

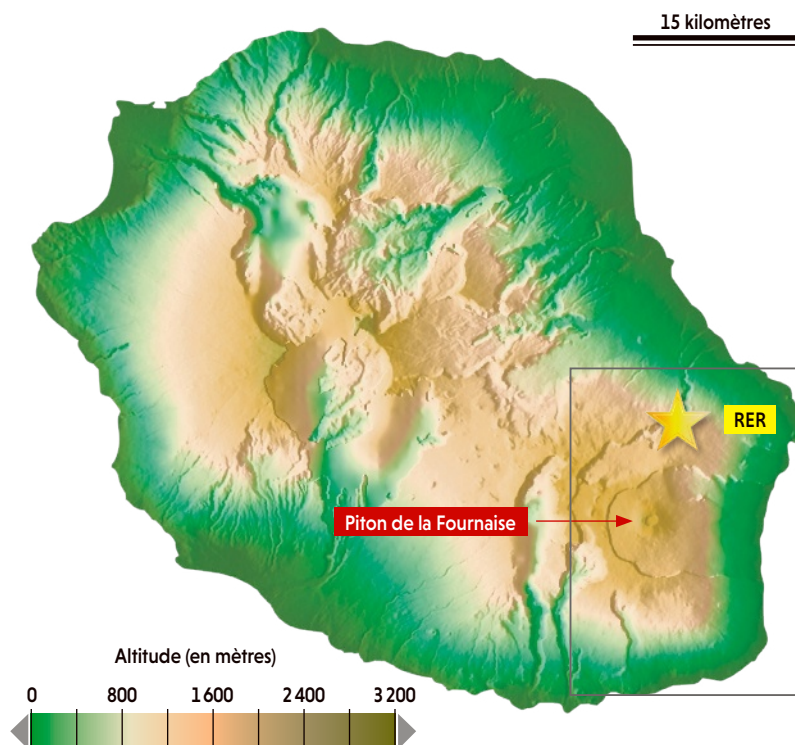
> vidée, elle a émis 150 kilomètres cubes de lave et formé une caldeira de 12,5 kilomètres de diamètre. Qu'arriverait-il à Naples si un tel phénomène se reproduisait à l'avenir, même avec une ampleur moindre?

Si elle est potentiellement très dangereuse, la formation d'une caldeira est heureusement un événement relativement rare à l'échelle de nos vies: en un siècle, seulement sept se sont produits à travers le monde (voir l'encadré page 58). C'est pourquoi l'enregistrement seconde par seconde des phases éruptives qui ont précédé et accompagné la formation d'une caldeira au piton de la Fournaise en 2007 est précieux: il nous a révélé le moyen de prédire avec quelques heures d'avance la formation d'une caldeira.

Comment? Grâce aux mesures réalisées à l'observatoire installé à son piémont par l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), qui fait de ce volcan du sud-est de l'île de La Réunion l'un des mieux étudiés du monde (voir les cartes ci-contre). Apparu il y a environ 530 000 ans, le piton de la Fournaise est dû à l'existence dans la région, depuis 65 millions d'années, d'un panache mantellique, c'est-à-dire d'une vaste remontée de matière chaude à travers le manteau terrestre (les 2885 kilomètres sous-jacents à la croûte terrestre). Avant 2007, les deux cratères de ce volcan formaient deux dépressions sommitales peu profondes: à l'ouest le cratère Bory, qui date de la première moitié du XVIII^e siècle, et à l'est le cratère du Dolomieu, formé en 1791. La nouvelle caldeira a beau être modeste, elle n'en est pas moins exceptionnelle, car sa formation a pu être suivie de minute en minute.

Tout a commencé en 2006, quand, après une activité intense, une éruption a, entre le 30 août et le 31 décembre, tellement rempli le cratère du Dolomieu que celui-ci a débordé par sa bordure inférieure. Cet épisode n'était qu'annonciateur: l'année suivante, des fissures se sont ouvertes, d'abord au sommet, puis sur le flanc sud-est et, enfin, à 7 kilomètres du sommet, à 590 mètres d'altitude au sud-est.

