

leur taille, les voisines tournent plus ou moins vite. Le rapport entre les vitesses des unes et des autres est directement et très précisément lié aux nombres de dents de chacune: si une roue de m dents est liée à une roue de n dents, quand la roue de m dents fait un tour, celle de n dents fait exactement m/n tours. Pour faciliter une usure uniforme des dents, il est souhaitable que m et n soient premiers entre eux (c'est-à-dire sans diviseur commun), car cela entraîne que chaque dent d'une roue sera périodiquement en contact avec chaque dent de sa voisine. Le lien par engrenage entre deux roues est équivalent à ce qu'on obtient avec des courroies reliant les roues, mais il est plus compact et permet de transmettre des forces plus grandes sans risque de glissement. De plus, il autorise aisément des changements de direction des axes de rotation: deux roues dentées perpendiculaires peuvent, si les dents sont correctement conçues, se transmettre un mouvement (voir l'encadré ci-dessous). Le rendement énergétique d'une transmission par engrenage est très bon et dépasse souvent 95%.

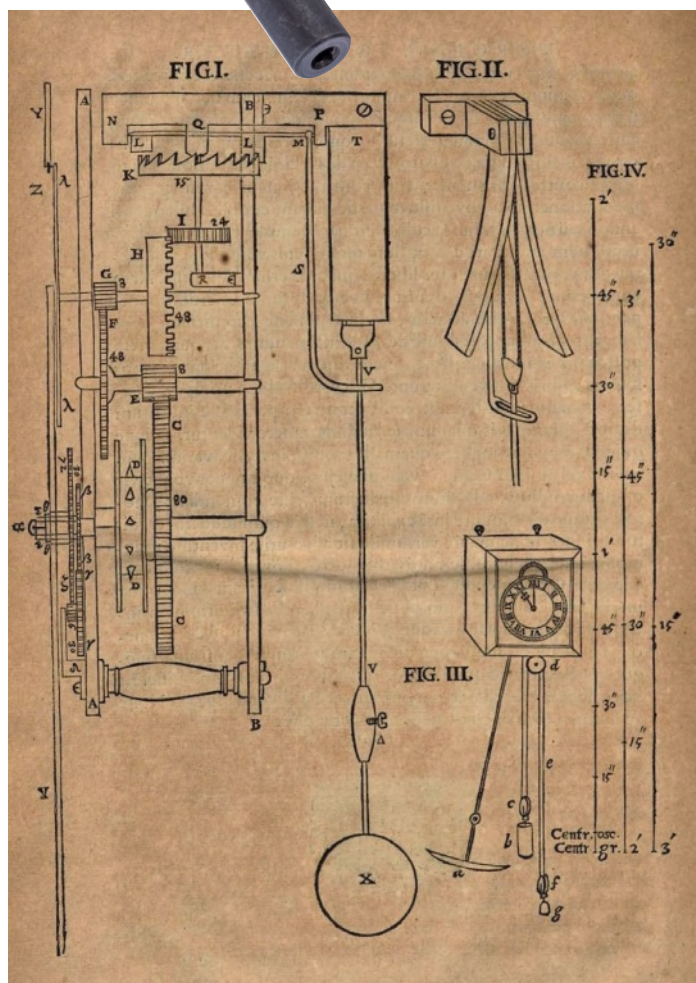
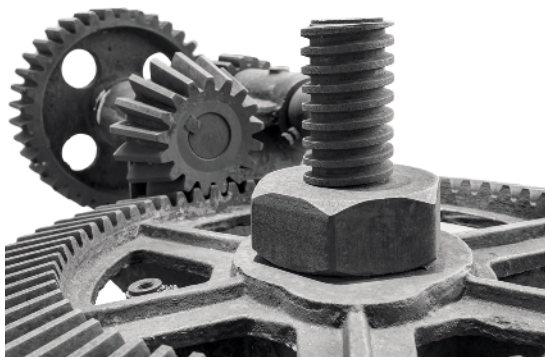


