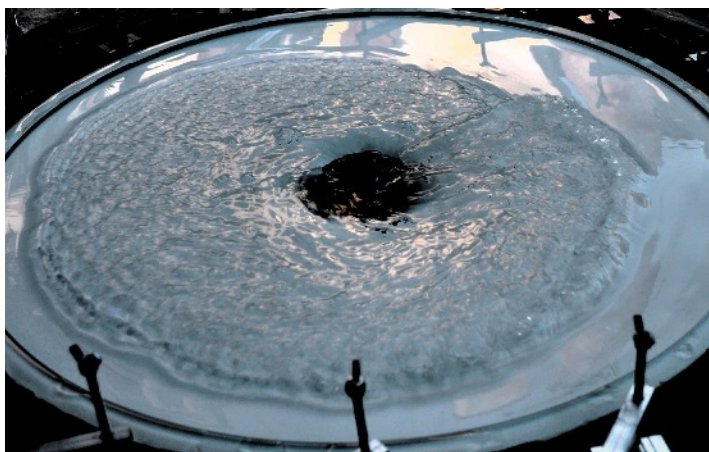


Dans cette expérience, le ressaut hydraulique est utilisé pour modéliser l'effondrement d'une étoile avant son explosion en supernova. Le dispositif consiste en un réservoir annulaire (R) qui injecte de l'eau sur une surface hyperbolique (analogue au potentiel gravitationnel de l'étoile) qui s'évacue par la partie centrale (C). Le ressaut qui se forme (inversé par rapport à celui de l'évier) est d'abord symétrique et circulaire, mais une instabilité se crée (photographie à droite). Cette instabilité est aussi observée dans les simulations numériques de supernovæ.



expériences. Mais, en 2019, avec le groupe de Tomas Bohr, j'ai suggéré que leur modèle serait fondé sur une hypothèse erronée. La question du rôle exact de la tension de surface semble encore loin d'être résolue !

Ce dernier rebondissement illustre le fait qu'il existe toujours un débat actif autour de ce problème qui semble banal et facile à résoudre : quelle est la taille du petit rond que vous voyez au fond de votre évier en faisant la vaisselle ?

DE L'ÉVIER AUX ÉTOILES À NEUTRONS

Malgré la modestie du phénomène, il pourrait nous en apprendre beaucoup sur des objets sans rapport avec le ressaut hydraulique et se manifestant à des échelles bien plus grandes. L'astrophysique nous propose des applications au phénomène de ressaut à des échelles un million de fois plus grandes qu'un évier. En 2012, Thierry Foglizzo, du CEA à Saclay, et ses collègues ont ainsi proposé d'étudier la dynamique des supernovæ par une analogie hydraulique.

Une supernova correspond à l'effondrement du cœur d'une étoile en fin de vie. Elle forme alors une étoile à neutrons ou un trou noir, tandis que les couches externes de l'astre sont violemment expulsées dans le milieu interstellaire. Les simulations numériques qui décrivent ce phénomène astrophysique ont mis en évidence que l'explosion de l'étoile présente toujours une asymétrie due à une instabilité entre le gaz qui s'effondre et l'onde de choc qui précède l'explosion en supernova. Pour modéliser expérimentalement un tel phénomène à l'échelle du laboratoire, Thierry Foglizzo et son équipe ont utilisé un dispositif ingénieux : un «ressaut circulaire inversé».

Dans un bassin circulaire de surface hyperbolique, une nappe de liquide de faible épaisseur est injectée depuis la périphérie vers un trou d'évacuation au centre. Un ressaut se forme et l'écoulement vers le tube d'évacuation central se fait ensuite en régime dominé par la

gravité. La forme hyperbolique est analogue au potentiel gravitationnel de l'étoile. Le ressaut hydraulique est similaire à l'onde de choc dans l'étoile et l'écoulement correspond au gaz en effondrement. Alors que le ressaut est initialement symétrique, il se forme une instabilité qui lui donne un mouvement global de rotation dans un sens alors que les régions internes tournent dans le sens opposé. Ces travaux confirment les instabilités observées dans les simulations numériques.

Les correspondances mathématiques entre les équations de la mécanique des fluides et les lois de la gravitation sont très fortes. En 1981, William Unruh, de l'université de Colombie-Britannique, au Canada, a suggéré que des systèmes hydrodynamiques pouvaient reproduire, par analogie, certaines propriétés des trous noirs : c'est ce qu'on nomme les trous noirs acoustiques.

