



Révlée par la tomographie, une inscription présente sur la façade arrière semble avoir été le mode d'emploi du dispositif

Le troisième acteur clé de la recherche sur la machine d'Anticythère est Michael Wright, un ancien conservateur du génie mécanique au musée de la Science de Londres. En 1990, il mena avec l'informaticien australien Allan Bromley un nouvel examen de l'intérieur des fragments du mécanisme, mais cette fois par tomographie, donc en trois dimensions. Bromley décéda avant que ce travail ne porte ses fruits, mais Michael Wright s'acharna et réussit plusieurs percées, déterminant par exemple les nombres exacts de dents des roues et le sens du cadran supérieur situé à l'arrière du dispositif.

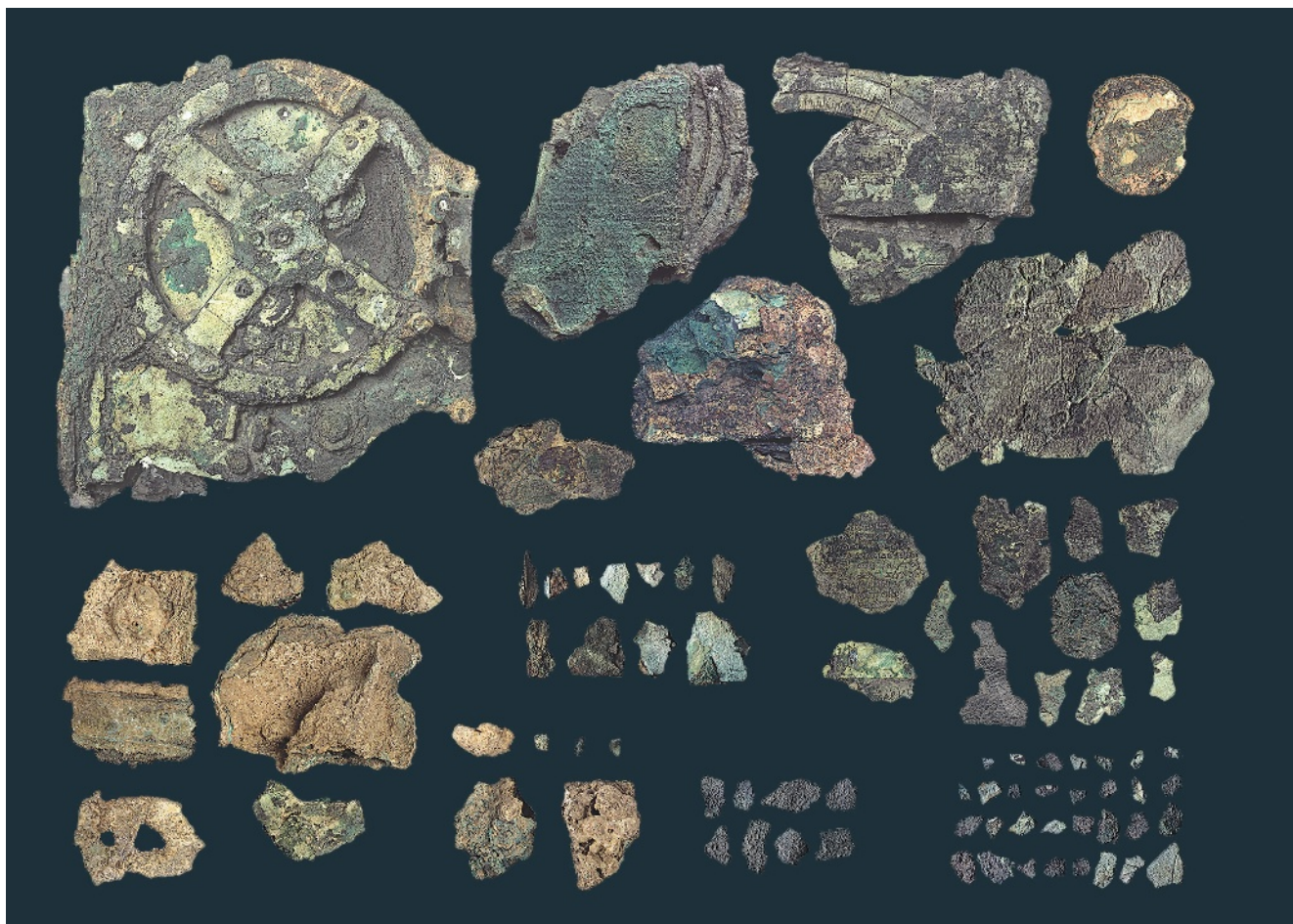
En 2000, j'ai proposé une nouvelle étude tomographique, qui fut menée en 2005 par le Projet de recherche sur le mécanisme d'Anticythère (*Antikythera mechanism research project*), une équipe anglo-grecque d'universitaires en collaboration avec le Musée archéologique national d'Athènes. La société X-Tek Systems – aujourd'hui une filiale de Nikon – mit spécialement au point un scanner doté d'une source de rayons X à microfoyer apte à fournir des images tridimensionnelles de très haute résolution. La société Hewlett-Packard nous aida en les exploitant par PTM (*polynomial texture mapping*), c'est-à-dire par une méthode d'analyse de texture fondée sur l'utilisation d'une base de fonctions polynomiales. La PTM rend encore plus visibles les détails de surface, ce qui ne pouvait que nous être utile.

