

Architecture des systèmes automatisés

N. Mesnier
Lycée Jean Perrin, Lyon

2024–2025

1 Introduction

- Cas généralisé
- Constituants des systèmes régulés
- Constituants du régulateur

2 Alimenter, distribuer, convertir

- Systèmes électriques
- Systèmes pneumatiques/hydrauliques
- Systèmes thermiques

3 Transmettre

- Adaptateurs de fréquence de rotation
- Transformateurs de mouvement

4 Acquérir

- Mesure d'une grandeur physique
- Structure fonctionnelle de la chaîne d'acquisition
- Capteurs
- Détecteur de présence ou de proximité
- Mesure de position analogique
- Mesure de position numérique
- Mesure de vitesse
- Mesure d'effort

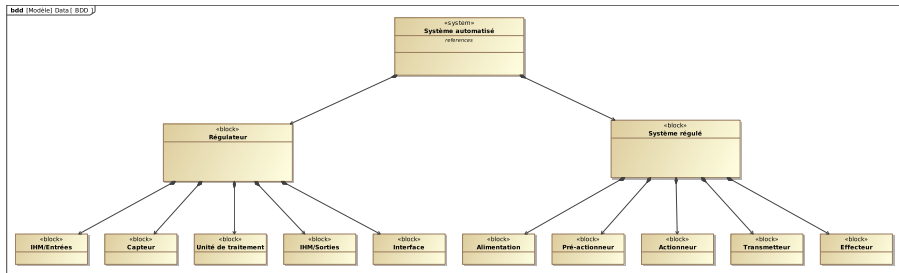
5 Communiquer

- Éléments de dialogue Homme – machine



Introduction

■ Systèmes pluritechniques



Introduction

Les systèmes techniques peuvent être classés selon la nature de leur commande.

Définition (systèmes non mécanisés)

Ce sont les systèmes pour lesquels l'utilisateur contribue à la fois à la commande est à l'apport d'énergie.

Définition (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.

Définition (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.

Introduction

Les systèmes techniques peuvent être classés selon la nature de leur commande.

Définition (systèmes non mécanisés)

Ce sont les systèmes pour lesquels l'utilisateur contribue à la fois à la commande est à l'apport d'énergie.

Définition (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.

Définition (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.

Introduction

Les systèmes techniques peuvent être classés selon la nature de leur commande.

Définition (systèmes non mécanisés)

Ce sont les systèmes pour lesquels l'utilisateur contribue à la fois à la commande est à l'apport d'énergie.

Définition (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.

Définition (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.

Introduction

Les systèmes techniques peuvent être classés selon la nature de leur commande.

Définition (systèmes non mécanisés)

Ce sont les systèmes pour lesquels l'utilisateur contribue à la fois à la commande est à l'apport d'énergie.

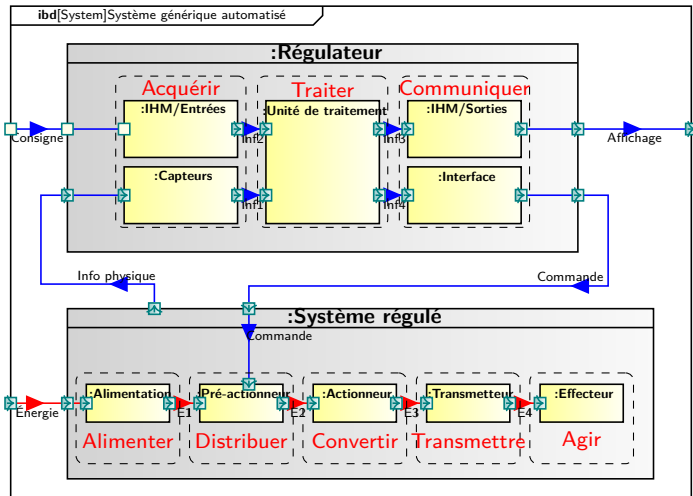
Définition (systèmes mécanisés)

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.

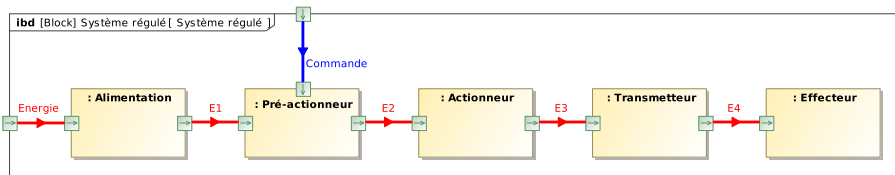
Définition (systèmes automatisés)

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.

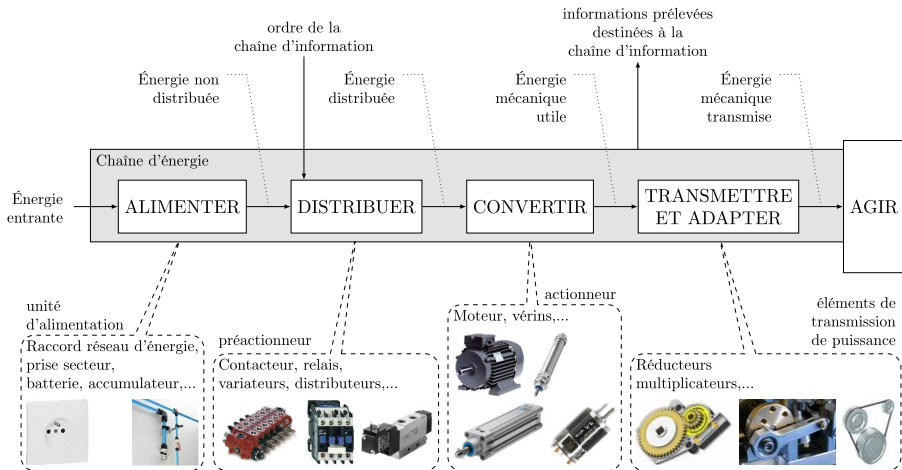
Structure des systèmes automatisés



Structure des systèmes régulés



Constituants des systèmes régulés



■ Convertir : actionneurs



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

Selon le type d'énergie :

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

■ Convertir : actionneurs



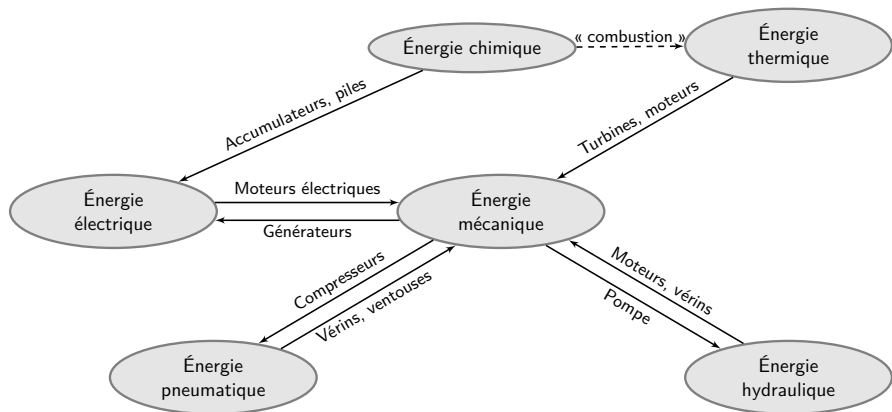
$$\eta = \frac{\text{énergie utile fournie}}{\text{énergie consommée}}$$

Selon le type d'énergie :

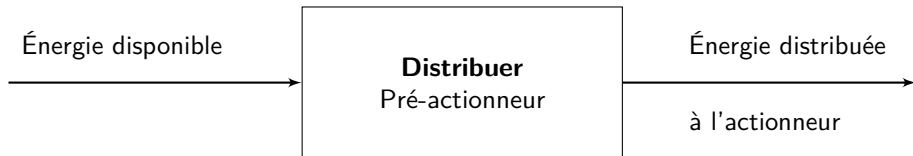
- électrique (moteurs électriques) ;
- hydraulique (moteurs et vérins hydrauliques) ;
- pneumatique (vérins et ventouses) ;
- thermique (moteurs à combustion interne, turbines à gaz).

