

Comment Moscou a perdu la Guerre des étoiles

LA

RECHERCHE

De la bulle à la mousse • La chasse au deutérium cosmique
Le voyage des protéines dans la cellule • **Ougarit, ville royale**

Faudra-t-il un jour évacuer Naples ?

LA DYNAMIQUE DES VOLCANS

**DOSSIER
SPECIA**

M 1108 - 274 - 38.00 F



SUISSE : 11,5 FS - MAROC : 33 DH - TUNISIE : 3500 ML - ESPAGNE : 800 PTAS - BELGIQUE : 277 FB - CANADA : 7,50 \$ - ROYAUME-UNI : 274 P - FRANCE : 38 F

MENSUEL N° 274 MARS 1995 • 38 FRANCS

EN DIRECT DES PANACHES

Comprendre la dynamique des éruptions suppose que l'on puisse observer et mesurer la vitesse, la hauteur ou encore la composition de panaches éruptifs. Des mesures qui se font aujourd'hui à distance et en temps réel.

GENEVÈVE BRANDEIS

Une éruption résulte d'une mise en surpression de la chambre magmatique située en général à quelques kilomètres de profondeur. Cette surpression peut être due à une injection de nouveau magma dans la chambre, ou à la production de gaz (dégazage) lors du refroidissement du magma dans la chambre. Lorsque la pression est trop forte, il y a fracturation des roches entourant la chambre, remontée du magma dans le conduit et explosion à la surface due à la décompression brutale des gaz magmatiques. Dans tous les cas, les gaz sont ou deviennent moteur des éruptions. Dans un magma basaltique, donc peu visqueux, le dégazage de la chambre entraîne l'accumulation de bulles au toit de la chambre, qui fusionnent et forment une mousse. Périodiquement, cette mousse se transforme en une grande poche de gaz instable qui monte dans le conduit sous forme de bulles⁽¹⁾. L'essentiel de ces gaz se libère du magma sous la forme d'explosions, ou jets de gaz, avec une très faible proportion de magma par rapport au gaz, comme au Stromboli dans les îles éoliennes (fig. 1) ou au Kilauea à Hawaii. Pour un magma andésitique (riche en silice), donc très visqueux, il n'y a pas de séparation de la phase gazeuse et l'explosion entraîne à la fois magma et gaz, produisant des panaches pliniens chargés de cendres comparables à des nuages atomiques.

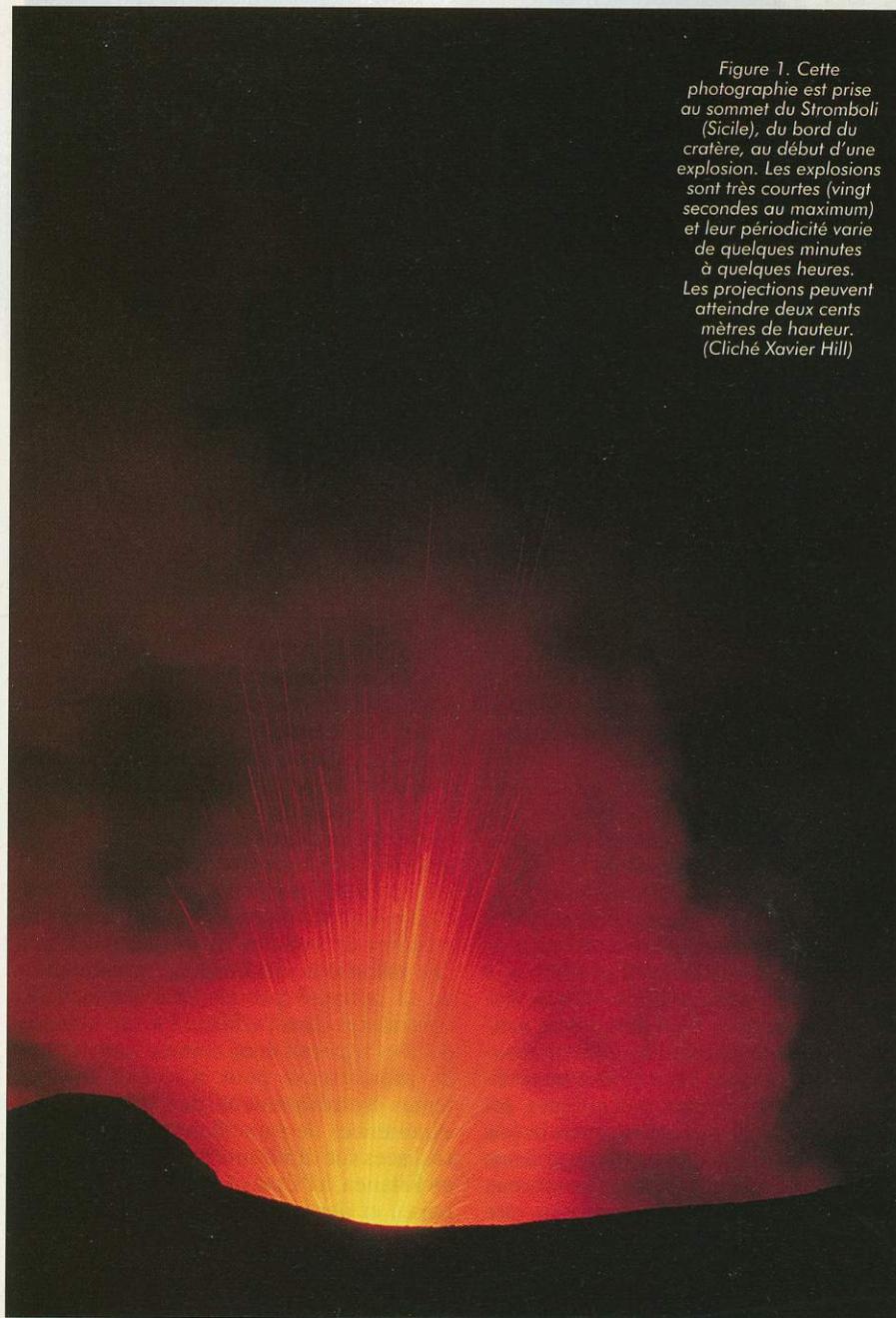
Afin d'obtenir une meilleure compréhension de la dynamique des éruptions, il est donc important d'étudier et de mesurer le plus grand nombre de caractéristiques des panaches ou des jets : leur vitesse, leur hauteur, leur volume, leur concentration en cendres et en gaz. Ces mesures permettent d'estimer d'une manière plus précise le flux de matière volcanique libérée dans l'atmosphère, paramètre essentiel de la dynamique. Elles sont également importantes pour estimer l'impact climatique des volcans.

