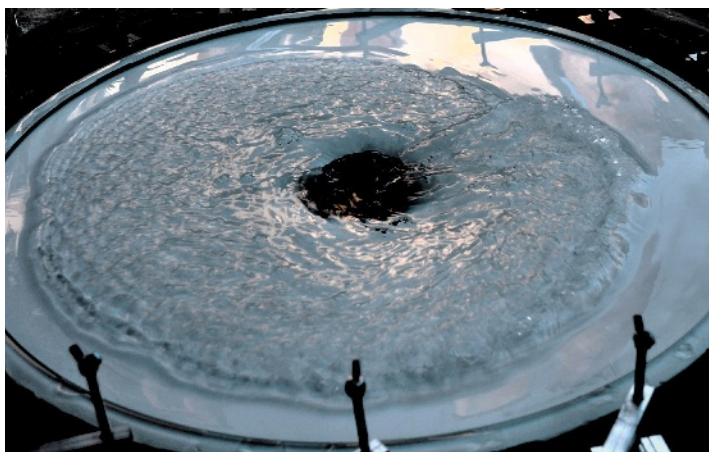


Dans cette expérience, le ressaut hydraulique est utilisé pour modéliser l'effondrement d'une étoile avant son explosion en supernova. Le dispositif consiste en un réservoir annulaire (R) qui injecte de l'eau sur une surface hyperbolique (analogue au potentiel gravitationnel de l'étoile) qui s'évacue 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 >