Un trou noir correspond à une région où la courbure de l'espace-temps est si importante que rien ne peut s'en échapper. Plus exactement, un ressaut pourrait servir de modèle à un «trou blanc», un trou noir où la flèche du temps est inversée. En effet, de la même façon que rien ne peut pénétrer dans un trou blanc, les ondes gravitaires ne peuvent pas se propager dans la zone interne d'un ressaut. Certains chercheurs, comme Germain Rousseaux, du laboratoire Pprime, à Poitiers, travaillent donc sur le ressaut hydraulique afin d'explorer cette analogie, notamment pour tester la formation du rayonnement Hawking, de faibles radiations émises par un trou noir et prédites par Stephen Hawking en 1974.

Le ressaut hydraulique est devenu un outil puissant pour étudier des phénomènes parfois inaccessibles comme les supernovæ ou les trous noirs. Mais d'autres applications sont aussi à l'étude, en particulier l'analogie avec des systèmes dynamiques en régime chaotique (voir l'encadré page 64). Pas mal pour un phénomène né dans un simple évier ! ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Duchesne et al., **Surface tension and the origin of the circular hydraulic jump in a thin liquid film**, *Phys. Rev. Fluids*, vol. 4, art. 084001, 2019.

A. Duchesne et al., **Multiple rotations of a drop rolling inside a horizontal circular hydraulic jump**, *Europhysics Letters*, vol. 102, art. 64001, 2013.

T. Foglizzo et al., **Shallow water analogue of the standing accretion shock instability : Experimental demonstration and a two-dimensional model**, *Physical Review Letters*, vol. 108 (5), art. 051103, 2012.

J. W. M. Bush et al., **An experimental investigation of the stability of the circular hydraulic jump**, *J. Fluid Mech.*, vol. 558, pp. 33-52, 2006.

T. Bohr et al., **Shallow-water approach to the circular hydraulic jump**, *J. Fluid Mech.*, vol. 254, pp. 635-648, 1993.

E. J. Watson, **The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane**, *J. Fluid Mech.*, vol. 20, pp. 481-499, 1964.

L'ESSENTIEL

> Longtemps a prévalu l'idée que les bâtiments de la Grèce ancienne, comme les sanctuaires d'Apollon à Délos et à Delphes, ont été construits avec de la pierre extraite localement, sauf pour les marbres.

> Depuis 2017, un projet de recherche a pour objectif d'étudier les provenances

des pierres à Délos et à Delphes, ainsi que les usages qui en ont été faits.

> Ses premiers résultats montrent que beaucoup de ces roches avaient une origine non locale, et parfois lointaine.

> Les raisons de ces importations, coûteuses en transport, sont à éclaircir.

L'AUTRICE



ISABELLE MORETTI
chercheuse associée
à Sorbonne Université
et à l'université de Pau
et des Pays de l'Adour, membre
de l'Académie des technologies



D'où proviennent les pierres de Délos et de Delphes?

On pensait que les sanctuaires de Délos et de Delphes, en Grèce, avaient été bâtis avec des pierres extraites localement, sauf pour ce qui est des marbres. Les premiers résultats d'une vaste enquête montrent que ce n'est pas aussi simple...



La petite île de Délos, à proximité de Mykonos, était un très important centre religieux de la Grèce ancienne. Le site archéologique est très étendu et n'a pas été fouillé en totalité.

Les ruines des cités et sanctuaires de la Grèce antique fascinent tout un chacun, voyageurs, touristes mais aussi les scientifiques. Même si des travaux de reconstruction ont souvent suivi les premières fouilles, au début du ^{xx}^e siècle, et expliquent parfois l'état actuel des monuments, beaucoup de ces lieux ont été habités ou utilisés pendant des siècles. Hors guerres et catastrophes naturelles, tremblements de terre ou glissements de terrain, ils ne semblent pas avoir nécessité de fréquentes réparations. Une longévité qui laisse songeur à l'ère de l'obsolescence programmée...

Pour parvenir à un tel résultat, les bâtisseurs de l'époque, en plus d'un sens aigu de l'esthétique, avaient sans doute une connaissance fine des matériaux et des méthodes de construction. Enfin, et là aussi contrairement à aujourd'hui, le transport, en particulier terrestre, avait un coût énorme. Le choix de matériaux locaux devait donc souvent être le plus économique.

