

et architectes, une pierre non dure plus ou moins poreuse employée dans le bâti, par opposition aux roches métamorphiques et aux marbres, quasiment sans porosité, mais aussi aux calcaires très compacts, datant en général du Jurassique ou du Crétacé (soit 200 à 65 millions d'années), que l'on trouve en Grèce.

LES PÔROS, DES PIERRES GÉOLOGIQUEMENT DIVERSES

Sur le plan géologique, cependant, la dénomination *pôros* ne correspond à rien – ni à un âge (crétacé, jurassique...), ni à une condition de dépôt (lacustre, marin...), ni à une granulométrie (grès grossier, grès fin...), ni à une composition chimique particulière (quartz, carbonate...). La porosité d'une roche évolue avec son enfouissement et les interactions qu'elle a eues avec l'eau, et n'en est donc pas une propriété spécifique.

Sur les deux sites, les *pôros* sont ainsi géologiquement très divers. À Délos, ils incluent des faciès continentaux, lacustres ou éoliens, des faciès marins et des faciès de plages, mais aussi des roches volcaniques et des roches volcanoclastiques. Ils proviennent peut-être de Milos ou de Santorin, les deux îles volcaniques proches où l'on retrouve ces faciès.

À Delphes, les *pôros* sont des grès marins plus ou moins grossiers, des dunes oolithiques (c'est-à-dire des dunes à grains sphériques qui se sont solidifiées) ou des travertins. Tous ces faciès sont présents autour du golfe de Corinthe, mais non à Delphes même, ni juste à proximité, car il n'y a quasiment pas de sédiments récents sur la côte nord du golfe. On peut ainsi conclure que les *pôros* de Delphes ont été importés.

Les provenances exactes et les carrières restent toutefois à préciser. Pour ce faire, les recherches pourront s'appuyer sur la géologie du golfe de Corinthe, qui a été beaucoup étudiée puisque c'est l'un des rifts les plus actifs au monde et la zone la plus fortement sismique d'Europe, et sur la comparaison avec les nombreuses autres villes antiques bordant le golfe, dont Corinthe et ses ports antiques Léchaion et Cenchrées, pour ne citer que les plus célèbres.

COMPRENDRE LES CHOIX DES BÂTISSEURS

Les provenances des pierres de construction ne sont qu'un des volets des recherches. Un autre porte sur la façon dont ces pierres ont été utilisées et la logique qui était derrière. Il est très rare que les bâtiments ne soient faits que d'une seule roche. Par exemple, pour le temple d'Apollon à Delphes, les bâtisseurs ont réalisé le mur qui soutient la terrasse en calcaire; les soubassements, non visibles à l'époque de l'activité du temple, en *pôros* (dont le type est à préciser); le plancher, en un calcaire gris

LES CALCAIRES DE DELPHES

Ce qui frappe avant tout le visiteur arrivant à Delphes, ce sont le site, les reliefs escarpés, le mont Parnasse, où les Grecs vont skier au nord, l'énorme falaise qui longe le site, la mer d'oliviers qui descend vers la côte. Mais cette beauté a un coût. La falaise est une faille active au rejet kilométrique, elle sépare les calcaires jurassiques dits « du Parnasse » des calcaires du Crétacé roses ou gris. Comme toutes les failles, elle joue un rôle majeur dans le drainage des fluides; sources et fontaines sont très nombreuses sur le site et à la base d'une grande partie des mythes autour de la Pythie. Revers de la médaille, des glissements de terrain du fait des tremblements de terre et des venues d'eau rapides ont aussi ponctué l'histoire du site. L'aspect des calcaires, leur couleur, la densité de fractures et de stylolithes (tracés en dents de scie) mais aussi les fossiles permettent assez facilement de reconnaître ces calcaires à l'œil nu. Le stade de Delphes est situé en haut du site, juste au pied de la faille; ses gradins sont en calcaire du Jurassique et une carrière dite « du stade » située juste au-dessus montre que les Anciens n'ont pas hésité à extraire des blocs de cette falaise/faille – dans des conditions sans doute très risquées pour les ouvriers. Le théâtre, en dehors de quelques éléments en marbre, est fait de ce même calcaire du Parnasse. En revanche, le temple actuel, rebâti après un glissement de terrain en 373 avant notre ère, est en calcaire du Crétacé terminal et provient d'une carrière située à 10 kilomètres à l'ouest du site, qui semble avoir été ouverte pour cette occasion. C'est le premier et apparemment seul bâtiment d'importance qui contient ce faciès. D'autres calcaires du Crétacé se retrouvent dans le spectaculaire mur de soubassement de la terrasse du temple; ils proviennent de carrières à l'est du site.

clair très dur provenant de la carrière située à une dizaine de kilomètres à l'est (voir l'encadré ci-dessus); les colonnes, en *pôros* de type dunes oolithiques, qui pourrait provenir de la zone de Corinthe au sud-est du golfe; les caniveaux permettant l'écoulement des eaux qui ruissellent parfois dans cette zone montagneuse, en brèche conglomératique; et le marbre était présent dans la statuaire, mais aussi dans certains éléments du toit. De toute évidence, il y a eu de la part des bâtisseurs un choix précis et raisonné qu'il reste à mieux comprendre. Les mesures pétrologiques en cours ainsi que la comparaison entre les différents édifices de la région devraient nous y aider.

