

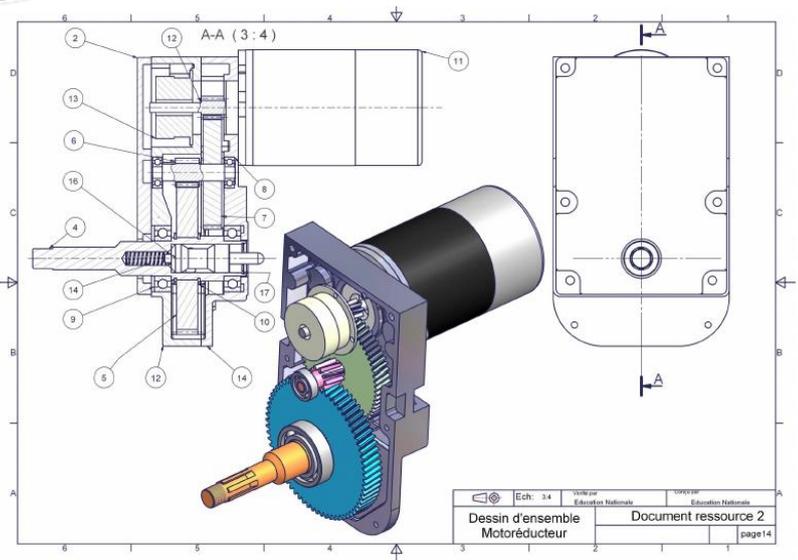
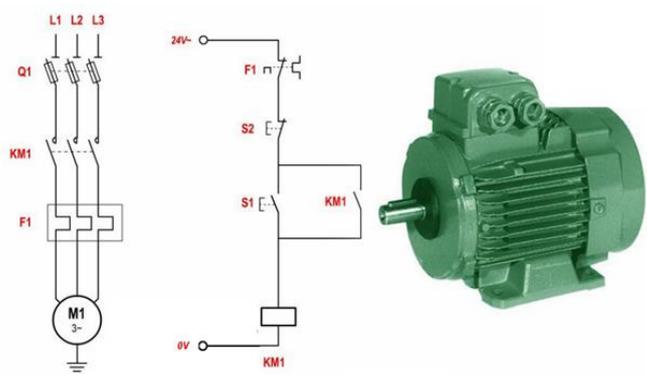
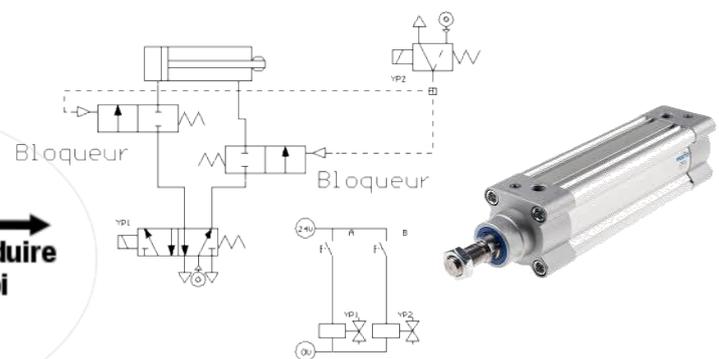
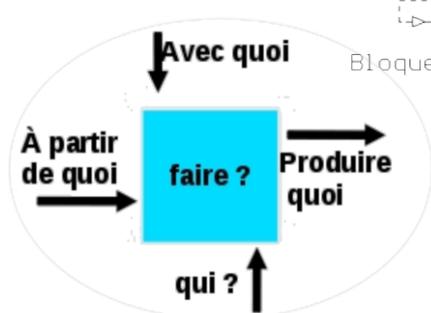
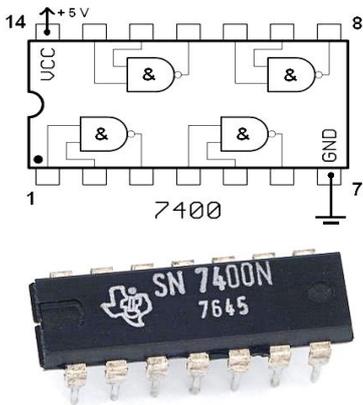


Filière : Sciences Mathématiques Option « B » **Résumé**

# Sciences de l'ingénieur

## Résumé de cours

Professeur : EL MIMOUNI EL HASSAN



Ech: 3:4	Travail par	Document ressource 2
Dessin d'ensemble		page 14
Motoréducteur		

## Avant-Propos

Tout d'abord, je voudrais noter que ce **résumé** des Sciences de l'Ingénieur (**SI**) pour la section « Sciences mathématiques option B », ne se veut absolument :

- Ni exhaustif, vu le contenu très important de cette matière.
- Ni un formulaire.

Il occupe, à mon sens, une place entre ces 2 types de productions pédagogiques.

Il respecte, en principe le **programme officiel** des SI, en s'inspirant fortement des sujets d'examen de baccalauréat, pour se fixer les limites des savoirs à aborder. Il contient quelques exemples ou exercices d'application de base, mais pas de série d'exercices.

Il a été conçu à partir de l'expérience personnelle de l'auteur, en s'aidant dans cette tâche, entre autres, de **nombreux travaux** francophones, rédigés par des pédagogues notamment français, tunisiens et marocains, qui sont largement partagés et disponibles dans le **Web** et qui sont de nature diversifiée (documents pdf et Word, pages Web, maquettes SolidWorks, images, animations, etc.). D'ailleurs, ce travail rentre dans cette **philosophie de partage**.

Je souhaite que ce document de travail permette alors aux :

- **Elèves** de se concentrer sur **l'essentiel** dans leurs préparations à l'examen, surtout en travaillant les sujets de l'examen national de baccalauréat, qui sont d'une grande richesse.
- **Professeurs**, notamment débutants, d'avoir un **cours de base** qu'ils sauront certainement améliorer et accompagner de séries d'exercices nécessaires. Un tel cours pourrait leur servir de base pour aborder les sujets d'examens.

Je profite de cette occasion pour **féliciter** vivement les concepteurs de ces examens (Inspecteurs et Professeurs). Rien n'est parfait ; mais dans l'ensemble, ces sujets sont **très bien faits et très instructifs** et attestent des grands efforts de travail derrière les coulisses.

- **Inspecteurs** pédagogiques, d'avoir une **référence** de plus, parmi d'autres, qui accompagne le document du programme officiel.

EL MIMOUNI EL HASSAN

**Inspecteur de Génie Electrique**

---

# **Module 1**

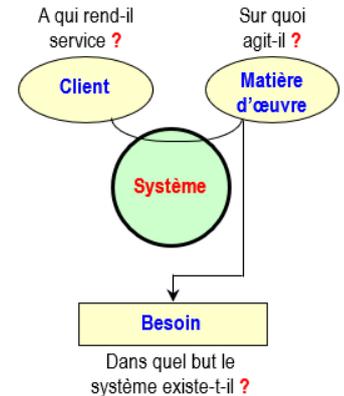
# **Analyse fonctionnelle**

---

## Diagramme de Bête à cornes

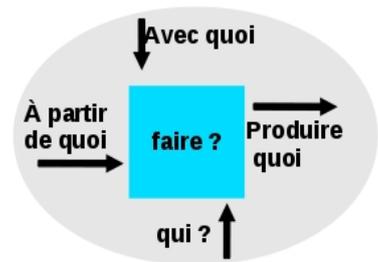
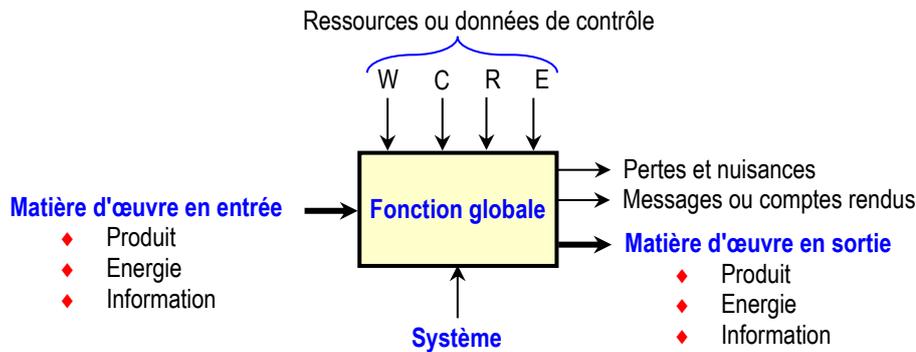
- Enoncé du besoin : On pose **3 questions** :
  - A **qui** rend-il service ?
  - Sur **quoi** agit-il ?
  - Dans **quel** but le système existe-t-il ?
- En résumé :

Le produit rend service au client en agissant sur la matière d'œuvre pour satisfaire le besoin.



## Actigramme de la fonction globale

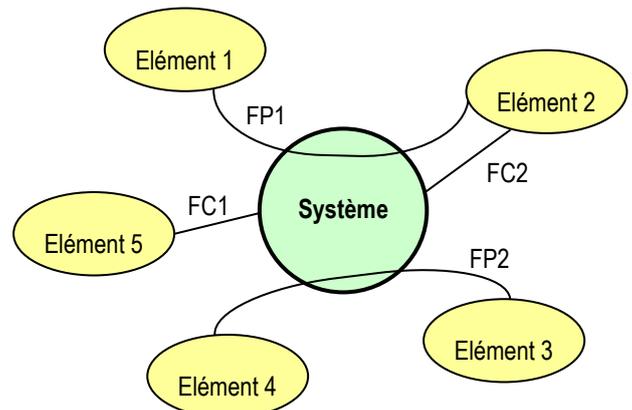
- L'actigramme de fonction globale indique la nature de l'activité principale d'un système :



- **Fonction globale** : C'est la fonction pour laquelle il a été réalisé.
- **Matière d'œuvre** : C'est ce sur quoi agit le système.
- **Ressources ou données de contrôle** :
  - Energie (**W**) : Présence d'énergie pour effectuer l'action ;
  - Configuration (**C**) : modes de marches (manuel, automatique, pas à pas, etc.) ;
  - Réglage (**R**) : paramètres de vitesse, seuils de déclenchement, etc.
  - Exploitation (**E**) : Départ de cycle, arrêt, etc.
- **Nom du système** : Il est indiqué en bas du rectangle.

## Diagramme Pieuvre

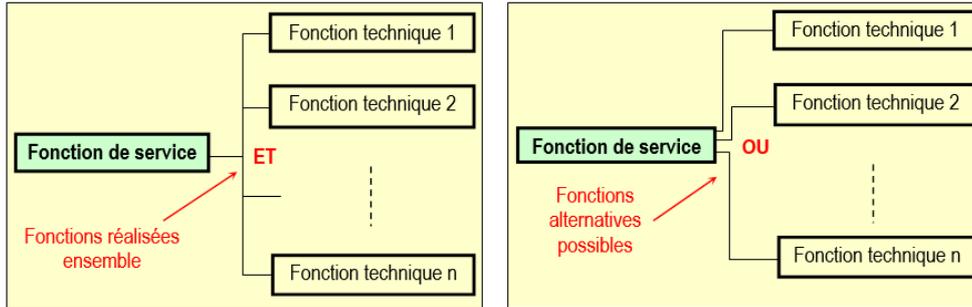
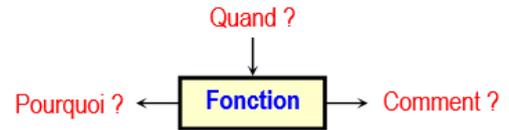
- **Les Fonctions Principales (FP)** : Elles lient plusieurs éléments de l'environnement satisfaire le besoin ; dans le diagramme général ci-contre, on trouve **FP1** et **FP2**.
- **Les Fonctions de Contrainte (FC)** : Elles adaptent le système à un ou plusieurs éléments de son environnement. Dans le schéma général, on trouve **FC1** et **FC2**.



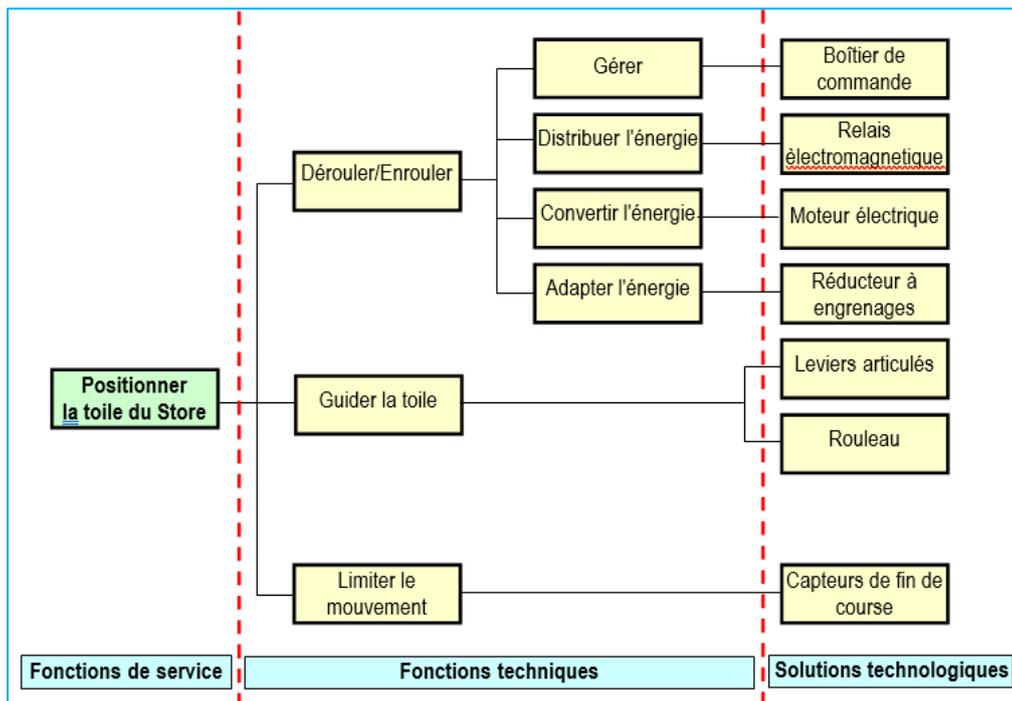
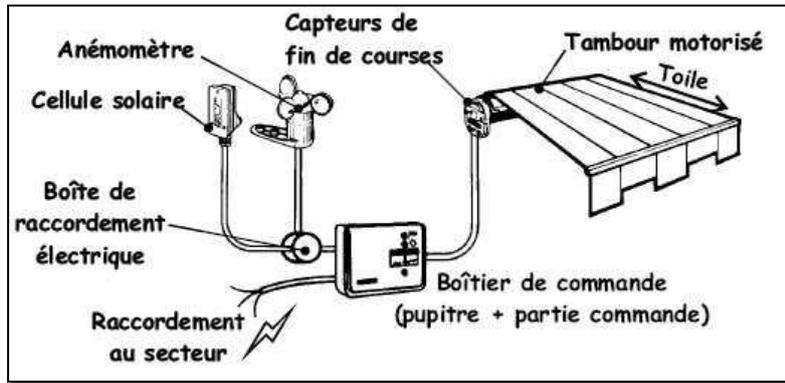
## Diagramme FAST

- C'est une décomposition hiérarchisée des fonctions d'un système, allant des fonctions de service jusqu'aux solutions technologiques ou constructives :

- **Pourquoi** cette fonction doit-elle être assurée ?
  - **Comment** cette fonction doit-elle être assurée ?
  - **Quand** cette fonction doit-elle être assurée ?
- Pour la question « **Quand ?** » il y a **2 possibilités** :



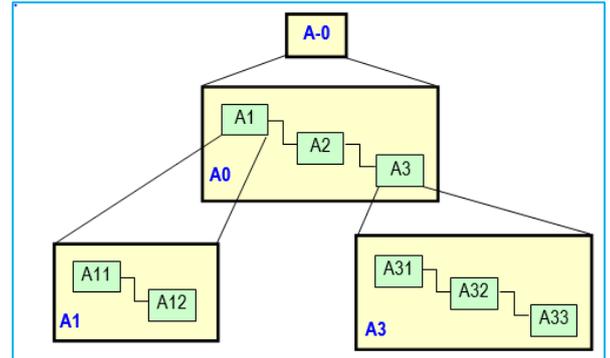
- Exemple** : FAST partiel du store automatisé



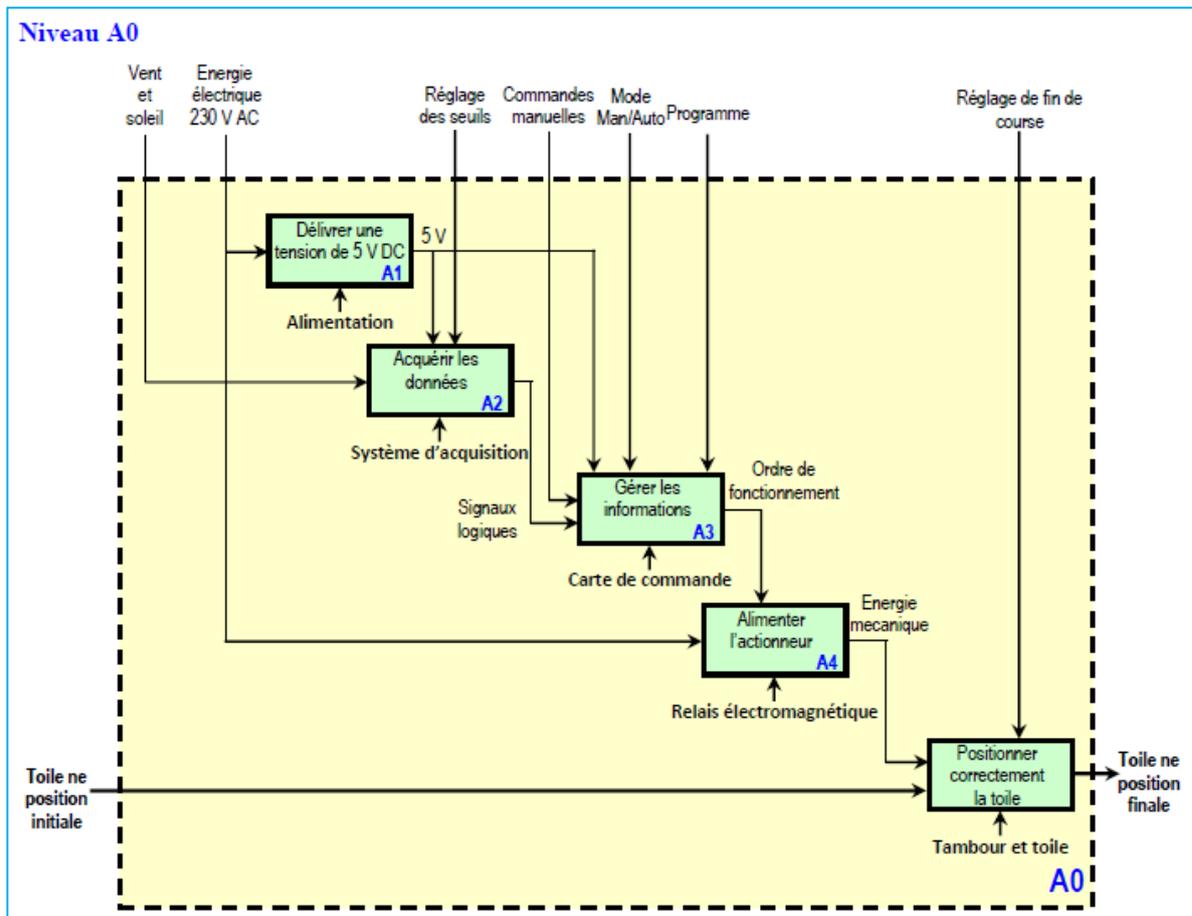
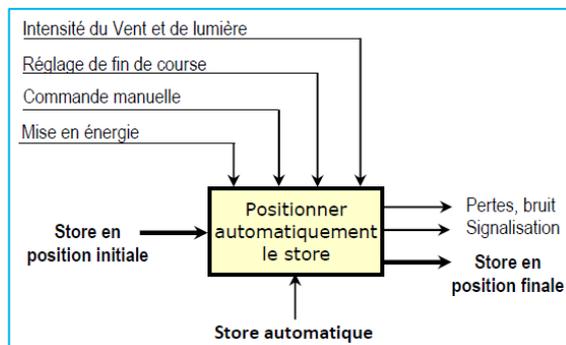
## Diagramme SADT

- Il est plus précis que le FAST ; il est constitué d'actigrammes structurés en niveaux :

- L'actigramme **A-0** correspond à la fonction globale du système ; par convention, ce niveau est noté **A-0 (A moins zéro)** et il se décompose en n boîtes **A1, A2, ..., An**, qui constituent le niveau **A0**.
- Chacun des diagrammes A1 à An est décomposé suivant le même principe. Dans l'exemple ci-contre, :
  - A0 représente le niveau 0, qui se décompose en 3 sous-systèmes A1 et A2 et A3.
  - A1 se décompose en A11 et A12 et ainsi de suite.
- La décomposition se termine si le niveau souhaité est atteint.
- Dans chaque actigramme, on définit la relation Entrée/Sortie et les données de contrôle.

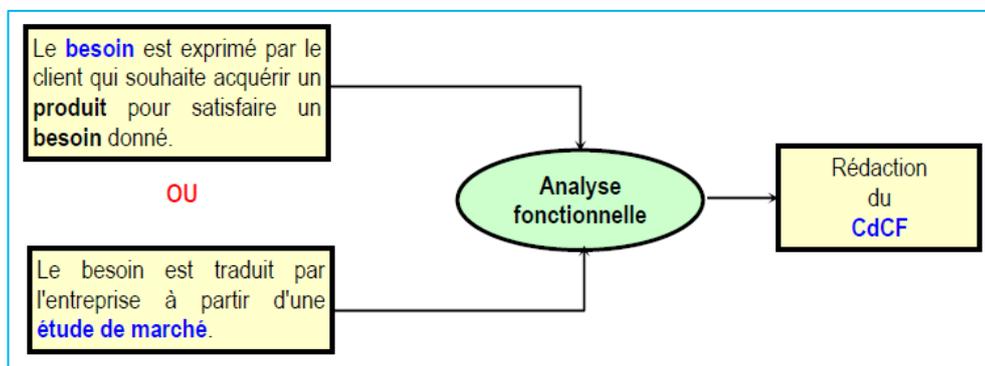


- Exemple : SADT partiel du store automatisé.**



## Cahier des charges fonctionnel (CdCF)

- C'est un document contractuel qui exprime le besoin en termes de fonctions de service.



