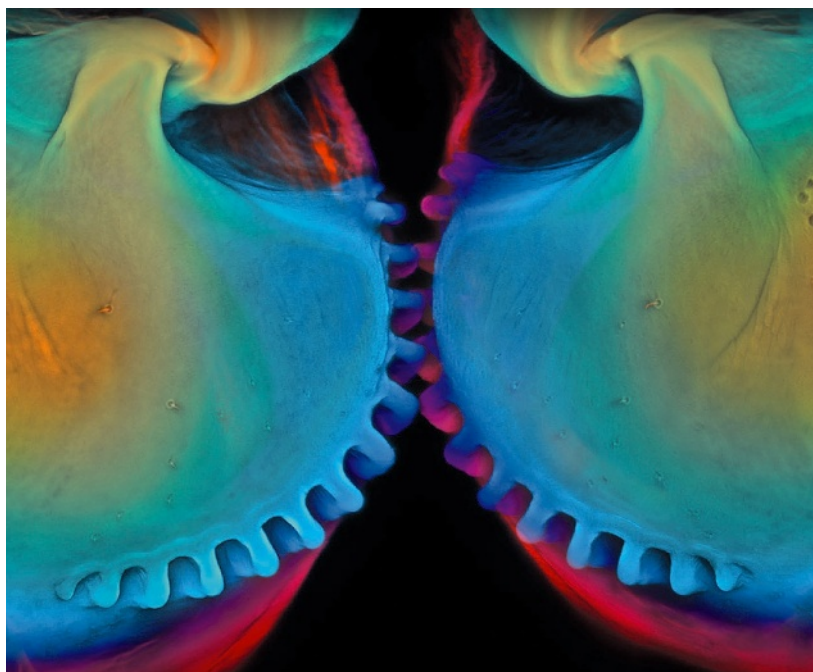




Tony Freeth, alors dans la même université, ont obtenu des images tridimensionnelles de la machine avec une précision de 50 micromètres, ce qui leur a permis de déchiffrer des inscriptions restées jusqu'alors illisibles et de mieux appréhender globalement l'objet, dont des reconstitutions de plus en plus précises ont été proposées (voir l'article pages 28 à 39).

## DE LA MACHINE D'ANTICYTHÈRE À L'HORLOGE D'AL-MURADI

L'appareil est remarquable par la finesse de sa miniaturisation et par la complexité de son mécanisme, comparable à celui des horloges mécaniques. La machine complète comportait probablement plus de soixante-dix roues, hérissées de dents en forme de triangles équilatéraux. Le fonctionnement de la machine était le suivant. Une date était choisie en positionnant une sorte de manivelle. Cela provoquait la rotation des diverses roues conduisant à l'affichage de la position du Soleil, de la Lune et de plusieurs planètes. Contrairement aux machines à calculer dans la lignée de la Pascaline, la calculatrice inventée par Blaise Pascal au XVII<sup>e</sup> siècle, elle ne dispose donc pas de mécanismes d'avance par sauts discrets et de système de report de retenue qui permettraient de la considérer comme une machine arithmétique.

Parmi les hypothèses avancées concernant le concepteur du mécanisme, on évoque Archimède ou l'un de ses élèves, mais rien n'est certain. Il est extraordinaire qu'une ou plusieurs machines de ce type aient existé il y a deux mille ans et que cela soit resté ignoré jusqu'au XX<sup>e</sup> siècle. L'idée que l'on a aujourd'hui de la science grecque en a été profondément bouleversée.

De fait, des autres engrenages de la même époque, nous n'avons que des traces écrites de systèmes plutôt simples. Réalisés en bois, ils servaient principalement à actionner des roues persanes (machines pour extraire l'eau d'un puits), des pompes, des moulins à eau et des horloges à eau. La première trace connue d'un autre mécanisme complexe d'engrenages remonte à quelque mille ans plus tard : dans l'ouvrage *Kitāb al-asrār fī natā'ij al-afkār* (« Le Livre des secrets résultant des pensées »), paru dans l'Espagne musulmane du XI<sup>e</sup> siècle, le savant Ali Ibn Khalaf al-Muradi décrit une horloge à eau de son invention munie d'un système complexe de roues, comprenant en particulier des engrenages dits « épicycloïdaux », qui jouent aujourd'hui encore un rôle clé dans l'industrie automobile et éolienne, nous y reviendrons. Il n'existe malheureusement aucun exemplaire de cette horloge ou d'une horloge équivalente de cette époque, et il n'a pas été possible de la reconstituer avec précision. Selon

La nymphe de la cigale bossue, *Issus coleoptratus*, effectue des sauts en synchronisant le mouvement de ses deux pattes postérieures grâce à un mécanisme d'engrenages présent sur des parties de ses pattes connectées aux fémurs (à droite en fausses couleurs, observé au microscope électronique à balayage). Les adultes, en revanche, troquent ce dispositif pour un système de frottement entre les hanches, peut-être plus avantageux du fait de leur plus grande taille, et peut-être aussi plus résistant à l'usure.



