

Les récentes avancées scientifiques en volcanologie et la multiplication des techniques de surveillance complexifient le travail d'interprétation des observatoires opérationnels, qui doivent maintenant intégrer en temps-réel des centaines de paramètres issus de mesures pluridisciplinaires.

Les observatoires volcanologiques français ont développé et mis en place un outil informatique novateur dans une optique d'aide à la surveillance et à la gestion de crise.

**La Soufrière (1467 m) domine la ville de Basse-Terre et son agglomération.**

*La soufrière (1,467 m) dominating the city and suburbs of Basse-Terre.*

Source : S. Bès de Berc - BRGM

# Surveillance opérationnelle des volcans français : développements récents à la Guadeloupe



**François Beauducel**

GÉOPHYSICIEN  
DIRECTEUR ET RESPONSABLE SCIENTIFIQUE  
DE L'OBSERVATOIRE VOLCANOLOGIQUE ET  
SISMOLOGIQUE DE GUADELOUPE - IPGP  
beauducel@ovsg.univ-ag.fr

*“ Les observatoires permanents assurent le suivi continu des phénomènes en parallèle d'études plus fondamentales sur les systèmes volcaniques et tectoniques. ”*

L'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris) a la charge de la surveillance des trois volcans actifs du territoire français : la Montagne Pelée (Martinique), la Soufrière (Guadeloupe) et le Piton de la Fournaise (Réunion). Des observatoires permanents ont ainsi été implantés respectivement en 1902, 1950 et 1977, et assurent le suivi continu des phénomènes en parallèle d'études plus fondamentales sur les systèmes volcaniques et tectoniques des régions concernées. La première mission de ces observatoires concerne la surveillance opérationnelle des volcans actifs dans le but de comprendre les phénomènes internes, détecter un changement de comportement, l'évaluer en terme de potentiel éruptif et enfin informer les autorités responsables de la protection des personnes et des biens.

Cette surveillance est assurée par le biais d'études pluridisciplinaires basées sur des enregistrements réguliers et "temps-réel" de divers paramètres physico-chimiques, complétés par une observation de la phénoménologie de surface. Pour les observatoires des Antilles, une deuxième mission consiste en le suivi de l'activité sismique régionale afin de contribuer à la zonation du risque et informer les autorités et les médias des caracté-

**Fig. 1 : L'observatoire est implanté sur le site du Houëlmont à Gourbeyre qui surplombe la ville de Basse-Terre (en arrière plan), à 430 m d'altitude.**

*Fig. 1: The observatory stands on the 430-m-high Houëlmont site at Gourbeyre, dominating the city of Basse-Terre (seen in the background).*

© F. Audras / DDE



“  
La Soufrière de Guadeloupe est aujourd’hui le volcan qui présente le risque le plus élevé sur le territoire français.”

ristiques de chaque séisme ressenti. Enfin, une tâche d’information préventive leur incombe. Ces missions justifient la présence locale d’équipes permanentes (une dizaine de personnes sur chaque site : chercheurs, ingénieurs et techniciens) ponctuellement épaulées par des équipes de l’IPGP et de laboratoires universitaires. Les collectivités territoriales de chaque département sont étroitement associées par un soutien matériel et humain parfois conséquent.

### L’observatoire de Guadeloupe

La Soufrière de Guadeloupe est aujourd’hui, sans doute, le volcan qui présente le risque le plus élevé sur le territoire français. Si environ 30 000 habitants vivent sur ses flancs, c’est plus de 70 000 personnes qui pourraient être concernées par une évacuation en cas de crise majeure. Ainsi, depuis la dernière éruption phréatique de 1976-1977, l’observatoire n’a cessé d’évoluer avec pour principal objectif l’amélioration des observations effectuées et de la réactivité en cas de crise. Ceci s’est traduit notamment par un développement instrumental vertigineux (en nombre de paramètres mesurés et diversité des techniques). En outre, la Soufrière se trouve actuellement dans un contexte particulier qui justifie un renforcement des moyens de surveillance : depuis 1992 son activité révèle une certaine recrudescence (lente augmentation du débit fumerollien, sismicité peu énergétique mais soutenue, températures en légère hausse et acidité très marquée depuis 1998) indiquant proba-

blement une nouvelle mise en pression du système hydrothermal [Komorowski *et al.* (2005)].