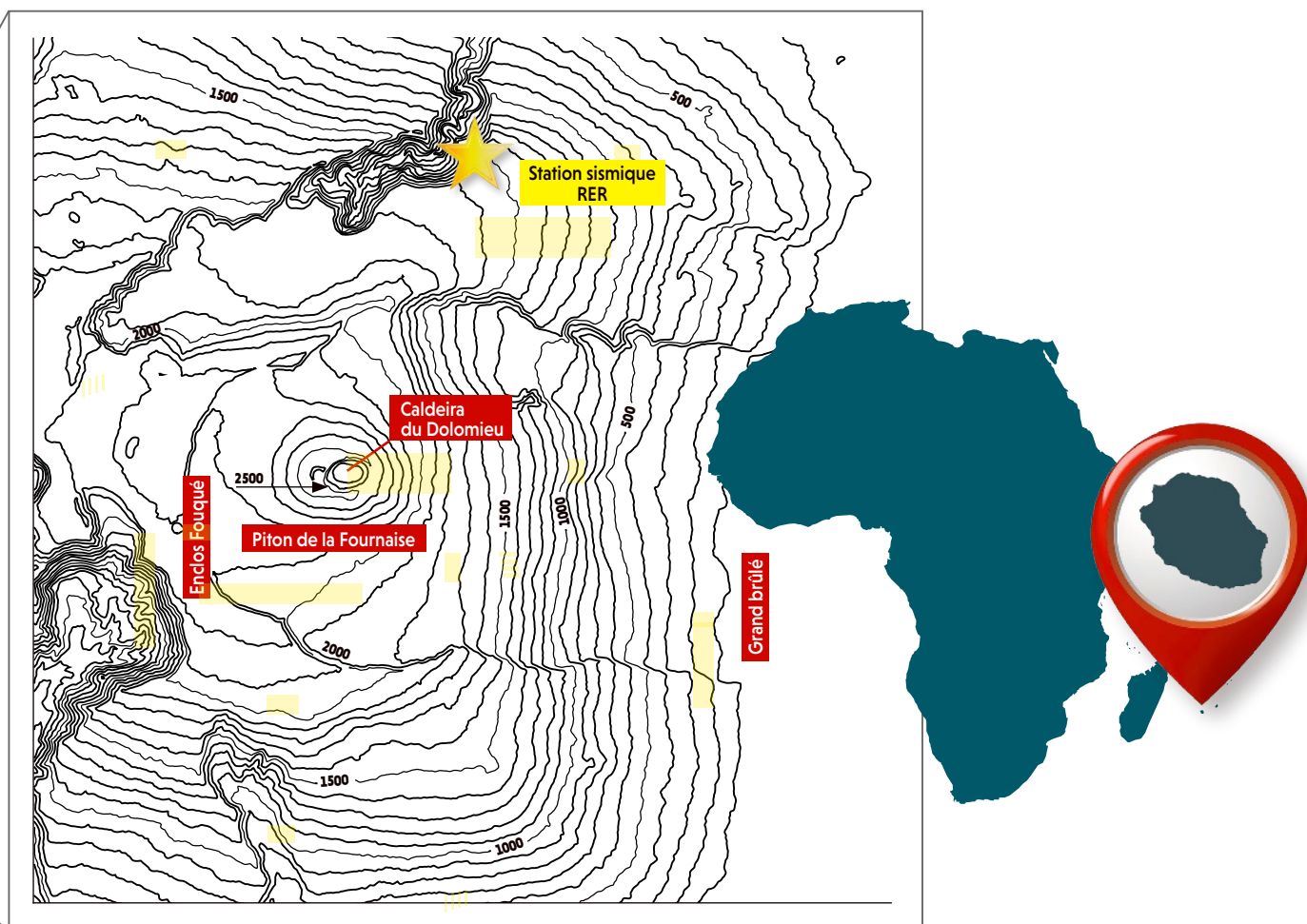
L'une des plus grandes éruptions connues du volcan a alors commencé: elle s'est déroulée en plusieurs épisodes du 18 au 19 février, du 30 au 31 mars et du 2 avril au 1^{er} mai. L'éruption d'avril a produit un volume de laves et d'intrusions – c'est-à-dire d'ouvertures de la roche du volcan par des filons de lave – que l'on estime à 0,24 kilomètre cube. Ce volume apparaît faible si on le compare aux volumes expulsés par d'autres volcans lors de la formation d'autres caldeiras (voir l'encadré page 58). Toutefois, la dépression du Dolomieu est assez importante pour que la séquence qui s'est déroulée lors de sa formation puisse être caractéristique de la formation d'une caldeira.



