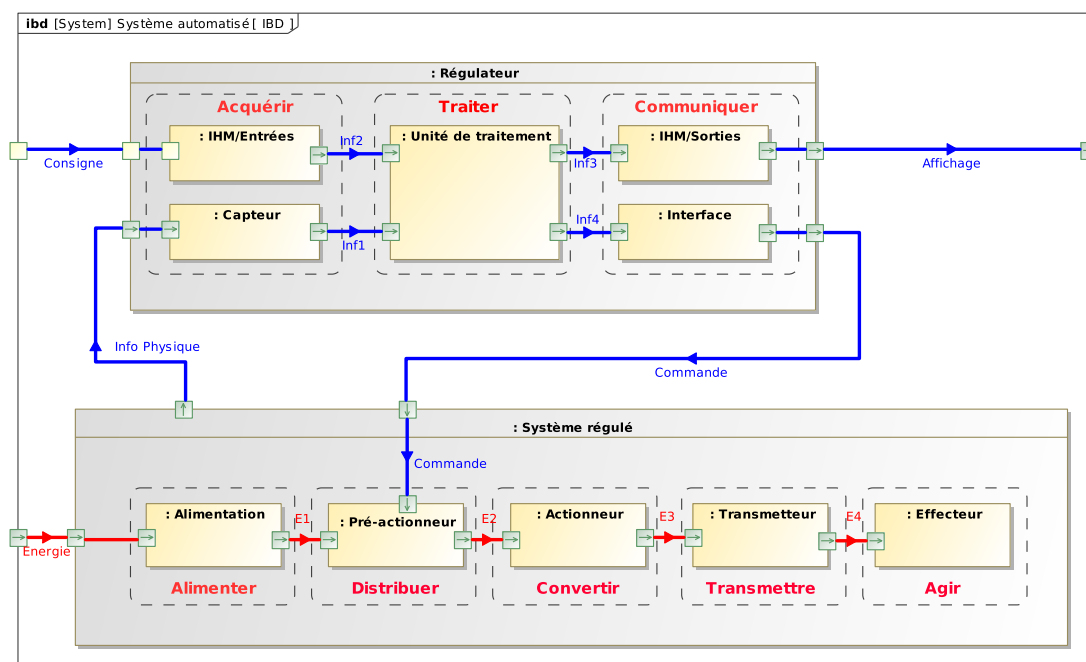


# Architecture des systèmes automatisés



## Objectifs

La mécatronique est la combinaison synergique et systémique de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique temps réel. Le terme *mechatronics* a été introduit par un ingénieur de la compagnie japonaise *Yaskawa* en 1969. L'intérêt de ce domaine d'ingénierie interdisciplinaire est de concevoir des systèmes complexes et leur contrôle automatisé. L'objectif de ce cours est de présenter l'architecture et les différentes solutions techniques des systèmes régulés permettant de générer une puissance. Sont notamment présentées les principales familles d'actionneurs et différentes solutions de transmission de puissance mais aussi les composants du régulateur et en particulier une présentation non exhaustive des différents capteurs.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Constituants des systèmes régulés . . . . .	4
1.2	Constituants du régulateur . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Alimenter–distribuer–convertir</b>	<b>8</b>
2.1	Systèmes électriques . . . . .	8
2.2	Systèmes pneumatiques/hydrauliques . . . . .	16
2.3	Systèmes thermiques : moteurs thermiques essence 4 temps . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Transmettre</b>	<b>27</b>
3.1	Adaptateurs de fréquence de rotation . . . . .	28
3.2	Transformateurs de mouvement . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Acquérir (capteurs &amp; détecteurs)</b>	<b>45</b>
4.1	Mesure d’une grandeur physique . . . . .	45
4.2	Détecteur de présence ou de proximité . . . . .	46
4.3	Mesure de position analogique . . . . .	50
4.4	Mesure de position numérique . . . . .	53
4.5	Mesure de vitesse . . . . .	56
4.6	Mesure d’effort . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Communiquer</b>	<b>58</b>
5.1	Éléments de dialogue Homme – machine . . . . .	58



# 1 Introduction

En ingénierie système, on s'intéresse aux systèmes complexes. Ce sont des systèmes pluritechniques automatisés dont les principes de fonctionnement sont souvent multiphysiques, c'est-à-dire qu'ils font appel à plusieurs disciplines de la physique (mécanique, électronique, thermique, optique, etc.). Leur conception, leur fabrication et leur fonctionnement font appel à un grand nombre de technologies.

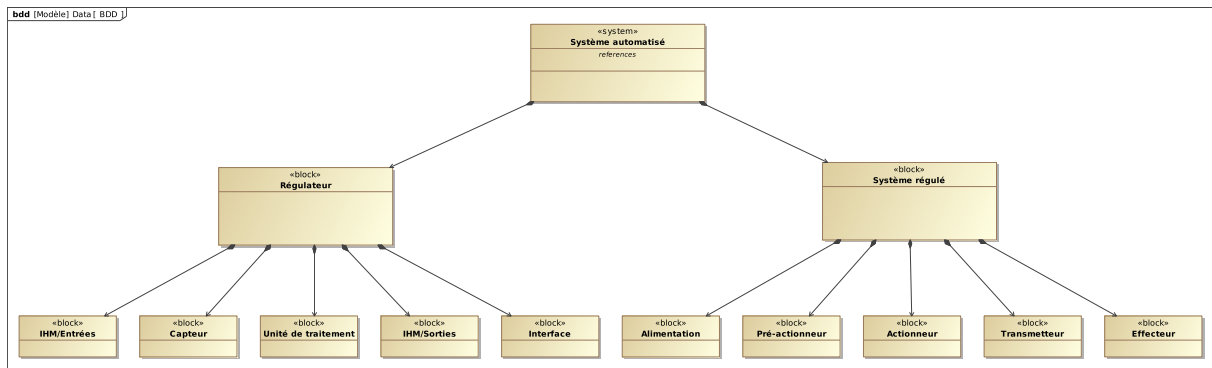


FIGURE 1 – Structure hiérarchique d'un système automatisé.

Les systèmes techniques peuvent être classés selon la nature de leur commande. On distingue alors :

**systèmes non mécanisés** — Ce sont les systèmes pour lesquels l'utilisateur contribue à la fois à la commande est à l'apport d'énergie. Un vélo est un bon exemple de système non mécanisé.

**systèmes mécanisés** — Ce sont des systèmes où l'utilisateur ne fournit plus l'énergie nécessaire au fonctionnement : son rôle est de commander le système. L'utilisateur est indispensable puisque le système n'a pas été programmé pour décider. Une voiture, un appareil ménager ou un ordinateur sont des exemples de systèmes mécanisés.

**systèmes automatisés** — Ce sont des systèmes pour lesquels un algorithme de décision a été programmé dans la partie commande du système. Ils fonctionnent de façon autonome selon des consignes de fonctionnement données par un utilisateur. Un robot aspirateur ou le projet de Google de voiture sans conducteur sont des systèmes automatisés. La plupart des moyens de production modernes sont aussi des systèmes automatisés.

La structure générale des systèmes pluritechniques automatisés peut être vue de deux façons différentes :

- d'un point de vue structurel ou hiérarchique en dissociant le système régulé (partie opérative) du régulateur (partie commande) ;
- d'un point de vue fonctionnel, faisant alors apparaître les chaînes d'information et d'énergie.

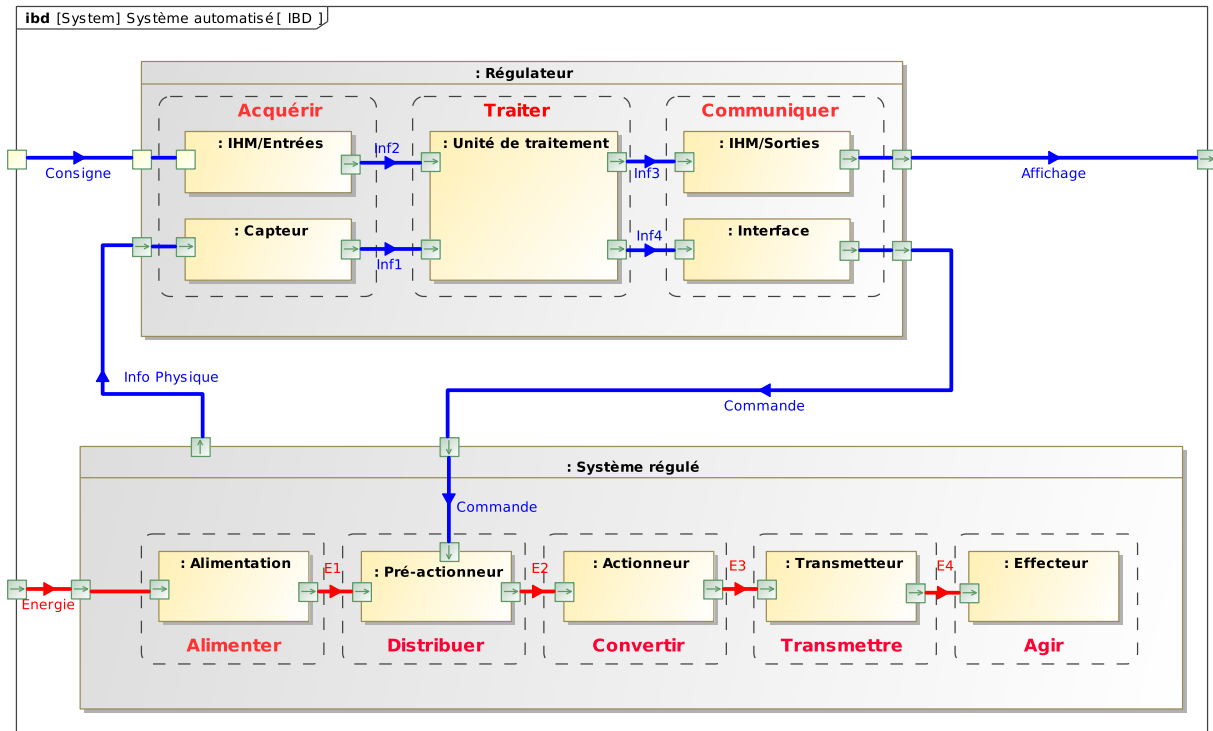


FIGURE 2 – Structure fonctionnelle d'un système automatisé.

On peut remarquer que la chaîne d'action est incluse dans la chaîne d'énergie, tout comme la chaîne d'acquisition est incluse dans la chaîne d'information. Les paragraphes qui suivent vont détailler les constituants de chacune de ces deux chaînes.

## 1.1 Constituants des systèmes régulés

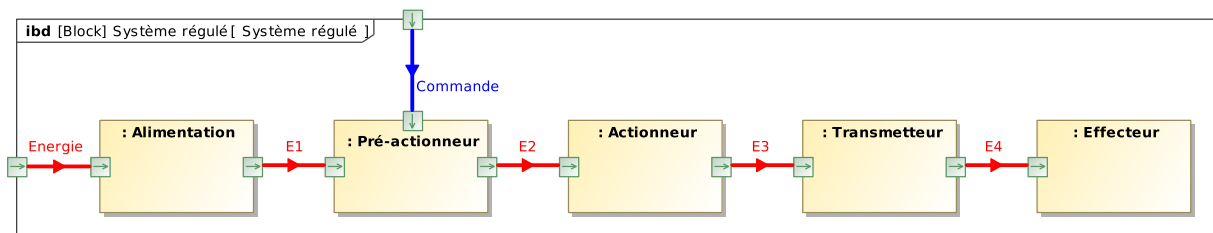


FIGURE 3 – Structure fonctionnelle d'un système à réguler.

Les systèmes industriels automatisés mettent en œuvre plusieurs types d'énergie et, pour l'essentiel d'entre eux, les transforment ou les convertissent. Les systèmes que l'on est amené à étudier peuvent posséder une ou plusieurs sources d'énergie. Les plus fréquemment rencontrées sont l'énergie électrique, l'énergie pneumatique et l'énergie hydraulique. Si les systèmes industriels utilisent tous une énergie provenant d'un réseau, les systèmes autonomes en énergie passent le plus souvent par un stockage d'énergie sous forme chimique (piles, accumulateurs, carburants, ...).

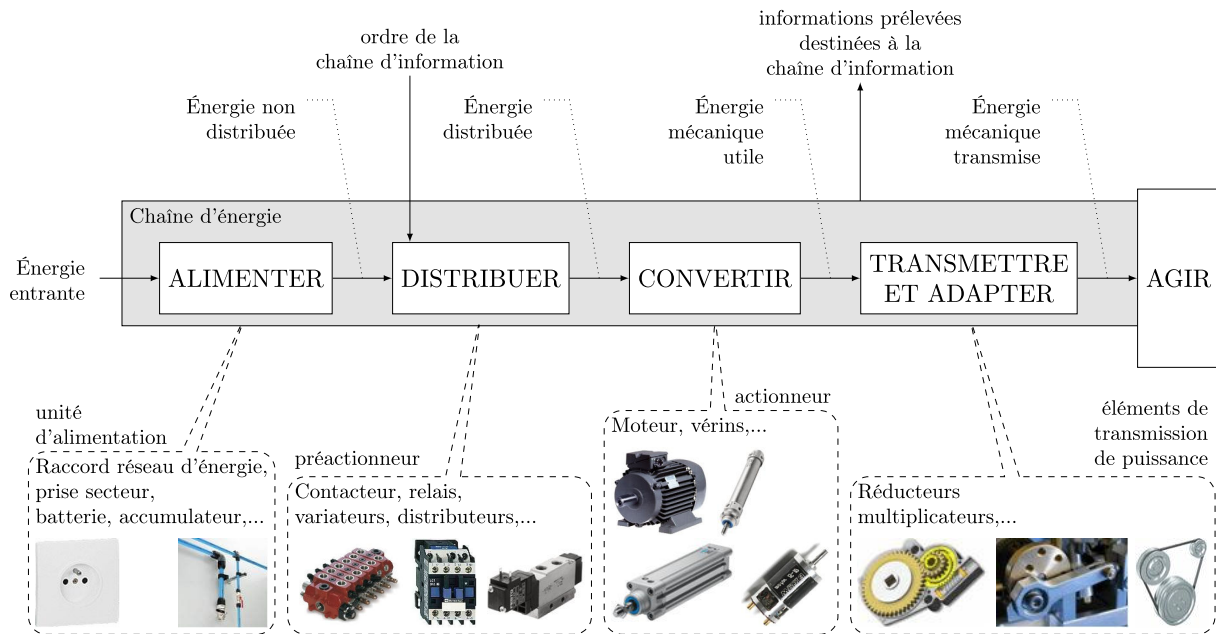
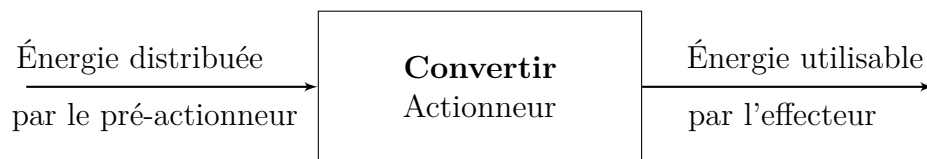


FIGURE 4 – Chaîne d'énergie générique d'un système automatisé.

La structure fonctionnelle d'un système à réguler est constituée des fonctions génériques : alimenter, distribuer, convertir, transmettre et adapter qui contribuent à la réalisation d'une action (agir). L'action à réaliser impose un flux d'énergie que le système doit transmettre et gérer par sa commande. Les performances dépendent des caractéristiques des divers constituants de la chaîne d'énergie (figure 4).

### 1.1.1 Convertir (actionneurs)

Les actionneurs sont les constituants de la partie puissance d'un système automatisé. Ils permettent de convertir une énergie de puissance en énergie utilisable par les effecteurs (élément de la partie opérative agissant sur la matière d'œuvre), le plus souvent sous forme mécanique.



La conversion d'une énergie ne peut se faire sans perte. Le rendement  $\eta$  d'un actionneur correspond au rapport entre l'énergie utile fournie (sortie) et l'énergie consommée (entrée) pendant le même intervalle de temps :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile fournie}}{\text{énergie consommée}}$$

tel que  $(1 - \eta)$  soit la proportion des pertes, généralement dissipées sous forme de chaleur.

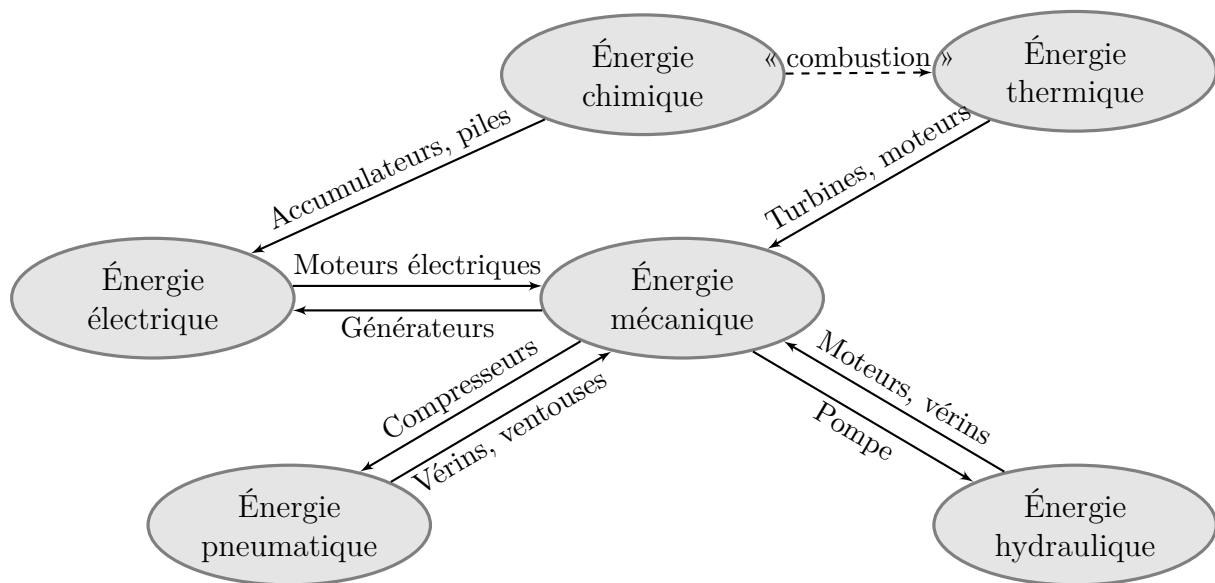


FIGURE 5 – Principaux convertisseurs d'énergie.

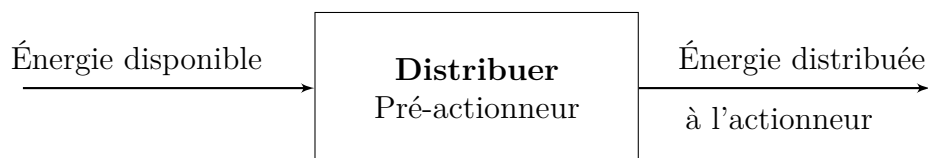
La figure 5 résume les différents convertisseurs utilisés par les systèmes automatisés.

Les familles d'actionneurs les plus couramment utilisés sont différenciées par le type d'énergie utilisée :

- électrique (moteurs électriques) ;
- hydraulique (moteurs et vérins hydrauliques) ;
- pneumatique (vérins et ventouses) ;
- thermique (moteurs à combustion interne, turbines à gaz).

### 1.1.2 Distribuer (pré-actionneurs)

Un pré-actionneur est un élément qui distribue l'énergie à l'actionneur sur ordre de la chaîne d'information. La partie commande envoie par l'intermédiaire de son circuit de commande un ordre de faible niveau pour établir, moduler ou fermer un circuit de puissance. Suivant la présence de ce signal, le pré-actionneur distribuera l'énergie de puissance à un actionneur.



Les pré-actionneurs peuvent être du type tout ou rien (TOR), c'est-à-dire fonctionnant comme un interrupteur de la chaîne d'énergie, ou moduler l'énergie (avec une variation continue).

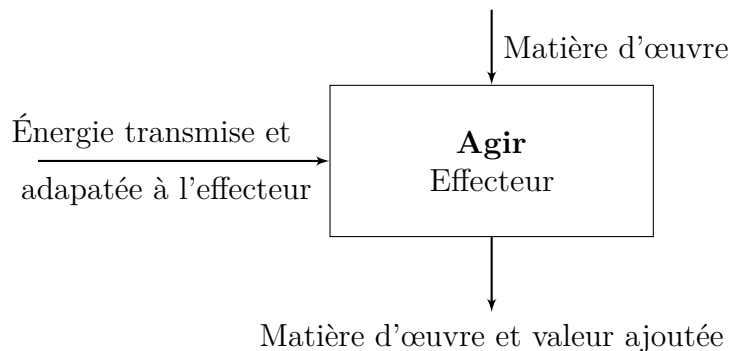
### 1.1.3 Transmettre (transmetteurs de puissance)

Un transmetteur de puissance est un constituant dont le rôle est d'adapter l'énergie mécanique pour la rendre utilisable par l'effecteur. Tous les dispositifs de transformation de mouvements, tels des réducteurs, des variateurs, des systèmes à bielle-manivelle par exemple, sont des transmetteurs de puissance.



### 1.1.4 Agir (effecteurs)

Les effecteurs sont les éléments terminaux des chaînes fonctionnelles. Ils agissent directement sur la matière d'œuvre en vue de lui apporter une valeur ajoutée. Ils convertissent l'énergie reçue de l'adaptateur en une opération ou un effet sur la matière d'œuvre. Les dispositifs comme une pince de robot manipulateur, un outil de fabrication ou un tapis roulant sont des effecteurs.



L'énergie de sortie la plus fréquemment utilisée par les effecteurs est de nature mécanique, mais on peut rencontrer des énergies thermiques, de rayonnement (lumineuse) ou acoustique (sonore). Seule l'énergie mécanique est abordée ici.

## 1.2 Constituants du régulateur

La chaîne d'information (voir figure 6) permet d'acquérir des informations :

- sur l'état d'un produit ou de l'un de ses éléments (en particulier de la chaîne d'énergie) ;
- issues d'interfaces homme/machine ou élaborées par d'autres chaînes d'information ;
- sur un processus géré par d'autres systèmes (consultation de bases de données, partage de ressources, ...).

de les traiter puis de communiquer les informations générées par le système de traitement pour réaliser l'assignation des ordres destinés à la chaîne d'énergie et/ou pour élaborer des messages destinés aux interfaces homme/machine (ou à d'autres chaînes d'information).

