

# L'horloge astronomique d'Anticythère

Tony Freeth

Cette horloge vieille de 2 000 ans calculait les dates d'éclipses et d'autres événements astronomiques. Son étude révèle un étonnant savoir-faire des Grecs anciens en mécanique de précision.

## L'ESSENTIEL

- ✓ La machine d'Anticythère, mise au jour en 1901, est une calculatrice mécanique datant du II<sup>e</sup> siècle avant notre ère.
- ✓ C'est le plus vieux mécanisme à engrenages connu. L'imagerie moderne a permis de mieux reconstituer ce mécanisme, qui prédit les éclipses et nombre d'autres mouvements célestes.
- ✓ Les inscriptions gravées sur sa façade arrière suggèrent qu'elle a pu être construite à Syracuse, en Sicile. Grâce au savoir-faire d'Archimède ?

Sauf mention contraire, les illustrations sont de Jean-François Podewin et Tony Freeth

**S**ans la Méditerranée, jamais nous n'aurions su. Mais deux tempêtes au même endroit à deux mille ans d'écart nous ont offert la preuve que la mécanique de précision des Grecs anciens approchait la nôtre !

Au milieu du I<sup>er</sup> siècle avant notre ère, une tempête coule un navire romain chargé de trésors grecs à Anticythère, une petite île située entre le Péloponnèse (l'île de Cythère) et la Crète. Vers 1900, une autre tempête oblige des pêcheurs à s'y réfugier, qui profitent de l'occasion pour pêcher des éponges. Ils découvrent l'épave romaine, signalent son intérêt et reviennent y mener, sous le contrôle du gouvernement grec, les premières fouilles archéologiques sous-marines de l'histoire. En neuf mois, ils remontent à la surface de magnifiques bronzes et autres objets de verre et de céramique, des bijoux et des blocs métalliques sans intérêt apparent.

Quelques mois plus tard, cependant, certains de ces blocs calcifiés tombent en morceaux et révèlent des restes d'engrenages et de plaques de bronze pleines d'inscriptions. Munis de dents longues d'un millimètre et demi, les engrenages sont

encore imbriqués les uns dans les autres. La découverte est un choc : on pensait jusqu'alors que les Anciens ne fabriquaient que de triviales fonctions mécaniques. Or certains des principaux fragments de la « machine d'Anticythère » sont pleins de fines roues dentées, qui ne peuvent résulter que d'un grand savoir-faire. Aujourd'hui exposés au milieu de bronzes sublimes au Musée national archéologique d'Athènes, ils semblent si fragiles. Pourtant, quelle puissance de calcul ils recèlent !

La passion de comprendre la machine d'Anticythère m'a pris vers 2000 quand Mike Edmunds, astronome de l'Université de Cardiff, au pays de Galles, me l'a suggéré comme un bon sujet de documentaire. Cinéaste, je suis aussi mathématicien de formation, et j'ai très vite voulu comprendre par moi-même son fonctionnement. J'ai alors découvert avec grand intérêt les avancées considérables déjà faites pour l'analyser. Elles montraient sans ambiguïté qu'il s'agissait d'une calculatrice astronomique, mais échouaient selon moi à expliquer complètement son fonctionnement. Avec M. Edmunds, nous avons alors mis sur pied



une collaboration internationale pour reprendre l'étude de la machine d'Anticythère. En quelques années, nous avons reconstitué le fonctionnement de presque toutes les pièces retrouvées et élucidé leurs fonctions. Nous avons établi que la machine d'Anticythère calculait avec précision les dates des éclipses de Lune et de Soleil, en modélisant le subtil mouvement de la Lune, et qu'elle fournissait le calendrier des jeux sportifs grecs.

## Un objet étonnant

Notons bien qu'aucun objet de même âge et de même complexité technique que la machine d'Anticythère n'est connu dans le monde. Les premiers mécanismes comparables apparaissent au moins un millénaire après le naufrage du bateau romain. Si cette machine n'avait été retrouvée, jamais historiens et archéologues n'auraient imaginé possible un tel mécanisme à une époque aussi reculée.

Vers 1905, Albert Rehm, un philologue (spécialiste des écrits anciens) allemand, est le premier à comprendre que la machine d'Anticythère était un calculateur astro-

nomique. Un demi-siècle plus tard, quand l'historien des sciences d'origine britannique Derek de Solla Price décrit le mécanisme dans un article de la revue *Scientific American*, il reste loin d'avoir tout élucidé.

Selon Price, la machine fonctionnait à l'aide d'une manivelle. On posait à la machine une question astronomique ou calendaire, et la réponse s'affichait à l'aide d'aiguilles sur les cadrans situés en face avant ou arrière. En tournant la manivelle, l'utilisateur pouvait régler la machine sur une date indiquée sur un cadran-calendrier à 365 jours situé sur la face avant. Simultanément, la manivelle actionnait des engrenages afin de produire les informations concernant la date choisie. Il était aussi possible de faire tourner le cadran-calendrier pour, une fois tous les quatre ans, ajouter un jour, sur le même principe que nos années bissextiles.

