

# Le mécanisme antique d'Anticythère enfin décrypté?

TONY FREETH

Un calculateur astronomique grec d'une incroyable complexité intrigue depuis sa découverte au xx<sup>e</sup> siècle. Grâce à la tomographie à rayons X, l'équipe de recherche dédiée à cette machine à l'université de Londres en propose une reconstitution d'une précision inédite.

**P**endant le printemps 1900, le scaphandrier Elias Stadiatis remonta affolé en racontant avoir vu «un tas d'hommes morts nus» et des chevaux. Une violente tempête avait forcé sa goélette à mouiller dans un havre naturel de l'île d'Anticythère située entre le Péloponnèse et la Crète. Une fois le mauvais temps calmé, ce pêcheur d'éponges naturelles explora le fond, tombant sur les restes d'un bateau romain rempli de trésors grecs. Dès novembre 1900, cette découverte – celle de la plus importante épave antique à ce jour – donna lieu à la première grande fouille sous-marine de l'histoire.

Les «hommes morts» étaient des statues antiques. Aujourd'hui, elles occupent pas moins de trois salles et l'atrium du musée national archéologique d'Athènes, de sorte qu'il n'est pas étonnant qu'un amas indistinct remonté en même temps que les statues ait échappé à l'attention. Toutefois, lorsque quelques mois plus tard cette masse de concrétions marines de la taille d'un dictionnaire éclata en morceaux, des roues dentées en bronze de la taille d'une monnaie et des inscriptions en grec apparurent. Comme la possibilité d'engrenages d'une telle qualité datant d'avant la Renaissance semblait alors (et semble toujours) peu pensable, la découverte provoqua une intense controverse.





Les rayons X font apparaître des structures mécaniques noyées dans des concrétions marines, au sein du principal fragment de la machine d'Anticythère. À la surface apparaît la roue motrice principale.

© 2005 Musée national archéologique d'Athènes (à gauche); © 2005 Nikon X-Tek Systems (à droite)

L'amas en question est le mécanisme d'Anticythère – on parle aussi de machine d'Anticythère –, un objet qui stupéfie les chercheurs depuis cent vingt ans. Au cours du <sup>xx</sup>e siècle, l'amas d'origine s'est fragmenté en 82 morceaux, créant un puzzle en trois dimensions extrêmement difficile à reconstituer. La machine d'Anticythère semble en effet être un calculateur astronomique à roues dentées d'une très grande complexité. Nous avons aujourd'hui une idée plutôt précise de certaines de ses parties, mais des énigmes non résolues demeurent. Nous savons que cette machine est au moins aussi ancienne que le naufrage d'entre 60 à 70 avant notre ère qui l'a emmenée au fond de la mer, et, par ailleurs, certains indices poussent à penser qu'elle pourrait avoir été créée vers 200 avant notre ère.

En mars 2021, l'*Antikythera Research Team*, l'équipe dédiée à l'étude de la machine d'Anticythère que je dirige à l'université de Londres, a publié une nouvelle étude de ce mécanisme. Ses membres comprennent le spécialiste des matériaux Adam Wojcik, celui de l'imagerie Lindsay MacDonald, l'archéométallurgiste Myrto Georgakopoulou, l'horloger David Higgon, le physicien Aris Dacanalis, deux étudiants diplômés et le mathématicien et cinéaste que je suis. Dans notre article, nous proposons une nouvelle reconstitution des trains d'engrenages – c'est-à-dire des ensembles de plusieurs roues dentées fonctionnant de concert – situés à l'avant du mécanisme, dont l'analyse n'avait pas encore été faite. Ainsi, nous parvenons aujourd'hui à une compréhension nouvelle de la machine qui remet en question beaucoup d'idées sur les capacités techniques des Grecs anciens.

## L'ASTRONOMIE DANS L'ANTIQUITÉ

Nous savons que les Grecs de l'Antiquité étaient rompus à l'observation des astres à l'œil nu. Chaque nuit, alors que la Terre tournait sur son axe, ils observaient la sphère céleste en rotation, ce qui leur donnait une perspective géocentrique sur le ciel nocturne. Les positions relatives de la plupart des astres restant inchangées, les anciens astronomes les considéraient comme des « étoiles fixes ». Toutefois, ils voyaient aussi des corps en mouvement par rapport à ce fond étoilé fixe: la Lune, par exemple, accomplit une rotation complète par rapport aux étoiles tous les 27,3 jours; le Soleil fait la même chose en un an.