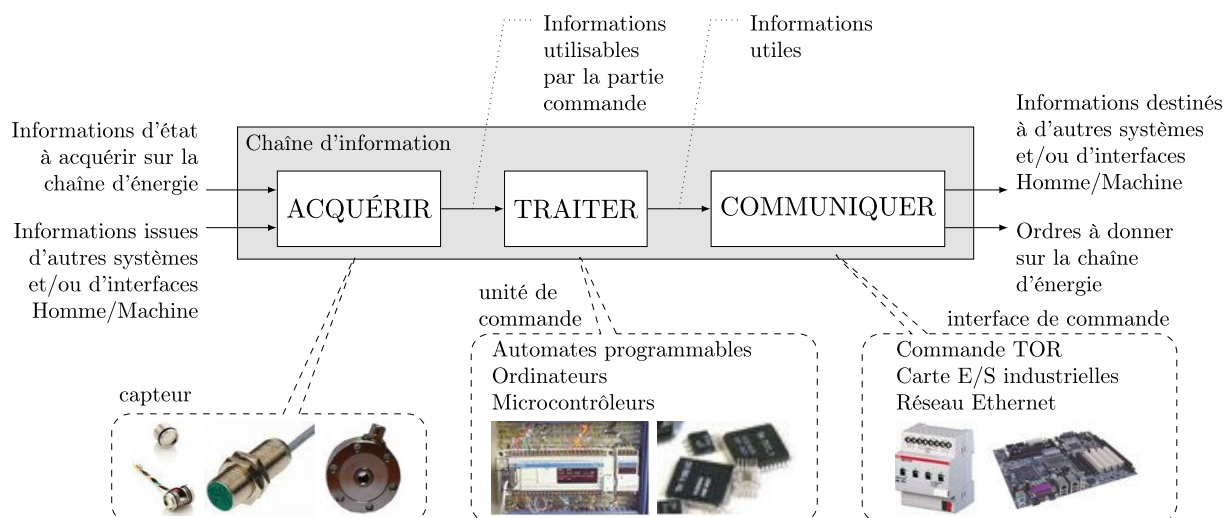


FIGURE 6 – Chaîne d'information d'un système automatisé.

## 2 Alimenter—distribuer—convertir

### 2.1 Systèmes électriques

L'énergie électrique est la plus simple à mettre en œuvre. C'est aussi l'énergie privilégiée pour la partie commande.

#### 2.1.1 Sources d'énergie électrique

##### Sources d'énergie alternatives

La production d'énergie électrique en France est majoritairement réalisée par les centrales nucléaires (conversion de l'énergie nucléaire en énergie thermique par la fission, puis mécanique par des turbines et enfin électrique avec des générateurs). On distingue deux types d'alimentation électrique en courant alternatif avec une tension sinusoïdale de fréquence 50 Hz :

- alimentation monophasée : une phase et un neutre. Cette alimentation est la plus répandue, aussi bien dans le domaine industriel que domestique. La tension entre la phase et le neutre est appelée tension simple et vaut très souvent 230 V.
- alimentation triphasée : trois phases (et parfois un neutre). Cette alimentation est très répandue dans le domaine industriel, notamment lorsque la puissance à fournir est importante ( $> \text{kW}$ ).

L'énergie électrique a parfois besoin d'être adaptée (transformateur et redresseur). Lorsque les tensions ne sont pas compatibles avec les appareils à alimenter, on a recours à des transformateurs qui permettent de gérer des tensions inférieures. Lorsque le courant doit être constant (de nombreux appareils fonctionnent en courant continu) le courant alternatif délivré par le réseau doit être redressé par des redresseurs.



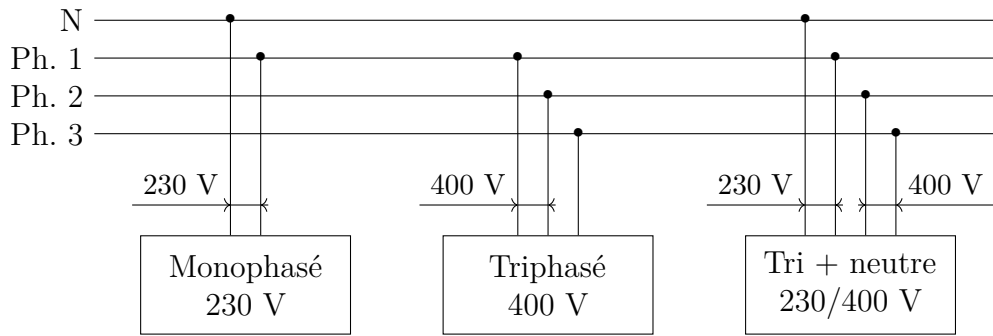


FIGURE 7 – Sources d’alimentations électriques alternatives à partir d’un réseau triphasé + neutre.



FIGURE 8 – Transformateurs.

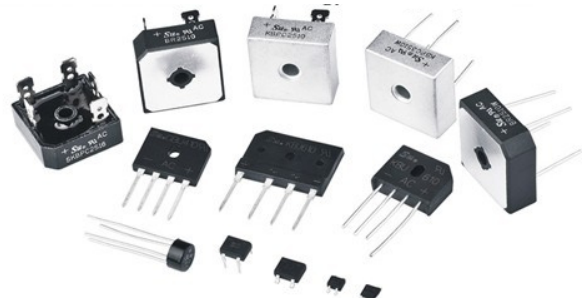


FIGURE 9 – Redresseurs.

**Transformateur** Un transformateur est un convertisseur d’énergie électrique réversible permettant de transférer une puissance électrique alternative d’une source vers une charge en adaptant la tension, mais en ne modifiant pas la fréquence. Le transfert de puissance se fait avec un excellent rendement.

**Redresseur** Un redresseur permet de transformer une tension alternative en une tension continue constante. Si la tension de sortie n’est pas réglable, on parle de redressement non commandé. Dans le cas contraire, si la tension continue de sortie est réglable, on parle de redressement commandé. Ce redressement est assuré par des interrupteurs électroniques déclencheables : appelés thyristors.

**Gradateur** Le Gradateur est un système électronique de puissance qui module l’énergie à partir d’une source de courant alternatif polyphasé vers un récepteur lui-même à courant alternatif, par exemple un moteur asynchrone, une résistance chauffante ou une ampoule d’éclairage. Un gradateur permet une variation continue de la tension.

### Sources d’énergie continues

Dans le cas d’un système autonome en énergie, pour utiliser de l’énergie électrique, cette dernière doit soit être produite localement (à partir d’une chaîne moteur, générateur) soit être stockée sous forme chimique pour alimenter le système en fonction des besoins.

Les piles (non rechargeables) et les batteries d'accumulateurs (rechargeables) fournissent directement une tension continue.



Les batteries d'accumulateur

FIGURE 10 – Chariot élévateur TOYOTA Traigo et son alimentation continue de 48 V.

**Onduleur** Un onduleur est un convertisseur statique qui permet d'alimenter une charge en courant alternatif à partir d'une source continue. Les onduleurs sont principalement utilisés pour :

- les alimentations de secours des systèmes informatiques ;
- les variateurs de vitesse des machines synchrones et asynchrones avec une tension et une fréquence de sortie variable ;
- l'alimentation des dispositifs de chauffage par induction.

### Remarque 2.1

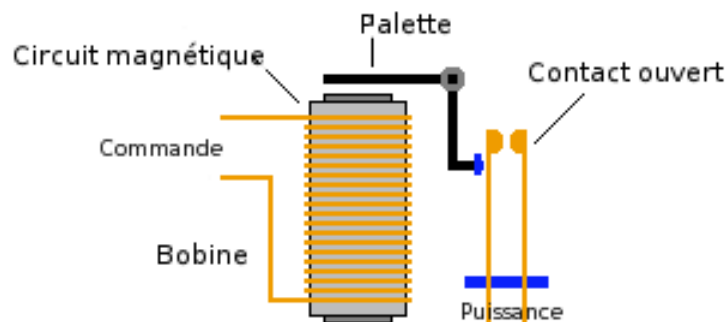
L'aspect continu peut sembler étrange, car une batterie se décharge. Mais lors de nos études, on suppose un fonctionnement sur une durée courte où l'on fera l'hypothèse que la batterie ne se décharge pas.

Il arrive très souvent que l'alimentation (tension et/ou courant) ne soit pas purement sinusoïdale. Cependant, soit la tension soit le courant reste sinusoïdal. Ce type d'alimentation apparaît lorsque le récepteur n'est pas linéaire, comme ce peut être le cas des variateurs de vitesse pour les machines à courant continu ou les machines asynchrones.

## 2.1.2 Pré-actionneurs électriques

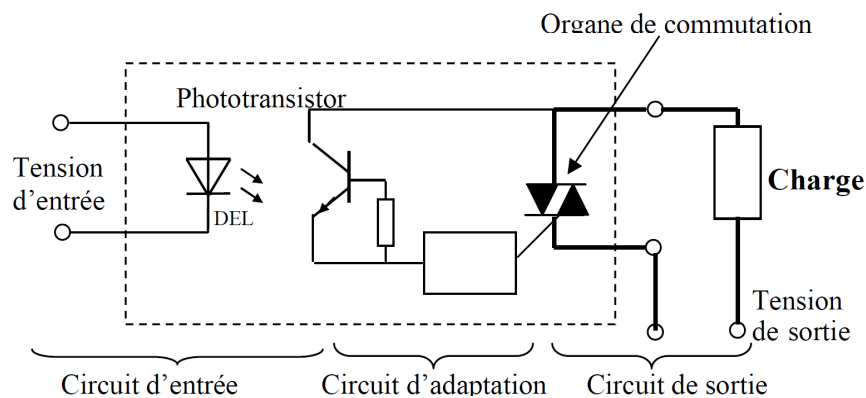
### Relais électromécanique

Un relais électromécanique permet l'ouverture et la fermeture d'un circuit électrique par un second circuit complètement isolé. Il est constitué d'une bobine qui lorsqu'elle est sous tension attire par un phénomène électromagnétique une armature ferromagnétique qui déplace des contacts. Il permet de dissocier la partie puissance de la partie commande.



### Relais statique

Un relais statique est par définition un organe ayant la fonction d'un relais mais réalisé avec des composants électroniques, sans aucune pièce mécanique en mouvement. Il est constitué d'un circuit d'entrée isolé avec un phototransistor, d'un circuit d'adaptation qui assure la commutation et un circuit de sortie qui contient l'organe de puissance (MOSFET, thyristors ou triac).



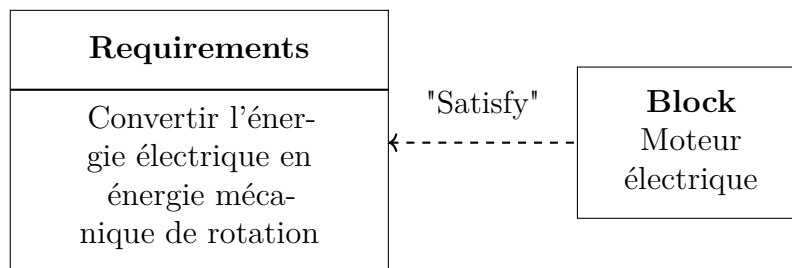
## Variateurs

Les variateurs permettent de moduler de façon continue la tension ou la fréquence d'alimentation de l'actionneur électrique.

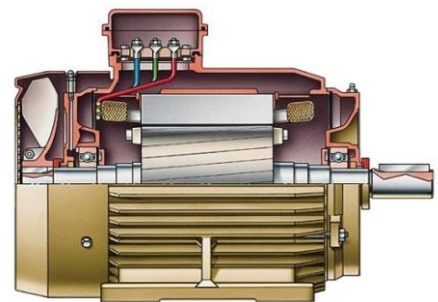
Moteur	Variateur	Gamme de vitesse	Applications types
Continu	Redresseur à thyristors	1 à 300	levage, téléphérique, convoyage
	Hacheur	1 à 10 000	Robotique, machine-outils, positionnement, traction
Synchrone	Onduleur/autoréglage	1 à 10 000	Robotique, machine-outils
Asynchrone	Gradateur	1 à 3	Ventilateurs, pompes (sans régulation)
	Onduleur $U/f$	1 à 50	toute application non régulée et ne nécessitant pas une grande précision
Asynchrone à bagues	Gradateur	1 à 20	gros levage

TABLE 1 – Synthèse des chaînes d'entraînements électriques.

### 2.1.3 Actionneurs : moteurs électriques



Les moteurs électriques permettent de convertir une énergie électrique en énergie mécanique. Les moteurs électriques sont en général de section cylindrique et fournissent en sortie une énergie mécanique de rotation. Ils possèdent un stator (partie fixe) et un rotor (partie mobile). Notez qu'il existe des systèmes linéaires pour certaines applications.

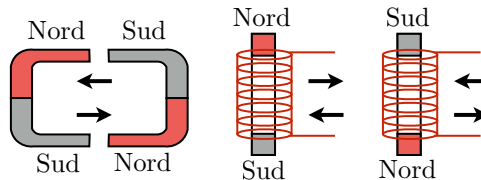


La conversion électromécanique est un phénomène réversible lié à l'existence de forces magnétiques. On peut produire une force électromotrice (f.é.m.) par variation du flux  $\phi$  dans un circuit. Le principe fait référence à un élément de circuit, parcouru par un courant, se déplaçant par rapport à un champ magnétique. Ce déplacement doit être considéré comme relatif et on peut donc mentionner les cas suivants :

- inducteur fixe et induit mobile (moteurs à courant continu) ;

- inducteur mobile et induit fixe (moteurs synchrones) ;
- inducteur et induit mobiles, mais à des vitesses différentes (machines asynchrones).

Un aimant possède un pôle Nord et un pôle Sud. Les pôles de même nature se repoussent, ceux de natures différentes s'attirent. On peut fabriquer artificiellement un aimant en enroulant un fil électrique autour d'un noyau métallique de sorte à faire une bobine. On crée alors un champ magnétique suffisant pour l'alimenter. Pour inverser la polarité de l'électroaimant, il suffit de changer le sens du courant. C'est ce principe qui est largement utilisé pour la conception des moteurs électriques.

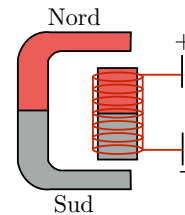


Il existe plusieurs sortes de moteurs électriques qui se différencient par la technologie de leur rotor et stator. Les principales machines électriques sont :

- la machine à courant continu à aimants permanents ;
- la machine synchrone à aimants permanents ;
- la machine synchrone à rotor bobiné ;
- la machine asynchrone.

### Moteur à courant continu

Une machine (moteur ou génératrice) à courant continu est une machine électrique tournante mettant en jeu des tensions et des courants continus constants.



La rotation du moteur à courant continu est induite par les forces de Laplace. Quand un conducteur, parcouru par un courant  $I$ , traverse un champ magnétique, il apparaît une force d'expression  $F = I \vec{\ell} \wedge \vec{B}$  où  $\vec{\ell}$  est un vecteur de norme  $\ell$ , la longueur du conducteur, de direction celle du conducteur, de sens celui du courant le traversant et  $\vec{B}$  le champ magnétique dans lequel est « baigné » le conducteur. On applique cette loi à chaque spire du rotor.

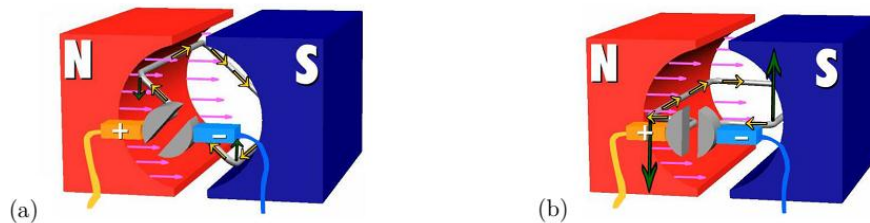
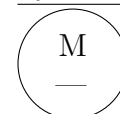


FIGURE 11 – Effort de Laplace sur une spire (a) position quelconque (b) couple maximal.

Caractéristiques :

- adapté au courant continu ;
- système réversible ;
- couple au démarrage important et réglable.

Symbole :



Utilisation : système simple de faible puissance (Maxpid, Comax), ou de plus forte puissance (remontées mécaniques).

### Moteur synchrone (triphasé)

Une machine synchrone (MS) est un convertisseur électromécanique réversible : elle peut fonctionner soit en génératrice (alternateur), soit en moteur.

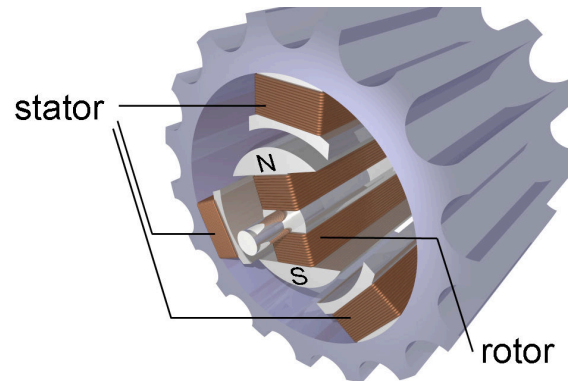
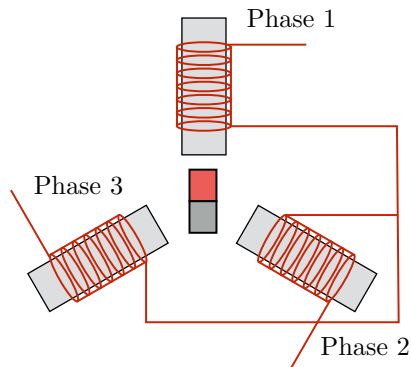


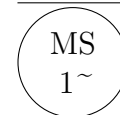
FIGURE 12 – Représentation d'un moteur synchrone.

Elle met en jeu des tensions et des courants alternatifs. Le stator est constitué d'un, deux ou trois enroulements (machine monophasée, biphasée ou triphasée) parcourus par des courants alternatifs. Le rotor est constitué d'électroaimants parcourus par un courant continu ou d'aimants permanents.

#### Caractéristiques :

- puissance ;
- vitesse de rotation proportionnelle à la fréquence du courant ;
- possibilité de non-démarrage si vitesse de rotation initiale trop grande.

#### Symbole :



Utilisation : tambour de lave-linge, moteur de TGV.

### Moteur asynchrone (monophasé ou triphasé)

La machine asynchrone est un convertisseur électromécanique qui, par sa simplicité de construction, a conquis en un siècle tous les domaines des entraînements : à vitesse fixe, puis variable, et à contrôle de couple. Il est alimenté par des tensions alternatives (triphasées ou monophasées). Le fonctionnement repose :

- d'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur en court-circuit placé dans un champ magnétique tournant (un des barreaux de la cage d'écureuil constituant le rotor du moteur).
- D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite (base directe).

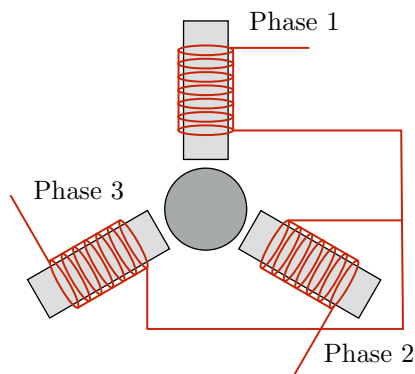
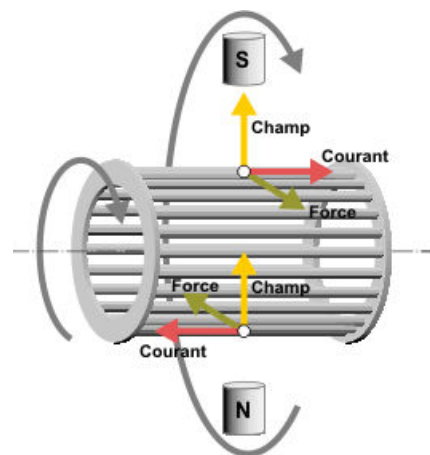


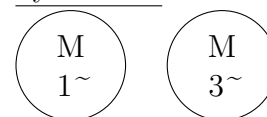
FIGURE 13 – Représentation d'un  
moteur asynchrone.  
Caractéristiques :

- puissance ;
- vitesse de rotation non proportionnelle à la fréquence du courant ;
- apparition d'une phase de glissement ;
- couple utile et maximum.

Utilisation : appareils domestiques (monophasé), machines-outils (triphasé).



Symboles :



### Moteur pas-à-pas

Un moteur pas à pas est un moteur dont la rotation du rotor s'effectue par déplacements angulaires successifs sous l'action d'impulsions électriques appliquées sur les bobinages statoriques. À l'inverse des moteurs précédents, le rotor ne tourne pas de façon continue. Le stator est constitué de bobines alimentées par des impulsions de courant continu. En augmentant la fréquence des ordres de commutation, le fonctionnement est assimilable à celui d'un moteur à courant continu.

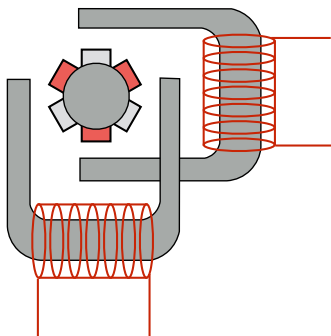


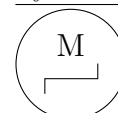
FIGURE 14 – Représentation d'un  
moteur pas-à-pas.  
Caractéristiques :

- nombre de positions par tour : pas
- couple maximum

Utilisation : applications nécessitant un positionnement précis sans asservissement.



Symbole :





## 2.2 Systèmes pneumatiques/hydrauliques

Le fonctionnement des deux types de systèmes présentés au cours de cette partie peut être regroupé. En effet, hormis les valeurs numériques des pressions utilisables, le fonctionnement des systèmes est le même (sauf si l'inverse est mentionné).

### 2.2.1 Sources d'énergie pneumatique : compresseurs

L'énergie pneumatique est fournie par un compresseur d'air. L'énergie est stockée dans un accumulateur dont la pression est régulée à une dizaine de bars. Un groupe de conditionnement filtre l'air et régule la pression d'utilisation autour de 6 bars au moyen d'un détendeur. L'air est le plus souvent lubrifié pour éviter la corrosion de certaines parties des distributeurs ou des actionneurs. En général une entreprise possède un réseau local pneumatique alimentant les différents ateliers.

