

années 1970, on ne calcule pas seulement l'évolution des galaxies individuelles. On modélise des volumes énormes d'univers. Quand nous explorons ces simulations aux plus grandes échelles, nous constatons que les galaxies ne sont pas distribuées de façon aléatoire. Au contraire, elles ont tendance à se concentrer dans un réseau de filaments qu'on nomme la toile cosmique. Nous voyons clairement la structure prévue quand nous scrutons le ciel avec les relevés astronomiques à grande échelle.

La toile cosmique est constituée de matière noire et de magnifiques ensembles de millions de galaxies, s'étalant sur des centaines de millions d'années-lumière. Des filaments en forme de cigares relient ces ensembles. Entre les filaments, on observe d'immenses vides dépourvus de galaxies. Les grandes, telles que la Voie lactée, ont tendance à se situer aux nœuds de la toile où se rejoignent plusieurs filaments (*voir l'encadré page ci-contre*).

Quand j'étais doctorant à l'Université de Durham en Angleterre, j'élaborais des simulations informatiques de ces régions denses. Je travaillais en particulier sur un modèle qui retraçait la formation de la Voie lactée et de son voisinage au fil des 13 milliards d'années de son histoire cosmique. Lorsque j'ai apporté un tracé des résultats à mon directeur de thèse, Carlos Frenk, il a examiné les figures pendant un moment, a secoué les papiers, et s'est exclamé : « Laisse tomber tout le reste ! Les galaxies satellites que tu étudies sont toutes situées sur le plan impossible de Kroupa ! »

Notre modèle ne reproduisait pas les prédictions antérieures des simulations informatiques, qui se résumaient à un halo uniformément peuplé de galaxies satellites autour de la Voie lactée. L'ordinateur prédisait plutôt la formation d'un plan de satellites qui ressemblait beaucoup à celui observé par les astronomes. Nous sentions que nos simulations commençaient à percer le mystère du mécanisme par lequel les galaxies naines ont adopté une configuration plane.

« Pourquoi ne fais-tu pas remonter tes simulations dans le temps pour voir d'où viennent les galaxies naines ? », m'a suggéré C. Frenk. Nous disposions du résultat final ; maintenant, il était temps d'examiner les étapes intermédiaires de la simulation.

En inversant le déroulement de la simulation, nous avons constaté que les galaxies naines ne provenaient pas de

la région entourant directement la Voie lactée. Elles ne se formaient pas dans le voisinage de la galaxie, mais plus loin dans les filaments de la toile cosmique. Ces régions, plus denses que les zones vides environnantes, attirent la poussière et le gaz voisins et les amalgament pour former des galaxies naissantes.

Une fois ces galaxies naines formées, la gravité les attire en direction de la région voisine la plus massive – dans notre cas la Voie lactée. Parce que notre galaxie se trouve en un nœud où se rencontrent plusieurs filaments, les galaxies naines se déplacent le long du filament qui leur a donné naissance et accélèrent dans notre direction. En d'autres termes, les filaments de matière noire servent d'autoroutes cosmiques pour les galaxies naines. Quand nous regardons le ciel et que nous voyons les galaxies dans un même plan et allant dans la même direction, ce que nous observons n'est en fait que la circulation galactique qui arrive en face de nous.

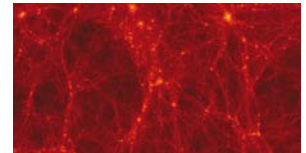
Un nouveau test

Certains scientifiques, comme P. Kroupa, restent sceptiques. Les modèles informatiques semblent reproduire les conditions observées autour de la Voie lactée avec suffisamment de précision, mais la théorie générale devrait aussi être capable de décrire le voisinage d'autres galaxies.

En janvier 2013, les astronomes cartographiant les environs de notre galaxie voisine, celle d'Andromède, ont trouvé un plan de galaxies naines satellites encore plus mince : ce plan a un diamètre d'un million d'années-lumière, pour une épaisseur de seulement 40 000 années-lumière. Cette nappe semble tourner exactement de la façon prévue par le scénario de P. Kroupa. Les simulations informatiques telles que la mienne, cependant, n'ont pas encore été capables de reproduire l'alignement des galaxies que nous voyons autour d'Andromède.

