

L'aléa volcanique

Les volcans sont toujours actifs, leurs éruptions tuent encore et, pour les plus importantes, sont à même d'affecter la population de la planète entière via le changement climatique. La volcanologie a pourtant bien progressé depuis 30-ans, grâce à la théorie et à l'observation. Où en est la discipline? Que peut-on prévoir aujourd'hui? Que peut-on espérer pour demain?

par **Claude Jaupart**,
Institut de physique du globe de Paris

Les éruptions volcaniques nous émerveillent encore après des décennies de reportages en tous genres et de multiples recherches dans la plupart des pays. Malheureusement, elles tuent encore et on peut se demander si nous avons beaucoup progressé. La volcanologie s'est beaucoup développée depuis trente ans grâce à la théorie, qui permet d'identifier les mécanismes mis en jeu et les différents comportements possibles pour un volcan ou une éruption, et aussi grâce aux observations et mesures systématiques qui apportent les données quantitatives nécessaires. De nombreux ouvrages font le point sur ces avancées et on trouvera plus bas une courte bibliographie. Nous nous limiterons dans cet article, à un bref bilan de nos connaissances en volcanologie et au problème de la prévision.

L'état actuel des recherches en volcanologie

Tous les régimes éruptifs connus correspondent fidèlement aux différents régimes d'écoulement d'un mélange de liquide et de gaz. L'origine de ces divers écoulements est connue et la mesure de leurs caractéristiques principales, telles que vitesse de sortie, teneur en gaz et débit massique, est possible. Ces mesures sont faites sur des volcans en activité, grâce à des radars et des sondeurs haute fréquence, mais aussi sur des éruptions fossiles, grâce à leurs dépôts. La figure-1 résume les débits massiques et les masses totales de produits émis d'une cinquantaine d'éruptions pliniennes. On appelle «-plinienne-» une éruption explosive dont la colonne atmosphérique atteint des altitudes

supérieures à 5-km environ. Ces colonnes éruptives sont composées d'un mélange de fragments de magma et de gaz, plus léger que l'air à cause de sa haute température-; elles sont propulsées par la poussée d'Archimède et dispersent cendres et ponces (les fragments de magma solidifiés) sur de très grandes distances. On peut remarquer l'énormité des chiffres-: de nombreuses éruptions ont des débits de 10⁹-kg-s⁻¹ ou plus.

Parallèlement au développement des études théoriques et des mesures de l'activité volcanique, des protocoles fiables ont été mis au point pour assurer la surveillance et la détection de mouvements de magma en profondeur. Des observatoires bien équipés ont été implantés sur un grand nombre de volcans dangereux et on ne connaît plus d'éruptions surprises. Un

dernier pas a été franchi avec le développement d'outils satellitaires, qui permettront un jour la surveillance systématique et uniforme de toutes les régions volcaniques actives du globe.

Peut-on dire pour autant que l'état actuel de nos connaissances soit satisfaisant et réponde aux besoins des populations et des autorités des régions menacées? Malheureusement non, car prévoir une éruption n'est, en pratique, pas très utile. En effet, le même volcan peut connaître une petite éruption sans conséquences ou une grosse éruption aux effets catastrophiques. Or, nous ne savons prédire ni le volume émis, ni le régime éruptif, ni même la durée d'une éruption. En outre, une éruption, même de faible intensité, peut être dévastatrice si elle se prolonge suffisamment longtemps. Ce n'est alors ni la violence de l'éruption, ni le volume total de lave émis qui posent problème, mais la durée. Ce fut le cas, en 1995,

sur l'île de Montserrat lorsque le volcan Soufrière Hills s'est réveillé après plusieurs siècles de repos. Cette éruption de faible intensité s'est prolongée pendant près de

