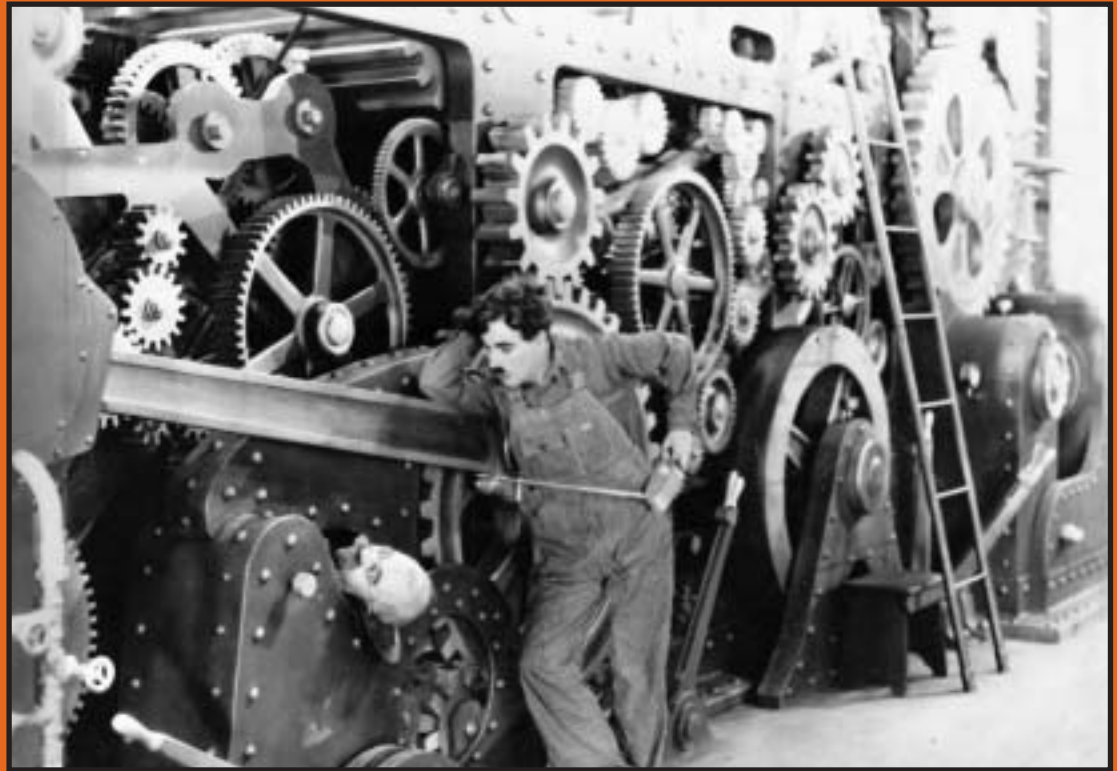


# musée des arts et métiers

L E S C A R N E T S

## LES DENTS DE L'EFFORT : LES ENGRENAGES

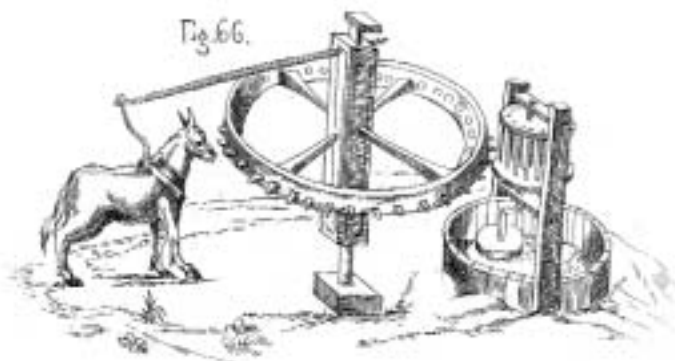


*« Les savants doivent descendre dans les ateliers »*

(Théodore Olivier, professeur au Conservatoire national des arts et métiers, 1793-1853)