On trouve pourtant une belle variété de pierres dans le bâti des grands sanctuaires dédiés à Apollon sur la petite île de Délos, dans les Cyclades, et à Delphes, sur le continent – deux sites archéologiques majeurs, qui étaient parmi les centres religieux les plus importants de la Grèce ancienne. Pourquoi cette diversité de pierres ? À la fin du ^{xix}^e siècle, des archéologues et des historiens ont avancé que lorsqu'une cité grecque prenait l'initiative de construire un

monument dans ces sanctuaires, elle amenait les ouvriers et la pierre de chez elle, par souci de prestige mais aussi parce que ses ouvriers excellaient dans le travail de ce matériel.

Les textes anciens permettent parfois de confirmer ce mode de fonctionnement. Il en



Le transport, en particulier par voie terrestre, avait un coût énorme



est ainsi du « trésor » des Naxiens à Délos, édifice construit au début du ^{vi}^e siècle avant notre ère dans le sanctuaire d'Apollon et destiné aux offrandes au dieu et aux banquets qui accompagnaient les sacrifices : des inscriptions sur place indiquent qu'il a été bâti par des artisans de Naxos avec du marbre de leur île (située à une cinquantaine de kilomètres de Délos), à un moment où personne d'autre n'avait ce savoir-faire, en particulier pour la charpente et le toit en marbre.



Le théâtre antique à Delphes, au premier plan à gauche, et le temple d'Apollon, au second plan.



L'une des techniques d'analyse *in situ* utilisées est la fluorescence X. La photo montre ainsi Sylvain Pont, du MNHN, dressant avec une « fluoX » portable la carte chimique d'un chapiteau, en s'assurant grâce à des échantillons étalonnés que l'appareil reste bien calibré.



Autre méthode d'examen *in situ* : le microscope de terrain, qui permet (ici à Marilou de Vals, de Sorbonne Université, et à l'autrice) d'observer et d'enregistrer sur l'ordinateur connecté une image à fort grossissement de la roche.

Mais la recherche du prestige n'explique pas tout et il y a aussi des bâtiments plus ordinaires, les habitations de particuliers par exemple. Où et d'après quels critères les artisans se fournissaient-ils ? Un projet lancé en 2017 par l'École française d'Athènes (EFA) et qui a pris de l'ampleur grâce aux financements de l'ANR vise à comprendre cette variété des pierres de construction sur les sites de Délos et de Delphes, les raisons qui ont présidé aux choix effectués et la façon dont les pierres étaient extraites et transportées jusqu'aux chantiers.

Un tel objectif nécessite une approche pluridisciplinaire. Sous la houlette de l'EFA et des éphories, l'administration grecque dont dépendent les autorisations de travaux, travaillent désormais ensemble des archéologues, des architectes, des épistémologues, des historiens des sciences et des géologues. Les équipes sont dirigées par Jean-Charles Moretti, de l'Institut de recherche sur l'archéologie antique, à Lyon, pour Délos, et par Amélie Perrier, de l'EFA, pour Delphes. Du côté de la géologie, elles comprennent à la fois des structuralistes de Sorbonne Université qui cartographient les sites, reconnaissent les carrières et estiment leur volume, et des pétrographes du Muséum national d'histoire naturelle, qui étudient plus en détail les faciès, c'est-à-dire les caractéristiques fines des roches, indispensables pour déterminer leur provenance : une caractérisation du type « marbre blanc à cristaux millimétriques » est en effet insuffisante et ne permet pas de savoir précisément de quelle carrière ce marbre provient, ni même de quelle région (Cyclades, Attique...).

Depuis que le projet a débuté, il y a deux ans, il a apporté plusieurs informations surprenantes, même pour les experts des sites, qui montrent que l'origine des pierres est beaucoup plus variée qu'attendue.

DES OUTILS ET DE LA MÉTHODE

Pour les géologues, les difficultés du projet sont liées aux limites d'échantillonnages sur les sites au regard de la précision visée. Lorsqu'ils étudient des roches dans la nature, ils voient l'ensemble de l'affleurement, qui peut être hectométrique, en déduisent les conditions de dépôt (pour les roches sédimentaires), prélèvent des morceaux pour y découper des lames minces à examiner sous microscope, les broient pour en analyser la composition chimique et en extraient des *plugs* (cubes ou cylindres de quelques centimètres) pour déterminer les propriétés physiques de la roche telles que la densité ou la porosité.

