



Les systèmes de transmission

DÉMULTIPLIER LA FORCE

Un système de transmission est une partie intégrante d'un mécanisme ou d'une machine. Il est composé d'un ensemble d'organes structurés ayant pour objectif de répercuter et/ou de transformer un mouvement. Le mécanisme de levier en est l'exemple le plus simple et le plus ancien. Vraisemblablement inventé en Égypte vers 3500 avant J.-C., son rôle est de démultiplier la force musculaire appliquée à un « bras ». D'autres systèmes de transmission ont ainsi été imaginés au fil de



l'histoire pour faciliter le travail de l'homme et optimiser celui des machines : la roue, la poulie, la vis, l'engrenage

ou encore le système bielle-manivelle. Dans le domaine de la construction mécanique, l'élaboration d'un système nécessite en premier lieu de définir l'agencement des pièces – fixes ou mobiles – qui le composent, puis de déterminer le système de transmission qui exécute la fonction demandée par transfert d'énergie. Ces différentes pièces mécaniques sont reliées entre elles par des liaisons. Il s'agit d'assemblages lorsqu'il n'y a pas de déplacement et de guidages dans le cas contraire. On distingue alors les guidages en translation (mouvement rectiligne), en rotation (mouvement autour d'un axe fixe) ou les deux à la fois (mouvement hélicoïdal). Ces déplacements sont induits par des forces (issues d'énergies mécanique, chimique, électrique), capables de modifier l'état d'un objet. Pour le système de transmission, on parle effectivement de transmission lorsque les déplacements d'entrée et

de sortie sont identiques. C'est par exemple le cas de deux poulies reliées entre elles par une courroie : le mouvement de rotation est ainsi maintenu.

Par contre, il y a transmission et transformation lorsqu'à la sortie du dispositif le mouvement ou la puissance sont différents de ceux d'entrée. Le système came-suiveur illustre ce principe : on constate une conversion du mouvement de rotation en mouvement de translation, ou inversement.

LES TECHNIQUES MISES EN ŒUVRE

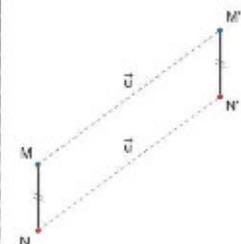
Le fonctionnement de tout système mécanique induisant une action peut être décomposé en quatre phases. En début de cycle, un apport énergétique est bien entendu nécessaire. Il provient d'un moteur électrique ou thermique, d'un alliage à mémoire de forme (pour les petits mécanismes) ou d'une énergie pneumatique ou hydraulique. Cette énergie est ensuite distribuée et répartie dans le système en fonction des besoins, puis elle est convertie en énergie exploitable par le système de transmission (énergie mécanique, électrique, calorifique). En fin de chaîne, des éléments de transmission vont répercuter cette énergie sous forme de déplacement, de vitesse ou de puissance et modifier ainsi l'état de repos ou de mouvement d'un objet, ou le déformer. Par principe, toute transmission de mouvement implique évidemment une liaison entre les pièces motrices et les pièces menées. Celle-ci est caractérisée par un contact. Il peut être :

- ponctuel : la surface de contact est réduite à un point. C'est par exemple le cas de la liaison sphère/plan,
 - linéique : la surface de contact est une ligne (par exemple, la liaison cylindre/plan),
 - ou surfacique lorsque la superficie de contact est importante (par exemple, la liaison plan/plan).
- Selon la nature du contact, certaines caractéristiques de la liaison peuvent être déduites :

- son degré de mobilité, défini par le nombre de mouvements élémentaires indépendants possibles (au maximum 3 axes de translations et 3 axes de rotation),
 - son degré de liaison, représenté au contraire par le nombre de mouvements inapplicables.
- Lorsqu'il n'y a pas de mouvement entre les pièces, la liaison est dite « d'encastrement » : les pièces se comportent alors comme un solide unique appelé « classe d'équivalence cinématique ». Cet assemblage se réalise à l'aide de composants dits « obstacles » : goupilles, clavettes, dentelures, cannelures, anneaux, segments d'arrêt. S'il y a un mouvement entre deux classes d'équivalence cinématique, les liaisons sont principalement de 4 ordres : liaisons pivot (guidage en rotation), glissière (guidage en translation), hélicoïdale et pivot glissant.

