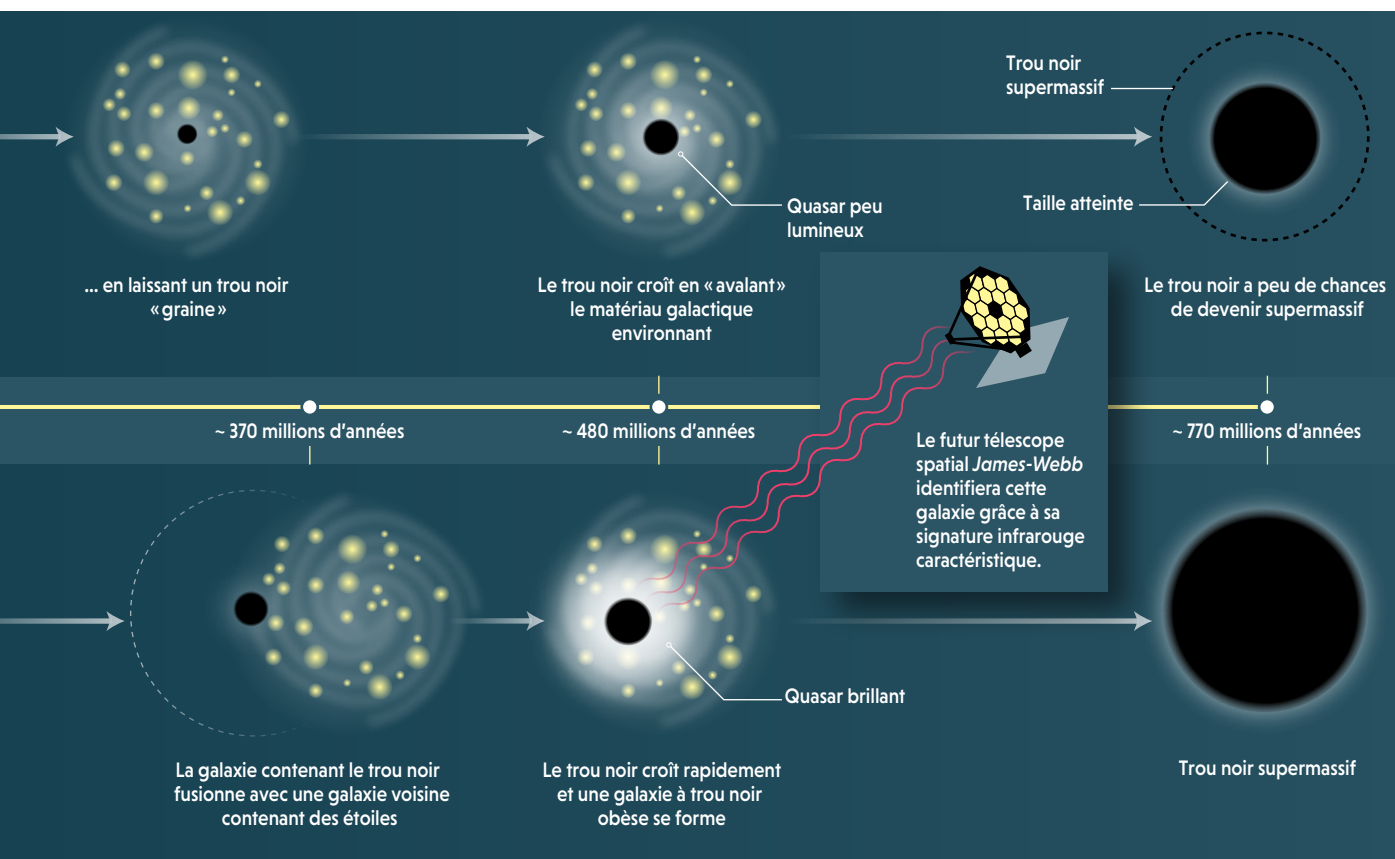




Les données suggèrent par exemple que le trou noir central influencerait sur la production d'étoiles de la galaxie où il se trouve. D'une part, la matière tombant dans le trou noir libère de l'énergie qui chauffe le gaz proche du centre galactique. Elle l'empêche ainsi de se refroidir et de former des étoiles. Cette influence serait aussi sensible à grande portée, bien au-delà du centre de la galaxie, sous la forme de jets de rayonnement de haute énergie. Ces jets, que les astronomes observent dans le domaine radio, chaufferaient le gaz des régions externes de la galaxie et y bloqueraient la formation stellaire. Ces effets sont complexes à modéliser, mais les astronomes espèrent mieux les comprendre: trouver les premières graines préciserait comment les relations entre ces trous noirs et leurs galaxies hôtes ont évolué au cours du temps.