Sur un site archéologique tel que Délos ou Delphes, les échantillonnages sont aujourd'hui soumis à des autorisations très strictes et difficiles à obtenir. Il faut donc, en général, se limiter à des méthodes non destructives appliquées *in situ*, grâce à des instruments de laboratoire miniaturisés. Ainsi, nous nous sommes servi de « fluoX » portatives, appareils qui permettent de dresser une carte chimique de roches, en laboratoire comme sur le terrain ; ces instruments utilisent la fluorescence X, c'est-à-dire qu'ils émettent des rayons X et analysent le rayonnement réémis par la matière, rayonnement qui dépend des éléments présents et de leurs concentrations. Nous avons aussi réalisé des observations sur place avec des microscopes de >



Pour identifier les carrières anciennes sur l'île de Délos, les chercheurs ont d'abord utilisé des vues aériennes 3D de haute résolution, prises au moyen de drones par l'entreprise Iconem. On distingue ainsi, sur l'exemple de photo à gauche, deux carrières (flèches) creusées dans le gneiss du nord de l'île. L'examen sur place permet ensuite de confirmer qu'il s'agit bien de carrières antiques. Le cliché de droite montre ainsi une saignée d'extraction (large d'une trentaine de centimètres) dans une carrière ancienne de granit, dans le sud de l'île.

Les carrières proches des sanctuaires n'ont pu fournir toutes les pierres

> terrain grossissant vingt fois, c'est-à-dire plus du double d'une loupe, reliés à un ordinateur portable (voir les photos page 51).

Parallèlement, nous avons dressé ou affiné les cartes des environs des sanctuaires et localisé les carrières présentes à proximité. En comparant les faciès présents dans les constructions à ceux des carrières, nous avons défini ce que l'on pouvait considérer comme des matériaux autochtones et ce qui était du matériau importé.

À Délos, île de 3,5 kilomètres carrés à peine, l'insularité offre un critère évident de distinction entre allochtone et autochtone. À Delphes, des carrières connues pour avoir été utilisées dans l'Antiquité, pour bâtir en particulier le temple d'Apollon au IV^e siècle avant notre ère, se situent à une petite dizaine de kilomètres du

site. C'est dans ces limites que nous considérons que les roches utilisées par les constructeurs sont d'origine locale.

PLUSIEURS TYPES DE ROCHES UTILISÉES DANS CHAQUE SITE

De quelles roches plus précisément s'agit-il ? À Délos, nous avons recensé quatre types de roches : du granit, du gneiss, du marbre et du *pôros* (terme sur lequel on reviendra). Les quatre sont présents dans l'île. À Delphes, on a quatre grandes familles de pierres de construction : des calcaires, des brèches conglomeratiques (roches détritiques composées de blocs anguleux), des marbres et des *pôros*. Brèches et calcaires sont présents sur place.

Si l'on s'en tenait à ce niveau de précision, nous n'aurions fait en rien avancer les connaissances : on savait depuis longtemps que l'on avait utilisé de la pierre locale. Ainsi, l'emploi du granit dans le sanctuaire de Délos, bâti sur une île à 80% en granit, était renseigné depuis fort longtemps ; l'archéologue français Roland Martin l'a considéré, en 1961, comme l'exemple même de la prédominance de la pierre locale. Comme Délos est le seul grand sanctuaire d'Apollon en Grèce où l'on a utilisé le granit et le seul à être bâti sur ce substrat, la mise en relation était facile.

Cependant, dès le début du projet, les limites de cette vision globale sont apparues. Nous avons repéré toutes les carrières présentes sur Délos, île assez petite pour qu'on puisse aisément la parcourir entièrement. Les photos prises par des satellites ou des drones

mettent clairement en évidence les découpes non naturelles dans les reliefs, et il suffit ensuite d'aller vérifier sur place si le lieu présente des traces d'extraction ancienne (voir les photos page 52). Nous avons ainsi identifié une trentaine de carrières, dont quatre de marbre. Ces dernières sont de taille réduite, le marbre y étant limité à des lentilles prises dans le granit. À Delphes, les bâtisseurs ont dû faire de gros travaux de terrassement pour ériger le sanctuaire. Une partie de la pierre vient de là et des traces d'extraction sont visibles sur beaucoup des roches qui affleurent sur le site.

Bien qu'il soit le plus grand de Grèce par la superficie de ses vestiges exhumés, le site de Délos n'est pas entièrement fouillé. Mais on peut calculer les volumes approximatifs de

Le portique des Athéniens à Delphes présente des pierres de différentes teintes. La colonne est en marbre blanc et le socle en calcaire rose de provenance locale. Le mur de soutènement de la terrasse du temple d'Apollon, en arrière-plan, est en calcaire gris local.



