



HAL
open science

Les risques volcaniques au XXI^e siècle : surveiller et prévoir ; l'exemple de l'OVSG

D.E. Jessop, R. Moretti, S. Moune, Magali Bonifacie, A. Burtin, J.-B. De Chabalier, S. Deroussi, J.-C. Komorowski, M. Rosas-Carbajal, A. Bosson, et al.

► To cite this version:

D.E. Jessop, R. Moretti, S. Moune, Magali Bonifacie, A. Burtin, et al.. Les risques volcaniques au XXI^e siècle : surveiller et prévoir ; l'exemple de l'OVSG. *Géologues*, 2019. hal-02395880

HAL Id: hal-02395880

<https://hal.science/hal-02395880>

Submitted on 13 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les risques volcaniques au XXIème siècle : surveiller et prévoir ; l'exemple de l'OVSG¹

D. E. Jessop², R. Moretti³ (dir. OVSG), S. Moune (dir. adj. OVSG), M. Bonifacie, A. Burtin, J.-B. de Chabalière, S. Deroussi (dir. tech. OVSG), J.-C. Komorowski (dir. OVS-IPGP), M. Rosas-Carbajal, A. Bosson, T. Didier, T. Kitou, A. Lemarchand (dir. tech. OVS-IPG), V. Robert

Encart 1 : La Soufrière de Guadeloupe

La Soufrière de Guadeloupe est un volcan en activité qui a connu, par le passé, de nombreuses éruptions magmatiques et non magmatiques. Le dôme actuel de La Soufrière a été formé en 1530 lors de la dernière éruption magmatique majeure qui a provoqué (i) un glissement de terrain qui a atteint la mer au niveau de l'emplacement actuel de Basse-Terre, (ii) une panache éruptif haute de 14-17 km qui s'est effondrée et a entraîné de retombées de cendres et ponces sur le sud de la Basse-Terre et (iii) des coulées pyroclastiques atteignant des distances de 5 à 7 km. Son activité historique depuis 1635 se caractérise par des éruptions non magmatiques mineures (1690, 1812, 1956) et majeures (1797-1798, 1836-1837, 1976-1977). La dernière éruption phréatique a été particulièrement violente avec 26 explosions majeures entre juillet 1976 et mars 1977. Elle a produit des émissions de gaz acides, des projections de blocs et de cendres dirigées verticalement et latéralement, de coulées pyroclastiques froides de faible volume, des coulées de boue et environ 16 000 tremblements de terre (150 ressentis, incluant celui du 16/08/1976). L'intensité de cette crise, le manque de réseaux de surveillance multi-paramètres et l'incertitude scientifique quant à son évolution ont obligé les autorités à évacuer 73 000 personnes pendant six mois. Après cette crise, la sismicité, le dégazage et les flux thermiques ont progressivement diminué pour atteindre, en 1990, leur plus bas niveau depuis le début de la surveillance sismique en 1950. À partir de 1992, l'activité de La Soufrière a augmenté pour atteindre progressivement son niveau d'énergie sismique le plus élevé le 27 avril 2018, avec le plus fort séisme volcano-tectonique (VT) ressenti ($M_L 4.1$) depuis l'éruption phréatique de 1976.

Encart 2 : Le rôle de l'OVSG-IPGP

L'Observatoire Volcanologique et Sismologique de la Guadeloupe (OVSG) a trois missions essentielles :

1- L'OVSG fait partie de l'Institut de Physique de Globe de Paris (IPGP) et de l'Université de Paris. Faisant partie intégrante d'un grand institut de recherche, l'un des rôles premiers de l'OVSG est la **recherche**, et en particulier dans le domaine des **Sciences de la Terre**.

2- L'OVSG doit effectuer des **observations volcanologiques et sismologiques** afin de surveiller le volcan La Soufrière de Guadeloupe. Pour cela, l'observatoire doit (i) gérer des réseaux permanents qui transmettent des données scientifiques en temps réel entre le volcan et l'observatoire, (ii) effectuer des mesures ponctuelles et (iii) coordonner ou assister des missions scientifiques. Tout ceci a pour but d'**établir un niveau de base d'activité** du volcan en période non-éruptive, de mieux comprendre le comportement du volcan, de détecter des changements du comportement de La Soufrière et d'évaluer son potentiel éruptif. L'observatoire doit également, le cas échéant, assurer le suivi et l'analyse de l'évolution d'une éruption.