PRINCIPES PHYSIQUES

L'étude des systèmes de transmission relève de la cinématique et de la dynamique. La cinématique définit les mouvements des objets dans le temps et en fonction de repères spatiaux.



- de ces mouvements :
 - la trajectoire correspond aux positions successives de l'objet,
 - le vecteur définit l'orientation de déplacement ou de vitesse,
 - la vitesse est le rapport entre la distance parcourue par un objet et le temps écoulé ; la vitesse instantanée correspond au déplacement dans un temps donné,
 - la vitesse angulaire est une vitesse de rotation qui mesure l'angle parcouru en un temps donné,
 - l'accélération est la variation de vitesse en un temps donné.
- La dynamique étudie quant à elle les causes des mouvements. Elle met donc en rapport la force motrice et le mouvement produit ou alors, le mouvement des objets et la force qui en résulte.

- La force agit en modifiant la vitesse d'un objet ou d'une portion d'un objet, ce qui le déplace ou le déforme. Elle est représentée par un vecteur force et caractérisée par une direction, un sens, une intensité et un point d'application. Elle s'exprime en Newton (N).
- Le moment d'une force traduit la capacité de transformation de la vitesse de rotation d'un objet.
- L'énergie cinétique est l'énergie qu'une force doit fournir pour déplacer un objet (en joule).
- Le travail est l'énergie fournie par une force lorsque son point d'application se déplace. Il est lié à la vitesse.

- Le couple décrit l'impact de forces sur la rotation d'un système autour d'un axe donné. Il définit le travail produisant cette rotation.
- La puissance est la quantité de travail effectué par unité de temps (en Watt).
- Le rendement est le rapport entre l'énergie de sortie et l'énergie d'entrée. Il est toujours inférieur à un : une part de l'énergie est perdue sous forme de chaleur, de frottements.

LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DE TRANSMISSION MÉCANIQUE

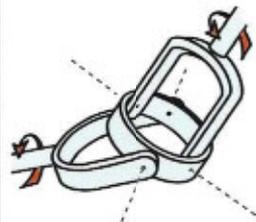
LES ACCOUPLEMENTS

Comme son nom l'indique, un accouplement permet de relier deux organes d'un système. Il assure ainsi la transmission du mouvement tel quel, et est généralement adapté à des arbres sur lesquelles sont appliqués des rotations. Plusieurs types d'accouplements ont été mis au point.

- Les accouplements rigides sont généralement matérialisés par une pièce intermédiaire entre les deux arbres, telle qu'une mâchoire, un clavetage, une vis de pression. Évidemment, les deux arbres doivent être parfaitement alignés pour

assurer la cohésion et la durabilité de la structure.

- Les accouplements semi-élastiques permettent de rattraper de possibles défauts d'alignement grâce à une partie flexible. Il est en effet extrêmement difficile de façonner un alignement parfait et définitif entre deux arbres.
- Les accouplements élastiques, plus tolérants encore en terme de désalignement, présentent les mêmes caractéristiques de fonctionnement que les semi-élastiques, à une différence près : la vitesse de rotation entre les deux arbres n'est pas conservée (on parle dans ce cas d'accouplements non homocinétiques).

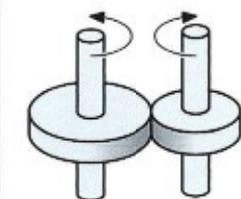


- Les **accouplements articulés** s'adaptent à des déviations toujours plus importantes. C'est le cas des joints Oldham, des tripodes (tous deux homocinétiques) ou des joints de Cardan. Ce dernier est fréquent sur les véhicules, par exemple pour accoupler le volant et la direction, ou encore pour entraîner des roues à la fois motrices et directrices.

Il existe également des systèmes spécifiques adaptés à certaines conditions d'utilisation : les accouplements magnétiques transmettent un mouvement sans contact, c'est-à-dire sans usure et appropriés à des environnements particuliers d'hygiène, de dangerosité. Les accouplements hydrodynamiques, eux, utilisent la puissance hydraulique d'un liquide pour transmettre le mouvement.