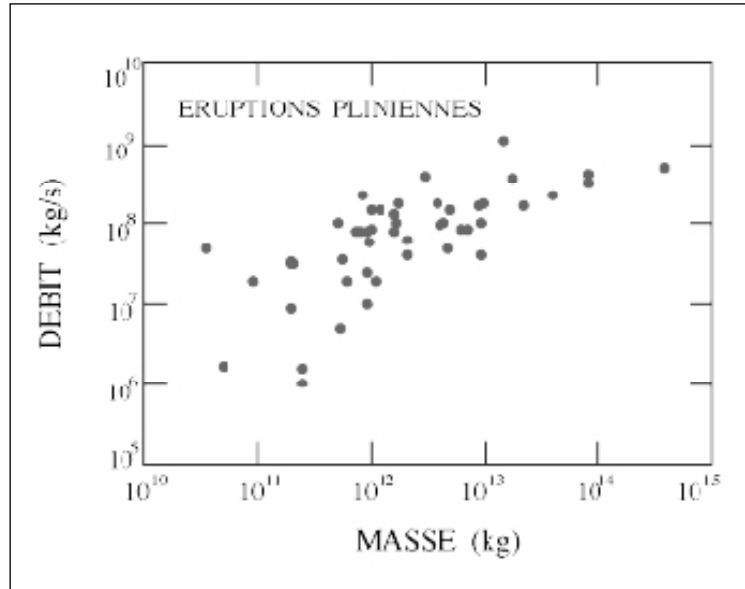


Figure 1. Débit massique et masse totale des dépôts pour les éruptions pliniennes connues à ce jour.

dix ans et n'est probablement pas encore tout à fait terminée aujourd'hui. Fallait-il reloger ou expatrier les habitants alors que le volcan n'émettait que peu de cendres? L'éruption

n'était pas dangereuse à quelques kilomètres de distance, mais produisait de temps en temps une petite explosion qui semait des cendres sur une bonne moitié de l'île. Or, les cendres volcaniques sont très fines

(quelques microns) et se soulèvent très facilement lorsque l'on marche. Il est aujourd'hui toujours impossible de travailler sur les terrains qu'elles ont recouverts, et encore

moins d'y cultiver et élever du bétail. L'île de Montserrat est aujourd'hui un territoire dévasté et ses installations portuaires sont devenues inutilisables. Une éruption de ce type ne pose pas le même problème pratique qu'une éruption violente de quelques jours.

L'analyse statistique

Pour une administration et des compagnies d'assurance, l'approche statistique est très certainement la seule acceptable pour l'évaluation du risque. Malheureusement, les données disponibles ne permettent pas d'analyse suffisamment précise. Annoncer

Pour une administration et des compagnies d'assurance, l'approche statistique est très certainement la seule acceptable pour l'évaluation du risque. Malheureusement, les données disponibles ne permettent pas d'analyse suffisamment précise.

qu'une éruption aura lieu dans 200-±-100 ans n'est pas d'une grande utilité-

Pour le Piton de la Fournaise, dans l'île de La Réunion, par exemple, le temps de récurrence varie fortement, de quelques jours à plusieurs années, soit des variations de plusieurs ordres de grandeur. Les grandes périodes d'inactivité sont exceptionnelles. Après une longue série d'éruptions quasiment annuelles, ce volcan s'est arrêté en 1992 et, comme d'habitude, les habitants et les scientifiques s'attendaient à un repos de quelques mois. Ils ont attendu six ans-! Statistiquement, un tel laps de temps était pratiquement exclu... Depuis son réveil, en 1996, le volcan est en activité quasi-continue. De tels changements de rythme ne peuvent être quantifiés correctement que grâce à de très longues séries temporelles, couvrant plusieurs centaines d'années. De telles archives ne sont pas disponibles aujourd'hui.

Le Vésuve offre un exemple plus frappant encore (figure 2). En 1631, le célèbre volcan sort d'une longue phase de sommeil d'à peu près cinq cents ans et démarre un cycle de très grande activité. Entre 1660 et 1944, aucune période de repos ne dépasse les 7-ans. Depuis, le Vésuve s'est de nouveau assoupi. Sa dernière éruption remonte à