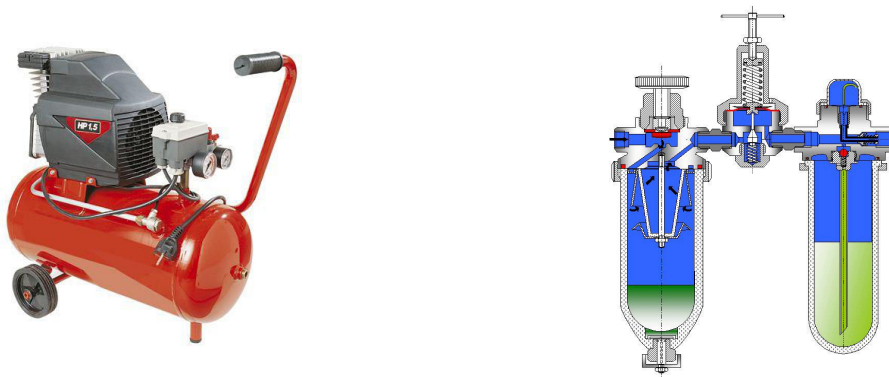
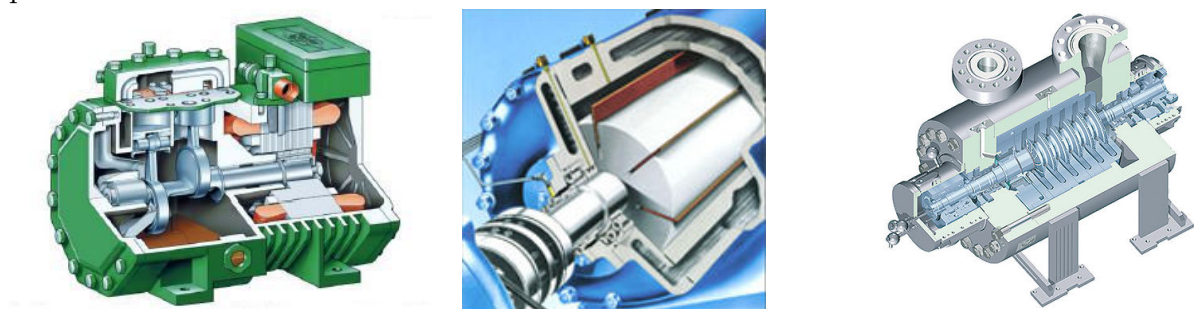


FIGURE 15 – Production et traitement d'énergie pneumatique.

Les compresseurs peuvent être volumétriques ou centrifuges. Les compresseurs volumétriques exploitent une variation de volume entraînant une variation de pression et de température. On distingue deux familles : les compresseurs alternatifs (à cylindre ou à membrane) et les compresseurs rotatifs (à palettes ou à vis). Les compresseurs centrifuges sont des turbomachines qui nécessitent une très grande vitesse de rotation en entrée. Généralement à plusieurs étages, ils sont utilisés pour les débits élevés et les fortes puissances.



Compresseur alternatif

Compresseur à palettes

Compresseur centrifuge

FIGURE 16 – Différents types de compresseurs pneumatiques.



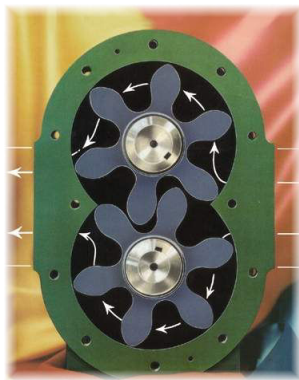
### 2.2.2 Sources d'énergie hydraulique : pompes

L'énergie hydraulique est fournie par un groupe motopompe (appelé également centrale hydraulique). Il s'agit d'un ensemble moteur + pompe hydraulique. Le moteur est en général électrique (si l'on a accès au réseau électrique) ou thermique. Classiquement, le système intègre ce groupe motopompe (la plupart du temps, il n'y a pas de réseau hydraulique dans les entreprises).

Comme les compresseurs, les pompes peuvent être volumétriques ou centrifuges. Parmi les pompes volumétriques, on distingue les pompes à cylindrée constante et les pompes à cylindrée variable :

- cylindrée constante : pompe à piston unique, pistons multiples, à membrane, à engrenages, à palette ;
- cylindrée variable : pompe à pistons radiaux, à pistons axiaux, à palettes.

Pour les pompes centrifuges, la rotation rapide du rotor entraîne en un effet centrifuge du fluide qui est en surpression à la périphérie et en dépression à proximité de l'axe. À l'instar des compresseurs centrifuges, il existe des pompes centrifuges mono-étagée et multi-étagée pour les installations nécessitant de fortes puissances.



Pompe à engrenages



Pompe à pistons axiaux



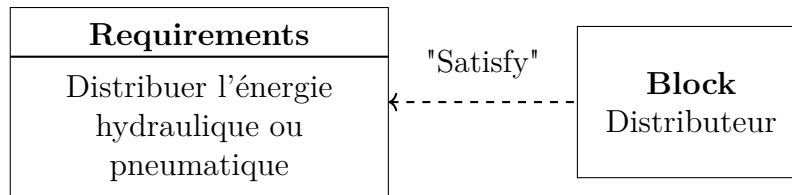
Pompe à pistons radiaux



Pompe centrifuge

FIGURE 17 – Production d'énergie hydraulique.

### 2.2.3 Pré-actionneurs : distributeurs



Le distributeur est l'élément de la chaîne de transmission d'énergie utilisé pour commuter et contrôler la circulation des fluides sous pression. Ses rôles principaux sont de :

- moduler le mouvement de la tige d'un vérin ou la rotation d'un moteur (hydraulique ou pneumatique) ;
- imposer le sens de circulation d'un fluide ;
- exécuter, à partir d'un fluide, des fonctions logiques (AND, OR, NOT) ;
- démarrer ou arrêter la circulation d'un fluide.

Les distributeurs classiquement utilisés sont dits « à tiroirs », il s'agit d'une tige de section variable indiquant quels orifices sont mis en relation. Un déplacement rectiligne s'adapte facilement aux différents types de commande (hydraulique, pneumatique). Les déplacements des tiroirs permettent de modifier la zone de sortie de pression. En fonction du raccordement avec le vérin utilisé, cela impliquera un mouvement de ce dernier.

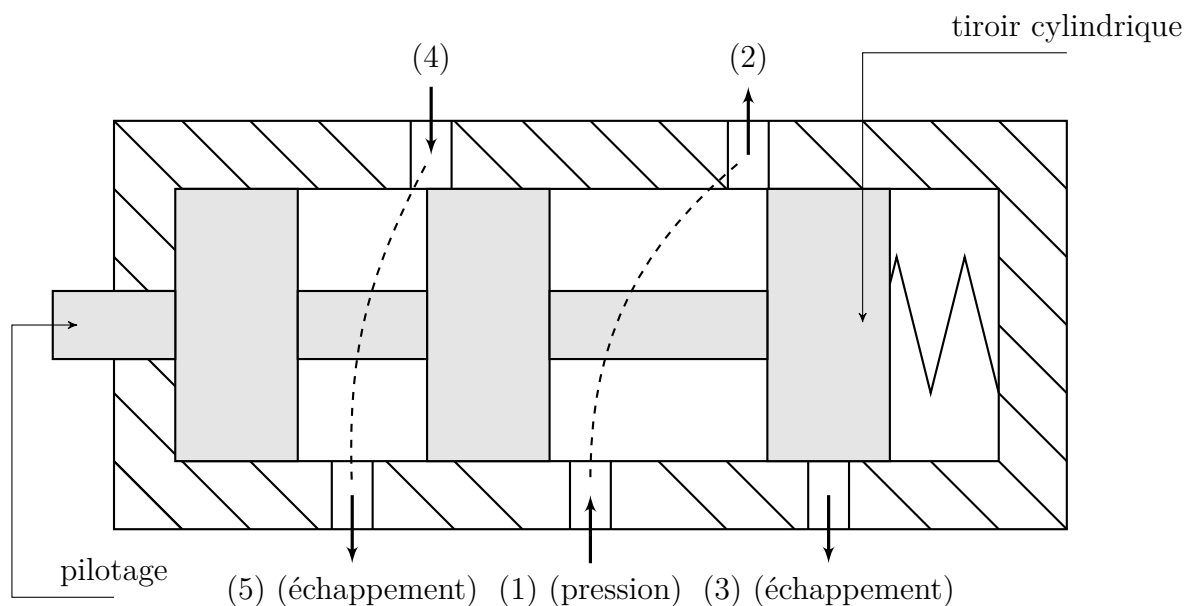


FIGURE 18 – Représentation réaliste d'un distributeur 5/2 en position de repos.

Un distributeur peut être à commande manuelle, mécanique, électrique (électromagnétique), hydraulique ou pneumatique. Il peut aussi être normalement fermé ou normalement ouvert :

- distributeur normalement fermé (N.F.) : aucune circulation n'est permise au repos ;
- distributeur normalement ouvert (N.O.) : durant la phase de repos, il y a circulation du fluide (air ou liquide).

De plus, un autre paramètre permettant de décrire complètement le fonctionnement d'un distributeur est le choix du pilotage. En effet, il est présenté dans le tableau 2 les différentes possibilités de pilotage en attente d'une commande. Il serait en fait possible d'utiliser un système de rappel de type ressort pour ne proposer qu'une position libre. Cela vient alors apporter une nouvelle caractéristique aux distributeurs :

- distributeur monostable : il n'a qu'une position stable. Il faut choisir un des moyens de pilotage pour quitter la position initiale et le retour est effectué à l'aide de la décompression du ressort ;
- distributeur bistable : il possède plusieurs positions stables dont le choix est réalisé à l'aide des pilotes utilisés.

### Symbolisation issue de la norme NF-ISO 1219-1

Un distributeur est caractérisé par un nombre d'orifices d'alimentation ou d'échappement et un nombre de positions (figure 19).

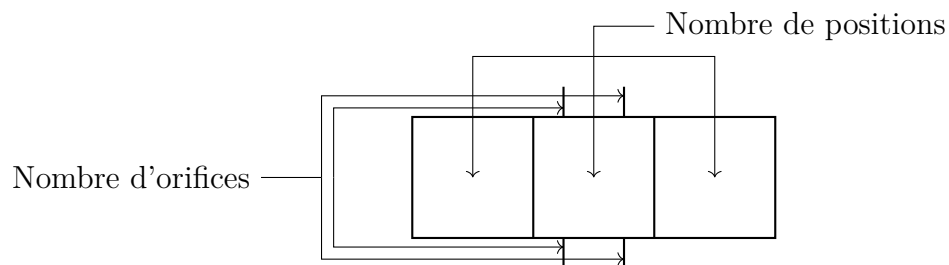


FIGURE 19 – Distinction entre positions et orifices.

Le nombre de positions est défini par le nombre de cases (séparées par un trait continu) représentées dans le symbole normalisé du distributeur. Il est important de comprendre que le nombre d'orifices n'est à relever que sur une position (identiques pour toutes). Les différents principes décrits précédemment sont représentés en figure 20.

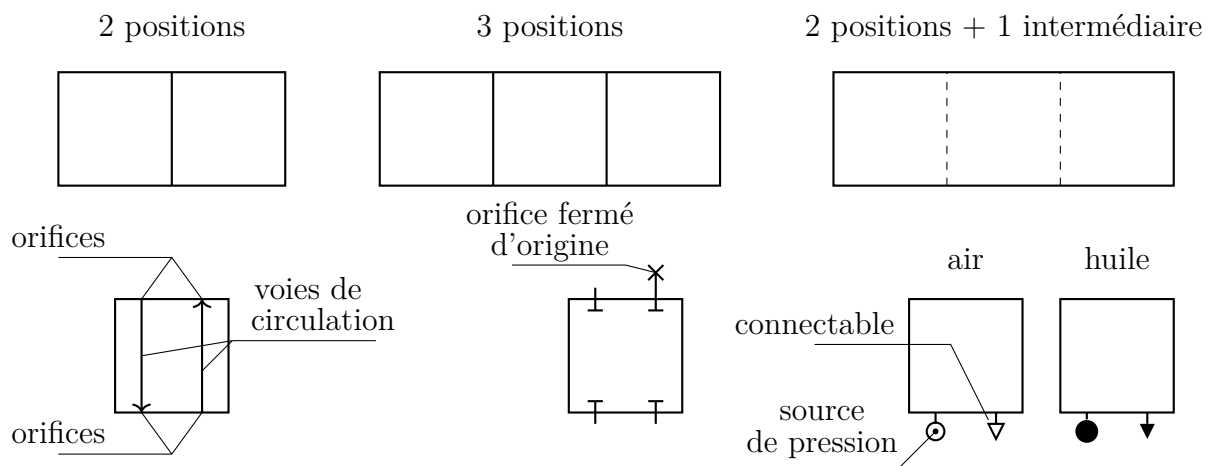


FIGURE 20 – Description des éléments de base.

La représentation des symboles permet de savoir si le système étudié est hydraulique ou pneumatique (en notant, comme illustré en figure 20, que les symboles sont pleins en hydraulique et vides en pneumatique).

La norme impose de placer la position de repos à droite pour les distributeurs à deux positions et au milieu pour ceux à trois positions. Le tableau 2 fournit les principaux distributeurs et dispositifs de pilotage.

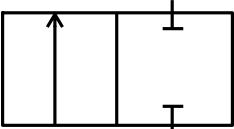
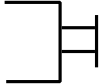
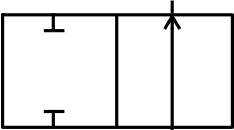
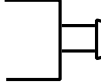
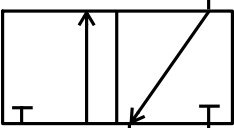
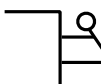
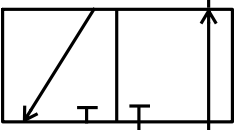
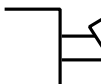
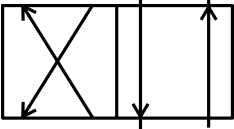
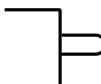
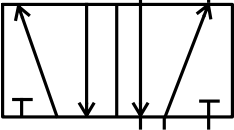

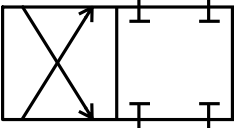
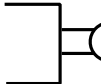
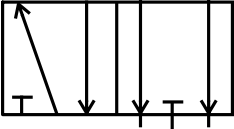
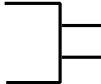
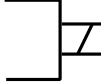
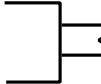
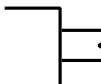
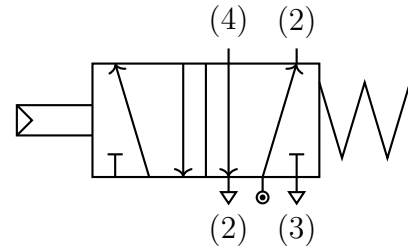
SYMBOLES		PILOTAGE		
N.O. : Normalement Ouvert N.F. : Normalement Fermé				
2/2 N.F.		MANUEL	général	
2/2 N.O.			bouton poussoir	
3/2 N.F.			levier	
3/2 N.O.			pédale	
4/2		MÉCANIQUE	poussoir	
5/2			ressort	
4/3			galet	
5/3		ÉLECTRO AIMANT	1 enroulement	
			2 enroulements	
		DISTRIBUTEUR PILOTE	hydraulique	
			pneumatique	

TABLE 2 – Distributeurs et principaux dispositifs de pilotage.

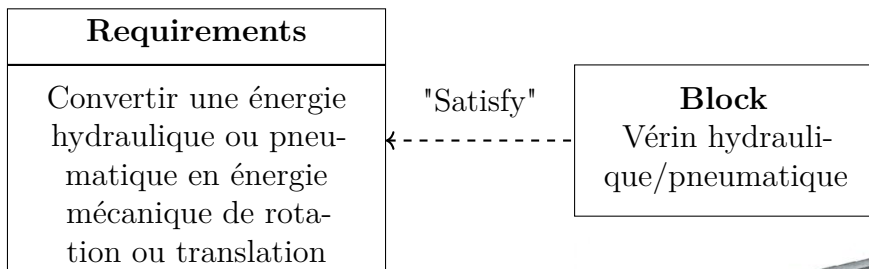
### Exemple 2.1 (Distributeur 5/2 monostable)

Le schéma ci-contre représente un distributeur 5/2 monostable en position repos. Deux de ces orifices ne sont utiles que pour une position (la sortie (5) au repos et la sortie (3) en compression). Sur cet exemple la commande est dite « directe », car elle est implantée sur le distributeur de puissance.

L'activation de l'électro-aimant permet de changer de position. Dès que l'électro-aimant est désactivé, le ressort remet directement le distributeur en position initiale.



#### 2.2.4 Actionneurs : vérins



Les vérins sont des éléments récepteurs de l'énergie dans un circuit pneumatique ou hydraulique. Ces derniers transforment l'énergie du fluide en énergie mécanique de translation pour les vérins linéaires et de rotation pour les vérins rotatifs. Ils permettent de développer un effort très important proportionnel à la pression et une vitesse maîtrisée proportionnelle au débit.

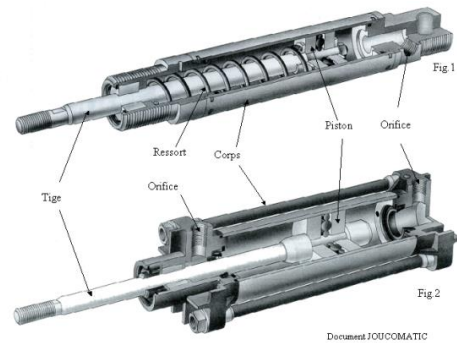
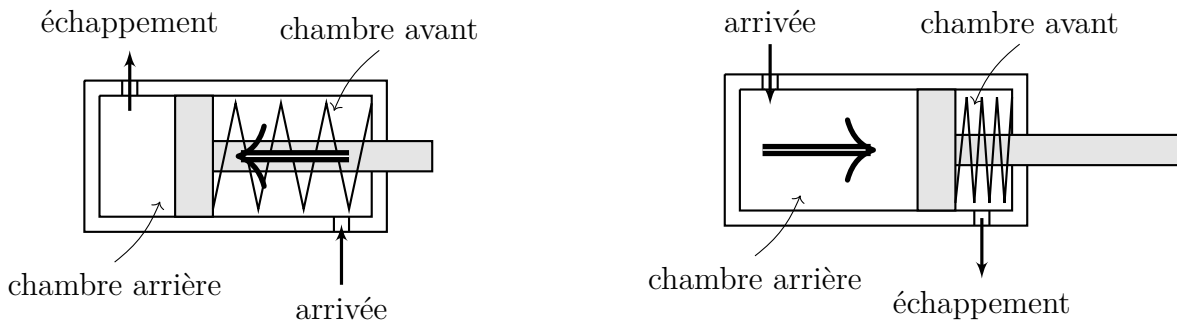


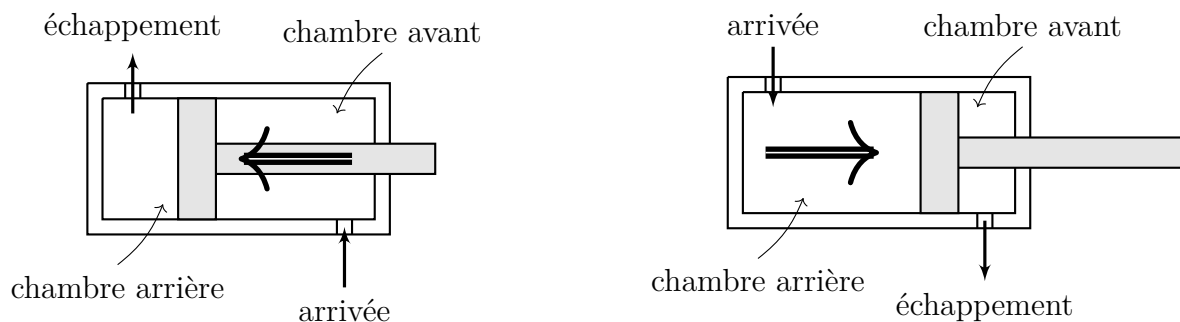
FIGURE 21 – Constitution d'un vérin.

**Vérins simple effet (VSE)** Un vérin simple effet est muni d'un ressort de rappel. Il est commandé dans un seul sens (en sortie si le ressort est placé dans la chambre avant ou en entrée si le ressort est placé dans la chambre arrière). Dès que le fluide est injecté dans la chambre arrière, le piston vient comprimer le ressort et la tige du vérin sort. Si l'alimentation est interrompue, la tige rentre sous l'action du ressort.



Ce type de vérin est économique, car la consommation de fluide (ou d'air) est réduite. L'inconvénient principal est que la vitesse du retour n'est pas réellement commandable mais est fonction de la raideur du ressort utilisé.

**Vérins double effet (VDE)** Un vérin double effet est conçu avec deux orifices pour l'alimentation en air. Ils permettent tour à tour l'arrivée et l'échappement de l'air comprimé. Pour faire sortir la tige du vérin, il faut alimenter la chambre arrière du vérin comme précédemment mais aussi vider la chambre avant. Par contre pour rentrer la tige il faut alimenter la chambre avant du vérin.

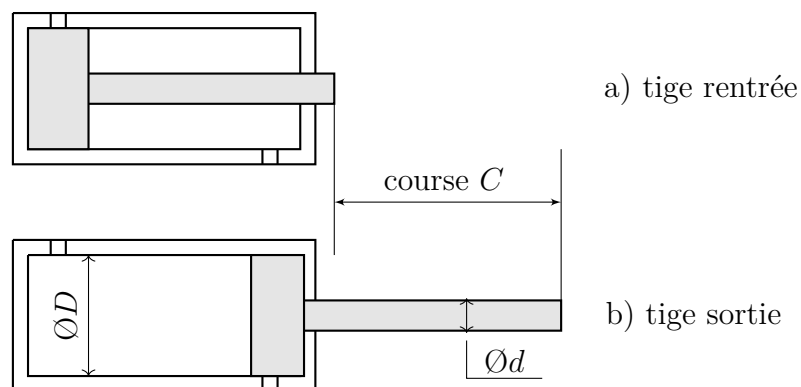


Ce type de vérin permet une plus grande souplesse d'utilisation :

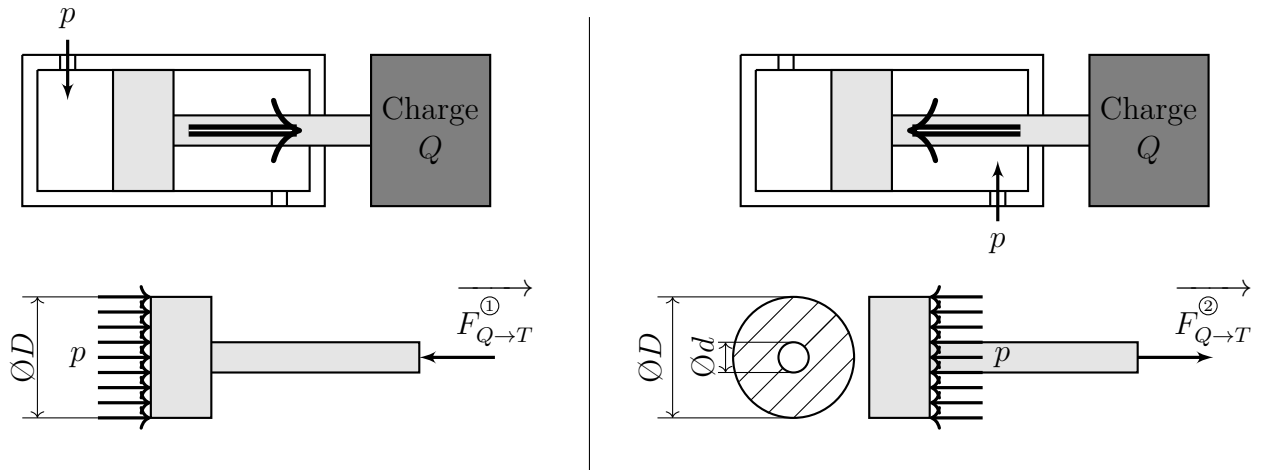
- réglage possible de l'évacuation à l'aide d'une régulation de débit ;
- possibilité de la création d'un amortissement en fin de course.