L E S T H È M E S

## Les engrenages



Manège pour pomper l'eau

### ■ Une origine très ancienne

Connus des mécaniciens grecs aux V<sup>e</sup> et IV<sup>e</sup> siècles av. J.-C., les engrenages restent très peu utilisés à cette époque : on leur préfère les cordages et les poulies pour le levage des charges ou la vis pour les fortes poussées (pressoirs). Leur utilisation devient courante au Moyen Âge, à partir du X<sup>e</sup> siècle, dans les moulins à eau ou à vent, pour le changement de direction (roues hydrauliques ou ailes verticales et meules horizontales) et la démultiplication du mouvement de la roue ou des ailes des moulins. Ces premiers engrenages réellement utilisables sont en bois, à axes parallèles

et denture droite extérieure. Leurs dents sont constituées par des barreaux de bois fichés à force dans des alésages pratiqués sur le pourtour de larges tambours de bois. Cette disposition primitive permet l'engrènement de deux roues dont les axes sont dans un même plan aussi bien parallèles que sécants.



Elle évolue à la fin du Moyen Âge sous la forme d'engrenages dits « à lanterne », composés d'une roue dentée s'engrenant dans un tambour formé de deux disques en bois reliés par des barreaux capables de transmettre des efforts plus importants.

nages complexes en bois. L'engrenage métallique, plus précis et plus facilement utilisable, se généralise d'abord au XVII<sup>e</sup> siècle dans la petite mécanique et l'horlogerie grâce aux travaux de La Hire, ou d'Euler au siècle suivant, puis connaît son essor définitif avec l'apparition de machines puissantes et rapides au XIX<sup>e</sup> siècle et les travaux de Poncelet ou de Willis.

### ■ Évolution des engrenages

Ces premiers engrenages conviennent aux mouvements lents des moulins, car ils peuvent transmettre des efforts importants. Ils se perfectionnent au XV<sup>e</sup> siècle grâce aux ingénieurs italiens, comme Francesco di Giorgio ou Léonard de Vinci, qui étudient les premiers engre-

### ■ Et maintenant...

L'hydraulique assure mieux la transmission d'efforts importants sur de petites distances (engins de chantier ou de levage). Mais quand il faut transmettre un effort mécanique pour soulever une charge à une grande hauteur ou quand il faut propulser un véhicule à grande vitesse et sur une longue distance, les engrenages sont toujours là, leur règne dans le domaine mécanique est loin d'être terminé !

Engrenage ancien en bois dans un moulin à eau.

## Les engrenages

### THÉODORE OLIVIER : UNE VIE CONSACRÉE À L'ÉTUDE DES ENGRENAGES

#### ■ Professeur de géométrie descriptive

Théodore Olivier (1793-1853) entre à l'École polytechnique en 1810, puis à l'École d'artillerie de Metz en 1815. Il fait partie du groupe fondateur de l'École centrale des arts et manufactures, ouverte en 1829, où il enseignera la géométrie descriptive jusqu'à sa mort. Il enseigne cette même discipline à l'École polytechnique et au Conservatoire des Arts et Métiers à partir de 1839. Il est nommé administrateur du CNAM en 1852.

#### ■ « Les savants doivent descendre dans les ateliers »

Théodore Olivier a été l'élève de Monge à l'École polytechnique et il a apprécié l'enseignement de cette institution qui fait une large place à la relation entre la théorie et



*Distribution de l'énergie dans un atelier,  
courroies et poulies*

la pratique. Il souhaite que les savants cessent d'être de purs esprits uniquement préoccupés de géométrie.

#### ■ Les ingénieurs, « médecins des usines et des fabriques »

Théodore Olivier veut industrialiser la France et, si le Premier Empire n'a nullement réalisé cette transformation déjà engagée en Angleterre, le Second Empire y parviendra et, à partir de 1850, Théodore Olivier trouvera