Les réseaux de surveillance et d’études sont actuellement constitués de près de 200 sites de mesures répartis sur tout l’archipel guadeloupéen et les îles avoisinantes (Dominique, Antigua, Montserrat et Nevis), dont plus de la moitié sur le massif de la Soufrière. On compte une soixantaine de stations totalement automatiques (avec batteries et panneaux solaires, données transmises à l’observatoire par radio ou téléphone), complétées par des sites instrumentés ou mesurés manuellement de façon périodique, et par des observations visuelles au moins mensuelles sur le terrain. Les réseaux se répartissent en une vingtaine de techniques : sismologie (courte-période, large-bande, accélérométrie), déformations du sol (GPS différentiel continu et de répétition, inclinométrie, extensométrie, distancemétrie laser),

“  
Les réseaux de surveillance et d’études sont actuellement constitués de près de 200 sites de mesures répartis sur tout l’archipel guadeloupéen et les îles avoisinantes.”

physico-chimie des gaz fumerolliens (spectromètre de masse) et des sources thermales (chromatographie ionique), mesures de flux de gaz (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, Rn), gravimétrie, magnéto-tellurisme, prospection électrique, bruit acoustique, niveau et températures en forages, géologie (reconstruction de l'histoire éruptive, phénoménologie) et météorologie. Le travail de l'équipe locale (deux chercheurs, un thésard, huit ingénieurs et techniciens et une secrétaire) consiste essentiellement en l'installation et la maintenance d'équipements soumis à des conditions climatiques rudes (humidité, orages, cyclones) et aux traitements dits "de routine" comme le dépouillement sismique et le contrôle du bon fonctionnement des acquisitions de données.

### Nécessité et objectifs d'une surveillance opérationnelle

Si les causes physiques d'une éruption sont connues depuis quelques décennies, il reste extrêmement délicat de caractériser précisément un système volcanique, objet géologique complexe, évolutif et difficilement quantifiable. La modélisation numérique, basée sur un *a priori* physique des phénomènes contraint par des mesures de terrain, est actuellement le seul outil à la disposition des volcanologues pour évaluer les paramètres indispensables au suivi d'une crise volcanique : pression, profondeur, flux magmatique et état de contraintes de l'édifice volcanique. Pour établir un diagnostic rapide et fiable, le traitement "temps-réel" de données pluridisciplinaires est une nécessité absolue. Les personnes chargées de la surveillance doivent disposer d'un accès intégré aux mesures, à leurs incertitudes et aux informations techniques liées à la chaîne d'acquisition complète (du capteur à la valeur physique interprétée) de façon à pouvoir écarter toute ambiguïté sur l'interprétation. Or, indépendamment de la complexité inhérente à la problématique scientifique, la principale difficulté rencontrée est la grande hétérogénéité des réseaux de surveillance, en termes instrumental mais aussi de périodes d'échantillonnage, de formats de données ou de types de représentation des résultats.

Pour tenter de répondre à ces problèmes et de poser les bases d'une surveillance automatique, l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe a développé et mis en place un système original d'intégration temps-réel des données ayant pour principaux objectifs [Beauducel et Anténor-Habazac (2002) ; Beauducel *et al.* (2004)] :

- surveillance : accès instantané à l'ensemble des données, sous forme graphique et numérique, toutes

“L'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe a développé et mis en place un système original d'intégration temps-réel des données.”

disciplines confondues, dans une optique d'aide à la surveillance et à la gestion de crise ;

