

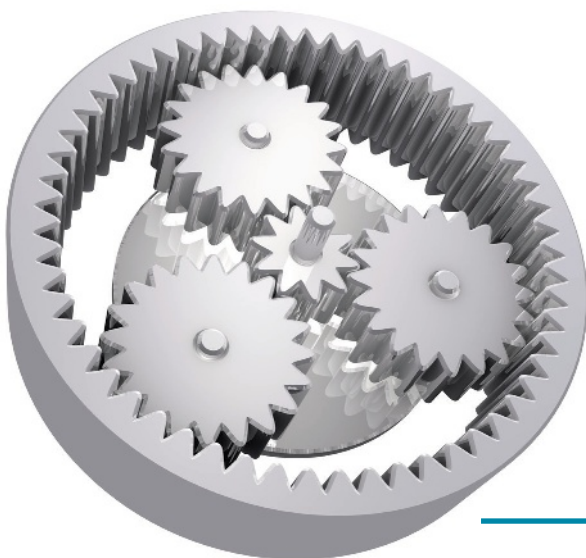
L'historien des sciences Ahmed Djebbar, spécialiste du monde de l'islam, le haut niveau d'élaboration des mécanismes décrits suggère que les techniques utilisées résultaient d'une longue tradition remontant au ^x^e siècle. Cette horloge n'eut pas d'équivalent jusqu'aux horloges mécaniques du milieu du ^{xiv}^e 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 ^{xiii}^e 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*). 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 ⁱ^{er} siècle, ou ceux à vent à axe horizontal, qui se sont développés en Europe à partir du ^{xii}^e 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

fois, le moteur associe le carburant à de l'air pour produire la poussée, et des pièces rotatives sont nécessaires pour compresser l'air qui entre à l'avant du dispositif.

Dans les versions minimales de ces moteurs, aucun engrenage n'est utile. Mais cela ne signifie pas qu'un avion ne compte pas d'engrenage. En effet, il est nécessaire d'extraire du turbo-réacteur d'autres sources d'énergie que la simple poussée, par exemple pour le fonctionnement de la pompe à carburant, ou pour la production d'énergie électrique utile dans l'avion. Aussi une partie de l'énergie produite par le turboréacteur est récupérée par une turbine à la sortie de la chambre de combustion. La turbine tourne selon l'axe du turboréacteur; il faut donc sortir l'énergie de cet axe, pour l'amener à l'extérieur et pouvoir en disposer. On utilise pour cela des «boîtiers d'accessoires à engrenages» (*accessory gearbox*) qui exploitent la capacité des engrenages à changer l'axe de rotation d'engrenages liés les uns aux autres et réussissent cette ponction d'énergie sur le turboréacteur. Même pour ces moteurs dont la partie principale ne comporte aucun engrenage, finalement, on n'a pas su s'en passer, et on n'est pas près d'y parvenir!

Un autre domaine où des engrenages aux axes non parallèles sont indispensables est l'automobile, et plus précisément son différentiel, c'est-à-dire le système mécanique qui permet dans une courbe d'avoir des vitesses de rotation différentes pour la roue droite et la roue gauche. Breveté en 1827 par le mécanicien français et maître horloger Onésiphore Pecqueur, ce système s'appuie sur trois axes de rotation: celui du moteur, celui des deux roues qu'il actionne, et un troisième, perpendiculaire à l'axe des roues et en rotation autour de lui. C'est ce troisième axe et ses engrenages qui confèrent aux roues une liberté supplémentaire pour adapter leur vitesse dans les virages (*un beau film de la chaîne YouTube Lesics décrit le fonctionnement d'un différentiel: bit.ly/346aFnI*).

DÉMULTIPLIER LA VITESSE DE ROTATION

Il y a bien sûr par ailleurs une multitude d'engrenages dans les boîtes de vitesses, qu'elles soient automatiques ou non. Même les voitures électriques, qui n'ont pas de boîte de vitesses, utilisent aussi des engrenages pour réduire ou augmenter la vitesse de rotation des roues par rapport à celle du moteur. Cependant, alors que dans les voitures non automatiques, on change de vitesse en changeant de pignon, dans celles automatiques (dont les voitures électriques), le changement de vitesse se fait au moyen de «trains d'engrenages épicycloïdaux» ou «trains d'engrenages planétaires» similaires à ceux de l'horloge à eau d'al-Muradi.



Constitués de plusieurs roues dentées dont l'une contient les autres, et dont au moins une est concentrique avec elle, ces systèmes sont utilisés pour multiplier ou démultiplier une vitesse de rotation sans changer l'axe concerné (*voir l'encadré page ci-contre*). Comparés à des engrenages placés côte à côte, comme dans une boîte de vitesses classique, ils sont plus compacts, plus robustes et permettent des rapports assez importants entre la rotation du plus rapide et celle du plus lent. On peut bien sûr en disposer plusieurs à la suite (*une vidéo de Thomas Schwenke explique bien le principe de fonctionnement de ces engrenages dans une boîte de vitesses automatique: bit.ly/3FTQMxi*).

Toutes les éoliennes modernes présentent, elles aussi, des engrenages épicycloïdaux, car l'hélice de l'éolienne tourne relativement lentement et les générateurs électriques exigent des pièces en rotation bien plus rapide. Dans les hélicoptères, le problème est inverse: le moteur tourne à une vitesse élevée que l'on doit réduire avant de la transmettre aux pales, plus lentes à cause de leur poids et de leur taille. Des trains d'engrenages planétaires sont aussi souvent présents dans les vélos électriques, car le moteur électrique produit une vitesse de rotation trop élevée pour être exploitée directement.

En 2020, l'artiste néerlandais Daniel de Bruin a conçu une machine avec un train d'engrenages réalisant une démultiplication de 10^{100} . Cent roues y opèrent chacune une réduction de vitesse d'un facteur 10. Si la première roue effectue 10^{100} tours, la dernière en fait un seul.



Toutes les éoliennes modernes présentent des engrenages épicycloïdaux