Le piton de la Fournaise se trouve à La Réunion, île française située à quelque 700 kilomètres à l'est de Madagascar. Plusieurs formations de caldeira ont structuré au cours du temps ce grand volcan bouclier culminant à 2632 mètres d'altitude. Ainsi, la caldeira du Dolomieu, qui s'est formée en 2007, se trouve au sein de l'enclos Fouqué, une caldeira de 9 kilomètres de large et de 13 kilomètres de long, bordée de falaises de 100 à 400 mètres de haut. Le piton de la Fournaise est l'un des volcans les mieux surveillés du monde, un observatoire volcanologique étant installé sur l'un de ses flancs.



La vidange de la chambre magmatique entraîne l'affaissement de la colonne de roches de la cheminée du volcan



Pour les volcanologues, cette séquence n'a *a priori* rien de mystérieux: il s'agit d'«un coup de piston». Le «piston» est constitué par la masse de roches *grosso modo* cylindrique surmontant la grande chambre magmatique sous pression, qui se trouve sous le volcan réunionnais, comme sous tous les grands édifices volcaniques. Les observations accumulées portant sur les sept formations de caldeiras les plus récentes suggèrent que la colonne de roches constituant le «piston» peut mesurer entre 1 et 12 kilomètres.

LE MODÈLE DE L'EFFONDREMENT D'UNE CALDEIRA

Durant une grande éruption, la vidange de la chambre magmatique entraîne l'affaissement de la colonne, lequel induit une résistance de la roche tout autour du «tube» dans lequel se déplace le cylindre de roches; pour le dire en termes de géophysicien, il se crée une contrainte cisailante annulaire s'opposant au déplacement du piston. Ces efforts mécaniques se traduisent par un gonflement de l'édifice volcanique tout

au long de la faille annulaire bordant la colonne de roches, suivi d'un dégonflement lorsque le piston s'arrête. Un «rebond élastique» se produit ainsi: après s'être déformées pour accommoder la pression latérale exercée par le piston, les roches de l'édifice volcanique reprennent leur forme initiale, démontrant par là que même si elles semblent extrêmement rigides à notre échelle, elles possèdent, à l'échelle du volcan, une certaine élasticité.

Au laboratoire GéoSciences Réunion de l'université de La Réunion et à l'observatoire volcanologique du piton de la Fournaise, nous avons suivi seconde par seconde la mise sous contrainte de l'édifice accompagnée d'un gonflement, puis le relâchement de ces contraintes. Tout cela ne s'est pas produit sans faire de «bruit», en d'autres termes sans l'émission de vibrations. Les descentes du piston ont systématiquement produit le même signal vibratoire caractéristique: des paquets d'ondes sismiques de très longues périodes et ayant sensiblement toujours la même durée.

Les ondes sismiques, rappelons-le, sont des propagations de déformations élastiques de la

LES EFFONDREMENTS RÉCENTS DE CALDEIRA

La formation d'une caldeira résulte d'une forte réduction du volume de la chambre magmatique, laquelle s'accompagne d'un effondrement d'une partie de l'édifice volcanique et d'éruptions à fortes émissions de laves ou de cendres. En 1991, par exemple, le Pinatubo en a émis de 3,7 à 5,3 kilomètres cubes; le Santorin, un volcan de la mer Égée entré en éruption il y a 3 500 ans, a émis 41 kilomètres cubes de matériaux; etc. Les formations de caldeira sont potentiellement très dangereuses, ce qu'illustre au mieux le cas de la caldeira du parc national de Yellowstone, aux États-Unis, évoqué dans l'article.