Les perspectives de recherche présentées ici s'inscrivent dans une évolution importante de nos capacités à étudier et comprendre les trous noirs de toutes les tailles. Quand, par exemple, l'interféromètre *Ligo* a réalisé la première détection d'ondes gravitationnelles en 2015, les scientifiques ont pu déterminer que les deux trous noirs qui avaient fusionné pesaient respectivement 36 et 29 masses solaires, des cousins poids plumes des trous

noirs supermassifs au cœur des quasars. La poursuite des projets pour détecter d'autres ondes gravitationnelles permettra d'obtenir de nouveaux et fascinants détails sur ce qui se passe quand des trous noirs fusionnent et font vibrer l'espace-temps autour d'eux.

Par ailleurs, le télescope *Event Horizon* compte utiliser les observatoires radio disséminés partout à la surface de la Terre pour acquérir une image du trou noir au centre de la Voie lactée. Les chercheurs espèrent observer une « ombre » en forme d'anneau autour des bords du trou noir, un phénomène prédit par la relativité générale. Tout écart entre les mesures du télescope *Event Horizon* et les prévisions de la relativité générale serait un défi à notre compréhension des trous noirs. Enfin, des astrophysiciens veulent utiliser un réseau de pulsars, des étoiles émettant du rayonnement de façon régulière, pour détecter le bruit de fond cosmique des ondes gravitationnelles dû à l'accumulation de signaux émis par la coalescence de trous noirs dans l'Univers. Mais à plus court terme, c'est le télescope *James-Webb* qui ouvrira une nouvelle fenêtre sur la recherche des trous noirs dans l'Univers jeune.

De nombreuses découvertes sont à prévoir dans un futur proche. Et notre compréhension des trous noirs pourrait en être transformée. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Natarajan et al., **Unveiling the first black holes with JWST : Multi-wavelength spectral predictions**, *Astrophysical Journal*, vol. 838(2), article 117, 2017.

D. Psaltis et S. S. Doeleman, **Tester la relativité avec les trous noirs**, *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

P. Natarajan, **Seeds to monsters : Tracing the growth of black holes in the Universe**, *General Relativity and Gravitation*, vol. 46(5), article 1702, 2014.

E. Treister et al., **New observational constraints on the growth of the first supermassive black holes**, *Astrophysical Journal*, vol. 778(2), article 130, 2013.

LES AUTEURS



JONAS BERKING
géographe à
l'université libre
de Berlin,
en Allemagne



BRIGITTA SCHÜTT
géographe à
l'université libre
de Berlin



WIEBKE BEBERMEIER
géographe à
l'université libre
de Berlin



STEPHAN SCHMID
archéologue à
l'université
Humboldt, à Berlin



Cette citerne, construite dans le désert du Néguev, à Bom Havarim, en Israël, illustre le savoir-faire hydraulique des Nabatéens, dont les cités ont prospéré malgré les conditions arides.

L'ESSENTIEL

> Les anciennes populations des régions arides ont dû optimiser leur gestion de l'eau.

> Les archéologues étudient leurs anciens systèmes de captage et de distribution, dont certains sont encore en usage.

> Le savoir-faire associé constitue un important patrimoine culturel, qu'il importe de sauvegarder pour le rendre utile à l'avenir.

> La négligence et l'oubli menacent ces installations traditionnelles.

Le vieux génie des eaux du désert

Les populations du passé savaient gérer avec efficacité les maigres ressources en eau des régions arides. Parfois encore en usage, leurs techniques pourraient servir de modèles à une exploitation durable du précieux liquide.

En 2018, un Européen qui veut boire n'a aucun problème: il ouvre l'un des robinets de son logement et obtient aussitôt de l'eau de bonne qualité et autant qu'il en souhaite. C'est loin d'être le cas dans de nombreuses régions du monde. Selon le Rapport mondial sur l'eau de l'Unesco publié en 2014, environ 15% de nos contemporains n'ont pas accès à l'eau potable et 1,8 million d'entre eux meurent chaque année de maladies dues à la pollution de l'eau.