3- Un rôle de **diffusion des connaissances** sur l'activité volcanique et sismique est également une mission importante de l'OVSG. Ce rôle d'information s'effectue, à plusieurs niveaux, que ce soit (i) par la formation (niveau collège, lycée et surtout universitaire), (ii) par la vulgarisation (participation à la Fête de la Science, aux journées du patrimoine, etc.) et (iii) via les médias (page Facebook, Twitter, Interview TV et Radio).

L'OVSG a aussi et surtout une mission de diffusion des connaissances vers les autorités. En effet, l'OVSG s'informe régulièrement l'autorité préfectorale de l'activité de La Soufrière. L'observatoire se doit de fournir, aux autorités en charge de la gestion de crise, des informations qui permettent d'affiner les scénarios d'activité possibles (voir encart n°3 "niveaux d'alertes"). L'OVSG publie également un bulletin mensuel de l'activité volcanique et sismique de Guadeloupe (www.ipgp.fr).

Encart 3 : Niveaux d'alertes et évolution de l'unrest: les enjeux de la prévision et le défi de la communication

encart3.pdf

1 Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe. www.ipgp.fr

2 Physicien-adjoint à l'OVSG. Courriel : jessop@ipgp.fr

3 moretti@ipgp.fr

4 Magnitude locale, $M_L = 4.1$

La figure ci-dessus représente des scénarios d'évolution de l'intensité des phénomènes d'*unrest* (ligne bleue continue), avec une augmentation progressive jusqu'à éruption, qu'elle soit phréatique ou magmatique. Les segments horizontaux correspondent aux différentes pratiques de gestion du risque liées aux niveaux d'alerte volcanique (définis dans le tableau, en bas de la Figure). Pendant la durée de chaque niveau, des actions sont mises en place en application des instruments de prévention (p.e. Plan Volcan). Ces actions représentent idéalement un niveau constant dans la réponse de la société civile, ainsi que dans l'action des acteurs responsables de la gestion du risque. La figure montre que si on suit la ligne bleue continue, une grande partie de l'évolution phénoménologique et ses fluctuations sont enregistrées en jaune, palier qui normalement représente le niveau d'alerte qui dure le plus longtemps. L'écart (flèche grise bidirectionnelle) entre l'intensité des actions des acteurs du risque et l'amplitude des phénomènes physiques définissant l'état du système est donc bien plus importante dans la phase finale du niveau de vigilance jaune qu'à son début. Une communication factuelle et rigoureuse doit accompagner toute observation d'anomalie pour rendre cet écart le moindre impactant et favoriser les échanges entre les acteurs responsables de la gestion du risque volcanique et les scientifiques, surtout en prévision du passage en niveau de vigilance orange. Les mêmes enjeux, à une échelle plus faible, peuvent être retrouvés au passage vert-jaune (début de la phase d'*unrest*).

Les deux lignes bleues en pointillées représentent un scénario d'incertitude liée à la progression de l'*unrest*, qui par définition commence dès le niveau de vigilance jaune. L'amplitude de l'incertitude est telle qu'on pourrait, en considérant le scénario décrit par la ligne bleue, soit sous-estimer l'évolution physique du système (avec la possibilité d'une éruption plus tôt que prévu), soit revenir en niveau de vigilance jaune sans éruption, mais toujours caractérisé par un *unrest* avec des variations de quelques paramètres observés par les techniques de surveillance. On voit aussi que l'incertitude majeure est liée aux épisodes d'*unrest* sans éruption. Bien qu'il soit rarement possible de déterminer avec précision l'origine de l'*unrest* sans éruption, des systèmes tels que les arbres bayésiens à événements (*Bayesian Event Trees*, BET) peuvent intégrer l'incertitude inhérente à l'évaluation de la cause de l'*unrest* dans les prévisions. Il sera donc possible, avec une approche probabiliste de traiter les parties épistémiques et aléatoires de l'incertitude.

Introduction : La Soufrière comme archétype d'un volcan andésitique en *unrest*⁵

L'*unrest* volcanique est une déviation du niveau d'activité d'un volcan par rapport à son comportement de base, ce qui est préoccupant à court terme (quelques heures à quelques mois), car il pourrait être le prélude d'une éruption. L'*unrest* volcanique est un phénomène complexe comportant plusieurs aléas. Le fait que l'*unrest* puisse conduire à une éruption imminente contribue à générer une incertitude importante pour l'évaluation, à court terme, des dangers de l'activité volcanique. Bien qu'il soit raisonnable de supposer que toutes les éruptions sont associées à une activité précurseuse, **la connaissance des liens de causalité** entre les processus souterrains, les signaux d'*unrest* qui en résultent et l'éruption imminente est aujourd'hui **encore insuffisante**. Cela résulte principalement des incertitudes liées à l'identification des processus causatifs de l'*unrest* et, par conséquent, de la prévision de leur évolution à court terme. Cependant, la clé pour une atténuation et une gestion efficace des risques lors de l'*unrest* est l'identification précoce et fiable des changements dans la dynamique souterraine d'un volcan et de leur évaluation en tant que précurseurs d'une éruption imminente.