Ainsi, alors que nous avons démarré ce projet avec l'idée classique que l'on construisait en pierres locales et que seuls les marbres, en particulier ceux destinés aux édifices prestigieux, étaient massivement importés, nos investigations ont mis en évidence qu'une grande partie des matériaux l'étaient. Même le vulgaire *pôros*, que l'on trouve essentiellement dans les soubassements et dans les cloisons où il était entièrement recouvert de stuc (contenant de la poudre de marbre), a pu être acheminé de très loin, c'est-à-dire à grands frais. La diversité des roches utilisées pour ces sanctuaires est surprenante et les zones d'importation de la pierre sont plus vastes qu'attendu. Il y a là une énigme archéologique qui reste à élucider. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. de Vals et al., **The stones of the Delphi Sanctuary – Northern shore of the Corinthian Gulf – Greece**, BSGF - Earth Sciences Bulletin, vol. 191, 11, 2020.

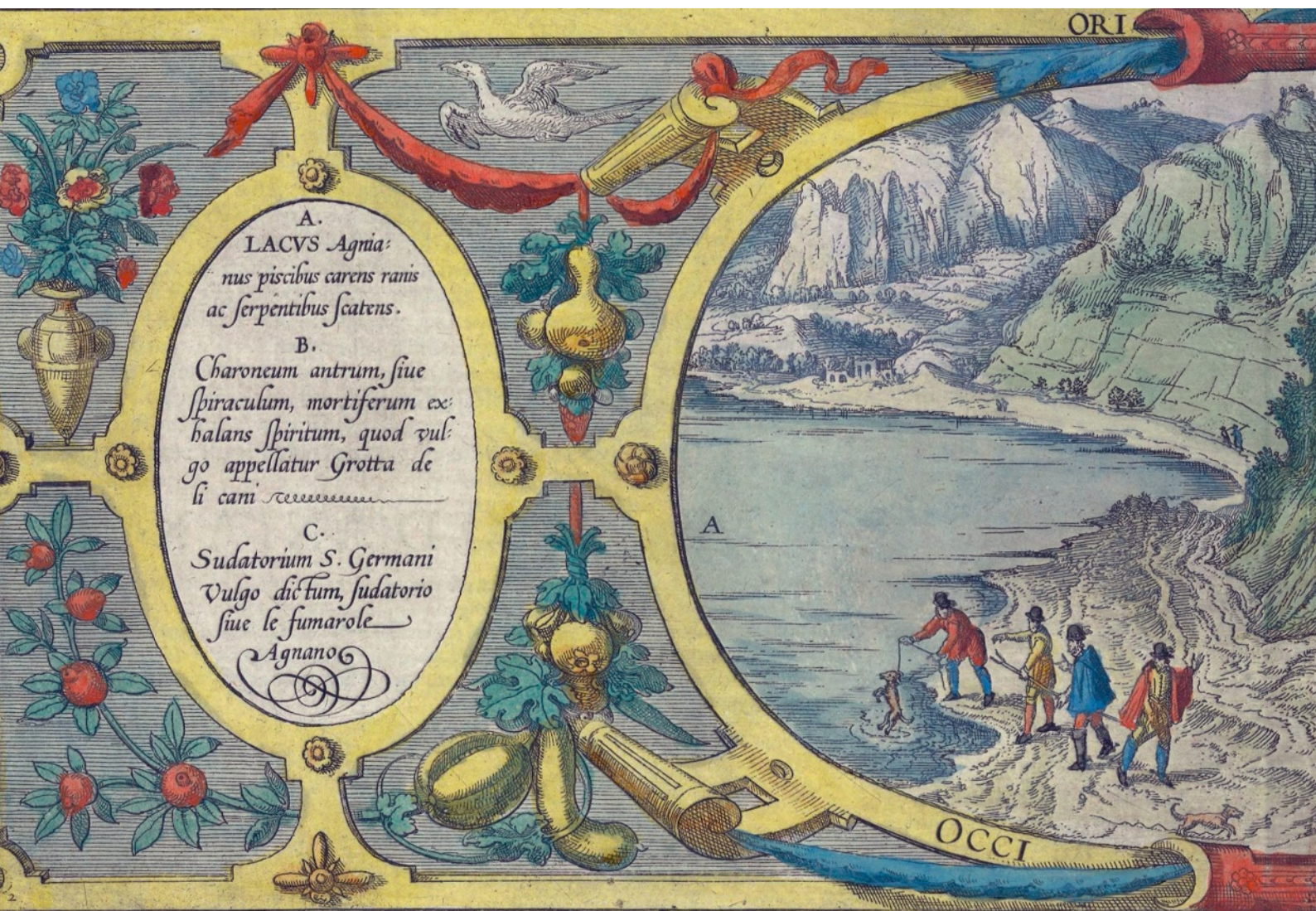
A. Perrier, **La réorganisation de l'espace du sanctuaire d'Apollon à Delphes au IV^e siècle av. J.-C.**, dans S. Montel et A. Pollini, *La question de l'espace au IV^e siècle avant J.-C. dans les mondes grec et étrusco-italique*, Presses univ. de Franche-Comté, pp. 71-91, 2019.