Mais les problèmes de la théorie de P. Kroupa demeurent : elle aussi est en désaccord avec certaines observations. L'histoire a montré que quand on se retrouve dans une telle impasse, les solutions définitives ne viennent qu'avec des données supplémentaires. Comme le faisait un jour remarquer Albert Einstein, « La nature n'a pas jugé devoir nous faciliter la découverte de ses lois. » ■

■ EN VIDÉO



Une simulation de la toile cosmique : www.ScientificAmerican.com/mar2014/cosmic-web

■ BIBLIOGRAPHIE

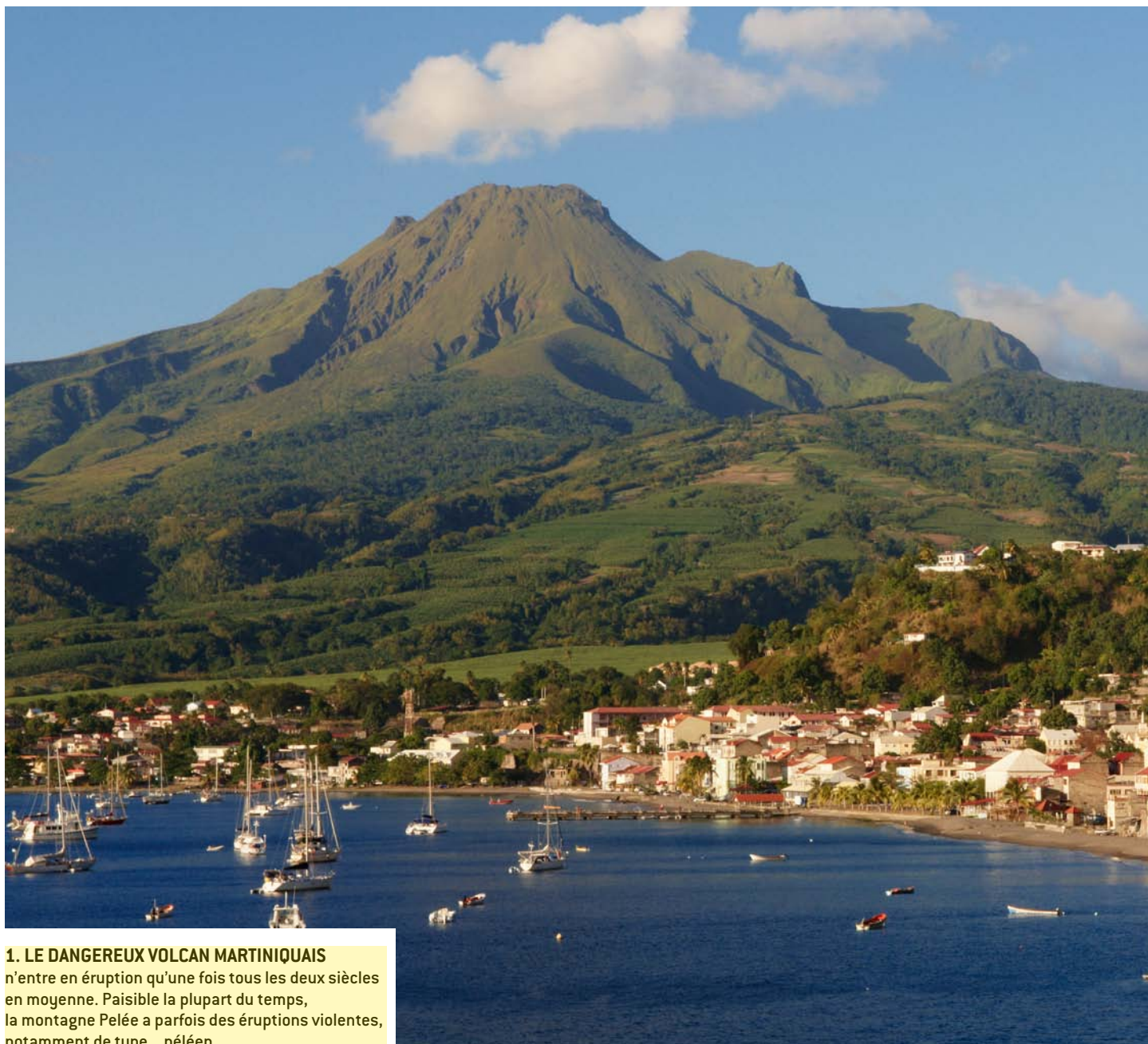
M. S. Pawlowski *et al.*, Dwarf galaxy planes : the discovery of symmetric structures in the Local Group, *MNRAS*, vol. 435(3), pp. 1928-1957, 2013.