Que l'*unrest* aboutisse ou non à une éruption dépend de nombreux paramètres dont notamment la remontée du magma en profondeur jusqu'à la surface. Pour les scientifiques, le dilemme réside dans le fait que les signaux enregistrés à la surface de la Terre, pendant une période d'*unrest*, ne peuvent pas être uniquement attribués au mouvement du magma. La déformation du sol, indicateur commun d'*unrest*, peut être provoquée par la pressurisation à l'arrivée de nouvelle matière dans une chambre ou un conduit magmatique peu profond. Cependant, cela peut aussi être dû à la redistribution et aux changements de phase des fluides aqueux ou à une augmentation des flux thermiques et des flux de produits volatils émis en surface. Cette redistribution peut ainsi être induite par un processus magmatique, mais des changements de contraintes tectoniques peuvent également déclencher un tel comportement. Des incertitudes substantielles sont associées à la cause de l'*unrest* : une éruption aura-t-elle lieu à court terme? Si oui, quelle sera sa nature?

La rupture de la chambre magmatique peut entraîner une éruption magmatique formant des coulées de lave ou des coulées pyroclastiques ainsi que des retombées de cendres qui peuvent impacter des zones jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres autour du volcan. L'*unrest* de nature hydrothermal peut culminer

⁵ *Unrest* volcanique: déviation du comportement normal d'un système volcanique. Ceci est souvent caractérisé par une plus forte fréquence et magnitude de séismes volcaniques ainsi que de fortes variations dans d'autres observables telles que la température, la composition chimique des fluides volcaniques, la déformation de surface, etc.

avec une éruption phréatique⁶ et les zones ainsi touchées seront plutôt proches du volcan. En conséquence, certains processus souterrains durant l'*unrest* sont une source de préoccupation majeure, alors que d'autres le sont moins voire pas. Toutefois, le dilemme réside dans le fait de savoir comment distinguer les signaux indiquant une réactivation éruptive majeure de ceux associés à une légère déviation par rapport aux niveaux de base.

Ce dilemme est bien synthétisé par la Soufrière de Guadeloupe (Fig. 1), archétype d'un volcan d'arc typiquement–explosif, de composition andésitique. La Soufrière est un volcan à conduit fermé qui a développé un système hydrothermal important, ce qui entrave une interprétation directe de l'évolution du magma à partir de signaux physiques, et surtout chimiques, mesurés à la surface. Ces signaux peuvent en effet être parfois amplifiés, parfois atténués, mais ils sont toujours modulés par rapport au signal originel venant du magma. Il s'agit donc de la situation -la plus difficile pour la surveillance et l'évaluation de l'état d'un volcan. **Les progrès des techniques d'interprétation des signaux provenant de systèmes magmatiques-hydrothermaux représentent des avancées fondamentales dans notre compréhension de l'unrest et du fonctionnement du système volcanique.**

Figure 1. (en haut) La Soufrière de Guadeloupe: le dôme volcanique vu depuis l'OVSG. Les émissions des fumerolles principales sont clairement visibles au-dessus du sommet; (en bas) vue aérienne des principaux centres d'émission fumerollienne au sommet. Source : OVSG, avec l'aimable coopération du Parc National de la Guadeloupe.

Activités de surveillance et recherche à l'OVSG

L'étude de l'*unrest* est, dans un premier lieu, le suivi des phénomènes qui peuvent aboutir à une activité éruptive. La définition des seuils d'alerte ou des passages principaux qui marquent un changement de régime nécessitent donc d'avoir acquis en amont **des lignes de base solides et fiables** pour les paramètres acquis, et s'appuie sur l'ensemble des données issues de différentes disciplines. Cette démarche est favorisée par une plateforme intégrée de visualisation et de traitement des observations. La surveillance et l'interprétation/modélisation des données sont intimement liées. Si ce lien est favorisé pour des disciplines consolidées telles que la sismologie (grâce à la description phénoménologique claire des signaux basée sur la théorie de la propagation élastique) pour d'autres, comme la géochimie des fluides, le manque d'une description phénoménologique complète des variables et processus intermédiaires, de la source à la surface, pose des défis très importants qui se traduisent en recherche novatrice (p.e. simulation numérique du transport du fluide et de la chaleur dans un milieu poreux, voir section "Nouveaux paradigmes..." ci-dessous).