Constituants des systèmes régulés

- Principaux convertisseurs d'énergie



■ Distribuer : pré-actionneurs

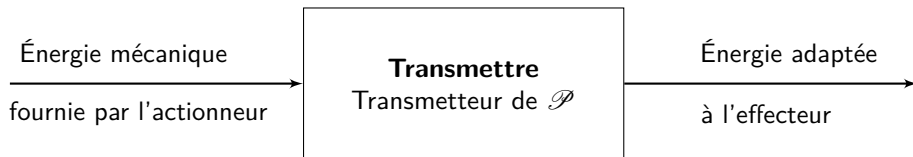


2 types :

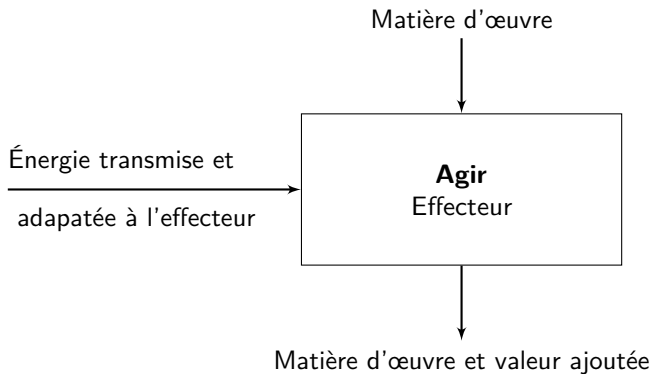
- tout ou rien (TOR) ;
- variateur (variation continue).

Constituants des systèmes régulés

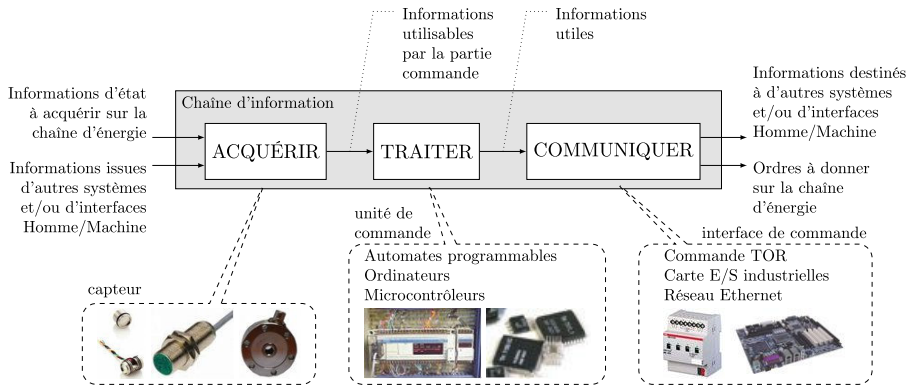
■ Transmettre : transmetteurs de puissance



■ Agir : effecteurs



Constituants du régulateur

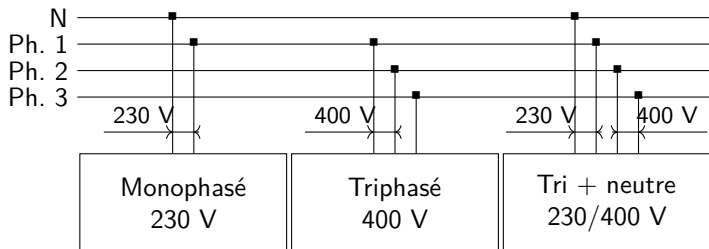




Alimenter - Distribuer
Convertir

Constituants des systèmes électriques

■ Sources de tension alternatives



Constituants des systèmes électriques

■ Sources de tension continues



Les batteries d'accumulateur

■ Pré-actionneurs

- Relais électromécanique

▶ animation

- Relais statique

- Hacheurs, variateurs



■ Pré-actionneurs

- Relais électromécanique

▶ animation

- Relais statique
- Hacheurs, variateurs



■ Pré-actionneurs

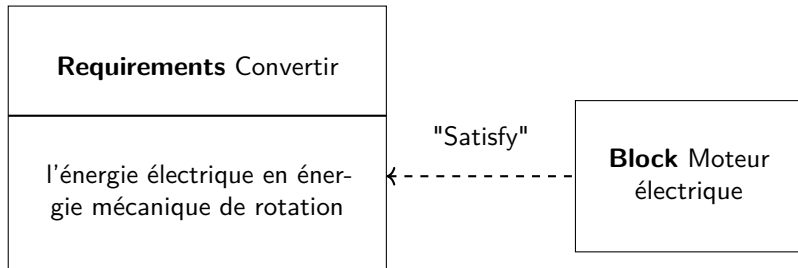
- Relais électromécanique

▶ animation

- Relais statique
- Hacheurs, variateurs



■ Actionneurs



Types de moteurs :

- moteur à courant continu (à aimants permanents) ;
- moteur synchrone (à aimants permanents ou rotor bobiné) ;
- moteur asynchrone ;
- moteur pas à pas.

■ Actionneurs : moteur à courant continu



▸ principe

Carcasse lisse, 2 fils d'alimentation en tension continue.
L'inversion de la tension induit celle du sens de rotation.
Très utilisé en robotique et pour de petites puissances.

■ Actionneurs : moteur asynchrone



Carcasse avec ailettes de refroidissement + bornier.
Alimentation le plus souvent triphasée.
Forte puissance massique.

■ Actionneurs : moteur pas-à-pas



▶ animation

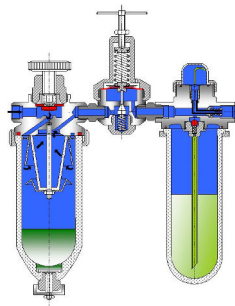
Souvent utilisé en robotique légère, rarement asservi.
Précision dépend de la résolution physique (nombre de pas).

