

correspondances périodiques antérieures pouvaient-elles expliquer les relations plus précises du mécanisme d'Anticythère? Nous avons fini par trouver une méthode, développée par le philosophe Parménide d'Élée (du VI^e au V^e siècle avant notre ère) et rapporté par Platon (du V^e au IV^e siècle avant notre ère), pour combiner les correspondances connues afin d'en obtenir de meilleures.

STRATÉGIE DE CONSTRUCTION

Nous avons alors considéré que les constructeurs de la machine ont employé des modes de calcul répondant à trois critères: être précis, rendre possible des factorisations et être économe. Un mode de calcul devait être précis pour traduire les correspondances planétaires connues pour Vénus et Saturne; il devait permettre des factorisations, pour que les roues dentées nécessaires au calcul puissent loger dans le mécanisme; l'exploitation mécanique des nombres premiers communs aux correspondances planétaires pouvait enfin aider à rendre le dispositif économe en réduisant le nombre d'engrenages nécessaire. Cette conception économisant le nombre de roues dentées est la caractéristique des trains d'engrenages survivants. Sur la base de ces critères, notre équipe a dérivé les périodes 462 et 442 en utilisant l'idée de Parménide et a employé les mêmes méthodes pour découvrir les périodes manquantes pour les autres planètes dont les inscriptions étaient perdues ou endommagées.

Grâce aux correspondances entre les périodes planétaires, nous avons pu comprendre comment adapter les trains d'engrenages des planètes dans les espaces restreints disponibles. Pour Mercure et Vénus, nous avons conçu des mécanismes économiques à cinq engrenages comportant des dispositifs à aiguilles et rainures, semblables aux mécanismes de Michael Wright pour ces planètes. Nous avons trouvé des indices solides de la justesse de notre reconstruction dans un fragment de quatre centimètres de diamètre. À l'intérieur de cette pièce, le tomographe à rayons X avait révélé un disque lié à un engrenage de 63 dents, tournant à l'intérieur d'une plaque en forme de D. Le nombre 63 ($3 \times 3 \times 7$) partage les facteurs premiers 3 et 7 avec 462 (la période de Vénus). Un train d'engrenages utilisant l'engrenage à 63 dents pourrait être dessiné afin de correspondre à un roulement placé sur l'un des rayons de la roue motrice principale. Une conception similaire pour Mercure correspond aux caractéristiques du rayon opposé. Ces observations nous ont donné une grande



Les chercheurs ont reconstitué l'affichage de la façade avant par ordinateur. Au centre, un dôme représente la Terre. La phase de la Lune est affichée par une sphère à demi argentée associée à un pointeur donnant sa position dans le zodiaque, décrit par l'avant-dernier anneau (gradué). Les dates remarquables des cycles synodiques de Mercure, de Vénus, de Mars, de Jupiter et de Saturne sont marquées par des lettres et des perles sur cinq anneaux concentriques. Entre celui de Vénus et celui de Mars s'intercale l'anneau donnant le soleil «vrai». Tout à fait à l'extérieur, après l'anneau gradué du zodiaque, un anneau gradué donne la date dans le calendrier égyptien.

confiance dans le fait que nous étions sur la bonne voie pour Mercure et Vénus.

Pour les autres planètes connues – Mars, Jupiter et Saturne –, notre équipe a conçu des systèmes très compacts adaptés à l'espace disponible. Ces conceptions constituaient un grand changement par rapport aux systèmes de Michael Wright pour ces mêmes planètes. Travaillant indépendamment, Christián Carman, de l'université nationale de Quilmes en Argentine, et moi-même avons montré que le subtil système d'engrenages indirect utilisé pour le mouvement variable de la Lune pouvait être adapté à ces planètes. Notre équipe de l'université de Londres a prouvé que ces trains d'engrenages pouvaient être augmentés afin d'incorporer les nouvelles correspondances périodiques. Grâce à cette stratégie, les constructeurs de la machine ont pu monter plusieurs engrenages sur la même plaque et les concevoir pour qu'ils produisent précisément les correspondances périodiques.