Cet article ne prétend pas être un catalogue exhaustif des méthodes existantes. J'en décrirai cinq récemment utilisées

par les volcanologues pour étudier la partie visible de l'explosion, le panache et les jets. Il s'agit de mesures à distance : radar, sodar, mesure optique, spectrométrie acoustique.

Les panaches pliniens étant très dangereux, le volcanologue recourt aux méthodes utilisées depuis de nombreuses années par les météorologues, les mesures à distance ou télémétrie. La première utilisation d'un appareil télémétrique remonte à 1980⁽²⁾ : c'était un radar du service météorologique utilisé lors de l'éruption du mont Saint Helens (Etat de Washington, Etats-Unis). Cette grande première dans la collaboration entre physiciens de la Terre et de l'atmosphère a marqué la naissance de la volcanologie expérimentale télémétrée. Une antenne

Figure 1. Cette photographie est prise au sommet du Stromboli (Sicile), du bord du cratère, au début d'une explosion. Les explosions sont très courtes (vingt secondes au maximum) et leur périodicité varie de quelques minutes à quelques heures. Les projections peuvent atteindre deux cents mètres de hauteur. (Cliché Xavier Hill)



GENEVÈVE BRANDEIS est physicienne-adjointe et travaille à l'Observatoire Midi-Pyrénées (Toulouse) dans le groupe de recherches en géodésie spatiale depuis septembre 1993. Elle a passé dix ans à l'Institut de physique du globe de Paris où elle a contribué à développer sur les volcans de nouvelles méthodes de mesures physiques des jets.

du service national de la Météorologie étant proche du volcan, deux géologues, David Harris et William Rose, avaient alerté deux météorologues, Robert Roe et Martin Thompson, de l'imminence de l'éruption. Ceux-ci utilisent des radars pour étudier les masses nuageuses : leurs masse et dimension, ainsi que la distribution des gouttelettes d'eau, sont déterminantes pour la prévision météorologique. Un nuage volcanique étant chargé de particules (cendres), il s'apparente à un nuage de grêle et peut donc être suivi par un radar d'une manière analogue.

Le radar a pu ainsi suivre le panache en temps réel pendant toute l'éruption du 18 mai 1980 et les sept suivantes. Les mesures ont été faites au sol à partir des stations météorologiques, la portée maxi-

Sylvie Vergnolle et Xavier Hill de l'Institut de physique du globe de Paris de collaborer avec A. Weill afin d'appliquer cette technique pour mesurer la vitesse verticale des jets volcaniques sur le Stromboli⁽³⁾ (fig. 1).