N. I. Libeskind *et al.*, The preferred direction of infalling satellite galaxies in the Local Group, *MNRAS*, vol. 411(3), pp. 1525-1535, 2011.

N. I. Libeskind *et al.*, The distribution of satellite galaxies : the great pancake, *MNRAS*, vol. 363(1), pp. 146-152, 2005.

Les crises de la montagne Pelée

Caroline MARTEL



1. LE DANGEREUX VOLCAN MARTINICAIS

n'entre en éruption qu'une fois tous les deux siècles en moyenne. Paisible la plupart du temps, la montagne Pelée a parfois des éruptions violentes, notamment de type... péleén.

Le volcan actif le plus dangereux de France est la montagne Pelée, sur l'île de la Martinique. Le 8 mai 1902, il a anéanti en deux minutes la ville de Saint-Pierre, située au pied du volcan, et près de 30 000 vies. Aujourd'hui, ce volcan est surmonté par le dôme de lave grise construit par l'éruption de 1929-1932.

Son apparente tranquillité est trompeuse : dans le cas non improbable d'une nouvelle arrivée de magma dans le réservoir sous-jacent au volcan, son dôme pourrait se volatiliser, comme cela s'est produit en 1902. À l'époque, il a littéralement explosé et libéré une déferlante de gaz, de cendres et de blocs incandescents qui, dévalant les pentes du volcan à une vitesse de quelque 200 kilomètres par heure, ont tout ravagé sur leur passage. De telles nuées ardentes sont non seulement très turbulentes, mais aussi très riches en particules fines, donc hautement abrasives ;

elles débordent aussi largement des vallées qu'elles empruntent, ce qui augmente la surface détruite. Paradoxalement, le volume de matériau qu'elles transportent est relativement limité : en 1902, la ville de Saint-Pierre s'est retrouvée couverte de seulement quelques décimètres de cendre (voir la figure 3).

Grâce à des expériences de laboratoire reproduisant la décompression d'un magma, les géophysiciens expliquent la diversité des éruptions qu'a connues le volcan de la Martinique.

Or la montagne Pelée ne fait pas qu'émettre des nuées ardentes : elle peut aussi avoir des éruptions quasi inoffensives ou au contraire cataclysmiques. Les raisons de cette diversité de styles éruptifs sont longtemps restées mal identifiées. Ce n'est plus le cas depuis que l'on commence

à simuler en autoclave, c'est-à-dire dans des enceintes à pression et à température contrôlées par des dispositifs régulateurs, la décompression subie par le magma au cours de son ascension dans la cheminée volcanique. Comme nous allons l'expliquer, ces expériences révèlent les mécanismes différents menant à l'un ou à l'autre des styles éruptifs de la montagne Pelée.

La déferlante du 8 mai 1902, et les six qui suivirent jusqu'en août 1902, ont été décrites par le géologue français Alfred Lacroix (1863-1948). Elles sont devenues le cas de référence mondiale pour ce type d'éruption, sous l'appellation de « nuées ardentes péleennes ». Quant aux éruptions à l'origine de ces nuées, les volcanologues les nomment des éruptions péleennes. Elles sont précédées par l'accumulation dans le cratère de trains successifs de lave visqueuse qui produisent un dôme. Au cours d'un épisode éruptif,



L'ESSENTIEL

- La nuée ardente émise par la montagne Pelée le 8 mai 1902 a tué près de 30 000 personnes en deux minutes.
- Le même volcan a aussi eu des éruptions plus violentes ou au contraire quasi inoffensives.
- Pour comprendre l'origine de ces différences, les géophysiciens ont reproduit en laboratoire la décompression des magmas correspondant aux trois types d'éruption répertoriés.
- Le régime d'éruption de la montagne Pelée est contrôlé par la vitesse d'ascension du magma dans sa cheminée.