Constituants des systèmes pneumatiques

■ Sources d'énergie pneumatique



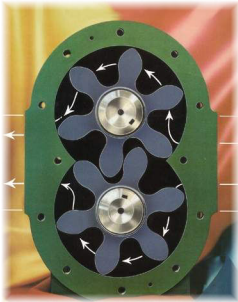
Compresseur



Manorégulateur

Constituants des systèmes hydrauliques

■ Sources d'énergie hydraulique



Pompe à engrenages



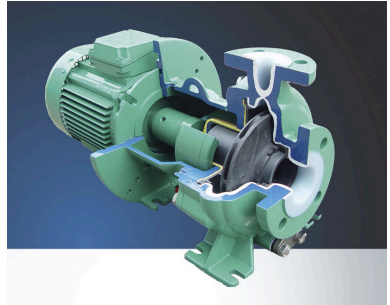
Pompe à pistons axiaux

Constituants des systèmes hydrauliques

■ Sources d'énergie hydraulique

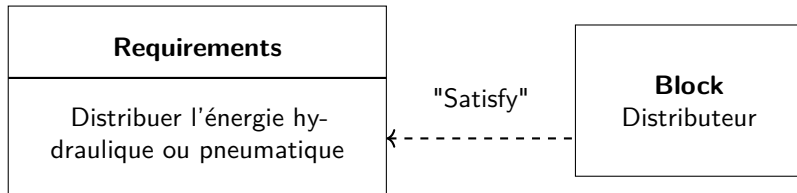


Pompe à pistons radiaux

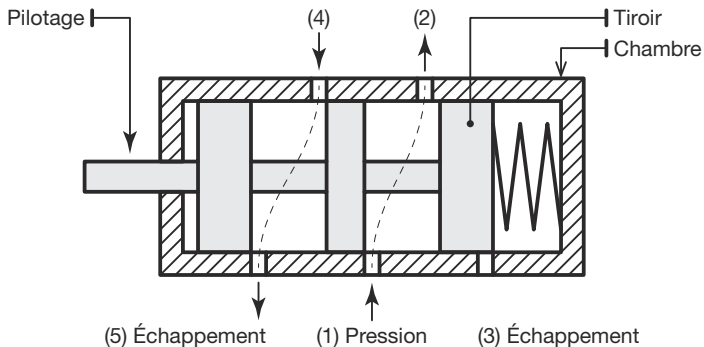


Pompe centrifuge

■ Pré-actionneurs

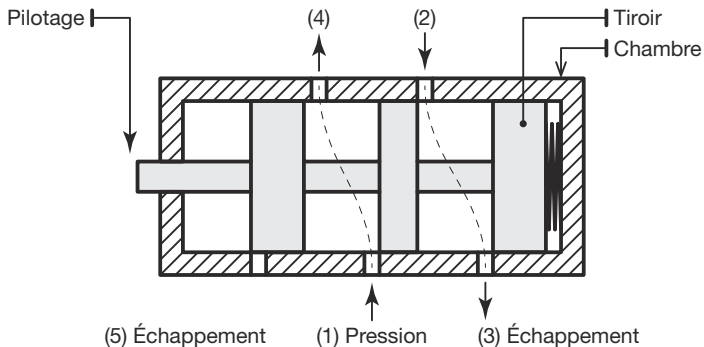


■ Exemple de distributeur 5/2



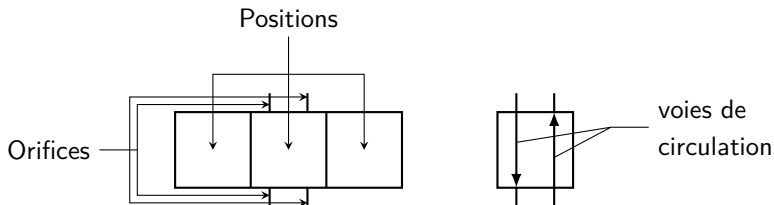
Systèmes pneumatiques et hydrauliques

■ Exemple de distributeur 5/2



■ Nomenclature des distributeurs

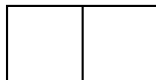
nombre d'orifices / nombre de positions



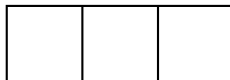
■ Nomenclature des distributeurs

nombre d'orifices / nombre de positions

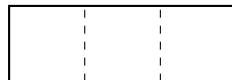
2 positions



3 positions

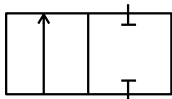


2 positions
+ 1 intermédiaire

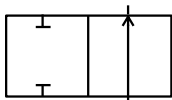


■ Types de distributeurs

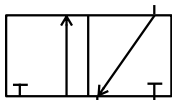
2/2
N.F.



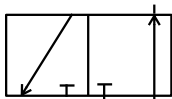
2/2
N.O.



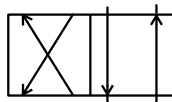
3/2
N.F.



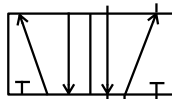
3/2
N.O.