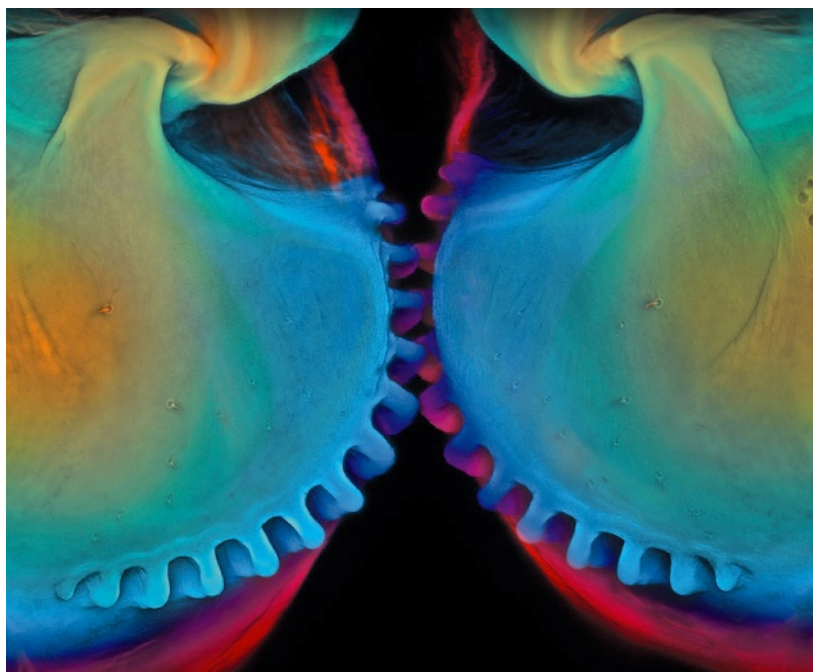
On ignore qui a inventé les engrenages, mais il est probable qu'ils aient été découverts indépendamment plusieurs fois. Les plus anciens mentionnés remonteraient au IV^e siècle avant notre ère en Chine. Les Grecs connaissaient ce type de dispositifs et ils en ont eu une maîtrise exceptionnelle dès le I^{er} siècle avant notre ère, comme en témoigne la fantastique machine d'Anticythère, dont l'étude a été menée avec soin. Grâce en particulier aux textes gravés sur ses différentes pièces, on est certain de sa fonction de machine à calcul astronomique.

Mis au jour en 1901 dans une épave près de l'île d'Anticythère, au nord de la Crète, cet appareil en bronze est le plus ancien mécanisme à engrenages qui nous soit parvenu. En 1959, en utilisant des radiographies aux rayons gamma, le physicien anglais Derek de Solla Price a mené une première étude de la machine et a commencé à en élucider la fonction. En 2000, grâce à un scanner à rayons X, l'astronome Mike Edmunds, de l'université de Cardiff, au Royaume-Uni, et le mathématicien

TRANSMISSION ORTHOGONALE

Certains engrenages permettent de transformer un mouvement de rotation selon un axe en un mouvement selon un axe perpendiculaire. Le savant néerlandais Christiaan Huygens a utilisé cette transmission orthogonale dans son horloge à pendule cycloïdal, qu'il présente en 1673 dans *Horologium Oscillatorium* (ci-contre). Sur son schéma, la figure II montre le guide cycloïdal qui assure un balancement constant du pendule. Sur la figure I, qui montre le mécanisme de côté, on voit que le pendule est relié à la roue des heures C via deux roues dentées perpendiculaires H et I. Une roue à dents de scie K fixée sur le même axe que la roue I entretient le mouvement du pendule grâce à un mécanisme d'échappement: les palettes L s'appuient tour à tour sur les dents de scie, ce qui fait osciller sur son axe l'arbre Q qui les porte. Il existe différentes façons de changer l'axe d'un engrenage, en jouant soit sur la forme de la roue (engrenage conique, en bas), soit sur la forme des dents (engrenage hélicoïdal), soit sur la géométrie de l'ensemble (engrenage à vis sans fin, ci-dessus).





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^e 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^e 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 fi natā'ij al-afkār* (« Le Livre des secrets résultant des pensées »), paru dans l'Espagne musulmane du XI^e 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