Un deuxième cadran, de même centre que le calendrier, se trouve sur la face avant. Les 360 degrés du cercle et les 12 symboles des constellations du zodiaque (voir l'encadré pages 68 et 69) y figuraient. Rappelons que le zodiaque est la zone de la sphère céleste sur laquelle, vus depuis la Terre,

**1. LES GRECS ANCIENS** savaient calculer le retour récurrent des éclipses lunaires grâce aux observations faites durant des siècles par les Babyloniens. La machine d'Anticythère aurait fait ces calculs à leur place. La représentation ci-dessus est fondée sur la reconstitution réalisée par l'auteur et son équipe.



## D'où venait l'horloge d'Anticythère ?

La machine d'Anticythère fut construite vers le milieu du II<sup>e</sup> siècle avant notre ère. Rome s'étendait alors aux dépens des royaumes hellénistiques fondés et dominés par des Grecs. Vers 1901, des plongeurs archéologiques ont trouvé ses restes corrodés [ci-contre à gauche] dans un navire romain ayant fait naufrage près de la petite île d'Anticythère vers 65 avant notre ère. Ce navire transportait des trésors artistiques grecs, peut-être de Pergame à Rome. Rhodes avait alors la plus forte tradition astronomique de la Grèce, mais nombre d'indices attribuent plutôt une origine corinthienne à la machine. On peut rapprocher cette origine probable et le fait que, un siècle avant le naufrage, à Syracuse en Sicile, vécut Archimède, le plus grand scientifique grec. Aurait-il laissé une tradition astronomique et technique représentée par la machine d'Anticythère ?

### L'AUTEUR



Tony FREETH, mathématicien et logicien de formation, est aussi un cinéaste. Il dirige la maison de production *Images First*, qui produit actuellement un film sur la machine d'Anticythère.

le Soleil, la Lune et les planètes du Système solaire se déplacent par rapport aux étoiles fixes. Cette zone s'étend sur 16 degrés de part et d'autre du plan de l'écliptique, le plan défini par l'orbite terrestre. Price supposait que la face avant de la machine était probablement munie d'une aiguille montrant où le Soleil se trouvait sur l'écliptique à la date choisie.

Dans les fragments subsistants, Price identifia les restes d'une douzaine de roues dentées qui avaient fait partie du mécanisme interne. Il estima leur nombre de dents, ce qui est le mieux que l'on puisse faire étant donné que presque toutes les roues sont endommagées et incomplètes. Plus tard, lors d'une importante étude de 1974, Price décrivit 27 roues dentées du fragment principal et apporta une estimation affinée du nombre de dents en se fondant sur les premières radiographies du mécanisme, réalisées par le radiologue grec Charalambos Karakalos.

Les décomptes des dents indiquent ce que le mécanisme calculait. Un tour de manivelle produisait un tour complet d'une roue dentée primaire de 64 dents, qui servait à représenter le passage d'une année, figuré par une aiguille sur le cadran du calendrier. Cette roue dentée primaire était couplée à des roues dentées secondaires à

38 dents, lesquelles tournaient donc chacune de 64/38 tour par année. Le mouvement était ensuite relayé de roue en roue de la même façon dans l'ensemble du mécanisme ; à chaque étape, le rapport des nombres de dents d'engrenage représente une fraction différente. *In fine*, le mouvement était transmis aux aiguilles tournant à des rythmes correspondant aux différents cycles astronomiques. Price découvrit que les rapports de l'un de ces trains d'engrenages correspondaient à un cycle lunaire anciennement utilisé à Babylone.

Price, comme Rehm avant lui, suggéra que le mécanisme contenait aussi des trains épicycloïdaux, c'est-à-dire des engrenages tournant sur ou à l'intérieur d'un bâti cylindrique muni de dents, eux-mêmes liés par l'intermédiaire d'arbres dit planétaires à d'autres engrenages. Ce type de combinaison d'engrenages sert par exemple dans les manèges à tasses tournantes ; ils sont utilisés de nos jours dans les boîtes de vitesses automatiques pour automobiles.

Grâce aux trains épicycloïdaux, les engrenages sont capables non seulement de multiplier des fractions, mais aussi d'ajouter ou de soustraire des nombres. On ne verra réapparaître de trains épicycloïdaux dans la technologie occidentale que 1500 ans après la machine d'Anticythère...

Outre Price, d'autres chercheurs ont aussi étudié le mécanisme d'Anticythère, en particulier Michael Wright, conservateur au Musée des sciences de Londres, en collaboration avec Allan Bromley de l'Université de Sydney. Ils ont fait les premières radiographies en trois dimensions du mécanisme et démontré l'imperfection du modèle de Price. Bromley est décédé en 2002, mais M. Wright a pu réaliser seul des avancées notables, par exemple en prouvant que les cadrans de la face arrière qui, de prime abord, semblent des anneaux concentriques, sont en fait des spirales. Il a aussi mis en évidence sur la face avant un train épicycloïdal calculant les phases lunaires.