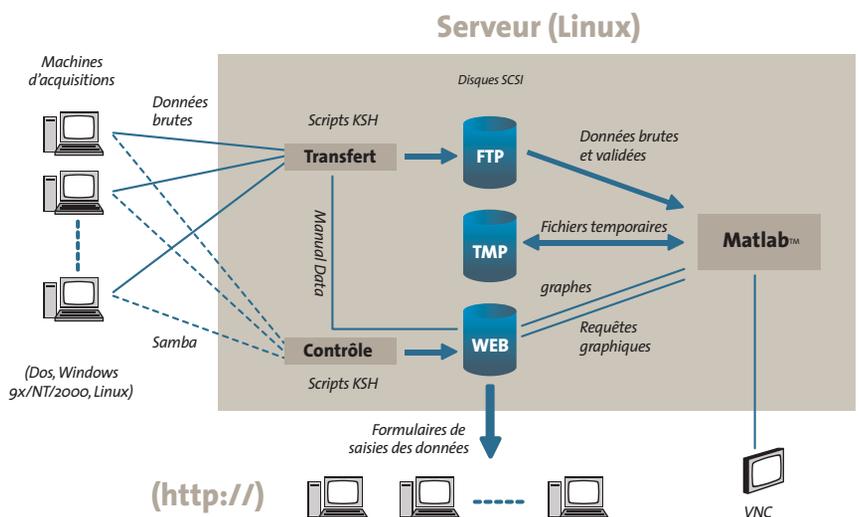
- archivage : centralisation de toutes les informations et données scientifiques et techniques pour former une base de données unique et rationnelle et optimiser la maintenance ;
- partage : mise à disposition des informations aux collègues éloignés pour faciliter la télé-surveillance et les collaborations.

### Solutions techniques mises en place

Le système est basé autour d'une simple machine serveur et d'une interface Web. Périodiquement - toutes les minutes, toutes les heures ou tous les jours, suivant les besoins et l'importance de chaque routine -, le serveur contrôle automatiquement les acquisitions de données, lance des routines de traitement sur chaque station et réseau, construit des fichiers de données et des graphes évolués sur différentes échelles de temps prédéfinies, et les met à jour sur un site Web. Le serveur peut également à cette occasion lancer des alarmes sur une panne d'acquisition ou un seuil de paramètres de surveillance (par e-mail et/ou SMS).

**Fig. 2 : Architecture simplifiée du système de contrôle, de traitement et d'accès aux données.**  
 Fig. 2: Simplified architecture of the system for controlling, processing and accessing data.

Source : IPGP





### Acquisitions automatiques/manuelles et archives

La première étape a consisté à centraliser les données vers un serveur unique. Pour les acquisitions automatiques, les fichiers sont simplement copiés périodiquement via l'Intranet ; pour les acquisitions manuelles, des formulaires de saisie (de terrain ou de laboratoire) ont été mis en place sur le site Web pour alimenter la base de données. Les données anciennes ont été numérisées à partir des archives (papiers ou numériques), vers un format commun universel et libre : le format texte ASCII. Les données brutes provenant des systèmes d'acquisition automatique sont laissées dans leur format natif (généralement binaire) et archivées comme telles. Certaines acquisitions analogiques ont été automatisées : c'est le cas du sismographe papier SEFRAM® qui est dorénavant entièrement informatique, dépouillé et archivé numériquement.

### Traitement des données

Écrites en langage Matlab, les routines de traitement de données sont spécifiques à chaque réseau et permettent la lecture des données quel que soit leur format, et la mise en commun sous forme matricielle (vecteur  $t$ , matrice  $d$ ). Ce langage a l'avantage de regrouper à la fois des outils de calcul numérique vectoriel (idéal notamment pour l'implantation

PUBLICITÉ

**NOUVEAU**



**L'IGAL**

*Institut Géologique Albert-de-Lapparent*

**et l'ISAB**

*Institut Supérieur d'Agriculture de Beauvais*

sont associés depuis le 1er septembre 2006 pour créer

**L'Institut Polytechnique  
LaSalle Beauvais**

Seule Ecole d'Ingénieurs  
en Sciences de la Terre et du Vivant

L'IGAL y poursuivra sa formation d'Ingénieurs Géologues dans la spécialité Géologie et Environnement

Dans un nouveau cadre riche en moyens et ouvert sur l'international

Contacts :

Année 2006-2007 LaSalle Beauvais Géosciences  
IPSL / 13 boulevard de l'Hautil 95092 CERGY PONTOISE Cedex  
Tél. : 01 30 75 60 70 Fax : 01 30 75 60 71  
www.igal.fr (portail) www.lasalle-beauvais.fr  
à partir de septembre 2007 LaSalle Beauvais Géosciences  
19 rue Pierre Waguet BP 30313 60026 BEAUVAIS Cedex  
Tél. : 03 44 06 25 25 Fax : 03 44 06 25 26