- Le CdCF contient donc les éléments suivants :
  - L'expression du besoin : fonction globale.
  - La définition des fonctions de service (fonctions principales et fonctions de contrainte).
  - L'énumération des critères d'appréciation (performances, coût, sécurité, etc.) ;
- Pour chacune des fonctions, sont définis des critères d'appréciation avec leurs niveaux et flexibilités, dans le « **tableau fonctionnel** », qui a le format suivant :

Fonction	Critère d'appréciation	Niveau du critère d'appréciation	Flexibilité du niveau
FP ou FC			

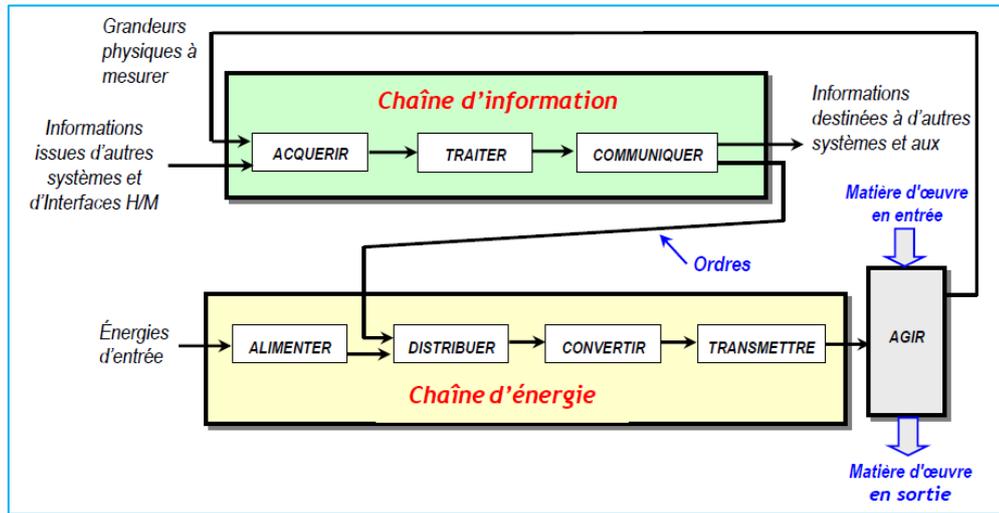
- Critère d'appréciation d'une fonction** : Il juge comment une fonction est remplie ; une échelle est alors utilisée pour apprécier le niveau.
- Niveau d'un critère d'appréciation** : Grandeur repérée dans l'échelle adoptée pour un critère d'appréciation d'une fonction ; il a des valeurs chiffrées avec tolérance (dimensions, paramètres de fonctionnement, etc.).
- Flexibilité d'un niveau** : Elle exprime les limites d'acceptation, qui sont précisées sous forme de classe :
  - Classe F0** : flexibilité nulle.
  - Classe F1** : flexibilité faible.
  - Classe F2** : flexibilité moyenne.
  - Classe F3** : flexibilité forte.
- Exemple** : CdCF partiel du store automatisé (cas de FP1 et FC4 par exemple).

Fonction	Critère d'appréciation	Niveau d'un critère d'appréciation	Flexibilité d'un niveau
FP1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Délai de descente du store</li> <li>Délai de montée du store</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 mn</li> <li>15 mn</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>± 2 s</li> <li>± 2 s</li> </ul>
...	...	...	...
FC4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niveau sonore</li> <li>MTBF*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>20 dB</li> <li>10 ans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>± 2 dB</li> <li>Minimum</li> </ul>

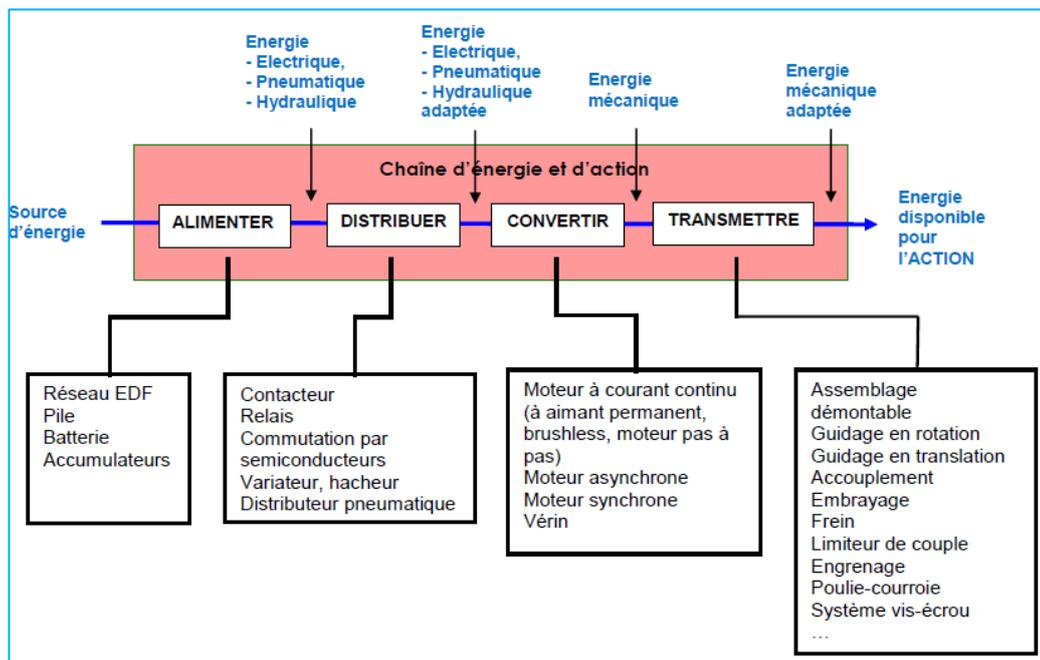
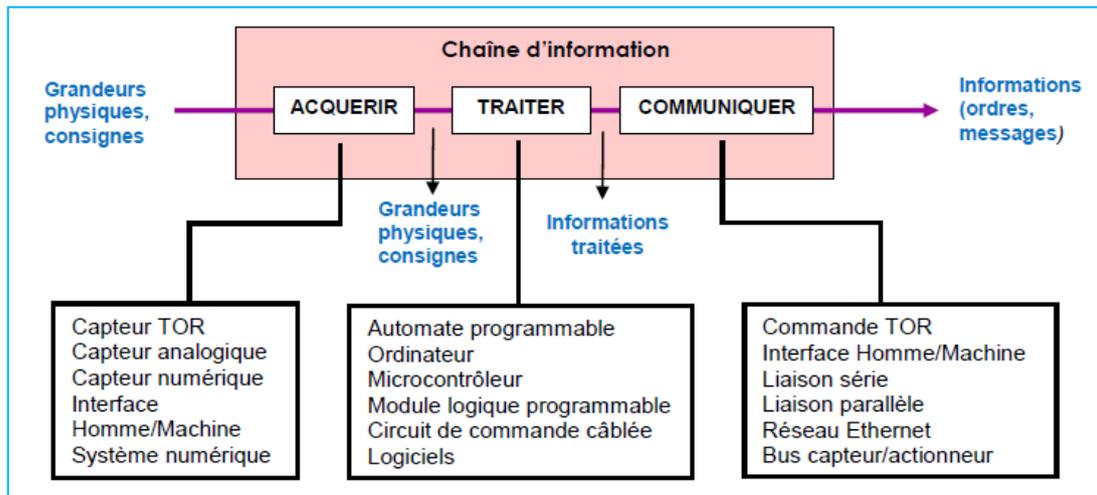
\* : MTBF est l'abréviation de **Mean Time Between Failures** (temps moyen entre pannes).

## Structure fonctionnelle d'un système

### Schéma



### Solutions constructives

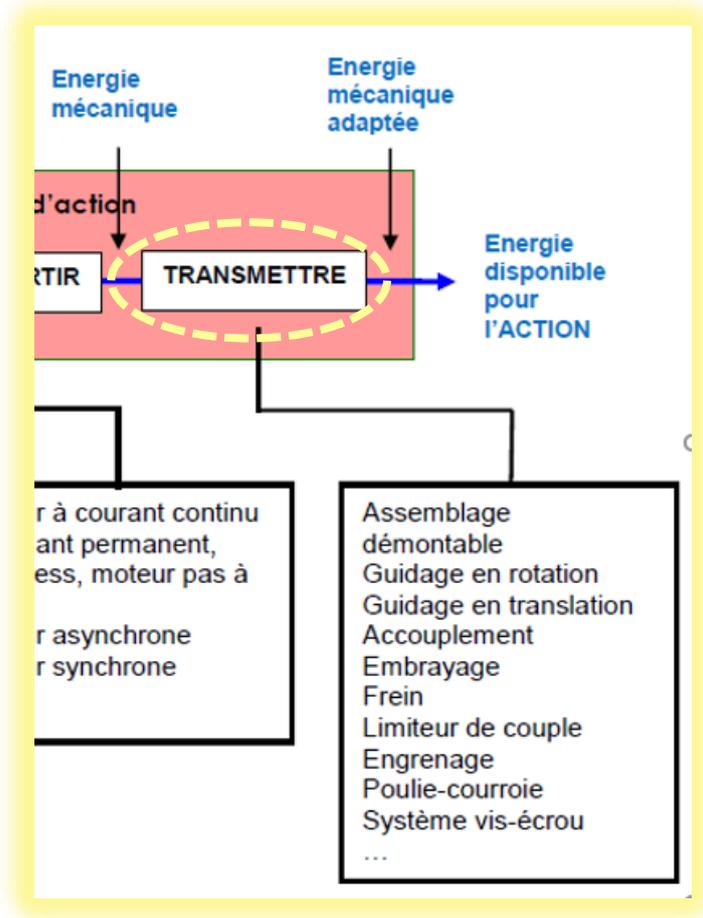


---

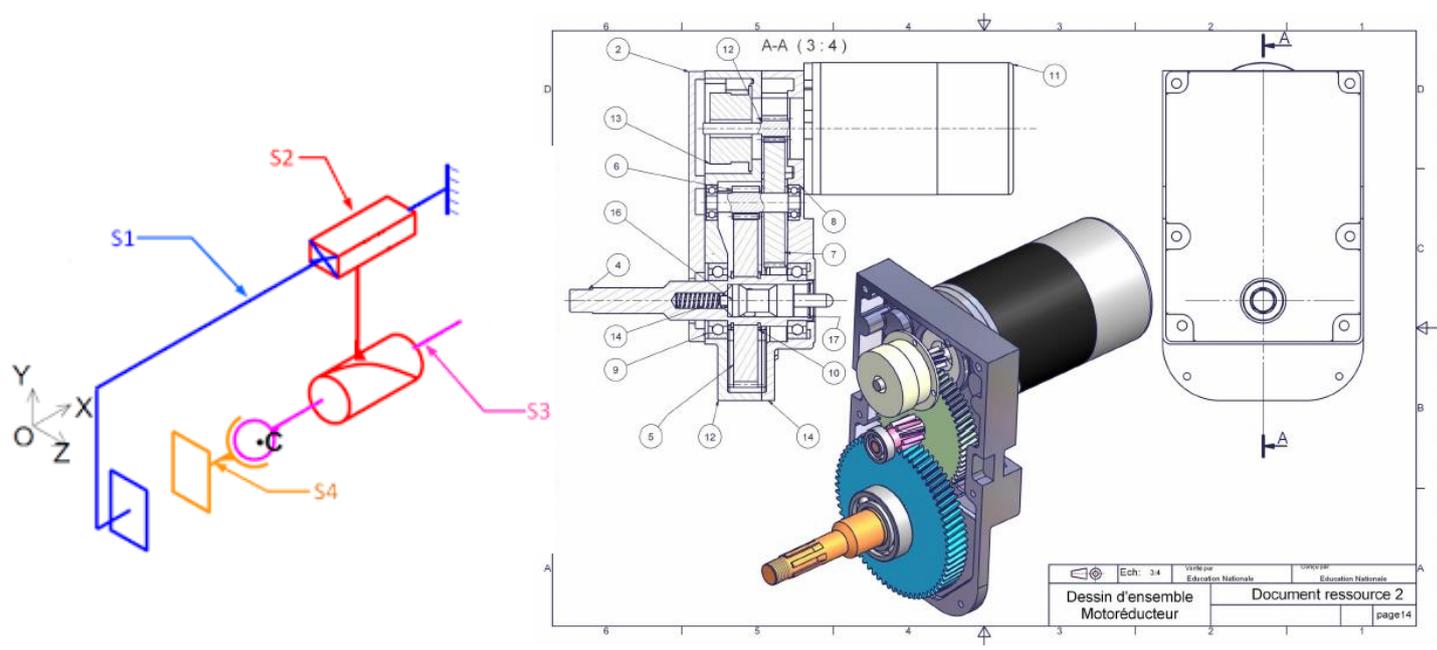
**Module 2**

**Chaine d'énergie**

---

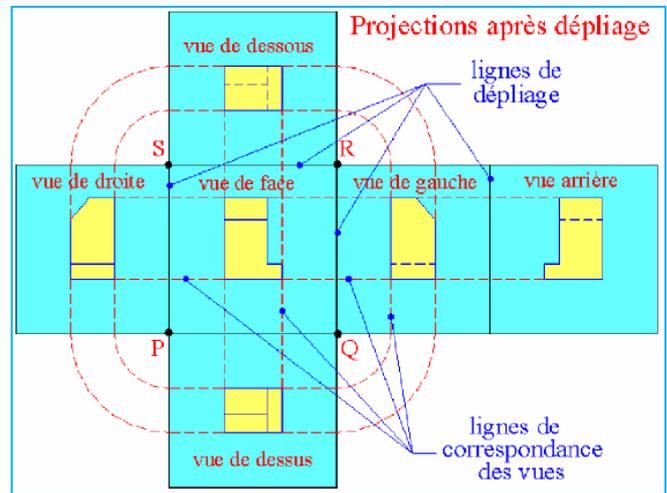
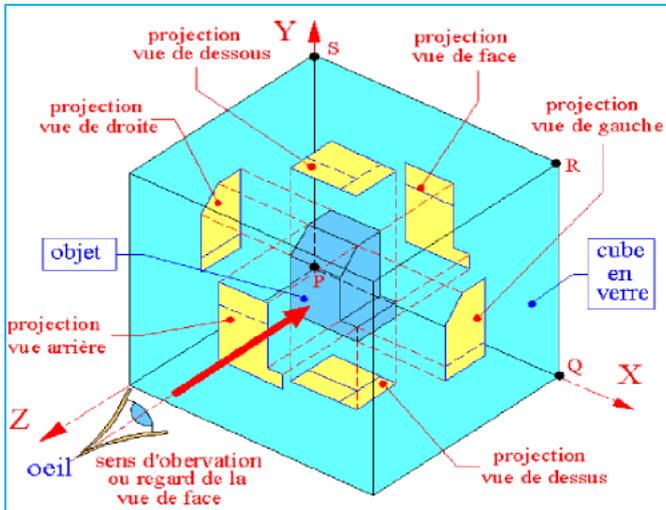


# Fonction Transmettre

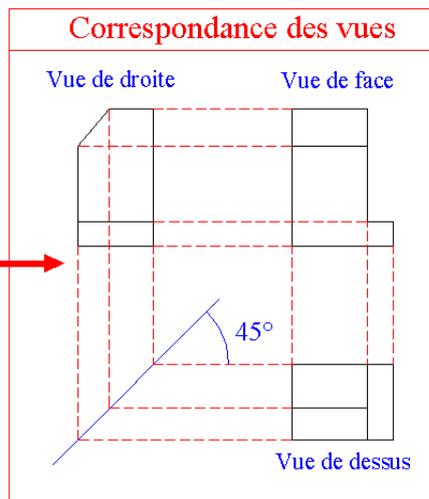
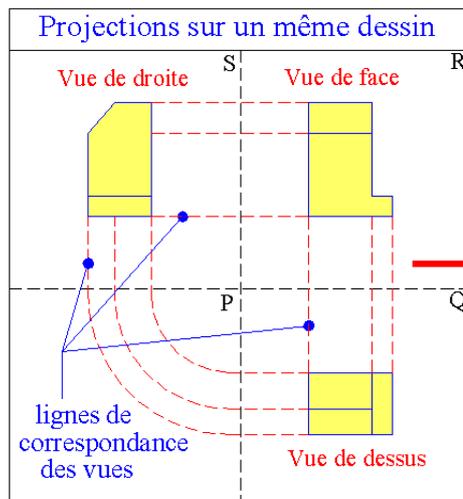


## Projection orthogonale

- On imagine l'objet à représenter à l'intérieur d'un **cube** et on projette l'objet sur les **6 faces** (face, arrière, droite, gauche, dessus et dessous). Les positions des différentes vues par rapport à la vue de face sont obtenues après dépliage et rotation par rapport aux arêtes du plan PQRS de la vue de face.



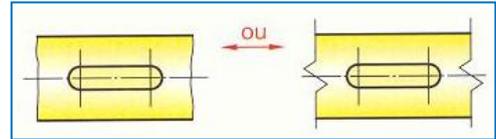
- On note ce qui suit :
  - 3 vues** sont suffisantes pour décrire les caractéristiques et les dimensions d'un objet.
  - Par convention, on utilise les vues de **face**, de **droite** et de **dessus**, sauf si un détail n'apparaîtrait pas sur ces trois vues.
  - La **vue la plus représentative** de la pièce sera choisie comme **vue de face**.
- Les différentes vues sont caractérisées par ce qui suit :
  - Les vues de face, de gauche et de droite sont alignées **horizontalement**.
  - Les vues de face, de dessus et de dessous sont alignées **verticalement**.
  - La largeur de la vue de gauche (ou de droite) est égale à la hauteur de la vue de dessus (ou de dessous). Cette propriété est mise en évidence graphiquement en utilisant la **droite à 45°**.



## Vues ou représentations particulières

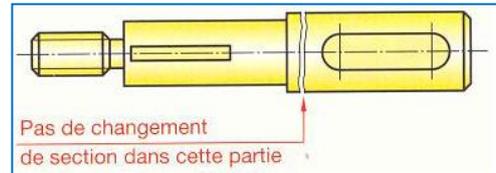
### Vue partielle

Dans certains cas, une vue partielle est suffisante pour la compréhension du dessin. Cette vue doit être limitée par un trait continu fin ondule ou rectiligne en zigzag.



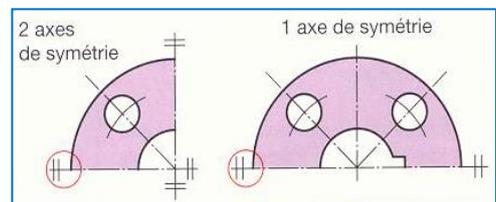
### Vue interrompue

Pour un objet très long de section uniforme, on peut se borner à une représentation des parties essentielles. Les parties conservées sont rapprochées les unes des autres et limitées comme dans une vue partielle.



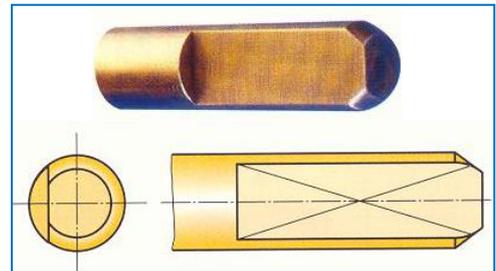
### Pièce symétrique

Pour simplifier ou gagner de la place dans la zone de dessin pour une vue comportant des axes de symétrie, on peut faire une représentation par une fraction de vue. Repérer les extrémités des axes de symétrie par deux petits traits fins perpendiculaires à ces axes.



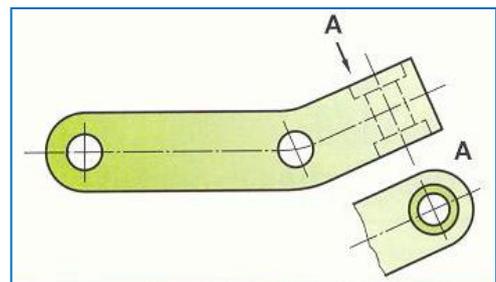
### Pièce avec méplat

Un méplat est une surface plane sur une pièce usinée cylindrique. Il est indiqué par ses diagonales principales marquées en trait fin.



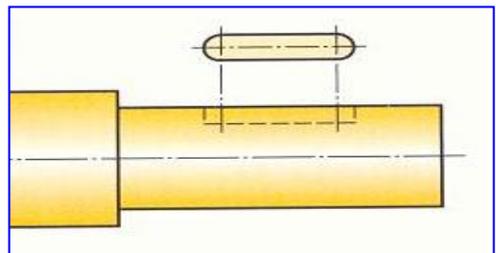
### Vue oblique

Lorsqu'une partie de l'objet est observée suivant une direction oblique, on peut la considérer comme une direction principale, mais uniquement pour la partie concernée de l'objet. On évite ainsi une représentation déformée, sans intérêt pour la compréhension. Repérer la direction de l'observation par la même lettre majuscule.



### Vue locale

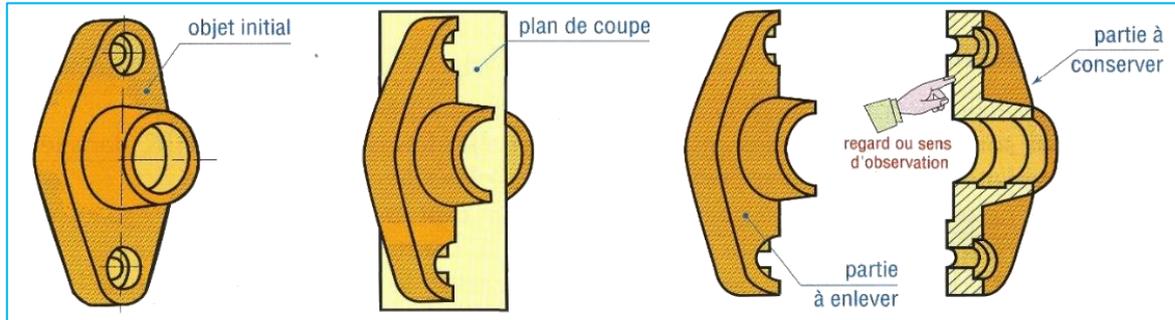
S'il n'y a pas d'ambiguïté, on peut effectuer une vue locale à la place d'une vue complète. La vue locale doit être reliée à la vue correspondante par un trait fin.



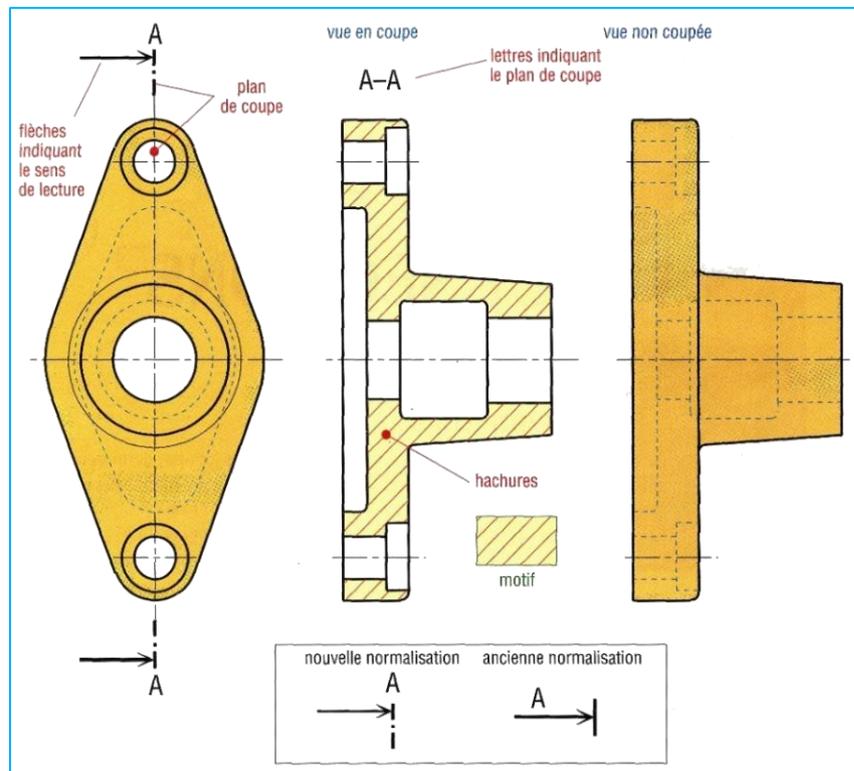
## Les coupes

### Principe

- Pour améliorer la définition et la lecture d'un dessin, on utilise des **vues en coupe** pour voir **l'intérieur** du système.