Cette méthode repose sur l'effet Doppler mesuré sur les fines particules de poussière en mouvement à l'intérieur du panache. Un sodar est un instrument qui envoie une onde acoustique de forte intensité et de fréquence fixée, et reçoit un signal réfléchi sur les particules en mouvement dans le jet. Le signal réfléchi étant de fréquence légèrement différente de celle de l'onde directe, on relie cet écart de fréquence ou signal Doppler, mesuré par la technique dite d'analyse spectrale, à la vitesse moyenne dans le

équipe ont ainsi pu mesurer, en continu pendant cinq jours, la valeur moyenne de la vitesse verticale à une hauteur très proche de la bouche éruptive du Stromboli (fig. 2).

Avec le Sodar, la vitesse verticale des jets volcaniques peut être mesurée en direct, de jour comme de nuit, par tous les temps : un bon outil pour suivre le déroulement d'une éruption

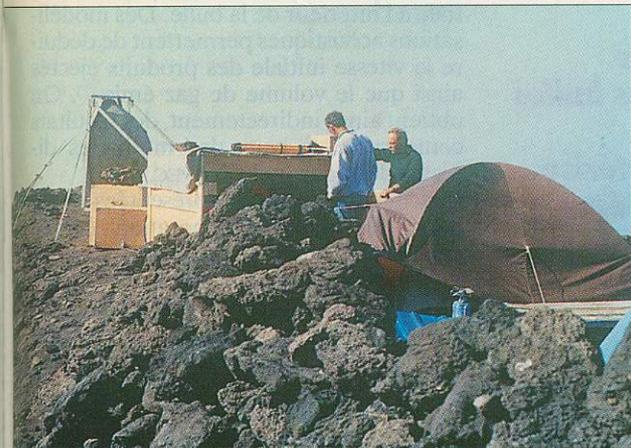


Figure 2. Le Sodar permet de mesurer la vitesse verticale des jets volcaniques sur le Stromboli. L'antenne parabolique est installée sur le bord du cratère, en vue directe et à 370 m des jets ; elle émet en continu pendant quelques millisecondes, toutes les quatre secondes, une onde acoustique de fréquence élevée (2 000 hertz), et de forte intensité. Cette même antenne reçoit le signal réfléchi sur les particules dans le jet, qui est enregistré et analysé. (Cliché G. Brandeis)

male des radars utilisés étant de quatre cents kilomètres. Elles ont permis tout d'abord de déterminer d'une manière fiable la hauteur du panache (minimum quatorze kilomètres pendant neuf heures) ainsi que sa durée d'émission. Par ailleurs, l'étude de la réflectivité du signal reçu renseigne sur la concentration des particules, soit la densité du panache, moyennant des hypothèses sur la taille des particules, et leur distribution à l'intérieur du panache. Les études au sol des retombées volcaniques permettent en effet de faire des hypothèses plausibles sur ces deux paramètres. Le volume du panache, mesuré directement, permet de déduire la masse de matière éjectée lors d'une éruption.

Les mesures de vitesse en continu sont encore plus récentes, les premières ayant été effectuées en 1991 sur les jets de gaz du Stromboli. Alain Weill, physicien de l'atmosphère, et son équipe du CRPE (Centre de recherches en physique de l'environnement, CNET), à Issy-les-Moulineaux, utilisent depuis une vingtaine d'années la technique du sondage Doppler acoustique afin de mesurer, notamment, les vitesses des panaches turbulents atmosphériques de hauteur moyenne. Les jets volcaniques étant très énergétiques, nous avons eu l'idée avec

jet. Le sodar doit être installé en vue directe du jet à une distance pouvant aller jusqu'à un kilomètre. Alain Weill et son

La vitesse a été mesurée pour une centaine d'explosions. Elle est de l'ordre de cinquante mètres par seconde, soit du même ordre de grandeur que celle estimée par Bernard Chouet⁽⁴⁾, actuellement à l'US Geological Survey à Menlo Park, par des mesures moins directes à partir de l'analyse de photographies successives prises de nuit. Par rapport à cette méthode, appelée photobalistique, les avantages du sodar sont multiples. Il permet une mesure directe et continue de la vitesse. La précision de la mesure est bien meilleure, de l'ordre de dix pour cent. Les mesures peuvent être faites de jour comme de nuit, et dans la plupart des conditions météorologiques. L'enregistrement continu permet de suivre l'évolution de la vitesse du jet pendant une série d'explosions. Cette méthode est donc adéquate pour suivre les variations de la