Ce problème se pose particulièrement dans les régions arides et semi-arides, soit environ un tiers des terres émergées. Le fait que ces régions soient aussi les plus anciennes zones de peuplement (voir la carte page 47) est étonnant, sachant à quel point la pluie y tombe irrégulièrement: l'eau n'y est disponible en quantité suffisante que quelques jours ou quelques semaines par an... Dès lors, se demande-t-on, comment les cultures anciennes ont-elles réussi à se procurer cet élément vital?

Disposer de suffisamment d'eau ne dépend pas que de la pluviométrie: la question est plutôt celle de l'exploitation des précipitations. Une grande partie des eaux de pluie qui circulent dans un bassin-versant ne peut pas être exploitée: elle s'évapore rapidement ou s'infiltre jusqu'à des nappes phréatiques profondes. Quant à l'eau aisément accessible, elle est souvent de mauvaise qualité, par exemple parce qu'elle est salée ou saumâtre. L'eau souterraine des zones arides est en outre souvent fossile, de sorte qu'elle ne se renouvelle pas.

La quantité d'eau exploitable dans une région sèche dépend en grande partie des connaissances disponibles sur l'occurrence, la collecte, le stockage et la distribution de la ressource aqueuse. La compétence des usagers et des ingénieurs hydrauliciens qui la gèrent joue donc un rôle essentiel.

À cet égard, les systèmes hydrauliques développés par les populations anciennes sont fascinants. Ils constituent d'ailleurs souvent l'une des bases de la gestion actuelle et locale des eaux. Pour autant, les systèmes d'irrigation >



© Getty Images/DEA / archivio J. Lange / Contributeur

> des anciens ne sont aujourd'hui que très partiellement conservés. Les techniques qui permettent de les faire fonctionner représentent un patrimoine culturel important et font partie de l'identité des populations locales. Et elles peuvent nous montrer comment utiliser de façon durable une ressource. Pour toutes ces raisons, il importe de les documenter et de préserver leur utilisation.

QUAND LA PLUIE NE TOMBE QUE QUELQUES JOURS PAR AN

Plusieurs exemples à travers le monde illustrent cela. Commençons notre voyage avec la ville nabatéenne de Pétra, en Jordanie. Les raisons pour lesquelles cette ville a été fondée dans la vallée chaude et aride de l'oued Moussa sont débattues depuis longtemps. Cet oued n'étant en eau que quelques jours par an, les avantages stratégiques ou économiques du site étaient-ils si grands qu'ils compensaient le manque d'eau? En réalité, le site de Pétra recèle de l'eau, mais encore fallait-il savoir comment se la procurer.

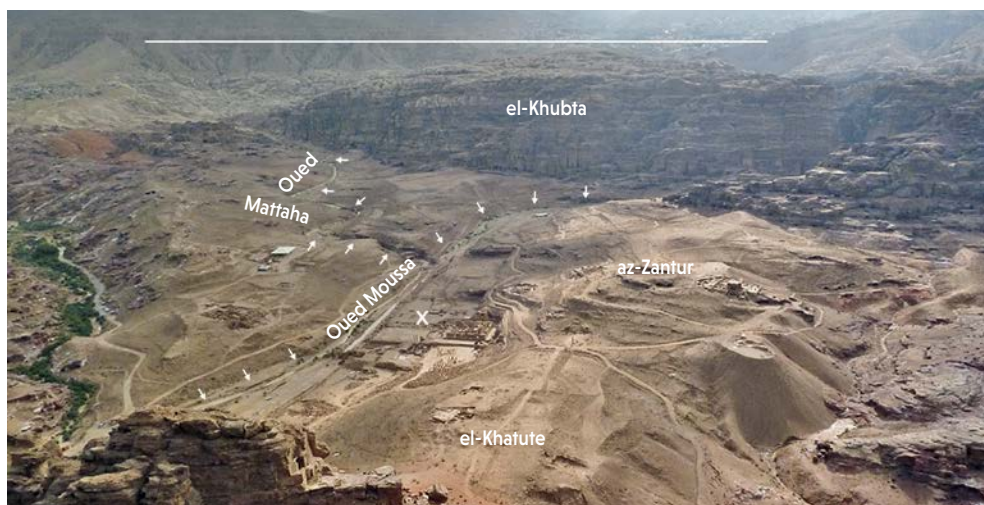
Cette ville à l'impressionnante architecture troglodyte a été construite dans une étroite bande montagneuse située entre la vallée chaude et très sèche de l'Arabah, à l'ouest, et les vastes déserts du plateau jordanien, à l'est. Ce paysage de pentes rocheuses et de vallées étroites, donc faciles à défendre, fournit aussi assez d'espace pour y aménager de grandes rues et des places. Outre sa remarquable architecture, la splendeur passée de Pétra était peut-être aussi liée à sa richesse en eau. Il y a deux mille ans, en effet, alors que la ville était au faite de sa prospérité, des fontaines et des jeux d'eau bordaient sa rue principale. Cette ville du désert où clapotis et autres bruits d'eau résonnaient dans les jardins et les bassins de stockage a dû offrir un spectacle magnifique. Les visiteurs de l'Antiquité qui, comme le décrit le géographe Strabon au