Heureusement, de tels événements catastrophiques sont rares à l'échelle géologique. De façon générale, la formation de caldeiras est rare à l'échelle de nos vies : seules sept caldeiras se sont formées au cours des cent dernières années. En 1968, il y a d'abord eu celle de l'île-volcan de Fernandina, aux Galápagos, puis en 1976 celle de l'énorme volcan Tolbachik, au Kamtchatka. De sinistre mémoire, l'effondrement en 1991 du cratère du Pinatubo, aux Philippines, s'est aussi accompagné de la



Le sommet du Pinatubo, aux Philippines, en train de s'effondrer le 1^{er} août 1991. La formation de la caldeira qui a résulté de cet effondrement a fait perdre beaucoup d'altitude au volcan.

formation d'une profonde dépression (voir la photographie ci-dessus). En 2000, le cratère de l'île-volcan de Miyake-jima s'est aussi effondré, puis en 2007 celui du piton de la Fournaise. En 2014-2015, une dépression s'est formée au cours de l'éruption du volcan islandais Bárðarbunga. Enfin, en 2018, le cratère du Kilauea, à Hawaï, s'est effondré en formant une dépression. Par chance, tous ces événements sont restés relativement modestes et, hors celui du Pinatubo, se sont produits à distance suffisante des zones peuplées pour ne pas occasionner de victimes.

Pour illustrer ce phénomène par des événements récents, détaillons un peu l'effondrement du Kilauea, en 2018, et celui de la caldeira de Bárðarbunga, en 2014-2015. Au Kilauea, le plancher de la caldeira s'est enfoncé d'environ 550 mètres à certains endroits, tandis que le débit de magma atteignait 1700 mètres cubes par seconde. Le lac de lave installé au sommet du volcan a alors disparu et les éruptions de la bouche éruptive

du Pu'u 'Ō'ō du Kilauea se sont interrompues : elles se poursuivaient depuis 1983 ! Le 1^{er} mai et le 4 août 2018, 62 effondrements se sont produits au sommet du volcan, distant de plus de 40 kilomètres de la sortie de lave. La baisse du plancher de la caldeira suggère une émission de lave de 0,825 kilomètre cube, valeur comparable au volume émis par la sortie latérale sur les basses pentes du Kilauea entre le 3 mai et début août 2018.

Quant à la formation de la caldeira de Bárðarbunga, nous nous en souvenons tous, car elle a perturbé le trafic aérien en Europe pendant les 180 jours qu'a duré l'éruption. Le volcan se trouvant en effet sous un glacier, des explosions magmatophréatiques (lave et eau) se sont produites, ce qui a dispersé de la cendre dans tout le ciel de l'Atlantique nord. Le plancher de cette caldeira s'est abaissé de quelque 65 mètres tandis que la fissure émettant de la lave se trouvait à 48 kilomètres de la dépression. Entre 1,3 et 1,7 kilomètre cube de lave a été émis.

> roche (laquelle tend à reprendre sa forme). Les ondes P (de compression), S (de cisaillement) et de surface, produites par les séismes d'origine tectonique (des glissements brusques de plaques) sont bien connues. Les ondes produites dans le cas qui nous intéresse sont très différentes. Ces paquets d'ondes de très basses fréquences (très longues périodes) et de durées à peu près égales d'une émission à la suivante sont comparables aux trains d'ondes sonores émis lors du glissement saccadé de deux objets l'un contre l'autre (un cylindre de charnière dans son gond par exemple), phénomène bien plus bref que les physiciens désignent par le terme de « collé-glissé » (*stick-slip*, en anglais). Dans le cas du rude glissement dans son tube volcanique de la colonne de roches sous-jacente à la caldeira de Miyake-jima, au Japon, en 2000, chaque train d'ondes

sismiques de basses fréquences a duré de l'ordre de 50 secondes.

Quelle influence exerce l'effondrement à l'origine d'une caldeira sur l'éruption qui la provoque ? Avant l'éruption, la pression exercée par la colonne de roches est contrebalancée par la pression régnant dans le réservoir, éventuellement entretenue, voire augmentée, par l'arrivée de magma. Toutefois, la vidange du réservoir en cours d'éruption abaisse la pression ; cela entraîne éventuellement un abaissement partiel du piston, donc une remontée de la pression, laquelle favorise la poursuite de l'éruption. La descente de la colonne de roches ne s'arrête que lorsque la différence entre la pression qu'elle exerce sur le magma et la contre-pression exercée par ce dernier cesse d'excéder la résistance au cisaillement le long de la faille annulaire entourant le cylindre de roches.