Figure 3. La pression à laquelle sortent les gaz peut être mesurée par un microphone acoustique, le son étant une variation de pression dans l'air. Avant d'éclater à la surface, les bulles de gaz vibrent quelques fractions de seconde, créant ainsi des variations de pression assez intenses pour être mesurées. On peut, par exemple, en déduire la taille du conduit, la vitesse initiale des matériaux éjectés et le volume de gaz émis. Pour mesurer le son des explosions, ici au sommet du Stromboli, on utilise un sonomètre et un magnétophone. Le sonomètre est un ensemble portable constitué d'un microphone et d'un amplificateur. (Cliché Geneviève Brandeis)

dynamique d'une éruption basaltique. Elle pourrait être appliquée sans grand danger à l'étude des fontaines de lave hawaïennes.

Un troisième type de mesure à distance, la détection optique des éclairs, a été adoptée pour la première fois en volcanologie en 1990, lors de l'éruption du Redoubt (Alaska). Cette méthode est utilisée par le service Incendie en Alaska pour détecter à distance la foudre et prévenir les feux de forêts. Or des éclairs se produisent dans les panaches volcaniques, les particules étant chargées d'électricité. Richard Hoblitt, de l'Observatoire des Cascades à Vancouver, a montré que la détection simultanée des éclairs et de la sismicité permet de repérer les panaches volcaniques, même lorsque toute observation visuelle est rendue impossible par la nuit arctique ou par le mauvais temps⁽⁵⁾. L'Observatoire d'Alaska s'est donc équipé de ce système efficace pour la protection aérienne.

Venons en maintenant aux constituants des panaches ou jets, les gaz volcaniques. Puisqu'ils sont responsables du déclenchement des éruptions, il est important de connaître leur concentration et leur flux lors de l'éruption. Ces gaz sont un mélange de vapeur d'eau en très grande partie (80 à 90%), de dioxyde de carbone (jusqu'à 10%) et, en plus petite quantité, de dioxyde de soufre, d'acide sulfurique, d'acide fluorhydrique et d'acide chlorhydrique. Jusqu'en 1973, les volcanologues avaient en général recours à la pétrologie en étudiant les gaz piégés dans les cristaux pour estimer indirectement leur concentration. Depuis 1973, les volcanologues utilisent des mesures COSPEC (*Correlation Spectrometer*) pour mesurer directement le dioxyde de soufre dans les panaches volcaniques^(6,7). Cet appareil mesure le taux d'absorption des ultraviolets de la lumière par le dioxyde de soufre. Les gaz volcaniques sont transparents dans les radiations visibles et ne se distinguent pas dans l'infrarouge des constituants atmosphériques normaux (dioxyde de carbone, vapeur d'eau et ozone). Seul le dioxyde de soufre est absorbé à la longueur d'onde utilisée par COSPEC.

Cet instrument est installé sur l'aile d'un avion ou sur un camion. Le panache libéré à la sortie du conduit se mélange ensuite progressivement dans l'atmosphère. Cette méthode permet de mesurer le flux dans le panache assez près du cratère, alors qu'il est assez peu dilué dans l'atmosphère, et donne une bonne estimation du flux à la source. Les flux mesurés ont des valeurs très grandes, se chiffrant en plusieurs millions de tonnes par an. L'impact volcanique sur l'environnement est ainsi loin d'être négligeable.

Depuis l'éruption du Chichon au Mexique en 1982, les volcanologues ont découvert que les panaches étaient égale-

ment détectés par les satellites équipés de spectromètres surveillant la stratosphère et notamment la couche d'ozone (*Total Ozone Mapping Spectrometer* ou TOMS). Arlin Krueger, physicien de l'atmosphère du Centre Goddard de la Nasa, a vu ses mesures de TOMS perturbées par cette éruption, plus précisément par le dioxyde de soufre contenu dans le panache⁽⁸⁾. Il a réalisé que l'on pouvait utiliser cet instrument pour le détecter et le mesurer. Cette technique a été depuis adoptée à plusieurs reprises pour suivre les nuages volcaniques des éruptions du Nevado del Ruiz (Colombie), du Redoubt (Alaska), du Pinatubo (Philippines), et de l'Unzen (Japon) notamment. Le nuage peut être suivi très loin du site de l'éruption, et très rapidement, l'impact climatique devient mondial.