Nous focaliserons d'abord ci-dessous sur les différentes disciplines sur lesquelles se fonde la pratique scientifique et technologique de l'observatoire, une pratique caractérisée par 1) la mise en place, gestion et le développement des réseaux (alimentation, acquisition, transmission), 2) l'activité des laboratoires d'analyse chimique, 3) l'exécution périodique des campagnes de mesures discrètes ou ponctuelles récurrentes sur le terrain. Tout cela, sans oublier le rôle crucial de l'informatique, nœud majeur de la vie d'un observatoire.

Sismologie

Le réseau sismique de la Guadeloupe fait partie d'un réseau régional qui s'étend des Îles-du-Nord (St. Martin et St. Barthélemy) jusqu'à Trinidad, dans lequel un réseau "volcanique" est intégré. L'OVSG en partenariat avec l'OVSM (Martinique) et le « Seismic Research Center » (Trinidad) opèrent une surveillance continue de l'activité sismique le long de l'arc des petites Antilles. D'un point de vue sismologique, le réseau OVSG est constitué de capteurs vélocimétriques (sismomètres courte-période et large-bande) et d'accéléromètres, avec une transmission des données en temps réel, ce qui rend possible **de détecter, localiser et caractériser les séismes dès leur occurrence** et de communiquer aux autorités et aux populations des rapports concernant l'activité sismique ressentie sans aucun délai.

⁶ Explosion volcanique violente de vapeur d'eau en absence de magma qui peut également former un panache volcanique et/ou des écoulements pyroclastiques. Cependant, la magnitude et violence de telles éruptions restent faible sur l'échelle des phénomènes volcaniques.

Les séismes d'origine volcanique sont de bons indicateurs de l'état du système hydrothermal (superficiel) et magmatique (profond). La surveillance de l'activité sismo-volcanique est donc essentielle pour détecter des signes d'une dynamique potentiellement éruptive. Un réseau d'instrumentation sismologique est donc installé autour du dôme et sa proche périphérie pour obtenir une plus forte densité de capteur, et ainsi accroître la résolution des observations.

La majorité des événements sismiques à La Soufrière de Guadeloupe sont des séismes de type Hybride (de faible magnitude, $M < 0.9$), avec un contenu haute fréquence (15-35 Hz) en début des formes d'ondes, puis un contenu plus basse fréquence (2-10 Hz) dans la coda du signal. Ces caractéristiques spectrales se répètent depuis des années, ce qui implique une continuité des sources sismiques et des processus qui les engendrent. Les événements de type Hybride sont produits par des phénomènes de fracturations et de résonances de l'encaissant liées à la propagation de fluides. Etant donné la distribution superficielle des hypocentres (majoritairement à des profondeurs entre -0.8 km et 0.8 km), cette activité sismique témoigne de la vivacité du système hydrothermal du volcan.

En 2018, en plus de cette activité dite « normale », 3 essais se détachent et dénotent une variation dans l'activité volcanique. Le premier est observé le 1er février, le second fut enregistré entre le 16 et le 18 avril et, enfin, le troisième essaim débute le 28 avril 2018 avec un séisme de $M > 4$ et a été ressenti à l'échelle de la Guadeloupe. C'est l'événement le plus fort enregistré depuis le 16 août 1976 et contribue à 99% de l'énergie totale libérée au cours de l'année. Localisé à environ 2 km au NO du dôme et à 2 km de profondeur, il se compose d'un mécanisme au foyer de type normal et semble se situer sur un système de failles régionales. Quant à l'origine de ce séisme, de l'essaim (~200 séismes répliques) qui s'en suit, ainsi que des deux essais précédents, l'hypothèse la plus plausible est la mise sous contrainte de ce plan de failles par des changements de pression et température importants dûs à la migration de fluides magmatiques depuis une source plus profonde.