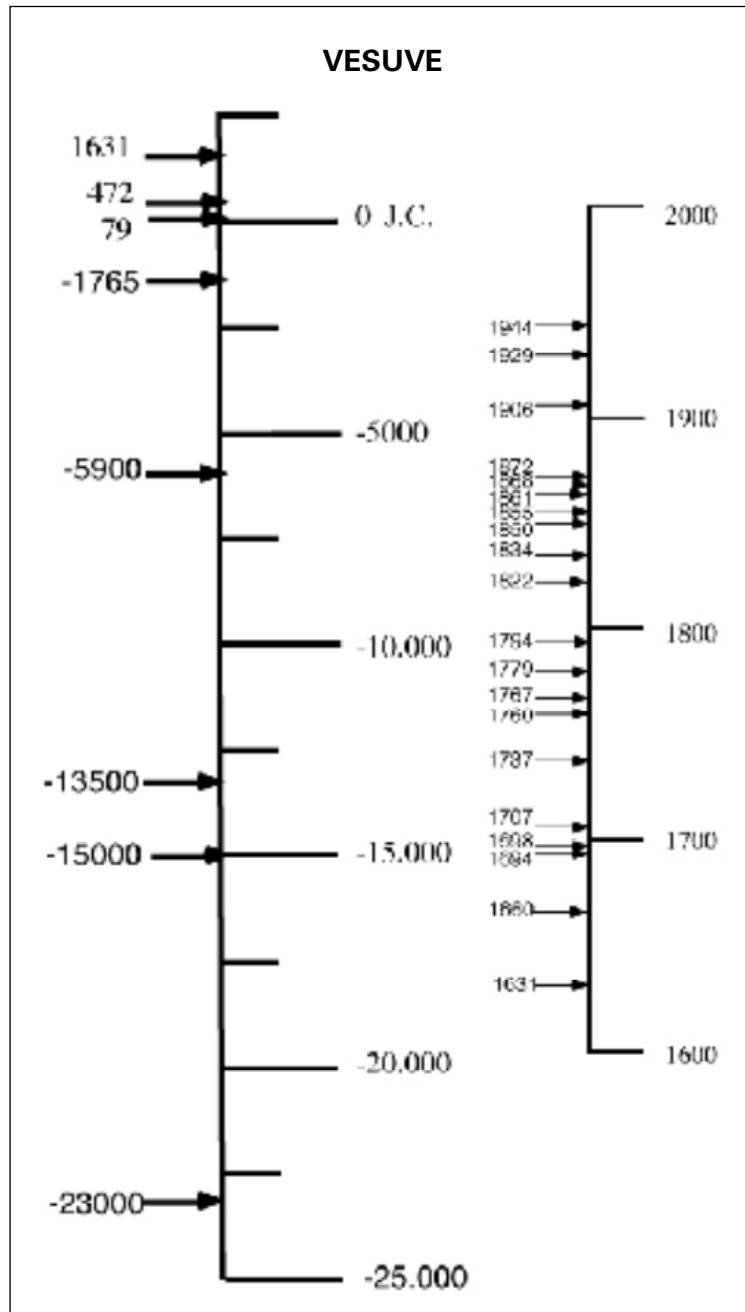


Figure 2. Les éruptions datées du Vésuve. On notera la différence entre l'enregistrement historique, précis et complet, et l'enregistrement géologique, grossier et incomplet. Les éruptions historiques sont de faible volume et n'ont laissé que peu de traces visibles.

plus de soixante ans, ce qui n'était jamais arrivé depuis 1631. Les données disponibles pour les périodes antérieures

à cette date sont mauvaises et incomplètes-: il est impossible d'évaluer la durée des grandes périodes de repos qui ont

précédé. Dans ces conditions, toute prédiction pour la date de la prochaine éruption serait bien hasardeuse.

Les temps de récurrence des éruptions montrent une séquence très irrégulière et peu propice à la prédiction. En outre, il n'est pas certain qu'ils offrent une bonne représentation de l'activité d'un volcan, qui n'est que la partie superficielle d'un système souterrain beaucoup plus volumineux. Ainsi, un phénomène de faible ampleur peut-il exhiber une séquence parfaitement erratique et n'exercer aucune influence sur l'ensemble. Un volcan peut rester actif pendant plusieurs centaines de milliers d'années. Celui de l'île de Santorin, par exemple, n'est pas encore éteint malgré son grand âge (600-000 ans). A cette échelle, le laps de temps entre deux éruptions, qui dépasse rarement quelques centaines d'années, n'est pas significatif.

La plupart des éruptions, aussi énormes qu'elles puissent paraître à l'être humain, ne représentent en fait que de petites perturbations pour les systèmes magmatiques profonds qui les alimentent. Il suffit, pour s'en rendre compte, de comparer le volume éjecté

à celui du réservoir. Par définition, le volume total stocké en profondeur est supérieur à celui des grosses éruptions. La plus importante du XX^e siècle a eu lieu en Alaska, en 1912, et a éjecté 15-km³ de magma. On retrouve les mêmes ordres de grandeur dans tous les systèmes volcaniques bien étudiés. En comparaison, l'éruption de 1902 de la Montagne Pelée, qui dévasta la ville de Saint-Pierre dans l'île de la Martinique et marqua profondément les esprits, n'a laissé qu'un petit dépôt d'environ 0,2-km³. Une éruption de ce type n'évacue qu'une très faible partie du réservoir et n'a pas grande influence sur lui.

Les temps de récurrence des éruptions montrent une séquence très irrégulière et peu propice à la prédiction. En outre, il n'est pas certain qu'ils offrent une bonne représentation de l'activité d'un volcan.

Il n'en va pas de même avec une grosse éruption qui vidange le réservoir: elle ne peut se répéter n'importe quand parce qu'il faut d'abord qu'il se recharge.