Bien évidemment ce type de vérin est plus coûteux au niveau de son utilisation.

**Caractéristiques d'un vérin** Après avoir choisi le type de vérin permettant de satisfaire des exigences données, il faut déterminer le diamètre  $D$  de l'alésage et la course  $C$  de la tige. Le diamètre de la tige  $d$  dépend de  $D$  (formulation normalisée).



Il est important de remarquer que l'effort transmissible par un vérin double effet simple tige n'est pas le même en phase d'ouverture et en phase de fermeture. En effet, bien que la pression apportée soit la même, les sections sont différentes et donc l'effort  $F = pS$  sera aussi différent. Les figures ci-dessous illustrent ce point important.



Durant la phase de sortie, l'effort poussant s'exprime :

$$\overrightarrow{\|F_{Q \rightarrow T}^{(1)}\|} = pS_1 = p\pi \frac{D^2}{4}$$

Durant la phase d'entrée, l'effort tirant s'exprime :

$$\overrightarrow{\|F_{Q \rightarrow T}^{(2)}\|} = pS_2 = p\pi \frac{(D^2 - d^2)}{4}$$

avec :

- l'effort en Newton (N)
- la pression en Pascal (Pa = N·m<sup>2</sup>)
- la section (m<sup>2</sup>)

La vitesse de la tige du vérin est liée au débit d'huile (souvent supposée incompressible) entrant par la relation :

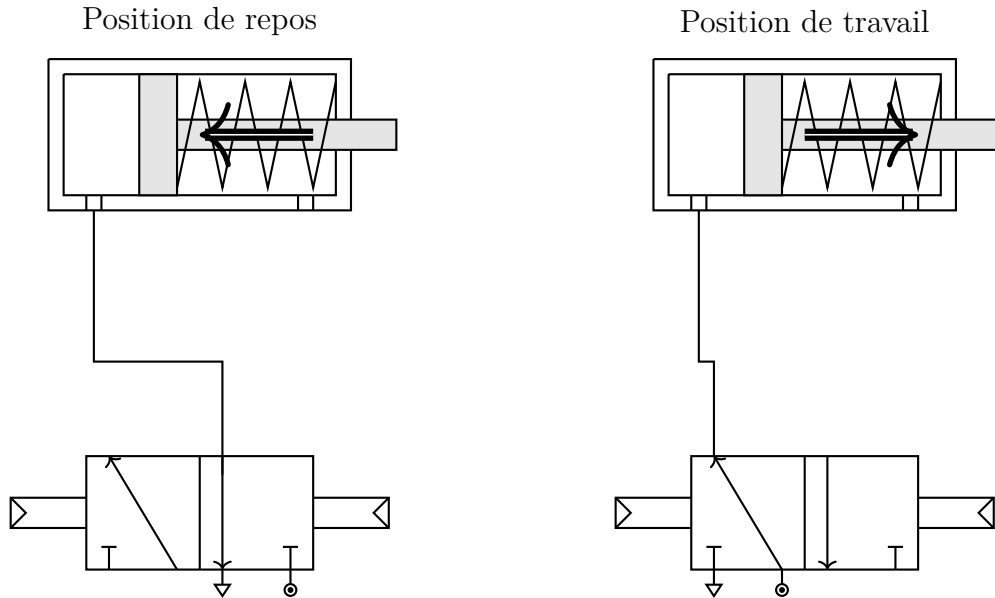
$$Q = SV$$

avec  $Q$  le débit en m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,  $S$  la section en contact avec le fluide en m<sup>2</sup> et enfin  $V$  la vitesse de sortie de la tige en m·s<sup>-1</sup>. Il est très clair que pour un même débit d'entrée, la vitesse de sortie de la tige est plus faible que la vitesse d'entrée puisque  $S_1 > S_2$ .

### 2.2.5 Exemples d'associations

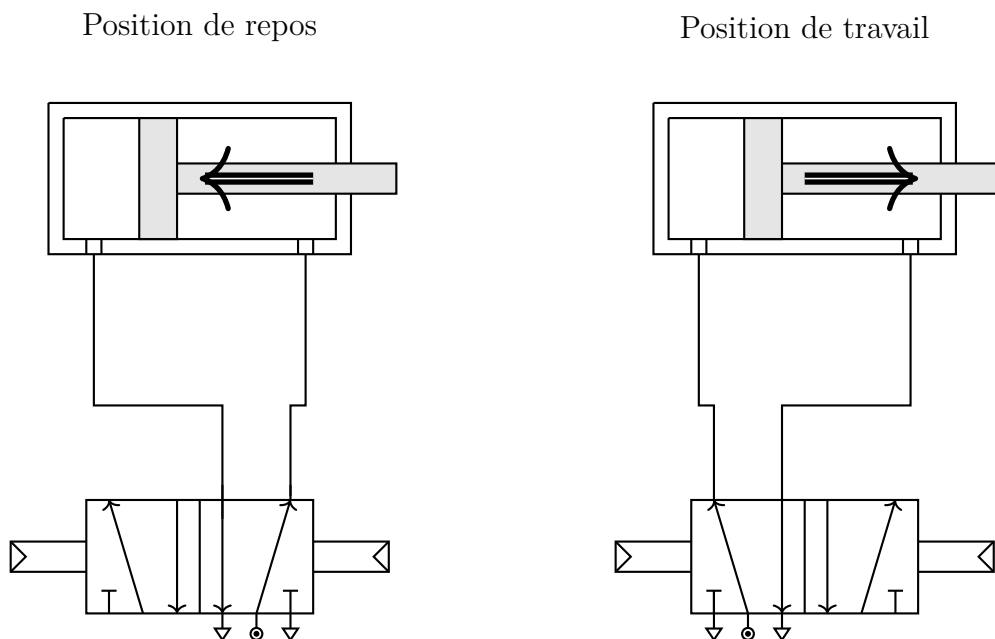
### Association d'un distributeur 3/2 et d'un vérin simple effet

Un vérin simple effet a besoin d'être piloté seulement pour effectuer un mouvement de sortie de tige (parfois en entrée de tige en fonction de la position de repos choisie). Donc pour le raccorder au distributeur, il suffit d'utiliser un seul tuyau.



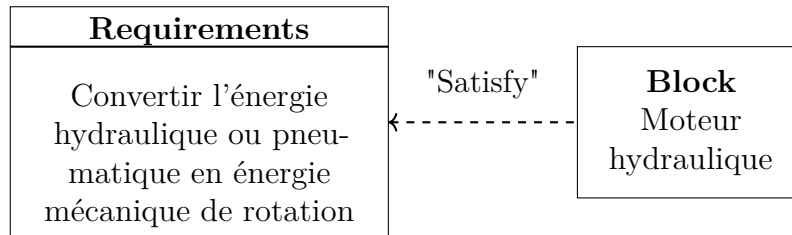
### Association d'un distributeur 5/2 et d'un vérin double effet

Un vérin double effet a besoin d'être piloté pour effectuer un mouvement de sortie de tige et un mouvement d'entrée de tige. Donc pour le raccorder au distributeur, il faut utiliser deux tuyaux. Sa position de repos est choisie par le concepteur du système. Pour l'exemple suivant, la position tige rentrée a été choisie comme position de repos.





## 2.2.6 Moteurs hydrauliques



Ils se divisent en deux grandes catégories :

- les moteurs à pistons axiaux (les plus répandus) ou radiaux ;
- les moteurs à palettes ou à engrenages (rapides, mais de durée de vie limitée et de rendement plus faible).

### Caractéristiques

Ils sont caractérisés également par leur cylindrée qui correspond au volume de fluide utilisé par tour :

$$Cyl = \frac{Q}{N}$$

avec :

- $Cyl$  : la cylindrée en  $L \cdot tr^{-1}$  ;
- $Q$  : le débit de fluide en  $L \cdot min^{-1}$  ;
- $N$  : la vitesse de rotation en  $tr \cdot min^{-1}$

Le plus classiquement utilisé est le moteur à pistons radiaux et à cylindrée fixe. Il est constitué :

- d'un rotor (2) lié au bâti (1) par une pivot ;
- de l'usinage du rotor pour accueillir l'ensemble des pistons (3) et galets (4)

Il y a une communication de la chambre du vérin avec l'alimentation (haute pression) quand sa longueur AB augmente ou avec le réservoir dans le cas contraire.

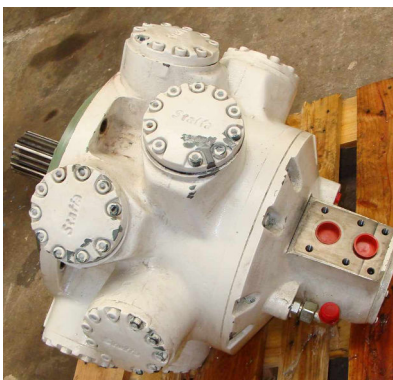
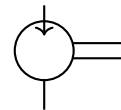


FIGURE 22 – Photo d'un moteur hydraulique.

### Symboles :

1 sens de rotation



2 sens de rotation

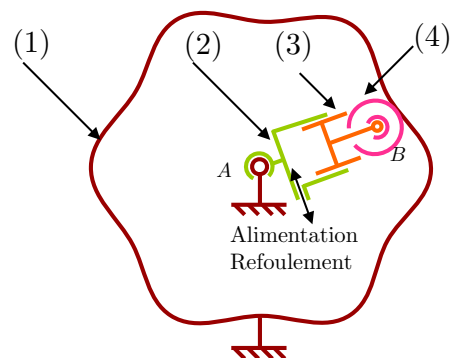
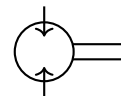
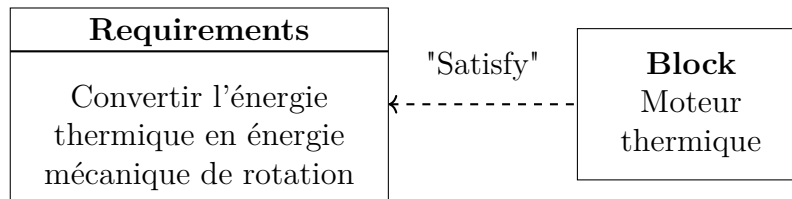


FIGURE 23 – Représentation cinématique d'un piston.

## 2.3 Systèmes thermiques : moteurs thermiques essence 4 temps



Les moteurs à combustion interne sont utilisés pour assurer la propulsion de la plupart des véhicules actuels. Ils transforment l'énergie thermique, due à la combustion d'un mélange carburé avec de l'air, en énergie mécanique, utilisée pour actionner les roues du véhicule. Pour cela, la pression générée par la combustion permet la mise en mouvement d'un piston dont le déplacement alternatif est transformé en rotation par l'intermédiaire d'un système bielle-manivelle, schématisé sur la figure 24.

**Principe de fonctionnement d'un moteur 4 temps** La figure 24 présente le moteur dans les deux positions extrêmes du piston, appelées point mort haut (PMH) et point mort bas (PMB). Le mouvement du piston dans sa chambre de combustion (ou cylindre) est transmis sous forme de rotation à l'arbre moteur (ou vilebrequin) par l'intermédiaire d'une bielle. Le système de distribution représenté comporte une soupape d'admission et une soupape d'échappement qui permettent respectivement d'assurer le remplissage du cylindre en mélange carburé puis l'évacuation des gaz après combustion.

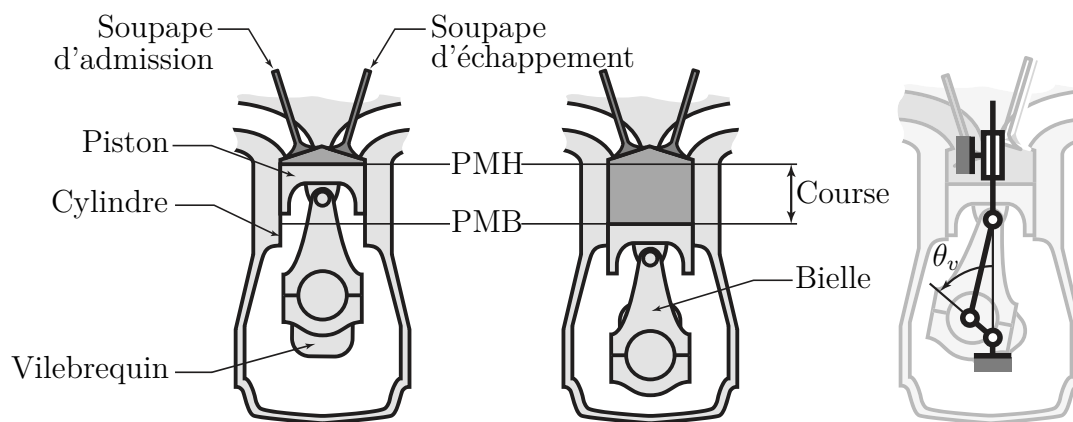


FIGURE 24 – Schématisation du moteur dans les deux positions extrêmes du piston.

La plupart des moteurs à combustion interne fonctionnent suivant un cycle à quatre temps et comportent plusieurs cylindres dont chacun peut compter plusieurs soupapes d'admission et d'échappement. Leur fonctionnement est régi à la fois par des paramètres dynamiques, liés à la cinématique du système bielle-vilebrequin, et par des paramètres thermodynamiques, liés aux transformations du mélange gazeux dans la chambre de combustion. Les caractéristiques d'un cycle sont représentées sur la figure 25. Les quatre phases de fonctionnement du cycle théorique sont :

- (a) **Admission** : après ouverture de la soupape d'admission, le piston descend, créant une dépression qui aspire dans la chambre de combustion le mélange carburé. La soupape d'échappement reste fermée.
- (b) **Compression** : après fermeture de la soupape d'admission, le piston remonte, comprimant les gaz enfermés dans la chambre de combustion ;
- (c) **Explosion puis détente** : la bougie crée une étincelle qui enflamme les gaz comprimés. La combustion se développe et la pression croît rapidement. Les soupapes d'admission et d'échappement restent fermées et la pression des gaz pousse le piston vers le bas ;
- (d) **Échappement** : l'ouverture de la soupape d'échappement provoque une évacuation des gaz brûlés sous l'effet de leur propre pression, suivie d'une poussée du piston qui remonte. La soupape d'admission reste fermée. La fermeture de la soupape d'échappement au point mort haut conclut le cycle.

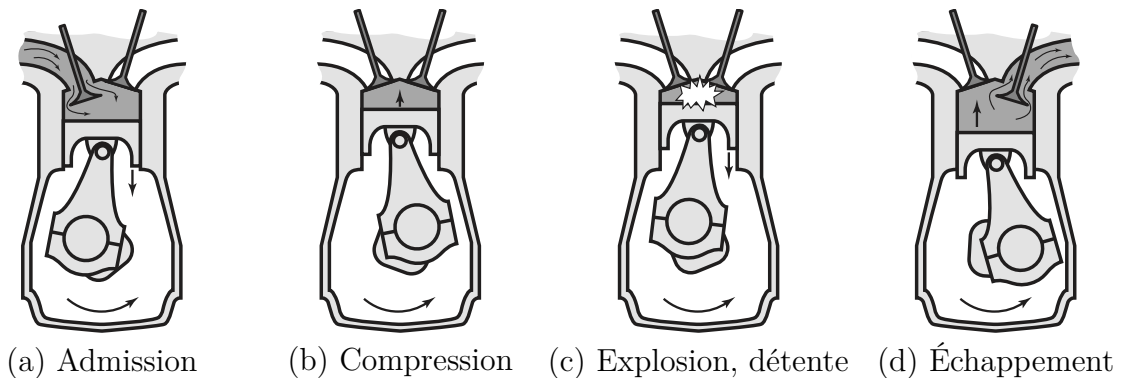
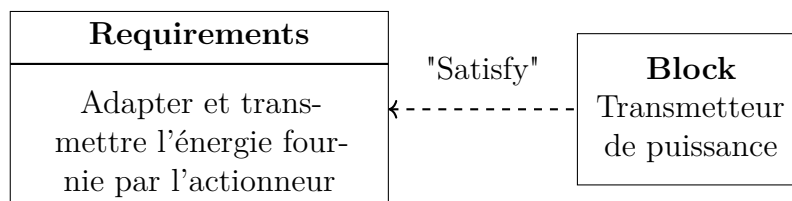


FIGURE 25 – Les quatre temps de fonctionnement d'un moteur à essence.

### 3 Transmettre

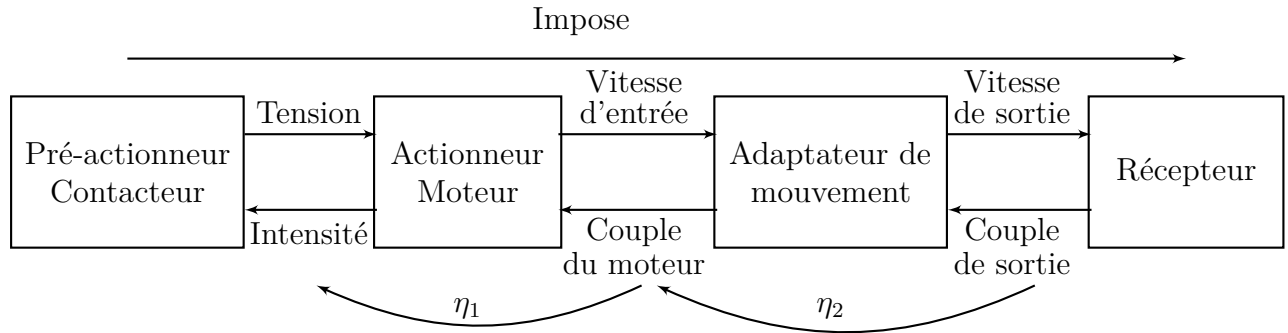


Il existe deux méthodes principales :

1. l'adaptateur de fréquence de rotation qui permet de modifier la vitesse de sortie fournie par l'actionneur (le moteur) en une vitesse adaptée au mécanisme piloté. La direction et/ou le sens et/ou la norme de la vitesse de rotation sont alors modifiés, cependant le mouvement de sortie reste un mouvement de rotation continu.
2. le transformateur de mouvement, qui répond à la même exigence que l'adaptateur, donne en sortie un mouvement différent du mouvement d'entrée (obtenu en sortie d'actionneur).

### 3.1 Adaptateurs de fréquence de rotation

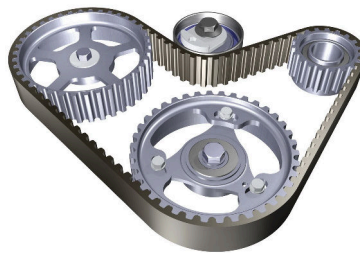
Dans de nombreuses applications industrielles, la plupart des actionneurs n'a pas les caractéristiques de vitesse de rotation ou de couple désirées. La transmission de puissance entre le moteur d'une part et la machine entraînée d'autre part nécessite alors l'interposition d'un adaptateur de mouvement entre ces deux constituants de la chaîne cinématique.



La fréquence de rotation d'un moteur (électrique ou thermique) est souvent supérieure à la valeur souhaitée pour le mouvement des organes récepteurs. Par ailleurs, le couple moteur délivré est parfois insuffisant pour vaincre l'inertie (masse) au démarrage, puis assurer le fonctionnement en charge du récepteur de manière continue. Dans ces conditions, l'interposition d'un réducteur de vitesse entre le moteur et le récepteur permet d'adapter les performances du moteur au récepteur en diminuant la vitesse de rotation et en augmentant le couple disponible. Les principaux moyens utilisés sont :



*Réducteurs à engrenage*



*Réducteurs poulies-courroie*



*Réducteurs pignons-chaîne*

Les actionneurs principaux que nous utilisons sont les moteurs qui développent une énergie mécanique transmise par un mouvement de rotation (par abus de langage on nomme souvent cette énergie : énergie mécanique de rotation). La puissance fournie (motrice) est alors de la forme :

$$\mathcal{P}_m = C_m \omega_m$$

avec  $\omega_m$  la vitesse de rotation de l'arbre de sortie du moteur par rapport au bâti et  $C_m$  le couple moteur. Bien évidemment, il est important de prendre en compte le rendement de

chaque élément de transmission, défini comme le quotient entre la puissance de sortie par la puissance d'entrée, tel que le rendement total soit :

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2 = \frac{C_m \omega_m}{UI} \times \frac{C_s \omega_s}{C_m \omega_m} = \frac{C_s \omega_s}{UI}$$

avec  $\eta_1$  le rendement du moteur et  $\eta_2$  celui de l'adaptateur.

### 3.1.1 Engrenages

Un engrenage (figure 26) est un ensemble de deux roues dentées complémentaires, chacune en liaison (pivot ou glissière) par rapport à un support (souvent le bâti). Les engrenages ont pour fonction de transmettre une puissance d'un arbre en rotation (1) à un autre arbre (2) tournant à une fréquence de rotation généralement différente, les deux fréquences de rotation restant dans un rapport constant (homocinétique) :

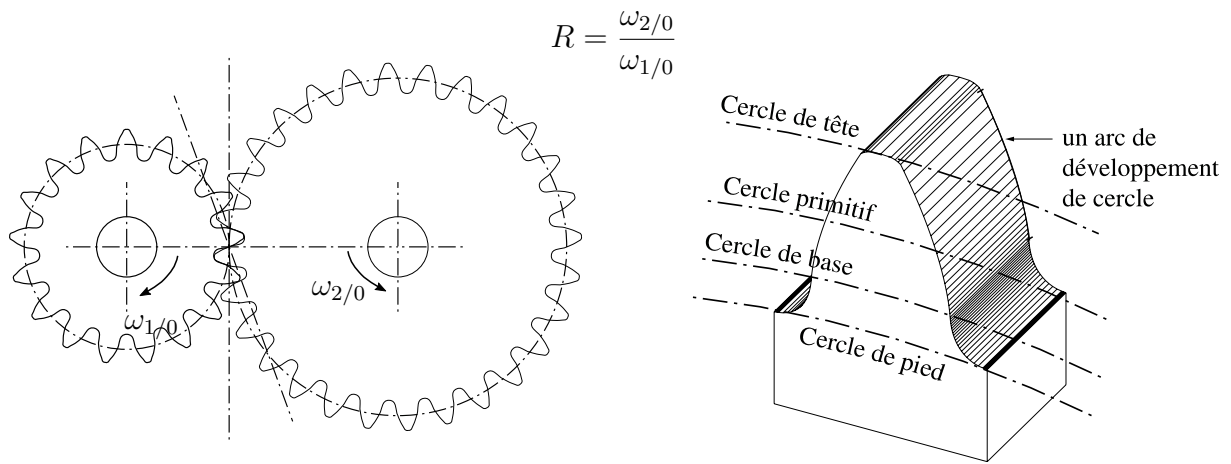


FIGURE 26 – Un engrenage et ses deux pignons et les cercles remarquables d'un pignon.