Les autres corps en mouvement sont les planètes, que les Grecs nommaient les « vagabondes » à cause de leurs mouvements erratiques en apparence. Pour les astronomes de

## L'ESSENTIEL

> La complexité d'un mécanisme à engrenages vieux de plus de 2 000 ans intrigue depuis sa découverte en 1900 près de l'île grecque d'Anticythère.

> De nouvelles analyses par tomographie à rayons X complètent notre compréhension

du fonctionnement de la machine à partir de ses 82 fragments.

> L'étude des trains d'engrenages subsistants conduit à une nouvelle reconstitution, qui confirme l'ingéniosité de ce calculateur astronomique antique.

## L'AUTEUR



**TONY FREETH** est un mathématicien membre de l'équipe de recherche dédiée au mécanisme d'Anticythère à l'université de Londres.

L'Antiquité, ces astres errants représentaient la plus grande des énigmes. Ils finirent toutefois avec le temps par remarquer que les vagabondes accomplissent d'étranges cycles, se déplaçant parfois dans la même direction que le Soleil dans un mouvement «prograde», avant d'inverser leur mouvement, le rendant «rétrograde». Ces cycles dits «synodiques» sont l'apparence que prend, depuis la Terre, la révolution des planètes autour du Soleil. Les étranges inversions se produisent dans notre ciel étoilé parce que les planètes tournent autour du Soleil, comme nous le savons aujourd'hui, et pas autour de la Terre, comme le croyaient les Grecs.

## L'ASTRONOMIE GÉOCENTRIQUE

En termes modernes, tous les corps en révolution dans le Système solaire suivent des orbites proches du plan de l'écliptique, celui contenant la trajectoire terrestre autour du Soleil. Cela implique qu'ils suivent tous à peu près le même chemin à travers les étoiles. Prédire la position des planètes le long de l'écliptique n'a pu qu'être très difficile pour les premiers astronomes, qui se servaient pour cela des périodes synodiques, celles des cycles du même nom. Il s'avère que l'une des principales fonctions de la machine d'Anticythère est de prédire les positions des planètes à l'aide des estimations des périodes synodiques élaborées pendant l'Antiquité. Une autre de ses fonctions est de suivre les mouvements lunaires et solaires, qui eux aussi varient par rapport aux étoiles.

La conception d'une grande partie du mécanisme d'Anticythère dérive donc du savoir des astronomes du Moyen-Orient antique. L'astronomie a en effet beaucoup progressé au cours du I<sup>er</sup> millénaire avant notre ère à Babylone et dans la ville d'Ourouk. Les astronomes babyloniens, en notant quotidiennement les positions des corps astronomiques sur des tablettes d'argile, ont ainsi mis en évidence les mouvements périodiques du Soleil, de la Lune et des planètes. Pour faire des prédictions, c'était essentiel! En

dix-neuf ans, la Lune parcourt 254 fois son orbite avant de se retrouver au début de son cycle devant le même ciel étoilé, en d'autres termes à la même date, ou, ce qui revient au même, au même point de son orbite. Cette «correspondance périodique» – c'est-à-dire cette correspondance entre les périodes de deux astres – est le cycle métonique, nommé d'après l'astronome grec Méton d'Athènes (mort vers 460 avant notre ère), même si les Babyloniens l'avaient découvert bien avant lui. La machine d'Anticythère traduit plusieurs des correspondances périodiques babyloniennes.

Le philologue allemand Albert Rehm, spécialiste des inscriptions en grec ancien, l'un des acteurs clés des recherches initiales sur le mécanisme d'Anticythère, a été le premier à le considérer comme une machine à calculer. Entre 1905 et 1906, il fit des découvertes cruciales qu'il consigna dans des notes non publiées. Il découvrit par exemple le chiffre 19 sur l'un des fragments du mécanisme, chiffre qui fait référence au cycle métonique. Sur le même fragment, Rehm découvrit aussi les chiffres 76, soit quatre fois 19, donc un raffinement grec du cycle de dix-neuf ans, ainsi que le chiffre 223 correspondant au nombre de lunaisons du «saros», la période de 223 lunaisons (environ dix-huit ans) que les Babyloniens employaient pour prédire les éclipses lunaires et solaires. Ces cycles se répétant étaient la force motrice de l'astronomie prédictive babylonienne.