J.-C. Moretti, **L'architecture publique à Délos au III^e siècle a. C.**, dans J. des Courtils (éd.), *L'architecture monumentale grecque au III^e siècle a. C.*, Ausonius Mémoires 40, Bordeaux, 2015, p. 83-115.

L. Piccardi et al., **Scent of a myth : Tectonics, geochemistry and geomorphology at Delphi (Greece)**, *Journal of the Geological Society*, vol.165(1), pp. 5-18, 2008.

Le mythe de la Grotte du chien

Pourquoi les chiens perdaient-ils connaissance dans une grotte près de Naples? Cette énigme de la Renaissance non seulement contribua à la diffusion des sciences, mais fut aussi une étape clé de la découverte et de la caractérisation du dioxyde de carbone.



L'ESSENTIEL

> À la fin du xvi^e siècle, une grotte près de Naples intrigua nombre de savants : les chiens y perdaient connaissance, mais se réveillaient une fois sortis.

> On ne comprit la nature des vapeurs toxiques à l'œuvre que dans la seconde moitié du xviii^e siècle, quand un jeune médecin écossais, Joseph Black, découvrit le dioxyde de carbone.

> Profitant de l'engouement pour les cabinets de curiosité et les voyages en Europe au xviii^e siècle, la grotte de Naples connut un grand succès.

> Au xix^e siècle, une réplique à Royat-Chamalières, en Auvergne, contribua à son tour à la diffusion des sciences, sans chien cette fois !

LES AUTEURS



THIERRY LEFEBVRE
maître de conférences
à l'université de Paris
et membre du Comité
des travaux historiques
et scientifiques (CTHS)



CÉCILE RAYNAL
pharmacienne
et membre de
la Société d'histoire
de la pharmacie

La Grotte du chien, au bord du lac Agnano, près de Naples, sur une copie de 1645 de l'estampe qui la rendit célèbre, du peintre flamand Georg Hoefnagel (années 1580).



Vera
delimitatio lacus Ani
ani, Antriq; letalis, In
montem facti non Ampli
nec longi: sed sensim In arc-
tum desinentis, In quod si
animal vivum Ingressum seu
Intromissum fuerit, subito mo-
ritur; Si tamen repente extrac-
tum In subiectum lacum
proijciatur, paulatim ad
se redit ac reuiuiscit, In
canibus sepe fac to
periculo.

Pendant des millénaires, les humains ont respiré du dioxyde de carbone sans le savoir et sans même en soupçonner l'existence. Invisible et inodore, ce gaz ne se signalait guère que par les phénomènes inquiétants qui en découlaient parfois (malaises pouvant aller jusqu'à l'asphyxie). En raison de sa densité supérieure à celle de l'air, il s'accumulait de manière insidieuse dans les endroits confinés : les mines, les chais et les celliers, mais également des cavernes dites « méphitiques » (du latin *mephitis*, qualificatif utilisé pour désigner les exhalaisons toxiques). Certaines de ces grottes sont même devenues des attractions très prisées pendant plusieurs siècles – et constituent aujourd'hui des témoins précieux à la fois de l'histoire de la chimie et de celle de la vulgarisation scientifique.

UN MYTHE NAÎT...

Cet engouement a commencé pendant la Renaissance lorsqu'une grotte, située non loin de Naples, a accédé à la célébrité. Il s'agissait d'une galerie de sondage creusée par des prospecteurs de l'Antiquité, probablement entre les III^e et II^e siècles avant notre ère, sans doute afin de mettre au jour une de ces sources minérales qui faisaient alors la renommée de cette région au riche patrimoine thermal.