A Santorin (figure 3), on distingue facilement les éruptions de petit volume, responsables des petits dépôts et coulées visibles dans les célèbres falaises de l'île, et les événements majeurs, qui donnent lieu à la formation des fossés d'effondrement (caldeiras). Le dernier événement majeur est celui de 1650 avant Jésus-Christ, qui vit la destruc-

tion d'un imposant édifice et la formation de l'île actuelle avec sa forme et sa topographie très particulières. Les grosses éruptions à caldeiras sont rares et séparées par des intervalles variant entre 17-000 et 40-000 années: par contraste avec les petites éruptions du Piton de la Fournaise dont les temps de repos varient de plusieurs ordres de grandeur, on peut les qualifier de quasi-périodiques. Ces observations amènent à distinguer un régime quasi-permanent, pendant lequel le volcan évacue régulièrement de petites parties de son stock de magma, et quelques rares cataclysmes dus à la destruction du réservoir.

Evolution à long terme

Ces observations illustrent bien le problème des méthodes de prévision basées exclusivement sur la connaissance du passé. Le Piton de la Fournaise ne se répète pas avec une périodicité parfaite et connaît des changements de rythme importants. Ces changements ne peuvent être établis que grâce à l'observation continue, qui permet de noter chaque éruption. Certaines d'entre elles ont été de très faible intensité et seraient passées inaperçues sans un effort

systématique. Le Piton de la Fournaise a un gros avantage. C'est un volcan basaltique aux périodes de repos brèves, et le catalogue de ses éruptions s'accroît rapidement. Sur un volcan à lave plus visqueuse, dont les éruptions sont beaucoup plus espacées, nous ne sommes pas en mesure d'établir un catalogue aussi important. Pour un volcan dont les périodes de repos s'étendent sur plusieurs centaines d'années, il est difficile d'obtenir un nombre significatif d'événements. D'un point de vue pratique, l'altération et l'érosion des fragiles dépôts complique encore le problème. En l'espace d'un millier d'années, toute trace d'une éruption peut ainsi disparaître, empêchant toute reconstitution exhaustive de l'activité passée.

L'analyse statistique repose sur l'hypothèse que chaque événement est une sorte de « tirage-» plus ou moins aléatoire d'un système qui ne change pas. Or, pour beaucoup de volcans, ce n'est pas le cas. D'une éruption à l'autre, la composition du magma peut en effet changer de manière significative. En outre, l'édifice subit des modifications très importantes. Lors de sa dernière éruption, en 1980, le Mount St Helens a perdu plus de mille mètres et son système magmatique a diminué en pression. Une telle décompression modifie la den-

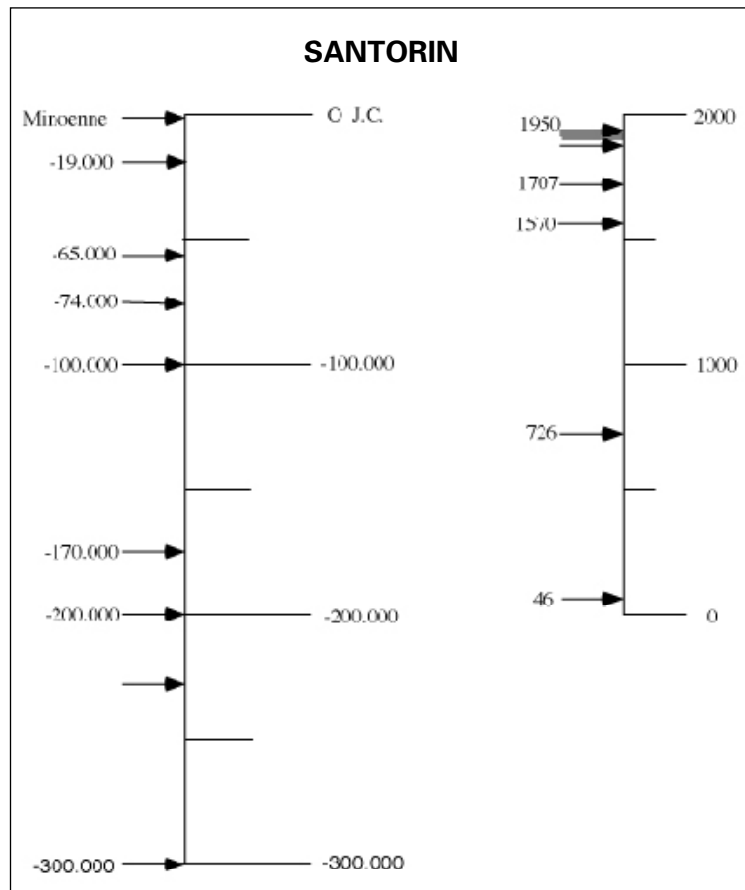


Figure 3. Les éruptions datées de Santorin. On notera que les grosses éruptions sont assez régulièrement espacées.

