

Chronique d'une noyade annoncée

Bâtiments publics, nécropoles, résidences ornées de riches mosaïques... La cité de Zeugma a été noyée par l'Euphrate et dans le chagrin.

En Turquie, non loin de la frontière syrienne, les deux cités antiques de Séleucie-Zeugma et d'Apamée se font face, de part et d'autre de l'Euphrate, en amont du nouveau barrage de Birecik. Apamée et ses alentours ont disparu en juin dernier sous les eaux du lac de retenue, en même temps qu'une cinquantaine d'autres sites archéologiques. Après un répit de trois mois pendant lequel les ingénieurs ont testé le fonctionnement du barrage, les eaux montent à nouveau : 20 pour cent du site de Zeugma sera bientôt englouti.

Depuis cinq ans, à l'initiative de Pierre Leriche (CNRS, ENS), la mission franco-turque de Zeugma-moyenne a fouillé les deux villes : l'une de leurs plus belles découvertes est une résidence romaine qui compte une quinzaine de salles décorées de mosaïques.

Fondées à la fin du IV^e siècle avant notre ère par le roi Séleucos I^{er}, ces deux villes deviennent une étape importante sur la route de la soie, qui relie la Méditerranée à l'Orient. Elles contrôlaient les caravanes et les convois militaires qui traversent l'Euphrate, probablement sur des bacs ou sur un pont de bateaux reliés par des câbles jetés entre les deux rives.

De nombreux historiens et géographes de l'Antiquité, tels Pline, Strabon et Ptolémée, ont cité la ville de Séleucie-Zeugma, florissante à l'époque romaine. À partir du I^{er} siècle, le passage de l'Euphrate devient si célèbre que Séleucie est renommée Zeugma, qui signifie « pont » en grec.

Pendant ces cinq dernières années, les archéologues ont fouillé les zones qui allaient être englouties. Ils ont retrouvé quelques gros blocs architecturaux qui renforçaient les berges, mais les autres aménagements liés à la présence du passage sur l'Euphrate avaient disparus dans le cours du fleuve. À Apamée, l'emploi des méthodes modernes de prospection magnétique et électrique a révélé un plan d'urbanisme en damier, typiquement hellénistique, et une enceinte en dents de scie. Les fouilles indiquent un brusque déclin, à partir du I^{er} siècle avant notre ère, à cause de l'affrontement entre les Romains et les Parthes. Toutefois, on relève encore des traces d'occupation partielle dans la ville jusqu'au VIII^e siècle.

Zeugma et ses trois grandes nécropoles s'étagent sur des terrasses à flanc de collines de calcaire tendre. Dans les deux nécropoles menacées par la montée des eaux, les archéologues ont étudié 300 tombes et hypogées (chambres funéraires collectives creusées dans le rocher) de l'époque romaine, notamment l'architecture, les décors peints, les inscriptions des stèles funéraires et les reliefs creusés dans la façade des tombes. Dans la ville elle-même, deux grandes places romaines avec leur système d'adduction et d'évacuation des eaux ont été mises au jour, ainsi que le bâtiment des archives du sénat.

La découverte la plus spectaculaire du site de Séleucie-Zeugma est une résidence romaine, dont toute la structure, ainsi que le décor de mosaïques et de peintures murales sont remarquablement conservés. En octobre 1999, les archéologues ont découvert une très grande mosaïque, composée de deux panneaux aux motifs géométriques et de deux panneaux figurés. L'un repré-



sente Dionysos sur son char tiré par des tigresses, accompagné d'une bacchante et de la Victoire, le second, la légende de Pasiphaé. Sa qualité technique égale les plus belles réalisations d'Antioche, par la finesse des tesselles (les petits cubes de matière dure qui la constituent), la variété des coloris, la présence de pâte de verre, le réalisme de l'architecture et des personnages représentés. L'œuvre, datée de la fin du II^e ou du début du III^e siècle, constituait le pavement du triclinium (la salle à manger).

Puis, au cours de l'hiver 1999, 14 salles ornées de mosaïques et de peintures murales ont été découvertes. La résidence comporte trois ailes. Celle du centre correspond aux appartements de réception. Outre le grand triclinium, elle comprend un impluvium (une petite cour ornée d'une fontaine) et un cubiculum, où figure une représentation d'Éros, cernée par un très beau rinceau (des volutes formées par des feuillages). Les murs sont recouverts de peintures en trompe-l'œil, imitant le marbre, comme à Pompei. Au centre de la cour, Poséidon trône sur son char entouré d'animaux marins. Presque toutes les pièces en enfilades des ailes Est et Ouest sont décorées de fresques. La cour orientale abritait des cuisines bien conservées : on y a retrouvé des jarres, des puits, des plans de travail avec foyers et repose-plats. Enfin la cour occidentale a livré une statue candélabre d'éphèbe casqué en bronze et des centaines de pièces de monnaie.