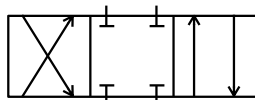
4/2



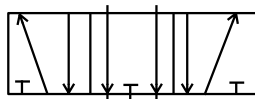
5/2



4/3



5/3



Systèmes pneumatiques et hydrauliques

■ Types de commande des distributeurs

MANUEL

général



bouton poussoir



levier



pédale



MÉCANIQUE

poussoir



ressort



galet



hydraulique



ÉLECTRO AIMANT

1 enroulement



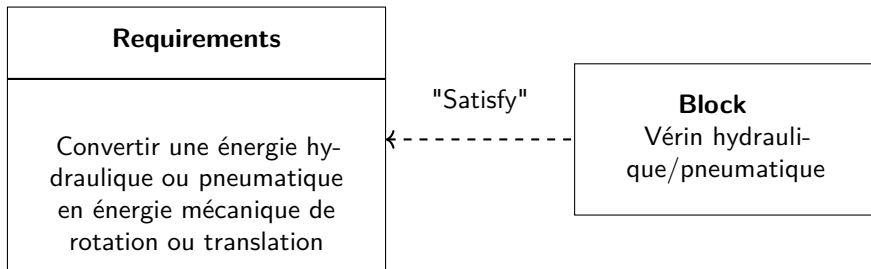
2 enroulements



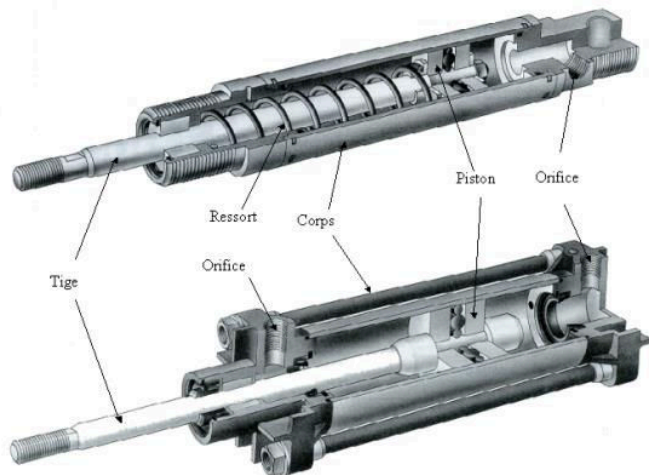
pneumatique



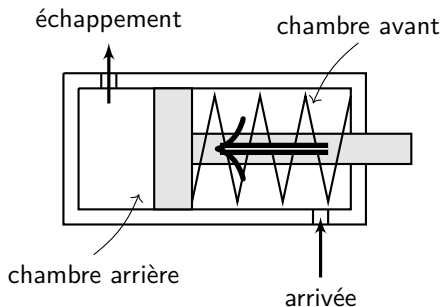
■ Actionneurs I : vérins



■ Actionneurs I : vérins



■ Actionneurs : vérin simple effet

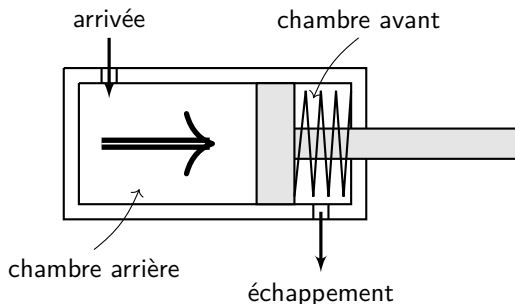


▶ Tige normalement rentrée

▶ Tige normalement sortie

Systèmes pneumatiques et hydrauliques

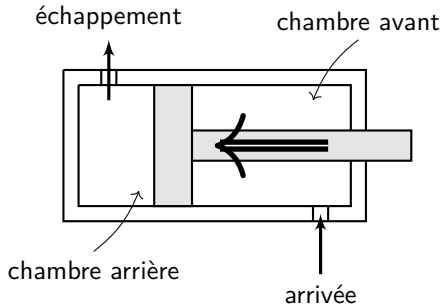
■ Actionneurs : vérin simple effet



▶ Tige normalement rentrée

▶ Tige normalement sortie

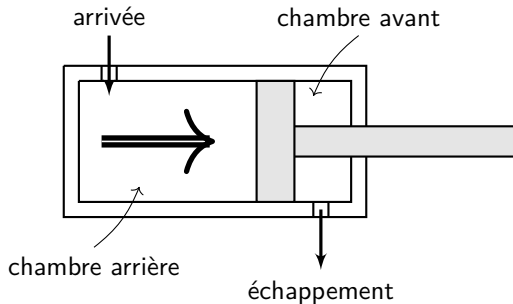
■ Actionneurs : vérin double effet



▶ vérin double effet

▶ vérin double effet à amortissement

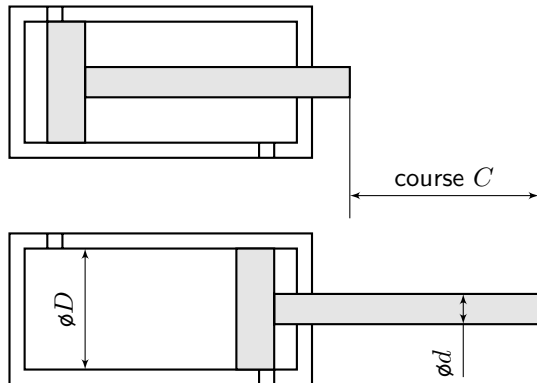
■ Actionneurs : vérin double effet



▶ vérin double effet

▶ vérin double effet à amortissement

■ Caractéristiques d'un vérin

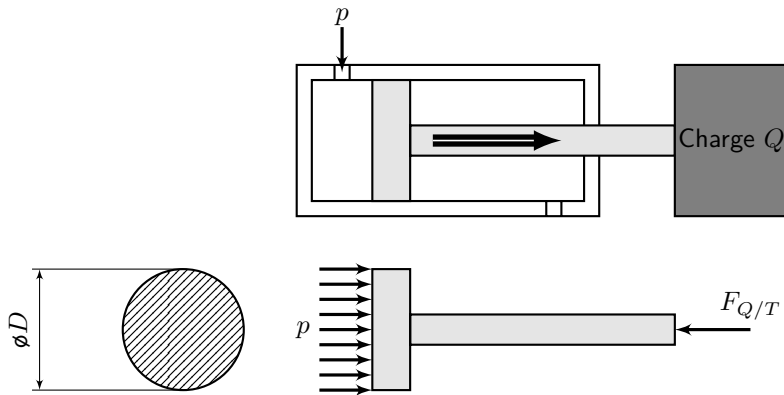


a) tige rentrée

b) tige sortie

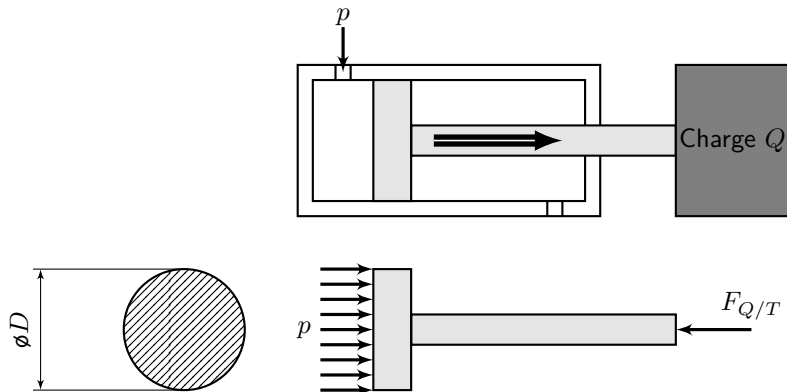
Systèmes pneumatiques et hydrauliques

■ Caractéristiques d'un vérin



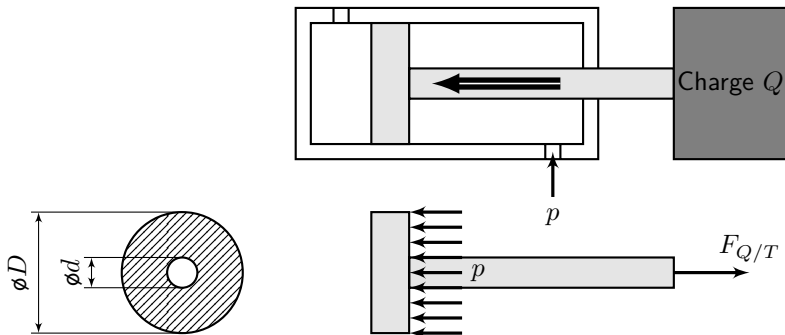
$$F_{Q/T} = pS_1 = p\pi \frac{D^2}{4}$$

■ Caractéristiques d'un vérin



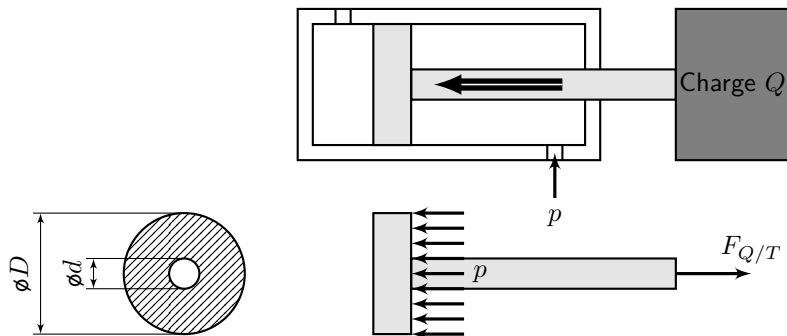
$$F_{Q/T} = pS_1 = p\pi \frac{D^2}{4}$$

■ Caractéristiques d'un vérin



$$F_{Q/T} = pS_2 = p\pi \frac{D^2 - d^2}{4}$$

■ Caractéristiques d'un vérin

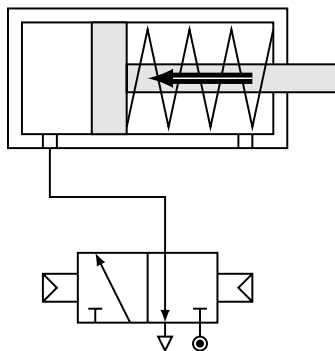


$$F_{Q/T} = pS_2 = p\pi \frac{D^2 - d^2}{4}$$

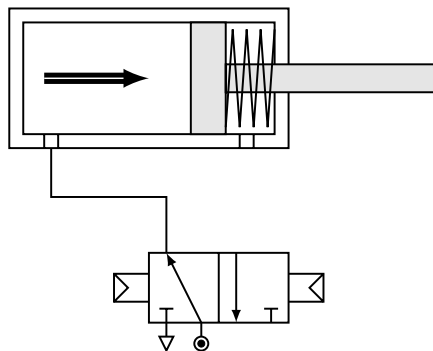
Systèmes pneumatiques et hydrauliques

- Exemple : distributeur 3/2 + vérin simple effet

Position de repos

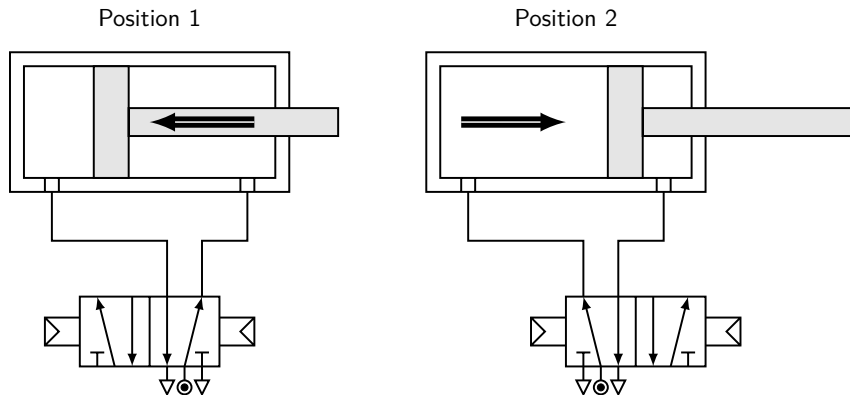


Position de repos



Systèmes pneumatiques et hydrauliques

- Exemple : distributeur 5/2 + vérin double effet

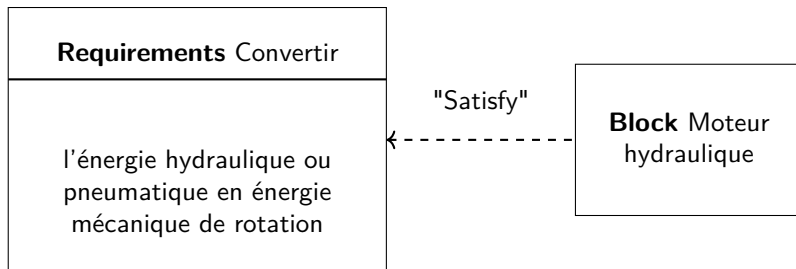


▶ animation

■ Différents types de vérins

- vérin compact [▶ animation](#)
- vérin rotatif à palette (moins d'un tour) [▶ animation](#)
- vérin rotation à pignon-crémaillère [▶ animation](#) [▶ animation](#) [▶ animation](#)
- vérin sans tige [▶ animation](#) [▶ animation](#) [▶ vidéo](#)