Le deuxième acteur clé de la recherche sur la machine d'Anticythère fut le physicien britannique devenu historien des sciences Derek John de Solla Price. En 1974, après plus de vingt ans de recherche, il publia un article important intitulé «Les engrenages des Grecs» («*Gears from the Greeks*»), dans lequel il citait de remarquables passages de Cicéron (106-43 avant notre ère). Dans l'un d'entre eux, l'avocat et homme politique romain décrivait une machine fabriquée par le mathématicien Archimède (287-212 avant notre ère) sur laquelle «étaient

## UN CALCULATEUR ASTRONOMIQUE

**D**écouvert il y a plus d'un siècle dans une épave, le mécanisme d'Anticythère est l'objet technique antique le plus complexe jamais découvert. Ce dispositif en bronze, datant probablement d'entre 205 et 60 avant notre ère, contient des dizaines de roues dotées de dents mesurant environ 1 millimètre de long. Leurs mouvements prédisaient les positions à tout moment du Soleil, de la Lune et des cinq planètes connues dans l'Antiquité. À l'université de Londres, une équipe de recherche consacrée à la machine d'Anticythère vient de proposer une nouvelle reconstitution du fonctionnement des engrenages situés à l'avant de la machine.

Façade avant : À l'intérieur de l'appareil, une roue motrice principale fait tourner tous les engrenages, lesquels déplaçaient des aiguilles et des anneaux concentriques affichant les positions de différents corps célestes. De petites sphères indiquaient la position du Soleil et de la Lune et la phase de la Lune. Des perles colorées indiquaient la position des planètes le long de l'écliptique, le plan du Système solaire.

Façade arrière : Deux grands cadrans étaient visibles à l'arrière de l'appareil, ainsi que plusieurs cadrans plus petits. Le grand cadran supérieur est un calendrier représentant le cycle métonique, une période de dix-neuf ans au cours de laquelle 235 phases lunaires se répètent. Le grand cadran inférieur est le cadran « saros » de 223 mois, servant à prédire les éclipses solaires et lunaires.



ENGRENAGES  
DONNANT LES SOLEIL,  
MARS ET SATURNE  
« VRAIS »

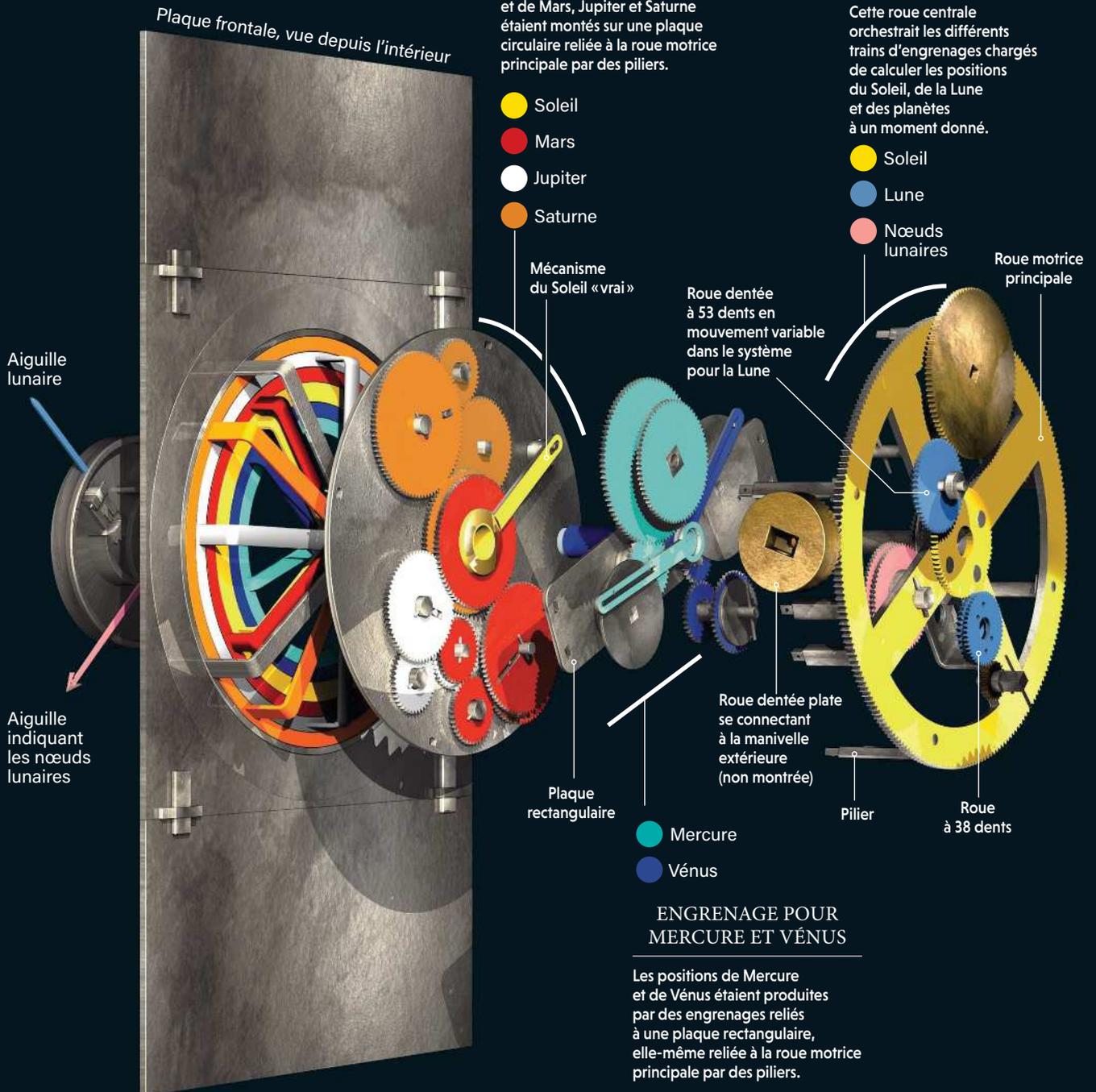
Les engrenages permettant d'afficher les positions du Soleil et de Mars, Jupiter et Saturne étaient montés sur une plaque circulaire reliée à la roue motrice principale par des piliers.