Géodésie

Les mouvements de magma au sein d'un volcan actif ainsi que les mouvements de fluides et surpressions associées provoquent des déformations en surface. L'OVSG a mis en place deux réseaux de surveillance des déformations au cours des dernières décennies : un réseau de mesure de mouvements de failles par extensométrie/fissurométrie (mesures du mouvement radial en 3D d'un côté d'une faille par rapport à l'autre) sur le dôme et un réseau de déformation GNSS (« Global Navigation Satellite System ») couvrant l'ensemble du massif émergé. Ce dernier permet de mettre en évidence des mouvements à différentes échelles :

1. à l'échelle du sud Basse-Terre, distale par rapport au dôme de La Soufrière, pour mettre en évidence d'éventuels mouvements de matière provenant des zones plus profondes du système magmatique ;
2. sur le pourtour du dôme, au niveau du système hydrothermal peu profond (≤ 2 km) ;
3. au niveau des déformations très superficielles du dôme, en complément de l'extensométrie sur les fractures du dôme. La figure 2 montre le champ de déformation reconstruit sur la base de 20 ans de mesure. Une fois les mouvements induits par la tectonique régionale pris en compte, on constate que seule la zone du dôme est affectée par une déformation bien détectable. Celle-ci est liée au gonflement du système hydrothermal où les fluides (gaz + liquides en ébullition) circulent sous-pression.

Figure 2. Vecteurs de déplacement horizontal du sol GNSS (sur 23 ans de mesures) sur le complexe volcanique de La Soufrière. La déformation mesurée est en première approximation radiale au dôme, perturbée par le système de failles et fractures qui le coupent en trois secteurs. En outre, le champ de déformation **montre un décollement du flanc Sud-Ouest**, ce qui représente un enjeu majeur aussi par rapport aux autres forçages de nature géophysique, notamment sismique, et hydro-météorologique. Source : Moretti et al, 2019, *soumis*.

Géochimie et thermicité

Lorsqu'un volume de magma remonte dans la lithosphère, il se retrouve en déséquilibre et subit donc un dégazage constant, libérant de grandes quantités de volatils tels que H₂O, CO₂, SO₂, H₂S et éléments halogènes. Les fluides ainsi produits remontent vers la surface, transportant avec eux des grandes quantités de chaleur. À la surface, ces remontées se manifestent par des anomalies thermiques, des sources chaudes et des fumerolles par lesquelles de la matière et de la chaleur sortent. La composition chimique de ces fluides à la surface apporte donc des informations majeures sur les processus en profondeur, et l'étendue spatiale des températures en surface est un indicateur de l'état de porosité et fracturation dans l'édifice puisque la chaleur s'échappe plus facilement là où elle rencontre moins de résistance.

Les mesures les plus simples sont sûrement la prise de température à un endroit fixe par un simple thermomètre électronique. Lié à un numériseur, une source d'alimentation et un moyen de stockage/transmission des données, ces instruments très simples surveillent en continu la température des fumerolles et du sol à haute fréquence (typiquement 1 Hz) à certains endroits clés, ainsi que la température des sources chaudes (1 mesure/10 minutes). La distribution spatiale de température est quant à elle bien caractérisée par une caméra thermique infrarouge (le capteur de cette caméra n'est sensible qu'aux rayonnements infrarouges : 7.5-14 microns). Le but ultime de la surveillance thermique est de déterminer un bilan thermique pour les trois manifestations de sortie de chaleur du volcan, c'est-à-dire les fumerolles, les anomalies thermiques des sols et les sources chaudes. Tout changement en magnitude d'un ou plusieurs de ces composants, ou du bilan total **est indicateur de changements en profondeur**, soit du système magmatique, soit du système hydrothermal.

L'échantillonnage direct des émissions de gaz volcaniques a traditionnellement exigé que les opérateurs soient à proximité des orifices volcaniques. La technique la plus fiable utilise des ampoules sous vide, remplies à moitié par une solution très alcaline. Avec l'utilisation d'une ligne en verre (ligne "dewar", pour éviter la chute thermique, voir la Figure 3) entre la sortie de la fumerolle et l'entrée de l'ampoule, il est possible d'échantillonner complètement le gaz : les espèces acides et/ou condensables (H₂O, CO₂, H₂S, SO₂, halogènes) sont piégées dans la solution alcaline, alors que les autres espèces (H₂, CO, CH₄, Ar, He, N₂) occupent la partie de l'ampoule initialement sous-vide. Un échantillonnage complémentaire permet la récupération d'un condensat acide (par échange thermique dans un condenseur) du fluide fumerolien d'une part, et le prélèvement d'un gaz "sec" en amont du condenseur. Au retour du terrain, les échantillons prélevés sont analysés à l'OVSF par spectrométrie de masse, titration acidimétrique et chromatographie ionique. Ponctuellement, certains échantillons sont également envoyés à l'IPGP à Paris pour des analyses isotopiques. Même si l'échantillonnage est donc suivi d'une longue phase d'analyse en laboratoire, ces techniques directes permettent non seulement de tracer les variations temporelles, ce qui représente un besoin primaire de surveillance et de recherche, mais aussi de mieux contraindre la source et l'origine du fluide (p.e. mélange de gaz magmatique avec les eaux de pluie). Cette analyse complète est hautement représentative du fluide fumerolien et des conditions physico-chimiques, c'est-à-dire de l'état pression-température-redox, du réservoir hydrothermal (voir figure 3).