Haut de deux mètres et large d'une soixantaine de centimètres, ce modeste couloir souterrain s'enfonçait, avec une déclivité d'environ 30%, dans la paroi sud-orientale du cratère d'Agnano. Une descente très courte de surcroît : à peine une douzaine de mètres qui se terminaient en cul-de-sac dans une salle parallélépipédique de 32 mètres carrés, dont tout indique qu'elle dut servir de *sudatorium*.

Les siècles passèrent. L'antique galerie de cure tomba d'autant plus profondément dans

l'oubli que des « vapeurs puantes et toxiques » s'y étaient infiltrées au fil des remaniements géologiques, si coutumiers dans cette région volcanique dite « des Champs phlégréens ».

Au XI^e siècle, l'eau envahit le cratère, donnant naissance à un petit lac. On peut imaginer que la proximité de cette rive pittoresque relança l'intérêt pour la cavité redoutée. Les paysans des environs utilisèrent alors sa nocivité pour mettre au point un petit « spectacle » lucratif, qui ne laissait pas de surprendre les



Pour le chimiste flamand Van Helmont, la grotte contenait un « Gas »

curieux de passage : un animal, en général un chien, était traîné de force au fond de la galerie, jusqu'à ce qu'il suffoque et perde connaissance ; ramené à l'air libre dans un état de mort apparente, il se voyait ensuite plongé dans l'eau du lac et recouvrait peu à peu ses esprits, au grand étonnement des badauds. Quelque chose d'imperceptible et de potentiellement mortel occupait cette excavation.

Vers le milieu du XVI^e siècle, les historiens Benedetto Di Falco et Leandro Alberti furent parmi les premiers à évoquer cette « attraction » dans leurs ouvrages respectifs consacrés à la description de l'Italie, et plus particulièrement aux merveilles antiques de la région de Naples. Puis, au début des années 1580, une magnifique estampe du peintre flamand Georg Hoefnagel, maintes fois rééditée et copiée par la suite, en fournit une représentation pour ainsi dire canonique : l'image invita les plus téméraires au voyage et fit rêver nombre de sédentaires (voir pages 74-75). Ainsi naquit le mythe de la *Grotta del Cane* (« Grotte du chien »).

LA SCIENCE DES MOFETTES

Des savants tentèrent d'élucider ce double mystère : quelle était la nature de ces « vapeurs » ? Et d'où venaient-elles ? Le chimiste flamand Jan Baptist Van Helmont fut le premier à émettre une hypothèse satisfaisante. Mais, trop en avance sur son temps, sa proposition ne fit pas école. Ayant fait brûler 62 livres de charbon de bois dans son laboratoire, Van Helmont n'avait récolté, en tout et pour tout, qu'une livre de cendres. Il en avait conclu que 61 livres d'un « esprit sauvage » (*spiritus silvestris*) invisible s'étaient dégagées. Il avait

Dans la *Grotta del Cane*, le dioxyde de carbone émanait de crevasses et de fissures au sol. Plus lourd que l'air, il stagnait au sol, piégé par la pente de la grotte, comme l'illustre ce dessin de 1832.





nommé «Gas» cet esprit et proposé que ce dernier explique les effets funestes des cavités méphitiques comme la *Grotta del Cane*. Mais il ne l'avait pas démontré.

D'autres, moins visionnaires, se rendirent sur place pour y réaliser des expériences souvent redondantes: ce fut le cas, par exemple, du prélat espagnol Juan Caramuel y Lobkowitz, ou encore de l'encyclopédiste allemand Athanasius Kircher qui fit l'hypothèse que les «vapeurs» toxiques pouvaient avoir leur origine dans «l'ocre, le sable, l'orpiment et l'arsenic».

La science des «mofettes», mot également tiré du latin *mephitis*, utilisé ici pour désigner certaines cavités asphyxiantes, battait désormais son plein. Elle eut bientôt son maître incontesté: le médecin napolitain Leonardo Di Capua, cofondateur de l'*Accademia degli investigatori*. Ses *Lezioni intorno alla natura delle mofete* («Leçons sur la nature des mofettes»), publiées à Naples en 1683, puis à Cologne en 1714, firent longtemps autorité. Selon ce savant, la «vapeur» qui se dégageait de ces cavités était due à la décomposition de résidus d'origines minérale, végétale voire animale. Son origine volcanique ne faisait pas encore consensus. À leur décharge, les investigateurs du XVIII^e siècle ne disposaient pas d'instruments adaptés et se trouvaient donc dans l'impossibilité d'isoler les substances accumulées au fond de la grotte.

Les progrès vinrent du Royaume-Uni. En 1755-1756, le jeune Écossais Joseph Black parvint à mettre en évidence un gaz qu'il

baptisa («peut-être improprement», reconnaissait-il en toute humilité) «air fixé» ou «air fixe» (*fixed air*). À défaut de se parer de son nom moderne, le dioxyde de carbone venait d'acquiescer ses premières lettres de noblesse (voir l'encadré page 78).