Quant à la fonction du cadran situé en haut de la face arrière, M. Wright s'est rangé à l'avis de Price: il s'agirait d'un calendrier lunaire, fondé sur le cycle métonique. Ce calendrier est fondé sur un multiple commun (et approximatif) du cycle lunaire et du cycle solaire. Bien qu'il ait été découvert par les Babyloniens, il porte le nom de l'astronome grec Méton d'Athènes (V<sup>e</sup> siècle avant notre ère). Le cycle métonique est de 19 années solaires ou 235 lunaisons. On l'utilise encore de nos jours pour déterminer la date du Nouvel an juif ou celle de la Pâques chrétienne. Nous avons confirmé le bien-fondé des déductions de M. Wright en découvrant que l'aiguille de ce cadran était extensible afin de pouvoir suivre la rainure divergente de la spirale.

Les données de base nous manquaient terriblement au début de notre étude. Ni les radiographies déjà effectuées n'étaient disponibles, ni même un bon jeu de clichés. La lecture d'un magazine scientifique, où j'ai trouvé une radiographie de poisson et une photographie améliorée d'une tablette babylonienne, m'a suggéré comment obtenir de meilleures images.

## Des éclairages modernes...

S'agissant de l'analyse de surface des objets en question, la Société *Hewlett-Packard* avait en effet mis au point une technique pour bien mettre en évidence sur une même image les détails d'un objet qui n'apparaissent que sous des angles différents: l'analyse polynomiale de texture (*Polynomial Texture Mapping*). Ainsi, les inscriptions que Price avait trouvées difficiles à déchiffrer devenaient maintenant clairement lisibles, et les détails fins pouvaient maintenant être agrandis sur l'écran d'un ordinateur en contrôlant la réflectance de la surface, c'est-à-dire la proportion de lumière réfléchie, et l'angle d'éclairage.

Pour réaliser une étude radiographique poussée en trois dimensions, nous nous sommes adressés à la société britannique spécialisée en densitométrie qu'est *X-Tek*. Son tomomodensitomètre, nommé *BladeRunner*, réalise des images en trois dimensions en mesurant l'absorption de rayons X sous divers angles.

Les images ainsi obtenues ressemblent à celles que produit un scanner X d'hôpital, mais avec des détails plus fins. Roger Hadland et son équipe de *X-Tek* ont bien voulu modifier leur appareil afin de donner assez de puissance aux rayons X pour pénétrer les fragments de la machine d'Anticythère.

Alors que nous préparions l'étude technique, deux membres de notre équipe, John Seiradakis, de l'Université Aristote de Thessalonique, et Xénophon Mousas, de l'Université d'Athènes, demandaient les autorisations nécessaires. Ils les obtinrent après quatre années de prudentes tractations diplomatiques, et nous pûmes enfin organiser la venue à Athènes des équipes d'imagerie et de leur matériel – le mécanisme d'Anticythère étant bien trop fragile pour voyager.

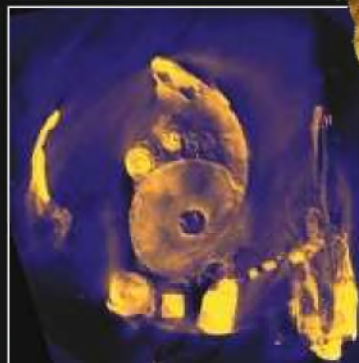
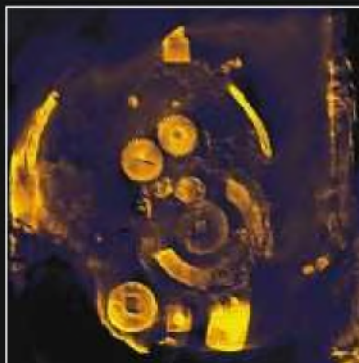
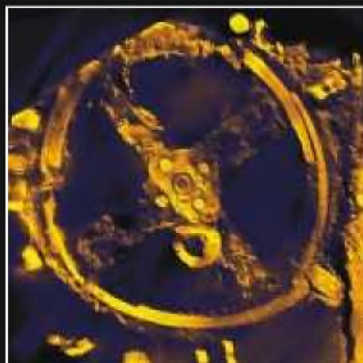
Une très heureuse surprise nous est venue d'un coup de téléphone de Maria Zafeiropoulou, du Musée national archéologique d'Athènes: elle était descendue dans les sous-sols du musée et y avait retrouvé des boîtes étiquetées « Anticythère ». Étions-nous intéressés par leurs contenus? Bien sûr! Grâce elle, nous disposions désormais de 82 fragments, contre une vingtaine auparavant...

Dirigée par Tom Malzbender, l'équipe de *Hewlett-Packard* assembla à Athènes un dôme de 1,50 mètre de diamètre, couvert à l'intérieur des flashes électroniques nécessaires pour pratiquer l'analyse polynomiale de texture.



## Anatomie d'une horloge

La tomomodensitométrie est une cartographie 3D réalisée à partir de multiples clichés en rayons X. Cette technique a révélé à l'auteur et ses collègues des mécanismes de précision encore contenus dans les restes de la machine d'Anticythère. L'équipe a par exemple exploité une analyse tranche par tranche [ci-dessous, le fragment principal] afin de comprendre comment étaient reliées les roues dentées, combien de dents elles avaient, etc. De cette façon, elle a réussi à reconstituer la majeure partie du dispositif [ci-contre à droite] et de ses fonctions, c'est-à-dire des calculs astronomiques et calendaires [voir l'encadré page suivante].