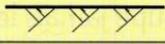
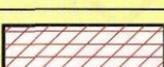
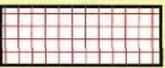
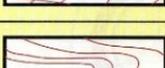
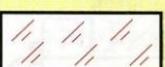


Principe des vues coupées et plan de coupe.



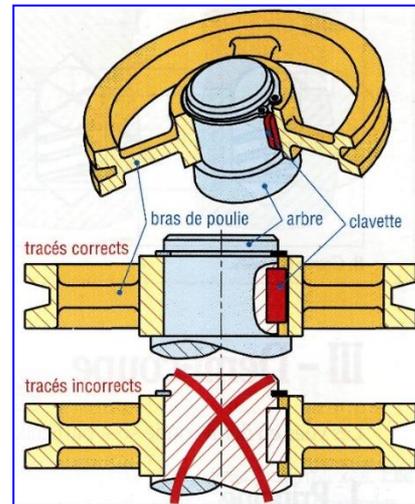
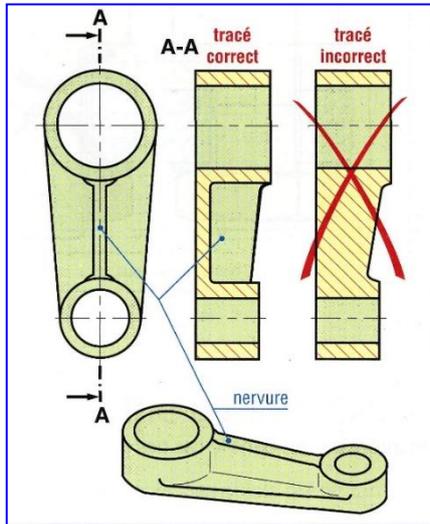
Représentation normalisée de l'objet coupé

### Nervures et bras de poulie ou volant

Hachures – motifs usuels		
	usage général tous métaux et alliages	 sol naturel
	métaux et alliages légers (aluminium ...)	 béton
	cuivre et ses alliages béton léger	 béton armé
	matières plastiques ou isolantes (élec.) élastomères	 bois en coupe transversale
	bobinages électro-aimants	 bois en coupe longitudinale
	antifriction	
	verre, porcelaine, céramique ...	
	isolant thermique	

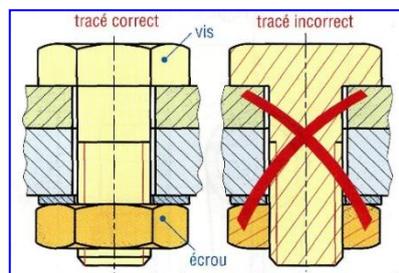
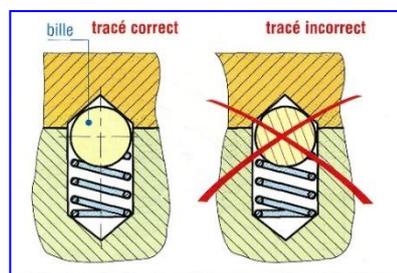
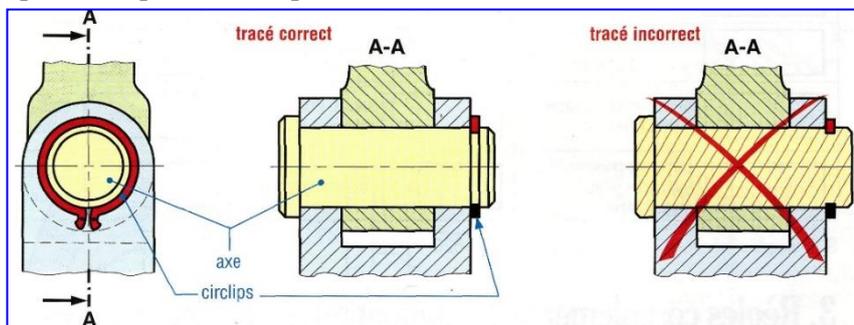
## Nervures et bras de poulie ou volant

- On ne coupe jamais les nervures lorsque le plan de coupe passe dans le plan de leur plus grande surface ; c'est de même pour les bras de poulie, de volant ou de roue. Cela permet de différencier une pièce **massive** d'une pièce nervurée de même section.



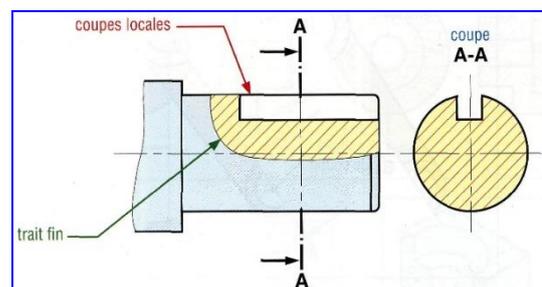
## Éléments non coupés

- On ne coupe jamais les pièces de révolution pleines, cylindriques ou sphériques, telles que axes, arbres, billes, vis, boulons, écrous, rivets, clavettes, etc. D'ailleurs, la règle est générale pour tout autre élément dont la coupe ne donnerait pas une représentation plus détaillée.



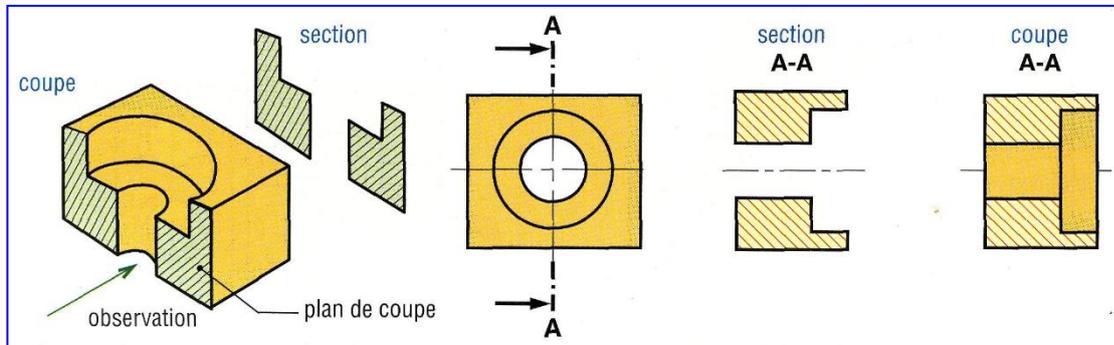
## Coupe locale ou partielle

- Elle est utilisée pour montrer en trait fort un détail local et intéressant. C'est plus avantageux qu'une coupe complète amenant trop de tracés inutiles. La zone coupée est limitée par trait fin **ondulé** ou en rectiligne **zigzag**.

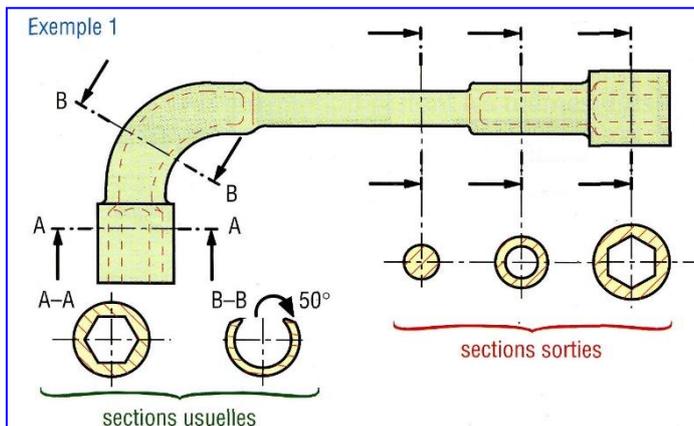


## Les sections

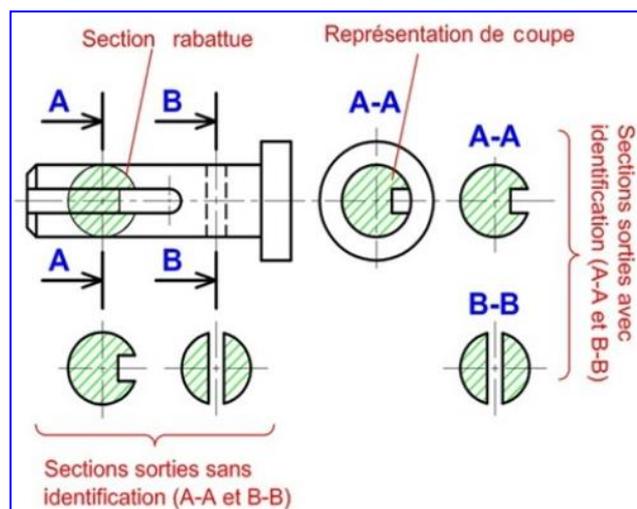
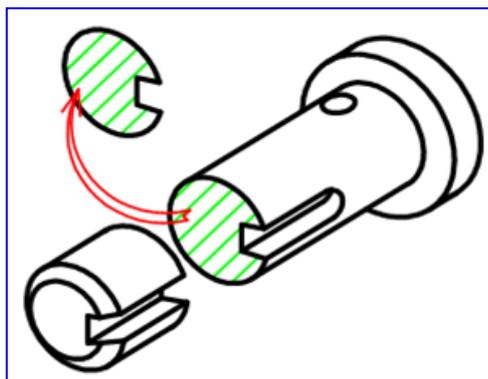
- Dans une section, **seule la partie coupée est dessinée** (là où la matière est réellement coupée ou sciée). Elles permettent de définir avec exactitude une forme en éliminant les tracés inutiles.



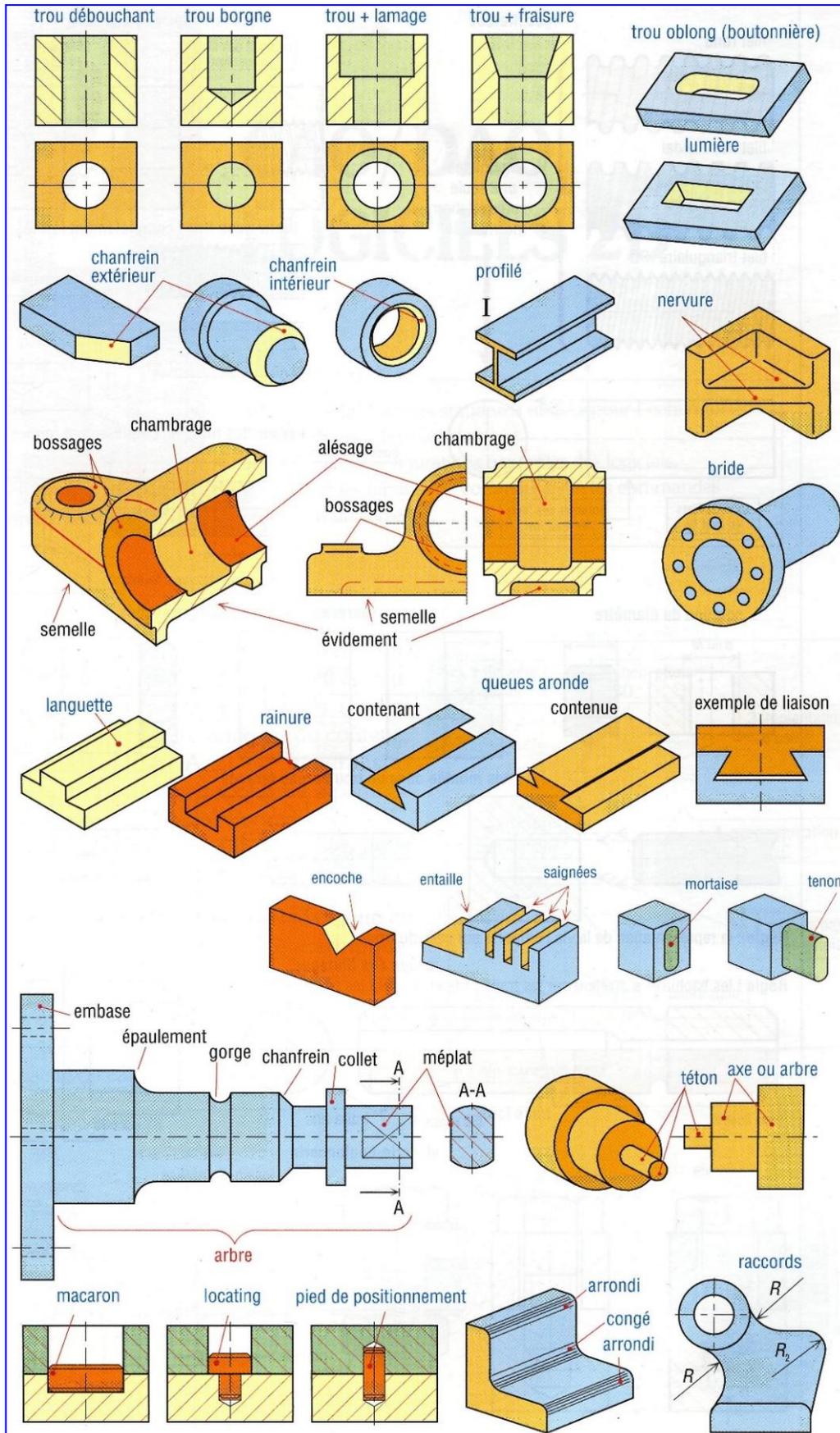
### Section de sortie



### Section rabattue



## Les formes techniques

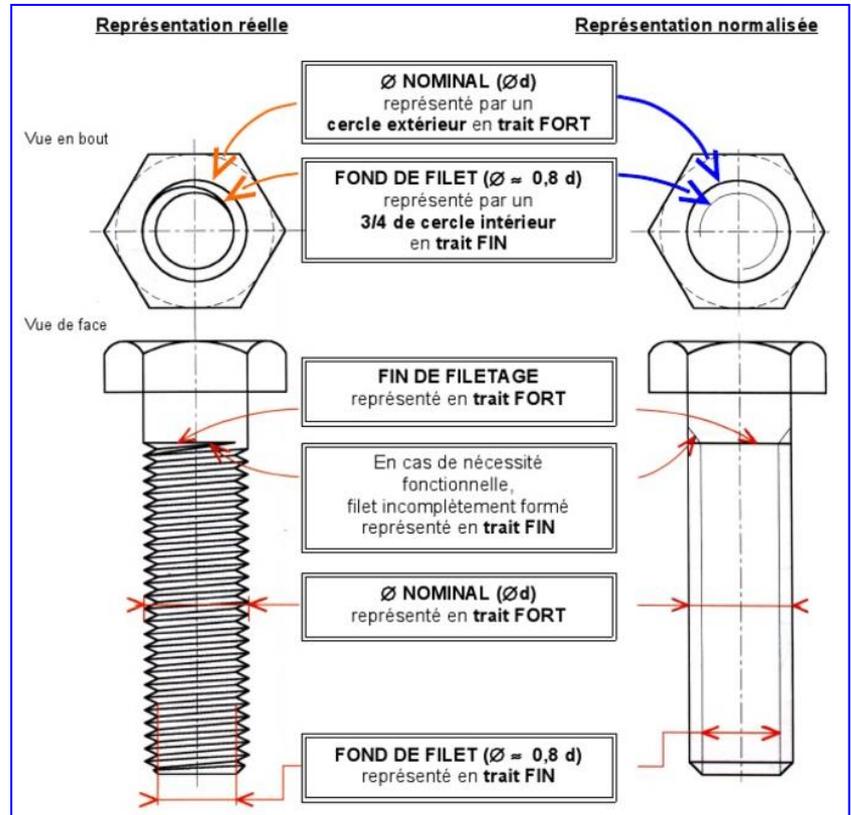


## Filetage et taraudage

- Un **filetage** est obtenu à partir d'un arbre (**filetage**) ou d'un alésage (**taraudage**) sur lequel ont été réalisées une ou plusieurs **rainures hélicoïdales**.

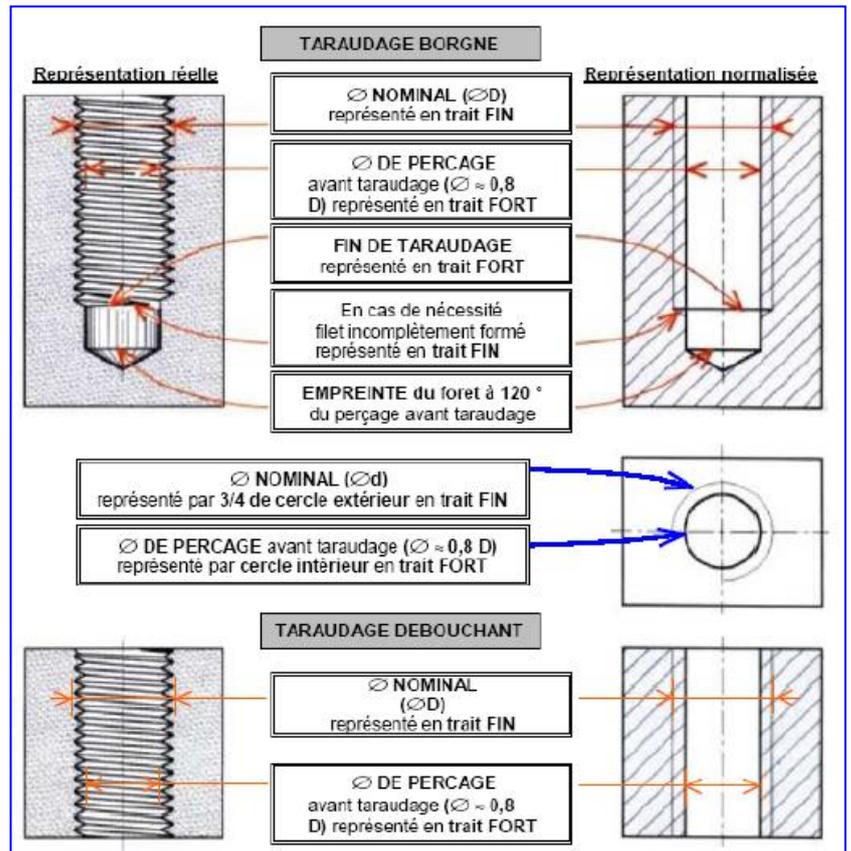
### Filetage

- Le filetage** : Une tige est « **filetée** » s'appelle généralement « **vis** ».



### Taraudage

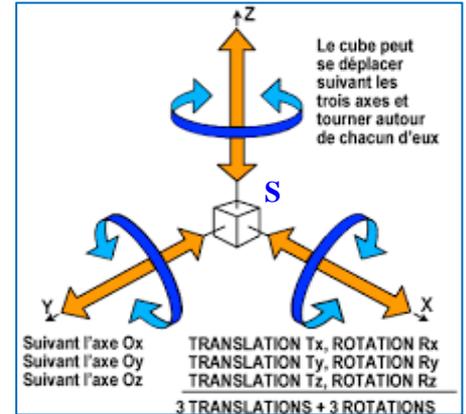
- Le taraudage** : Un trou est « **taraudé** » s'appelle généralement « **écrou** ».



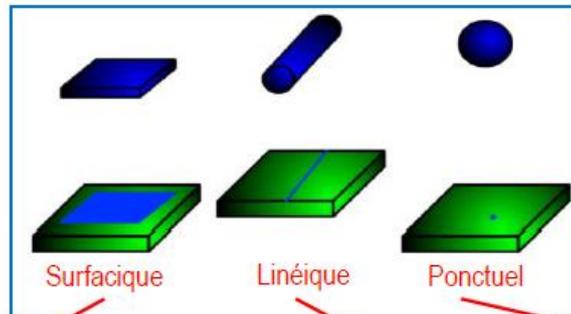
## Les liaisons mécaniques

### Degrés de liberté

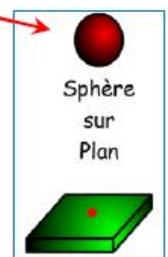
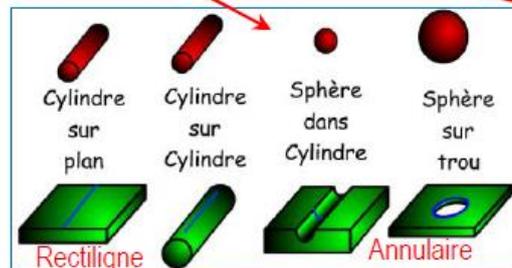
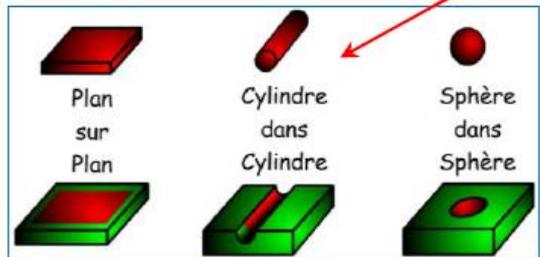
- Un **solide S** libre dans l'espace à 3 dimensions, peut se déplacer dans tous les sens.
- Etablir une **liaison** mécanique entre 2 solides, c'est supprimer un certain nombre de degrés de liberté entre ces 2 solides par des **surfaces de contact**, appelées **surfaces fonctionnelles** de la liaison.