Quelques années plus tard, le Britannique Henry Cavendish démontra que cet «air fixe» était plus dense que l'air, ce qui expliquait son accumulation dans les zones basses des chais, pressoirs et autres cavités méphitiques.

Enfin, en 1770, un jeune médecin écossais et ancien élève de Black, John Mervin Nooth, se rendit à la *Grotta del Cane* à l'occasion d'un séjour en Italie: il démontra, au terme d'expériences malheureusement mal documentées, que l'«air fixe» était bien à l'origine des incidents constatés.

Bien plus tard, au début du XX^e siècle, grâce entre autres au physiologiste écossais John Scott Haldane, on comprit que la dangerosité du dioxyde de carbone résultait de sa fixation sur l'hémoglobine, la protéine qui transporte dans le sang les gaz respiratoires (l'oxygène et le dioxyde de carbone), et que l'oxygène pouvait aisément lui être substitué: de là, l'explication des mystérieuses «résurrections» canines...

SOUS LA PLUME DE DUMAS

La résolution de l'énigme scientifique ne mit pas pour autant fin au mythe de la *Grotta del Cane*, bien au contraire! Pendant plus d'un siècle, elle continua à attirer de nombreux >

Jusqu'au XIX^e siècle, la Grotte du chien italienne attira de nombreux curieux, avant de tomber dans l'oubli après le drainage du lac d'Agnano.

> savants et voyageurs : Mozart la visita avec son père en 1770, Goethe en 1787, ainsi que Sade (1776), Flaubert (1851), Twain (1867)...

Il faut dire que depuis le XVIII^e siècle, la mode était aux cabinets de curiosités et aux démonstrations publiques des prodiges de la science. Le « spectacle curieux » des effets produits par le gaz carbonique participa de ce mouvement de vulgarisation, au même titre que les merveilles de l'électricité et de l'astronomie. Dans le même temps, la vogue du « Grand Tour », ce voyage d'initiation à travers l'Europe que s'accordaient les jeunes élites, culminait. La *Grotta del Cane* se situait à la croisée de ces deux engouements complémentaires.

En 1835, Alexandre Dumas se rendit à Agnano avec son ami Louis Godefroy Jadin. Il relata cette excursion quelques années plus tard dans *Le Corricolo* (1843) : « Le tour du malheureux chien était venu. Son maître le poussa dans la grotte sans qu'il opposât aucune résistance ; mais, une fois dedans, son énergie lui revint, il bondit, se dressa sur ses pieds de derrière pour élever la tête au-dessus de l'air méphitique qui l'entourait. Mais tout fut

inutile : bientôt un tremblement convulsif s'empara de lui, il retomba sur ses quatre pattes, vacilla un instant, se coucha, roidit ses membres, les agita comme dans une crise d'agonie, puis tout à coup resta immobile. Son maître le tira par la queue hors du trou ; il resta sans mouvement sur le sable, la gueule béante et pleine d'écume. Je le crus mort. »

Dumas assista ensuite au « miracle » maintes fois rapporté par les auteurs des siècles antérieurs : « Bientôt l'air extérieur agit sur lui, ses poumons se gonflèrent et battirent comme des soufflets ; il souleva sa tête, puis l'avant-train, puis le train de derrière, demeura un instant vacillant sur ses quatre pattes comme s'il eût été ivre ; enfin, ayant tout à coup rassemblé toutes ses forces, il partit d'un trait et ne s'arrêta qu'à cent pas de là. »

Les manuels scolaires de la seconde moitié du XIX^e siècle s'emparèrent, à leur tour, de ce qui s'apparentait désormais de plus en plus à un poncif : désormais, point d'exposé sur le « gaz carbonique » sans qu'il fût fait référence à cette caverne singulière ! Anton Tchekhov s'en moqua gentiment dans une nouvelle

LES DÉBUTS DE LA « CHIMIE DES GAZ »

Pour sa thèse de médecine soutenue en 1754, l'Écossais Joseph Black s'était penché, entre autres, sur les propriétés chimiques d'un purgatif, la *magnesia alba* (ancien nom du carbonate de magnésium $MgCO_3$). Une version retravaillée de sa dissertation fut lue l'année suivante devant les membres de la *Philosophical Society* d'Édimbourg, puis imprimée en 1756 dans la revue de cette société savante, *Essays and observations : Physical and literary*. Elle marque la découverte du dioxyde de carbone (CO_2).