Un mois plus tard, la police grecque dut vider les rues du centre d'Athènes afin de permettre le passage d'un camion transportant les huit tonnes du tomodynamomètre de X-Tek.

En produisant des images particulièrement lisibles, l'analyse polynomiale de texture nous a révélé de nombreuses inscriptions inédites. Ces inscriptions consistent essentiellement en instructions d'emploi gravées sur les plaques extérieures. Quant à la reconstruction en trois dimensions, elle est magnifique: là où Price ne voyait qu'un puzzle d'engrenages qui se chevauchent, nous pouvions maintenant distinguer les couches à l'intérieur du fragment et les petits détails des dents d'engrenage.

Les rayons X ont révélé plus de 2 000 nouveaux caractères de texte cachés au cœur des fragments. Nous avons ainsi identifié et interprété aujourd'hui un total de 3 000 caractères sur les quelque 15 000 que comportait sans doute la machine à l'origine. À Athènes, X. Moussas et Yanis Bitsakis, de l'Université d'Athènes, et Agamemnon Tselikas, du Centre d'histoire et de paléographie, ont commencé à découvrir des inscriptions qu'aucun œil humain n'avait vues depuis plus de 2 000 ans. L'une d'entre elles indique «...subdivisions spirales 235...» et confirme que le cadran du haut de la face arrière était bien une spirale décrivant le calendrier de Méton.

## Un cycle de 223 mois lunaires

De retour à Londres, je commençai à étudier les images du tomodynamomètre. Certains fragments faisaient tous clairement partie d'un cadran spiral situé au bas de la face arrière. Une estimation du nombre total de divisions de la spirale à quatre tours du cadran donnait une fourchette de 220 à 225.

Or cette fourchette contient le nombre premier (divisible seulement par un et par lui-même) 223. Y avait-il 223 divisions sur la spirale? Les Babyloniens avaient découvert que si l'on assiste à une éclipse de Lune – phénomène qui ne se produit qu'à la pleine lune –, une éclipse semblable se reproduit généralement 223 lunaisons plus tard. Par une observation du même genre, les Babyloniens assistant à une éclipse solaire – qui ne se produit qu'à la nouvelle lune – prédisaient que 223 nouvelles lunes plus tard, une éclipse identique aurait à nouveau lieu. Toutefois, les éclipses solaires ne sont visibles que depuis une bande à la surface de la Terre,

que les astronomes de l'Antiquité ne savaient pas déterminer de façon fiable. Les éclipses se répètent ainsi parce que toutes les 223 lunaisons (environ 18 ans), le Soleil, la Terre et la Lune retrouvent approximativement le même alignement les uns par rapport aux autres, périodicité connue sous le nom de *saros*.

Entre les graduations se trouvaient des groupes de symboles, contenant presque tous les lettres Σ (*sigma*) ou Η (*êta*), ou les deux. Je remarquai rapidement que Σ correspondait à Σεληνη (Séléné), le mot grec qui désigne la Lune, et indiquait une éclipse lunaire; pour sa part, Η représentait Ηλιος (Hélios), le Soleil en grec, et indiquait une éclipse solaire. Les Babyloniens savaient aussi qu'au cours de chaque cycle de 223 mois lunaires, les éclipses ne peuvent avoir lieu qu'à certaines lunaisons particulières, séparées par des intervalles de cinq ou six lunaisons; la répartition des symboles sur le cadran correspondait bien à la succession des éclipses.

Il me fallait maintenant suivre ce faisceau d'indices jusqu'au cœur du mécanisme. La première étape consistait à trouver une roue à 223 dents pour entraîner ce nouveau cadran de saros. Le radiologue grec C. Karakalos avait estimé qu'une grosse roue visible à l'arrière du fragment principal comportait 222 dents. Mais M. Wright avait révisé cette estimation à 223, ce que mon coéquipier M. Edmunds a confirmé. Pourvu que l'on affecte un nombre de dents plausible aux autres roues dentées, et que l'on suppose l'existence d'un petit pignon, cette roue comportant 223 dents pouvait effectuer le calcul requis.

Toutefois, il restait un gros problème à résoudre, qui s'est révélé l'aspect du mécanisme d'Anticythère le plus difficile à comprendre. En plus de calculer le saros, la grande roue à 223 dents portait également le système épicycloïdal noté par Price: un sandwich de deux petites roues dentées couplées à la grosse roue dentée comme dans un mécanisme de manège de tasses; et chacune de ces roues dentées épicycloïdales était aussi reliée à une autre roue dentée plus petite. Fait déroutant, les quatre petites roues semblent avoir 50 dents, ce qui n'a aucun sens, car elles ne peuvent ainsi produire qu'une sortie identique à l'entrée...

Après des mois de frustration, je me suis rappelé que M. Wright avait observé qu'une des deux roues dentées épicycloïdales était

# Horloge astronomique

**CADRAN ZODIACAL**  
Montrait les 12 constellations le long de l'écliptique, la trajectoire du Soleil sur la voûte céleste.