Le bruit, inaudible pour l'homme, des bulles de gaz arrivant à la surface caractérise le volume de gaz émis et la vitesse à laquelle les produits sont éjectés

Terrence Gerlach, de l'Observatoire des Cascades à Vancouver, a comparé ces deux méthodes de mesures à distance avec les études de pétrologie pour l'éruption du Redoubt⁽⁹⁾. Il a montré que les études pétrologiques par analyse du gaz piégé dans les cristaux, encore appelé inclusion fluide, sous-estiment de plus d'un facteur dix le taux de dioxyde de soufre émis. Cela semble indiquer un dégazage très important en profondeur dans la chambre bien avant l'éruption, dont le magma ne peut garder de trace dans les inclusions fluides. Cela montre aussi que l'impact climatique d'une éruption volcanique a certainement été sous-estimé dans le passé.

Un autre paramètre important à mesurer à la sortie du conduit est la pression à laquelle sortent les gaz. Connaissant ce paramètre et en s'appuyant sur les mesures sismiques pour connaître la profondeur de la chambre, on peut calculer la pression au toit de la chambre qui a déclenché l'éruption. La pression peut être mesurée soit par des microbarographes (enregistreurs de grande précision de la pression atmosphérique), soit par un microphone acoustique. En effet, le son n'est autre qu'une variation de pression dans l'air et son intensité et sa fréquence sont quantifiables. Les explosions pliniennes font un bruit si intense qu'il pourrait être enregistré à plusieurs kilomètres du volcan. Les éruptions basaltiques peuvent être mesurées à plus

faible distance. Avec Sylvie Vergniolle, nous avons ainsi effectué en 1991 de telles mesures en continu pour une cinquantaine d'explosions du Stromboli⁽¹⁰⁾ (fig. 3). Les bulles sont en légère surpression lorsqu'elles arrivent à la surface terrestre. Avant d'éclater en produisant ces formidables jets (fig. 1), elles vibrent à la surface quelques fractions de seconde, créant ainsi des variations de pression dans l'air assez intenses pour être mesurées. Ce phénomène de basse fréquence (inférieure à vingt hertz) n'est certes pas audible, mais la technologie actuelle permet de le mesurer, ce qui n'était pas le cas il y a vingt ans⁽¹¹⁾. La mesure de la fréquence renseigne sur la taille du conduit. Plus le conduit est large, plus la fréquence est basse. Par ailleurs, l'intensité acoustique est reliée à la surpression initiale à l'intérieur de la bulle. Des modélisations acoustiques permettent de déduire la vitesse initiale des produits éjectés ainsi que le volume de gaz émis⁽¹²⁾. On obtient ainsi, indirectement, des résultats comparables à ceux des méthodes directes du sodar et du COSPEC.

Chacune des méthodes présentées ici est donc née d'une collaboration étroite entre surveillance et recherche. Celle-ci est indispensable pour améliorer la prédiction et la compréhension des éruptions volcaniques. Le modélisateur doit vérifier ses résultats par des mesures sur le terrain, et l'observateur doit s'appuyer sur les modèles pour comprendre ses données, les progrès de l'un servant à l'autre. Cela est vrai tant pour la sismologie, outil de base de la surveillance géophysique et volcanique, que pour la pétrologie des laves. Ces dernières années ont vu le développement d'un certain nombre de méthodes plus modernes pour étudier la partie aérienne des éruptions, notamment les mesures à distance. Il est important de poursuivre ces recherches, tant pour la sécurité des volcanologues, que pour la qualité des mesures. Il faudra notamment adapter les instruments utilisés au terrain volcanique, ces méthodes télémétrées étant encore chères et lourdes à mettre en œuvre, pour en voir leur utilisation plus systématique lors des prochaines éruptions. ■

(1) C. Jaupart et S. Vergniolle, *Nature*, 331, 58, 1988.

(2) D.M. Harris et al., *USGS Prof. Pap.*, 1250, 323, 1981.

(3) A. Weill et al., *Geophys. Res. Lett.*, 19, 2357, 1992.

(4) B. Chouet et al., *J. Geophys. Res.*, 79, 4961, 1974.

(5) R.P. Hoblitt, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 62, 499, 1994.

(6) T.J. Casadevall et al., *Science*, 221, 1383, 1983.

(7) P. Allard et al., *Nature*, 351, 387, 1991.

(8) A.J. Krueger, *Science*, 220, 1373, 1983.

(9) T.G. Gerlach et al., *J. Volc. Geotherm. Res.*, 62, 317, 1994.

(10) S. Vergniolle et G. Brandeis, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1959, 1994.

(11) G. Wouffet et T.R. McGetchin, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 45, 601, 1976.

(12) S. Vergniolle et G. Brandeis, *J. Geophys. Res.*, en préparation.