LES ROUES DE FRICTION

Ce système fait toujours appel à la transmission par adhérence. Deux roues sont en contact et la **liaison**



par frottement propage le mouvement. Les inconvénients majeurs restent la faible capacité de transfert de charge (risque de glissement) et la nécessité d'opérer en absence de tout lubrifiant. Selon le rapport entre les diamètres

Exemple de mécanisme et d'applications

Mécanisme	Fonction	Applications
Lever	Transmission d'un mouvement de translation	Grue simple
Roue de friction	Transmission d'un mouvement de rotation	Dynamo, aïlex
Poulie simple	Transmission d'un mouvement de translation	Trouil, grue
Poulie-courroie	Transmission d'un mouvement de rotation	Ventilateur, palan, magnétoscope
Vis sans fin	Transmission d'un mouvement de rotation	Réducteur
Engrenage	Transmission et transformation d'un mouvement de rotation	Chignole, perceuse, essoreuse à salade, boîte de vitesse
Bielle-manivelle	Transformation d'un mouvement de rotation en mouvement de translation ou de rotation alternatif ou inversement	Scie sauteuse, machine à coudre, moteur à explosion, pompe

Histoire de transmission

650 av. J.-C.

Invention de la poulie.



300 av. J.-C.

Invention de l'engrenage.

250 av. J.-C.

Invention de la vis sans fin par Archimède.



235 av. J.-C.

Invention du treuil.

200 av. J.-C.

Invention de la roue d'engrenage.

Le levier et la roue

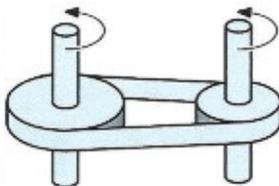


Inventés en 3500 av. J.-C.

de la roue motrice et de la roue menée ($i = D_1/D_2$) la vitesse et le couple du mouvement de rotation sont modifiés :

- $i < 1$
- Diminution de la vitesse
- Augmentation du couple
- $i = 0$
- Vitesse identique
- Couple identique
- $i > 0$
- Augmentation de la vitesse
- Diminution du couple

LE SYSTÈME POULIE-COURROIE



Le **système poulie-courroie** assure la transmission par friction d'un mouvement de rotation entre deux arbres distants. Il est composé d'au moins deux poulies et d'une courroie. La poulie est une simple roue, appelée réa lorsque la courroie s'insère dans une gorge. La courroie est un lien flexible fabriqué généralement en élastomère ou en matière plastique et présentant différentes formes :

- la courroie plate dispose d'une section rectangulaire ; ce système est limité en puissance par risque de patinage ou de glissement. Ce défaut peut néanmoins présenter un avantage en évitant une surchauffe du système en cas d'emballement.

- la courroie ronde est principalement utilisée dans de petits mécanismes,
- la courroie trapézoïdale possède une section en trapèze correspondant au profil de la gorge de la poulie, ce qui assure une adhérence supérieure et un bien meilleur rendement de fonctionnement,

- la courroie synchrone est dentée (ou crantée) et améliore encore l'efficacité de transmission (en vitesse et en puissance).

Par opposition à ces liens flexibles, il existe des courroies métalliques inextensibles adaptées à certains environnements hostiles ou présentant des caractéristiques améliorées : durabilité, résistance élevée, précision d'action. Le mouvement de rotation s'effectue dans le même sens avec une courroie directe et en sens inverse avec une courroie croisée. Lorsque les poulies sont de même taille, la vitesse et le couple de rotation sont identiques. Ces paramètres évoluent dans le cas contraire et l'on retrouve les caractéristiques du coefficient « i » des roues de friction. Les applications du système poulie-courroie sont nombreuses : moteurs (alternateur, distribution), machine à coudre, palan, rideau, mats.

LES ENGRENAGES

Descriptif

Les engrenages sont parmi les éléments de transmission les plus fréquents dans les systèmes mécaniques. Ils sont en fait constitués d'au moins deux éléments de forme circulaire, comme une poulie, mais dotés de dents. Ce dernier point constitue leur principal avantage, à savoir éviter le patinage.