Pour assurer la continuité de l'engrènement il est nécessaire d'avoir une succession de profils conjugués en développante de cercle, la distance entre deux profils consécutifs doit être constante et égale pour les deux roues dentées; cette distance, caractéristique de l'engrènement, est appelée le module  $m$  de fonctionnement de l'engrenage :

$$m = \frac{d_1}{Z_1} = \frac{d_2}{Z_2} \iff \boxed{\forall i \in \llbracket 1, 2 \rrbracket, d_i = m Z_i}$$

où les  $(d_i)_{i \in \llbracket 1, 2 \rrbracket}$  sont les diamètres primitifs des deux pignons (ou roues) et les  $(Z_i)_{i \in \llbracket 1, 2 \rrbracket}$  leur nombre de dents respectif.

Pour un prix de revient modéré, les engrenages ont pour avantages un excellent rendement et un encombrement plutôt faible. On distingue les différents types suivants :

- les engrenages à axes parallèles à denture droite ou hélicoïdale;
- les engrenages à axes concourants à denture droite ou hélicoïdale;
- les engrenages à axes non concourants ou gauches (roue-vis, hypoïde, etc.).





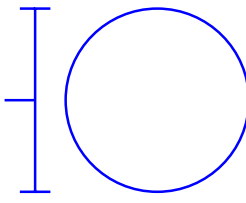
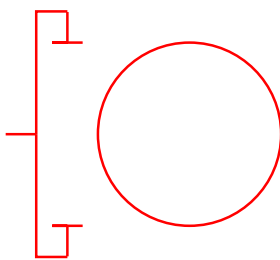
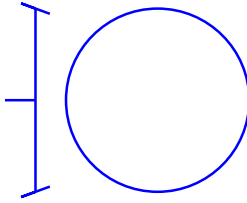
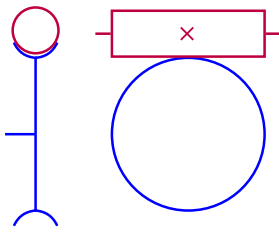
Pignon	Couronne	Pignon conique	Roue et vis sans fin
			
			

FIGURE 27 – Symbolisation des roues d'engrenage.

### Réducteur à engrenage parallèle

Il existe trois (quatre) types principaux de réducteurs à engrenages parallèles (figure 28). Le système le plus simple et le plus économique est celui utilisant des engrenages parallèles à dentures droites. De plus, la force motrice est intégralement utilisée. Par contre, le travail est dit par choc (une seule dent en prise à chaque fois). Ce type de roue dentée est utilisée, par exemple, pour la marche arrière des voitures.



*à denture droite*



*à denture hélicoïdale*



*à denture intérieure*

FIGURE 28 – Engrenages parallèles.

Pour les engrenages droits à dentures hélicoïdales, il est intéressant de noter que la partie en contact est plus longue et donc le fonctionnement est moins bruyant. De plus le transfert de contact entre dents est continu donc cela permet d'obtenir une variation continue de l'effort transmis. Par contre, la poussée axiale nécessite une butée afin de ne pas décaler la roue dentée. Enfin, il est possible de remarquer, une perte en terme d'effort transmis (effort axial). Pour aller contre cet effet, Citroën a tenté de développer des roues dentées de types chevrons, mais cela était beaucoup trop onéreux par rapport l'économie d'énergie perdue. L'ensemble des marches avant d'une voiture utilise des engrenages à dentures hélicoïdales.





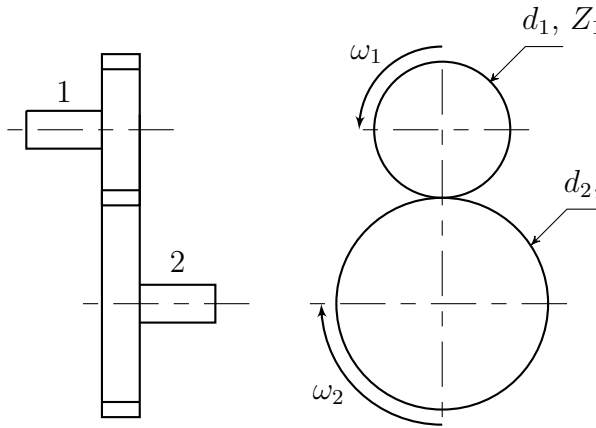


FIGURE 29 – Train à contact extérieur.

$$R_{21} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = -\frac{Z_1}{Z_2} = -\frac{d_1}{d_2}$$

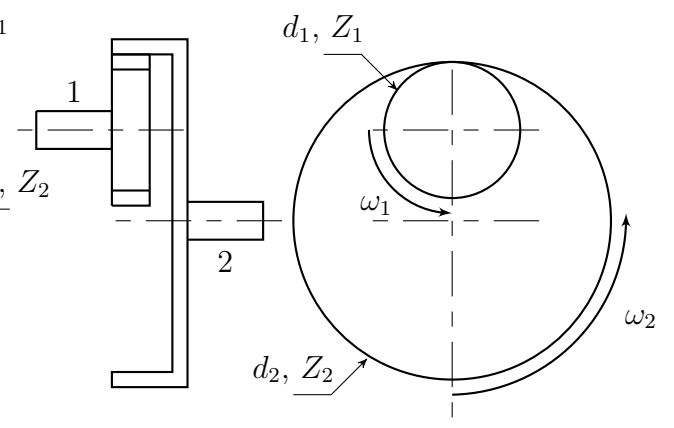


FIGURE 30 – Train à contact intérieur.

$$R_{21} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{d_1}{d_2}$$

avec  $(\omega_i)_{i \in \llbracket 1,2 \rrbracket}$  la vitesse de rotation de la roue  $i$  par rapport au bâti. Le calcul du rapport de réduction peut être généralisé selon :

$$R = (-1)^n \frac{\prod Z_{\text{menantes}}}{\prod Z_{\text{menées}}}$$

avec  $n$  le nombre de contacts extérieurs.

### Réducteur à engrenage conique

Les engrenages coniques sont des engrenages à axes concourants (figure 31). Ils permettent de transmettre le mouvement entre deux arbres concourants, avec un rapport de vitesse rigoureux. Les conditions d'engrènement imposent que les deux roues doivent avoir le même module et que les sommets des deux cônes soient confondus. Ce dernier impératif oblige le concepteur à un centrage très précis des deux roues pour assurer un fonctionnement correct. Il faut donc prévoir au montage un réglage axial des deux roues. On peut utiliser par exemple des boîtiers et des cales de réglage.



*à denture droite*



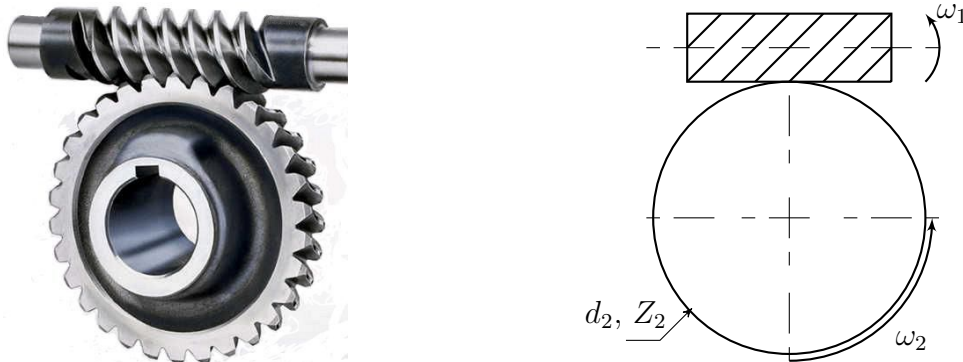
*à denture hélicoïdale*

FIGURE 31 – Engrenages coniques.

Pour le calcul du rapport de transmission, on peut toujours utiliser la relation mais en valeur absolue (perte du sens donc pas de signe à prendre en compte).

### 3.1.2 Mécanisme roue/vis sans fin

C'est un engrenage hélicoïdal dont les axes sont orthogonaux et non concourants. La vis ressemble à une vis d'un système vis/écrou et la roue à une roue droite à denture hélicoïdale. La transmission par ce type d'engrenage donne une solution simple pour les grands rapports de réduction ( $\approx 1/200$ ), avec un fonctionnement peu bruyant. Par contre, le rendement est plutôt faible à cause d'une perte due au frottement important et la transmission peut être irréversible (vis motrice mais pas la roue). Enfin, dans le cas de grandes démultiplications, la poussée axiale de la vis peut être très importante.



En notant  $Z_1$  le nombre de filets de la vis (nombre d'hélices imbriquées) et  $Z_2$  le nombre de dents de la roue, le rapport de transmission (non signé) est défini par :

$$|R| = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

### 3.1.3 Trains épicycloïdaux

Un train d'engrenages est qualifié d'épicycloïdal quand, pendant le fonctionnement, une ou plusieurs roues dentées (appelées satellites) tournent autour d'axes qui ne sont pas fixes par rapport au bâti. Le nom est dû à la trajectoire d'un point du diamètre primitif d'un satellite par rapport au planétaire appelé épicycloïde. Ce système autorise de grands rapports de réduction avec un faible encombrement en notant de plus que les axes d'entrée et de sortie sont coaxiaux. Certaines boîtes de vitesses utilisent un train épicycloïdal.



On adopte pour décrire les trains épicycloïdaux, une désignation spécifique des différentes roues dentées (figure 32) :

**Planétaire** Les roues dentées qui tournent autour d'un axe fixe par rapport au bâti. Il y a en général 2 planétaires (pignon et/ou couronne).

**Satellite** Le pignon tournant autour d'un axe du porte-satellites. Il engrène sur les deux planétaires. Les satellites ont une trajectoire épicycloïdale. Il peut y avoir 1, 2, 3 ou 4 satellites sur la périphérie en fonction de la puissance à transmettre.

**Porte-satellites** Le porte-satellites ne comporte pas de dents, il supporte les satellites, Il tourne autour du même axe que les deux planétaires.



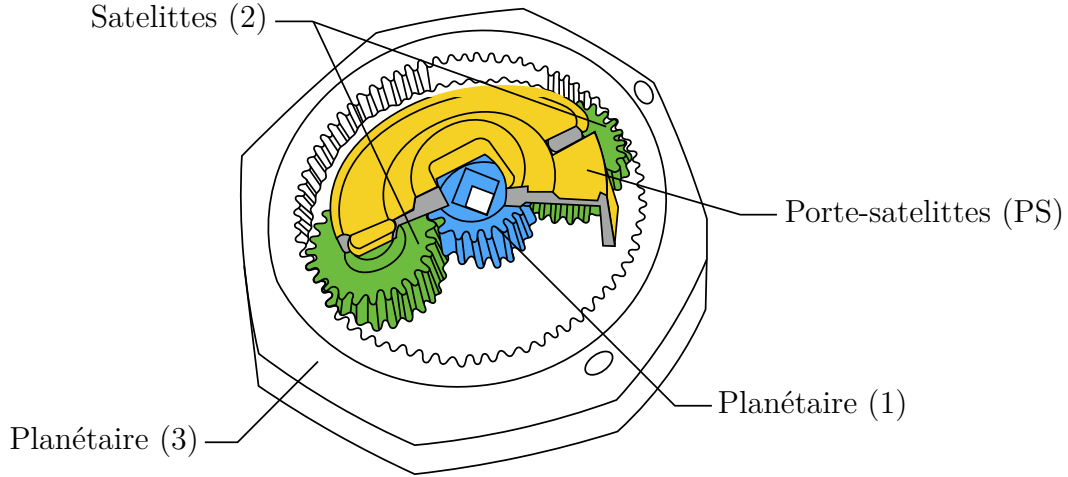


FIGURE 32 – Réducteur épicycloïdal simple.

La configuration présentée figure 32 est la plus utilisée car le rendement est bon et l'encombrement réduit. Ce système nécessite le blocage d'une des parties permettant différents types de fonctionnement. La figure 33 représente les cas usuels de fonctionnement. La configuration avec le planétaire (3) bloqué, ou couronne bloquée, est le plus utilisé avec comme entrée le planétaire (1) et en sortie le porte-satellites (2). Si jamais, le montage est réalisé comme illustré au niveau du cas 3, le porte-satellites est bloqué et l'ensemble fonctionne alors comme un train d'engrenages classique.

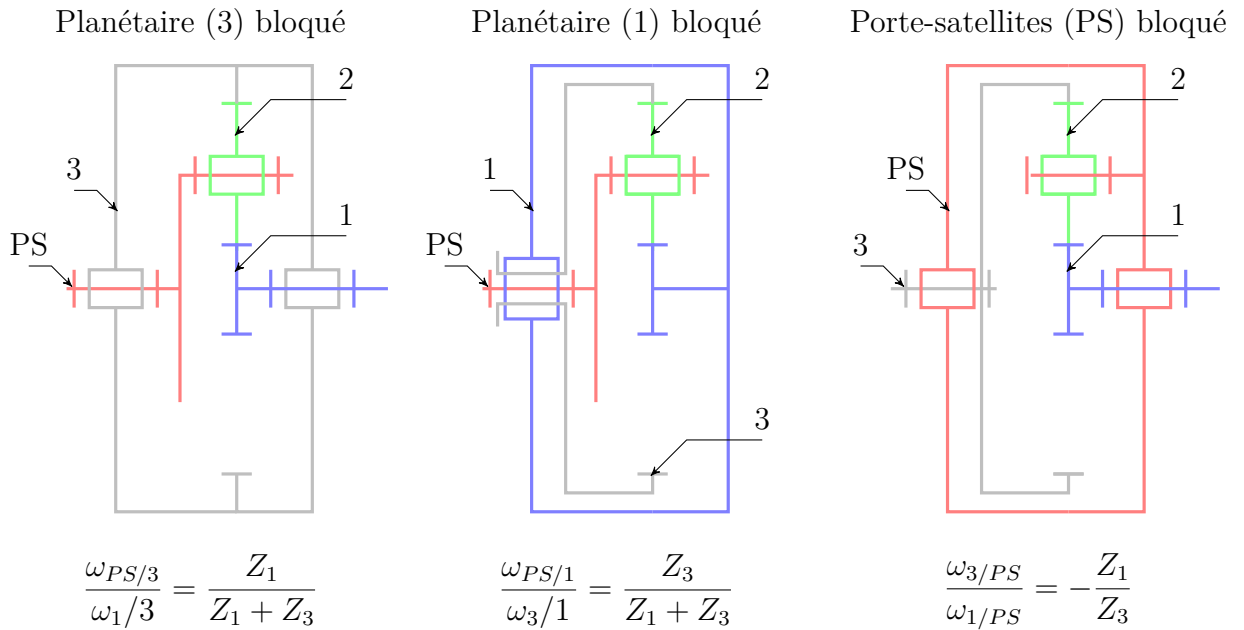


FIGURE 33 – Différentes configurations d'un train épicycloïdal de type I.

Il existe seulement quatre types de trains épicycloïdaux (figure 34).

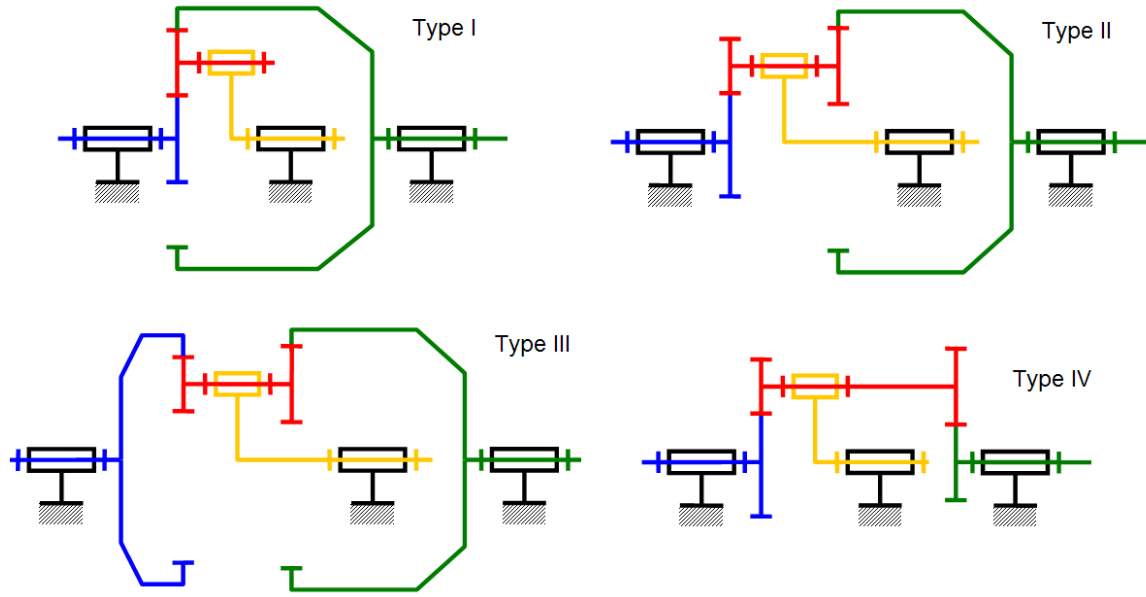


FIGURE 34 – Types de trains épicycloïdaux.

En prenant le porte-satellites comme référentiel, dans lequel tous les axes du train d'engrenage sont fixes, et en procédant comme pour un train d'engrenages à axes parallèles, il est possible de déterminer la raison basique du train épicycloïdal :

$$\lambda = \frac{\omega_{3/PS}}{\omega_{1/PS}}$$

On peut donc écrire les relations dans chaque engrenage pour en déduire la loi entrée-sortie en prenant comme entrée et sortie les deux planétaires. Enfin, en décomposant les vitesses en passant par le référentiel (0), il est possible de déterminer la relation de Willis :

$$\lambda = \frac{\omega_{3/0} - \omega_{PS/0}}{\omega_{1/0} - \omega_{PS/0}} \iff \omega_{3/0} = \lambda \omega_{1/0} + (1 - \lambda) \omega_{PS/0}$$

Pour faire fonctionner le train, il faut imposer la vitesse de rotation de deux entrées. Le plus couramment, on bloque une entrée par rapport au bâti et on impose la vitesse de rotation d'une deuxième entrée. La troisième est alors donnée par la relation de Willis en prenant en compte la vitesse nulle de l'entrée bloquée.

### Exemple 3.1

Si on considère le cas le plus classique avec le planétaire (3) bloqué et  $Z_1 = 20$ ,  $Z_2 = 30$  et  $Z_3 = 80$  dents, alors :

$$\frac{\omega_{PS}}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} = \frac{20}{20 + 80} = \frac{1}{5}$$

Avec  $\omega_1 = 160 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , on trouve comme vitesse de sortie  $\omega_{PS} = 32 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 3.1.4 Liens flexibles

Les liens flexibles sont particulièrement intéressants lorsqu'il s'agit de relier des mécanismes à grands entraxes car ils sont moins couteux que les autres solutions techniques. Ils sont utilisés dans tous les secteurs de la construction mécanique (machines outils, moteurs, convoyeurs, engins de BTP, ...). Dans les réducteurs à liens flexibles, les poulies et les roues tournent dans le même sens contrairement aux engrenages. En notant avec un  $e$  l'entrée et avec un  $s$  la sortie, le rapport de transmission s'écrit :

$$R = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{d_e}{d_s}$$

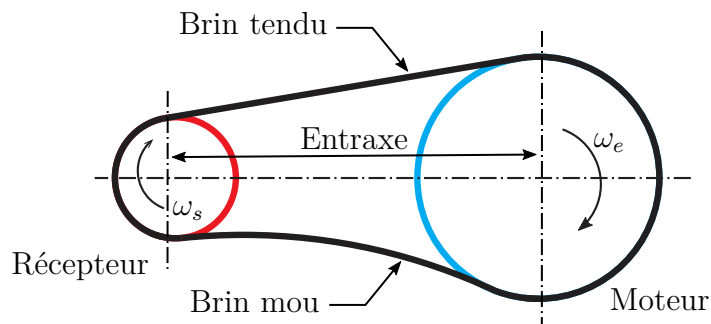
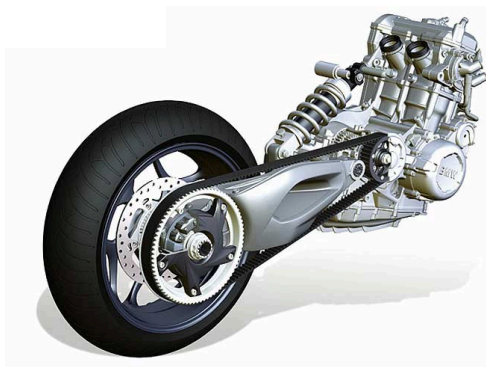
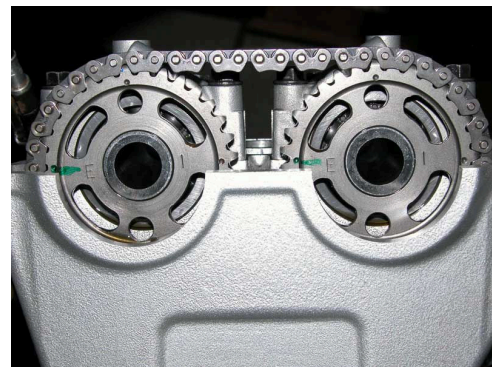


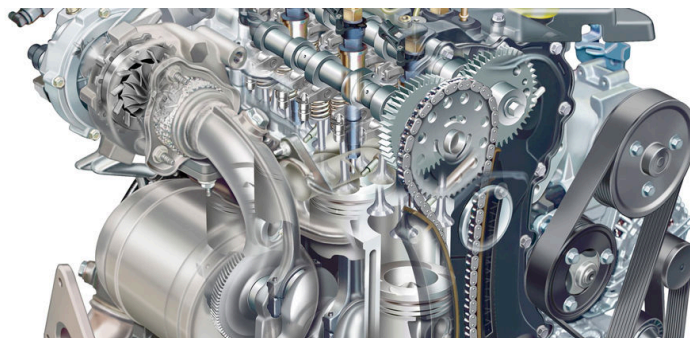
FIGURE 35 – Transmission par lien flexible.



*Transmission par courroie crantée*



*Chaîne reliant deux arbres à cames*



*Moteur Renault-Nissan M9R (avec chaîne et courroie)*

FIGURE 36 – Exemples de transmissions par liens flexibles.

## Transmission par roues et chaîne

Les chaînes sont utilisées en transmission de puissance, mais aussi en manutention et convoyage. Ce type de systèmes possèdent plusieurs avantages :

- une puissance transmissible importante ;
- un rapport de transmission constant (pas de glissement) ;
- une bonne aptitude à entraîner plusieurs arbres à partir d'un seul moteur ;
- une longue durée de vie.

Cependant, certains inconvénients sont à relever :

- nécessité de lubrification ;
- essentiellement utilisées à basses vitesses ;
- conception du montage plus complexe que pour un système poulies-courroie ;
- prix de revient plus important ;
- présence de jeu dans les maillons (exemple sur la tension des chaînes de moto) ;
- système bruyant.

