detected by self-potential measurements at the N-S volcanic axis between the volcanoes "Nevado de Colima" and "Volcan de Fuego de Colima" Mexico. *Geofis. int.* 25: 575-586.
- BALLESTRACCI R., 1982. Self-potential survey near the crater of Stromboli volcano, Italy. Inference for internal structure and eruption mechanism. *Bull. volcanol.* 45: 349-365.
- BARBERI F., 1990. Volcanology and Chemistry of the Earth Interior. Italian research activity (1987-1990) report to IAVCEI. *Boll. Geofis. teor. appl. suppl.v. 23, n°127-128*: 413-488.
- CORWIN R.F. et HOOVER D.B., 1979. The self-potential method in geothermal exploration. *Geophysics* 44: 226-245.
- EBERLE D., 1981. A method of reducing terrain relief effects from VLF-EM data. *Geoexploration* 19: 103-114.
- FARAONE D., SILVANO A., VERDIANI G., 1986. The monzogabbroic intrusion in the Island of Vulcano, Aeolian Archipelago, Italy. *Bull. Volcanol.* 48: 299-307.
- FITTERMAN D.V., 1983. Modeling of self-potential anomalies near vertical dikes. *Geophysics* 48: 171-180.
- FRASER D.C., 1969. Contouring of VLF-EM data. *Geophysics* 34: 958-967.
- FRAZZETA G., LA VOLPE L., SHERIDAN M.F., 1983. Evolution of the Fossa cone, Vulcano. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 17: 329-360.
- KELLER G.V., 1960. Physical properties of tuffs of the Oak Spring Formation, Nevada. *Geophys. Surv. Res 1960. Short Pap. in Geol. Sci. US geol. Surv. Prof. Pap. B-400*: 396-400.
- KELLER J., 1980. The Aeolian Islands. An active volcanic arc in the Mediterranean Sea. *Rend. Soc. ital. Mineral. Petrol.* 36: 369-414.
- KRUGER F.C. et LACY W.C., 1949. Geological explanation of geophysical anomalies near Cerro de Pasco, Peru. *Econ. Geol.* 44: 485-491.
- MASSENET F. et VAN NGOC PH., 1985. Mapping and surveillance of active fissures zones on a volcano by the self-potential method, Etna, Sicily. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 24: 315-338.
- MORGAN F.D., WILLIAMS E.R., MADDEN T.R., 1989. Streaming potential properties of Westerly Granite with applications. *J. geophys. Res.* 94, B9: 12449-12461.
- PARKER GAY S. Jr., 1967. A 1800 millivolt self-potential anomaly near Hualgayoc, Peru. *Geophys. Prospect.* 15: 236-245.
- PICHLER H., 1981. Italienisches Vulkan-Gebiet III. Sammlung Geologischer Führer 69, p.130-138. Gebr. Bornträger. Berlin, Stuttgart.
- RAPOLLA A., 1974. Natural electric field survey in three southern Italy geothermal areas. *Geothermics* 3.3: 118-121.
- SILL W.R., 1983. Self-potential modeling from primary flow. *Geophysics* 48: 76-86.
- THANASSOULAS C. et LAZOU A., 1990. Application of the SP technique over Lagadas low enthalpy geothermal field, Greece. *Geothermics* 19.3: 295-307.
- ZABLOCKY CH.J., 1978. Application of the VLF induction method for studying some volcanic processes of Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Volcanol. Res.* 3: 155-195.

Manuscrit reçu le 20 octobre 1992