■ Actionneurs II : moteurs hydrauliques



■ Actionneurs II : moteurs hydrauliques



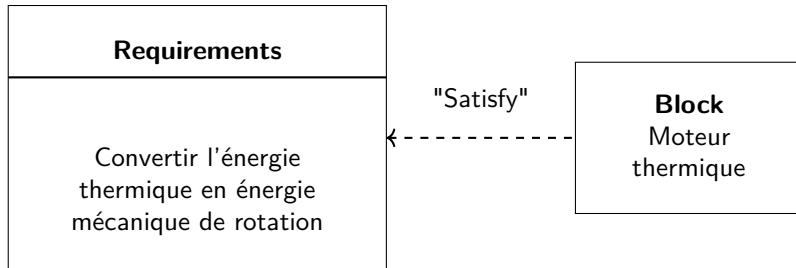
à pistons axiaux



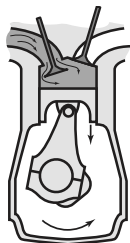
à pistons radiaux

▶ animation

■ Moteur thermique



■ Principe de fonctionnement d'un moteur essence 4T



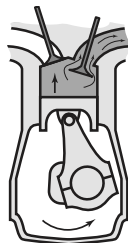
(a) Admission



(b) Compression



(c) Explosion, détente

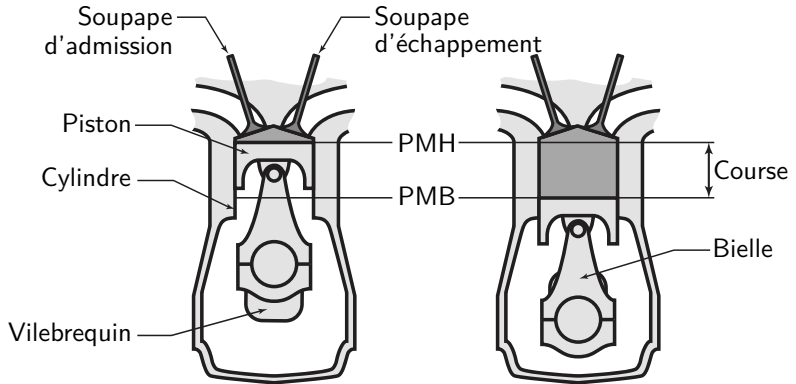


(d) Échappement

▶ animation

▶ moteur 4 cylindres

■ Caractéristiques d'un moteur essence 4T

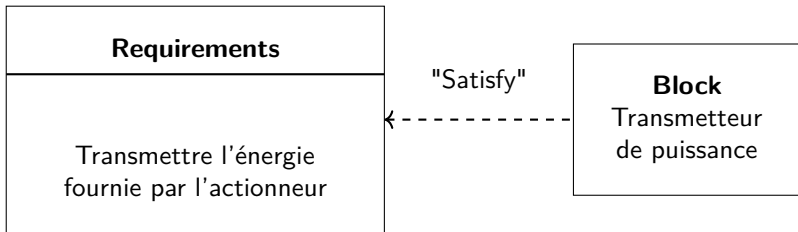


▶ animation

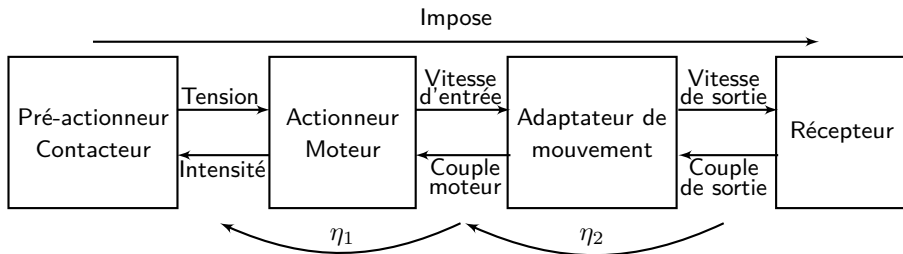


Transmettre

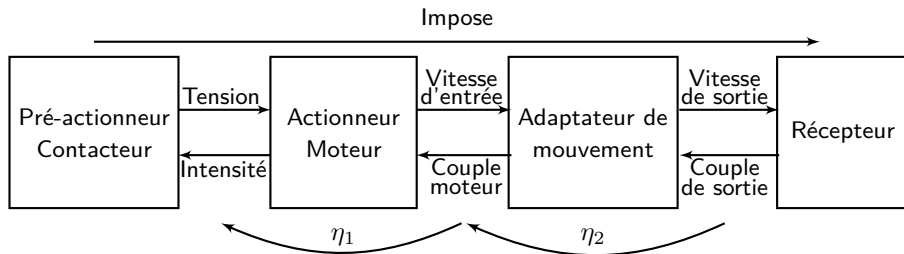
Transmetteur de puissance



Adaptateurs de fréquence de rotation



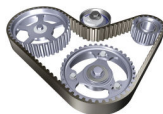
Adaptateurs de fréquence de rotation



Les principaux moyens utilisés sont :



Réducteurs à engrenage

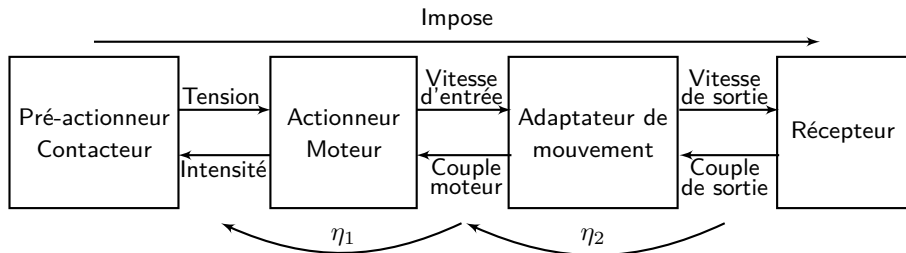


Réducteurs poulies-courroie



Réducteurs pignons-chaîne

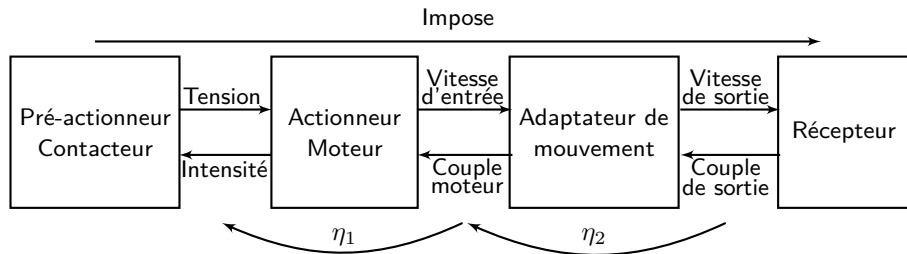
Adaptateurs de fréquence de rotation



Rendement :

$$\eta_i = \frac{\mathcal{P}_{\text{sortie}}}{\mathcal{P}_{\text{entrée}}} < 1$$

Adaptateurs de fréquence de rotation



$$\text{rendement de l'adaptateur : } \eta_2 = \frac{C_s \Omega_s}{C_m \Omega_m}$$

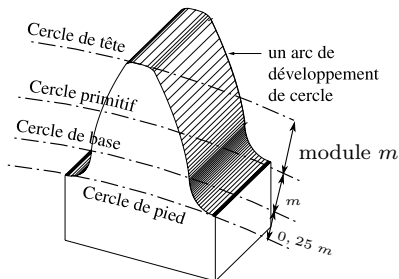
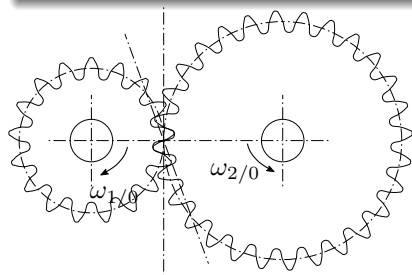
$$\text{rendement du moteur : } \eta_1 = \frac{C_m \Omega_m}{UI}$$

$$\text{rendement total : } \eta = \eta_1 \eta_2 = \frac{C_s \Omega_s}{UI}$$

Adaptateurs de fréquence de rotation

Définition (Engrenage)

Ensemble de 2 roues dentées complémentaires permettant de transmettre une puissance d'un arbre en rotation à un autre.



Rapport de transmission :

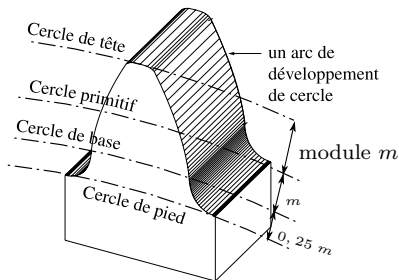
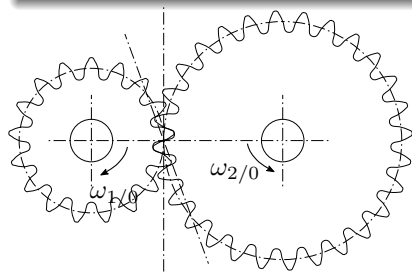
$$R = \frac{\omega_{2/0}}{\omega_{1/0}}$$

▶ animation

Adaptateurs de fréquence de rotation

Définition (Engrenage)

Ensemble de 2 roues dentées complémentaires permettant de transmettre une puissance d'un arbre en rotation à un autre.