tourant de notre ère, y parvenaient après des semaines de voyage à travers des paysages arides et secs, devaient en être profondément impressionnés.

Mais d'où provenait cette eau? Les études paléoclimatiques indiquent qu'il y a deux mille ans, le climat de Pétra était le même que celui d'aujourd'hui: sec presque toute l'année. De fait, pas plus de 100 à 200 millimètres de pluie tombent annuellement. Au contraire de ce qui est le cas ailleurs, cette eau ne ruisselle pas sur un sol sec et desséché, mais surtout sur des roches nues. Ne pouvant s'infiltrer, la partie qui ne s'évapore pas s'écoule sous la forme de torrents qui peuvent être dévastateurs. Une partie de ces pluies peut cependant s'infiltrer et remplir des réservoirs souterrains, qui sont à l'origine de plusieurs dizaines de sources permanentes en amont de Pétra.

Les Nabatéens profitaient à la fois du ruissellement et des infiltrations des eaux. Grâce à un ingénieux système de plus de 20 kilomètres de canalisations, ils captaient toutes les sources souterraines se trouvant dans un rayon de dix kilomètres. Ce système comportait probablement cinq aqueducs principaux, dont certains prenaient la forme de conduites en terre cuite sous pression. Par ailleurs, l'eau ruisselant à la surface de la roche était recueillie à l'aide de canaux creusés dans la pierre en de nombreux endroits. Grâce à ces techniques, les Nabatéens ont réussi à rendre Pétra prospère, puis à la faire vivre durant plusieurs siècles. Sans elles, les pluies torrentielles de printemps sur le grès nu de la région auraient régulièrement dévasté la ville.

Il y avait cependant un problème: au cours de son long chemin vers les canaux, l'eau recueillie se pollue et devenait impropre à la consommation. Les hydrauliciens nabatéens ont donc développé une solution ingénieuse: un complexe de bassins de sédimentation et de



Vue sur le bassin de la vallée de Pétra. La ligne en arrière-plan signale l'aquifère qui s'est formé dans les monts Shar'a. Les Nabatéens y avaient capté les eaux d'une demi-douzaine de sources et construit des aqueducs pour les acheminer jusqu'à Pétra, où elles alimentaient de spectaculaires plans d'eau. Le X marque l'emplacement d'un ancien jardin comportant piscine et île artificielle. Les flèches indiquent le cheminement des oueds par lesquels les eaux de pluies tombées sur les montagnes traversent la vallée de Pétra. Les Nabatéens les collectaient puis les acheminaient vers la ville de façon organisée.

citernes successives, sorte de station d'épuration où les particules solides sédimentaient dans les bassins, tandis que les bactéries mouraient dans l'obscurité des citernes.