**CALENDRIER ÉGYPTIEN**  
Affichait les 365 jours de l'année.



Aiguille solaire

Pointeur de date

Manivelle

**AIGUILLES PLANÉTAIRES (HYPOTHÉTIQUES)**  
Elles montraient les positions des planètes sur le cadran zodiacal.

**AIGUILLE LUNAIRE**  
Elle indiquait la position de la Lune par rapport aux constellations sur le cadran zodiacal.

**INSCRIPTIONS DE LA PLAQUE AVANT**  
Elles décrivaient les heures de lever et de coucher d'étoiles importantes au long de l'année.

Cette vue éclatée du mécanisme montre 29 des 30 roues dentées connues. En tournant une manivelle sur le côté, on activait toutes les roues du mécanisme et on déplaçait des aiguilles sur les cadrans situés sur les faces avant et arrière : les flèches bleues, rouges et jaunes indiquent comment se transmettait le mouvement d'une roue aux suivantes. L'utilisateur choisissait une date sur le calendrier égyptien à 365 jours situé à l'avant, ou bien sur le calendrier métonique à 235 mois lunaires situé à l'arrière, puis lisait les pré-

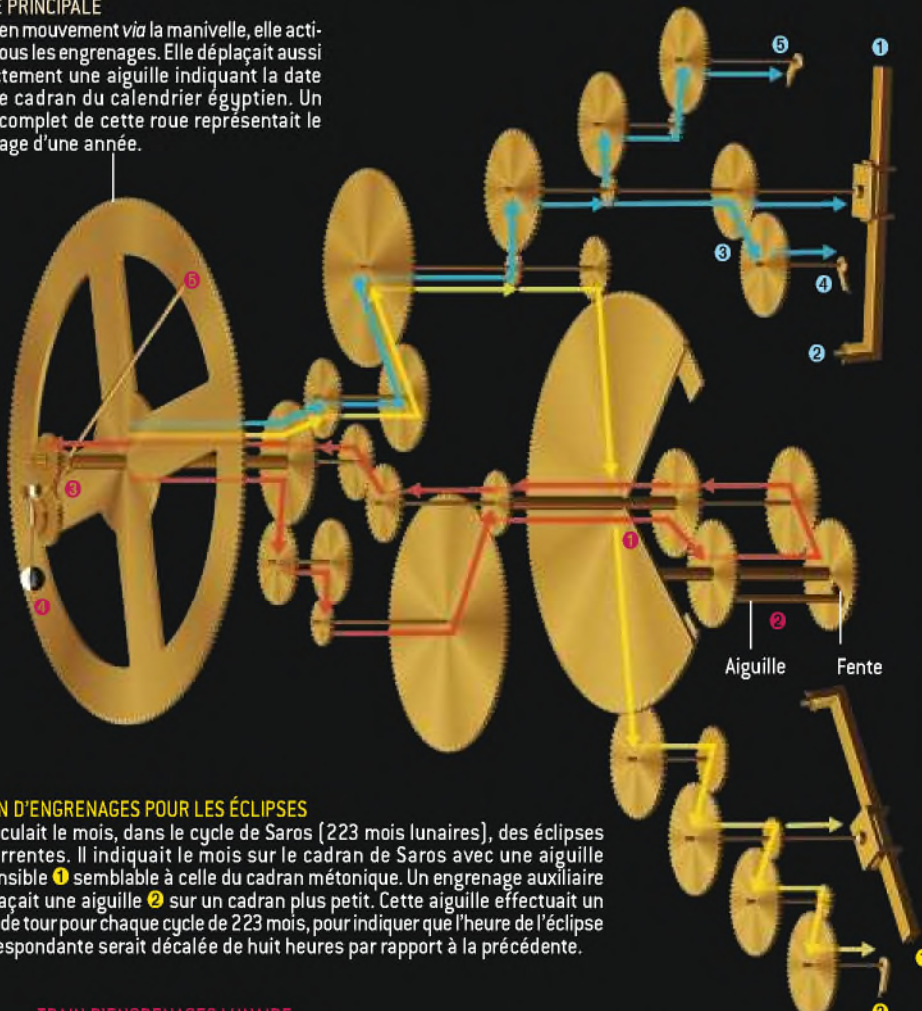
dictions astronomiques pour ce jour (telles la position et les phases de la Lune) sur les autres cadrans. Alternativement, on pouvait tourner la manivelle pour fixer un événement particulier sur un cadran astronomique, et l'on voyait alors à quelle date il se produirait. Il est possible que d'autres roues, maintenant perdues, calculaient les positions du Soleil et de certaines des cinq planètes connues dans l'Antiquité, voire de la totalité d'entre elles, et les affichaient grâce à des aiguilles sur le cadran zodiacal.

#### TRAIN D'ENGRENAGES MÉTONIQUE

Il calculait le mois du calendrier métonique, constitué de 235 mois lunaires, et l'affichait au moyen d'une aiguille ① sur le cadran du calendrier métonique situé à l'arrière. Un goujon ② à l'extrémité de l'aiguille suivait la rainure de la spirale, et la longueur de l'aiguille augmentait pour atteindre les mois successifs indiqués de plus en plus loin sur la spirale. Un engrenage auxiliaire ③ faisait tourner une aiguille ④ sur un cadran plus petit indiquant les cycles de quatre ans des Olympiades et d'autres jeux. Un autre engrenage déplaçait une aiguille sur un autre petit cadran ⑤, qui indiquait peut-être un cycle de 76 ans.