2 roues qui engrènent ont même **module** m (caractéristique de taille, en mm)
Diamètre primitif d fonction du nombre de dents Z :

$$d = m Z$$

Adaptateurs de fréquence de rotation

■ Types de roues dentées



Pignon



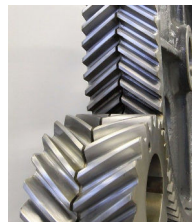
Couronne



à denture droite

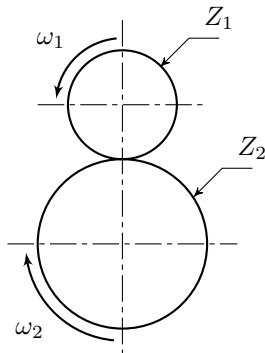


à denture hélicoïdale



à denture en chevrons

■ Réducteur à engrenage parallèle à contact extérieur



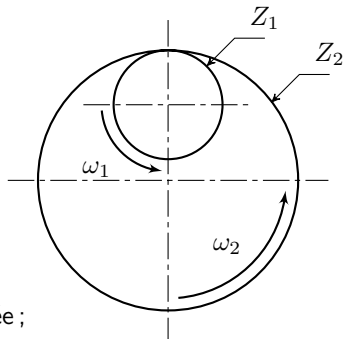
Rapport de transmission :

- Z_1 le nombre de dents du pignon d'entrée ;
- Z_2 le nombre de dents du pignon de sortie ;

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

Adaptateurs de fréquence de rotation

■ Réducteur à engrenage parallèle à contact intérieur



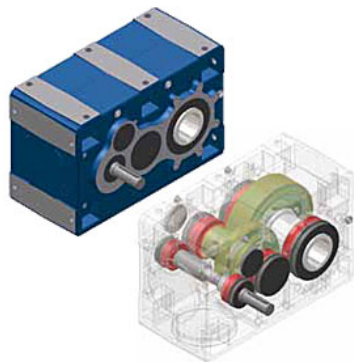
Rapport de transmission :

- Z_1 le nombre de dents du pignon d'entrée ;
- Z_2 le nombre de dents de la couronne de sortie ;

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

Adaptateurs de fréquence de rotation

■ Réducteur à engrenage parallèle



Rapport de transmission :

$$R_{S/E} = (-1)^n \frac{\prod Z_{\text{menantes}}}{\prod Z_{\text{menées}}}$$

n : nombre de contacts extérieurs.

■ Engrenage à pignons coniques



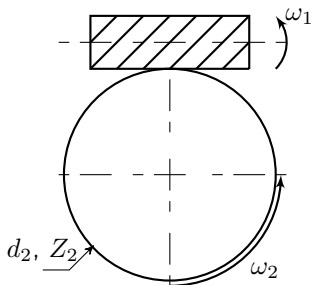
Rapport de transmission :

- Z_1 le nombre de dents du pignon d'entrée ;
- Z_2 le nombre de dents du pignon de sortie ;

$$|R_{S/E}| = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Adaptateurs de fréquence de rotation

■ Roue et vis sans fin



Rapport de transmission :

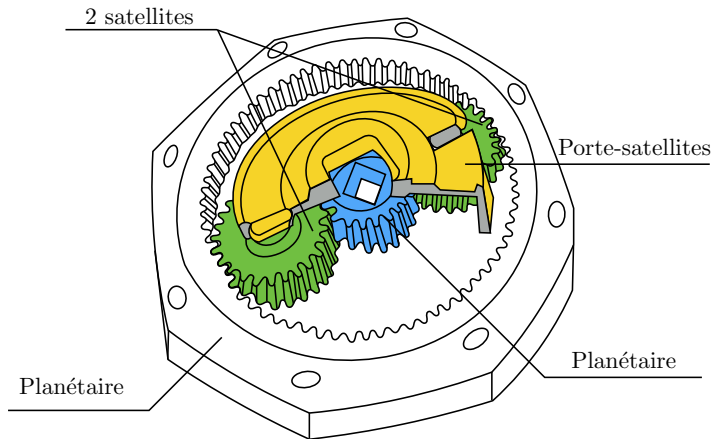
- Z_1 le nombre de filets de la vis ;
- Z_2 le nombre de dents de la roue ;

$$|R_{S/E}| = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

▶ animation

Adaptateurs de fréquence de rotation

■ Trains épicycloïdaux

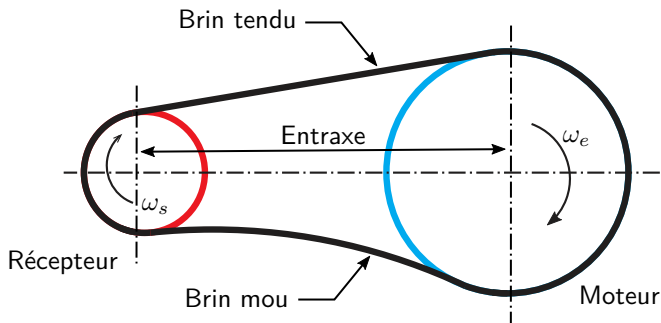


▶ animation

▶ animation

Adaptateurs de fréquence de rotation

■ Liens flexibles

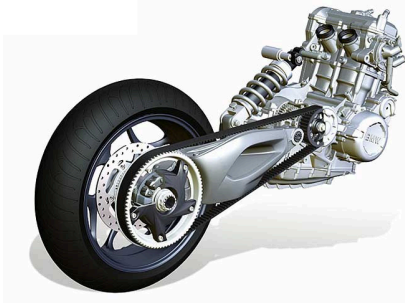


Rapport de transmission :

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

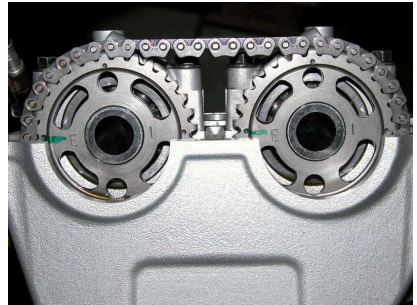
Adaptateurs de fréquence de rotation

■ Liens flexibles



Transmission par courroie crantée

▶ animation

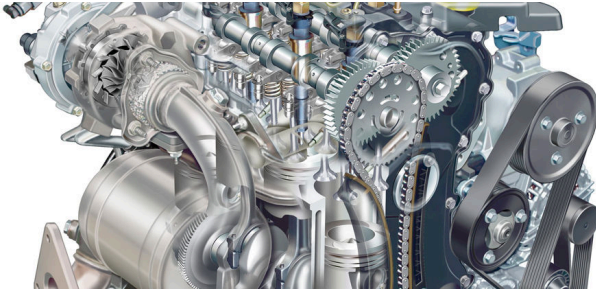


Chaine reliant deux arbres à cames

▶ animation

Adaptateurs de fréquence de rotation

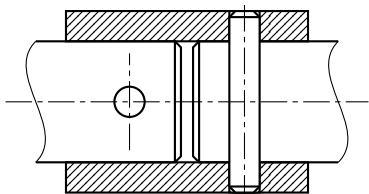
■ Liens flexibles



Moteur Renault-Nissan M9R (avec chaîne et courroie)

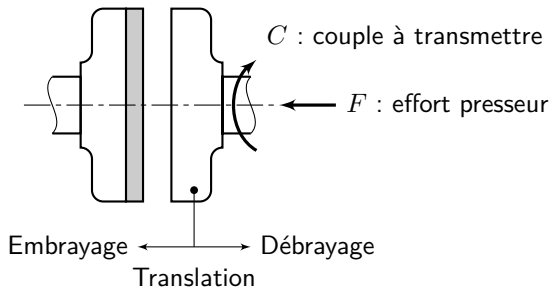
■ Accouplements

- 1 Accouplement permanent (liaison complète)
- 2 Accouplement temporaire (embrayages et freins)