- Soleil
- Mars
- Jupiter
- Saturne

ROUE MOTRICE PRINCIPALE

Cette roue centrale orchestrait les différents trains d'engrenages chargés de calculer les positions du Soleil, de la Lune et des planètes à un moment donné.

- Soleil
- Lune
- Nœuds lunaires



ENGRENAGE POUR  
MERCURE ET VÉNUS

Les positions de Mercure et de Vénus étaient produites par des engrenages reliés à une plaque rectangulaire, elle-même reliée à la roue motrice principale par des piliers.

## DANS LE VENTRE DE LA MACHINE

### PLAQUE CENTRALE

Une plaque placée au centre du mécanisme portait les trains d'engrenages produisant les affichages sur les plaques avant et arrière.

Axe de sortie pour le mouvement variable du système lunaire

Engrenages à aiguilles et fentes créant le mouvement variable de la Lune.

### ENGRENAGES POUR LA LUNE VARIABLE

Tant les Babyloniens que les Grecs savaient que le mouvement de la Lune varie par rapport aux étoiles – ce que l'on explique en termes modernes par son orbite elliptique. Un train d'engrenages particulièrement compliqué calculait ce mouvement variable de la lune d'une manière spectaculairement efficace.

Roue à 127 dents pour créer le mouvement variable de la Lune

Roue à 188 dents soudée à la roue à 223 dents

### Façade arrière

La nouvelle reconstitution de la machine d'Anticythère comprend un total de 69 roues dentées, dont les mouvements produisent ensemble des calculs astronomiques d'une spectaculaire complication. La plus grande partie de cette complexité se retrouve dans les entrailles de la machine, où des trains d'engrenages concouraient à diverses déterminations de la position des astres – dans certains cas à plusieurs en même temps ! L'utilisateur n'avait qu'à placer le cadran calendaire sur un point du passé, du présent ou du futur, et les engrenages internes déplaçaient les pointeurs et les anneaux sur les affichages de la façade de façon à indiquer les positions des astres.

- Calendriers métonique et callippique
- Calendrier des Olympiades
- Cycles saros et exeligmos

### CADRANS ARRIÈRE

Le cadran supérieur arrière était un calendrier métonique/callippique conciliant le mois lunaire avec l'année solaire. Il comprenait également un cadran plus petit indiquant le cycle quadriennal des Olympiades des Jeux panhelléniques, couramment utilisé pour marquer le temps. Le cadran inférieur arrière était un calendrier saros qui prédisait les éclipses solaires et lunaires selon le cycle « saros » de 223 mois. Sur la façade arrière, des inscriptions lui étaient associées, qui décrivaient les caractéristiques des éclipses prédites.

figurés les mouvements du Soleil, de la Lune et des cinq étoiles que nous nommons vagabondes [...]. Archimède [...] avait su combiner dans un seul système et effectuer par une seule rotation tous les mouvements dissemblables et les révolutions inégales des différents astres.» Ce passage de Cicéron suggère qu'Archimède pourrait avoir fondé la tradition ayant conduit à la machine d'Anticythère, même si, selon nous, il a vécu avant sa réalisation. Se pourrait-il même qu'elle dérive d'une conception du mathématicien de Syracuse ?