L'avènement très récent du système d'analyse de gaz multi-composant (MultiGAS, Figure 3) a constitué une véritable avancée dans le domaine de l'observation des gaz volcaniques, permettant d'abord d'acquérir des rapports chimiques de ces espèces gazeuses avec une résolution sans précédent (~ 1 Hz), à faible coût, ouvrant ainsi la voie à la caractérisation de processus hydrothermaux et volcaniques "rapides", auparavant inaccessibles à la recherche.

En parallèle, le couplage des données issues des prélèvements et analyses de la chimie des gaz avec la chimie des sources chaudes (y compris leur température, potentiel redox, pH) permettra un bilan complet de la remontée des fluides profonds du volcan, ainsi que l'étude de leurs interactions avec la roche.

Figure 3. Les outils de géochimie utilisés en routine à l'OVSF : analyseurs MultiGAS (à gauche en haut et au centre), et ligne d'échantillonnage des gaz émis par les fumerolles par ampoules de Giggenbach (à gauche en bas). Des traverses du panache à plusieurs hauteurs avec un MultiGAS portable permet d'estimer le flux des principales espèces du sommet de La Soufrière (en haut à droite). L'analyse de ces ampoules permet d'obtenir la composition complète des fluides fumeroliens (au centre) ainsi que les conditions de surpression et température du réservoir hydrothermal qui relâche les gaz (en bas à droite, modifié de Villemant et al., 2014). Source : OVSF.

Nouveaux paradigmes en instrumentation et modélisation

Les données acquises par l'observatoire servent pour nos activités de surveillance et nous les analysons afin d'identifier des changements liés au comportement du volcan. Cependant, ces informations sont souvent de type surfacique (par exemple les mesures du GNSS et de l'imagerie thermique) ou des mesures ponctuelles (comme l'échantillonnage géochimique des gaz). Étudiées individuellement, ces données ne permettent pas une compréhension globale du dynamisme du volcan. Néanmoins, **la puissance d'un observatoire est de pouvoir combiner ces diverses données**, et c'est cette combinaison des paramètres et surtout leur variation dans le temps et l'espace qui peut indiquer une évolution vers une activité éruptive (phréatique ou magmatique).

Les signaux géophysiques, obtenus à haute fréquence ($f \gg 1$ Hz) ont permis la détection en temps réel des processus tels que l'ascension du magma à un niveau peu profond, peu de temps avant une éruption. En même temps, les signaux géochimiques n'ont montré ce potentiel que récemment et uniquement sur les volcans à conduit ouvert. En revanche, les observations de gaz à haute fréquence ont toujours été difficiles à obtenir. Un défi est donc d'obtenir des données géochimiques (concentrations et flux de matière via des mesures MultiGAS) et thermiques (température et flux de chaleur) à haute fréquence qui pourront être couplées avec les données géodésiques et sismique pour mieux étudier les variations du système hydrothermal, le but étant de s'affranchir de l'influence hydrothermale afin d'identifier le signal de la source plus profonde, magmatique (Fig. 4). L'intérêt, en termes de surveillance et de recherche, est en effet de tracer la propagation des anomalies liées aux fluides venant de profondeur jusqu'à la surface. Ce sont ces fluides qui produisent le dégazage et l'anomalie thermique observés en surface, et qui sont strictement associés à la déformation du dôme et à la partie de basse fréquence de la sismicité produite par la fracturation des roches par des fluides de haute température et pression.

La Soufrière, minutieusement étudiée depuis de nombreuses années, **est un volcan "laboratoire" pour des techniques novatrices et de nouveaux instruments, dont nous citons trois exemples clés ci-dessous.**

Figure 4. Schéma récapitulatif du volcan La Soufrière, qui met en évidence les processus en cours et le type de données générées et acquises par les stations et réseaux OVSG actuels. Source : modifiée de Hinks et al., 2014.