Ce mur de maison à Délos montre un exemple d'agencement de pierres dans le bâti. Les gros blocs sont du granit, les petits allongés du gneiss. En bas à gauche, on remarque un reste de crépi et de peinture. Malgré leur magnifique agencement, ces murs étaient en effet recouverts.



roche qu'a nécessités la construction du sanctuaire et de la ville à son apogée, et les comparer à ceux ayant pu être extraits des carrières. Cette comparaison a fait immédiatement apparaître que, sauf pour le granit, il en manque énormément. Ainsi, les gneiss sont très majoritaires dans le bâti, alors que les carrières de gneiss, au nord de l'île, sont petites et peu nombreuses. Une première conclusion s'est donc vite imposée: bien que l'île de Délos soit on ne peut plus rocheuse et caillouteuse, on y a massivement importé de la roche pour bâtir le sanctuaire.

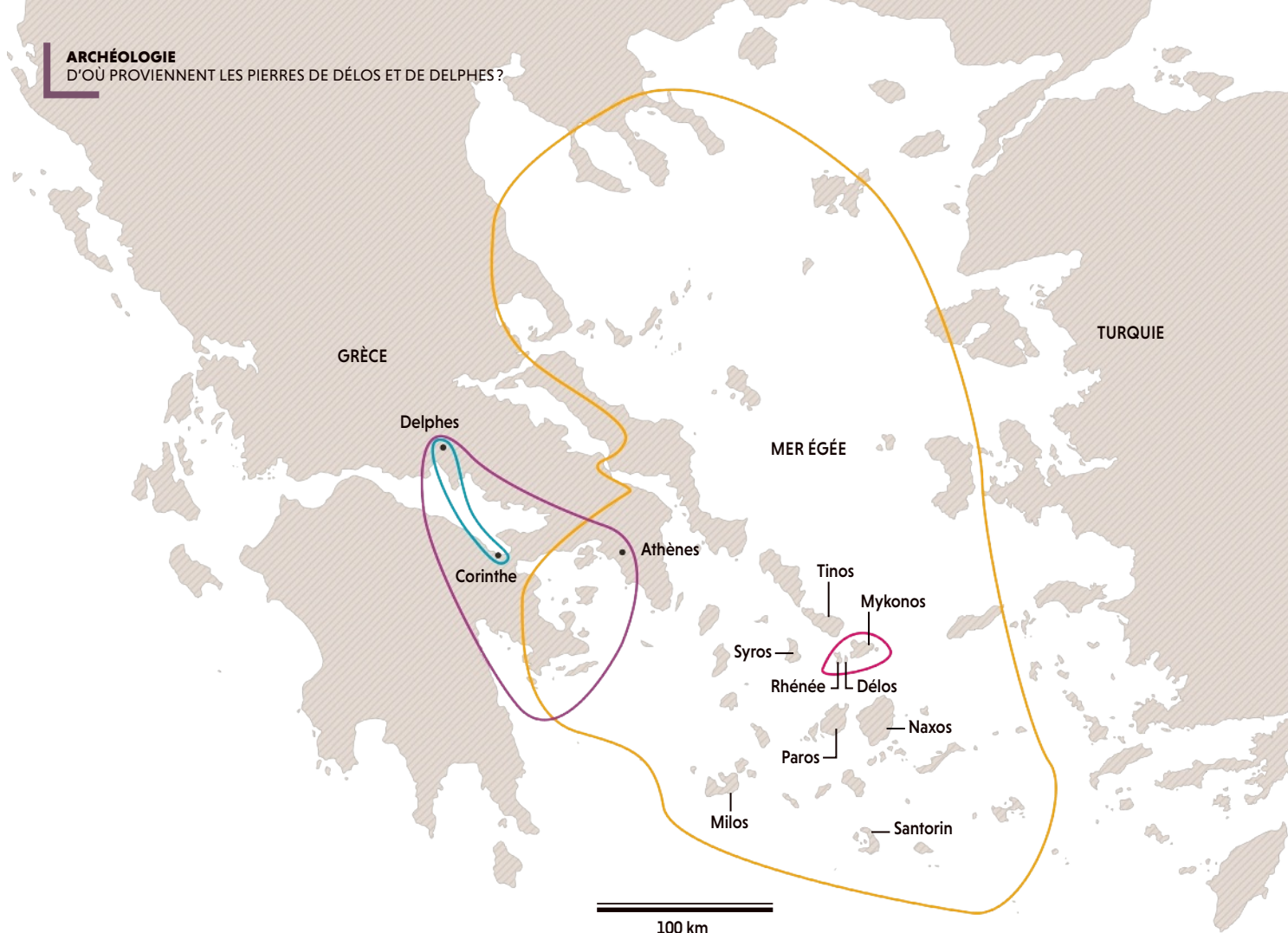
DÉCRIRE PRÉCISÉMENT LES PIERRES DU BÂTI

D'où cette roche a-t-elle été importée? Pour le savoir, une description précise des pierres du bâti et de leur mise en œuvre est requise. Commençons par le gneiss. Ce terme, assez global, désigne une roche métamorphique, c'est-à-dire qui a été portée à des températures et des pressions assez élevées, et qui en général a aussi subi une déformation intense. La texture résultante ainsi que les minéraux qui la composent sont donc variables. Certains gneiss contiennent du mica blanc, d'autres du mica noir. Seuls les seconds sont présents à l'état naturel sur Délos, alors que c'est le premier type que l'on voit partout dans le bâti; les paillettes de mica blanc brillent au soleil et sont identifiables à l'œil nu. L'analyse pétrographique du gneiss du site conduit donc à la même conclusion que l'analyse volumique: importation massive de gneiss.

Nous recherchons à présent les types de gneiss présents sur les îles voisines en commençant évidemment par Rhénée, la plus proche (à moins de 1 kilomètre), en espérant vérifier l'hypothèse d'une provenance non locale, mais pas trop lointaine non plus, des gneiss utilisés sur le site de Délos.

Qu'en est-il des marbres de Délos? Le marbre est en principe une roche métamorphique dérivée du calcaire, dominée par des cristaux de calcite (CaCO_3), sauf en cas de présence de dolomie, composée majoritairement de dolomite, de formule $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. La composition est très monotone et ce sont les éléments présents à l'état de traces ou texturaux, comme la taille des cristaux, qui permettent de différencier les marbres les uns des autres.