Avant la montée des eaux, les archéologues ont détaché les mosaïques et les fresques des murs et du sol. Ils ont pris les empreintes d'une partie des reliefs de la façade la mieux conservée des nécropoles de Zeugma et celle d'une des inscriptions funéraires d'Apamée. Aujourd'hui, les fouilles se poursuivent dans les parties hautes de Zeugma et dans la nécropole Sud, qui resteront au-dessus de la surface du lac. Ces secteurs devraient réserver de belles découvertes, car ils sont les plus riches de la ville en bâtiments publics.



L'une des mosaïques de la résidence romaine découverte à Zeugma, que les archéologues ont détachées des murs et du sol pour les sauver des eaux.

Trous noirs galactiques

Les trous noirs et les galaxies seraient liés dès leur formation.

L'explication de l'évolution des étoiles est l'un des grands accomplissements scientifiques du XX^e siècle. Malgré l'étonnante variété de ces objets, toutes les étoiles traversent le même type de cycles, résultats de l'effet combiné de quelques mécanismes fondamentaux, tels l'effondrement gravitationnel ou la fusion nucléaire. Aujourd'hui, les astronomes sont sur le point d'unifier notre connaissance des galaxies. De la Voie lactée aux lointains quasars des confins de l'espace connu, toutes les galaxies connaissent les mêmes phénomènes : les interactions galactiques, et, selon les derniers résultats, l'action de trous noirs supermassifs.

Les trous noirs sont connus pour leur pouvoir destructeur «étoilophage», mais leur potentiel créateur n'est apparu que progressivement. Dans les années 1960 et 1970, la mesure de l'énergie émise par les quasars indiquait que des trous noirs massifs se trouvaient en leur centre : seuls ces monstres de millions, voire de milliards de masses solaires, pouvaient fournir suffisamment d'énergie pour expliquer la luminosité des quasars. Dans les années 1980, les astrophysiciens invo-

quèrent ces trous noirs géants pour rendre compte de l'énergie de toutes sortes de galaxies anormalement lumineuses. Grâce à des observations conjointes du Télescope *Hubble* et d'interférométrie radio à très longue base, les astronomes ont découvert que les étoiles et les nuages interstellaires situés près du centre de nombreuses galaxies se déplaçaient anormalement vite, comme si la gravité d'un astre géant et invisible les entraînait.

Les astronomes supposent que cet astre est un trou noir supermassif, même si d'autres objets plus prosaïques (des amas denses d'étoiles) ou exotiques (des boules de neutrinos) n'ont pas été écartés. Le nombre de ces trous noirs supermassifs s'élève aujourd'hui à 34 et deux tendances ont émergé. D'abord, ces trous noirs n'apparaissent pas seulement dans les quasars et affiliés, mais dans des galaxies normales. La seule contrainte semble être une forme elliptique : soit une galaxie elliptique, soit un bulbe dans une galaxie spirale, comme la Voie lactée. Ensuite, le trou noir a une masse d'environ 0,15 pour cent de celle de son hôte elliptique, galaxie ou bulbe galactique.

Une troisième caractéristique vient d'être annoncée par deux équipes américaines qui ont remarqué que la masse du trou noir dépendait de la vitesse moyenne des étoiles à l'intérieur de leur hôte elliptique, même dans les régions situées au-delà de l'influence directe du

trou noir. La corrélation entre vitesse et masse est si parfaite qu'on a l'impression que chaque trou noir est «taillé» pour son hôte. Quel mécanisme a-t-il pu produire pareille corrélation ? Le trou noir est-il apparu d'abord, ce qui a déterminé la masse de l'ellipsoïde ?

Selon John Kormendy, de l'Université du Texas, la masse de trou noir ne dépend pas seulement de la masse de l'ellipsoïde, mais aussi de sa taille : plus l'ellipsoïde est petit, plus les étoiles se meuvent rapidement. Pour obtenir un trou noir supermassif, une galaxie ou un bulbe galactique doit, en plus d'être très massif, être particulièrement petit et dense. En d'autres termes, la masse du trou noir est déterminée par ce qui fixe la taille du bulbe. On pense que cette taille est fixée au cours de la formation du bulbe ; lorsque le gaz s'est condensé en étoiles, la taille est fixée. Ainsi, ni le trou noir ni le bulbe ne naissent en premier : ils se développent ensemble, limités par la quantité de matériau disponible.