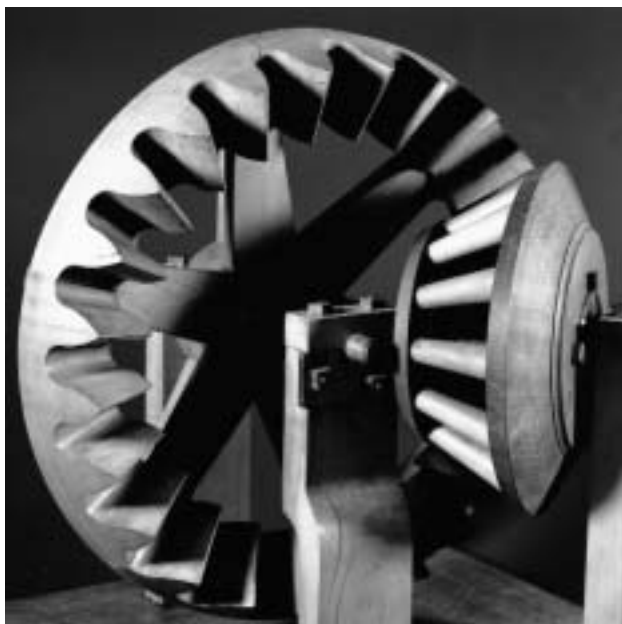
(malheureusement peu de temps avant sa mort) un climat politique et idéologique beaucoup plus favorable à ses idées. Industrialiser la France, c'est l'idée-force qui anime son enseignement au CNAM, et il considère que l'ingénieur est « le médecin des usines et des fabriques », alliant à la fois la science la plus approfondie possible, d'une part, et, d'autre part, une pratique quotidienne sur les cas les plus concrets.

#### ■ Les poulies et les courroies à la place des engrenages

Les machines à vapeur des premières usines du XIX<sup>e</sup> siècle sont reliées par un système de transmission avec poulies et courroies à l'ensemble des machines-outils des ateliers. Acceptant des vitesses plus élevées, travaillant en silence, moins chères et plus simples, les poulies et courroies envahissent les ateliers et les usines. Si elles facilitent les opérations d'embrayage et de débrayage qui permettent tour à tour d'entraîner une machine, puis de l'arrêter après utilisation, elles sont dangereuses et à l'origine de nombreux accidents. De plus elles risquent de glisser, ce qui interdit la courroie plate dans tous les systèmes où il faut un positionnement précis et une synchronisation des mouvements: horloges, machines-outils à synchronisation, commandes de distribution dans un moteur d'automobile.

*Les engrenages*

Modèles d'engrenages en bois construits pour l'enseignement de T. Olivier au CNAM

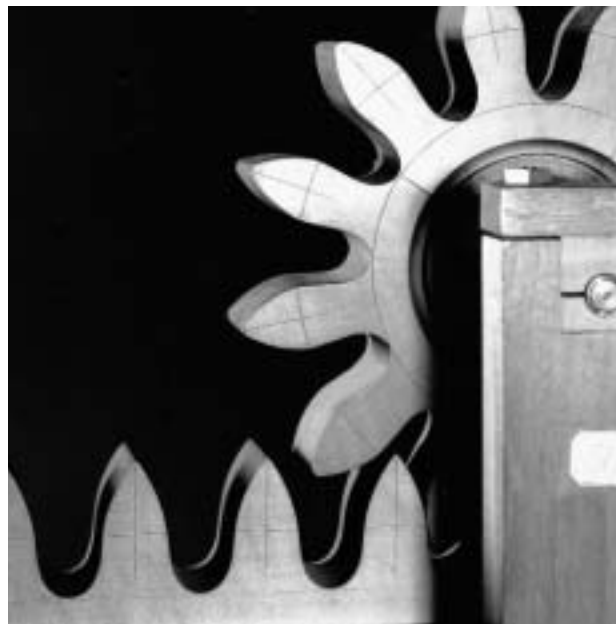


### ■ Une visite aux Arts et Métiers : une vocation pour la vie

Les travaux de Théodore Olivier sur les engrenages sont certainement les plus connus, et la collection d'une cinquantaine de modèles d'engrenages en bois du Musée des arts et métiers est remarquable tant par l'ingéniosité et le savoir mathématique mis en œuvre que par la qualité de réalisation des modèles.