Suivi sismologique dense du système hydrothermal

Sur les volcans, les suivis géophysiques sont des outils centraux des réseaux permanents de surveillance mais leur densité est limitée pour garantir la continuité et qualité des observations. Les expériences temporaires permettent de contourner cette limitation. Pour étudier le système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe, une nappe à forte densité de capteurs sismologiques a été déployée sur la partie sud du dôme où est présente une zone très fortement conductrice à une profondeur de plusieurs centaines de mètres, de faible densité, et peu sismogène. La figure 5 montre la localisation des 70 sites instrumentés par des géophones 3-composantes pendant une durée de 2 mois.

Ce projet en cours d'analyse aura de multiples impacts pour l'étude de l'activité de la Soufrière. Il permettra une meilleure compréhension de la dynamique superficielle du système hydrothermal (circulation de fluide, activité sismique, déstabilisation de pente), il offrira une imagerie sismologique 4-D (temps et espace) du dôme avec la structure en vitesse jusqu'à des profondeurs de quelques centaines de mètres, et l'étude des variations relatives de vitesse (marqueur d'une dynamique éruptive). Il sera également possible d'imager la circulation de fluide dans le système hydrothermal et quantifier les forçages actifs (internes et externes) au sein du système.

Cette expérience de sismologie dense au sommet du volcan sera une première étape avant la réalisation d'un futur projet où un suivi sera envisagé sur une plus longue période de temps voire en opérationnel et à l'échelle du dôme pour participer à la surveillance d'une éventuelle éruption phréatique.

Figure 5 - Carte du réseau sismologique temporaire de 70 sites (en vert) déployé sur le bombement pour une période de 2 mois. Les stations sismologiques permanentes de l'OVSG (en rouge) complètent l'étendue spatiale de cette expérience. Noter la forte densité de capteurs sur la partie sud du dôme. Source : OVSG.

Distributed Temperature Sensors

De nouveaux systèmes de mesures des températures sur fibre optique ont été développés et commercialisés depuis une dizaine d'années ; parmi les avancées les plus significatives on trouve les DTS ("Distributed

Temperature Sensors”), utilisés chez les pétroliers, et plus récemment dans le génie civil. Cette technique permet de mesurer la température le long d’une fibre optique avec un échantillonnage spatial de 25 cm. Ces “nœuds” de mesure ont des propriétés optiques qui varient avec la température de manière caractéristique : la rétrodiffusion et le temps de retour des impulsions laser de chacun de ces nœuds sont donc interprétés comme la température aux nœuds. De plus, en passant la fibre verticalement dans des forages, cela permet le calcul d’un gradient de température, à partir duquel on détermine le flux thermique. Ces données de flux thermique au sommet (les premières de ce type pour ce volcan) seront croisées avec les autres données mesurées par l’OVSG : sismicité, déformation, et surtout mesures de flux et de composition chimique des gaz dans les fumerolles, pluviométrie, ainsi que les données provenant de mesures de résistivité électrique et de tomographie géophysique... L’interprétation de ces données permettra d’initier une analyse complète du bilan de masse et d’énergie des transferts de fluides sur la Soufrière et fournira des données d’entrée pour la modélisation thermo-hydro-mécanique et chimique de ces transferts. Cette modélisation est fondamentale afin de mieux comprendre la dynamique du système hydrothermal et magmatique et d’anticiper des changements soudains pouvant aboutir à une activité éruptive en surface.

Modélisation multi-paramètres

Afin de mieux comprendre les systèmes volcaniques, et prédire de façon quantitative leur évolution, il faut des modèles numériques. La modélisation permet d’analyser ces phénomènes et de proposer différents scénarios d’activité volcanique. Une modélisation peut s’appuyer sur un jeu de données de surveillance comme conditions initiales aux limites, ou alors les données peuvent contraindre les paramètres sur lesquels le modèle se repose, ou encore contraindre la solution d’une manière quantitative dans le sens d’une modélisation inverse (e.g. localisation de la source d’un séisme). La complexité du milieu volcanique et la grande gamme des phénomènes produits par le volcanisme, chacun d’une nature différente, engendre le fait qu’il n’y a pas une seule approche à la modélisation de tels phénomènes. En effet, il y a souvent autant de type de modèles qu’il y a de jeux de données. Même lorsque le but est fixé, il y a souvent plusieurs modèles possibles dont chacun présente des avantages spécifiques. Par exemple, la méthode d’éléments finis est très bien adaptée aux milieux hétérogènes et discontinus, mais reconnaît des instabilités numériques importantes lorsque l’advection ou la convection sont des facteurs importants ; or la méthode de volumes finis convient mieux aux problèmes de convection, mais ne fonctionne pas quand le domaine est hétérogène.