Cette nouvelle corrélation corrobore la théorie selon laquelle les quasars sont des trous noirs et des bulbes en interactions. Les épisodes d'interactions, pas toujours aussi intenses que ceux des quasars, seraient alors des moments normaux de la vie de la plupart des galaxies, engendrés par des interactions ou des coalescences avec d'autres galaxies. La phase de quasar coïnciderait avec l'époque de naissance des premières étoiles dans le bulbe. Ensuite, certaines galaxies s'aplatiraient, comme celle dans laquelle nous nous trouvons. D'autres galaxies naîtraient en tant que disques et acquerraient ensuite un bulbe et un trou noir.

Certains astronomes estiment que ce scénario contredit les observations selon lesquelles un intervalle de temps important existe entre le moment où l'activité de quasar démarre et celui de formation des premières étoiles. En tout cas, personne ne sait encore comment se crée le «germe» de trou noir qui grossit ensuite dans de telles proportions. On ignore aussi comment le matériau tombe sur le trou noir ou comment le monstre arrête de dévorer les alentours.

Afin d'améliorer les données, les astronomes testent la corrélation aux points faibles de la théorie : les galaxies massives et celles de faibles masses. De nombreux instruments continueront d'étudier les trous noirs au centre des galaxies et, dans les prochaines décennies, de nouveaux satellites, comme le NGST, successeur du Télescope spatial, étudieront les toutes premières galaxies. D'ici là, les trous noirs auront peut-être perdu leur réputation d'objets étranges.



Le trou noir, au cœur de la galaxie d'Andromède, a une masse équivalente à 30 millions de fois celle du Soleil. L'observatoire de rayons X Chandra a repéré des spirales de gaz englouties (flèches dans le cartouche ci-contre).

Jason Ware

NASA, S. Murray et M. García

La longévité des batteries «solaires»

Les causes de la durée de vie limitée des batteries solaires sont désormais élucidées.

Les piles photovoltaïques, qui transforment l'énergie solaire en électricité, équipent des sites isolés, où le raccordement au réseau électrique est difficile et la consommation faible, tels les refuges de montagne. Ces piles sont onéreuses : au prix d'achat des panneaux solaires s'ajoute le coût de remplacement des batteries, qui stockent l'électricité fournie par les panneaux, pendant la nuit et durant les jours sans soleil. Ces batteries durent 5 à 15 ans, selon les sites. Comment augmenter leur durée de vie ?

Philippe Malbranche, Florence Matterna et leurs collègues du groupement énergétique de Cadarache (CEA Cadarache-ADEME) ont étudié les phénomènes qui limitent la durée de vie des batteries pour automobiles utilisées dans des applications solaires. En analysant des dizaines de batteries usagées, ils ont identifié la cause de la mort des batteries : des dépôts de sulfate de plomb rendent les électrodes isolantes.

Ces batteries sont des accumulateurs plomb-acide : les électrodes, qui contiennent toutes deux du plomb, plongent dans une solution aqueuse d'acide sulfurique. Au cours de leur fonctionnement (lors de la décharge), du sulfate de plomb se dépose sur les deux électrodes, selon une

réaction de «double sulfatation», qui consomme de l'acide sulfurique. Pendant la phase de charge, la réaction inverse se produit : le sulfate de plomb précédemment formé se dissocie, et l'acide sulfurique est libéré.

Les électrochimistes de Cadarache ont mis de l'acide sulfurique contenant du soufre radioactif dans une batterie neuve, afin de le suivre à la trace. Ils ont découvert que, pendant la charge, l'acide sulfurique relargué s'accumule au fond du bac : la batterie ne se charge pas uniformément. La solution étant très concentrée en acide sulfurique vers le bas, une partie du sulfate de plomb accumulé sur les électrodes ne se dissocie pas, ce qui les rend isolantes. À mesure des cycles de charge et de décharge de la batterie, l'acide sulfurique s'accumule et monte dans le bac, tandis que le sulfate de plomb se dépose de plus en plus haut sur les électrodes. Finalement, il les recouvre entièrement : comme il est isolant, la batterie ne fonctionne plus.

Dans les voitures, ce phénomène n'apparaît pas, car la quantité d'acide relargué est faible (la batterie se recharge en permanence) et le mouvement du véhicule mélange l'eau et l'acide. Toutefois cette agitation est absente dans les batteries couplées aux panneaux solaires.