■ Accouplements

- 1 Accouplement permanent (liaison complète)
- 2 Accouplement temporaire (embrayages et freins)



Adaptateurs de fréquence de rotation

■ Accouplements homocinétiques



Joint Rzeppa



Joint de Oldham

▶ animation

▶ vidéo



Joint tripode

homocinétique \iff mêmes vitesses de rotation

Adaptateurs de fréquence de rotation

■ Accouplements homocinétiques



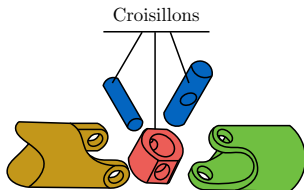
Joint Rzeppa



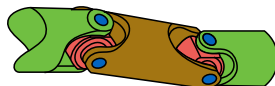
Joint de Oldham



Joint tripod



Joint de cardan

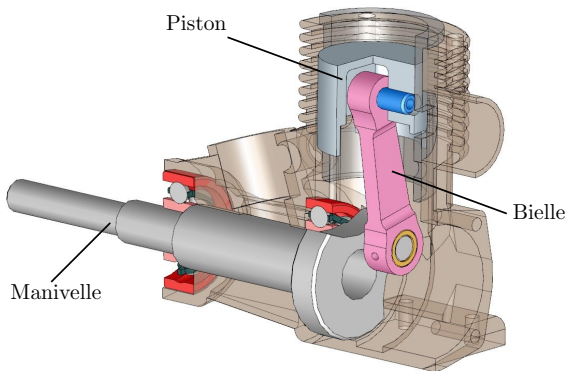


Double joint de cardan

▶ Joint Cardan

▶ Double joint de Cardan

■ Mécanisme bielle/manivelle

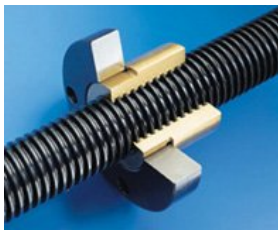


▶ animation

▶ compresseur

Transformateurs de mouvement

■ Mécanisme vis/écrou



Caractérisé par son **nombre de filets** et son **pas** p en mm (implicitement par tour) tel que le déplacement axial x soit lié à la variation d'angle θ selon

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

4 modes de fonctionnement : [▶ mode 1](#) [▶ mode 2](#) [▶ mode 3](#) [▶ mode 4](#)

[▶ Vis à billes](#)

Transformateurs de mouvement

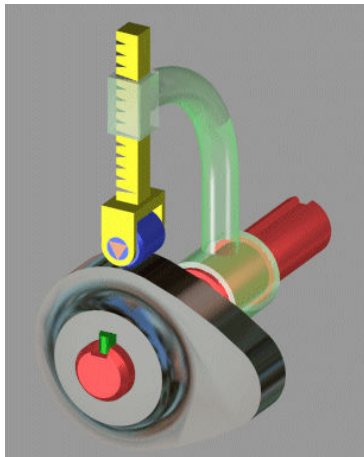
■ Mécanisme pignon/crémaillère



▶ animation

Transformateurs de mouvement

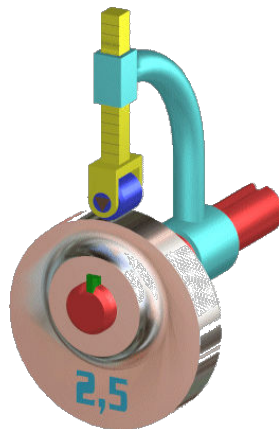
■ Mécanisme à came ou excentrique



Système à came

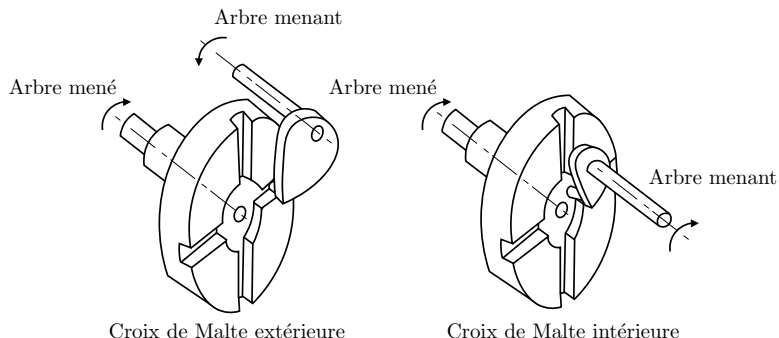
▶ animation

▶ animation



Système à excentrique

■ Mécanisme à croix de Malte



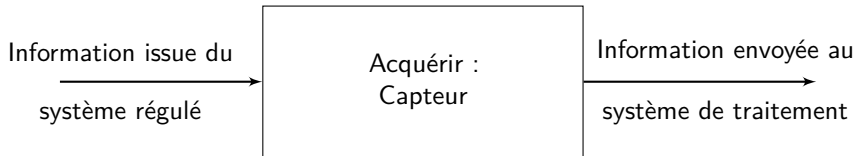
▶ à 4 rainures

▶ à 5 rainures

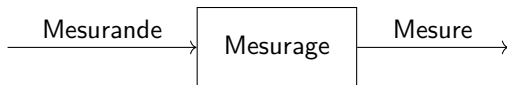


Acquérir

Capteurs & détecteurs



■ Mesure d'une grandeur physique

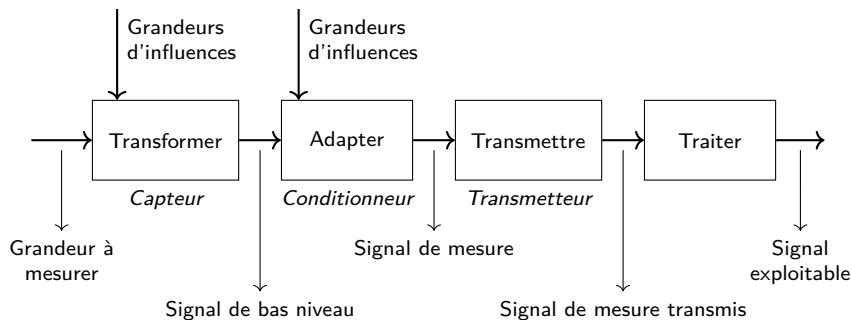


Mesurande : grandeur physique (pression, vitesse, température, etc.) soumise à mesurage ;

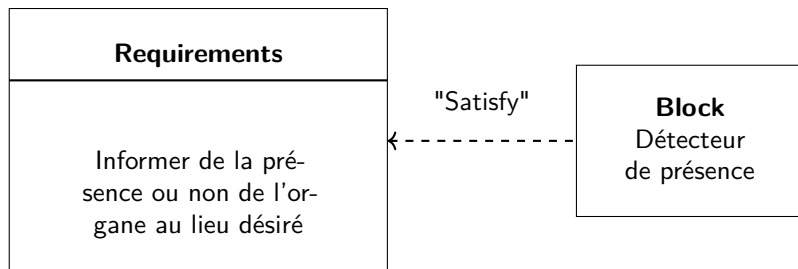
Mesurage : toutes les opérations permettant l'obtention de la valeur numérique d'une grandeur physique (mesurande) ;

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

■ Structure fonctionnelle de la chaîne d'acquisition



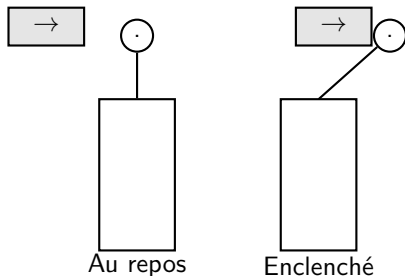
■ Détecteur de présence ou de proximité



Information de type tout ou rien (TOR).

