

rainures afin d'afficher correctement les mouvements variables des planètes.

Lorsque j'ai découvert le modèle de Wright, j'ai été choqué par sa complexité mécanique. Il comportait notamment huit tubes coaxiaux apportant des informations sur l'écran frontal de l'appareil. Était-il plausible que les Grecs anciens aient construit un système aussi compliqué? Je suis aujourd'hui persuadé que Wright a correctement reconstruit les mouvements coaxiaux en surface, mais le train d'engrenages qu'il propose n'a ni l'ingéniosité ni l'économie d'engrenages perceptible dans les rouages connus de la machine. Notre équipe de l'université de Londres s'est donc attaquée à réconcilier les mouvements coaxiaux de Wright avec ce que nous avons observé sur le reste du dispositif.

Un indice crucial nous est venu de l'étude tomographique aux rayons X de 2005. En plus de montrer les engrenages en trois dimensions, les images ont révélé quelque chose d'inattendu: des milliers de lettres cachées à l'intérieur des fragments, qui n'avaient plus été lues depuis 2000 ans ou davantage. Dans les notes de recherche prises entre 1905 et 1906, Rehm proposait que les positions du Soleil et des planètes soient affichées dans un système concentrique d'anneaux. À l'origine, le mécanisme comportait deux façades – avant et arrière – portant les affichages et de nombreuses inscriptions. Révélée par les tomographies de 2005, une grande inscription présente sur la façade arrière semble avoir été le mode d'emploi du dispositif. En 2016, le professeur d'histoire de l'astronomie à l'université de New York Alexander-Jones a découvert dans cette inscription la preuve définitive que l'idée de Rehm était correcte: elle décrit en effet en détail l'affichage du Soleil et des planètes sur les anneaux concentriques marqués par des perles servant à indiquer les positions de ces astres.

Dès lors, il devenait clair que toute reconstitution de la machine devrait correspondre à la description de l'affichage du Soleil et des planètes inscrites au dos de l'appareil. Un problème technique nous avait empêchés jusque-là de le faire, de sorte que nos reconstitutions n'intégraient pas les anneaux concentriques donnant le mouvement des planètes. Wright avait en effet découvert qu'une boule argentée sur la moitié de sa surface servait à afficher sur l'appareil la phase de la Lune (lune nouvelle, premier croissant, lune pleine, etc.). Comme il est possible de la décrire par l'angle Lune-Terre-Soleil dans le plan de l'écliptique, la machine la calculait mécaniquement par soustraction de l'angle solaire à l'angle lunaire (tous les deux

fournis par leurs trains d'engrenages respectifs). Toutefois, les affichages de Mercure et de Vénus dans les systèmes des anneaux concentriques donnant les positions planétaires empêchaient le dispositif calculant la phase lunaire d'accéder au train d'engrenages du Soleil, et donc à son angle. Nous butions sur cette difficulté quand, en 2018, David Higgon, l'étudiant diplômé en horlogerie de notre équipe, réussit par une idée étonnamment simple à résoudre élégamment ce problème technique. Sa proposition expliquait en plus la présence sur la roue motrice principale d'un mystérieux bloc percé, qui s'avérait capable de transmettre directement au dispositif de calcul de la phase lunaire l'«angle moyen du Soleil» (par opposition à l'angle variable dit «soleil vrai»). Grâce à cette trouvaille, nous avons obtenu un système d'anneaux concentriques sur la façade avant du mécanisme d'Anticythère reflétant entièrement la description de l'inscription présente sur la façade arrière.

Une autre de nos préoccupations pendant l'étude de l'avant du dispositif était d'identifier les cycles planétaires intégrés au mécanisme, car ils déterminent les trains d'engrenages calculant les positions planétaires. Les recherches antérieures suggéraient qu'ils étaient fondés sur des correspondances périodiques dérivées de celles des Babyloniens. Mais en 2016, Alexander Jones a découvert quelque chose qui nous fit écarter cette hypothèse. La tomographie à rayons X de l'inscription de la façade avait révélé qu'elle est divisée en sections pour chacune des cinq planètes. Dans la section Vénus, Jones a trouvé le nombre 462; dans la section Saturne, il a trouvé le nombre 442. Ces chiffres représentent des correspondances périodiques plus précises que celles des Babyloniens, ce qui est étonnant, car rien n'a jamais suggéré que les astronomes de l'Antiquité les connaissaient. Il semble en fait que les constructeurs de la machine d'Anticythère avaient découvert des correspondances périodiques améliorées pour deux des planètes: 289 cycles synodiques en 462 ans pour Vénus et 427 cycles synodiques en 442 ans pour Saturne.

Alexander Jones n'ayant pas expliqué comment les Grecs anciens ont obtenu ces deux périodes synodiques, nous avons entrepris d'essayer de le saisir par nous-mêmes. Aris Dacanalis, notre autre étudiant de l'université de Londres, a établi une liste complète des relations entre les correspondances périodiques et leurs erreurs estimées dans l'astronomie babylonienne. Les combinaisons de ces

LA MACHINE D'ANTICYTHÈRE, EN CHIFFRES

2 060 ans sous l'eau
7 astres situés dans le ciel
223 dents dans la plus grande roue dentée
3 affichages par cadran
30 roues dentées retrouvées
69 roues dentées dans la dernière reconstitution.

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 économiques à sept engrenages seulement pouvaient s'imbriquer entre les plaques