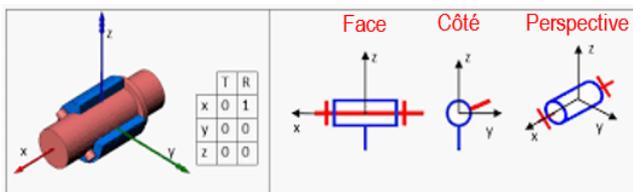
### Types de surface de contact



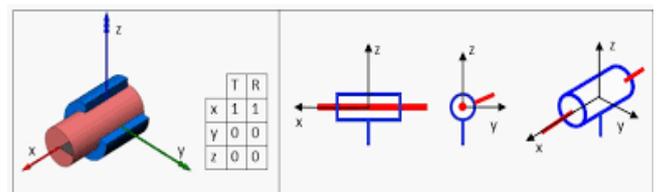
**Note :** Annulaire qui provient du mot anneau, signifie donc circulaire



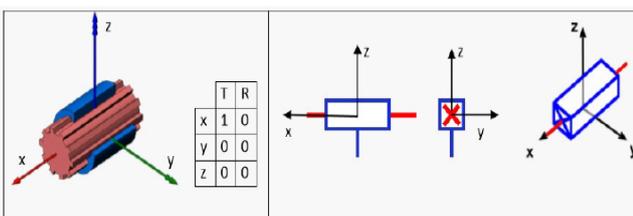
### Liaisons très courantes



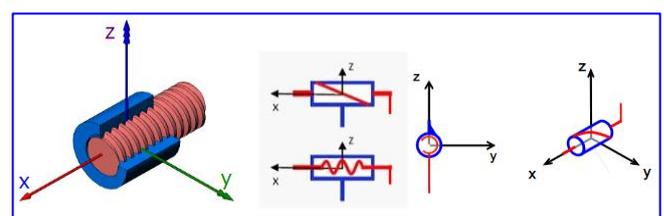
Liaison pivot



Liaison pivot glissant



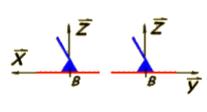
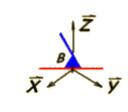
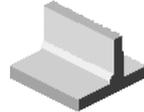
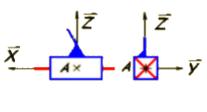
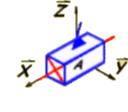
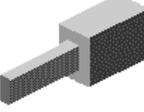
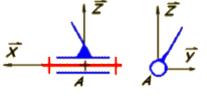
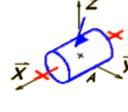
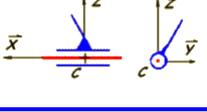
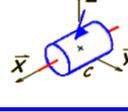
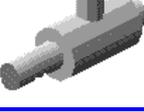
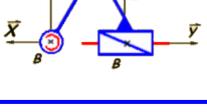
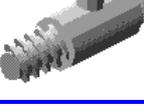
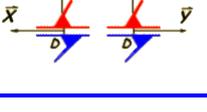
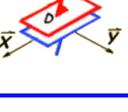
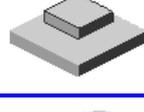
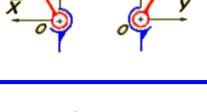
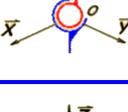
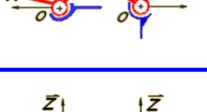
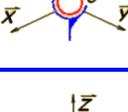
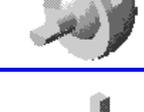
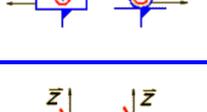
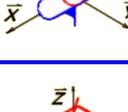
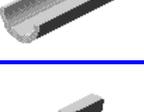
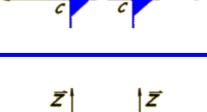
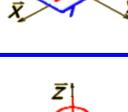
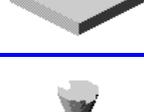
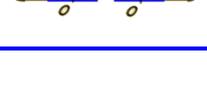
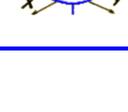
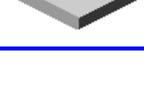
Liaison glissière



Liaison hélicoïdale

## Les 11 liaisons mécaniques normalisées

- A chaque liaison, on fait associer un **symbole normalisé** qu'on utilise dans un **schéma cinématique**, qui est un modèle représentant simplement l'aspect cinématique d'un mécanisme.

	Nom de la liaison	Représentations planes	Perspective	Degrés de liberté	Exemple	Description
1	Liaison <b>encastrement</b> de centre B			Translation 0 0 0 Rotation 0 0 0		La liaison <b>Encastrement</b> entre 2 solides 1 et 2 ne permet aucun mouvement de l'un par rapport à l'autre. Elle est aussi appelée « <b>liaison complète</b> ».
2	Liaison <b>glissière</b> de centre A et d'axe X			Translation Tx 0 0 Rotation 0 0 0		La liaison <b>Glissière</b> entre 2 solides 1 et 2 permet un mouvement de translation de l'un par rapport à l'autre, selon un même axe.
3	Liaison <b>pivot</b> de centre A et d'axe X			Translation 0 0 0 Rotation Rx 0 0		La liaison <b>Pivot</b> entre 2 solides 1 et 2 permet un mouvement de rotation de l'un par rapport à l'autre, selon un même axe.
4	Liaison <b>Pivot Glissant</b> de centre C et d'axe X			Translation Tx 0 0 Rotation Rx 0 0		La liaison <b>Pivot Glissant</b> entre 2 solides 1 et 2 permet une rotation et une translation de l'un par rapport à l'autre, selon un même axe.
5	Liaison <b>hélicoïdale</b> de centre B et d'axe Y			Translation Tx 0 0 Rotation Rx 0 0		La liaison <b>Hélicoïdale</b> entre 2 solides 1 et 2 permet la rotation et la translation <b>conjuguée</b> de l'un par rapport à l'autre, selon un même axe.
6	Liaison <b>Appui Plan</b> de centre D et de normale Z			Translation Tx Ty 0 Rotation 0 0 Rz		La liaison <b>Appui Plan</b> entre 2 solides 1 et 2 permet la translation selon 2 axes et la rotation autour du 3e axe, de l'un par rapport à l'autre.
7	Liaison <b>rotule</b> de centre O			Translation 0 0 0 Rotation Rx Ry Rz		La liaison <b>Rotule</b> entre 2 solides 1 et 2 permet la rotation autour de 3 axes, de l'un par rapport à l'autre.
8	Liaison <b>rotule à doigt</b> de centre O d'axe X			Translation 0 0 0 Rotation 0 Ry Rz		La liaison <b>Rotule à doigt</b> entre 2 solides 1 et 2 permet la rotation autour de 2 axes concourants, de l'un par rapport à l'autre.
9	Liaison <b>linéaire annulaire</b> de centre B et d'axe X			Translation Tx 0 0 Rotation Rx Ry Rz		La liaison <b>Linéaire Annulaire</b> entre 2 solides 1 et 2 permet la rotation autour de 3 axes et la translation selon l'un d'eux, de l'un par rapport à l'autre.
10	Liaison <b>linéique rectiligne</b> de centre C, d'axe X et de normale Z			Translation Tx Ty 0 Rotation Rx 0 Rz		La liaison <b>Linéaire Rectiligne</b> entre 2 solides 1 et 2 permet la translation selon 2 axes, la rotation autour de l'un d'eux et la rotation autour du 3e perpendiculaire,
11	Liaison <b>ponctuelle</b> de centre O et de normale Z			Translation Tx Ty 0 Rotation Rx Ry Rz		La liaison <b>Ponctuelle</b> entre 2 solides 1 et 2 permet la rotation autour de 3 axes et la translation selon 2 d'entre eux, de l'un par rapport à l'autre.

## Elaboration d'un schéma cinématique

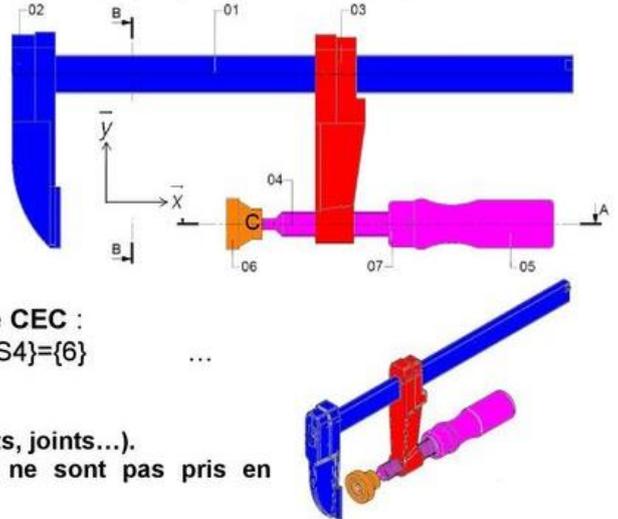
- On résume ce processus avec comme support d'exemple, un **serre-joint** :

### Étape 1 : Identifier les Classes d'Équivalence Cinématique (CEC).

CEC : groupes de pièces en liaison encastrement entre elles (n'ayant aucun mouvement relatif entre elles).

Cette étape se divise en 2 sous-étapes :

- 1) **Rechercher et colorier différemment chaque CEC** sur la représentation technique 2D ou 3D.
- 2) **Nommer chacune des CEC (S1, S2...)** et lister, dans l'ordre croissant les pièces qui les constituent de chaque CEC :  
 $\{S1\} = \{1, 2\}$        $\{S2\} = \{3\}$        $\{S3\} = \{4, 5, 7\}$        $\{S4\} = \{6\}$       ...



Remarques :

Toutes les pièces déformables sont à exclure des CEC (ressorts, joints...).

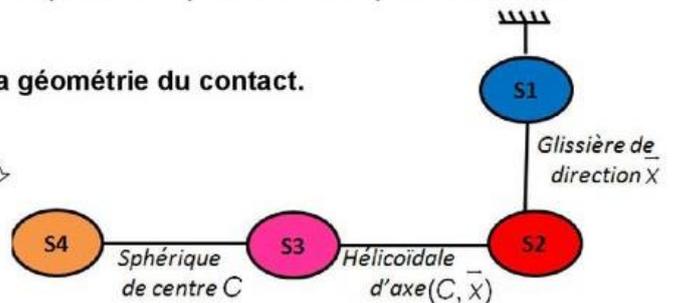
Les éléments roulants (billes, rouleaux...) des roulements ne sont pas pris en compte.

### Étape 2 : Réaliser le graphe de liaison (minimum de liaisons donc sans liaison en parallèle).

- 1) Représenter les CEC par des bulles et les placer en respectant si possible leurs positions relatives observées sur le système réel.
- 2) Préciser la CEC considérée comme fixe.
- 3) **Déterminer les liaisons entre ces CEC en identifiant la géométrie du contact.**

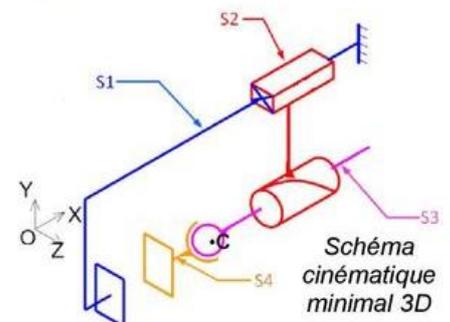
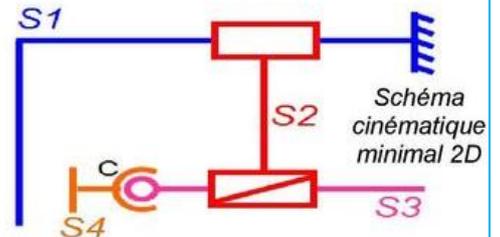
Exemple : graphe de liaison du serre-joint

NB : On ne verra JAMAIS apparaître de liaison encastrement sur un graphe de liaison.



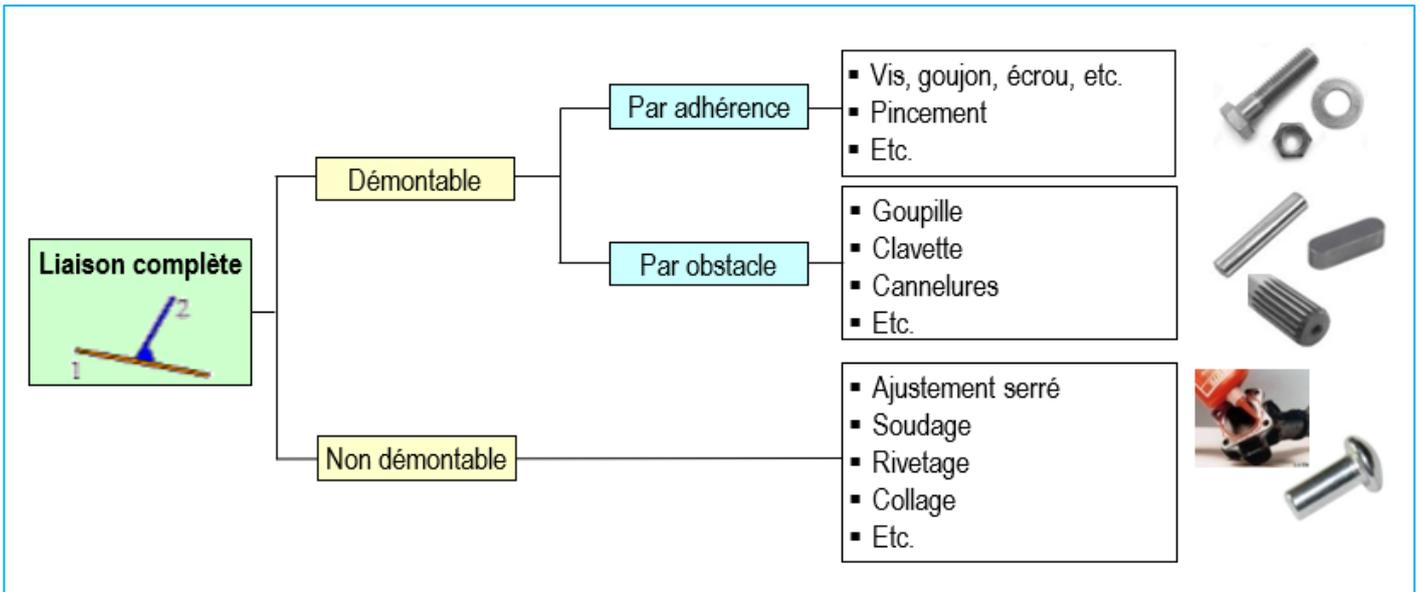
### Étape 3 : Tracer le schéma cinématique minimal.

- 1) **Positionner les centres et les axes des liaisons** en respectant si possible leurs positions relatives observées sur le système réel.
- 2) **Mettre en place les représentations symboliques des liaisons élémentaires et du bâti** en utilisant le code de couleur retenu et en respectant leur orientation.
- 3) **Relier tous les éléments de même couleur** en respectant si possible l'architecture du système réel et en évitant que des traits se croisent.
- 4) Compléter « éventuellement » par quelques traits le schéma pour faciliter la compréhension.
- 5) vérifier la cohérence entre les mouvements possibles entre les CEC sur le schéma cinématique et les mouvements observés sur le système réel.

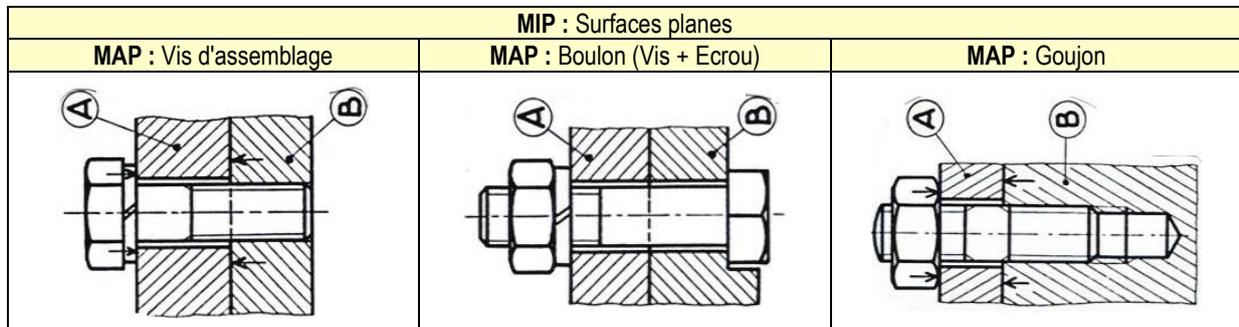


## Liaison encastrement : solutions constructives

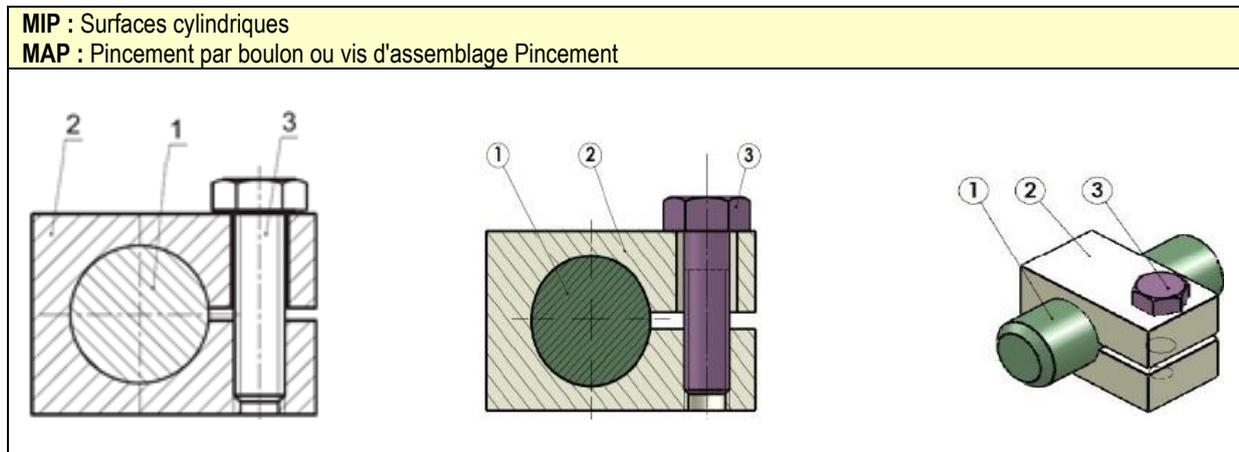
- Pour réaliser une liaison encastrement entre 2 pièces, il faut assurer les 2 fonctions techniques suivantes :
  - **La mise en position (MIP) :** Elle consiste à **mettre en contact** des surfaces (planes, cylindriques, etc.) pour supprimer des degrés de liberté pour **préparer** la réalisation de la liaison encastrement.
  - **Le maintien de position (MAP) :** Elle consiste à utiliser une **solution technologique** (vissage, soudage, etc.) pour **maintenir les éléments assemblés** et éviter leur démontage.



### Par éléments filetés



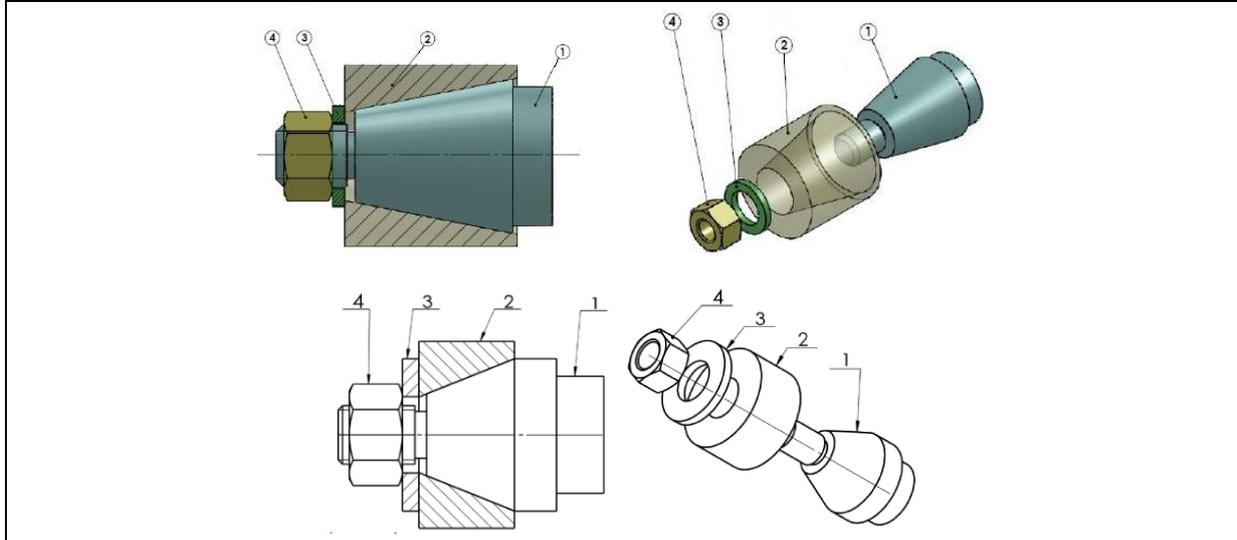
### Par pincement



## Par emmanchement conique et écrou

MIP : Surfaces coniques

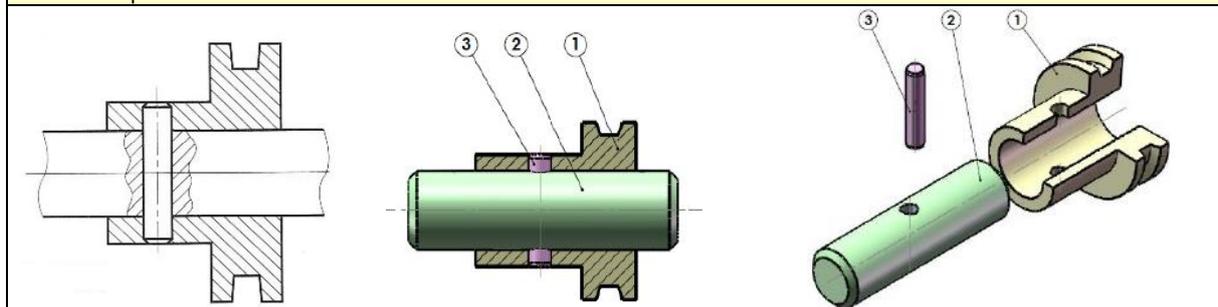
MAP : Ecrou + Rondelle d'appui + cone



## Par Goupille (Goupillage)

MIP : Surface cylindrique

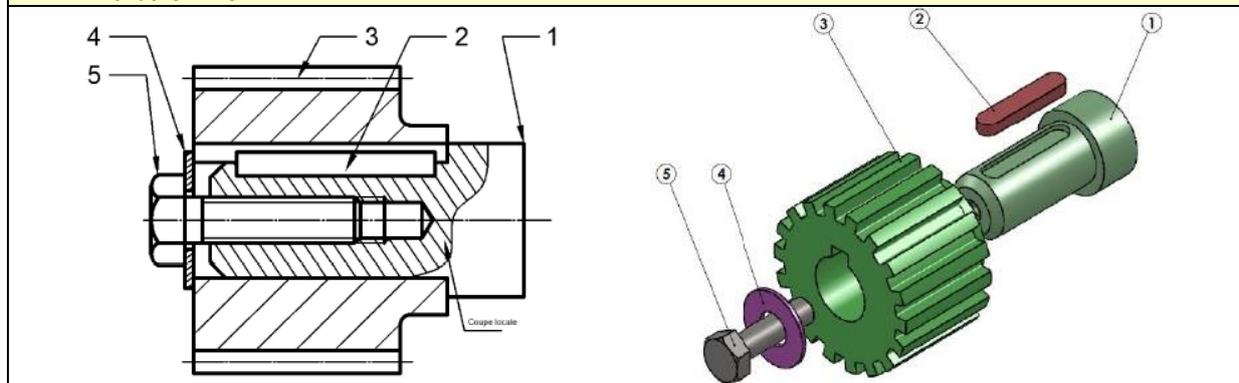
MAP : Goupille



## Par Clavette (Clavetage)

MIP : Surfaces cylindrique + Surface plane + Clavette

MAP = Rondelle + Vis

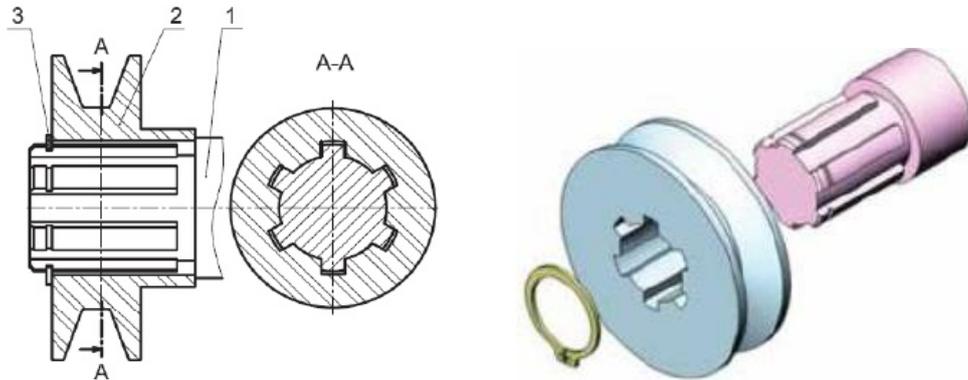


- L'assemblage arbre-clavette-alésage est tel que :
  - La clavette est **montée serrée sur l'arbre**.
  - La clavette est **montée glissante sur l'alésage**.