sité moyenne du magma, les conditions de cristallisation, et surtout, le comportement des gaz volcaniques. Les prochaines éruptions seront sans doute différentes. On peut tester cette hypothèse à l'aide du Vésuve. Sa violente éruption de 1631 l'a réveillé de 500 ans de sommeil et l'a partiellement décapité. Le sommet a été abaissé de 470-mètres et le Vésuve est alors entré dans un cycle très actif qui s'est prolongé jusqu'en 1944. On pourrait interpréter ce cycle comme l'ajustement du système mag-

matique à de nouvelles valeurs de la pression, comme un retour vers un état de pseudo-équilibre. Dans cette situation, que dire de la prochaine éruption, qui est aujourd'hui très en retard par rapport aux précédentes-? Dans l'hypothèse où le cycle antérieur est d'une manière ou d'une autre associé à la destruction d'une partie de l'édifice, peut-on supposer que les mêmes phénomènes se reproduiront-? Nous ne sommes pas en mesure de répondre à ces questions.

Que peut-on prédire-?

Il ne faudrait pas déduire des paragraphes précédents que nous ne pouvons rien prédire. La production de magma est due à des mouvements de grande ampleur faisant intervenir le manteau terrestre sur une épaisseur de plusieurs centaines de kilomètres. Ces mouvements se perpétuent pendant des dizaines de millions d'années et ne peuvent changer brutalement pendant la très courte existence du volcan. Le volcan Hawaïen du Kilauea, qui est en activité quasi-continue depuis une vingtaine d'années, se trouve à l'extrémité d'une chaîne volcanique de près de 80-millions d'années. Il a atteint sa forme et son volume actuels en 400-000 ans environ. Il est donc légitime de supposer qu'à l'échelle humaine, sur quelques siècles, le taux d'alimentation magmatique est constant. On peut assimiler un système volcanique à un réseau de plomberie qui relie une source profonde à des bouches de surface, en passant par un réservoir situé à une profondeur intermédiaire. L'hypo-

thèse la plus simple est que le volcan n'a qu'un seul réservoir dont le volume change peu. Dans ces conditions, les quantités de lave émises sont probablement proches des quantités produites en profondeur. Pour tester cette hypothèse très simple, il faut déterminer le débit du volcan. L'entreprise n'est pas facile car elle nécessite de dater précisément chaque éruption, puis de calculer son volume : or, une éruption recouvre et détruit souvent les dépôts plus anciens.

On constate que les volumes éjectés varient d'une éruption à l'autre, mais que, sur une longue durée, le débit est effectivement à peu près constant. Les mesures sont disponibles sur une trentaine d'années au Piton de la Fournaise et sur plusieurs centaines d'années pour l'Etna, en Sicile. On observe ainsi que le débit moyen du Piton de la Fournaise est de $0,01\text{-km}^3/\text{an}$, et que, pendant 300 ans, celui de l'Etna s'est maintenu à une valeur voisine ($0,007\text{-km}^3/\text{an}$). On peut en outre remarquer que celui de l'Etna s'accélère notablement depuis 1950, pour atteindre aujourd'hui $0,02\text{-km}^3/\text{an}$. Ces chiffres sont frappants parce qu'ils sont assez proches,

alors que les deux volcans sont très différents. Pour l'Etna, ils permettent aussi de montrer sans ambiguïté que le volcan est entré dans une nouvelle phase depuis 1950. Ils servent enfin d'outil de prédiction-: à partir du temps de repos, on peut estimer, avec une marge d'erreur très faible, la quantité de lave qui va être émise lors d'une éruption. Voilà une prédiction quantitative rarement mise en défaut. En l'occurrence, on ne peut donc prévoir ni le temps et l'heure, ni le volume, mais la relation entre la longueur du repos et le volume.