Enfin, on notera que pour déterminer le rapport d'une transmission par roues-chaînes, on préfère prendre en compte le nombre de dents, tel que :

$$R = \frac{Z_e}{Z_s}$$

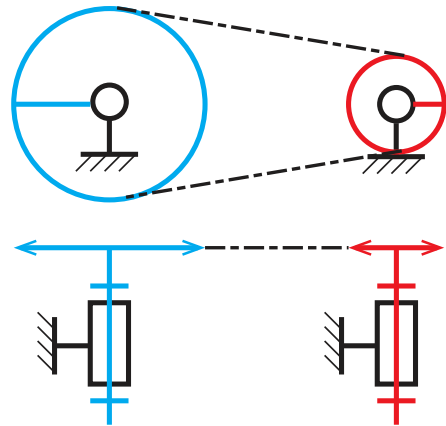


FIGURE 37 – Schématisation d'une transmission par roues-chaîne.

## Transmission par poulies et courroie

Une transmission par poulies-courroie est une solution économique et fiable. Le couple de la poulie motrice est transmis à la poulie réceptrice par l'intermédiaire d'une courroie. La transmission entre une poulie et l'armature de la courroie peut se faire par adhérence (cas des courroies lisses ou de section ronde ou trapézoïdale) ou par obstacle (cas des courroies crantées, aussi dites synchrones).

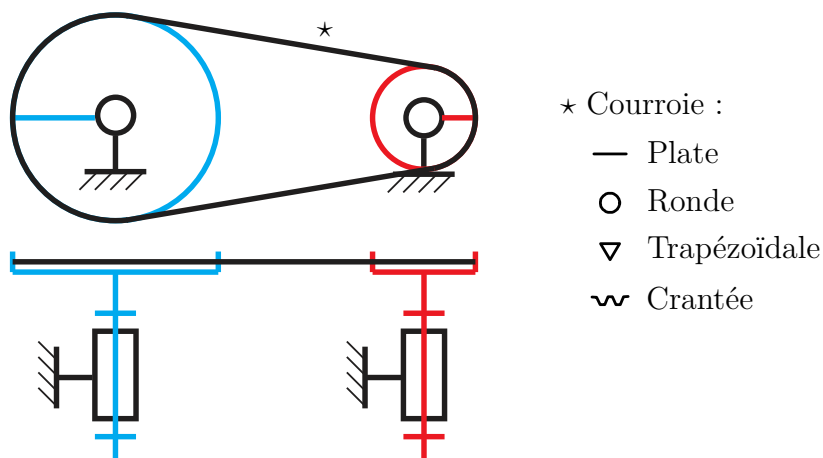


FIGURE 38 – Schématisation d'une transmission par poulies-courroie.

Outre son coût réduit et son absence de lubrification, une transmission par poulies-courroie permet :

- fonctionnement silencieux ;
- multiplication ou réduction de la vitesse de rotation selon le diamètre des poulies ;
- variation de vitesse avec des poulies à flasques mobiles (changement de diamètre) ;
- inversion du sens de rotation par croisement des brins ;
- transmission à axes non parallèles avec des galets de renvoi ;
- transformation de la rotation en translation (exemple sur le système Emericc).

Bien qu'organe mécanique, la courroie permet, en raison de sa souplesse, une certaine imprécision de réalisation qui évite d'avoir recours à des solutions très sophistiquées, donc plus coûteuses. Par contre, un système à entraxe réglable ou un dispositif annexe de tension est souvent nécessaire pour régler la tension initiale et compenser l'allongement des courroies à mesure de leur usure. L'illustration privilégiée de ces caractéristiques est le mécanisme agricole où pratiquement tous les mouvements sont assurés par des courroies.

### 3.1.5 Roues de friction

Deux roues cylindriques ou coniques sont en contact sur une génératrice et soumises à un effort presseur. Le frottement au contact des deux roues permet de transmettre le mouvement de la roue motrice vers la roue réceptrice. En pratique, cette solution reste limitée car elle nécessite des pressions de contact importantes pour assurer le roulement sans glissement entre les deux roues et donc un rapport de vitesse constant. De plus, la puissance transmissible est assez faible.

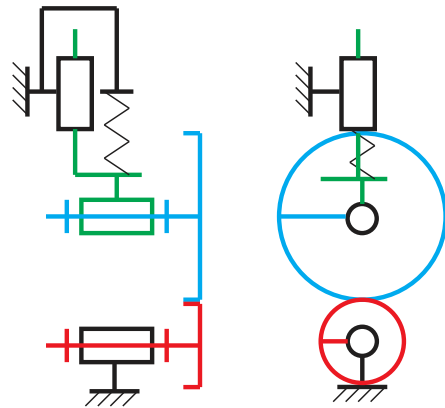


FIGURE 39 – Schématisation d'une transmission par roues de friction.

### 3.1.6 Accouplements

En mécanique, un accouplement (ou joint de transmission) est un dispositif de liaison entre deux arbres en rotation, permettant la transmission d'une puissance mécanique de rotation  $\mathcal{P} = C\omega$  avec  $C$  le couple transmis en N·m et  $\omega$  la vitesse de rotation en rad·s<sup>-1</sup>. Ils sont principalement utilisés pour :

- entraîner en rotation un élément récepteur à partir d'un élément moteur ;
- réaliser un raccordement rapide entre deux éléments d'un système (par exemple entre un moteur et une pompe) et pouvoir effectuer facilement des travaux d'entretien sur ces éléments (démontage) ;
- pallier un désalignement axial, radial ou angulaire ;
- ajouter plus de flexibilité dans le système ;
- amortir les vibrations ;
- ajouter une protection contre les pics de couple (amortissement de ce dernier).

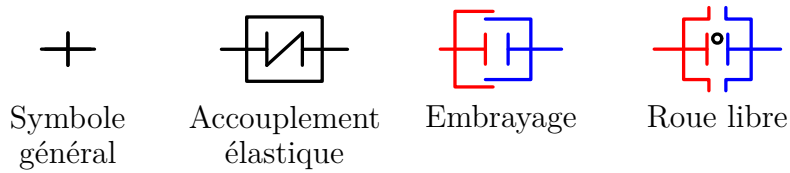


FIGURE 40 – Schématisation des accouplements.

Plusieurs solutions permettent la transmission du mouvement de rotation entre deux arbres concourants ou parallèles. Ils sont notamment caractérisés par leur homocinétisme, c'est-à-dire que la fréquence de rotation constante en sortie est la même que celle, constante, de l'entrée. L'accouplement homocinétique classiquement utilisé est le double joint de Cardan (deux joints en série, figure 41).

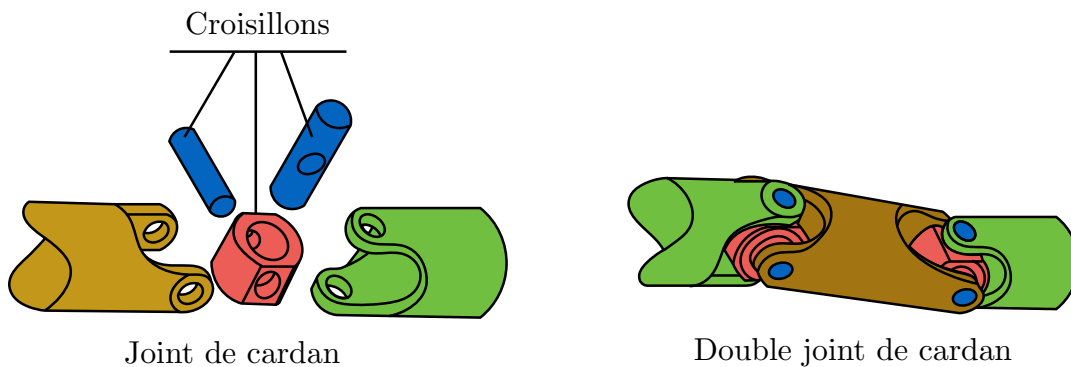


FIGURE 41 – Assemblage de deux joints de Cardan.

Il existe aussi (figure 42) :

- joint Rzeppa : homocinétique, cet accouplement est particulièrement adapté à la transmission de puissance à grands débattements ;
- joint de Oldham : homocinétique, cet accouplement autorise la transmission d'un mouvement de rotation entre deux arbres parallèles. Il possède une excellente compacité tant que la distance entre les arbres est faible ;
- joint tripode : cet accouplement est pratiquement homocinétique. Il autorise un écart angulaire jusqu'à 25° au maximum.



FIGURE 42 – Joints homocinétiques.

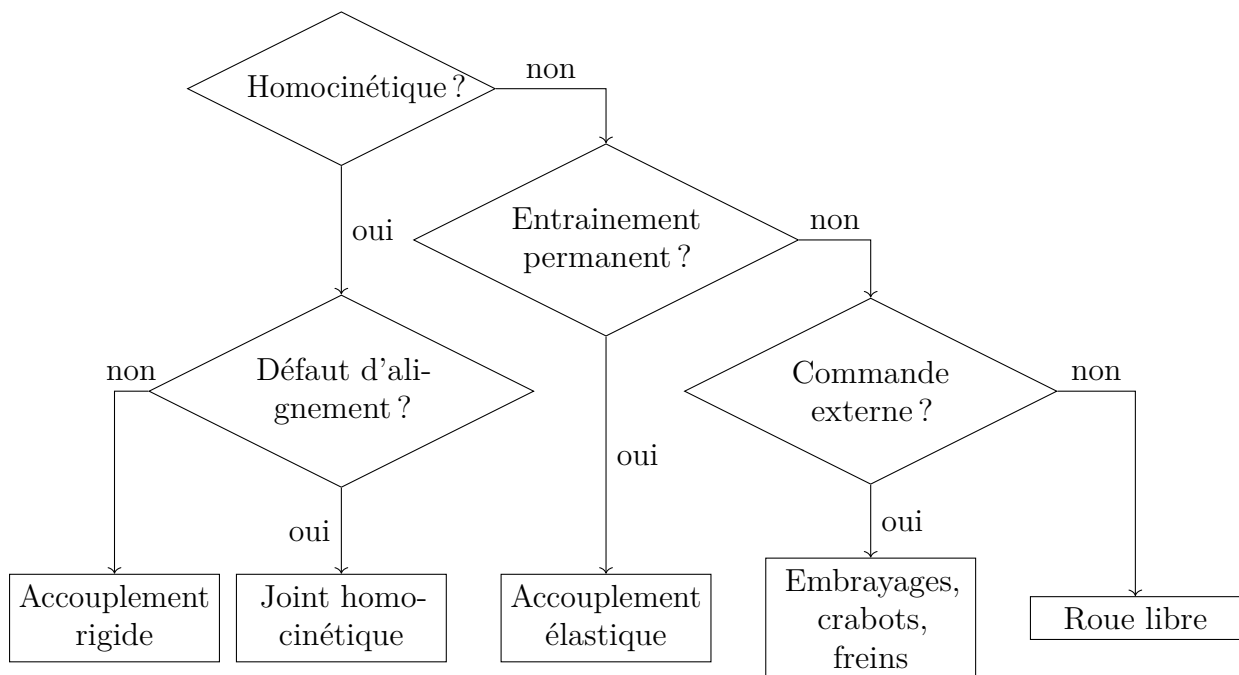


FIGURE 43 – Choix des accouplements.

Tous les accouplements ne sont pas homocinétiques, ni même permanents (figure 43) et on distingue :

- les accouplements élastiques qui permettent de compenser par déformations élastiques de pièces intermédiaires (souvent en élastomère) des mésalignements axiaux, radiaux ou angulaires ;
- les embrayages, crabots ou freins : ce sont des accouplements temporaires qui peuvent être désactivés par une commande extérieure (l’embrayage ou le frein à tambour par exemple) ;
- les roues libres : ce sont des accouplements qui ne permettent une transmission de puissance que dans un seul sens, l’application typique est l’entraînement de la roue arrière d’un vélo.

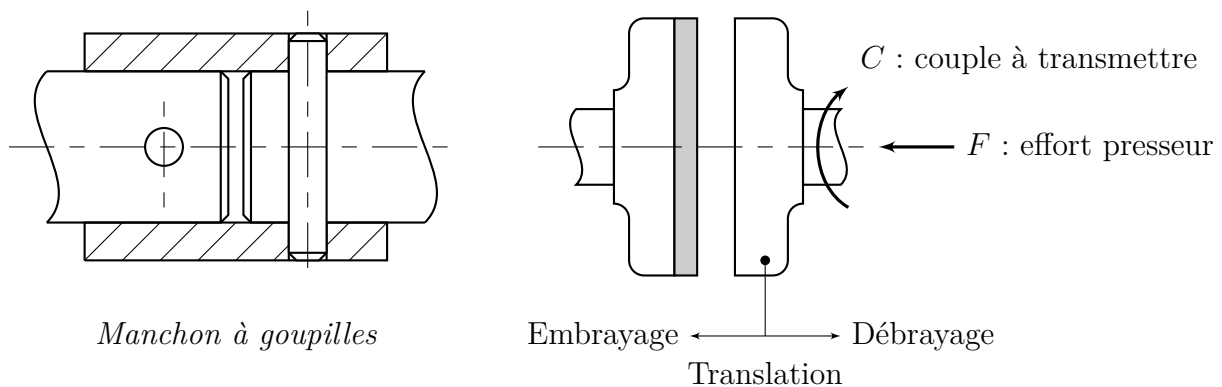


FIGURE 45 – Exemples d’accouplement rigide et d’embrayage.



## 3.2 Transformateurs de mouvement

La fonction du transformateur de mouvement à la sortie du moteur est la même que celle de l'adaptateur à un détail prêt. En effet, le transformateur de mouvement ne fournit pas une simple réduction de la vitesse de sortie de l'actionneur, mais une modification du mouvement complet. Il existe plusieurs systèmes permettant cette modification, les plus utilisés sont présentés par la suite.

### 3.2.1 Mécanisme bielle/manivelle

Ce mécanisme est destiné à transformer un mouvement de translation rectiligne alternative en un mouvement de rotation continue (machine à vapeur, moteur à combustion interne) ou inversement (pompe à piston, étau-limeur, scie alternative). Dans le système bielle-manivelle, l'une des extrémités de la bielle, appelée tête de bielle, est articulée sur l'excentrique d'une manivelle ou sur un maneton de vilebrequin, qui, en tournant, induit un mouvement de rotation. L'autre extrémité, appelée pied de bielle, dont la trajectoire par rapport au bâti est un segment de droite, est articulée sur une crosse, qui se déplace entre deux glissières, ou sur l'axe d'un piston, ce dernier assurant lui-même le guidage du mouvement. La figure 46 représente les différents composants.

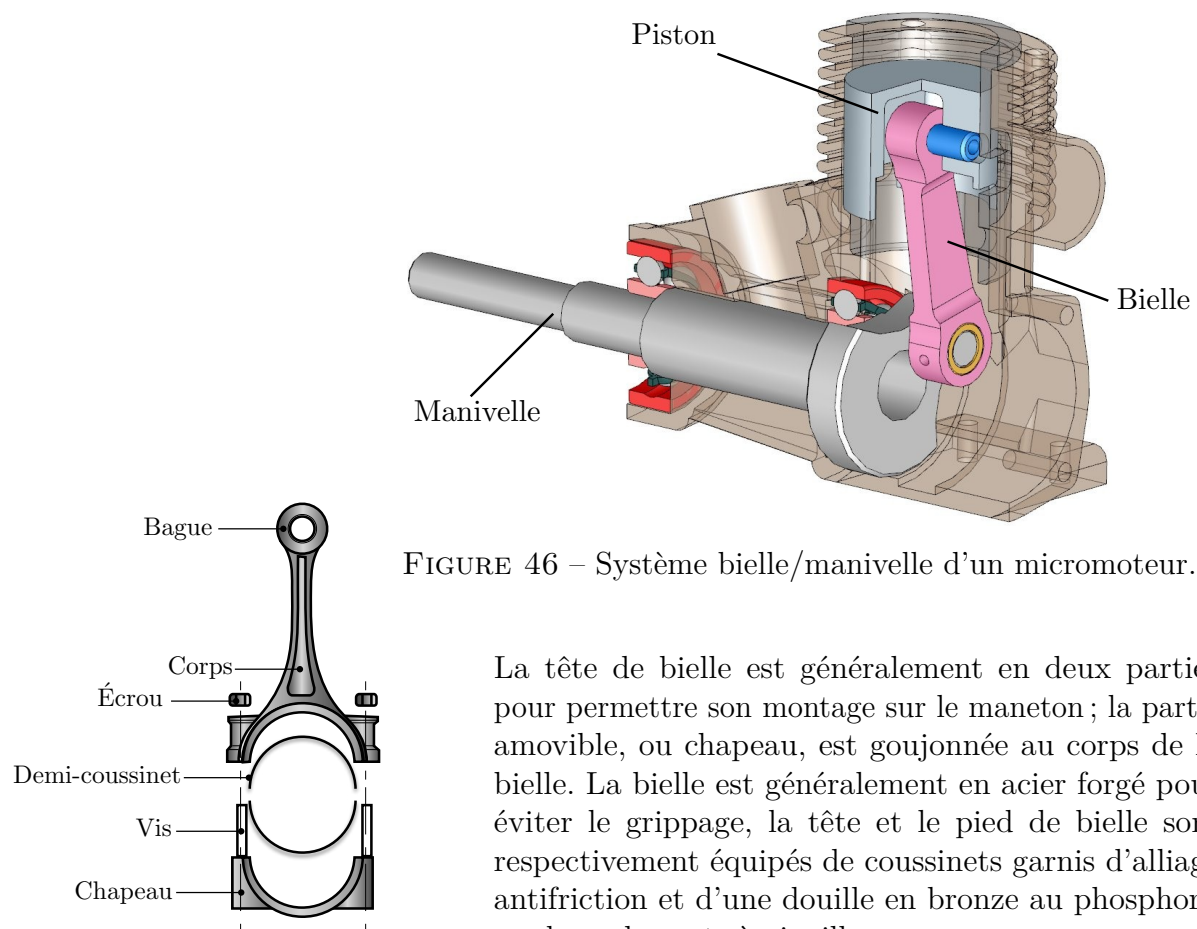
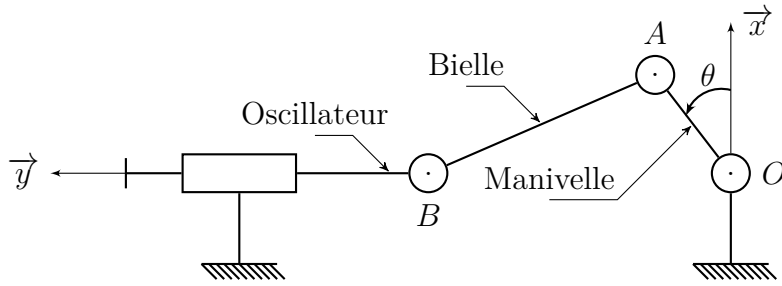


FIGURE 46 – Système bielle/manivelle d'un micromoteur.

La tête de bielle est généralement en deux parties pour permettre son montage sur le maneton ; la partie amovible, ou chapeau, est goujonnée au corps de la bielle. La bielle est généralement en acier forgé pour éviter le grippage, la tête et le pied de bielle sont respectivement équipés de coussinets garnis d'alliage antifriction et d'une douille en bronze au phosphore, ou de roulements à aiguilles.





Pour cette configuration du mécanisme bielle-manivelle, le point  $B$  est sur l'axe  $(O, \vec{y})$ . On peut repérer la position du mécanisme par la position angulaire  $\theta(t)$  de la manivelle. La position de  $B$  est alors définie par sa hauteur :

$$h(t) = \overrightarrow{OB} \cdot \vec{y} = (\overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AB}) \cdot \vec{y} = R \sin(\theta) + \sqrt{(L^2 - R^2 \cos^2(\theta))}$$

avec  $R = \|\overrightarrow{OA}\|$  l'excentration et  $L = \|\overrightarrow{AB}\|$  la longueur de la bielle. Afin de vérifier la cohérence du résultat obtenu, il est possible de vérifier les positions extrêmes :

- pour  $\theta = \pi/2$  :  $h = R + L$  : c'est la position la plus haute de  $B$ , appelée point mort haut parce que sa vitesse s'annule pour changer de signe ;
- pour  $\theta = 3\pi/2$  :  $h = L - R$  : par opposition il s'agit du point mort bas.

La distance séparant les deux points morts et valant  $c = 2R$  est appelée course du piston.

#### Avantages

- ce mécanisme peut fonctionner à grande vitesse.

#### Inconvénients

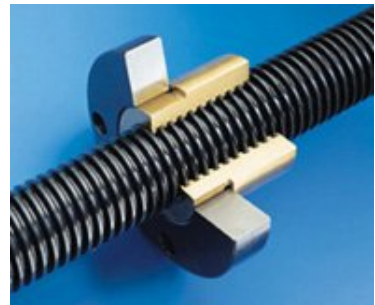
- présence de beaucoup de frottement dû aux nombreuses articulations de ce système ;
- besoin de beaucoup de lubrification.

### 3.2.2 Mécanisme vis/écrou

L'association vis-écrou est un système répandu pour déplacer des charges. Cela utilise le mouvement axial d'un écrou associé au mouvement rotatif d'une vis. Le déplacement linéaire suivant l'axe  $x$  et lié au déplacement angulaire  $\theta$  par la relation :

$$x(t) = \frac{p}{2\pi} \theta(t) \implies \dot{x}(t) = \frac{p}{2\pi} \dot{\theta}(t)$$

avec  $p$  le pas de la vis en mm (implicitement par tour).



#### Avantages

- application de forces et de pressions transmissibles importantes ;
- possibilité d'une exigence importante sur l'ajustement ;
- une fabrication facile et de faible coût ;
- un grand choix de matériaux.

## Inconvénients

- soumis à beaucoup de frottement.
- fragilité pouvant entraîner des problèmes de guidage ;
- fonctionnement lent à moins d’avoir un pas de vis important ;
- rendement moyen à faible sans éléments roulants.

Le système est réversible lorsque l’écrou peut entraîner en rotation la vis. Si le système est à filetage triangulaire ou trapézoïdal, alors la réversibilité du système dépend de l’angle d’hélice de la vis  $\beta$  ainsi que du coefficient de frottement entre l’écrou et la vis  $f = \tan \phi$  où  $\phi$  est l’angle de frottement. Le système est réversible à la condition que  $\beta > \phi$ . Le rôle du frottement est important et de nombreux moyens sont mis en place pour minimiser ses effets. L’exemple fourni en figure 47 est un système vis-écrou à billes qui est, du coup, forcément réversible.

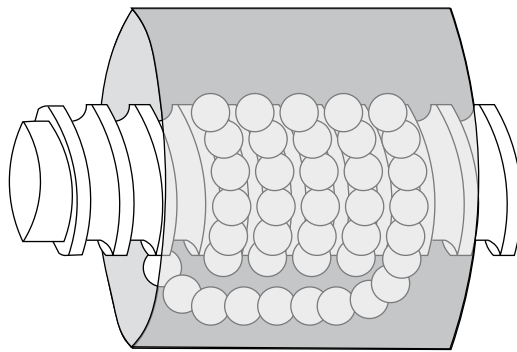


FIGURE 47 – Modélisation d’un montage vis-écrou à billes.