## Par Cannelures

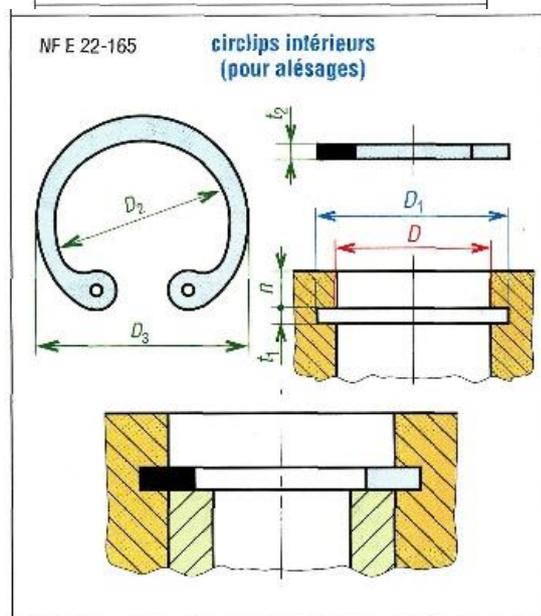
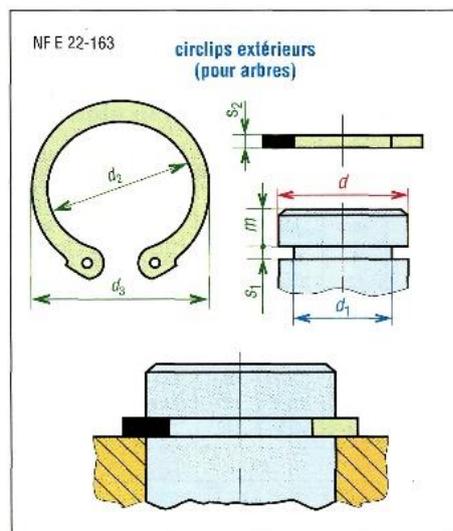
MIP : Surfaces cylindrique + Surface plane

MAP : Anneau élastique + epaulement



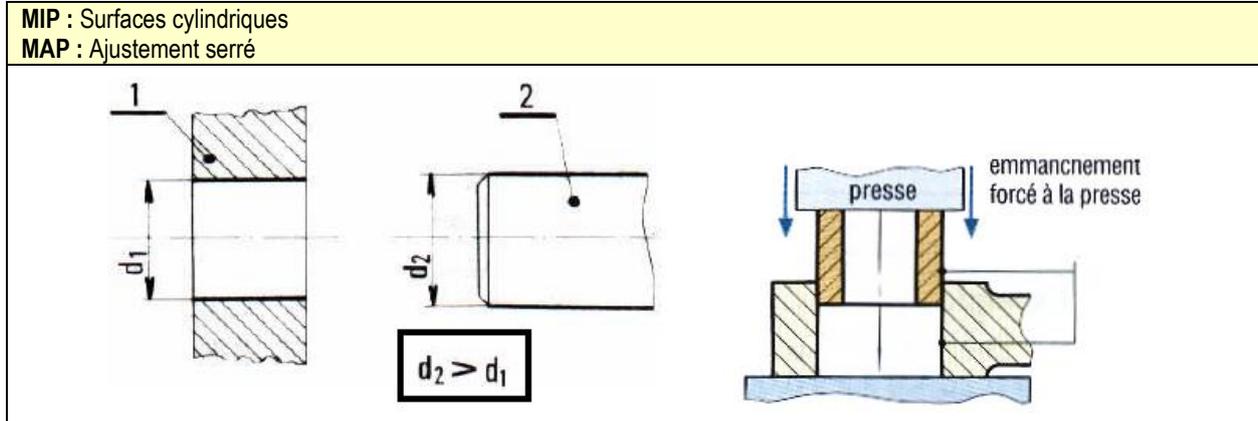
### Anneaux élastiques :

- Les anneaux élastiques sont des composants **d'assemblage mécanique**.
- Ils permettent la **fixation axiale ou l'épaulement** d'éléments de machines sur des arbres ou dans des alésages.



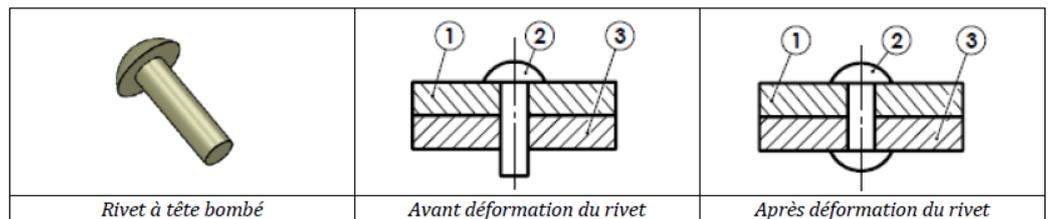
## Emanchement forcée

- Cette technique permet de réaliser une liaison encastrement non démontable par adhérence entre 2 pièces généralement cylindriques avec un **ajustement serré**.



## Rivetage

- Le rivetage consiste à assembler des **pièces minces** par déformation d'un composant mécanique appelé « **rivet** » ; cette déformation se fait à froid ou à chaud.



## Soudage

- Le soudage consiste à assembler deux ou plusieurs pièces d'une façon permanente, tout en assurant entre elles la continuité de matière soit par fusion locale des pièces soit par fusion d'un autre élément.



## Collage

- Les assemblages collés réalisent une liaison encastrement d'un ensemble de pièces en utilisant les qualités d'adhérence de certaines matières synthétiques.

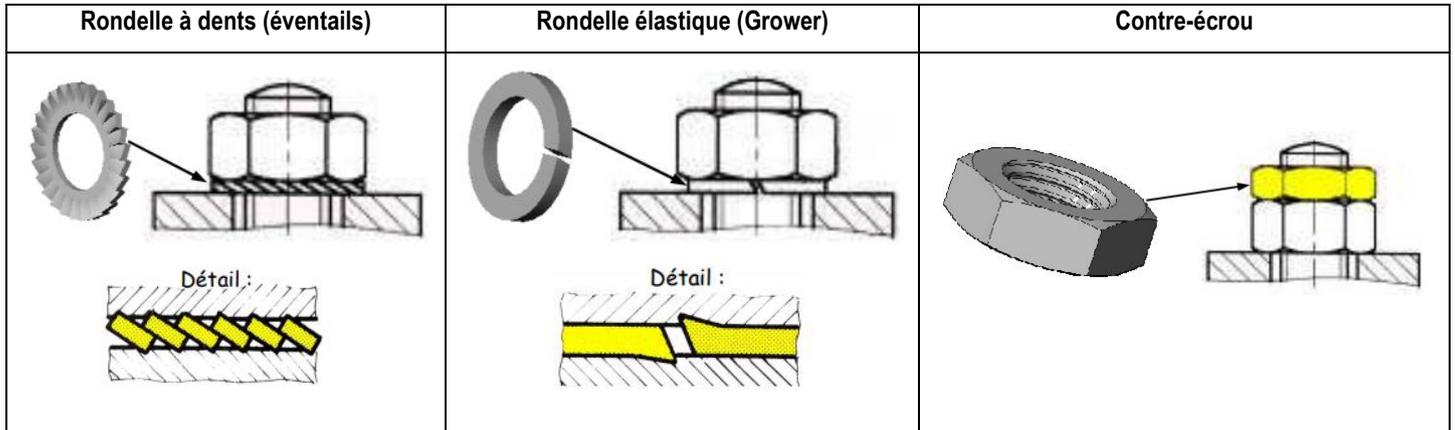


## Solutions technologiques pour assurer la fiabilité

- Les **vibrations** répétées des assemblages par éléments filetés peuvent entraîner leur **desserrage** ; il faut alors assurer la fiabilité des liaisons par **freinage**.

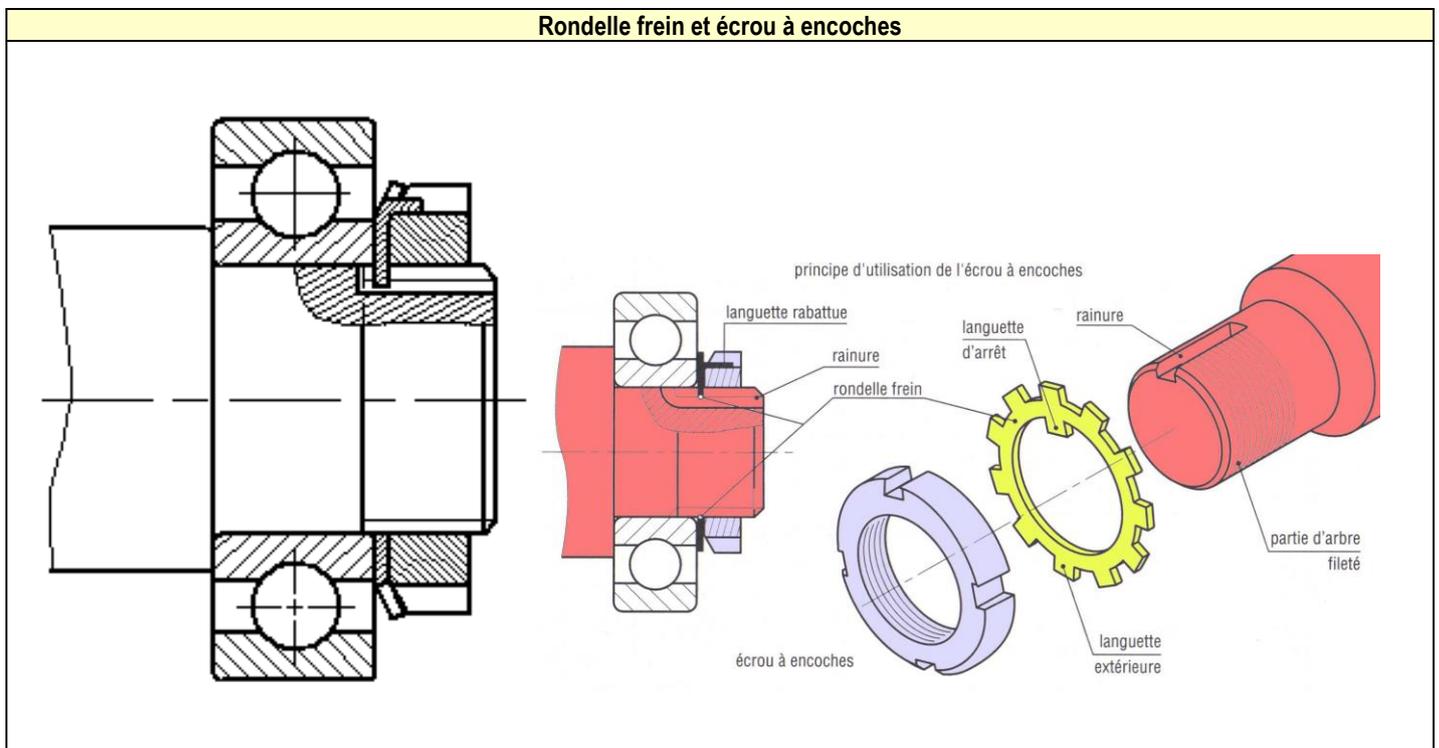
### Freinage par adhérence

- Cette solution représente une **sécurité relative**, puisque le desserrage n'est pas définitivement supprimé.

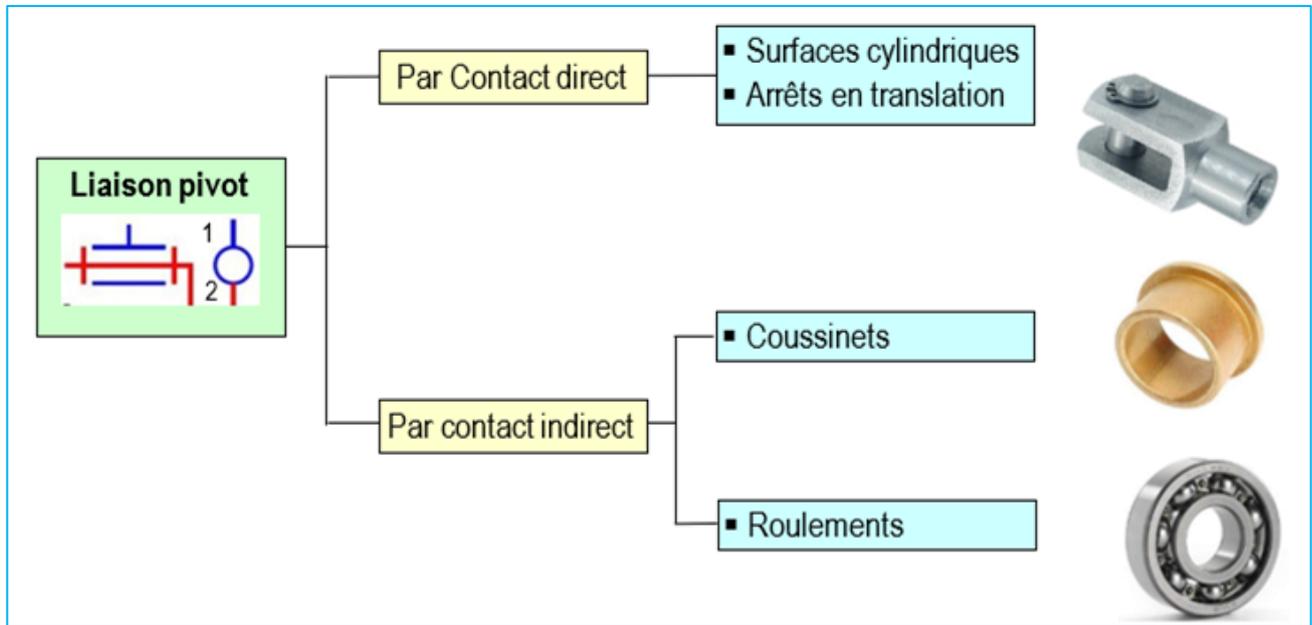


### Freinage par obstacle

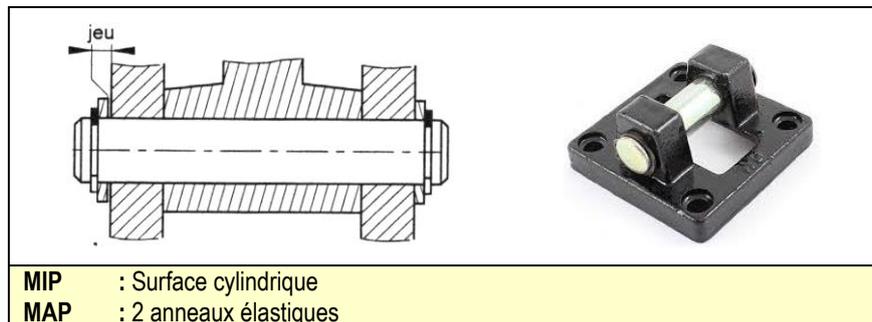
- Cette solution représente une **sécurité absolue**, puisque le desserrage est définitivement supprimé ; parmi les solutions très courantes, on trouve l'utilisation de **l'écrou à encoches** associé à une **rondelle frein**.



## Liaison pivot : solutions constructives

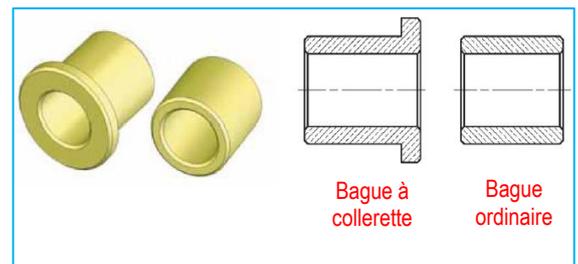
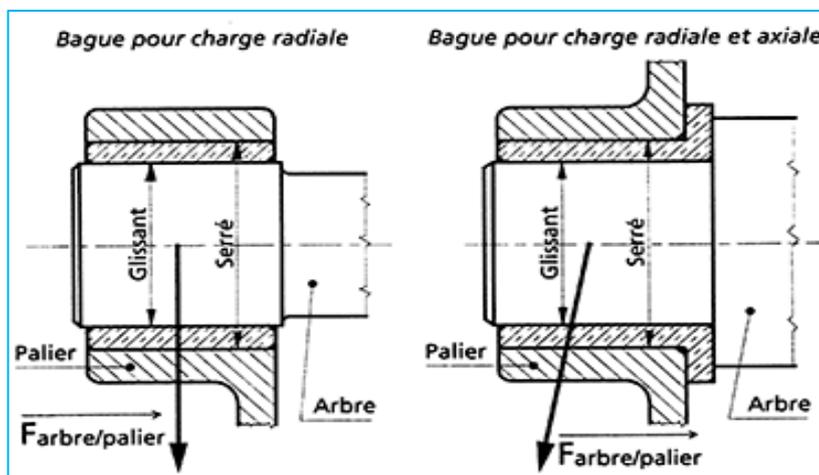


### Guidage en rotation par contact direct



### Guidage en rotation par contact indirect à l'aide de coussinet

- Un montage à coussinets, appelés aussi bagues de frottement ou bagues de guidage, permet de diminuer le coefficient de frottement et donc un fonctionnement meilleur.

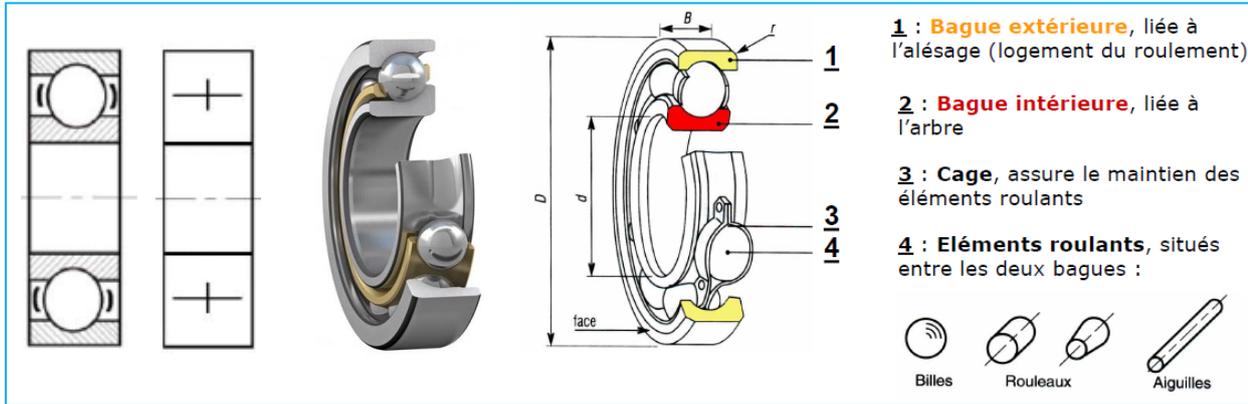


Une bague à **collerette** permet de supporter les efforts axiaux de l'arbre

## Guidage en rotation par contact indirect à l'aide de roulement

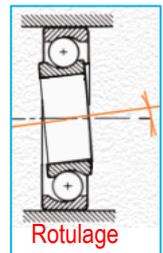
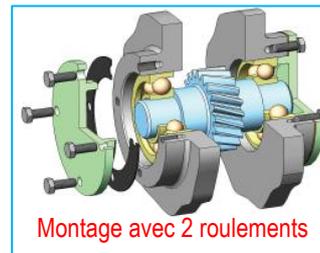
### Présentation

- Avec le roulement la **surface de contact est beaucoup plus petite**, ce qui diminue le frottement et par conséquent améliore encore plus le guidage et donc le fonctionnement.
- On présente le type de roulement à **contact radial**, qui est le plus courant et le plus économique.



### Règles de montage

- Les **roulements se montent habituellement par 2**, ce qui permet de supporter les couples radiaux ayant tendance à faire fléchir l'arbre. Par ailleurs, la plupart des roulements admettent un débattement appelé « **rotulage** ».

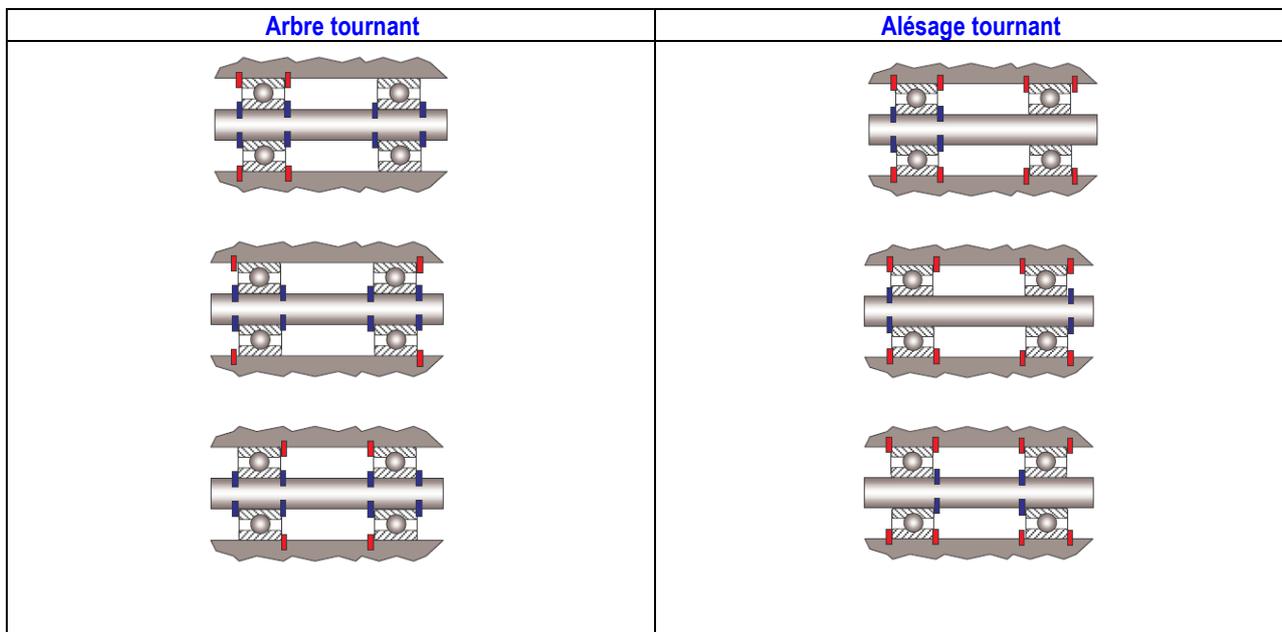


### Règle 1 : Ajustement des bagues

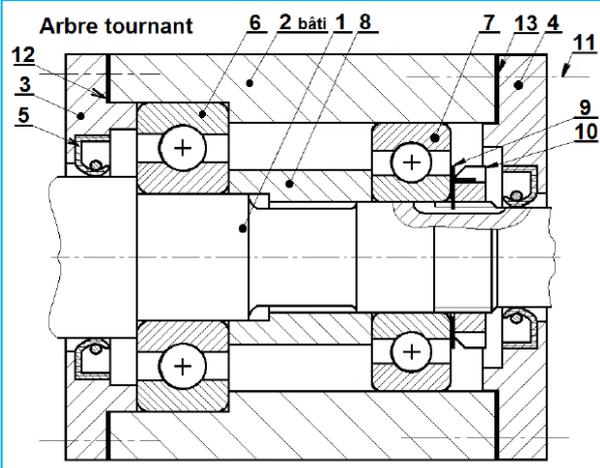
- Il faut monter **serrée** la bague qui **tourne** par rapport à la direction de la charge.
- Il faut monter **glissante** la bague qui **ne tourne pas** par rapport à la direction de la charge.