Capteurs & détecteurs

■ Détecteurs électromécaniques

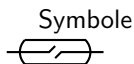
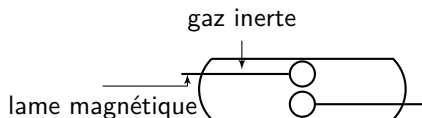


Symbole



▶ animation

■ Interrupteurs à lame souple (ILS)



Avantages

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

Inconvénients

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

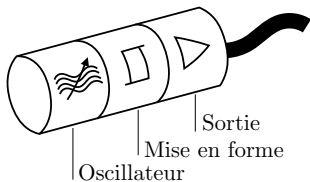
▶ animation

▶ exemple sur vérin

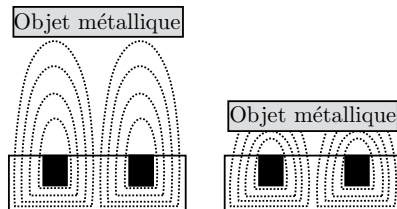
Capteurs & détecteurs

■ Détecteurs inductifs ou magnétiques ou capacitifs

Constitution de ces capteurs



Fonctionnement



Détection d'un objet métallique

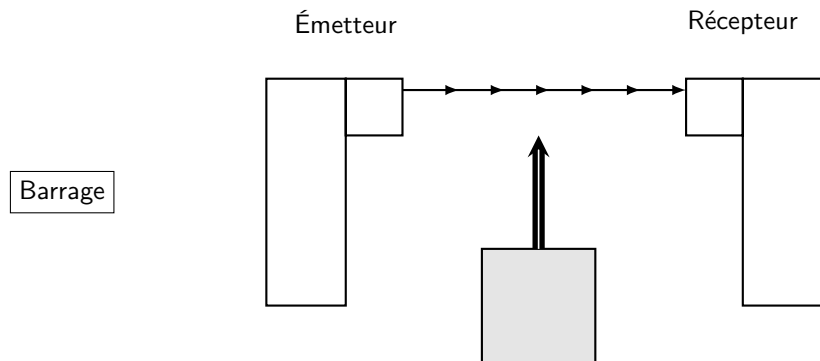
▶ détecteur inductif

▶ détecteur magnétique

▶ détecteur capacitif

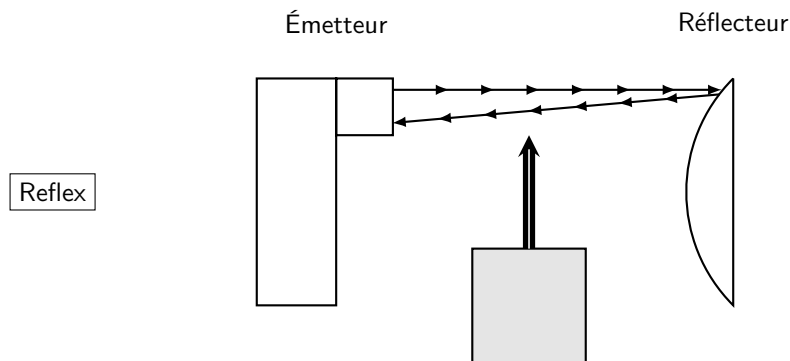
Capteurs & détecteurs

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



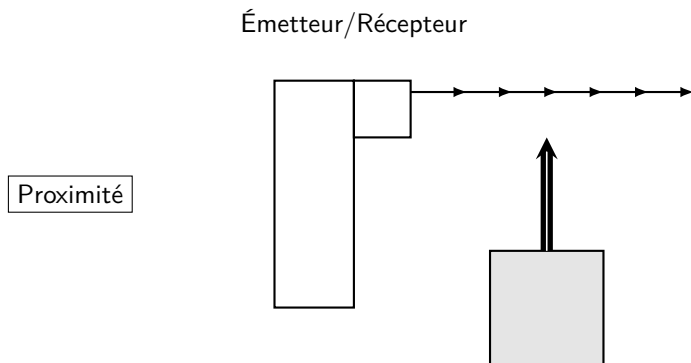
▶ animation

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



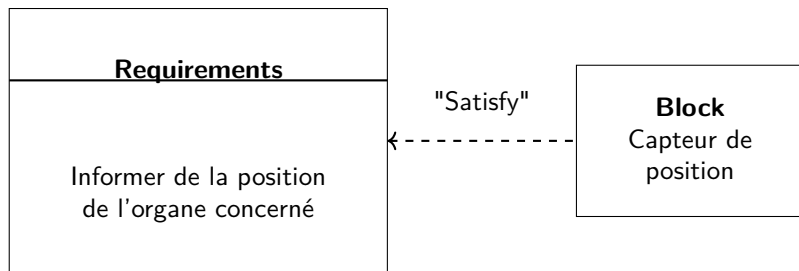
▶ animation

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



▶ animation

■ Mesure de position analogique



Deux critères :

- sa résolution (plus petite valeur mesurable) ;
- son étendue de mesure (valeurs extrêmes).

■ Capteurs potentiométriques (mesure de position analogique)

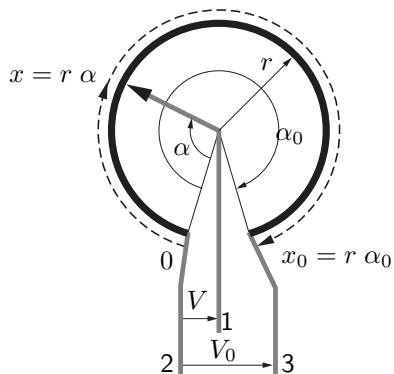
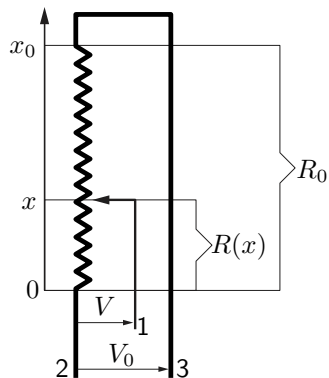


Potentiomètre linéaire



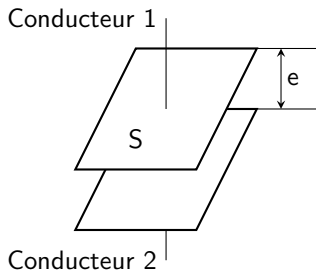
Potentiomètre rotatif

■ Capteurs potentiométriques (mesure de position analogique)



$$V = \frac{R}{R_0} V_0$$

■ Capteurs de déplacement capacitifs (mesure de position analogique)



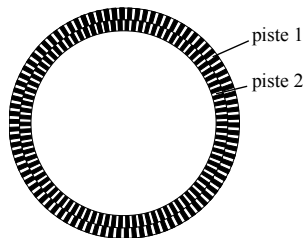
Avantages :

- grande sensibilité et bonne résolution.

Inconvénients :

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

■ Codeurs incrémentaux (mesure de position numérique)



▶ animation

▶ sens 1

▶ sens 2

Gain avec quadrature :

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

avec n le nombre de fentes sur le disque codeur.

Capteurs & détecteurs

- Codeurs absolus (mesure de position numérique)



1 code par secteur angulaire.

■ Génératrice tachymétrique (mesure de vitesse)



Moteurs électriques montés « à l'envers » (en générateurs).
Tension proportionnelle à la vitesse de rotation.

Capteurs & détecteurs

■ Capteurs d'efforts

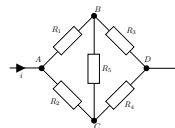
- Anneau dynamométrique
- Jauge d'extensiométrie



$$F = k\Delta\ell$$

■ Capteurs d'efforts

- Anneau dynamométrique
- Jauge d'extensiométrie



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



Communiquer

Constituants du régulateur

Éléments de dialogue Homme – machine

IHM/Entrées (Opérateur → PC)

IHM/Sorties (PC → Opérateur)

Dialogue élémentaire

- bouton poussoir
- bouton tournant
- bouton à clef
- pédale
- manche à positions multiples



- voyants colorés fixes et clignotants
- gyrophares
- avertisseurs sonores



Constituants du régulateur

Éléments de dialogue Homme – machine

IHM/Entrées (Opérateur → PC)

IHM/Sorties (PC → Opérateur)

Dialogue alphanumérique

- roue codeuse
- clavier alphanumérique
- écran résistif



- afficheur 7 segments
- écran (LED, LCD, plasma)
- imprimante



Constituants du régulateur

Éléments de dialogue Homme – machine

IHM/Entrées (Opérateur → PC)

IHM/Sorties (PC → Opérateur)

Dialogue analogique

- potentiomètre
- souris



- indicateur à aiguille





N. Mesnier, lycée Jean Perrin, Lyon