### 3.2.3 Mécanisme pignon/crémaillère

Le système à pignon et crémaillère transforme le mouvement de rotation d’une roue dentée appelée « pignon » en un mouvement de translation d’une tige dentée appelée « crémaillère », ou vice versa. Lorsque le pignon tourne, ses dents s’engrènent avec les dents de la crémaillère et entraînent cette dernière dans un mouvement de translation. À l’inverse, si l’on fait bouger la crémaillère, les dents de la crémaillère s’engrèneront dans les dents du pignon induisent alors un mouvement de rotation. Il s’agit donc d’un système réversible.



## Avantages

- aucun glissement lors de la transformation de ce mouvement ;
- l’action mécanique de ce système est relativement grande.

## Inconvénients

- les engrenages qui sont utilisés imposent souvent une lubrification importante ;
- nécessité d’un ajustement précis à cause des dents entre la roue et la crémaillère ;

- beaucoup d'usure ;
- le mouvement généré n'est pas cyclique, c'est un mouvement fini (on doit s'arrêter lorsqu'on est rendu au bout de la crémaillère, comme tout mouvement linéaire).

### 3.2.4 Mécanisme à came ou excentrique

Un mécanisme à cames est constitué d'un élément moteur, qui comporte un profil formé par une suite de courbes se raccordant le plus souvent tangentielllement, appelé came, et un élément entraîné par le premier suivant une loi déterminée, appelé suiveur. Le système de came et tige-poussoir (aussi appelée tige guidée) permet de transformer le mouvement de rotation (il peut également être de translation) de la came en un mouvement de translation alternatif (de va-et-vient) de la tige-poussoir.

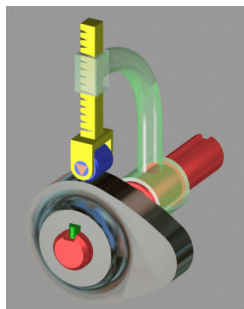


FIGURE 48 – Système à came.

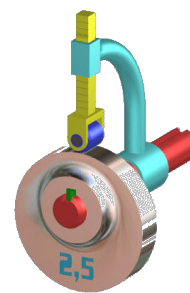
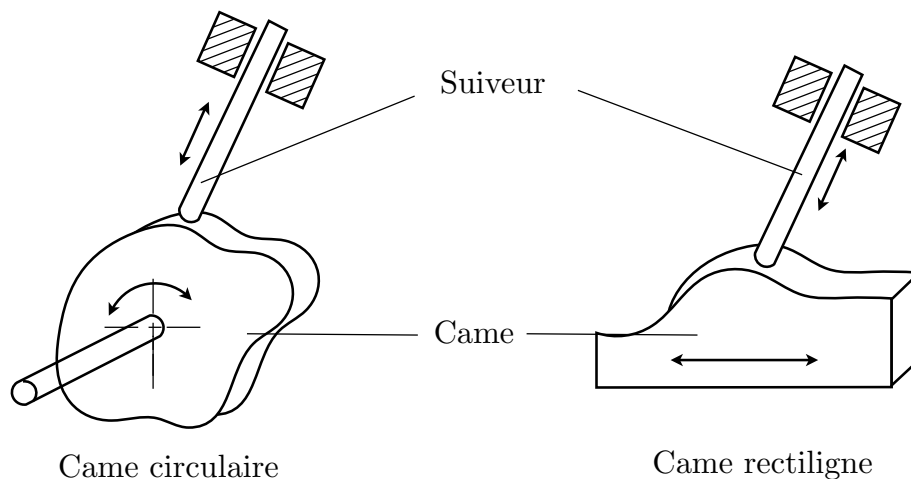


FIGURE 49 – Système à excentrique.

La came peut être tournante autour d'un axe, elle est dite circulaire (c'est le cas le plus fréquent). Elle peut être animée d'une translation, la nature du mouvement est alors dite rectiligne (comme illustré sur la figure ci-dessous). Le profil de la came détermine le mouvement du suiveur, il s'agit de l'organe principal.



#### Avantages

- aucun glissement (le mouvement est transmis idéalement entre les éléments), le rapport de vitesse est constant ;
- possibilité d'avoir une réduction importante de la vitesse ;

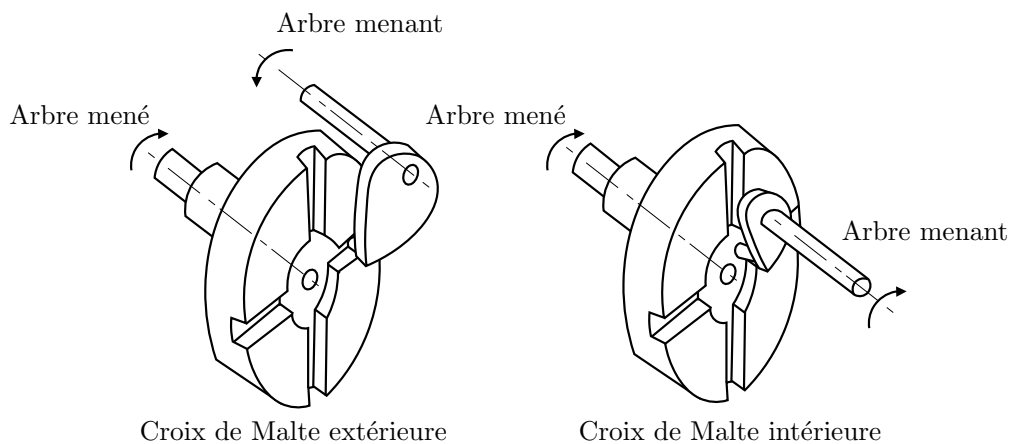
- pas de desserrage lorsqu'on relâche la vis sans fin ;
- permet des ajustements précis.

### Inconvénients

- les pièces s'usent rapidement à cause de la présence de frottement et elles nécessitent donc un besoin constant de lubrification ;
- le risque de vibrations importantes est présent si la came tourne à grande vitesse.

### 3.2.5 Mécanisme à croix de Malte

Les mécanismes à croix de Malte sont des mécanismes où la partie menée est un plateau muni de rainures radiales et la partie menante est un maneton qui s'engage ou se dégage suivant une direction normale à chacune de ces rainures. Il s'ensuit que la vitesse de la partie menée varie progressivement sans aucune discontinuité. Généralement, le plateau possède un nombre entier de rainures également espacées et le maneton possède un galet entraîneur permettant de limiter le glissement. La transformation obtenue concerne le passage d'une rotation continue à une rotation alternative.



Il est notamment utilisé pour le cinéma argentique (non numérique) dans les caméras et projecteurs pour l'avance de la pellicule : la pellicule qui doit s'arrêter à chaque image devant l'obturateur (prise de vue) ou devant la lampe (projection).

### Avantages

- l'avantage de ce système est la projectivité du mouvement de rotation qui atteint doucement, la vitesse maximum de rotation, au milieu du temps de rotation et ensuite il y a ralentissement jusqu'à l'arrêt. Ceci a pour effet de limiter la traction exercée sur le film au démarrage de chaque image.

### Inconvénients

- le rapport entre le temps d'entrée et le temps de sortie est fixé mécaniquement et non réglable ;
- la loi de commande est fixée par la géométrie.

## 4 Acquérir (capteurs & détecteurs)



### 4.1 Mesure d'une grandeur physique

La mesure est une représentation quantifiée d'une grandeur physique. On définit la terminologie suivante :

**Mesurande** : grandeur physique (pression, vitesse, température, etc.) soumise à mesurage ;

**Mesurage** : toutes les opérations permettant l'obtention de la valeur numérique d'une grandeur physique (mesurande) ;

**Mesure** : valeur numérique représentant au mieux la mesurande et associée à une unité (6 Mpa, 20 °C, 2 m/s, ...)



#### Remarque 4.1

Par abus de langage, on confond souvent mesurage (action) et mesure (résultat de l'action).

Les grandeurs qui nous intéressent sont celles qui interviennent dans le domaine de la mécanique physique, à savoir principalement : déplacement, allongement, vitesse, débit, accélération, force, pression, contrainte, température. Les techniques de mesurage font appel à des méthodes très variées et font intervenir différents types de phénomènes physiques.

Grandeur physique soumise à mesurage	unités
Longueur, épaisseur	m
Position, niveau	m
Déplacement	m
Temps	s
Vitesse linéaire	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Vitesse angulaire	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
Force	N
Couple	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
Vibration, Accélération	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Allongement relatif	[-]
Pression	MPa

TABLE 3 – Mesurandes et unités associées.

### 4.1.1 Structure fonctionnelle de la chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition est intégrée dans des systèmes qui nécessitent le pilotage d'une grandeur physique. Elle permet de transformer une grandeur à mesurer en un signal électrique exploitable.

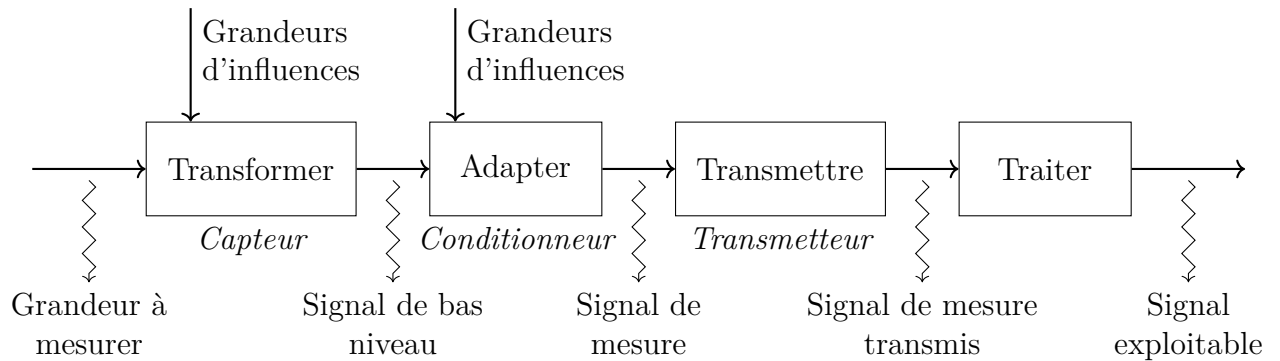


FIGURE 50 – Structure de la chaîne d'acquisition.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons uniquement aux capteurs et aux éventuels conditionneurs. Néanmoins, le choix d'un capteur se fait en fonction de l'environnement dans lequel il se trouve (voir l'influence en figure 50).

### 4.1.2 Capteurs

La fonction d'un capteur est de délivrer un signal électrique de sortie  $s$  qui est fonction de la mesurande  $m$ . Le capteur nous donne la relation  $s = f(m)$ . Dans le domaine nominal d'emploi, on va définir les caractéristiques métrologiques suivantes :

- étendue de mesure ;
- plage d'utilisation ;
- domaine de linéarité ;
- sensibilité statique et dynamique ;
- résolution et précision ;
- rapidité et temps de réponse ;
- hystérésis, répétabilité ;
- étalonnage ;
- ...

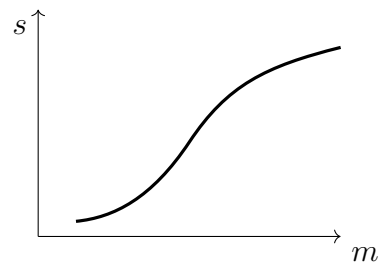


FIGURE 51 – Exemple de caractéristique d'un capteur.

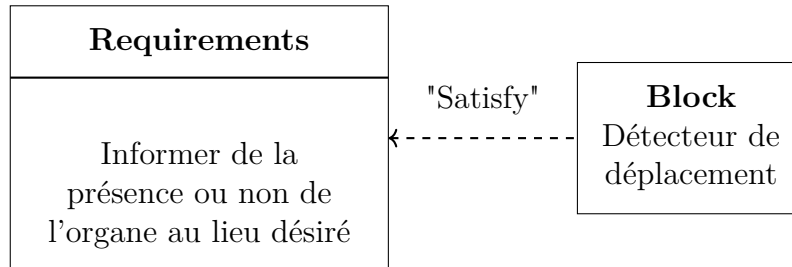
## 4.2 Détecteur de présence ou de proximité

Les détecteurs font partie de la famille des capteurs. Leur fonction est de détecter la présence d'un objet, l'information en sortie d'un détecteur est donc de type binaire. Voici quelques exemples d'utilisation courants :

- la détection de la position des palettes porte pièces ;
- la détection de la présence ou de l'absence des composants de base au niveau des postes de travail ;

- la détection de la présence de colis.

Ce sont des capteurs de type tout ou rien (TOR), c'est-à-dire qu'ils n'ont pas pour fonction de mesurer, mais uniquement de détecter des événements.

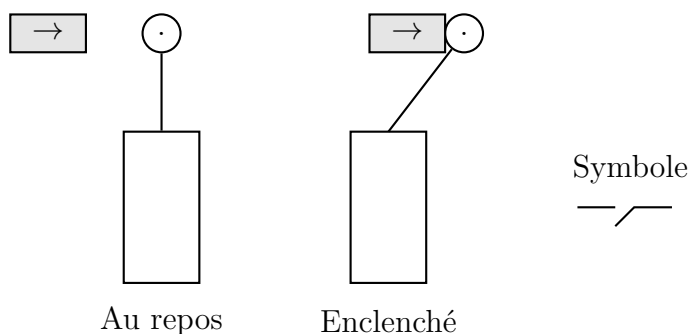


#### 4.2.1 Les détecteurs électromécaniques

Les interrupteurs de position sont présents dans toutes les installations automatisées ainsi que dans des applications variées en raison de nombreux avantages inhérents à leur technologie. Ils transmettent au système de traitement les informations de :

- présence/absence ;
- passage ;
- positionnement ;
- fin de course.

Vous avez pu en voir un certain nombre sur le TP capsuleuse de bocaux. Ils étaient placés à chaque fin de course des tiges de vérins. Il s'agit de contacteurs délivrant un signal électrique lorsque la tige du vérin est dans la position extrême : rentrée ou sortie.



#### Avantages

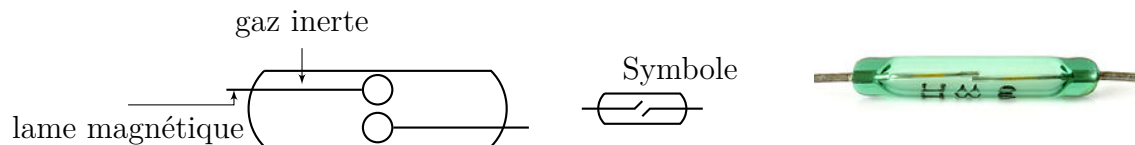
- simples à installer ;
- très peu chers ;
- une grande résistance aux diverses ambiances industrielles (essais normalisés et spécifiques en laboratoire) ;
- une bonne fidélité, jusqu'à 0,01 mm sur les points d'enclenchements.

#### Inconvénients

- durée de vie relativement courte, car il y a toujours contact entre la pièce dont on souhaite avoir les positions extrêmes et le contacteur.

#### 4.2.2 Interrupteurs à lame souple (ILS)

Un interrupteur de position à lame souple permet de détecter sans contact tous les matériaux magnétiques. Il est constitué d'un boîtier à l'intérieur duquel est placé un contact électrique métallique souple. Lorsque le champ magnétique est dirigé sur la face sensible du capteur, le contact souple se ferme et permet la transmission d'une information électrique vers la partie commande. Les I.L.S. sont souvent montés sur le corps des vérins pneumatiques afin de contrôler les déplacements du piston sur lequel est monté un aimant permanent. Vous avez rencontré ce type de capteur sur le trieur de pellicules, au niveau de chaque vérin.



##### Avantages

- bonne précision ;
- détection sans contact ;
- fiabilité du système.

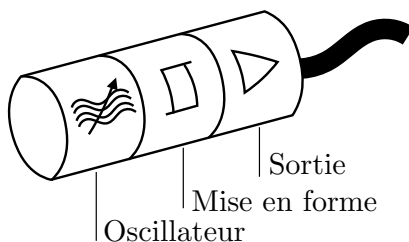
##### Inconvénients

- détection de matériaux magnétique uniquement ;
- portée faible (quelques mm).

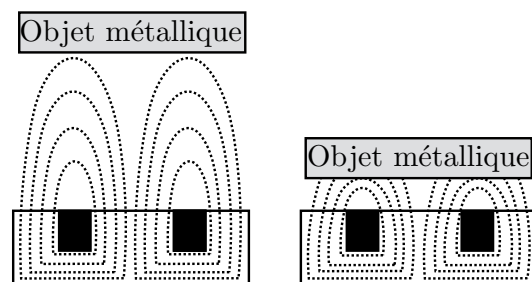
#### 4.2.3 Détecteurs de proximité inductifs ou magnétiques

Les détecteurs de proximité sont caractérisés par l'absence de liaison mécanique entre le dispositif de mesure et l'objet en déplacement. La technologie des détecteurs de proximité inductifs est basée sur la variation d'un champ magnétique à l'approche d'un objet conducteur du courant électrique : lorsqu'un écran métallique est placé dans le champ magnétique du détecteur, des courants induits constituent une charge additionnelle qui provoque l'arrêt des oscillations. Ils sont utilisés pour la détection d'objets métalliques.

##### Constitution de ces capteurs



##### Fonctionnement



Détection d'un objet métallique

##### Avantages

- pas de contact physique avec l'objet donc pas d'usure ;
- possibilité de détecter des objets fragiles ;
- détecteur statique, pas de pièces en mouvement ;
- durée de vie indépendante du nombre de manœuvres.

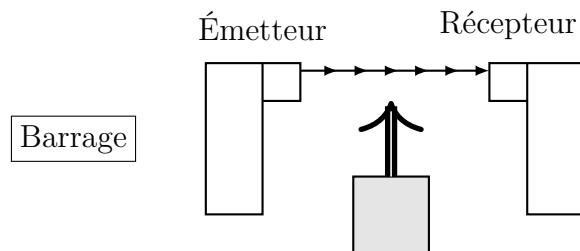
##### Inconvénient

- ils sont assez chers.

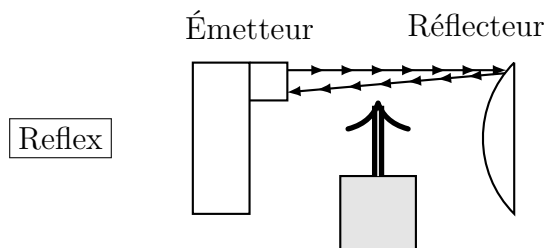


#### 4.2.4 Détecteurs de proximité à commande optoélectronique (ou photo-électrique)

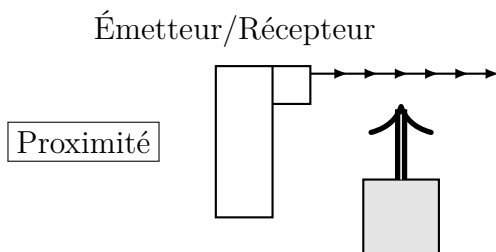
Les détecteurs photo-électriques portent aussi le nom de barrières lumineuses, ils sont de technologie électronique et délivrent une information binaire ( 0 ou 1 ) chaque fois que le faisceau issu de la partie émettrice est interrompu par un obstacle quelconque occultant la partie réceptrice (provoquant un changement d'état de la sortie).



1. Le capteur est constitué d'un émetteur et d'un récepteur. Lorsque l'objet à détecter coupe le faisceau, le récepteur en l'absence de faisceau lumineux commute la sortie. Ce détecteur possède une grande portée mais est limité aux objets opaques.



2. Le capteur est constitué d'un émetteur et d'un récepteur placés dans le même boîtier. Le faisceau est réfléchi par un réflecteur. Lorsque l'objet à détecter coupe le faisceau, le récepteur en l'absence de faisceau lumineux commute la sortie. Ce détecteur détecte principalement les objets mats.



3. Le capteur est constitué d'un émetteur et d'un récepteur placés dans le même boîtier. Le faisceau est réfléchi par l'objet à détecter. Lorsque l'objet a réfléchi le faisceau, le récepteur en présence du faisceau lumineux commute la sortie. Ce détecteur détecte les pièces brillantes.

##### Avantages

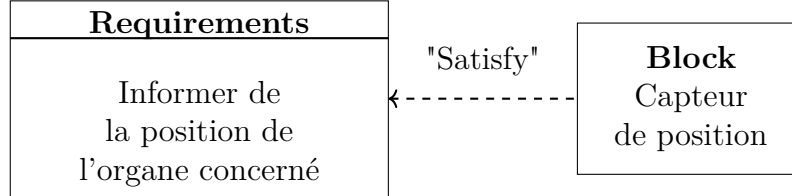
- pas de contact physique avec l'objet détecté donc pas d'usure ;
- possibilité de détecter des objets fragiles, fraîchement peints ;
- détecteur statique, pas de pièces en mouvement ;
- durée de vie indépendante du nombre de manœuvres.

##### Inconvénient

- sensibles à la poussière et aux perturbations.

### 4.3 Mesure de position analogique

Une position peut être une longueur (cas d'une translation) ou un angle (cas d'une rotation) et être relative (mesure d'un déplacement) ou absolue (position par rapport à une origine). Le signal en sortie de capteur peut être analogique ou numérique.



Deux grands critères sont utiles pour juger de la qualité d'un capteur de position :

- sa résolution : c'est la plus petite valeur mesurable ;
- son étendue de mesure : elle est définie par les valeurs extrêmes mesurables par le capteur.

Seules quelques technologies courantes sont présentées ci-dessous.

Bien que la place des capteurs numériques dans les systèmes asservis soit considérable maintenant, les capteurs de déplacement analogiques trouvent encore leur place dans bon nombre d'applications, en raison de leur qualité et de leur facilité d'intégration. Le principe de la mesure consiste à mesurer une grandeur physique (souvent d'origine électrique), qui varie en même temps que la grandeur à mesurer appelée mesurande.

#### 4.3.1 Capteurs potentiométriques

Un capteur potentiométrique ou potentiomètre est une résistance équipée d'un pointeur mobile glissant sur la piste résistive. Lorsque la résistance est alimentée de part et d'autre, la tension mesurée au niveau du pointeur donne une image relative de la position du pointeur. L'ensemble forme un pont diviseur de tension.