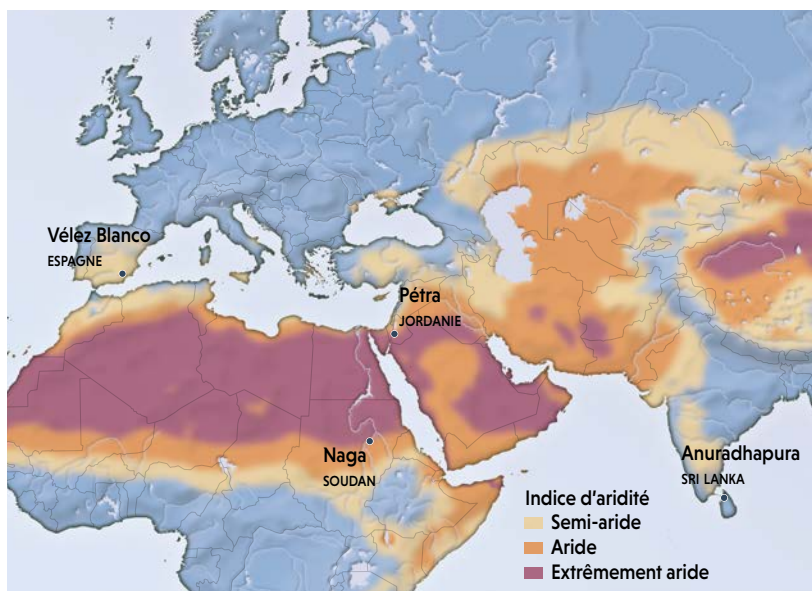
Vers le milieu du I^{er} millénaire avant notre ère, pendant que les Nabatéens s'installaient à Pétra, le royaume de Méroé s'épanouissait sur le cours moyen du Nil (dans le Soudan actuel). Des millénaires durant, le Nil et ses crues fertilisantes annuelles avaient fourni un refuge aux populations du désert. Mais, contrairement aux Égyptiens, les Méroïtes ont choisi de construire aussi des villes à distance du Nil. Ils devaient donc les approvisionner en eau sans pouvoir puiser dans le fleuve.

MÉROÉ, ROYAUME DU DÉSERT

L'une de ces villes, Naga, est aujourd'hui une ruine couverte de sable. La fouille de ses structures architecturales nous a principalement renseignés sur ses sanctuaires et ses palais. Pour autant, comment s'y approvisionnait-on en eau? Le site de Naga se trouve aujourd'hui dans une savane aride et sèche où, comme à Pétra, la pluviométrie annuelle n'est que d'environ 100 millimètres. L'eau de pluie n'y coule que quelques jours par an dans les oueds ou se stocke au sein de réservoirs souterrains profonds, entre 70 et 90 mètres sous la surface, tandis que le Nil est à plus de 40 kilomètres...

Lors de la fondation de la ville, les conditions régnant dans la région étaient plus humides qu'aujourd'hui : grâce aux pluies, l'eau était probablement disponible pendant plusieurs mois par an. Puis le climat s'est lentement asséché jusqu'à l'installation des conditions actuelles au début de notre ère. Les habitants de Naga ont donc dû trouver une solution.

Deux circonstances ont joué en leur faveur : d'une part, la pluie tombe dans la région de Naga presque toujours entre juin et août ; d'autre part, la dépression équatoriale qui est chaque année à l'origine de la saison des pluies



Cette carte de l'indice d'aridité (on calcule cet indice caractéristique d'une zone en fonction de ses niveaux de précipitation et d'évaporation) révèle que de vastes régions de l'Afrique et de l'Eurasie sont arides, voire ultra-arides – comme, du reste, un tiers des terres émergées.