## DES ENGRENAGES COMPLEXES

Le mystère de ses origines n'a pas empêché des scientifiques, des décennies durant, de chercher à deviner le fonctionnement du mécanisme, en observant la surface des fragments issus de la désintégration de l'amas remonté du fond. Au début des années 1970, ils ont enfin pu en observer l'intérieur. Price et le physicien nucléaire Charalambos Karakalos produisirent alors les premières radiographies. Les deux chercheurs, stupéfaits, mirent en évidence pas moins de trente roues dentées différentes. Vingt-sept d'entre elles sont contenues dans le plus grand fragment et trois dans trois autres. Karakalos et sa femme Emilia estimèrent pour la première fois le nombre des dents présentes sur les roues dentées, étape essentielle pour comprendre les calculs effectués par le mécanisme, qui semblait bien plus compliqué que tout ce que l'on avait imaginé...

Les radiographies étant en deux dimensions, la structure des trains d'engrenages apparaissait à plat, ce qui ne révélait que des parties de la plupart des roues dentées. Déterminer le nombre de dents s'avéra impossible pour de nombreuses roues. Malgré ces lacunes, Price identifia un train d'engrenages calculant la position moyenne de la Lune à une date donnée en utilisant la correspondance périodique de 254 lunaisons en dix-neuf ans. Mis en mouvement par la roue motrice principale – une grande roue elle-même entraînée par une manivelle – située vers l'avant du mécanisme, ce train d'engrenages commence par une roue de 38 dents – deux fois 19, car une roue de 19 dents seulement aurait été trop petite. Cette roue dentée à 38 dents entraîne par l'intermédiaire d'autres roues dentées une roue de 127 dents, soit la moitié de 254 – une roue dentée de 254 dents aurait été trop grande (voir pages 32 et 33).

Le concepteur de la machine d'Anticythère l'a certainement calibrée à partir des positions connues du Soleil, de la Lune et des cinq planètes



Des tomographies X réalisées en 2005 ont révélé des inscriptions inédites sur le mécanisme d'Anticythère, notamment, sur la façade avant, une liste de cycles planétaires (ci-dessus) et, sur la façade arrière, un « mode d'emploi ».

observées dans l'Antiquité, de sorte qu'elle pouvait être utilisée pour prédire les positions de ces astres n'importe quel jour du passé ou du futur. Un utilisateur n'avait qu'à tourner la manivelle se trouvant sur le côté pour la régler sur la période recherchée et lire les prédictions astronomiques correspondantes. La machine affichait par exemple les positions des astres sur le « cadran zodiacal » visible sur sa façade avant. Le plan de l'écliptique y était divisé en douze secteurs de 30 degrés représentant les constellations du zodiaque. Cette ceinture de la sphère terrestre, dont la largeur est d'environ 17 degrés et divisée en deux parties égales par l'écliptique, contient les courses apparentes de toutes les planètes. La première reconstitution du mécanisme capable de remplir les fonctions identifiables sur les cadrans de la machine fut celle de Price, qui la proposa à partir de ce que révélaient les radiographies des fragments subsistants.

Cette reconstitution ne m'a pas convaincu : mon premier article sur le mécanisme d'Anticythère, publié en 2002, propose une réfutation de la plupart des propositions de Price. Le physicien britannique ne nous en a pas moins fait franchir des étapes essentielles : c'est lui qui a le premier déterminé les positions relatives des principaux fragments, dont il a pu déduire l'architecture globale du mécanisme. Nous savons ainsi que des cadrans donnant la date et représentant le zodiaque se trouvaient sur la façade avant de la machine et que deux grands systèmes de cadrans se trouvaient sur sa façade arrière. De significatifs pas en avant !



# 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 surprisent au plus haut point en nous révélant qu'en plus des mouvements astraux, le mécanisme

prédisait 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 vitesse 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<sup>e</sup> 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 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 Dacanalís, 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<sup>e</sup> au V<sup>e</sup> siècle avant notre ère) et rapporté par Platon (du V<sup>e</sup> au IV<sup>e</sup> 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 x 3 x 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 préminent 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 levés 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'Anticythère 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'Anticythère, 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'Anticythère, on croyait que les engrenages des Grecs anciens se limitaient aux roues dentées rudimentaires des moulins à vent et à eau. Le mécanisme d'Anticythère 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<sup>e</sup> siècle que des savants créèrent des horloges astronomiques complexes. Le mécanisme d'Anticythère 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'Anticythère? 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'Anticythère, 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'Anticythère**, *Pour la Science*, n° 389, mars 2010.

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