En raison de l'histoire géologique de la Grèce et de la mer Égée, les marbres des Cyclades et du sud de l'Attique se ressemblent beaucoup, et les distinguer à l'œil nu est rarement possible. L'approche que nous avons choisie, inhabituelle en géologie, est une «analyse en composantes principales», méthode d'analyse de données adaptée à l'analyse statistique d'un grand nombre de variables; elle remplace un grand nombre de variables corrélées (par exemple les contenus en strontium, en ➤



Au début du projet de recherche, en 2017, la zone d'importation des *pôros* attendue pour Délos (contour rouge) englobait juste l'île toute proche Rhéée et peut-être Mykonos. La zone désormais considérée inclut les îles volcaniques et les côtes de la mer Égée, vers la Macédoine, au nord (contour orange). Pour Delphes, on savait que des fûts de colonne ont été importés de Corinthe vers le temple d'Apollon (contour bleu), mais une aire de provenances beaucoup plus étendue (contour violet) est désormais étudiée pour les autres pierres du bâti.

> silicium, en fer, les tailles de grains, etc.) par un plus petit nombre de variables, mais décor-rélées, c'est-à-dire indépendantes.

COMPARAISONS AVEC UNE LITHOTÈQUE

Nous avons construit une «lithothèque» contenant des échantillons de toutes les carrières de marbre susceptibles d'avoir été utilisées pour la construction de Délos. Hors du site archéologique, l'échantillonnage est possible, ce qui nous a permis d'effectuer à la fois des analyses complètes et des analyses plus qualitatives par fluorescence X. Nous comparons ensuite les analyses non destructives faites sur les éléments des bâtiments à cette base de données.

Là encore, la conclusion de nos travaux est claire: les bâtisseurs sont allés chercher ces marbres plus loin que nous ne l'envisagions. Certains ne peuvent avoir été extraits d'aucune des carrières de Délos et d'aucune de celles que nous avons déjà échantillonnées sur d'autres îles voisines comme Naxos, Paros, Syros... Autrement dit, il faut reprendre notre marteau et rechercher plus loin les carrières ayant fourni le marbre de Délos!

Venons-en au quatrième type de roches utilisées à Délos, les *pôros*. Ce terme désigne, dans les textes anciens et pour les archéologues



Certains marbres de Délos proviennent d'encore plus loin que Naxos, Paros ou Syros



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.