Le défi de la modélisation, et ce qui fait le sujet de projets de recherche actuellement menés par l’OVSG, est donc **de développer des modèles numériques qui sont capables d’incorporer et de reproduire l’ensemble des données** que nous obtenons sur la Soufrière. Dans un premier temps, les données serviront comme contraintes qualitatives (e.g. reproduire la structure de conductivité et la distribution de températures surfaciques, comme montrées dans la figure 6) avant d’incorporer des contraintes multi-paramétriques quantitatives afin de déterminer les informations sur la source de l’*unrest* volcanique (i.e. la zone d’interaction entre fluides magmatiques et la nappe phréatique, ou encore sur l’état du système magmatique sous le volcan). Une telle modélisation, combinée avec des jeux de données novateurs comme mentionnés ci-dessus est notre stratégie pour dévoiler les processus en profondeur.

Figure 6 - Exemple des contraintes pour la modélisation multi-paramètres du dôme de la Soufrière : (en haut) cartographie de la température à faible profondeur (50 à 70 cm) de ~80 points de mesure au sommet de la Soufrière ; (en bas) image tomographique issue d’une étude de prospection électrique (“ERT”) qui démontre une structure de forte conductivité entre la base du gouffre Tarissan et les résurgences d’eaux chaudes aux sites du Galion (GAL) et Tarade (TAR). Source : OVSG.

Conclusions et perspectives

Nous avons énuméré et détaillé l’ensemble des observations scientifiques qui sont conduites ou sont en cours de développement à l’OVSG pour la surveillance du volcan La Soufrière de Guadeloupe. La Soufrière est l’archétype d’un volcan d’arc explosif de composition andésitique. De par son activité éruptive historique variée et de par le fait que ce volcan est minutieusement étudié depuis de nombreuses années, La Soufrière est devenue un volcan “laboratoire” (i) pour l’étude et le suivi des phénomènes physico-chimiques qui produisent des amples spectres d’éruptions (des phréatiques aux explosives de types ultra-Plinien) et (ii) pour tester et développer des techniques novatrices et de nouveaux instruments.

Vu la présence d’un important système hydrothermal, il est essentiel de combiner plusieurs types d’observables, puisque aucun type de données seul ne permet d’identifier de manière unique l’origine de l’*unrest*. L’*unrest* caractérise l’activité du volcan depuis plus de 25 ans, mais cette dernière a connu une phase de recrudescence en 2018. Un de nos objectifs est de montrer que la cohérence spatiale et temporelle,

ainsi que la fréquence d'acquisition entre les données géochimiques, thermiques et géophysiques permettrait un saut de qualité dans notre compréhension de la dynamique d'un volcan. Ceci est particulièrement fondamental pour réduire les incertitudes qui accompagnent l'acquisition des données et leur élaboration ayant pour but ultime l'identification de la source de l'*unrest* (magmatique ou hydrothermale ?). Les observations de surface ne seront jamais suffisantes pour réduire cette incertitude qui nécessairement impacte notre connaissance ainsi que notre capacité prévisionnelle, puisque des ambiguïtés intrinsèques demeurent dans l'interprétation. Malgré le fait qu'il soit possible de gérer une telle incertitude avec des approches probabilistes, il faut absolument (i) poursuivre dans la mise en place de nouvelles techniques de caractérisation et suivi temporel, (ii) développer davantage les modèles numériques en intégrant les divers observables et (iii) forer ces systèmes volcaniques pour tester les modèles en ayant accès au sous-sol.

Références

1. Hincks, T. K. et al. (2014). "Retrospective analysis of uncertain eruption precursors at La Soufrière volcano, Guadeloupe, 1975–77: volcanic hazard assessment using a Bayesian Belief Network approach". *J. Appl. Volcanol.* 3.1, pp. 1–26. doi: 10.1186/2191-5040-3-3.
2. Moretti, R. et al. (submitted). "The 2018 February-April unrest phase at La Soufrière of Guadeloupe (French West Indies) andesitic volcano: deep magmatic fluid transfer into the hydrothermal system and dome-structure modulation".
3. Villemant, B. et al. (2014). "Evidence for a new shallow magma intrusion at La Soufrière of Guadeloupe (Lesser Antilles): insights from long-term geochemical monitoring of halogen-rich hydrothermal fluids". *J. Volcanol. Geoth. Res.* 285, pp. 247–277. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.08.002.