Surveillance et fausses alertes

Un système volcanique est en équilibre instable, donc rarement calme. La surveillance ne peut se limiter à détecter des signes d'activité, car il y en a quasiment toujours, mais consiste à faire la différence entre une activité «-normale-» qui n'annonce aucun réveil, et une activité «-anormale-» qui annonce une éruption. Par exemple, des petits tremblements de terre sont enregistrés en permanence à l'Observatoire de la Soufrière de Guadeloupe. Des crises se produisent parfois-: les tremblements de terre deviennent plus nombreux, les fumerolles

L'analyse statistique repose sur l'hypothèse que chaque événement est une sorte de «-tirage-» plus ou moins aléatoire d'un système qui ne change pas. Or, pour beaucoup de volcans, ce n'est pas le cas. D'une éruption à l'autre, la composition du magma peut en effet changer de manière significative.

s'activent, de petites déformations sont détectées. Ces crises sont assez fréquentes et disparaissent aussi brusquement qu'elles sont apparues. On les attribue à de légères perturbations du système hydrothermal tant dans l'édifice que dans le socle fracturé.

Un édifice volcanique est un assemblage perméable de coulées de lave et de cendres soumis à des contraintes répétées: cycles de gonflement et de dégonflement, fracturation, chargement par de nouveaux dépôts. A l'intérieur, des quantités d'eau considérables sont stockées et portées à haute température. Sous l'édifice, les roches sont aussi fracturées et perméables. Un système volcanique est aussi une gigantesque chaudière, chauffée par le magma. L'eau chaude a un grand pouvoir de dissolution et sa circulation modifie le réseau de pores et de fractures. Avec le temps, la structure se complexifie, conduisant à la superposition de poches saturées d'eau et d'horizons imperméables. La mise sous pression ou une modification de l'état du magma (l'apparition d'une phase gazeuse, par exemple) peut fissurer les parois du réservoir, favorisant le dégazage. Tout changement de la proportion de vapeur d'eau et d'eau liquide conduit à de fortes variations de volume. Dans certains cas,

le changement peut être violent et conduire à une explosion phréatique. Parfois aussi, il peut se traduire par d'impressionnants mouvements du sol sans aucune éruption.

La région de Naples est connue pour abriter le Vésuve et les vestiges de Pompéï. Pour le volcanologue, toutefois, le célèbre volcan est presque insignifiant par comparaison avec le système volcanique voisin, situé sous la ville de Pouzole. Ce système a reçu le nom de Champs Phlégréens en raison de ses nombreuses fumerolles. Ce n'est pas un bel édifice plus ou moins conique, mais une caldeira de près de 25-kilomètres de diamètre. C'est ce système volcanique qui a enseveli la région sous des dizaines de mètres de ponces et de cendres il y a 34-000, puis 12-000 ans. Les dépôts qu'il a laissés forment le soubassement de la plupart des constructions de Naples. Le volume total des produits de la plus ancienne de ces deux éruptions, qui a reçu le nom de Campanienne, est de 250-millions de tonnes, que l'on retrouve sur une surface d'un million de kilomètres carrés. Ce système volcanique actif s'est rappelé au bon sou-

venir des habitants à plusieurs reprises. Par exemple, en 1515, un nouvel édifice s'est construit au bord de la caldeira, recevant le nom de Monte Nuovo. Plus

La surveillance d'un système volcanique ne peut se limiter à détecter des signes d'activité, car il y en a quasiment toujours, mais consiste à faire la différence entre une activité «-normale-» qui n'annonce aucun réveil, et une activité «-anormale-» qui annonce une éruption.

récemment, le sol de la caldeira s'est soulevé de plus de deux mètres au cours d'une crise qui s'est étalée sur quinze ans, de 1970 à 1985. Les énormes déformations du sol ont eu des conséquences sur l'économie de la région, mais

n'ont été suivies d'aucune éruption.

Avec les instruments sensibles de la géophysique, il est possible de détecter d'infimes secousses en profondeur. Malheureusement, ces signaux ne se répètent pas régulièrement et peuvent parfois être espacés de plusieurs années. Un diagnostic fiable nécessite une surveillance continue de longue durée, mais cela demande patience et constance: surveiller un volcan qui ne bouge pas est un travail bien ingrat ! Une fois des signes d'agitation détectés, il faut être sûr que ceux-ci annoncent une éruption. Chaque méthode a ses limites, et la mesure d'une seule variable ou la seule observation visuelle laissent la porte ouverte à de nombreuses interprétations contradictoires.

Pour être sûr du diagnostic, il faut disposer d'un faisceau de preuves concordantes. On peut déterminer les déformations de l'édifice, soit par la mesure directe des déplacements du sol, soit par des changements de la pente des terrains, soit encore par l'ouverture ou la fermeture de fissures. On peut aussi suivre les petits tremblements de terre. On peut analyser la composition des eaux et des gaz qui percolent à travers l'édifice et détecter l'apport de volatils d'origine magmatique.