#### ROUE PRINCIPALE

Mise en mouvement via la manivelle, elle activait tous les engrenages. Elle déplaçait aussi directement une aiguille indiquant la date sur le cadran du calendrier égyptien. Un tour complet de cette roue représentait le passage d'une année.



**CADRAN DU CALENDRIER MÉTONIQUE**  
Il affichait le mois sur un cycle de 235 mois lunaires disposé en spirale.

**CADRAN DES OLYMPIADES**  
Indiquait les années des jeux Olympiques et d'autres jeux de l'Antiquité.

**CADRAN INDIQUANT LE SAROS POUR LES ÉCLIPSES LUNAIRES**  
Les inscriptions de cette spirale indiquaient les mois où des éclipses de Lune et de Soleil peuvent se produire.

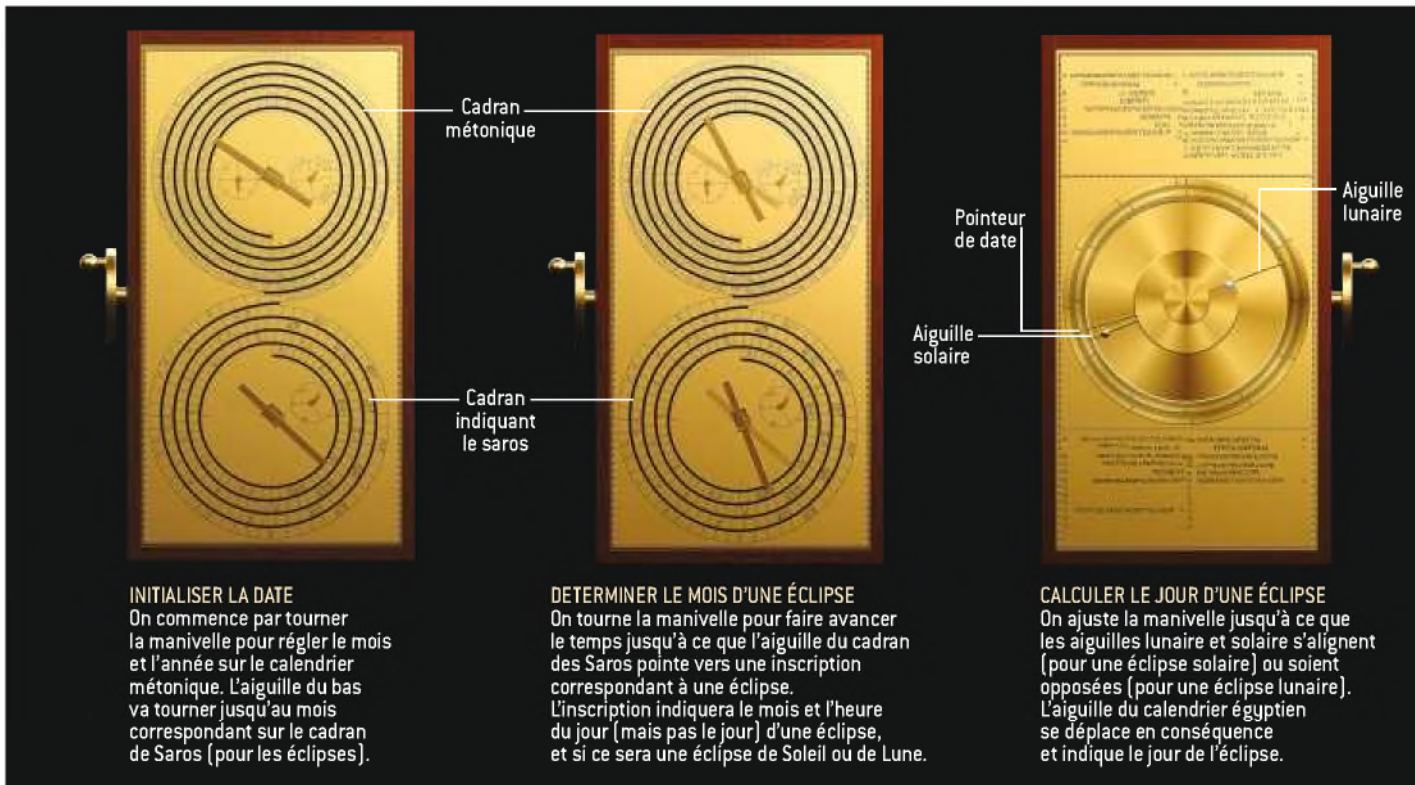
Aiguille Fente

#### TRAIN D'ENGRENAGES POUR LES ÉCLIPSES

Il calculait le mois, dans le cycle de Saros (223 mois lunaires), des éclipses récurrentes. Il indiquait le mois sur le cadran de Saros avec une aiguille extensible ① semblable à celle du cadran métonique. Un engrenage auxiliaire déplaçait une aiguille ② sur un cadran plus petit. Cette aiguille effectuait un tiers de tour pour chaque cycle de 223 mois, pour indiquer que l'heure de l'éclipse correspondante serait décalée de huit heures par rapport à la précédente.