### Règle 2 : Arrêts en translation des bagues

- Bagues ajustées serrées : **4 arrêts**.
- Bagues ajustées libres : **2 arrêts**.

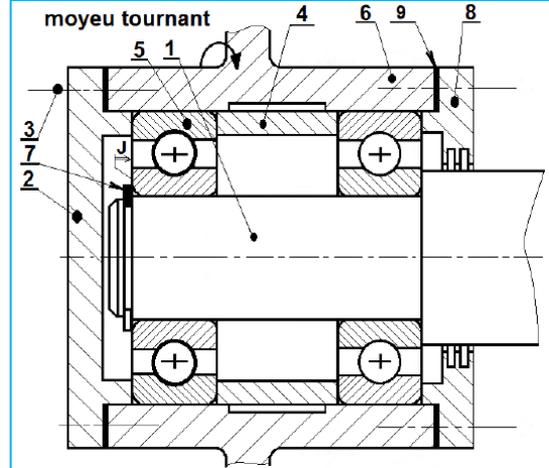


**Exemple**



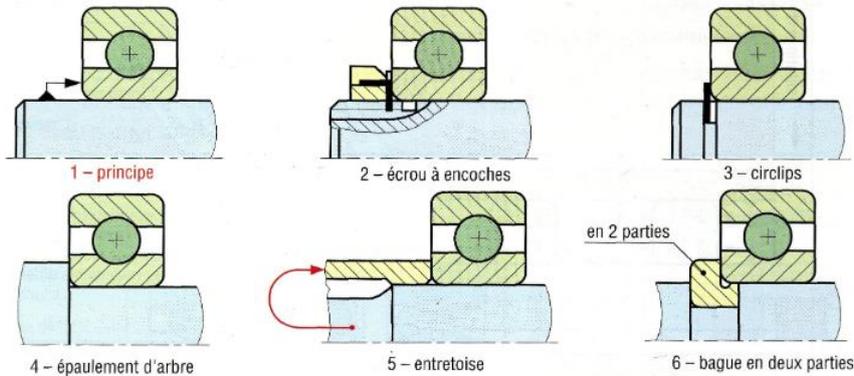
- Roulement à billes à contact radial.
- Bagues intérieures serrées et bagues extérieures libres.
- 4 arrêts pour bagues internes : Epaulement de l'arbre 1, entretoise 8 et écrou à encoches 10.
- 2 arrêts pour bagues externes : Couvercle 3 et bâti 2.

**Exemple**

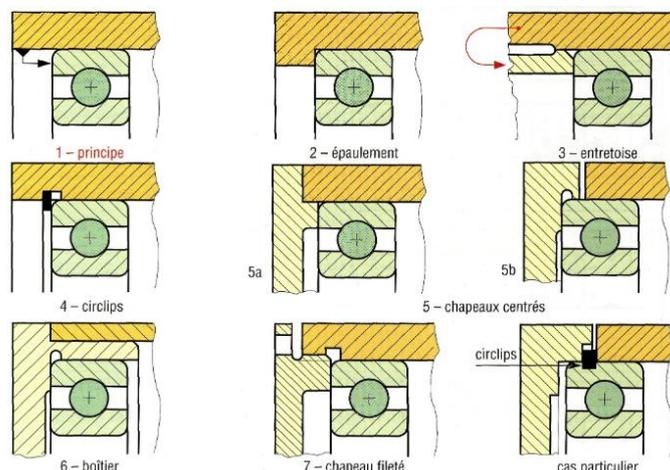


- Roulement à billes à contact radial.
- Bagues extérieures serrées et bagues intérieures libres.
- 2 arrêts pour bagues internes : Anneau élastique 7 et épaulement de l'arbre 1.
- 4 arrêts pour bagues externes : Couvercle 3, entretoise 4 et bâti 2.

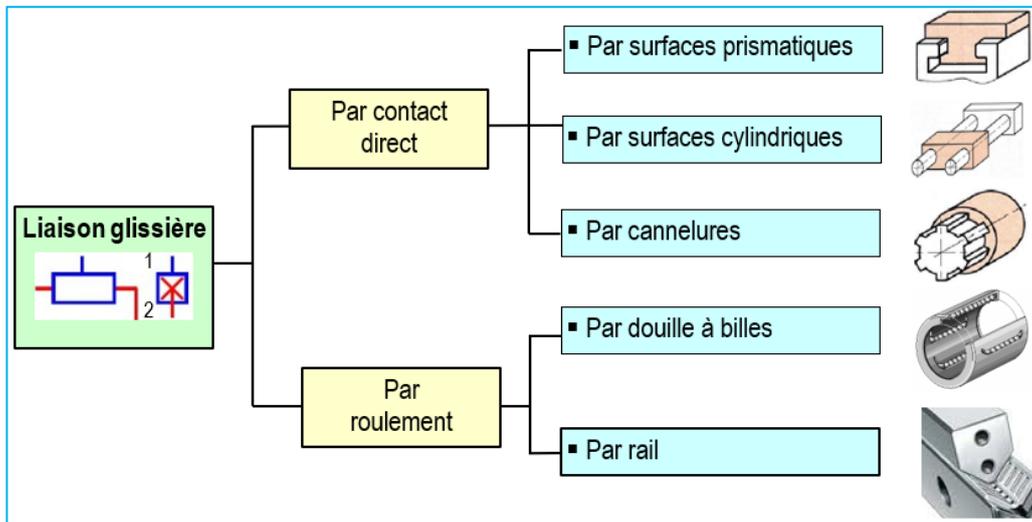
**Arrêts pour bague intérieures : Solutions constructives**



**Arrêts pour bagues extérieures : Solutions constructives**

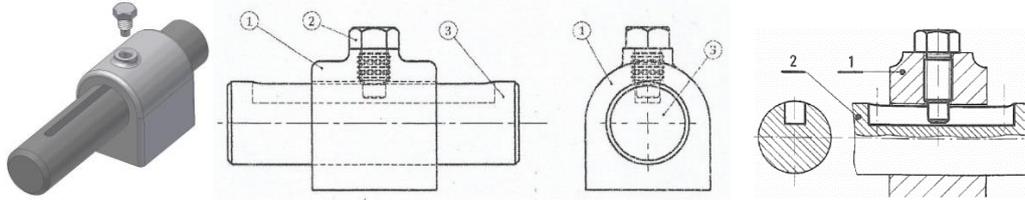
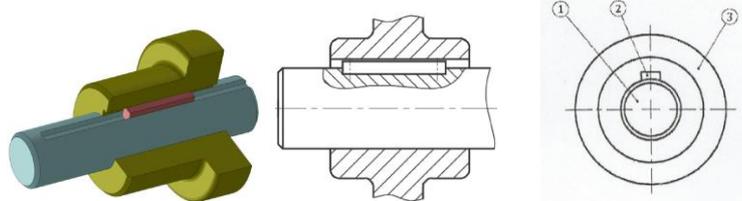
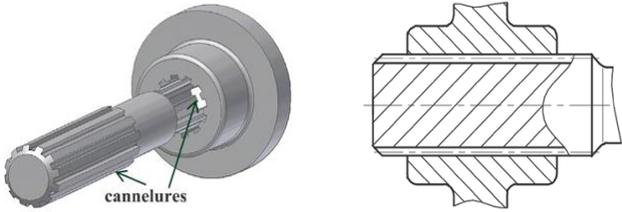
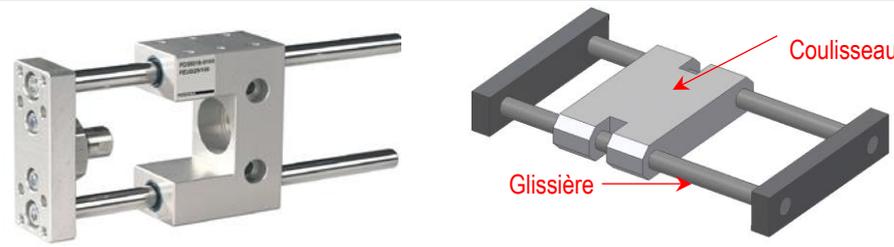


## Liaison glissière : solutions constructives

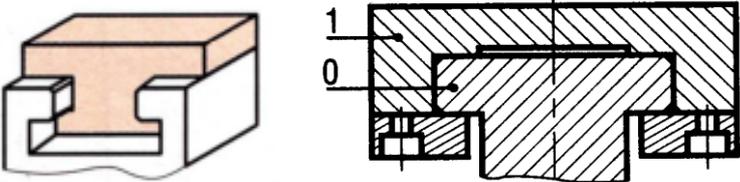
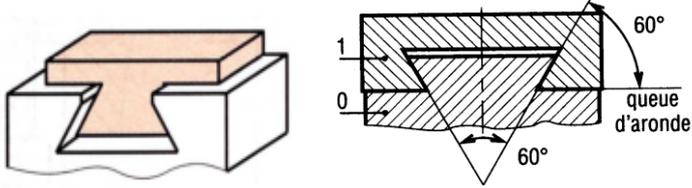
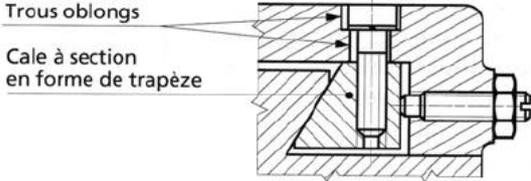


### Guidage en translation par contact direct ou glissement

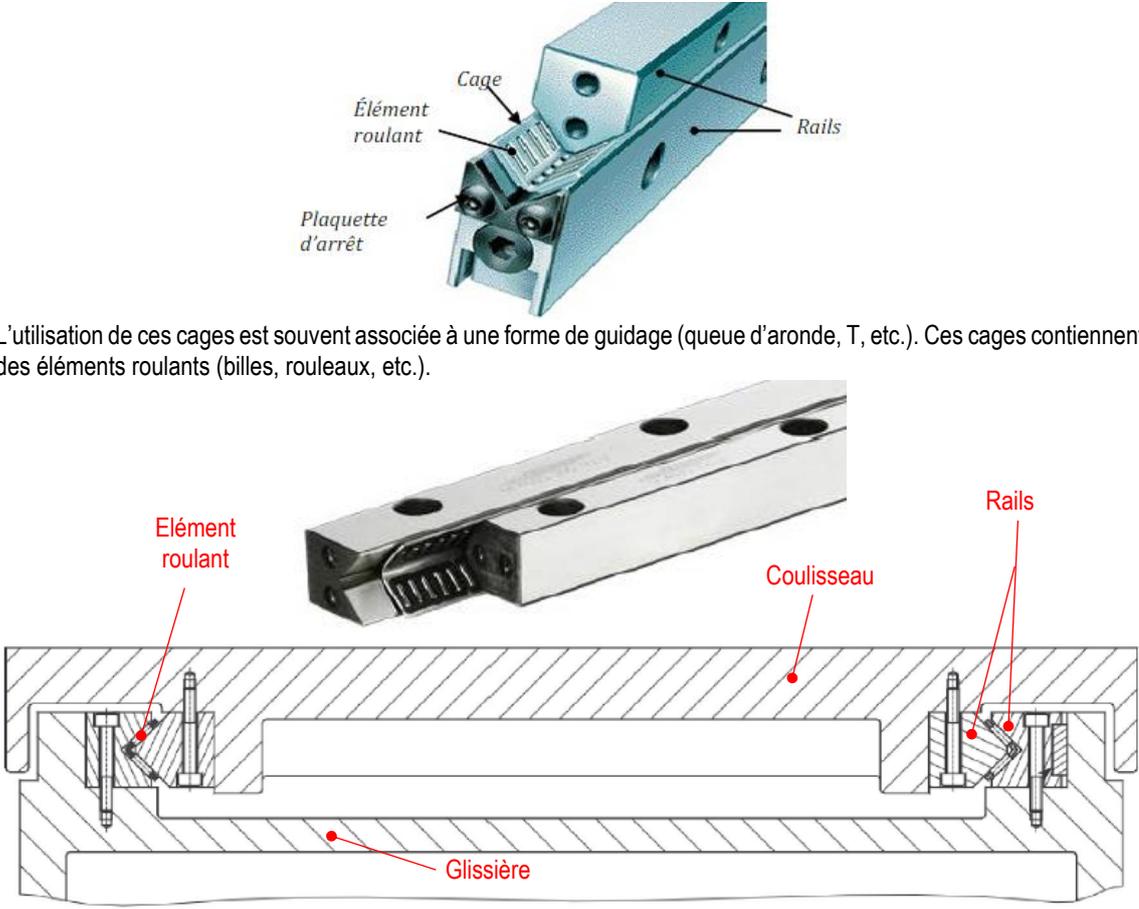
#### Guidage par surfaces cylindriques

<p><b>Guidage par vis de pression</b></p>	 <p>Dans cette solution, la rotation est supprimée par une vis à téton et une rainure dans l'arbre.</p>
<p><b>Guidage par clavette</b></p>	 <p>Ici, on utilise une clavette et une rainure dans l'arbre.</p>
<p><b>Guidage par cannelures</b></p>	 <p>Ici, le principe de base est le même qu'avec une clavette, mais avec des efforts plus élevés.</p>
<p><b>Guidage par double tige</b></p>	 <p>Les 2 liaisons pivot glissant en parallèle suppriment systématiquement la rotation.</p>

## Guidage en translation par surfaces prismatiques

<p>Forme en T</p>	
<p>Forme en Queue d'aronde</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>L'usure entre les surfaces de contact nécessite l'emploi d'un dispositif de <b>rattrapage de jeu</b> : la vis de pression sans tête ajuste la position de la cale en fonction du jeu à rattraper.</li> </ul> 

## Guidage en translation par roulement

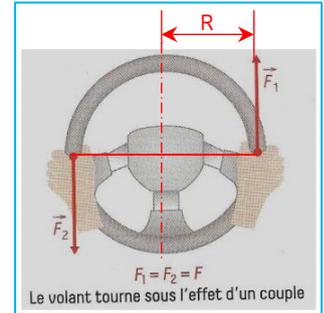
<p>Guidage par cages à éléments roulants</p>	 <p>L'utilisation de ces cages est souvent associée à une forme de guidage (queue d'aronde, T, etc.). Ces cages contiennent des éléments roulants (billes, rouleaux, etc.).</p>
--	---

## Formulaire

### Couple

- Un **couple de forces** correspond à 2 forces  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  qui ont des droites d'actions parallèles, des sens opposés et une même intensité ( $F_1 = F_2 = F$ ).
- Un couple de force, noté **C**, peut mettre un objet en rotation :

$$C = F \cdot R$$

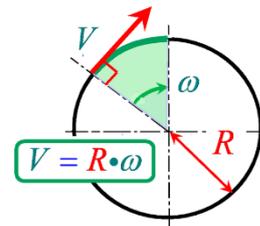


### Vitesse linéaire et vitesse angulaire

La vitesse linéaire et la vitesse angulaire sont liées par la relation :

$$V = R \cdot \omega$$

R : Rayon en mètres (m)  
 $\omega$  : Vitesse angulaire (rad/s)  
 V : Vitesse linéaire (m/s)



### Vitesses angulaire $\omega$ en (rad/s) et N en tr/min

$$N = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi}$$

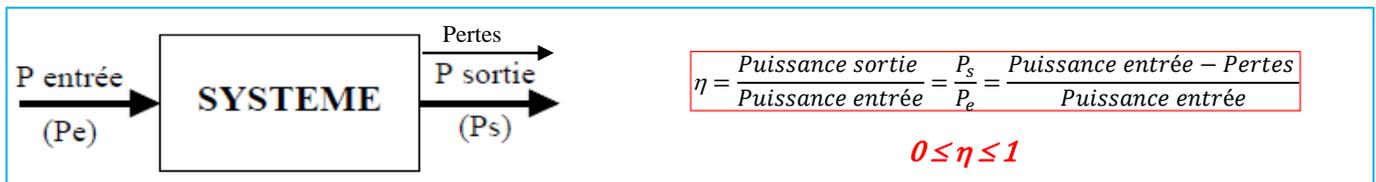
$$\omega = \frac{2\pi \cdot N}{60}$$

### Puissance mécanique

Mouvement de translation	Mouvement de rotation
$P = F \cdot V$ <ul style="list-style-type: none"> <li>P : Puissance mécanique (W)</li> <li>V : Vitesse linéaire (m/s)</li> <li>F : Force à l'origine du mouvement (N)</li> </ul>	$P = F \cdot V = F \cdot R \cdot \omega$ $P = C \cdot \omega$ <ul style="list-style-type: none"> <li>C : Couple de forces (N.m)</li> <li><math>\omega</math> : Vitesse angulaire (rd/s)</li> </ul>

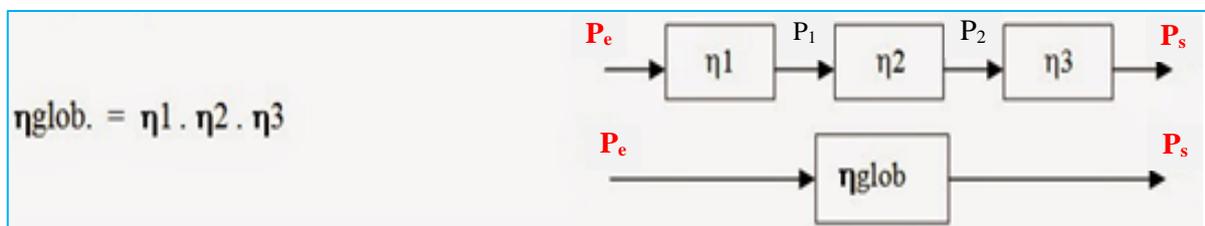
### Rendement

- Dans un mécanisme, les **frottements** entre pièces engendrent des **pertes** et rendent le mécanisme moins **rentable**. Le concept de **rendement permet** d'évaluer cette rentabilité.



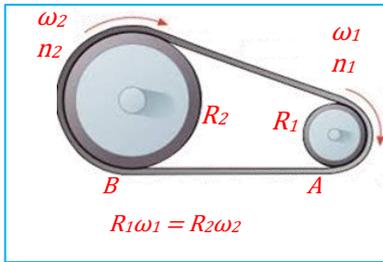
- Dans un système à **n** sous-systèmes, ayant des rendements  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ , le rendement global ( $\eta_{\text{global}}$ ) du système est égal au **produit** de ces n rendements ; par exemple, pour un système avec 3 sous-systèmes, on a :

$$\eta_{\text{global}} = \frac{P_s}{P_e} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$$

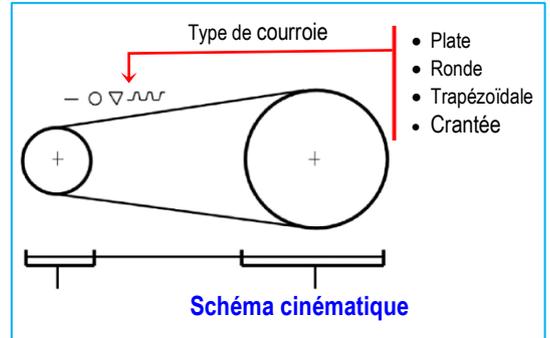


## Système Poulies-Courroie

- Il est constitué d'une **poulie menante** ou motrice, qui entraine une courroie, qui à son tour entraine la **poulie menée** ou réceptrice.
- Il permet de transmettre la puissance mécanique entre **2 arbres éloignés**, par **adhérence**.



$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{d_1}{d_2}$$

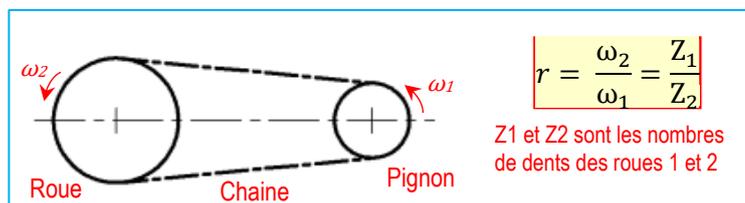
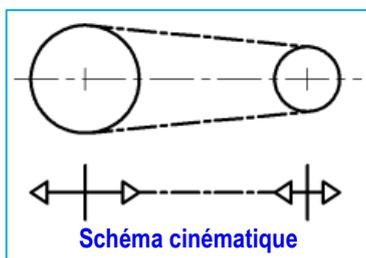
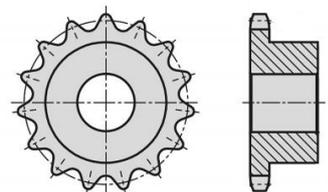
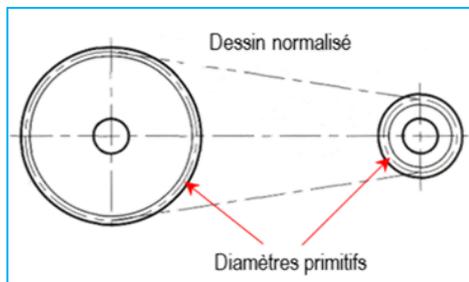
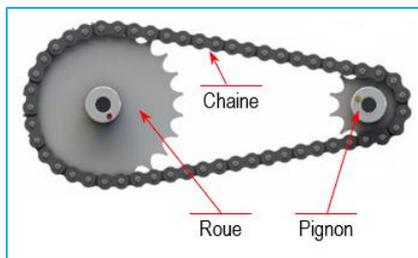


- Plate
- Ronde
- Trapézoïdale
- Crantée

Courroie plate	Courroie trapézoïdale	Courroie crantée
<p><b>Simple et silencieuse</b></p>	<p><b>Meilleure adhérence</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmission par obstacle (<b>pas de glissement</b>).</li> </ul>

## Système Roues et Chaîne

- Il est constitué de 2 **roues dentées** reliées par une **chaîne** ; la roue la plus petite est appelée **Pignon**.
- Il permet de transmettre la puissance mécanique entre **2 arbres éloignés**, par **obstacle**.