Par contre, ils sont particulièrement sensibles aux impuretés. La plus petite roue est appelée pignon tandis que la plus grande conserve le nom de roue. On parle également de train d'engrenages lorsque le système se compose de plus de deux engrenages. On différencie enfin le **système engrenages-chaîne** qui est utilisé



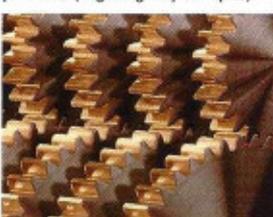
lorsque les axes de rotation sont éloignés l'un de l'autre. Par rapport au système poulie-courroie, ce dispositif présente plusieurs avantages : durabilité, transmission constante (pas de glissement), puissances plus élevées. Néanmoins, son fonctionnement nécessite une lubrification et tolère des vitesses de rotation plus faibles. Dans tous les cas, l'entraînement se fait par obstacle et non par adhésion.

Quand le nombre de roues est pair, les sens de rotation d'entrée et de sortie sont opposés. Ils sont identiques si ce nombre est impair. Comme pour les roues de friction et les poulies, des roues dentées présentant le même diamètre et le même nombre de dents ont la même vitesse de rotation. Dans le cas contraire, ce rapport de vitesse (k) est le nombre de dents de la roue motrice divisé par le nombre de dents de la roue menée. Si k est supérieur à 1, on parle de surmultiplication avec une vitesse de sortie supérieure à celle d'entrée. À l'inverse, si k est inférieur à 1, il y a démultiplication. Concernant le couple, il est l'inverse du rapport de vitesses. Un engrenage réducteur de vitesse est donc multiplicateur de couple.

Types d'engrenages

On distingue plusieurs types d'engrenages selon la position des axes de rotation.

- Il y a d'abord les engrenages à axes parallèles (engrenages cylindriques).



- Les **engrenages à denture droite** : ce sont les plus simples. Les dents des roues sont en contact une à une, ce qui les rend assez bruyants et moins fiables.

- Les engrenages à denture hélicoïdale : les plus courants, ils offrent l'avantage d'avoir toujours plus de deux dents en prise en même temps. Ainsi, les couples transmis peuvent être plus importants, le niveau sonore est réduit et le mouvement est plus régulier.

- Les engrenages à chevrons : ils présentent les mêmes avantages que les précédents, tout en limitant les efforts sur les axes.

- Les engrenages à couronne : la couronne possède une denture interne dans laquelle est associée une roue

plus petite à denture externe. • Il y a aussi des engrenages à axes concourants (engrenages coniques) : ils permettent de transmettre le mouvement entre deux axes qui convergent vers un même point et, donc, de renvoyer l'angle de rotation.



On rencontre enfin des engrenages gauches : c'est le système roue-vis sans fin. Inventé par **Archimède**, la vis sans fin est un cylindre fileté. Associée à une

roue dentée, l'angle de renvoi est de 90° sur deux axes non concourants et non parallèles. Leur intérêt premier est le rapport de réduction obtenu. La plupart de ces engrenages ne sont pas utilisés seuls mais associés en étages ou en réducteurs/multiplicateurs. Ces derniers sont en fait formés de plusieurs trains d'engrenages et permettent de réduire la vitesse de rotation tout en augmentant le couple (réducteurs), ou inversement (multiplicateurs). Quant aux étages d'engrenages, ils bénéficient d'un encombrement réduit grâce à leur agencement sur plusieurs niveaux. Ainsi, en adaptant l'ensemble de ces paramètres (types d'engrenage, nombre de roues, diamètres et nombre de dents des roues), il est possible de modifier le sens de rotation, la vitesse, le couple et/ou l'axe de rotation.

Le système pignon-crémaillère, un cas particulier

Il permet de transformer un mouvement de rotation en un mouvement de translation, et inversement. La crémaillère est une barre droite munie de dents qui peut être assimilée à une roue dentée de diamètre infini. Lorsque le pignon tourne, la crémaillère est animée d'un mouvement de translation. La direction d'une automobile (colonne de direction) en est l'illustration parfaite.

LE SYSTÈME CAME-SUIVEUR

L'objectif d'un tel dispositif est de générer un mouvement alternatif de translation ou de rotation. La came est une pièce non circulaire animée d'un mouvement de rotation. Le suiveur est en contact continu avec le profil de la came et est donc, le plus souvent, déplacé en translation. Il est généralement doté d'un ressort pour maintenir le contact avec la came. On distingue les cames disque (le suiveur se déplace dans un plan perpendiculaire à l'axe de la came) et les cames tambour (le suiveur suit un plan parallèle). Les suiveurs se distinguent quant à eux suivant le type de contact (à plateau ou à galet pour limiter le frottement) et suivant leur mouvement (à translation, tournant ou oscillant). L'application la plus connue est celle des soupapes d'admission et d'échappement des moteurs à combustion.