#### TRAIN D'ENGRENAGES LUNAIRE

Un système comportant des engrenages épicycloïdaux simulait les variations du mouvement de la Lune, dont on sait aujourd'hui qu'elles sont dues à sa vitesse orbitale non constante. L'engrenage épicycloïdal était attaché à une roue plus grande ① comme les tasses d'un manège de tasses. Une roue faisait tourner l'autre via un mécanisme de goujon et d'encoche ②. Le mouvement était alors transmis par l'intermédiaire des autres roues jusqu'à l'avant de la machine. Là, un autre système épicycloïdal ③ faisait tourner une sphère à moitié blanche et à moitié noire ④ pour montrer les phases de la Lune, et une aiguille ⑤ indiquait la position de la Lune sur le cadran zodiacal.



munie sur une face d'un goujon fait pour s'engager dans une fente sur l'autre roue dentée épicycloïdale. Son idée était que, reliées par cette sorte de bielle, les deux roues dentées épicycloïdales tournaient sur des axes légèrement différents, séparés d'environ un millimètre. Par conséquent, l'angle dont tournait une roue était, alternativement, légèrement supérieur ou inférieur à celui dont tournait l'autre roue. Ainsi, si l'une des roues dentées tournait à un rythme constant, la rotation de l'autre roue était tantôt plus rapide, tantôt plus lente.

M. Wright avait rejeté sa propre observation, mais je me suis rendu compte que cette rotation variable est ce qu'il faut pour déterminer les mouvements de la Lune tels que les décrit la théorie astronomique d'Hipparque de Rhodes – la théorie lunaire considérée comme la plus avancée au II<sup>e</sup> siècle avant notre ère. Avant Johannes Kepler (1609 de notre ère), personne ne comprenait que les orbites étaient elliptiques et que la Lune accélère vers le périhélie, le point de l'orbite lunaire le plus proche de la Terre, et ralentit vers l'apogée, le point orbital opposé. En revanche, les Anciens avaient remarqué que le mouvement lunaire par rapport au zodiaque ralentissait ou accélérail périodiquement. Dans le modèle d'Hipparque,

la Lune se déplaçait à vitesse constante non pas sur une ellipse, mais sur un cercle, dont le centre tournait lui-même à vitesse constante sur un cercle. Pareille combinaison de mouvements représente en effet une assez bonne approximation du mouvement apparent de la Lune. Ces cercles sur des cercles, eux-mêmes nommés épicycles, ont dominé la pensée astronomique pendant 1 800 ans après Hipparque.

## Rotations décentrées

Mais il y a une complication supplémentaire : l'apogée et le périhélie ne sont pas fixes, parce que l'ellipse de l'orbite de la Lune effectue un tour complet tous les neuf ans. Le temps nécessaire pour que la Lune repasse par le périhélie est donc un peu plus long que le temps qu'il lui faut pour revenir au même point sur le cercle zodiacal. La différence est de 0,112579655 tour par an selon l'astronomie babylonienne (en réalité, elle est de 0,112987 selon la physique). Avec une roue d'entrée à 27 dents, la rotation de la grande roue était légèrement trop importante ; avec 26 dents, elle était légèrement insuffisante. Le bon résultat semblait se situer à mi-chemin. J'ai eu alors l'idée saugrenue que la roue d'entrée puisse avoir 26,5 dents. Lorsque j'ai appuyé sur la

touche de ma calculatrice, celle-ci a affiché 0,112579655, soit la bonne réponse à neuf décimales près ! Il ne pouvait y avoir là de hasard, sauf que les roues dentées ont un nombre entier de dents...

J'ai alors remarqué que  $26,5 \times 2 = 53$ . En fait, M. Wright avait estimé le nombre de dents d'une certaine roue cruciale à 53, et je voyais désormais qu'avec ce nombre tout marchait. Le concepteur avait monté le goujon et la fente en épicycles pour ralentir subtilement la période de sa variation tout en conservant la rotation de base inchangée : du pur génie. Grâce à M. Edmunds, nous avons également noté que le système d'engrenage épicycloïdal, qui est à l'arrière du mécanisme, déplaçait une tige qui tournait à l'intérieur d'une autre tige creuse à travers le reste du mécanisme et jusqu'à l'avant, afin que le mouvement lunaire puisse être représenté sur le cadran zodiacal et sur l'affichage des phases de la Lune. Tous les nombres de dents étaient alors expliqués, à l'exception d'une petite roue qui reste à ce jour une énigme.

Des recherches plus poussées nous ont amenés à apporter quelques modifications à notre représentation du mécanisme. L'une d'entre elles concernait un petit cadran subsidiaire situé à l'arrière, à l'intérieur du cadran métonique, et qui est

## Comment prédire une éclipse

Pour se servir de la machine d'Anticythère, nul besoin de grandes connaissances astronomiques ni d'une longue pratique. Après une calibration initiale par un expert, le mécanisme pouvait donner des prédictions assez précises d'événements distants de plusieurs décennies dans le passé ou dans le futur. Les inscriptions du cadran de Saros, réparties à intervalles de cinq ou six mois, correspondaient aux mois durant lesquels la Terre, le Soleil et la Lune étaient pratiquement alignés (et représentaient donc les dates d'éclipses solaires ou lunaires potentielles) dans un cycle de 223 mois lunaires. Une fois que le mois d'une éclipse était connu, le jour précis pouvait être calculé sur les cadrans de la face avant grâce au fait que les éclipses solaires se produisent toujours à la nouvelle lune, et les éclipses lunaires à la pleine lune.