Théodore Olivier est engagé dans cette voie par Hachette, son professeur à l'École polytechnique, qui lui montre lors d'une visite au Musée des arts et métiers un engrenage dont il avoue tout ignorer de la construction géomé-



trique. Piqué au vif, Théodore Olivier consacra sa vie à l'étude et au calcul des engrenages. En particulier il s'intéresse aux engrenages présentés par l'ingénieur anglais White en 1810 et dont leur créateur dit qu'ils sont sans frottement, ce qui semble contraire aux théories mathématiques d'Euler. White ne peut apporter la preuve scientifique de ses affirmations, et Olivier s'attache à le faire. Il publie, en 1825, des travaux sur le sujet,

présentés à l'Académie des sciences, et revient sur le problème dans son ouvrage *Théorie géométrique des engrenages destinés à transmettre le mouvement de rotation entre deux axes non situés dans un même plan* en 1842. En 1848, il donne un tracé des engrenages de White (conique et à chevrons) en utilisant la spirale logarithmique et dessine le principe de construction de la machine capable de les tailler.

## Les engrenages

### ■ Questions de vocabulaire

Ne confondons pas roues dentées, pignons et engrenages...

Un engrenage est un mécanisme élémentaire composé de deux roues dentées mobiles autour d'axes de position relative invariable. L'une des roues entraîne l'autre par l'action des dents successivement en contact. La roue qui a le plus petit nombre de dents est appelée « pignon ». Une combinaison de plusieurs engrenages est appelée un train d'engrenages.



Engrenage parallèle

Suivant la position relative des axes des roues, on distingue :

- les engrenages parallèles (axes parallèles)
- les engrenages concourants (axes concourants)
- les engrenages gauches (les axes ne sont pas dans un même plan).



Engrenage concourant



Engrenage gauche  
(vis sans fin)

### ■ Les engrenages et leur construction mathématique

La construction mécanique des engrenages demande beaucoup de précision lors de leur dessin. On distingue :

- le cylindre primitif de fonctionnement, qui passe sensiblement à mi-hauteur des dents, à l'endroit où les dents entrent en contact,
- le cylindre de tête passant par les sommets des dents,
- le cylindre de pied passant par les pieds des dents,
- la forme des dents, qui se définit par une saillie et un creux, une largeur et une hauteur de denture, un flanc et un profil,
- le profil, qui est la section d'un flanc par un plan normal à l'axe,
- le pas, qui est la distance entre deux dents mesurée à mi-hauteur des dents,
- le module, qui est le quotient du pas (en millimètres) par le nombre «  $\pi$  » ( $\pi$ ).

La forme des dents, leur hauteur et leur largeur sont déterminées pour donner un engrènement qui assure, en permanence, un point de contact entre les deux roues dentées : il y a donc transmission de l'effort d'une manière continue et sans heurts. Le module est une valeur importante ; seules des roues dentées du même module peuvent s'engrener entre elles. Le module est choisi en fonction de la résistance des matériaux, et le nombre des dents en fonction du rapport des vitesses souhaité entre les roues dentées. **Le module et le nombre des dents sont donc les caractéristiques mécaniques fondamentales des engrenages.**



## Les engrenages

### ■ Les caractéristiques et utilisations des différents types d'engrenages

Les engrenages à denture droite donnent des roues qui, à condition qu'elles soient du même module bien sûr, engrènent toutes entre elles, quels que soient leur diamètre et leur nombre de dents. Ce sont les engrenages les plus simples et les plus courants.



Les engrenages à denture hélicoïdale donnent des roues qui, toujours si elles sont de même module, engrènent également toutes entre elles, mais il faut que les hélices constituées par les dents (qui nous semblent être « de biais ») soient de sens contraire. On les utilise là

où des critères de qualité mécanique, de silence de fonctionnement, de précision dans le positionnement sont importants (mécanique automobile, machines-outils, industrie, etc.).



Les engrenages à axes concourants ont des roues de formes coniques. Les dentures sont, en général, droites. Leur calcul, plus complexe, ne fait pas référence à des cylindres (de tête, de pied, etc.) mais à des cônes (primitif, de tête, de pied, etc.). Les dents ont une largeur correspondant à une partie seulement du cône. On les utilise là où il faut impérativement renvoyer un mouvement selon un angle très fermé (volets roulants, rideaux de fer des magasins, etc.).