Enfin, les changements de l'état de contraintes des roches modifient la circulation des eaux interstitielles et engendrent des signaux électriques et magnétiques. L'éruption est certaine quand ces différents signaux

sont simultanés. L'entrée en éruption d'un volcan laisse en général suffisamment de temps pour une étude poussée si on y met les moyens. Par exemple, en 1980 au Mont St Helens, la phase de réveil précédant l'éruption proprement dite a duré environ deux mois. Au Piton de la Fournaise, cette période est souvent de quelques semaines.

Le climat de la Terre

Prévoir les éruptions volcaniques ne concerne pas seulement les régions et pays où les volcans sont actifs comme l'Italie ou l'Islande, mais le monde entier: une éruption puissante peut modifier durablement le climat terrestre.

Les effets des volcans sur le climat terrestre ont fait l'objet de discussions et de débats acharnés pendant plusieurs

Avec les instruments sensibles de la géophysique, il est possible de détecter d'infimes secousses en profondeur. Malheureusement, ces signaux ne se répètent pas régulièrement et peuvent parfois être espacés de plusieurs années.

siècles. Certaines éruptions ont été associées à des changements de climat, d'autres non, et il a longtemps été difficile de trancher sur la base de quelques coïncidences. Pour évaluer les consé-

quences d'une éruption sur l'atmosphère, il faut connaître ses caractéristiques, c'est-à-dire la masse totale émise et l'altitude maximale atteinte par le panache éruptif. Il faut aussi tenir compte de la circulation dans la haute atmosphère. Pour que les effets climatiques soient importants, il faut que l'injection de gaz et de cendres se fasse dans la stratosphère, au-dessus de 10-kilomètres d'altitude. En effet, la stratosphère est stable et les mouvements

verticaux réduits: la circulation de l'air y est essentiellement horizontale, les mélanges très limités, et les produits volcaniques peuvent s'y maintenir pendant plusieurs cycles saisonniers. Autre condition: l'injection doit se faire aux bonnes latitudes, car les vents stratosphériques n'ont pas la même vitesse partout. Près des pôles, ces vents ont un faible pouvoir de dispersion, les effets volcaniques restent limités à une petite partie de l'atmosphère et ont des conséquences réduites à l'échelle du globe. La très puissante éruption du Katmai, en Alaska, au début du XX^e siècle, a eu peu d'incidence sur le climat. Au contraire, les effets sont maximisés si les éruptions se produisent dans des régions tropicales.

Aujourd'hui, il ne fait aucun doute que certaines éruptions ont eu des effets climatiques considérables. Cette certitude fut acquise à la suite des éruptions de l'Agung, en 1963, et du El Chichon, en 1982. Les mesures et les photographies prises en haute altitude montrèrent la grande étendue latérale des nuages éruptifs et constatèrent une chute brutale des températures de l'atmosphère. L'éruption récente du Mont Pinatubo dans les Philippines, en 1991, a achevé la démonstration avec la baisse de température la plus

importante qui ait été mesurée ($-0,5^{\circ}\text{C}$ en moyenne sur l'hémisphère Nord, ce qui est considérable).

La mécanique des changements climatiques est complexe, et il serait trop long de la détailler ici. Les cendres volcaniques jouent un rôle négligeable car elles retombent vers le sol en quelques jours. C'est le dioxyde de soufre (SO_2), l'un des composants volatils des magmas, qui est l'agent atmosphérique le plus important. En se mélangeant à la vapeur d'eau de l'atmosphère, ce gaz se transforme en acide sulfurique liquide (H_2SO_4) et forme un aérosol. Dans la stratosphère, une couche d'aérosols sulfuriques absorbe la radiation solaire et la ré-émet vers l'espace, ce qui a pour effet de refroidir l'atmosphère située en dessous (la troposphère).

Ce sont donc la latitude du volcan, les quantités de dioxyde de soufre et d'aérosol stratosphérique qui sont les paramètres déterminants. Une mesure globale de la perturbation de l'atmosphère est donnée par la variation de la température moyenne de la troposphère, mais il faut savoir que les différences entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud sont

importantes. D'après les estimations directes et les calculs de circulation atmosphérique, c'est l'éruption du volcan Tambora, en 1815, qui a induit les effets climatiques les plus dramatiques des deux derniers siècles. Plusieurs livres ont raconté dans le détail le froid qui s'est abattu sur l'Europe et l'Amérique du Nord en 1816, et les très mauvaises récoltes qui ont suivi. 1816 fut appelée « l'année sans été » à cause du givre et de la neige qui tombèrent en juin et juillet dans de nombreux pays occidentaux. Les effets furent encore plus sévères en Extrême-Orient, avec une grande famine en Inde et une épidémie de choléra. On