$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

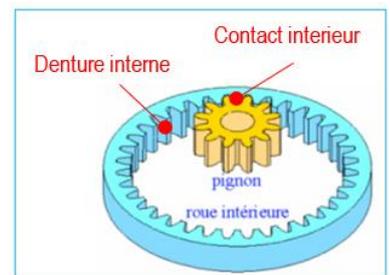
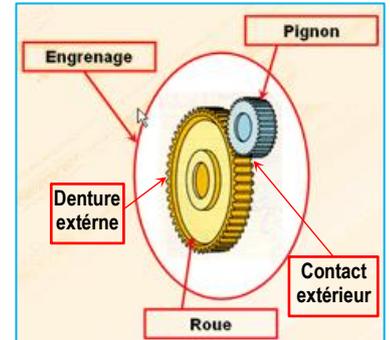
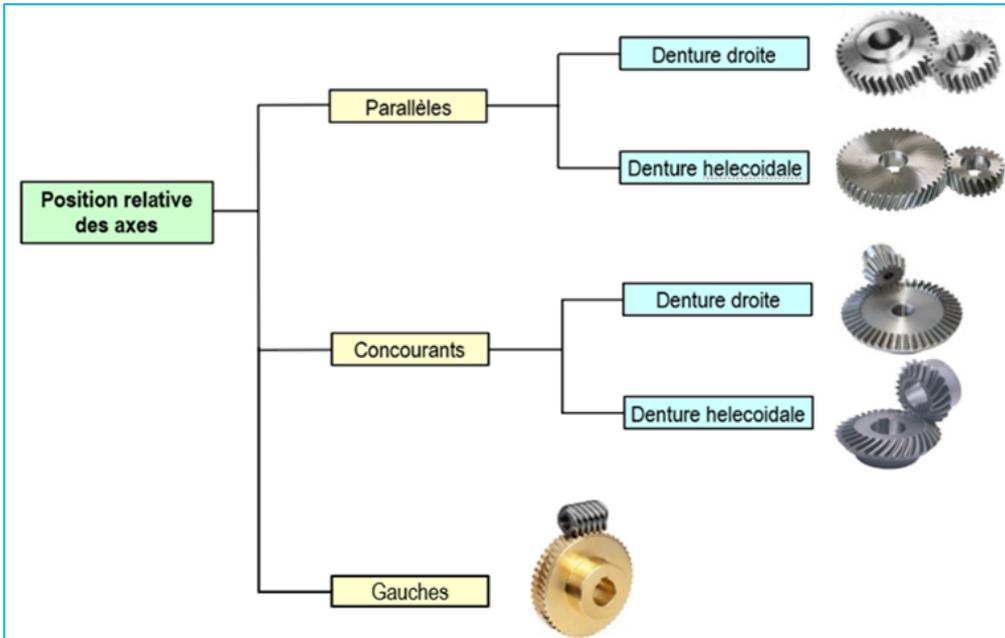
Z1 et Z2 sont les nombres de dents des roues 1 et 2



Maillon de chaîne

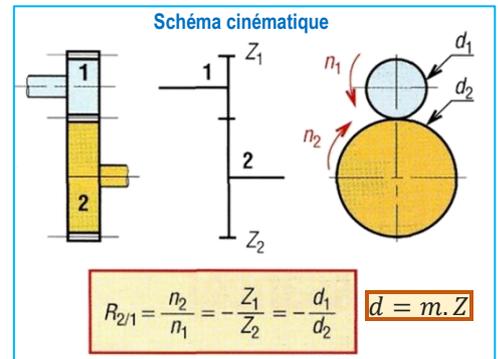
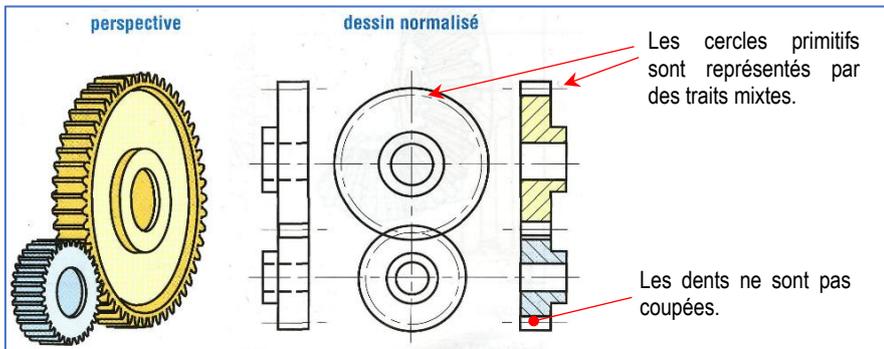
## Les engrenages

- Un engrenage est composé de 2 **roues dentées** ; c'est une transmission par **obstacle**.



### Les engrenages à axes parallèles à denture droite

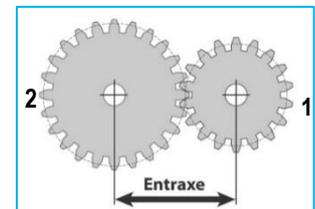
#### Engrenage extérieur



#### Condition d'engrènement :

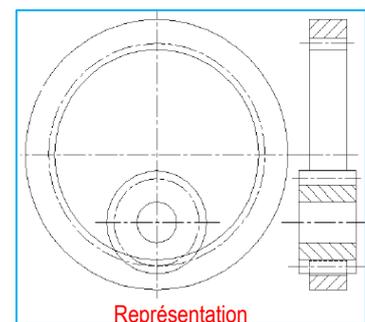
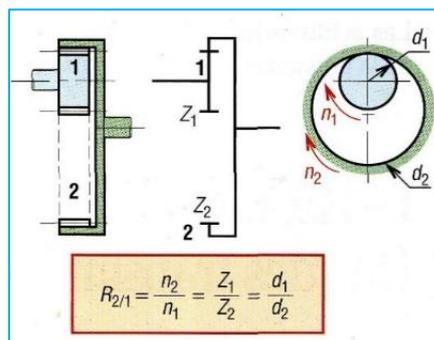
- Avoir le **même module m**.
- Montage avec respect de **l'entraxe a** :

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{mZ_1 + mZ_2}{2} = \frac{m(Z_1 + Z_2)}{2}$$

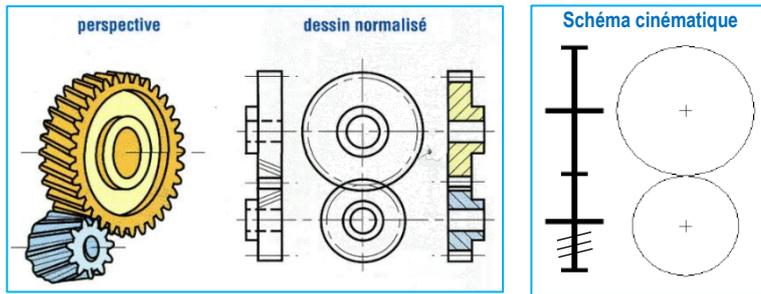


#### Engrenage intérieur

- C'est un engrenage formé d'un pignon et d'une roue à **denture interne** ; la roue est appelée couramment **couronne**.
- N'introduit pas **d'inversion** de sens de rotation entre le pignon et la couronne.



## Les engrenages à axes parallèles à denture hélicoïdale

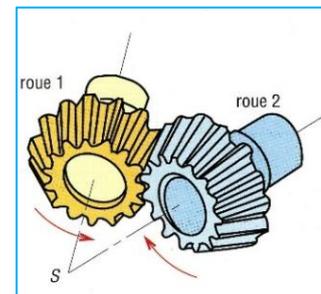
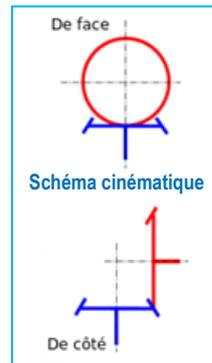
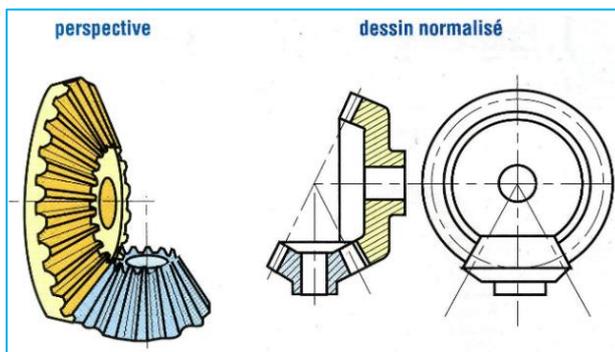


### Condition d'engrènement :

- Avoir le **même module m**.
- Avoir le **même angle d'hélice et de sens opposé**.

## Les engrenages concourants coniques

- Ils permettent la transmission de mouvement entre 2 arbres généralement **perpendiculaires (renvoi d'angle)**.
- Les surfaces primitives sont des cônes (**cônes primitifs**) ; leur **sommet commun est le point S** : le point d'intersection des axes de rotation des 2 roues.

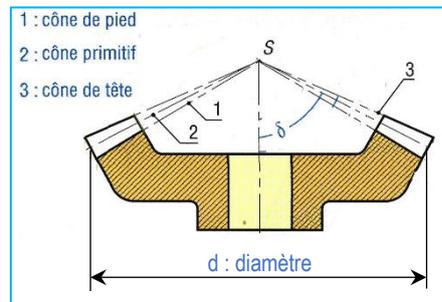


### Condition d'engrènement :

- Avoir le **même module m**.
- Les sommets de cône confondus.
- Le même angle d'hélice, en cas de denture hélicoïdale.

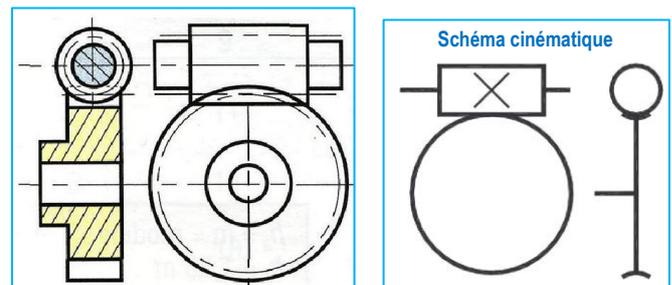
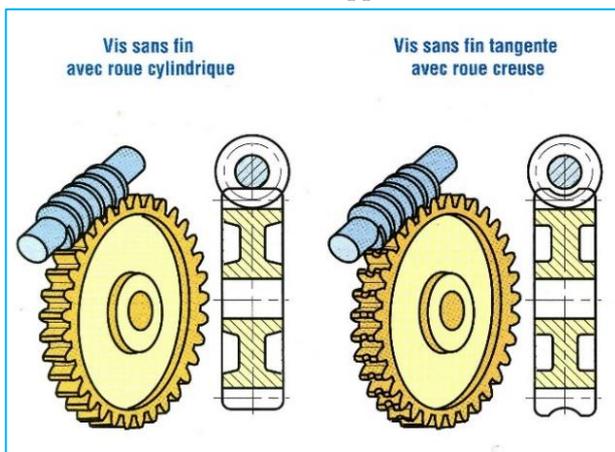
### Rapport de réduction :

$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{Z_1}{Z_2} = \tan \delta_1$$



## Roue et vis sans fin (Engrenage gauche)

- C'est un engrenage à **denture hélicoïdale**, où les axes sont **orthogonaux et non concourants**.
- Il permet un grand **rapport de réduction** (1/200), avec **faible encombrement**.
- Les dents de la vis s'appellent des **filets** (1 à 8 filets).



Les systèmes à roue creuse sont utilisés pour des plus grands efforts.

- **Même module réel.**
- **Même angle d'hélice et même sens.**
- **Même pas :** pas axial de la vis = pas apparent de la roue.

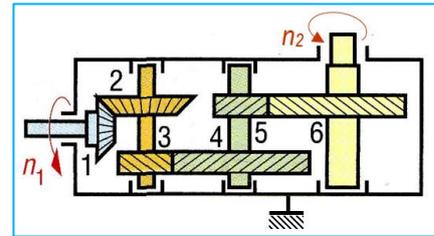
• **Rapport de réduction :**

$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_v}{Z_r}$$

$Z_v$  et  $Z_r$  sont respectivement le **nombre de filets de la vis** et le nombre de dents de la roue.

**Train d'engrenages ordinaire**

- Un train d'engrenage est dit simple ou ordinaire, quand **chacune des roues tourne par rapport au bâti**.
- Le rapport de réduction, d'un train d'engrenages ordinaire est égal au produit des différents rapports des différents engrenages en cascade, ce qui est exprimé aussi par la formule suivante, où **n** est le nombre de contacts entre les roues à denture externe :

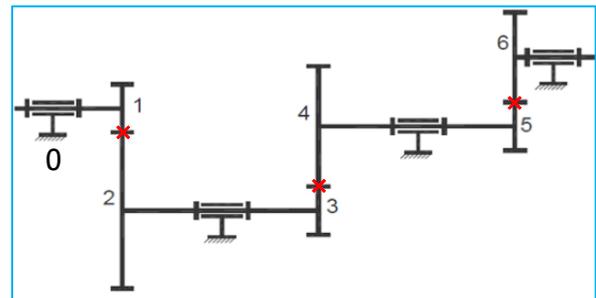


$$r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{N_s}{N_e} = (-1)^n \cdot \frac{\text{Produit des nombres de dents des roues menantes}}{\text{Produit des nombres de dents des roues menées}} = \frac{\prod Z_{menantes}}{\prod Z_{menées}}$$

• **Exemple 1 :** Engrenage avec 3 étages

$n=3$  (3 contacts extérieurs)

$$r = \frac{n_2}{n_1} = (-1)^3 \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_5}{Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6} = - \frac{Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_5}{Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6}$$

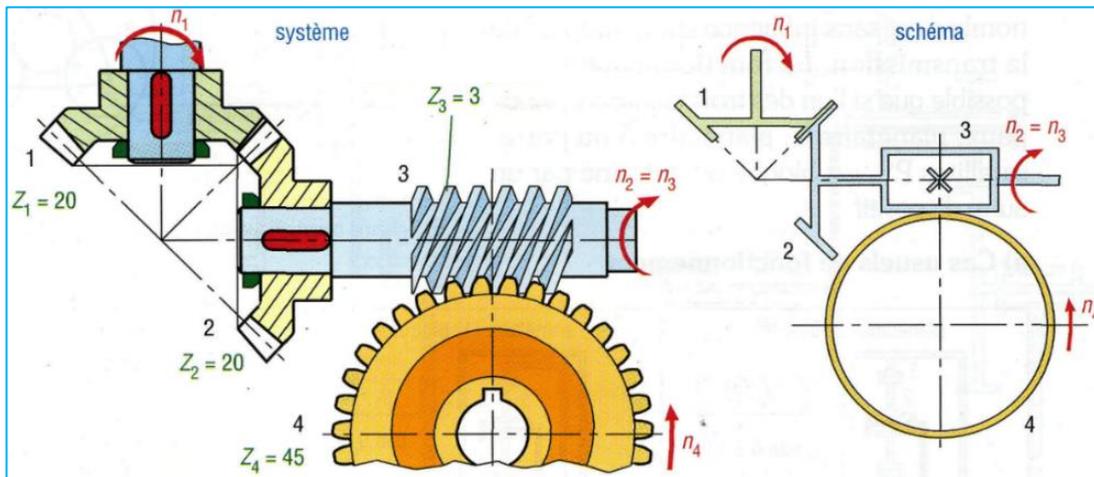


• **Exemple 2 :** Engrenage avec 2 étages : engrenage conique et système roue et vis sans fin

**Note :** La formule générale est applicable en supprimant le terme  $(-1)^n$ , qui n'a pas de sens ni pour un engrenage conique ni pour un engrenage avec roue et vis sans fin.

Le réducteur se compose d'un renvoi d'angle de  $\pi/2$  ( $Z_1=20$  et  $Z_2=20$ ) et d'un système de roue et vis sans fin ( $Z_3=3$  et  $Z_4=45$ ). On se propose de déterminer la valeur de  $n_4$  sachant que  $n_1=1500$  tr/min.

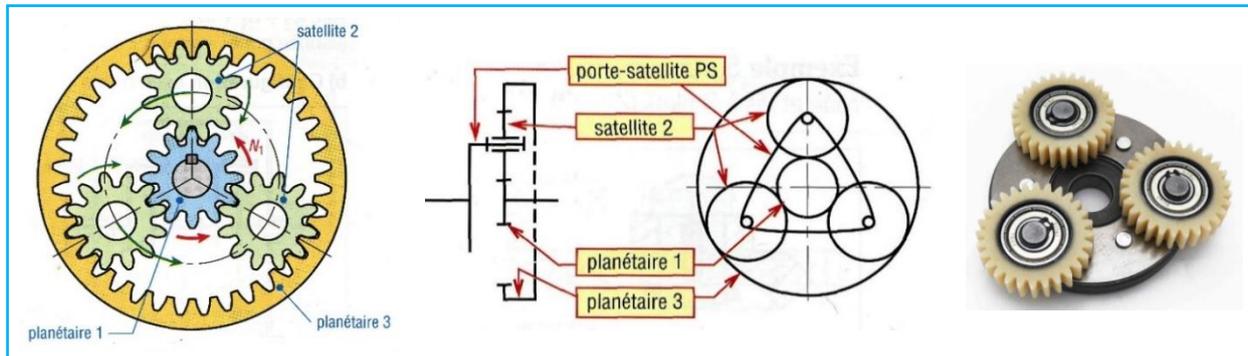
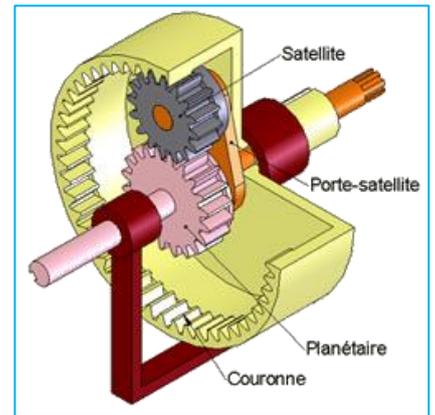
$$r = \frac{n_4}{n_1} = \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2 \cdot Z_4} = \frac{20 \cdot 3}{20 \cdot 45} = \frac{1}{15} \Rightarrow n_4 = \frac{1500}{15} = 100 \text{ tr/min}$$



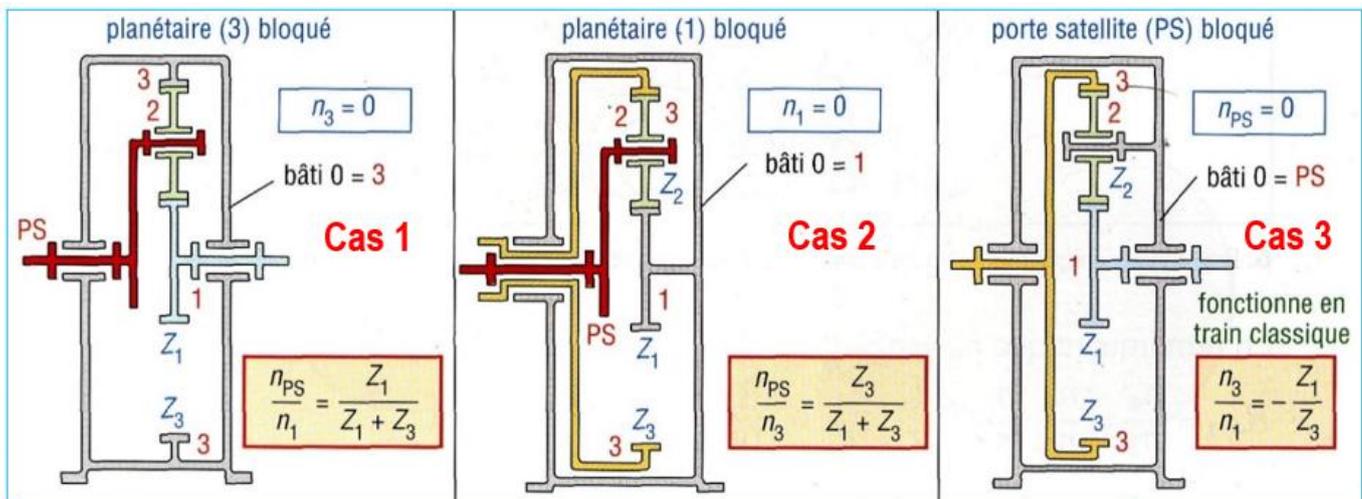
## Train d'engrenages épicycloïdal

### Définition d'un train épicycloïdal

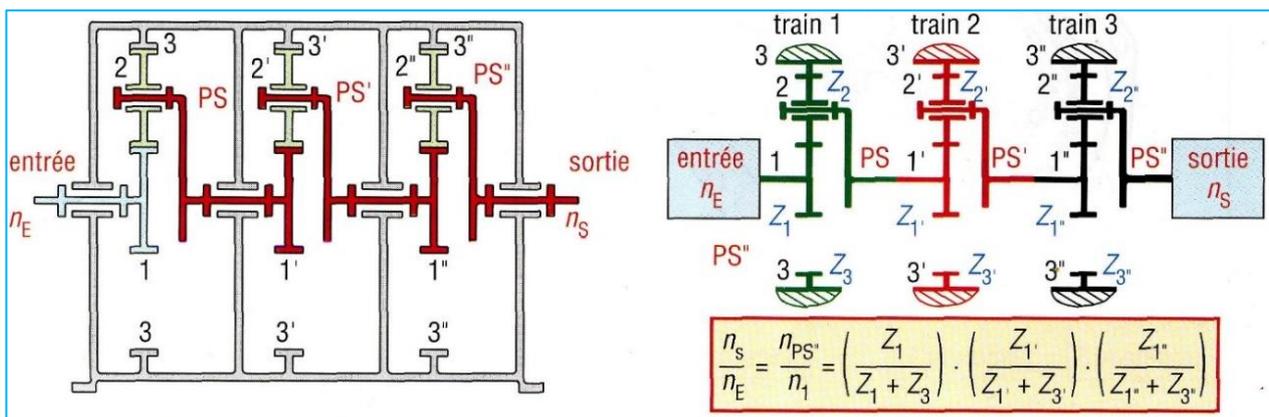
- Dans un train épicycloïdal, l'axe d'une des roues n'est pas fixe par rapport au bâti et son déplacement est circulaire ; il est constitué :
  - D'un pignon central appelé **planétaire**.
  - D'une roue à denture **intérieure (couronne)**.
  - D'un ou plusieurs **pignons (satellites)**, qui engrènent avec le planétaire et la couronne ; les satellites sont portés par un **porte-satellite**.
  - Par rapport aux **trains** ordinaires, les trains épicycloïdaux permettent des **grands rapports** de réduction sous un **faible encombrement**.