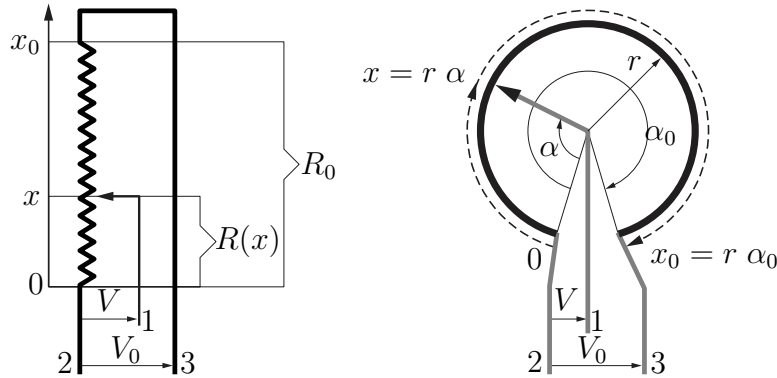


FIGURE 52 – Potentiomètres résistifs linéaire et angulaire.

La résistance  $R$  [ $\Omega$ ] d'un conducteur est fonction de sa longueur  $\ell$  [m], de sa section  $S$  [ $\text{m}^2$ ] et de sa résistivité  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ ] :

$$R = \frac{\rho \ell}{S}$$

Le déplacement, linéaire  $x$  (en m) ou angulaire  $\alpha$  (en rad), d'un curseur mobile sur une piste résistive fixe de résistance  $R_0$  fournit un signal de sortie du pont diviseur  $V$  directement proportionnel à la position du curseur. Selon la forme géométrique de la résistance et donc du mouvement du curseur, on distingue (figure 52) :

— le potentiomètre linéaire :

$$R(x) = \frac{x}{x_0} R_0 \quad \text{et} \quad \frac{V}{V_0} = \frac{x}{x_0}$$

— le potentiomètre circulaire :

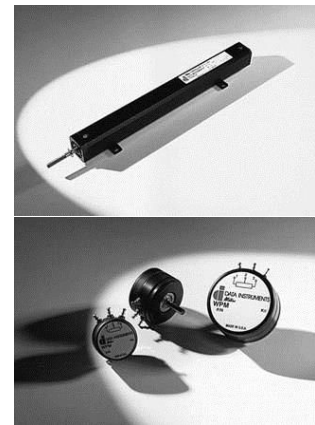
$$R(\alpha) = \frac{\alpha}{\alpha_0} R_0 \quad \text{et} \quad \frac{V}{V_0} = \frac{\alpha}{\alpha_0}$$

La résistance est constituée par une piste conductrice en résine chargée de grains conducteurs (carbone, métal, ...) ou un fil bobiné isolé (sauf au contact avec le curseur). Les ordres de grandeur de  $R_0$  vont de 1 k $\Omega$  à 1 M $\Omega$ . La résistance du curseur doit être faible et stable (mouvement, usure) et la résistance de contact doit présenter les mêmes qualités (ce qui est difficile à assurer pour une piste).

### Étendue de la mesure

Pour les potentiomètres linéaires, l'étendue de mesure est la longueur de la piste.

Pour les potentiomètres angulaires, que vous avez pu rencontrer sur la plate forme 6 axes, le bras MAXPID ou le toit de 206CC, l'étendue de mesure est légèrement inférieure à un tour. Ces potentiomètres angulaires (ou rotatifs) sont donc monotour.



### Avantages

- simplicité de fonctionnement et d'exploitation du signal électrique en sortie ;
- bonne précision et résolution ;
- peu chers.

### Inconvénients

- bruit dans le signal engendré par le frottement du curseur sur la piste ;
- usure, car le frottement mécanique entre le curseur et la piste détériore les éléments en contact ;
- durée de vie limitée.

### Remarque 4.2

Dans un système technique, les moteurs sont principalement des moteurs électriques rotatifs. La mesure d'un angle de rotation est donc très fréquente et utilise donc tout naturellement le capteur rotatif. Le capteur rotatif peut être placé directement au niveau

de la grandeur à mesurer, c'est le cas pour MAXPID où le potentiomètre donne la position angulaire du bras ou pour le groupe de direction du chariot filoguidé. En effet, le potentiomètre est placé directement au niveau de l'arbre de sortie du réducteur, qui est l'arbre du groupe de direction. Cette prise de mesure assure une bonne précision, car elle est située directement au niveau de l'élément dont on souhaite avoir la position angulaire. Pour la plateforme 6 axes, le potentiomètre, appelé « potentiomètre de recopie », trouve sa place après un système de transformation de mouvement : le système roue et vis sans fin. Ce système est nécessaire afin que le potentiomètre ne fasse pas plus d'un tour pour toute la course de la tige du vérin. Il a pourtant pour objectif de mesurer la position de la tige du vérin : ainsi, dans ce cas, la mesure ne s'opère pas directement au niveau de l'élément concerné. On connaît cependant la chaîne cinématique liant la longueur de la tige du vérin à la rotation du potentiomètre. Ainsi, à partir de la mesure du potentiomètre, on peut déduire la valeur de la longueur de la tige du vérin, aux jeux prêts et en faisant une hypothèse de jeu nul. Pour un souci de précision, il est donc plus judicieux, lorsque cela est possible, de mesurer la grandeur physique *via* un capteur au niveau de l'élément concerné. On s'affranchit par là de la chaîne cinématique qui peut comporter des jeux et conduire à des erreurs dans la mesure.

#### 4.3.2 Capteurs de déplacement capacitifs

Un capteur de déplacement capacitif est une famille de capteurs utilisant l'effet capacitif pour détecter une variation de faibles distances. Ils sont généralement réalisés avec une électrode plane, en forme de disque, entourée d'un anneau de garde isolé de l'électrode centrale. L'électrode forme avec la pièce à mesurer (conductrice) un condensateur plan. On le trouve également sous la forme de deux peignes imbriqués, ce qui augmente la surface capacitive lorsqu'un capteur peu épais est nécessaire.

Pour faire varier la capacité du condensateur en fonction du déplacement, on fait varier soit la surface en regard, soit l'épaisseur  $e$ . La mesure de la capacité requiert une tension alternative. L'impédance du condensateur est alors, à fréquence fixe, fonction uniquement de sa capacité :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_s \frac{S}{e}$$

avec :

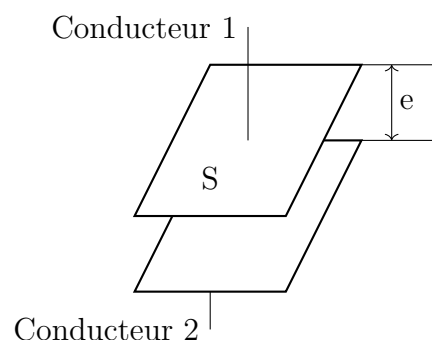
- $\epsilon_0$  : la permittivité du vide ;
- $\epsilon_s$  : la permittivité relative de l'isolant ;
- $S$  : la surface en regard des armatures ;
- $e$  : l'épaisseur de l'isolant.

##### Avantages

- grande sensibilité ;
- bonne résolution.

##### Inconvénients

- faible étendue de mesure ( $< 1$  cm) ;
- traitement du signal relativement complexe.



## 4.4 Mesure de position numérique

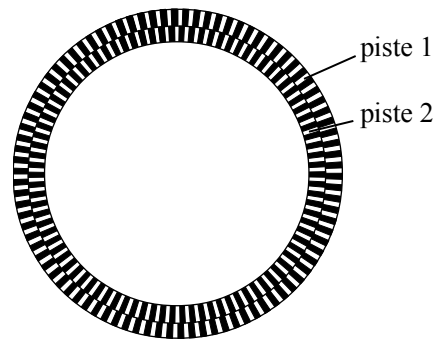
Ces capteurs fournissent directement, sous forme numérique (codée), la mesure d'une position. On place la plupart du temps ces capteurs rotatifs au niveau des moteurs, on doit donc tenir compte du problème des différents jeux dans la chaîne cinématique.

### 4.4.1 Codeurs incrémentaux

Un capteur ou codeur incrémental est constitué d'un disque comportant 1 ou 2 voies, avec ou non un index. Le disque est lié à l'arbre tournant dont on souhaite avoir la position. D'un côté du disque se trouvent des diodes électroluminescentes et de l'autre, des phototransistors, ces constituants étant fixes. On a un couple de diode et phototransistor par voie.

Chaque voie du disque, excepté l'index, possède des zones alternativement opaques et transparentes.

Ces codeurs incrémentaux utilisent donc l'opto-électronique. Le signal émis par le phototransistor, après un traitement électronique, est un signal carré de type TTL (train d'impulsions plus ou moins espacées dans le temps). Un codeur incrémental comporte au moins une piste ou voie A, avec un index ou non (piste intérieure). L'index permet de compter le nombre de tours.



L'expression de la fonction de transfert pour 2 voies représentant le comptage (ou décomptage) de toutes les transitions des signaux  $A$  et  $B$  donne pour résultat une image numérique du déplacement angulaire. Celle-ci est définie ci-dessous pour différentes unités :

$$K_{\text{codeur}} = 4n \text{ inc} \cdot \text{tour}^{-1} = \frac{4n}{360} \text{ inc} \cdot \text{deg}^{-1} = \frac{4n}{2\pi} \text{ inc} \cdot \text{rad}^{-1}$$

avec  $n$  le nombre de fentes sur le disque codeur.

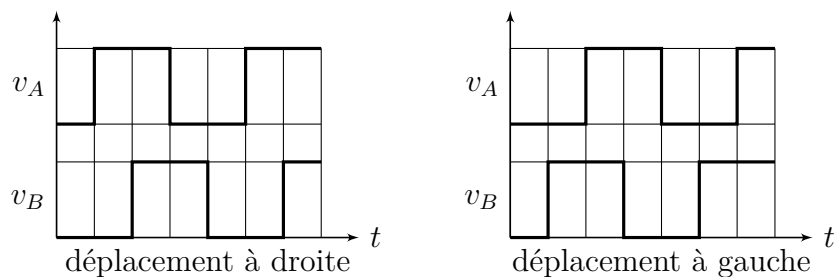
**Caractéristique :** la résolution, donc en grande partie sa précision et sa qualité, est liée au nombre de fentes.

**Étendue de mesure :** elle est a priori infinie.

**Détection du sens de rotation :** le codeur incrémental est un capteur relatif (on ne connaît pas le sens de rotation ni l'origine). La détection du sens de rotation peut néanmoins avoir à faire à une deuxième voie, décalée d'un quart de période par rapport à la première voie. L'évolution des deux signaux est alors différente dans un sens par rapport à l'autre.

Le déphasage des signaux  $A$  et  $B$  permet de déterminer le sens de rotation :

- dans un sens pendant le front montant du signal  $A$ , le signal  $B$  est à 0 ;
- dans l'autre sens pendant le front montant du signal  $A$ , le signal  $B$  est à 1.

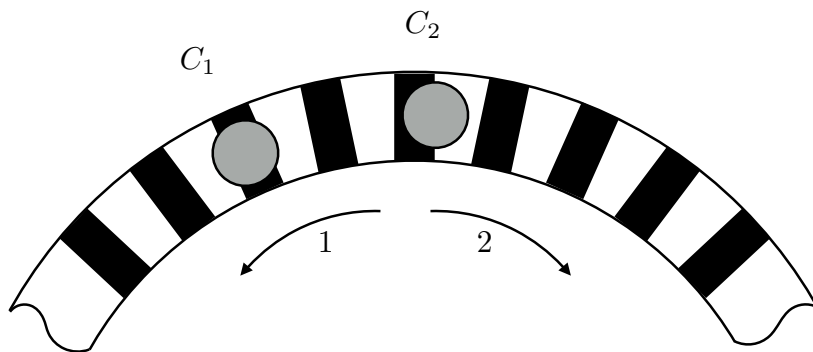


**Prise d'origine :** l'initialisation d'un capteur incrémental est une prise d'origine. Sa nécessité provient du fait que le capteur est relatif. Elle consiste en un déplacement du système vers un capteur tout ou rien, appelé capteur d'origine, qui matérialise l'origine machine.

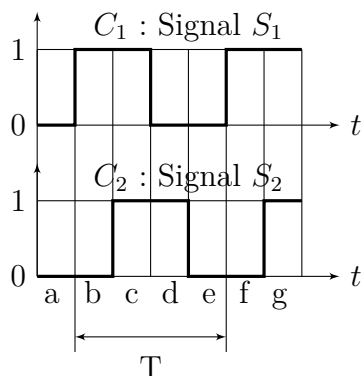
Elle est indispensable à chaque remise sous tension du système : c'est le cas pour le robot ERICC3. Elle peut être supprimée si on utilise des codeurs absolus, plus chers.

#### Exemple 4.1

Le codeur incrémental dont le fonctionnement est décrit ci-dessous est constitué de deux voies et permet de mesurer  $500 \text{ pts} \cdot \text{tr}^{-1}$ . Le schéma représente partiellement le disque du capteur incrémental et les deux cellules photoélectriques  $C_1$  et  $C_2$ . Ce disque comporte une piste où alternent des zones opaques (noires sur le schéma) et des zones transparentes (blanches sur le schéma). Les cellules  $C_1$  ou  $C_2$  (en gris sur le schéma) renvoient un signal 1 ou 0 selon qu'elles se trouvent respectivement en face d'une zone transparente ou d'une zone opaque. Les deux cellules  $C_1$  et  $C_2$  sont placées de telle manière que les signaux qu'elles délivrent sont décalés d'un quart de période.



Pour un couple de zones, il y a quatre combinaisons possibles pour  $S_1$  et  $S_2$ . Pour que le capteur soit capable de reconnaître 500 positions différentes, il faut donc 125 couples de zones.



Zone	$S_1$	$S_2$
a	0	0
b	1	0
c	1	1
d	0	1
e	0	0
f	1	0
g	1	1

#### 4.4.2 Codeurs absolus

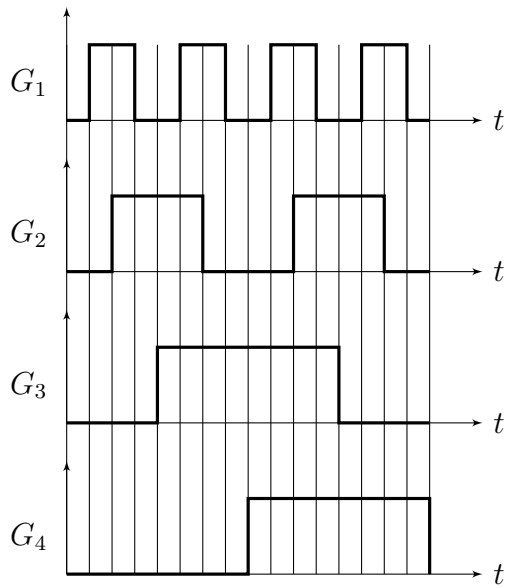
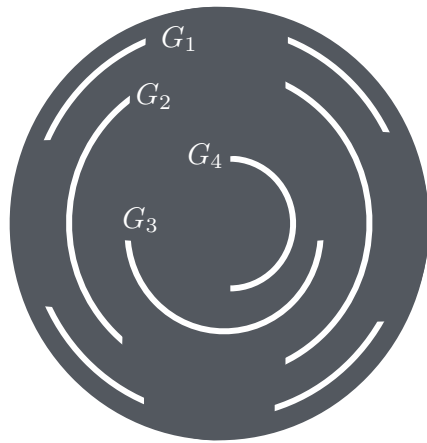
Un codeur optique absolu fonctionne de la même manière qu'un codeur incrémental sauf que cette fois, le signal émis n'est pas un train d'impulsions, mais un véritable code numérique sur 4, 8, 9, 12 ou même 16 bits. Ceci n'est pas réalisé par un ou deux couples de diodes et phototransistors, mais par un couple par piste, avec un nombre de pistes égal au nombre de bits. Le disque comporte donc plusieurs pistes :

- la première piste en partant du centre du disque est composée d'une moitié opaque et d'une moitié transparente, la lecture de cette piste permet de déterminer dans quel demi-tour du disque on se situe. C'est la piste MSB (« *Most Significant Bit* ») = bit de poids le plus fort ;
- la piste suivante, en allant vers l'extérieur, est divisée en quatre quarts alternativement opaques et transparents. La lecture de cette piste, combinée avec la lecture de la piste précédente, permet de déterminer dans quel quart de tour du disque on se situe ;
- la piste suivante permet de déterminer dans quel huitième de tour on se situe, la suivante dans lequel seizième de tour on se situe, etc. ;
- la dernière piste, la plus extérieure, est la piste LSB (« *Least Significant Bit* ») = bit de poids le plus faible.

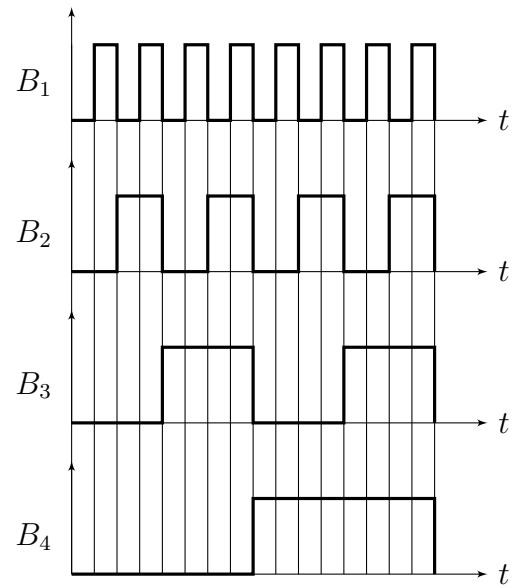
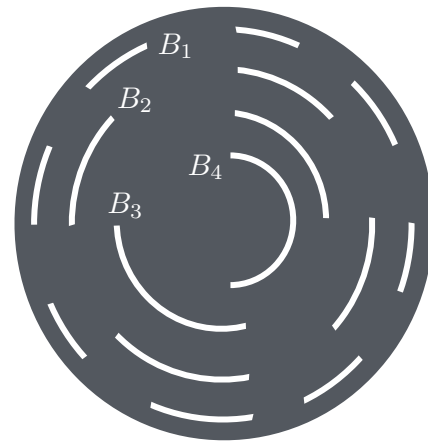
##### Remarque 4.3

Afin de limiter le risque d'erreur, on préfère employer un codage en code GRAY, en ne changeant qu'un bit à la fois.

C'est la dernière piste qui donne la précision finale du codeur appelée résolution. Si on appelle  $N$  le nombre de pistes, cette dernière piste comportera  $2N$  points. Le nombre de positions codées sur un tour du disque sera  $2N$ , on dira alors que le codeur a une résolution de  $2N$  points par tour. Détecter le sens de rotation n'est pas utile puis que le mot binaire émis est la valeur d'un angle compris entre 0 et  $2\pi$ . C'est pour cela qu'on les appelle codeurs semi-absolus. Lorsque le codeur doit mesurer des angles supérieurs à  $2\pi$ , on doit lui adjoindre un compteur qui compte le nombre de tours effectués. Il n'est donc pas toujours nécessaire d'initialiser le capteur.



Disque Gray



Disque binaire pure

## 4.5 Mesure de vitesse

### 4.5.1 Génératrice tachymétrique

Ce sont des moteurs électriques montés « à l'envers ». En effet, les moteurs transforment une tension en rotation d'un rotor. Les moteurs électriques peuvent également fonctionner en générateur (récepteur). On impose une vitesse de rotation au moteur qui va générer une tension. Il existe trois types de moteurs (à courant continu, synchrone et asynchrone). Il existe par conséquent trois types de génératrices tachymétriques :

- les génératrices tachymétriques continues ;
- les génératrices tachymétriques synchrones ;
- les génératrices tachymétriques asynchrones.

Ce capteur délivre donc une information analogique : une tension proportionnelle à la vitesse de rotation mesurée.



## 4.6 Mesure d'effort

### 4.6.1 Capteurs de forces

Un capteur de force est un ensemble qui convertit la force qui lui est appliquée en une déformation ou un déplacement facile à mesurer. Par exemple, le ressort s'allonge sous l'effet d'une force, en mesurant sa flèche on peut connaître la force qui lui est appliquée.

Pour mesurer une force, il faut connaître la relation qui lie la déformation à la force (opération d'étalonnage). Les corps d'épreuve représentent la partie active du capteur. Ils sont étudiés de façon à ce que la force qui leur est appliquée ne provoque pas de déformations permanentes, mais mesurables par jauges d'extensométrie, capteurs de déplacement, etc.

### 4.6.2 Anneaux dynamométriques

L'anneau dynamométrique est conçu pour les mesures de force en compression, en statique et dynamique, et sont tout particulièrement adaptés pour la surveillance des efforts dans les machines en production comme dans l'industrie alimentaire par exemple.

La relation entre l'effort et la variation de longueur est donnée par l'équation :

$$F = k\Delta\ell$$



### 4.6.3 Jauges d'extensométrie

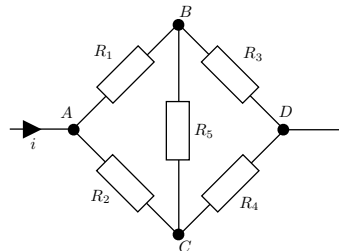
Si l'on tire sur ce fil, celui-ci va s'allonger tandis que sa section va se réduire. La résistance  $R$  va donc augmenter ( $L/S$  augmente). La résistance ohmique du fil conducteur est donnée par la relation suivante :

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

avec :

- $R$  : résistance en ohm ( $\Omega$ ) ;
- $\rho$  : résistivité du métal utilisé pour le fil ( $\Omega.m$ ) ;
- $L$  : longueur du fil (m) ;
- $S$  : section du fil ( $m^2$ ).







Si ce fil est collé sur une surface métallique par l'intermédiaire d'un support isolant, toute déformation de la plaque métallique sera fidèlement transmise au fil.



Pour mesurer la variation de résistance (donc de déformation de la plaque), on utilise un pont de Wheastone. Si l'on réalise un circuit de quatre résistances et si les branches  $ABD$  et  $ACD$  ont la même résistance, la différence de potentiel lue entre  $B$  et  $C$  est nulle. Si une seule résistance varie (cas d'un montage en quart de pont) le pont se déséquilibre et  $U_{BC} \neq 0$ . Ainsi, en mesurant la différence de potentiel entre  $B$  et  $C$  d'un pont dans lequel une résistance au moins est une jauge de déformation, on mesure la variation de résistance du fil, donc la déformation du support ce qui permet d'en déduire la force responsable de celle-ci.

## 5 Communiquer

### 5.1 Éléments de dialogue Homme – machine

IHM/Entrées (Opérateur → PC)	IHM/Sorties (PC → Opérateur)
<i>Dialogue élémentaire</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>— bouton poussoir</li> <li>— bouton tournant</li> <li>— bouton à clef</li> <li>— pédale</li> <li>— manche à positions multiples</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>— voyants colorés fixes et clignotants</li> <li>— gyrophares</li> <li>— avertisseurs sonores</li> </ul> 
<i>Dialogue alphanumérique</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>— roue codeuse</li> <li>— clavier alphanumérique</li> <li>— écran résistif</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>— afficheur 7 segments</li> <li>— écran (LED, LCD, plasma)</li> <li>— imprimante</li> </ul> 
<i>Dialogue analogique</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>— potentiomètre</li> <li>— souris</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>— indicateur à aiguille</li> </ul> 

\* \*

\*