Au cours de ses expériences, Black avait constaté que lorsqu'il soumettait la *magnesia alba* à l'action d'un acide (par exemple l'« esprit de sel »



An experiment on a bird in the air pump, gravure d'après Joseph Wright (1768). Au XVIII^e siècle, les démonstrations scientifiques publiques des pompes à air et de l'effet de sa raréfaction sur de petits animaux ou des modèles de poumons étaient répandues en Grande-Bretagne.

ou HCl), il se dégageait un « air » spécial qu'il était parvenu à isoler et à peser au moyen d'une balance de précision. Par ailleurs, cet « air » pouvait être « fixé » par la chaux vive (CaO), d'où le nom d'« air fixe » ou « fixé » que lui attribua le chimiste. On représente aujourd'hui

ces réactions de la manière suivante :

$$MgCO_3 + 2 HCl \rightarrow MgCl_2 + H_2O + CO_2$$

$CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$
Black comprit que cet « air fixe » n'était autre que le « Gas » entrevu un siècle plus tôt par Jan Baptist Van Helmont et il rendit un vibrant hommage au

savant flamand. Il reprit également à son compte les hypothèses du maître, en particulier celle qui attribuait à cet « air fixe » les effets funestes des celliers et de la *Grotta del Cane*. Mais là encore, sans le démontrer formellement, puisqu'il n'eut pas l'occasion de se rendre sur place...

intitulée *Zinotchka* (1887). Le jeune Pétia, âgé de 8 ans, en venait à douter de l'étendue de la culture scientifique de sa répétitrice: «Cette malheureuse Grotte du chien, près de Naples, constitue, en chimie, le fin du fin au-delà duquel toute gouvernante décide de ne pas s'aventurer. Zinotchka défendait toujours avec chaleur l'utilité des Sciences naturelles, mais je doute qu'elle connût en chimie autre chose que cette grotte.»

Le déclin de cette curiosité pluriséculaire était amorcé. Le lac d'Agnano fut drainé entre 1865 et 1870 afin d'assainir la région, où sévissait le paludisme. L'ancien sentier lacustre, jadis si propice à la rêverie et à la découverte, fut dès lors déserté et la grotte retomba peu à peu dans l'oubli. Elle fit même office de décharge sauvage dans la seconde moitié du ^{xx}e siècle!

Réhabilitée depuis peu par le *Gruppo archeologico napoletano*, elle suscite aujourd'hui un regain d'intérêt: le 16 juin 2019 s'est ainsi tenue à Naples une conférence scientifique intitulée «Dai campi flegrei a Marte: ricerca alla Grotta del Cane» («Des Champs phlégréens à Mars: recherches à la Grotte du chien»).

UNE RÉPLIQUE DANS LES MONTS D'Auvergne

La *Grotta del Cane* n'était évidemment pas la seule caverne méphitique dans le monde. D'autres, quoique moins renommées, étaient signalées ici et là, en particulier en France. La nature volcanique du Massif central et du Vivarais, démontrée au cours de la seconde moitié du ^{xviii}e siècle, expliquait désormais l'existence de ces mofettes jusqu'alors tant redoutées par les paysans.

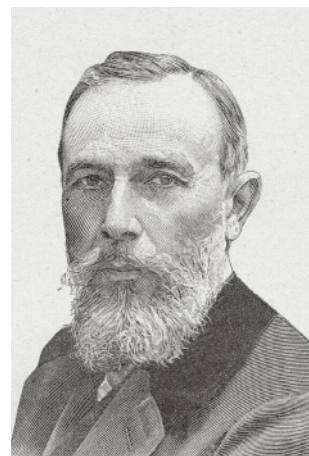
En 1830, à Montpensier, dans la vaste plaine de la Limagne, l'académicien des sciences Jean-Pierre-Joseph d'Arcet imagina de répliquer l'«attraction» napolitaine en faisant construire, au-dessus d'une «fontaine empoisonnée» (en pratique, une source carbogazeuse particulièrement riche en dioxyde de carbone), un petit bâtiment «présentant toutes les facilités désirables pour bien exécuter l'expérience qui [avait] fait la réputation de la Grotte du chien». Grâce à cet aménagement, assurait-il, «le pays [trouverait] un exemple utile des ressources que peut présenter l'industrie, et un encouragement pour augmenter l'intérêt [...] de son sol et de ses sites». Ce projet ne vit cependant pas le jour.

Vers 1875, un jeune médecin clermontois, Alexandre Petit, devint propriétaire d'une vaste cave de sinistre réputation, située à une centaine de mètres de la station thermale florissante de Royat où il avait pris l'habitude d'exercer durant la saison des cures. Cet «étouffis» (terme local pour désigner une mofette) était connu de longue date. La «grotte Saint-Mart», comme on l'appelait alors, donnait lieu

à un phénomène similaire à celui de la *Grotta del Cane*: une couche de dioxyde de carbone d'une cinquantaine de centimètres environ, provenant de toute évidence des entrailles du petit puy de Dôme, y stagnait en permanence. On pouvait donc y reproduire la plupart des expériences qui avaient fait la réputation de l'excavation italienne: en particulier, les petits animaux, maintenus contre leur gré dans l'atmosphère délétère, perdaient connaissance au bout d'un délai variable selon les espèces.