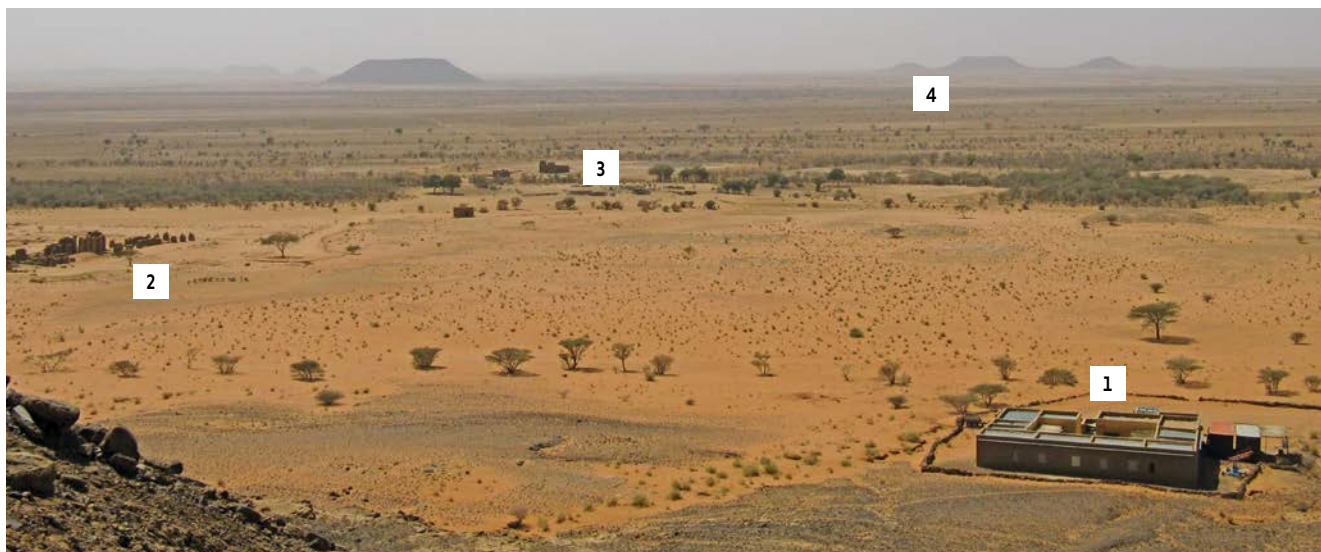
sous les tropiques atteint à Naga sa latitude la plus septentrionale. Les pluies tropicales qui en résultent sont intenses. Un bref ruissellement de surface se forme, puis s'écoule en torrents à travers les oueds.

Pour exploiter cette eau, les habitants de Naga ont construit, partout sur le cheminement de l'eau, des bassins de captage : les *hafirs*. Ces petits bassins creusés à la main au fond des vallées sédimentaires descendent souvent jusqu'au substrat rocheux. Leurs bords sont constitués des matériaux qui en ont été excavés. D'un diamètre de 170 mètres, le grand *hafir* de Naga est bordé par un mur de 4,5 mètres de haut et d'une profondeur atteignant 10 mètres à certains endroits. Il fut probablement construit à proximité immédiate de Naga, à l'apogée de la cité. Sa capacité d'environ 37 000 mètres cubes correspond au volume d'une bonne quinzaine de piscines olympiques. On connaît des installations méroïtiques similaires, par exemple dans les villes de Basa et de Musawwarat es-Sufra.

Les *hafirs* ont la particularité d'être toujours utilisés aujourd'hui, voire parfois créés par les habitants actuels des environs des anciennes villes méroïtiques. Ainsi, le savoir-faire correspondant est toujours présent. Afin de faire face à la rareté croissante de l'eau, l'État soudanais encourage depuis les années 1980 la construction de *hafirs*. Au Soudan, la réactivation de techniques millénaires offre ainsi une possibilité d'exploitation plus durable des ressources en eau.

Les systèmes de collecte d'eau des Nabatéens et des Méroïtes témoignent d'un savoir-faire technique très développé, mais ils ➤

La capacité du grand hafir de Naga (un bassin de captage) est d'environ 15 piscines olympiques



Au tournant de notre ère, la ville de Naga, dans le royaume de Méroé (dans l'actuel Soudan), s'est épanouie dans une vallée tributaire du Nil. La base des archéologues est située au pied d'un plateau de pierre (1). À gauche

de l'image, on voit les restes du temple d'Amon (2) et au milieu, les ruines du temple du Lion (3). L'oued Awatib mesure jusqu'à 3 kilomètres de large et contient d'innombrables petites rigoles bordées d'acacias (4).

> impliquent certainement beaucoup d'entretien et de maintenance. Naga et Pétra ont toutes les deux été abandonnées vers le milieu du I^{er} millénaire de notre ère. L'empire romain, sans doute la culture que la conscience collective associe le plus à l'idée de gestion de l'eau, disparaît aussi à cette époque. À son apogée, il jouxtait les royaumes nabatéens et méroïtiques; la question de l'influence du savoir-faire hydraulique des Romains sur ceux des Nabatéens et des Méroïtes s'est donc posée, sans qu'une réponse faisant l'unanimité se dégage.

LES « WEWAS » DU SRI LANKA

En revanche, les Romains n'ont sûrement pas eu d'influence sur les systèmes d'irrigation complexes qui ont été mis au point loin en Asie. Quelque trois cents ans avant Pétra et Méroé, le Sri Lanka a ainsi commencé à développer une gestion élaborée de l'eau qui joue toujours un rôle important aujourd'hui, notamment en agriculture. Son principe était de stocker dans des réservoirs les pluies et les eaux de ruissellement qu'elles produisaient. En fonction des besoins des champs, de l'eau était tirée pendant les mois secs de l'été de ces réservoirs, qui avaient aussi l'intérêt de servir de bassins de rétention lors des inondations de la mousson.