Ph. Malbranche et ses collègues envisagent de limiter l'accumulation d'acide sulfurique dans la partie inférieure du bac à l'aide de membranes ou de gels, qui réduiraient les sédimentations dans la solution. Quand les batteries sont en service, on pourrait les forcer à se surcharger, ce qui provoquerait la formation d'hydrogène et d'oxygène : les bulles, en s'échappant vers le haut, brasseraient la solution.

Repérage dans l'espace

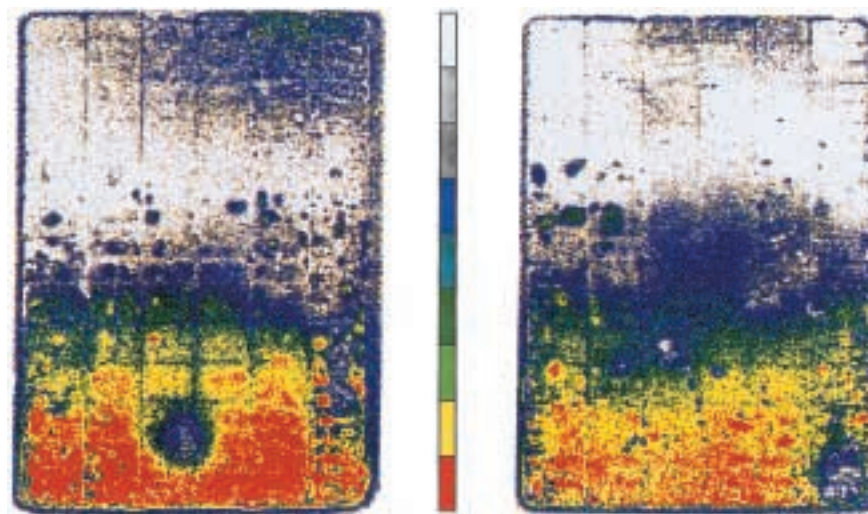
Des caméras intelligentes pour l'orientation des satellites par rapport aux étoiles.

Dans l'espace, comment distinguer le haut du bas, la droite de la gauche, bref comment s'orienter ? Si la plupart des satellites utilisent le Soleil et la Terre comme points de repère, les étoiles sont une meilleure référence. Réparties en grand nombre sur la voûte céleste, elles sont cependant difficiles à utiliser pour un satellite. L'apparition des capteurs numériques (CCD) et les progrès des calculateurs de bord ont conduit à la mise au point de systèmes d'orientation précis, autonomes et peu encombrants.

Orienter une caméra ou une antenne vers la Terre, pointer les panneaux solaires vers le Soleil ou commander la direction du jet d'une tuyère sont autant d'opérations qui nécessitent la connaissance de l'orientation du satellite, encore nommée attitude. Or, dans l'espace, les points de repère, compléments indispensables aux précieuses informations des centrales inertielles (gyroscopes), ne sont pas légions. Le Soleil et la Terre sont des repères évidents, mais pas suffisamment précis pour toutes les missions, notamment celles d'observation de la Terre.

Peut-on orienter les satellites par rapport aux étoiles, comme le font les navigateurs depuis des siècles ? Malgré les difficultés liées à leur faible luminosité des étoiles et à leur identification, des instruments spéciaux, nommés senseurs stellaires, ont été mis au point dès le début de l'ère spatiale. Toutefois, leur masse importante, leur absence d'autonomie ainsi que l'utilisation de tensions élevées limitaient leur utilisation.

Au début des années 1970, l'invention du capteur CCD, qui équipe aujourd'hui les caméscopes et les appareils photographiques numériques, change le domaine de l'imagerie : la lumière reçue par le capteur libère des électrons contenus dans une mince couche de silicium, lesquels sont ensuite capturés. Périodiquement, on compte le nombre d'électrons piégés, qui est proportionnel à l'intensité lumineuse reçue. On reconstitue ainsi une image. L'intérêt de cette technique réside dans sa capacité à accumuler les électrons, ce qui autorise la détection de signaux très faibles. De surcroît, les capteurs CCD, petits et peu gourmands en énergie, forment des images de qualité.



Les électrodes des batteries plomb-acide qui stockent l'énergie solaire se recouvrent de quantités croissantes de sulfate de plomb (du rouge au blanc selon l'échelle de couleur au centre), lors des cycles de charge et de décharge (après 10 cycles à droite et 20 à gauche), ce qui finit par les rendre isolantes et entraîne la mort des batteries.