La cave auvergnate bénéficiait cependant d'un avantage considérable sur son modèle italien, comme le rappelait en septembre 1875 un article de la *Gazette des eaux*: «La grotte Saint-Mart est plus curieuse encore que celle du Chien, à Naples, car celle de Naples n'a qu'un mètre de large et trois mètres de profondeur [sic], tandis que la grotte Saint-Mart a 18 mètres d'ouverture.»

Soucieux de mettre cette curiosité à la disposition des voyageurs et curistes, toujours plus nombreux en cette fin du ^{xix}e siècle, Petit fit réaliser d'importants aménagements, tant aux abords qu'à l'intérieur de la cave. Au fil des ans, la «Grotte du chien» (ce devint rapidement sa désignation commerciale) s'imposa



À la fin du ^{xix}e siècle, le médecin clermontois Alexandre Petit transforma une cave auvergnate sujette aux émanations de dioxyde de carbone en un lieu de vulgarisation qui, à son tour, attira de nombreux touristes.

Mozart visita la grotte de Naples en 1770, ainsi que Goethe, Sade, Flaubert, Twain...

comme un lieu de vulgarisation à part entière. Elle se dota en annexe, dans un chalet pittoresque, d'un petit «musée géologique» et d'une boutique où étaient mis en vente des «collections minéralogiques», des «pétrifications» et des ouvrages scientifiques ou à caractère historique.

Une cour intérieure en plein air, conçue dans un style évoquant les vestiges des anciens thermes gallo-romains, était équipée de chaises et d'un petit banc. En attendant leur tour, les visiteurs pouvaient laisser errer leur regard sur une décoration des plus curieuses: ici, une stèle romaine; là, une statue antique; plus loin, sous un auvent, un grand panorama de 12 mètres carrés, réalisé par le peintre auvergnat Gaston Maurie et intitulé *Les Dernières Éruptions volcaniques des monts Dômes*.

TOURISTES visitez à ROYAT



La Célèbre GROTTTE DU CHIEN

Son musée, sa caverne volcanique, ses expériences.

POUR TOUTS RENSEIGNEMENTS Téléphonez 73 19 05 50

Boulle D. ARNAUD - Clamart 75

Le banc des belles-mères a-t-il contribué au succès de la Grotte du chien de Royat-Chamalières? Peut-être, si l'on en croit l'une des premières affiches publicitaires du lieu...

> Mais le clou était évidemment la visite proprement dite de la grotte, sous la conduite d'un guide, seul habilité à en ouvrir la porte et à en dévoiler le secret pluriséculaire. Là, installé sur une estrade dressée en surplomb de la nappe de gaz carbonique, le cicérone débitait son boniment dans une semi-pénombre propice au mystère. Il agrémentait ses propos d'expériences amusantes de physique et chimie: il remplissait un arrosoir de dioxyde de carbone et en versait le contenu sur une bougie allumée qui s'éteignait aussitôt; il fabriquait des bulles de savon qui venaient rebondir sur la couche de gaz invisible; il manipulait des feux grégeois... Dans un coin de la grotte, le «banc des belles-mères», source intarissable de plaisanteries plus ou moins subtiles, ajoutait une touche d'ironie (voir l'affiche ci-dessus).

À ROYAT-CHAMALIÈRES, DU PUBLIC, MAIS PAS DE CHIEN!

Le spectacle était donc bon enfant. Surtout, on n'y torturait plus les chiens pour les besoins de la démonstration. En effet, depuis 1850, la «loi Grammont» (du nom du général Jacques Delmas de Grammont, député de la Loire,

auquel il faut rendre ici hommage) interdisait en France ce genre de spectacle barbare. Au début du xx^e siècle, le *Guide Joanne* insistait lourdement sur ce point: «L'expérience du chien ne se fait pas ici: elle est interdite par la loi Grammont; le gardien se borne à plonger dans le gaz une flamme qui s'éteint aussitôt.»

La Grotte du chien de Royat-Chamalières traversa tout le xx^e siècle, avec des hauts et des bas. Mais il fallut bientôt se rendre à l'évidence: la curiosité était passée de mode et son exploitation s'avérait peu rentable. L'adjonction d'une petite salle audiovisuelle, à l'étage du chalet d'accueil, n'y fit rien. Dans le même temps, les normes de sécurité et d'accessibilité devenaient de plus en plus contraignantes.