divisé en quatre quadrants. Le premier indice me fut donné par la lecture du mot « NEMEA » sous l'un des quadrants. Alexander Jones, historien à l'Université de New York, m'expliqua que cela se référait aux jeux Néméens, l'un des événements athlétiques majeurs de la Grèce antique. Finalement, nous avons repéré, gravés autour des quatre secteurs du cadran, la quasi-totalité de « ISTHIA », pour les jeux de Corinthe, « PYTHIA », pour les jeux de Delphes, « NAA », pour des jeux mineurs à Dodona, et « OLYMPIA » pour les jeux les plus importants du monde hellénique, les jeux Olympiques. Tous ces jeux avaient lieu tous les deux à quatre ans. Nous considérons auparavant le mécanisme d'Anticythère comme une horloge astronomique, mais l'existence de ce « cadran des Olympiades » lui conférerait aussi le rôle inattendu de calendrier social.

Vingt-neuf des 30 roues qui nous sont parvenues servent à établir les cycles du Soleil et de la Lune. Toutefois, l'étude des inscriptions visibles sur la face avant du mécanisme livre aussi de riches informations sur les levers et les couchers d'étoiles importantes ou de planètes. En outre, sur la roue de l'engrenage primaire situé à l'avant du mécanisme, des restes de paliers témoignent d'un système épicycloïdal perdu qui aurait bien pu modé-

liser les mouvements de rétrogradation des planètes le long de l'écliptique ainsi que les anomalies du mouvement du Soleil lui-même. Tous ces indices suggèrent fortement que les mouvements solaires et ceux d'au moins certaines des cinq planètes connues dans l'Antiquité – Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne – étaient décrits par le mécanisme.

M. Wright a construit un modèle de mécanisme à systèmes épicycloïdaux décrivant les cinq planètes. Mais son ingénieux agencement ne concorde pas avec toutes les données. Avec ses 40 roues supplémentaires, il pourrait également être trop complexe pour s'accorder avec la brillante simplicité du reste du mécanisme. La réponse ultime repose peut-être encore par 50 mètres de fond.

## Eurêka ?

La question de l'origine de la machine d'Anticythère et de l'identité de son créateur reste ouverte. La majeure partie de la cargaison du navire naufragé provenait du monde grec oriental, c'est-à-dire d'endroits tels que Pergame, Cos ou Rhodes. Il est assez naturel d'imaginer qu'Hipparque ou un autre astronome de Rhodes soit le constructeur de la machine. Mais le texte caché entre les 235 graduations mensuelles du calendrier métonique contredit cette idée. Certains des noms de mois n'étaient utilisés que dans certains lieux spécifiques du monde grec et suggèrent une origine corinthienne. Si la machine venait de Corinthe même, elle a dû être fabriquée avant que la ville ne soit dévastée par les Romains, en 146 avant notre ère. Elle était plus probablement destinée à être utilisée dans une des colonies corinthiennes, dans le Nord-Ouest de la Grèce ou en Sicile.

L'hypothèse de la Sicile est tentante. C'est sur cette île, dans la cité de Syracuse, que vécut Archimède, le plus grand scientifique de l'Antiquité. Au I<sup>er</sup> siècle avant notre ère, l'homme d'État romain Cicéron a raconté la mort d'Archimède lors du siège de la ville en -212, et comment le général romain victorieux, Marcellus, n'emporta avec lui qu'un seul objet pillé : un instrument astronomique fabriqué par Archimède. La machine d'Anticythère ? Sans doute pas, car elle a été fabriquée plusieurs décennies après la mort d'Archimède ; mais peut-être selon un savoir-faire hérité du célèbre savant ? ■

Eliki



2. CE FRAGMENT EN BRONZE, qui provient de l'arrière de la machine d'Anticythère, est vu ici radiographié. On peut y lire les mots « subdivisions spirales 235 », qui ont aidé les chercheurs à confirmer que le cadran en haut à l'arrière montrait les 235 mois du calendrier métonique, arrangés en spirale. Auparavant, n'était visible que le mot « Eliki » (en haut à gauche), signifiant « spirale » en grec ancien.

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

T. Freeth *et al.*, *Calendars with olympiad display and eclipse prediction on the Antikythera mechanism*, *Nature*, vol. 454, pp. 614-617, 2008.

T. Freeth *et al.*, *Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera mechanism*, *Nature*, vol. 444, pp. 587-591, 2006.

D. de S. Price, *Gears from the Greeks: The Antikythera mechanism – A calendar computer from ca. 80 B.C.*, *Transactions of the American Philosophical Society, New Series*, vol. 64(?), pp. 1-70, 1974.

D. de S. Price, *An ancient Greek computer*, *Scientific American*, vol. 200, pp. 60-67, juin 1959.

## ✓ SUR LE WEB

Le projet de recherche sur la machine d'Anticythère : [www.antikythera-mechanism.gr](http://www.antikythera-mechanism.gr)