◀ **Fig. 3 : Vue d'une machine de contrôle dans la salle d'acquisition de l'observatoire.**

*Fig. 3: View of a work station in the observatory's acquisition room.*

© F. Beauducel / IPGP

de problèmes inverses) et une interface graphique puissante. Les graphes sont générés à des échelles de temps glissantes (24 heures, 1 mois, 1 an, 10 ans, toutes les données de la base) permettant la vision rapide de l'évolution des paramètres, et ce sur trois niveaux :

- ▶ par station, présentant les données brutes et les paramètres de contrôles associés (type tension batterie ou température ambiante par exemple) ;
- ▶ par réseau, présentant les données filtrées de toutes les stations avec éventuellement un calcul plus évolué (données différentielles, corrections systématiques, modélisation du premier ordre par exemple) ;
- ▶ et enfin, une intégration pluridisciplinaire via une modélisation des données provenant de plusieurs réseaux différents. Cette dernière phase est actuellement en cours d'élaboration, mais déjà le système permet une vision globale de l'ensemble des réseaux aux mêmes échelles de temps.

Ces traitements automatiques sont effectués sur toutes les données existantes dans la base (provenant indifféremment des acquisitions automatiques, manuelles ou des archives), et permettent d'anticiper les demandes les plus communes pour suivre les paramètres de surveillance. Des centaines de graphes sont ainsi à jour et disponibles instantanément sur le site Web, et ce quel que soit le nombre d'utilisateurs connectés. Il est également possible d'exécuter une requête spécifique sur une période de temps choisie, moyennant quelques minutes de traitement.

### **Suivi technique des réseaux**

La continuité des mesures est l'une des clefs d'une bonne interprétation des données. La maintenance des réseaux doit être permanente, réactive pour minimiser la perte de données, et les interventions techniques archivées de façon très exhaustive sur de longues périodes de temps pour en assurer l'interprétation. Toutes les stations et sites de mesures gérés par l'observatoire ont ainsi été référencés de façon rationnelle, classés en réseaux et en grandes disciplines, et associés à une "fiche de station" comportant la description détaillée des équipements, photos de terrain, documents techniques associés, carte de localisation, et une petite base de données des interventions ou événements. Ces fiches sont accessibles par tableaux ou cartes interactives à différentes échelles géographiques.



▲ **Endommagement d'un bâtiment suite au séisme des Saintes (Guadeloupe) le 21 novembre 2004.**  
*Damage to a building caused by the 21 November 2004 earthquake at Saintes (Guadeloupe).*

© BRGM im@gé

### **Première application : séisme des Saintes**

Le système mis en place en Guadeloupe sera pleinement exploité lorsque les signes précurseurs d'éruption seront de plus en plus marqués et qu'il faudra gérer la crise volcanique. Mais c'est le séisme des Saintes et sa longue séquence de répliques (Mw 6,3 du 21 novembre 2004, 27 000 répliques au total) qui en a finalement été la première application concrète : le site a permis non seulement un suivi temps-réel détaillé des séismes (sismogrammes, évolution des localisations et magnitudes par rapport aux structures tectoniques connues, lois d'Omori, de Gutenberg-Richter, d'atténuation des ondes...) facilitant considérablement les interprétations scientifiques et communications aux autorités et médias, mais aussi un accès distant des collègues parisiens qui ont ainsi participé pleinement aux traitements et réflexions pendant les jours les plus intenses de la crise (jusqu'à 2 000 répliques par jour).