# Les premiers engrenages servaient à actionner des roues persanes et des moulins

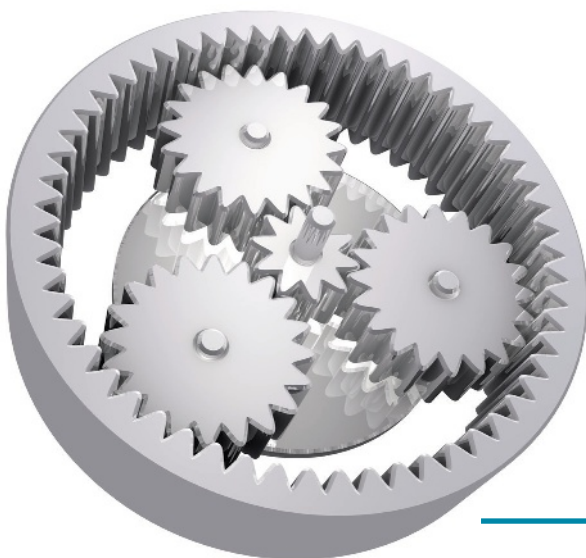
L'historien des sciences Ahmed Djebbar, spécialiste du monde de l'islam, le haut niveau d'élaboration des mécanismes décrits suggère que les techniques utilisées résultaient d'une longue tradition remontant au <sup>x</sup><sup>e</sup> siècle. Cette horloge n'eut pas d'équivalent jusqu'aux horloges mécaniques du milieu du <sup>xiv</sup><sup>e</sup> siècle en Europe. Il se peut que le travail d'al-Muradi, qui était connu des érudits, ait joué un rôle dans le développement de ces instruments.

Les premières horloges entièrement mécaniques ont vu le jour très probablement à la fin du <sup>xiii</sup><sup>e</sup> siècle. L'engrenage en était un élément fondamental qui permettait de retenir le mouvement de la roue des heures. En effet, l'élément moteur était en général un poids suspendu à une corde, dont la chute naturelle est uniformément accélérée et ne convient donc pas pour indiquer la régularité de l'écoulement du temps. Montée sur l'axe de la roue des heures, une roue dentée entraînait le mouvement d'un pignon, lui-même relié à un élément régulateur – un système de balancier autour d'un axe vertical (un foliot) entretenu par le mouvement du pignon et dont l'inertie était ajustée pour ralentir la roue des heures de façon adéquate.

## ENGRENAGES PLANÉTAIRES OU ÉPICYCLOÏDAUX

Les engrenages planétaires – une grande roue avec des dents internes, un système de roues intermédiaires, une petite roue centrale (ci-dessous) – servent à multiplier ou à diviser la vitesse de rotation de deux axes colinéaires. Lorsque les trois roues intermédiaires ont des axes fixés, si la roue la plus grande tourne à la vitesse de 1 tour par seconde, et que le nombre de dents des roues par taille décroissante est  $N, M, P$ , alors la roue centrale tournera à la vitesse de  $(N/M) \times (M/P) = N/P$  tours par seconde. Parfois la grande roue

est fixe et les roues intermédiaires sont liées les unes aux autres et tournent en même temps que leur ensemble tourne aussi (voir par exemple la vidéo [bit.ly/3H61xht](https://bit.ly/3H61xht)). On peut mettre bout à bout plusieurs engrenages planétaires : l'arbre de sortie d'un réducteur devient l'arbre d'entrée du suivant. Le coefficient de réduction global de la vitesse de rotation est bien sûr le produit des coefficients intermédiaires. Par exemple, avec trois étages de coefficient 10, on obtient une réduction de 1 000.



Tout au long de l'histoire de l'horlogerie, ces trois éléments de base – le moteur, le rouage et le régulateur – ont été perfectionnés. On doit ainsi au mathématicien, astronome et physicien néerlandais Christiaan Huygens une avancée notable dans le domaine. Tout d'abord, en 1656, afin de mener ses observations astronomiques, il a inventé l'horloge à pendule en s'inspirant des recherches de Galilée sur l'isochronisme du pendule. En 1602 en effet, le savant italien avait observé que, du moins pour de petites oscillations, la période d'un pendule était indépendante de l'amplitude de son oscillation – une propriété qui faisait du pendule un régulateur potentiel. Un peu plus tard, Huygens a perfectionné le fonctionnement de son horloge en concevant le pendule cycloïdal, qui permet une oscillation parfaitement constante quelle que soit l'amplitude du mouvement (voir l'encadré page 42).

Du côté des engrenages, cette innovation nécessitait un changement : le pendule ayant un mouvement de balancier autour d'un axe horizontal et non vertical, comme le régulateur classique, il fallait modifier en conséquence l'axe de rotation du pignon du rouage. C'est ainsi que l'horloge de Huygens, la première à pendule, s'est trouvée aussi dotée d'un engrenage à axes perpendiculaires, alors qu'auparavant les axes des engrenages des horloges à foliot étaient tous parallèles.

## DES ENGRENAGES DÉSAXÉS

Les engrenages à axes non parallèles n'en étaient pas moins connus depuis longtemps. On les utilisait dans les calculateurs astronomiques (la machine d'Anticythère en présentait déjà un), dont les changements d'orientation des axes étaient bien plus complexes que dans l'horloge de Huygens. Pour les moulins à eau, largement diffusés dans le monde romain dès le <sup>i</sup><sup>er</sup> siècle, ou ceux à vent à axe horizontal, qui se sont développés en Europe à partir du <sup>xii</sup><sup>e</sup> siècle, il était aussi inévitable de changer au moins une fois la direction des axes de rotation. On passait ainsi d'un axe de rotation horizontal – la roue entraînée par l'eau ou l'axe qui porte les ailes que le vent pousse – à un axe vertical qui faisait tourner la meule de pierre, nécessairement horizontale pour que les grains ou épis déposés ne s'échappent pas.

Plus récemment, dans l'aviation, un problème du même type s'est posé pour les avions à réaction. Dans leur forme pure, les statoréacteurs ne comportent aucune pièce mobile et n'ont donc aucun engrenage. La force de poussée est créée par l'éjection des gaz brûlés issus de la combustion d'un carburant, en général du kérosène. Cependant, ces moteurs ne fonctionnent qu'à vitesse élevée, ce qui ne convient pas pour les avions. On a donc conçu les turboréacteurs qu'on trouve par exemple sur tous les gros avions de ligne aujourd'hui et les avions de chasse. Cette