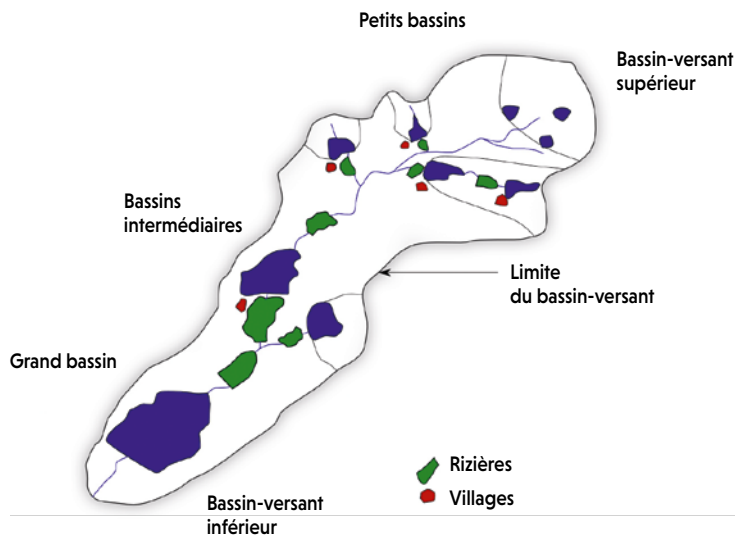
Appelés *wewas*, les innombrables bassins qui constituaient ce système de captation ont été construits le long de la plus grande pente des vallées plates et reliés par un système de canaux et d'écluses. Vers l'aval, la taille des réservoirs augmentait. D'une superficie de quelques hectares dans la partie supérieure du système, les petits bassins servaient souvent de bassins de sédimentation et d'abreuvoirs pour les animaux sauvages qu'ils maintenaient

ainsi loin des villages. Plus bas dans le réseau, les bassins avaient des superficies qui atteignaient parfois 200 hectares.

C'est grâce à ces réservoirs en cascade que la ville d'Anuradhapura a pu devenir la capitale d'un royaume portant son nom (de 377 avant notre ère à 1017). Seule la maîtrise d'une bonne technique d'irrigation a permis de cultiver du riz aquatique (le « riz irrigué ») dans les conditions climatiques du Sri Lanka, où sévissait notamment une sécheresse saisonnière prononcée. Or cette culture a joué un rôle essentiel dans l'approvisionnement des populations croissantes des villes du royaume.

Lors de la fondation de la capitale royale Anuradhapura, de grands bassins de stockage ont été construits à sa proximité immédiate. Des inscriptions et les premières chroniques

Il y a plus de deux mille ans, les habitants du Sri Lanka ont développé un système de captage et de régulation de l'eau à base de bassins reliés par des canaux. Les tailles des bassins augmentent depuis l'amont vers l'aval. Chaque village installait sa rizière directement sous un réservoir. Le nombre de bassins varie de 3 à 30 au sein d'un même réseau.





Vélez Blanco, en Andalousie, est un village agricole, où se pratique depuis mille ans un système de partage de l'eau introduit par les Maures. Les terrasses cultivées (1) reçoivent de l'eau par l'intermédiaire d'un vieux réseau de canaux,

qui aboutit aujourd'hui dans un réservoir moderne (2). La colline Muela (3) est à l'origine des sources qui alimentent ce réseau, mais leurs étiages baissent depuis que les forages se multiplient dans la région.

historiques donnent un aperçu de l'organisation de la gestion de ces réservoirs. Contrairement aux cascades de réservoirs des zones rurales, créées et gérées par la population paysanne, les grands bassins étaient gérés par l'administration royale, donc de façon centralisée. Puisqu'ils ne s'asséchaient généralement pas, même si les saisons des pluies du printemps et de l'automne apportaient peu d'eau, ils atténuaient les effets d'un déficit saisonnier en eau.

Aujourd'hui, environ 30 000 bassins sont en usage au Sri Lanka dans une région dont la taille est comparable à celle de l'Occitanie. On investit toujours afin de réaliser de nouveaux réservoirs, de sorte que les réseaux de bassins constituent l'une des composantes importantes du paysage et de la culture de ce pays.

