

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



Dans les centrales hydroélectriques, la vitesse de rotation du moteur recevant la chute d'eau est le plus souvent inférieure à celle des génératrices électriques standard, prévues pour être entraînées à 750, 1000 ou 1500 tours par minute. Là aussi, on résout le problème par un multiplicateur de vitesse à engrenages, épicycloïdal ou non.

Un record de démultiplication a été atteint pour le plaisir du défi. Le 1^{er} mars 2020, à l'occasion de sa milliardième seconde de vie, l'artiste néerlandais Daniel de Bruin a mis en marche une machine absurde de sa conception réalisant une démultiplication de 10^{100} , nombre dénommé «gogol» par le mathématicien américain Edward Kasner au début du xx^e siècle et à l'origine du nom de la firme Google. Le système comporte un train d'engrenages de cent roues opérant chacune une réduction de vitesse d'un facteur 10. Il faut donc que la première roue effectue 10^{100} tours pour que la dernière en fasse un. À raison par exemple de 1000 tours par seconde pour la première, il faut donc attendre $3,18 \times 10^{80}$ milliards d'années pour que la dernière en fasse un, ce qui est beaucoup plus que l'âge de l'Univers... et sans doute largement suffisant pour user totalement la première roue et mettre le dispositif en panne!

LES ENGRENAGES DE L'EXTRÊME

D'autres records concernent la taille des engrenages. On trouve mention de ce qui serait le plus grand engrenage du monde dans le journal bimensuel *Gear Technology* (oui, cela existe!) qui, dans son numéro de mars-avril 2013, montre la photo d'un engrenage utilisé en Chine de diamètre 13,2 mètres pesant 73,5 tonnes (voir la photo ci-dessus à gauche). Les grandes roues d'observation des parcs d'attractions auraient pu battre ce record, mais ce n'est pas le cas, car pour s'élever au-dessus

La plus grande roue dentée a été construite pour une mine de cuivre en Chine (à gauche). Son diamètre est de 13,2 mètres et elle pèse 73,5 tonnes. Les plus petits engrenages fonctionnels mesurent quelques dizaines de micromètres (à droite). Leurs roues dentées sont produites par des procédés de gravures utilisés dans l'industrie des microprocesseurs. Elles sont utilisées dans la conception de systèmes microélectromécaniques (MEMS, en anglais), des mécanismes micrométriques aux applications multiples dans des domaines variés comme la défense, l'acoustique ou la conception de capteurs électroniques.

des villes, ces roues sont entraînées non pas par des engrenages, mais par friction.

Les plus petits engrenages sont, à l'autre extrémité du spectre, l'œuvre de chercheurs en micromécanique ou en nanosciences, qui utilisent les procédés de gravure de l'industrie des microprocesseurs pour produire des roues dentées de quelques micromètres de diamètre (voir la photo ci-dessus à droite), voire de quelques dizaines de nanomètres, mais l'idée d'aller plus loin fait son chemin. Depuis une quarantaine d'années, des chimistes explorent diverses stratégies pour fabriquer des engrenages moléculaires. Un facteur limitant étant la stabilisation des molécules à l'échelle atomique, depuis quelques années, diverses équipes tentent de fixer une des roues moléculaires sur un support.

C'est ainsi qu'en 2019, l'équipe de Christian Joachim, au Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales, à Toulouse, a réussi à actionner un engrenage constitué de deux roues de 1 nanomètre de diamètre à six dents. Chaque dent avait pour base une molécule de benzène, l'ensemble formant une étoile centrée sur un même cycle de benzène. À l'aide d'un microscope à effet tunnel, l'équipe a déposé l'une des deux roues sur un atome de cuivre, qui a servi de pivot, puis a approché l'autre de telle façon que les dents s'imbriquent, avant d'actionner l'ensemble. Et les chimistes rêvent à présent de nanoroues avec plus de dents ou qui s'assembleraient toutes seules en réseaux d'engrenages. On le voit, les roues dentées n'ont pas fini de nous accompagner! ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Freeth et al., **A model of the cosmos in the ancient Greek Antikythera mechanism**, *Scientific Reports*, 2021.

Y. Gisbert et al., **Molecular gears : From solution to surfaces**, *Chemistry – A European Journal*, 2021.

H. Bruderer, **The Antikythera mechanism**, *Communications of the ACM*, avril 2020.

B. Bhushan, **Nanotribology and Nanomechanics**, Springer, 4^e édition, 2017.

M. Burrows et G. Sutton, **Interacting gears synchronize propulsive leg movements in a jumping insect**, *Science*, 2013.

T. Freeth, **L'horloge astronomique d'Antikythera**, *Pour la Science*, n° 389, 2010.

E. Bautista Paz et al., **A Brief Illustrated History of Machines and Mechanisms**, Springer, 2010.