L'engrenage à roue et vis sans fin permet la transmission de fortes puissances en donnant une importante démultiplication. Plusieurs filets de la vis engrènent avec la roue dentée. Le sens de l'hélice est la même pour la vis et pour la roue (les dents sont « en biais »). Les automobiles ont jadis utilisé le « pont à vis » qui permettait à l'arbre de transmission d'entraîner les roues motrices. Celui-ci avait pour avantage de bien retenir la voiture dans les descentes compte tenu de sa faible réversibilité, mais pour inconvénient d'être bruyant et fragile.

### Les trains d'engrenages : un cas intéressant

Notons, enfin, que les engrenages sont parfois utilisés sous la forme d'une succession d'engrenages avec, à chaque fois, une grande roue et une petite roue calées deux par deux sur des arbres : c'est ce qu'on appelle un train d'engrenages. Il est possible ainsi d'obtenir par accumulation des démultiplications ou des surmultiplications très importantes. Dans une montre ou un réveil mécaniques, nous avons un bel exemple de surmultiplication : le ressort tournant très lentement, tandis que la trotteuse tourne rapidement. Un interrupteur programmable de ménage a un moteur électrique qui tourne à 250 tours par minute, mais le cadran assurant les allumages tourne 1 fois par 24 heures, soit une démultiplication totale de 1:36 000 !

## Les engrenages

Engrenages choisis dans l'importante collection que possède le Musée des arts et métiers

Engrenage intérieur de la Hire,  
inv. 8384

Engrenage à vis creuse,  
dite vis tangente,  
inv. 4437

Engrenage cylindrique  
hélicoïdal de White,  
inv. 4396



Engrenage conique hélicoïdal,  
inv. 4392

Engrenage hélicoïdal  
à crémaillère,  
inv. 3008

Engrenage d'une roue droite  
et de son pignon  
et d'une roue d'angle,  
inv. 2596

Courbes roulantes de  
Schroeder,  
inv. 7781, 7782, 7783, 7784

Courbes roulantes dentées,  
inv. 9104

Engrenage à spirale  
logarithmique de Wiesbach,  
inv. 10113



Engrenage gauche à vis et  
pignon, inv. 2735

Et quelques-uns des modèles  
de Théodore Olivier :  
Crémaillère rectiligne,  
inv. 4430

Crémaillère rectiligne,  
inv. 4431

Engrenage conique extérieur  
à lanterne,  
inv. 4424

Engrenage cylindrique droit  
à contact extérieur,  
inv. 4429

Engrenage conique droit  
extérieur, angle aigu,  
inv. 4421

Engrenage hélicoïdal  
à crémaillère,  
inv. 5453

Engrenage à crémaillère,  
inv. 5456

Engrenage intérieur  
à chevrons,  
inv. 8383

Engrenage gauche extérieur,  
inv. 5455

Engrenage intérieur,  
roue à lanterne,  
inv. 5450

## POUR EN SAVOIR PLUS

Théodore Olivier, Théorie géométrique des engrenages destinés à transmettre le mouvement de rotation entre deux axes non situés dans un même plan, Paris, 1842

Maurice Daumas, Histoire générale des techniques, Paris, PUF, 1962-1979

Bertrand Gille, Histoire des techniques, « Encyclopédie de la Pléiade », Gallimard, 1978 (notamment les chapitres sur l'Antiquité, les mécaniciens italiens de la Renaissance).

Bertrand Gille, Les ingénieurs de la Renaissance, Paris, Éd. du Seuil, 1964

Les inventions qui ont changé le monde, (traduit de l'anglais). Sélection du Reader's Digest, Paris, 1983. (chapitre sur les engrenages)

Sigvard Strandh, Machines, histoire illustrée, Paris, Gründ, 1988.

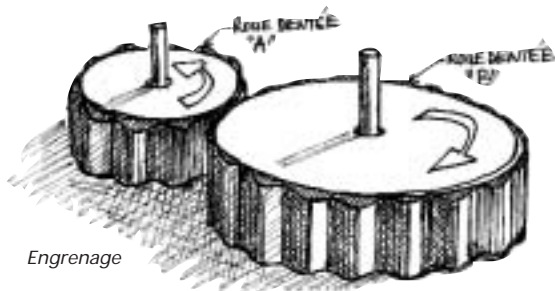
Les collections du Musée des arts et métiers sont aussi consultables sur Internet.