Développé par l'équipe locale et uniquement au moyen de scripts écrits dans différents langages évolués (Matlab, shell Linux, Perl...), le système est totalement évolutif et peut être modifié au gré des besoins, des avancées en modélisation et résultats issus des interprétations de données. En partie déjà installé en Martinique, il sera également implanté à la Réunion afin d'homogénéiser les trois observatoires volcanologiques français. ■

## ► 1986-2006 : 20 ANS DE COOPÉRATION FRANCO-INDONÉSIENNE EN VOLCANOLOGIE

En 1986, un accord de coopération scientifique dans le domaine de la prévision et de la limitation des risques géologiques a été signé entre la Délégation aux Risques Majeurs du Ministère chargé de l'Environnement (France) et la Direction Générale de la Géologie et des Ressources Minérales du Ministère des Mines et de l'Énergie (Indonésie). L'objectif de cet accord était triple : "(1) mettre en œuvre en commun de nouvelles techniques d'évaluation du risque volcanique, (2) former des scientifiques indonésiens, (3) chercher à mieux comprendre le comportement des volcans andésitiques de façon à mieux surveiller les volcans des Antilles françaises".

Plusieurs équipes françaises ont ainsi effectué des travaux couvrant pratiquement toutes les disciplines de la volcanologie, avec pour cible principale le Merapi (Java), volcan laboratoire du Volcanological Survey of Indonesia (VSI) et de l'UNESCO dans le cadre de la Décennie internationale des risques (IDNDR). Outre une aide initiale de la Banque asiatique de développement (ADB), un budget annuel était attribué conjointement par les ministères de l'Environnement et des Affaires Étrangères, permettant le financement des différents projets et d'un poste de coopérant affecté au VSI (à Bandung ou Yogyakarta) qui assurait la maintenance des équipements installés par les laboratoires français et un contact permanent avec les collègues indonésiens. Au total, onze coopérants français se sont succédés sur

place (de 1987 à 2004), des dizaines d'étudiants indonésiens ont été diplômés dans les universités françaises et de nombreuses publications ont vu le jour. En contrepartie, les équipes françaises se sont trouvées confrontées à des situations de crise lors des fréquentes éruptions sur les volcans indonésiens, leur permettant de se préparer à la gestion de crises éventuelles sur d'autres volcans du même type et en particulier ceux situés aux Antilles. En 2003, les accords de coopération n'ont pas été renouvelés et les projets scientifiques ont dû progressivement être arrêtés à partir de 2004. Si la plupart des équipements sur place ont été abandonnés (notamment en raison de l'absence de coopérant), certains sont désormais maintenus et utilisés par nos partenaires, illustrant le transfert de compétence entre les deux pays. De même, plusieurs nouvelles méthodes validées sur le Merapi sont désormais mises en œuvre sur les volcans français.

Aujourd'hui l'Ambassade de France à Jakarta redonne une nouvelle impulsion à la coopération franco-indonésienne, sous forme d'une convention avec le VSI, qui permettra de remettre en état les réseaux de surveillance mis en place sur les volcans Merapi et Kelut (Java), et peut-être de relancer d'autres opérations. ■

**Mise en œuvre d'équipements de mesures pour la surveillance du volcan Merapi (Indonésie).**  
*Installation of measuring instruments to monitor the Merapi volcano (Indonesia).*

© F. Beauducel / IPGP



## Operational monitoring of French volcanoes: recent advances in Guadeloupe

*Volcanologic observatories have shared needs and must often cope with similar problems when implementing applications to monitor multidisciplinary data. Real-time access to data and estimating measurement uncertainties are important assets in determining the imminence of an eruption, but differences in instruments, data sampling and acquisition systems do in fact raise problems liable to hinder crisis management.*

*Over the past few years, and thanks to experience gained with 20 different networks and more than 200 permanent sensors installed in Guadeloupe, we have developed an operational system that helps address these issues. Using just one computer server and web interface, all the raw data are processed with automatic routines run at one-minute intervals for continuous seismic monitoring and hourly for other slower types of acquisition. Graphics, used primarily for interpretational purposes, are defined for preset moving time windows, i.e. the past day, month, year, 10-year period, all available data, or custom user-defined intervals. Digital and graphic results are presented for individual stations (calibrated data) or for monitoring networks (processed data), and the system lends itself well to inter-disciplinary real-time modelling. Moreover, the status of computers, stations and individual sensors is checked automatically using simple criteria (file updates and signal quality) and displayed as synthetic pages for technical control. This system provides real-time Internet access for integrated monitoring and represents a robust support medium for exchange among scientists and technicians. It was set up last year at the Montagne Pelée Observatory, and is expected to be installed at the Piton de la Fournaise Observatory.*