De fait, les nouvelles données nous surprirent au plus haut point en nous révélant qu'en plus des mouvements astraux, le mécanisme

prédissait aussi les éclipses. Cette percée est liée à l'inscription que Rehm avait trouvée, qui mentionnait le saros. Les nouvelles images révélaient en effet à l'arrière du mécanisme la présence d'une grande roue à 223 dents, laquelle faisait tourner un indicateur sur un cadran en forme de spirale, de sorte que quatre tours couvraient 223 sections successives représentant 223 lunaisons successives. Ce « cadran saros » servait à prédire les mois à éclipses de Soleil et de Lune, dont les caractéristiques étaient décrites sur le mécanisme par des inscriptions. Cette découverte nous a donc révélé une nouvelle fonction de la machine, mais en posant un problème énorme : un jeu de quatre roues dentées situé à l'intérieur de la circonférence de la roue motrice principale semblait sans fonction.

Des mois m'ont été nécessaires pour résoudre cette énigme, mais quel n'a pas été mon étonnement quand j'y suis enfin parvenu : ce train d'engrenages calculait très joliment les variations du mouvement de la Lune ! La vélocité de la Lune varie en effet dans le temps à cause du caractère elliptique de l'orbite lunaire, de sorte que, par rapport aux étoiles, elle est plus lente loin de la Terre et plus rapide proche d'elle. L'orbite lunaire n'est en outre pas fixe : elle accomplit une rotation complète autour de la Terre en un peu moins de neuf ans. Les Grecs anciens ignoraient les orbites elliptiques, mais décrivaient les mouvements subtils de la Lune par la théorie des épicycles, c'est-à-dire par la combinaison de deux mouvements circulaires. J'ai réalisé de quelle façon le mécanisme traduisait la théorie épicyclique en m'appuyant sur une remarquable observation de Michael Wright faite pendant son étude de l'énigmatique train de quatre roues dentées. Il avait observé deux des quatre mystérieuses roues situées à l'arrière du mécanisme et remarqué qu'une aiguille solidaire de sa face s'engageait dans une fente sur une autre roue dentée. On aurait pu penser ce dispositif inutile, étant donné que les roues avaient le même axe, mais Michael Wright s'est justement rendu compte qu'en fait, elles tournaient sur deux axes différents séparés d'un peu plus d'un millimètre. Ces détails de construction étaient apparus à la tomographie : les axes des deux roues dentées ne sont pas fixes, mais engendrent un mouvement circulaire non uniforme en formant un train épicycloïdal – une roue tourne sur l'autre de sorte que leurs axes tournent l'un autour de l'autre – monté sur la grande roue dentée à 223 dents.

Michael Wright avait écarté l'idée que ce train épicycloïdal reproduisait le mouvement variable de la Lune parce que, dans sa



reconstitution du mécanisme, l'engrenage à 223 dents tournait bien trop vite pour que cela ait un sens. Dans ma reconstitution, l'engrenage à 223 dents tourne afin de déplacer correctement l'aiguille du cadran saros. Reproduire le mouvement lunaire dans la théorie épicyclique à l'aide d'un train épicycloïdal et d'une aiguille glissée dans une fente est de la part des Grecs anciens une véritable performance technique, ingéniosité qui renforce l'hypothèse qu'Archimède pourrait être le concepteur originel de la machine d'Anticythère. Nos recherches sur les cadrans arrière ont complété notre vision de l'arrière du mécanisme, réconciliant toutes les données recueillies. Mes collègues et moi avons publié ces résultats en 2006 dans le journal *Nature*. Une grande énigme subsistait cependant : l'avant de la machine.

L'AVANT DU MÉCANISME

La structure la plus frappante à l'avant du plus grand fragment est la roue motrice principale conçue pour tourner une fois par an. Au contraire de la plupart des autres roues dentées, il ne s'agit pas d'un disque plat, mais d'une roue à quatre rayons comportant de

Au fil des ans, la masse originale du mécanisme d'Anticythère s'est fragmentée en 82 morceaux. Comprendre comment les assembler fut un véritable défi pour les chercheurs. C'est dans le plus grand fragment (en haut à gauche) que se trouve la roue motrice principale.

nombreuses structures étonnantes. Des trous circulaires dans les rayons où s'inséraient des axes montrent qu'ils portaient des roulements. Le bord extérieur de l'engrenage contient un anneau de petits piliers, sorte de petits doigts dotés d'un épaulement et dont l'extrémité est percée, clairement pour fixer une plaque. Plus courts, quatre de ces piliers supportaient une plaque rectangulaire ; plus longs, quatre autres supportaient une plaque circulaire.

Suivant en cela Price, Michael Wright a proposé qu'un vaste train épicycloïdal – la conception grecque de deux cercles expliquant les étranges mouvements rétrogrades des planètes – était monté sur la roue motrice principale. Il en a même construit une reconstitution en laiton pour en démontrer le fonctionnement. En 2002, il a publié un modèle planétaire révolutionnaire de mécanisme d'Anticythère affichant les cinq planètes que connaissaient les Anciens : Uranus et Neptune ne se voyant pas à l'œil nu, elles n'ont en effet été découvertes qu'avec les premiers télescopes au XVIII^e siècle. Michael Wright a démontré que les théories épicycliques pouvaient être traduites en trains d'engrenages épicycliques à l'aide d'aiguilles coulissant dans des

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 donnaient les positions planétaires empêchant 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.