Adresse électronique : <http://www.cnam.fr/museum/>

- Rédaction : Clive Lamming
- Schémas : Serge Picard
- Coordination : Élisabeth Drye
- Conception graphique : Agnès Pichois, Atelier Michel Bouvet,
- Photos : Lechner-Pâtissier, extrait du guide du dessinateur industriel d'A. Chevalier, Hachette Livre, éd. 95-96  
Musée des arts et métiers/S. Pelly  
Musée des arts et métiers/P. Faligot/Seventh Square  
Musée des arts et métiers/L. André  
Kharbine-Tapabor
- Remerciements : Agence photographique du Musée des arts et métiers
- Musée des arts et métiers, Service éducatif  
Conservatoire national des arts et métiers  
292, rue Saint-Martin -  
75003 Paris

ISBN : 2-908207-65-6

## Les engrenages



Engrenage

### ■ Jeux d'engrenages

Prenez du carton ondulé pour réaliser la denture des roues, une rondelle de bois, un couvercle de bocal ou plus simplement une bande de papier enroulée sur elle-même jusqu'à obtenir le diamètre souhaité pour réaliser leur corps.

Collez ensuite la bande de carton ondulé constituant la denture sur le pourtour du cylindre. Attention la bande de carton doit, à sa jointure, respecter la régularité de la denture. Faites un trou au centre des roues pour y passer des axes qui les guideront en rotation. Ces axes seront constitués par des pointes plantées dans une planche servant de support à l'engrenage. Ayez soin de positionner ces pointes de telle manière que les roues engrènent sans forcer ni glisser.

### ■ Silence on tourne

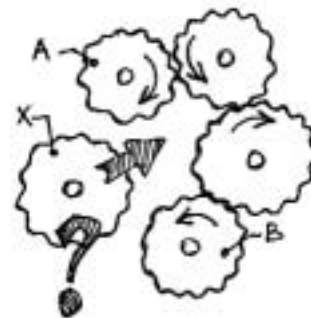
Soit un engrenage constitué de deux roues dentées. Entraînez en rotation l'une d'elles. La seconde tourne en sens contraire et le rapport de leur vitesse de rotation est inverse au rapport de leur nombre de dents. Par exemple, si les roues A et B ont respectivement 10 et 20 dents, la roue B, qui a le double de dents, tournera deux fois moins vite que la roue A. En effet, celle-ci fait deux tours quand B n'en effectue qu'un seul. L'engrenage permet donc de démultiplier une vitesse de rotation (le mouvement entre par A et sort par B) ou à l'inverse de la multiplier (le mouvement entre par B et sort par A).

### ■ Faisons nos comptes

L'engrenage fut abondamment utilisé dans les machines à calculer mécaniques. En effet, on peut représenter un chiffre par un nombre équivalent de dents et par là même ajouter ou retrancher des nombres entre eux. Par exemple, s'il s'agit de compter le nombre de tours effectués par une roue, on peut réaliser un engrenage dont l'une des roues ne possède qu'une dent. À chaque tour, celle-ci fera tourner d'une dent ou d'un cran la roue dentée avec laquelle elle engrène. Des repères permettent de compter le nombre de tours que vous avez effectués depuis le début.



Compte-tours



Train d'engrenages

### ■ L'engrenage casse-tête

Dans un train d'engrenages constitué par exemple de quatre roues dentées, le rapport des vitesses des roues d'entrée et de sortie ne dépend que de leur nombre de dents. Les dimensions des roues intermédiaires n'ont donc aucune influence sur ce rapport. Que se passe-t-il si on introduit dans le train d'engrenages la roue dentée X qui engrène simultanément avec les roues A et B ? Le mouvement devient impossible et l'engrenage se bloque. En effet, les roues A et B tournent en sens inverse et ne peuvent engrener simultanément sur une même roue dentée.



Prix : 10 F