Ces trains économes à sept engrenages seulement pouvaient s'imbriquer entre les plaques

disposées sur les piliers de la roue motrice principale de façon à faire apparaître les informations produites dans l'ordre cosmologique habituel des corps célestes – Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter et Saturne – qui préside à la disposition du système annulaire. Les dimensions des espaces disponibles entre les plaques étaient parfaitement adaptées pour accueillir ces systèmes, laissant même un certain volume en réserve. Quelques détails restent cependant inexpliqués.

Ainsi, nous avons ajouté un mécanisme pour le mouvement variable du Soleil et un mécanisme épicyclique pour calculer les «nœuds lunaires» – les points où l'orbite de la Lune traverse l'écliptique, ce qui rend une éclipse possible. Les éclipses se produisent seulement lorsque le Soleil est proche de l'un de ces nœuds pendant une pleine ou une nouvelle lune. Les astronomes du Moyen-Âge et de la Renaissance appelaient «main de dragon» l'aiguille à double extrémité destinée à repérer les nœuds lunaires. L'engrenage épicyclique de cette main de dragon explique aussi exactement un roulement prédominant sur l'un des rayons qui semblait auparavant n'avoir aucune fonction. En mars 2021, ayant enfin expliqué toutes les structures de la roue motrice principale, nous avons publié nos conclusions dans *Scientific Reports*.

UNE CONCEPTION MAGNIFIQUE

Ainsi, nous comprenons aujourd'hui comment l'affichage frontal correspondait à la description du mode d'emploi de la façade arrière, avec le Soleil et les planètes représentés par des perles de marquage disposées sur des anneaux concentriques. Sur la façade avant étaient affichés la phase, la position et l'âge de la Lune – le nombre de jours depuis le début d'une lunaison –, les années à éclipses – par l'aiguille de dragon –, et les saisons.

Les anneaux concentriques planétaires nous ont fait comprendre que nous pouvions désormais donner un sens à l'inscription de la façade avant. Cette inscription est une liste formelle des événements synodiques de chaque planète (conjonctions avec le Soleil, stations) et des intervalles en jours les séparant. Sur la façade arrière, les inscriptions relatives aux éclipses correspondent aux marques sur le cadran du saros. D'une façon analogue, sur la plaque avant, les inscriptions concernant les levers et couchers d'étoiles correspondent aux marques sur le cadran zodiacal. Nous avons pensé que les inscriptions sur la face avant pouvaient correspondre à des lettres sur les anneaux planétaires: si l'aiguille du Soleil se

trouve sur l'une de ces lettres, l'inscription correspondante décrit le nombre de jours jusqu'au prochain événement synodique. L'absence de la partie gauche de l'inscription, où l'on s'attendrait à trouver ces lettres, ne nous permet pas de prouver cette hypothèse, qui fournit cependant une explication convaincante.

En tant que dispositif technique issu de l'Antiquité, la machine d'Antikythère est extraordinaire, et change à elle seule notre notion du niveau technique atteint par les Grecs anciens. Nous les savions déjà très compétents: bien avant la machine d'Antikythère, ils ont construit le Parthénon et le phare d'Alexandrie, connaissaient la plomberie et expérimentèrent avec la vapeur pour créer du mouvement. Cependant, avant la découverte de la machine d'Antikythère, on croyait que les engrenages des Grecs anciens se limitaient aux roues dentées rudimentaires des moulins à vent et à eau. Le mécanisme d'Antikythère mis à part, les premiers mécanismes à engrenages de précision connus sont un cadran solaire et un calendrier à engrenages relativement simples, mais impressionnants pour l'époque byzantine, qui datent environ de l'an 600 de notre ère. Après cela, ce ne fut pas avant le ^{xiv} siècle que des savants créèrent des horloges astronomiques complexes. Le mécanisme d'Antikythère et ses roues dentées portant des dents d'un millimètre de long ne ressemblent à rien de connu dans le monde antique.

Pourquoi a-t-il fallu des siècles aux savants pour réinventer un objet aussi avancé que la machine d'Antikythère? Pourquoi les archéologues n'ont-ils jamais découvert d'autres mécanismes de ce type? Nous avons des raisons de croire que cet objet ne peut avoir été le seul mécanisme de son genre et, du reste, qu'il a eu des précurseurs. Le bronze étant un métal précieux toutefois, les mécanismes complexes réalisés dans cet alliage ayant cessé de fonctionner étaient probablement refondus une fois non fonctionnels. Les épaves antiques constituent peut-être notre meilleure chance d'en découvrir d'autres.