MILLE ANS DE GESTION CONSENSUELLE D'UNE « VEGA »

En Europe aussi existent des terroirs où l'on continue à utiliser les techniques d'irrigation de l'Antiquité ou du Moyen Âge. L'un d'eux est Vélez Blanco, en Andalousie, dans le sud-est de la péninsule Ibérique. Des Romains d'abord, puis des Goths, des Maures et enfin des Espagnols y ont vécu. Le village et son paysage attendant de jardins (des *vegas*) offrent aux chercheurs une occasion unique d'étudier comment un système d'irrigation a pu à la fois fonctionner pendant des siècles tout en s'adaptant aux conditions sociales et techniques changeantes.

La *vega* de Vélez Blanco est une zone de champs en terrasses dont l'irrigation est gérée en commun par leurs propriétaires, tous des habitants de la commune. Plus de 100 kilomètres de canaux reliés à plusieurs

sources souterraines distribuent gratuitement de l'eau dans les champs d'après une rotation complexe et proportionnelle à la surface à irriguer. L'eau provient de sources qui surgissent au pied du mont Maimón, et c'est leur permanence qui explique la fondation du village. Outre cet approvisionnement de base, les agriculteurs disposent aussi de la possibilité d'acheter un volume d'eau supplémentaire aux enchères. C'est surtout au printemps, pour les semailles, ou pendant les mois d'été chauds et secs que la demande augmente et que les prix montent. Le produit des ventes aux enchères de l'eau sert à l'entretien et à la rénovation du réseau de canaux, ce qui rend le système pratiquement autonome.

D'origine mauresque, cette façon de gérer l'eau est pratiquée à Vélez Blanco depuis plus de mille ans. Toutefois, comme en beaucoup d'endroits en Espagne, ce système traditionnel pourrait s'effondrer. Une première raison est liée à l'exode rural : depuis le xx^e siècle, Vélez Blanco a perdu 75 % de sa population. Ce sont surtout les jeunes qui partent... Ensuite, la multiplication dans le sud de l'Espagne de forages équipés de pompes électriques, la plupart illégaux, fait baisser la nappe phréatique et assèche les sources.

Ces problèmes espagnols sont à l'image de ceux du monde : l'eau, surtout dans les régions arides, est une ressource rare, comme l'est aussi la prudence dans sa gestion ! Les quatre exemples que nous avons présentés prouvent que dans le passé, les populations humaines ont été capables de se procurer de l'eau même dans des conditions difficiles. Leur exemple devrait nous aider à mieux utiliser cette ressource précieuse et de plus en plus rare. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Berking et al., **Heavy rainfalls in a desert(ed) city : A climate-archaeological case study from Sudan**, dans L. Giosan et al., *Climates, Landscapes, and Civilizations*, American Geophysical Union, pp. 163-168, 2013.

D. L. O. Mendis, **Environment and conflict : A kuhnian paradigm-based approach to understanding some socio-cultural and economic causes of problems and conflicts in modern irrigation projects in Southern Sri Lanka**, dans *Water for People and Nature*, Ministry of Irrigation and Water Management (dir.), Sri Lanka Water Heritage, pp. 95-122, 2003.

L'ESSENTIEL

> Les mollusques construisent des coquilles de formes complexes avec une précision mathématique.

> La modélisation mathématique montre qu'il suffit de suivre trois règles simples pour reproduire ces formes.

> Ces résultats aident à comprendre pourquoi de nombreuses espèces de mollusques non apparentées sécrètent des coquilles aux formes similaires.

LES AUTEURS



DEREK E. MOULTON
professeur de
biomathématiques à
l'université
d'Oxford,
en Grande-Bretagne



ALAIN GORIELY
professeur
de modélisation
mathématique
à l'université
d'Oxford



RÉGIS CHIRAT
paléontologue et maître
de conférences
à l'université
Claude-Bernard, à Lyon

Comment les coquillages acquièrent leur forme

Spirales, épines, surfaces côtelées... : les coquilles des mollusques ont des géométries complexes et d'une étonnante régularité. Comment ces formes sont-elles produites ? La modélisation mathématique montre que quelques processus mécaniques simples suffisent à engendrer les caractères observés.