© Tullio/Corbis



2. L'ARC INSULAIRE DES PETITES ANTILLES est un chapelet de volcans créés par la subduction de la plaque nord-américaine sous la plaque caraïbe. Ce mouvement tectonique entraîne de la croûte océanique saturée d'eau en profondeur, ce qui provoque la fusion partielle

de roches, et un volcanisme, dont la montagne Pelée est un exemple. Situé à l'extrémité Nord de l'île de la Martinique, ce volcan est surtout dangereux pour la zone déjà dévastée par la nuée ardente de 1902, indiquée en gris ci-dessus.

une nuée ardente jaillit quand la pression des gaz dépasse la résistance de ce bouchon.

Toutefois, la montagne Pelée peut faire pire : elle présente aussi des émissions pliniennes. Nommées ainsi en raison du témoignage de Pline le Jeune (61-115) sur l'éruption du Vésuve en 79, ces éruptions s'accompagnent de l'émission pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours, de panaches de cendres et de pierres ponces de plusieurs kilomètres de haut. L'amplitude et la violence du phénomène produisent des effets destructeurs sur de vastes zones. À proximité du volcan, les dépôts de pierres ponces atteignent souvent plusieurs mètres de haut, et l'on en retrouve sur les îles et dans les contrées voisines.

À la montagne Pelée, une dizaine d'éruptions pliniennes ont été répertoriées. La dernière en date, celle de 1300, est particulièrement intéressante. En effet, elle a commencé par une éruption de type péleén accompagnée par une nuée ardente de même extension que celle de 1902, qui fut immédiatement suivie par un événement plinien. Imaginons un instant que se produise à la montagne Pelée une catastrophe comparable à celle du 8 mai 1902, suivie par plusieurs Pompéïs martiniquais... L'éruption de 1300 montre qu'il s'agit là d'un scénario à ne pas négliger.

À l'inverse, la montagne Pelée peut aussi avoir des éruptions moins dangereuses que

■ L'AUTEUR



Caroline MARTEL est volcanologue et chargée de recherche au CNRS. Elle travaille à l'Institut des sciences de la Terre d'Orléans (ISTO).

■ BIBLIOGRAPHIE

C. Martel, Eruption dynamics inferred from microlite crystallization experiments: Application to Plinian and dome-forming eruptions of Mt. Pelée (Martinique, Lesser Antilles), *J. Petrol.*, vol. 53, pp. 699-725, 2012.

J.-C. Tanguy, Rapid dome growth at Montagne Pelée during the early stages of the 1902-1905 eruption: A reconstruction from Lacroix's data, *Bull. Volcanol.*, vol. 66, pp. 615-621 2004.

C. Martel et al., Magma storage conditions and control of eruption regime in silicic volcanoes: Experimental evidence from Mt. Pelée, *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 156, pp. 89-99, 1998.

A. Lacroix, *La Montagne Pelée et ses éruptions*, Masson, 1904.

les éruptions péleennes ou pliniennes : les éruptions de type Merapi, nommées d'après le volcan indonésien du même nom. Ainsi, lors de l'éruption qui s'est déclarée en 1929, par exemple, le dôme de la montagne Pelée n'a pas explosé, mais s'est juste déstabilisé à mesure que le magma remontant des profondeurs repoussait le magma plus ancien ; des écoulements peu turbulents de cendres et de blocs incandescents se sont formés, qui ont emprunté les vallées autour du volcan sans dépasser quelques kilomètres d'extension. Peu dangereuses, les lourdes avalanches qui ont accompagné les éruptions de 1929-1932 avaient cependant la particularité de laisser des dépôts atteignant plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur à proximité de leur point d'émission.

Des éruptions inoffensives aussi

Enfin, la montagne Pelée peut aussi avoir des éruptions plus inoffensives encore : les éruptions phréatiques. Elles se produisent quand assez de magma arrive près de la surface pour vaporiser de façon explosive les eaux souterraines superficielles. Très peu dangereuses, les éruptions phréatiques n'impliquent pas d'émissions de magma, mais seulement d'importantes quantités d'eau vaporisée qui forment de