S'agissant du mécanisme d'Antikythère, nous ne sommes pas au bout de nos peines. Nous pensons que notre travail représente une avancée significative, mais il reste encore des énigmes à résoudre. Notre équipe n'est pas certaine que sa reconstitution est entièrement correcte, tant l'énorme perte d'information entraînée par la détérioration du mécanisme rend difficile l'explication de tous les détails subsistants. Quoi qu'il en soit, nous saisissons de plus en plus clairement la performance inouïe que représente la réalisation cet objet. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Freeth, D. Higgon, A. Dacanalis, *et al.*, **A model of the cosmos in the ancient Greek Antikythera Mechanism**, *Sci. Rep.*, 2021.

T. Freeth, **Revising the eclipse prediction scheme in the Antikythera Mechanism**, *Palgrave Commun.*, 2019.

J. H. Seiradakis, M. G. Edmunds, **Our current knowledge of the Antikythera Mechanism**, *Nat. Astro.*, 2018.

A. Jones, **A Portable Cosmos : Revealing the Antikythera Mechanism, Scientific Wonder of the Ancient World**, Oxford University Press, mars 2017.

T. Freeth, **L'horloge astronomique d'Antikythère**, *Pour la Science*, n° 389, mars 2010.

T. Freeth, **The Antikythera Mechanism : Challenging the classic research**, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 2002.

L'ESSENTIEL

> Les plus anciens engrenages mentionnés remonteraient au IV^e siècle avant notre ère en Chine, mais ils ont sans doute été inventés plusieurs fois indépendamment.

> Horloges, moulins, machines à calculer, vélos, moteurs... nombre de machines n'auraient jamais vu le jour sans eux.

> Aujourd'hui encore, ils restent indispensables dans de nombreux domaines comme l'automobile, l'aviation et la production d'électricité.

> Depuis quelques dizaines d'années, ils ont aussi investi le domaine micrométrique et sont partis à l'assaut de l'échelle nanométrique.

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)

2000 ans et toutes leurs dents

De la machine d'Anticythère aux moteurs des voitures électriques, l'ingénieuse mécanique des engrenages, toujours plus élaborée, est au cœur de bien des technologies essentielles... jusqu'à l'échelle moléculaire.

L'évolution a doté la cigale bossue, *Issus coleoptratus*, d'un outil étonnamment rare dans le monde vivant : des engrenages. Contrairement à nombre de ses congénères, cet hémiptère de quelques millimètres de long ne vole pas. En revanche, sa détente est remarquable, et ce dès le stade larvaire. De fait, les nymphes présentent une rangée de dents sur chaque surface courbe de leurs deux trochanters postérieurs – les parties des pattes proches de la hanche. Pendant la phase préparatoire du saut, les dents de droite s'engagent dans celles de gauche. La complémentarité parfaite entre les parties droite et gauche assure que les deux pattes arrière se déplacent à des vitesses angulaires identiques lors du saut, ce qui propulse le corps sans le faire pivoter.



La découverte de ce mécanisme est récente. C'est seulement en 2013 que les biologistes Malcolm Burrows et Gregory Sutton, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, ont présenté ce système d'engrenages partiels chez cet insecte. C'était la première fois que l'on décrivait un tel mécanisme chez un organisme vivant. Dans le monde vivant, on n'a d'ailleurs jamais trouvé de roues complètes – dentées ou non – qui tourneraient autour d'un axe, comme le font les pièces des horloges mécaniques. Cette absence est assez étonnante vu le rôle central que ce type de systèmes rotatifs a joué et joue toujours dans les technologies humaines. Pourquoi ce qui, pour nous, a été déterminant dans notre évolution technique ne l'a-t-il pas été pour la vie, qui semble être passée à côté de ce mécanisme élémentaire ? L'explication est peut-être liée à la difficulté d'imaginer un processus morphogénétique produisant de manière progressive un objet ajusté – la roue –, mais non connecté à son support – l'axe de la roue.

Le fait est que pour nous, humains, les engrenages constituent une invention remarquable sans laquelle le monde serait bien