Cette «grotte scientifique unique en France» dut donc fermer définitivement ses portes en 2004. Depuis, le silence est retombé sur ce lieu jadis si animé, même si la ville de Chamalières, qui en est propriétaire, s'efforce de trouver une solution. À l'heure où l'on parle beaucoup de relocalisations, on ne peut que souhaiter la réouverture de ce lieu patrimonial, témoignage d'une époque où la science était une véritable fête. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Lefebvre et C. Raynal, **Voyage en CO₂. De la Grotta del Cane de Naples à la Grotte du chien de Royat-Chamalières**, Glyphe, 2020.

B. Bensaude-Vincent et S. Loeve, **Carbone : ses vies, ses œuvres**, Le Seuil, 2018.

W. R. Halliday et A. Cigna, **The Grotta del Cane (Dog Cave), Naples, Italy**, *Cave and Karst Science*, vol. 33, n°3, 2006.



Comment les sciences peuvent-elles nous aider à appréhender l'après-crise ?

Comment vivre avec le numérique dans le respect des règles éthiques primordiales pour notre liberté ?

« **Et après ?** », une collection de livres numériques pour penser le monde d'après



R

ENDEZ-VOUS

P.82 Logique & calcul
 P.88 Idées de physique
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

LE SECRET D'ARSÈNE LUPIN : LES SUPER-PERMUTATIONS

Comment représenter toutes les permutations possibles d'un ensemble par une courte séquence ? Ce jeu de tassement n'intéresse pas seulement les mathématiciens : il peut aussi aider les étourdis, les cambrioleurs et les voyageurs de commerce.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
 professeur émérite
 à l'université de Lille
 et chercheur au
 laboratoire Cristal
 (Centre de recherche
 en informatique, signal
 et automatique de Lille)



Jean-Paul Delahaye a notamment publié : **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

Certains problèmes simples passionnent les amateurs de mathématiques et les conduisent aux sommets de la recherche. Le problème dont nous allons parler dans cette rubrique est de cette catégorie. Plus étrange et plus rare, une avancée dans les recherches menées sur les superpermutations provient d'un contributeur qui a souhaité rester anonyme ! De surcroît, les mathématiques des superpermutations peuvent intéresser les cambrioleurs et les étourdis qui ont oublié leur code.

Les permutations d'un ensemble sont les différentes façons d'en classer les éléments. Il y a par exemple 6 permutations possibles d'un ensemble de trois éléments $\{1, 2, 3\}$ qui sont : 123, 132, 213, 231, 312 et 321.

Dans le cas d'un ensemble ayant n éléments, il y a $n! = n(n-1) \dots 3 \cdot 2 \cdot 1$ permutations possibles. Le nombre $n!$ (« factorielle n ») croît très rapidement avec n :

$1! = 1$; $2! = 2$; $3! = 6$; $4! = 24$; $5! = 120$; $6! = 720$; $7! = 5040$; $8! = 40320$; $9! = 362880$; $10! = 3628800$; $11! = 39916800$; $12! = 479001600$; $13! = 6227020800$; $14! = 87178291200$; etc.

Le problème des superpermutations pour n consiste à proposer une suite d'entiers compris entre 1 et n , aussi courte que possible, dans laquelle on trouve chaque permutation de $\{1, 2, \dots, n\}$ comme séquence d'éléments côte à côte.

Pour $n=2$, la suite 121 de longueur 3 est une superpermutation, car on y trouve 12 et 21 qui sont les deux seules permutations

de $\{1, 2\}$. En échangeant le rôle de 1 et de 2, on obtient une seconde superpermutation de longueur 3 : 212. Cette possibilité d'obtenir d'autres superpermutations de même longueur dès qu'on en a une fonctionne bien sûr pour tout n , et chaque superpermutation trouvée pour n en donnera $n!$ de même longueur, puisqu'il y a $n!$ façons de permuter les symboles de $\{1, 2, \dots, n\}$.

PREMIÈRES SUPERPERMUTATIONS

Pour $n=3$, la séquence 123121321 est une superpermutation ; on y trouve bien les 6 permutations 123, 132, 213, 231, 312, 321, dans l'ordre 123, 231, 312, 213, 132, 321.

Pour la construire, on a pris les 6 permutations et on les a mises les unes derrière les autres en choisissant un ordre permettant de les fusionner au mieux. Derrière 123, on a choisi de mettre 231, ce qui, en les fusionnant, donne 1231 et fait donc gagner 2 symboles par rapport à une juxtaposition sans fusion.

La superpermutation proposée pour $n=3$ a pour longueur 9. Est-il possible d'avoir plus court ? La réponse est non. Pour s'en persuader, il faut faire un petit raisonnement (voir l'encadré 1).

Pour des n supérieurs à 3, on peut procéder par tâtonnement ou en utilisant des programmes qui explorent tous les cas possibles. On va voir qu'on rencontre vite les limites de capacité de calcul de nos ordinateurs, car la croissance exponentielle de $n!$ est vraiment très rapide. Il existe cependant des raisonnements généraux donnant des informations sur