LE SYSTÈME BIELLE-MANIVELLE

Il convertit un mouvement de rotation en mouvement de translation alternatif, ou inversement. Le système est en fait composé de trois organes : la manivelle qui tourne autour de son axe,

l'oscillateur qui adopte un mouvement de translation et la bielle qui relie les deux précédentes pièces et transforme le mouvement. On retrouve par exemple ce système dans le moteur à explosion (actionnement des pistons).

UN EXEMPLE CONCRET : L'AUTOMOBILE

Une automobile est constituée d'un ensemble de mécanismes assurant diverses fonctions. Ils exploitent ainsi une multitude d'éléments de transmission, indépendants ou couplés les uns aux autres.

LE MOTEUR

L'élément de base est un système bielle-manivelle associé à deux systèmes came-suiweur. Le système bielle-manivelle est composé d'un piston (l'oscillateur), d'une bielle et d'un vilebrequin (manivelle). Les



systèmes came-suiweur sont composés de **soupapes** (suiweurs) et de cames d'admission et d'échappement. Le mouvement de translation du piston est transmis au vilebrequin par la bielle et transformé en mouvement de rotation. Ce vilebrequin va ensuite entraîner tous les éléments moteurs ayant besoin d'un mouvement rotatif (pompes, alternateur, arbre de transmission).

L'EMBRAYAGE

L'embrayage permet d'amener progressivement deux arbres à la même vitesse de rotation (arbre moteur et boîte de vitesse). La transmission se fait par adhérence entre deux organes : le volant moteur et le disque d'embrayage. C'est un accouplement temporaire. Lorsque le conducteur enfonce la pédale d'embrayage, il dissocie l'ensemble, c'est le débrayage. Quand la pédale est relâchée, le disque d'embrayage et le volant moteur sont accouplés, c'est l'embrayage. Cet accouplement est également graduel : il y a une phase transitoire de glissement entre les disques avant que ceux-ci ne soient solidaires et que les deux arbres ne développent la même puissance.

LA BOÎTE DE VITESSE

La boîte de vitesse permet de transmettre un mouvement de rotation entre l'arbre moteur et l'arbre de transmission. Mais surtout, elle autorise une correction du couple et de la vitesse. En effet, les moteurs thermiques sont affectés d'une vitesse de rotation constante et d'un couple faible : l'arbre moteur ne peut donc pas être relié directement aux roues du véhicule. Il est donc indispensable d'intercaler des éléments réducteurs permettant de démultiplier le rapport de puissance (réduction de la vitesse et augmentation du couple) et donc de faciliter l'évolution du véhicule à différentes allures. Le fonctionnement des boîtes de vitesse repose ainsi généralement sur des trains d'engrenages disposés sur deux arbres. Le changement de rapport est actionné par le conducteur à l'aide d'un levier de vitesse et répercuté par une tringlerie jusqu'à la boîte.

LE PONT

Ce mécanisme permet de transmettre le mouvement de la boîte de vitesse aux roues du véhicule. Il est composé :

- d'un axe couplé à la boîte de vitesse (arbre de transmission doté d'un engrenage),
- d'un différentiel qui répartit le mouvement aux roues et permet, en particulier, d'appliquer des vitesses de rotation différentes aux deux roues motrices, notamment dans les virages. Il est formé d'une couronne dentée et de deux satellites (engrenages coniques).

- de deux demi-arbres qui assurent la liaison avec les roues. Chaque arbre possède un planétaire (engrenage conique) en contact avec le satellite du différentiel. À l'autre extrémité, un joint de cardan double répercuta la transmission sur un autre angle.

LES FREINS

Les freins permettent de réduire la vitesse de rotation. Tout comme l'embrayage, ce sont des accouplements temporaires. Un système de freinage est composé d'un arbre fixe (garniture ou plaquette) et d'un arbre mobile qui tourne avec les roues : la partie fixe serre la partie mobile. La transmission de mouvement se fait donc par frottement : l'énergie mécanique de rotation se transforme alors en énergie thermique.

Embrayage d'une automobile