Prévoir les éruptions volcaniques ne concerne pas seulement les régions et pays où les volcans sont actifs comme l'Italie ou l'Islande, mais le monde entier: une éruption puissante peut modifier durablement le climat terrestre.

sait aujourd'hui que l'éruption du Tambora se produisit après plusieurs autres éruptions importantes, aux Açores en 1811, à la Soufrière de Saint Vincent (Antilles) et à l'Awu (Indonésie) en 1812, au Vésuve en 1813 et au Mayon (Philippines) en 1814. La stratosphère fut ainsi rechargée périodiquement en aérosols sulfuriques pendant quatre années consécutives et reçut le coup de grâce avec le Tambora. C'est cet enchaînement exceptionnel qui explique les effets considérables qui ont marqué l'année 1816.

Conclusion

Les problèmes que pose la prévision des éruptions volcaniques et des tremblements de terre sont semblables, et diffèrent considérablement de ceux de la prévision météorologique. Les trois types de catastrophes sont bien compris dans leurs principes. La grande différence est que l'atmosphère est un milieu continu et facilement pénétrable, dont on peut mesurer les propriétés en trois dimensions et en fonction du temps. Les progrès de la météorologie ont été possibles grâce à des réseaux d'observation mondiaux et des calculs de circulation atmosphérique à différentes échelles, depuis celle la planète entière jusqu'à celle d'une province française. Les perturbations atmosphériques qui annoncent des tempêtes se déplacent et peuvent être suivies par un satellite et des appareils au sol. La simulation des écoulements atmosphériques permet de prolonger un ensemble de mesures et d'avancer dans le temps. Autre facteur important, le nombre de météorologues et le volume des financements dont ils bénéficient, parfaitement justifiés par les enjeux économiques. Le Centre de Reading centralise plus de vingt ans de mesures systé-

matiques sur un réseau dense de stations à travers l'Europe et ses simulations atmosphériques sont « réactualisées » quotidiennement par de nouvelles données. En volcanologie, de tels gains d'échelle sont impossibles : chaque volcan est indépendant des autres.

Les éruptions volcaniques sont rares et dispersées, mais la Terre en subit plusieurs chaque année. Rassembler des données au sol en provenance de centaines de volcans actifs différents n'aurait pas grande utilité et serait très onéreux. En revanche, la surveillance de tout le globe peut être faite grâce à des satellites. Il suffirait de mesurer les déplacements du sol avec une précision de quelques centimètres, qui sera bientôt possible presque partout grâce à l'interférométrie radar. Pour disposer d'une alerte en temps utile, la périodicité des mesures sur chaque volcan actif doit être de quelques jours. Ces objectifs pourront être atteints avec un petit nombre de satellites, placés sur des orbites bien choisies. Le dispositif ne demanderait pas de lourds investissements et pourrait être pris en charge par une agence spatiale.

Aujourd'hui, il ne fait aucun doute que certaines éruptions ont eu des effets climatiques considérables. L'éruption récente du Mont Pinatubo dans les Philippines, en 1991, en a achevé la démonstration.

Pour progresser dans la compréhension des séquences et des cycles éruptifs, il sera nécessaire de reconstituer l'évolution de plusieurs volcans bien choisis, sur un laps de temps représentatif et avec une précision suffisante. Pour disposer des informations sur la taille et la structure des systèmes de plomberie magmatique souterrains, il faudra déployer des réseaux géophysiques plus puissants et plus denses que ceux de l'industrie pétrolière: les cibles sont plus profondes et les marqueurs plus rares. J'oserai, pour terminer, comparer les différentes catastrophes naturelles de ce numéro. Toutes ont des effets dévastateurs et méritent donc attention, recherches et mesures systématiques. Une analyse simpliste pourrait amener à conclure que les éruptions volcaniques sont un moindre mal car elles tuent moins que les autres. C'est sans aucun doute vrai pour le XX^e siècle, mais il ne faudrait pas oublier que les plus grosses éruptions sont très rares et que, lorsqu'elles ont lieu, c'est la population du globe toute entière qui en subit les conséquences.

Bibliographie

Claude Jaupart, «-Les volcans-», collection «-Dominos-», Flammarion, 1998.

Divers auteurs, «-La physique et la Terre-», Belin – CNRS Editions, 2000.

Divers auteurs, Encyclopedia of Volcanology, Academic Press, 2000.