### Configurations possibles



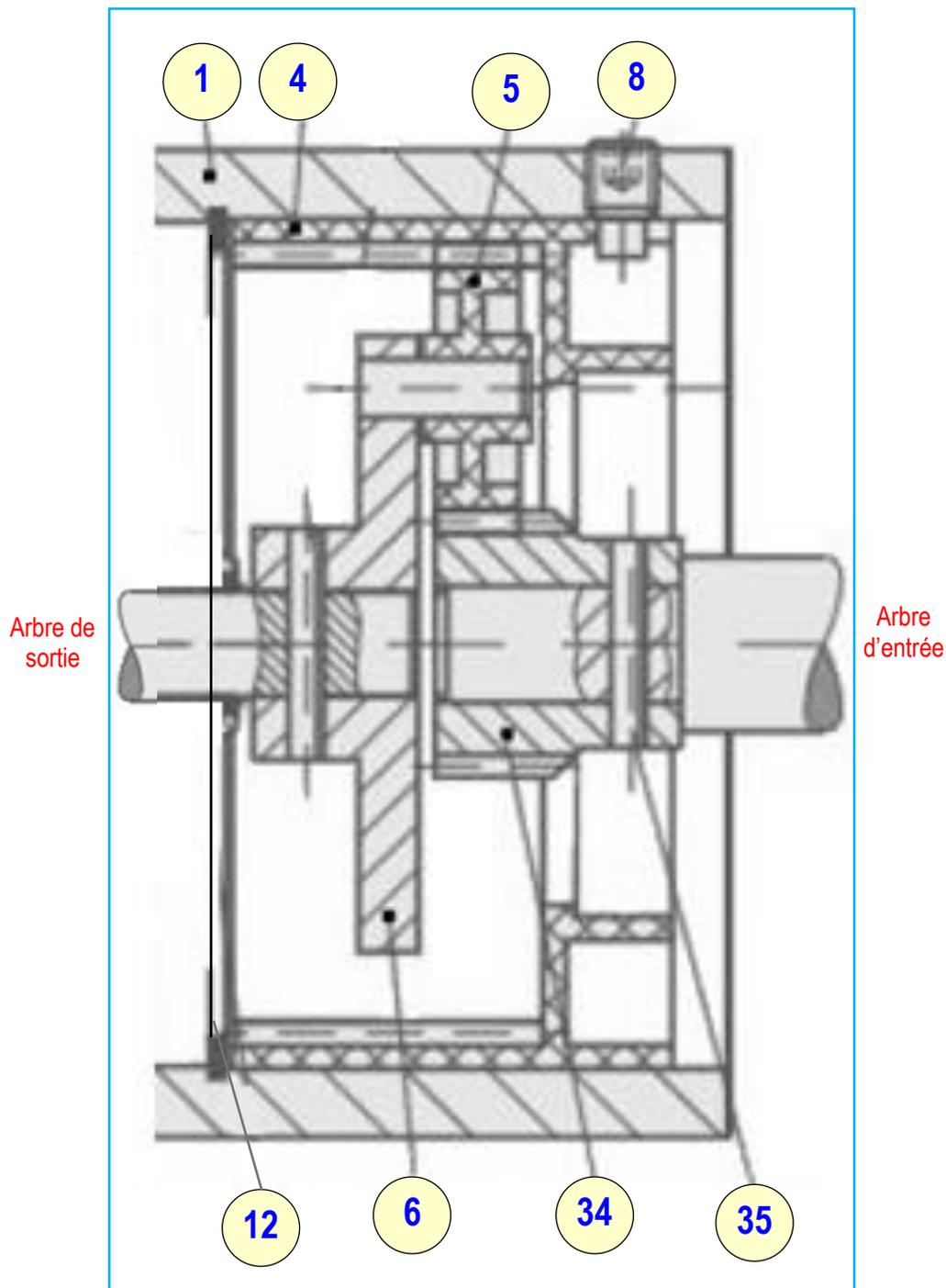
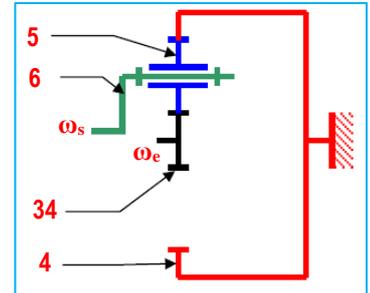
### Configuration avec trains en série (cas le plus utilisé avec couronne bloquée)



- **Exemple :** Le dessin partiel de la figure ci-bas représente un réducteur à train épicycloïdal. La configuration de ce cas de figure est :

- Élément bloqué : **Couronne 4 avec bâti 1.**  
Moyens de blocage : **Vis 8 et circlips 12.**
- Entrée : **Planétaire intérieur 34**, qui est encastré avec l'arbre d'entrée.
- Sortie : **Porte-Satellite 6.**
- C'est le **cas 1** des configurations possibles (p. 31) ; alors :

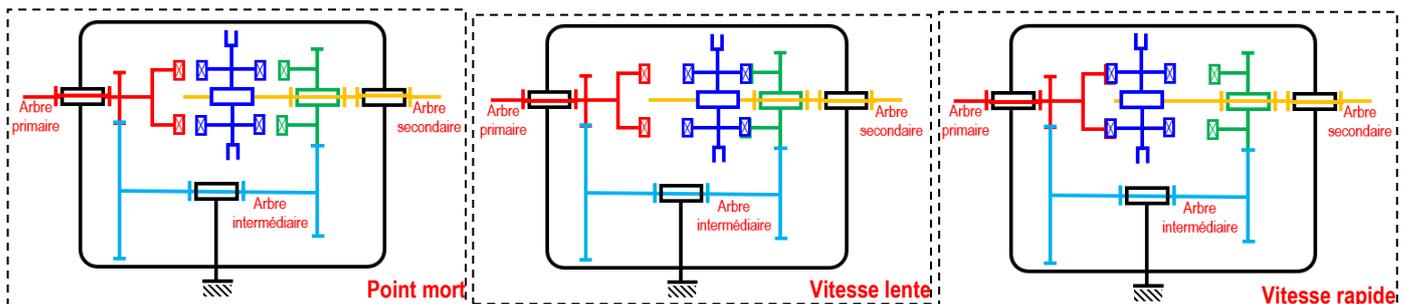
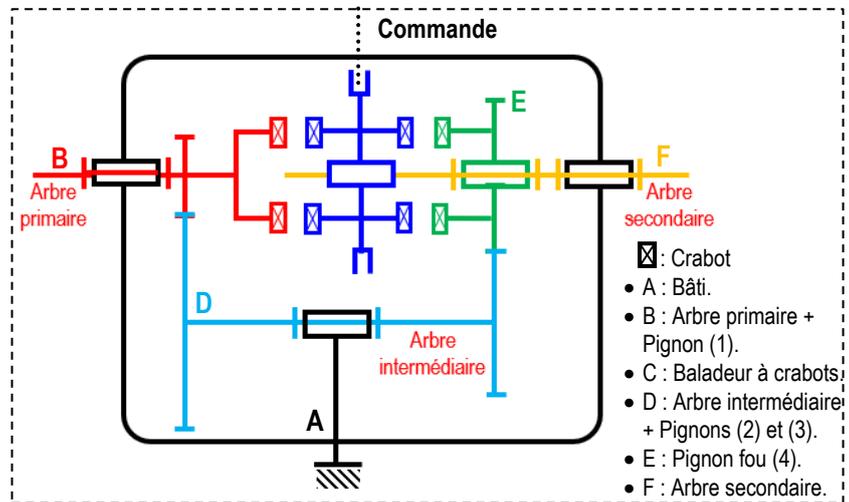
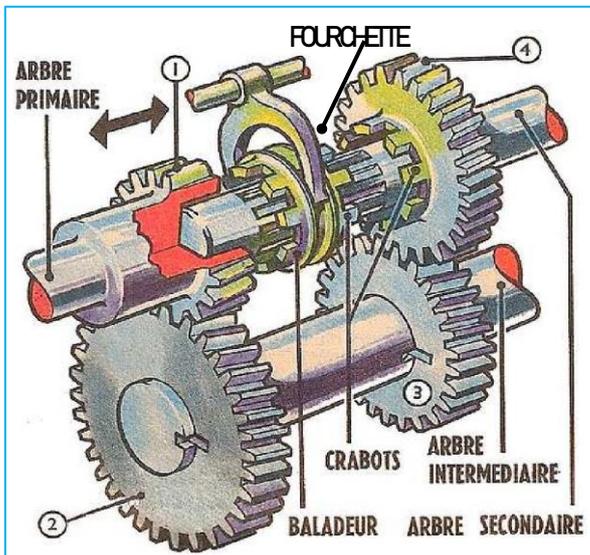
$$\frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{\omega_6}{\omega_{34}} = \frac{Z_{34}}{Z_{34} + Z_4}$$



## Boîte à vitesses

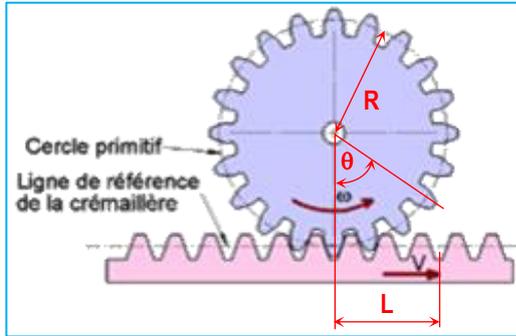
- Une boîte à vitesses est un mécanisme qui transmet le mouvement de rotation d'un arbre moteur à un arbre récepteur en modifiant la vitesse de rotation, en fonction des différentes situations **dynamiques** de la charge à mouvoir.
- Le groupement de **plusieurs trains d'engrenages**, dans un même carter, permet d'obtenir **différents rapports de réduction**, via un système de commande permettant de sélectionner l'un de ces réducteurs.
- La sélection d'un train d'engrenages nécessite la présence d'un **dispositif de manœuvre** et d'un **dispositif de verouillage** dans la position choisie.
- On donne la structure de base d'une boîte à vitesses, dite **non synchronisée** :
  - Le pignon (1) est un **pignon fixe**, qui est solidaire de l'arbre primaire ; il est en **prise constante** avec la roue 4.
  - Les roues (2) et (3) de l'arbre intermédiaire sont encastrées à ce dernier.
  - Le pignon (4) de l'arbre secondaire est en liaison pivot par rapport à ce dernier ; on le désigne par **pignon fou**.
  - Le **baladeur à crabots** est en **liaison glissière** sur l'arbre secondaire à cannelures, sous la commande de la pièce en forme de **fourchette**.
  - Lorsqu'il est engagé, le pignon fou est relié à l'arbre de sortie via le baladeur.
  - Les différents rapports de réduction sont résumés au tableau suivant :

Point mort (Baladeur au centre)	Baladeur à droite (Baladeur à droite)	Baladeur à gauche (Baladeur à gauche)
$r = 0$	$r = \frac{Z_1 Z_3}{Z_2 Z_4}$	$r = 1$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le baladeur n'est craboté ni avec le pignon (1) ni avec le pignon (4)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le baladeur est craboté avec avec le pignon (4).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le baladeur est craboté avec avec le pignon (1).</li> </ul>



## Système Pignon-Crémaillère

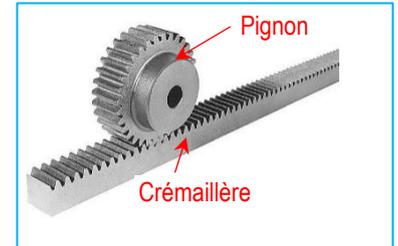
- Ce système est constitué d'une **roue dentée** (pignon) et une tige dentée appelée « **crémaillère** ».
- Il permet une conversion de **rotation en translation**.
- **Condition d'engrènement** : le pignon et la crémaillère doivent avoir le **même module m**.



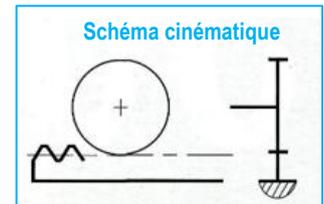
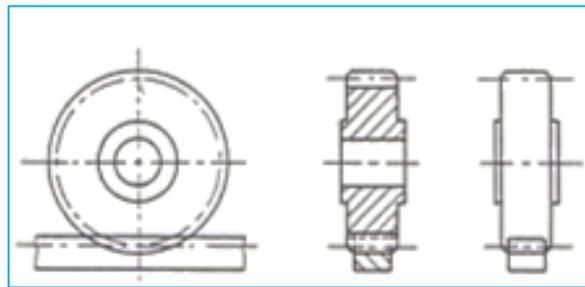
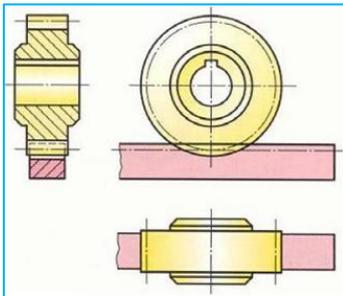
$$L = R \cdot \theta$$

$$V = R \cdot \omega = R \frac{2\pi}{60} \cdot N$$

- **L** : Course de la crémaillère (m)
- **θ** : Angle de rotation du pignon (rd)
- **N** : Fréquence (tr/min)
- **ω** : Vitesse angulaire (rd/s)
- **V** : Vitesse linéaire (m/s)
- **R** : Rayon primitif (m)

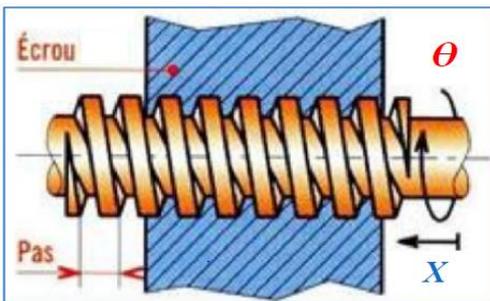


- **Représentation :**



## Système Vis-Ecrou

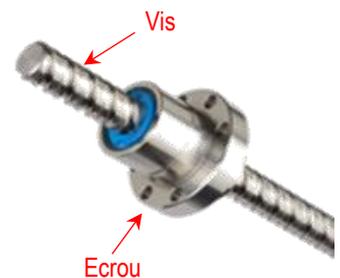
- Le **système Vis-Ecrou** permet de transformer un mouvement de **rotation** en un mouvement de **translation**.



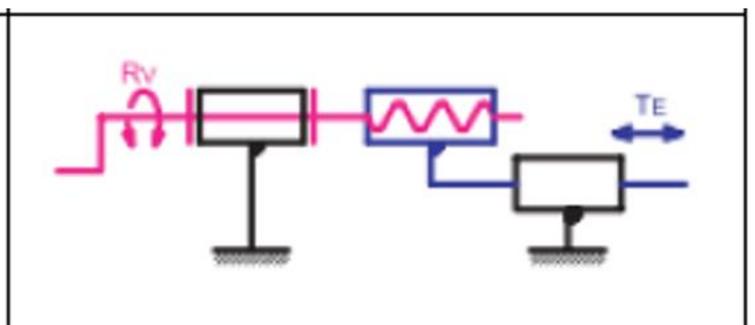
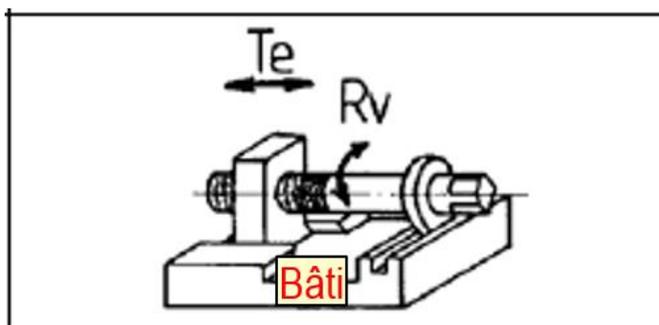
$$X = \frac{P}{2\pi} \cdot \theta = p \cdot n$$

$$V = \frac{P}{2\pi} \cdot \omega = \frac{P}{60} \cdot N \text{ (m/s)} = p \cdot N \text{ (m/min)}$$

- **P** : Pas de la vis (m)
- **X** : Course de l'écrou (m)
- **n** : Nombre de tours.
- **θ** : Angle de rotation de la vis (rd)
- **N** : Fréquence (tr/min)
- **ω** : Vitesse angulaire (rd/s)
- **V** : Vitesse linéaire (m/s)

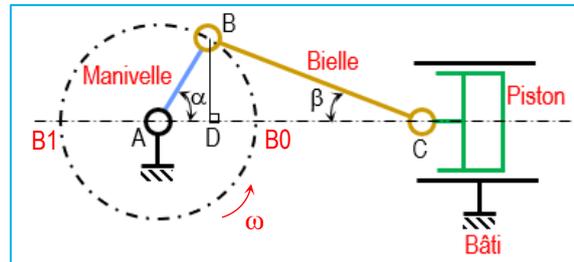
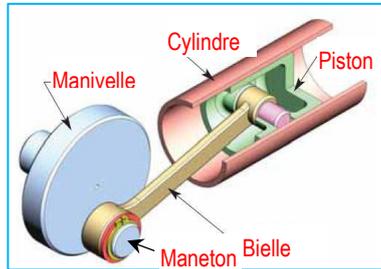


- Une des configurations la **plus fréquente** : la rotation de la vis (**Rv**) entraîne la translation de l'écrou (**Te**).

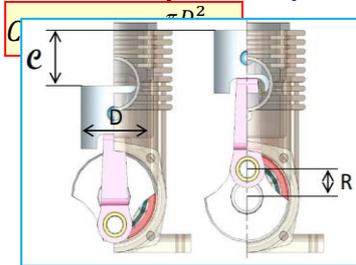


## Système Bielle-Manivelle

- Le **système Bielle-Manivelle** permet de transformer une **rotation** en une **translation alternative**.



- PMH** : Point Mort Haut correspond au maximum du déplacement de la manivelle (point B<sub>0</sub>).
- PMB** : Point Mort Bas correspond au minimum du déplacement de la manivelle (point B<sub>1</sub>).
- C** : la course maximale du piston est (**2.R**), **R** étant le rayon de la manivelle.
- Cylindrée** : La cylindrée **Cy** est le volume balayé par le piston dans le **cylindre**, entre le PMH le PMB.



$$C = 2 \cdot R$$

$$Cy = S \cdot C = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C$$

$$\text{Cylindrée totale} = Cy \cdot n$$

- Cy : Cylindrée (m<sup>3</sup>/tr)
- S : Section du piston (m<sup>2</sup>)
- C : Course du piston (m)
- D : Diamètre du piston (m)
- R : Rayon du vilebrequin (m)
- n : Nombre de cylindres

- Débit volumétrique** : Il quantifie le volume traversé par unité de temps, soit :

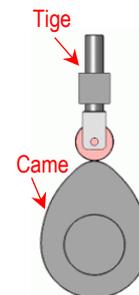
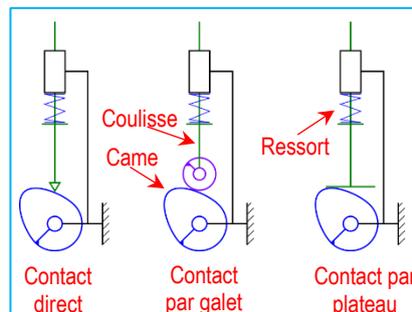
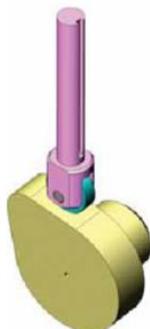
$$Q = Cy \cdot N$$

- Q : Débit (m<sup>3</sup>/mn)
- Cy : Cylindrée (m<sup>3</sup>/tr)
- N : Vitesse (tr/min)

- Exemple** : Mini-compresseur (Voir page suivante).

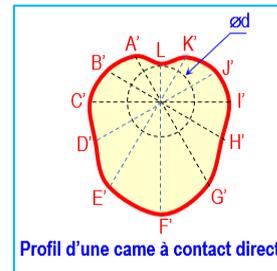
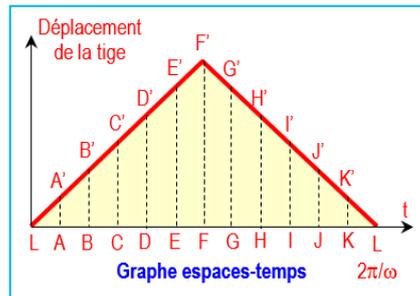
## Système à came

- On appelle « **came** » une roue de forme irrégulière.
- Le système à came permet de transformer le mouvement de **rotation** de la came en un mouvement de **translation alternatif** de la tige.
- Le contact de la tige sur la came est maintenu grâce à une force de rappel d'un **ressort**.



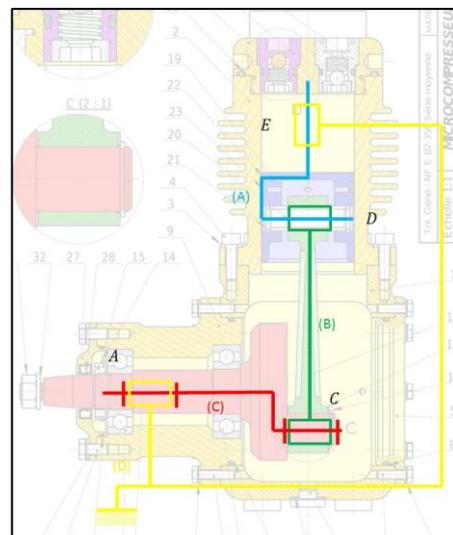
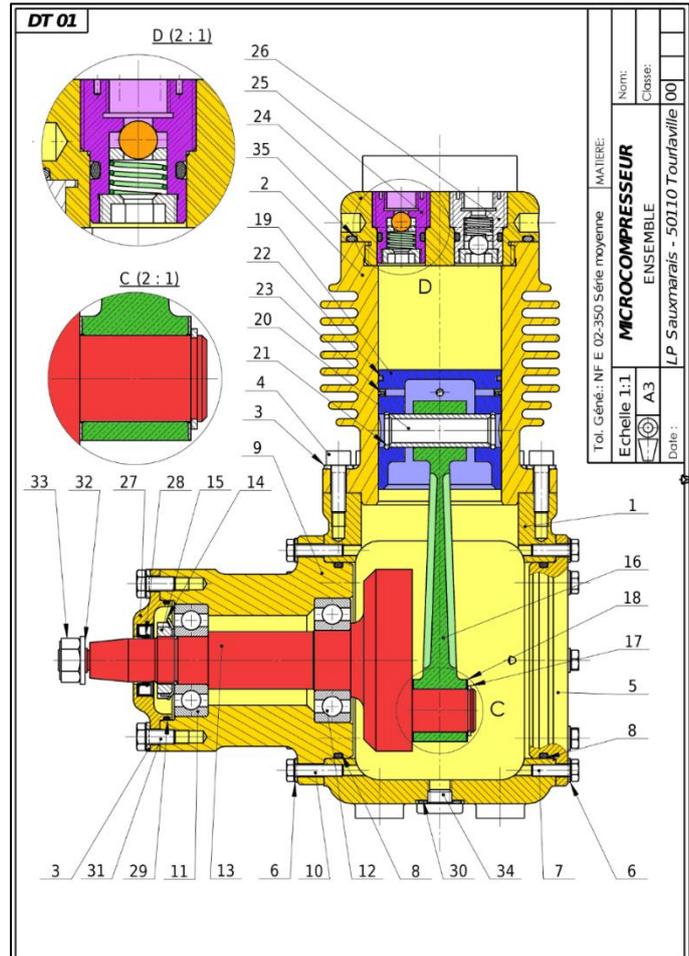
- Profil d'une came** :

- Un calcul de résistance de matériaux (**RDM**) permet de définir le **diamètre minimal (d)** de la came.
- On décompose le graphe en **intervalles égaux**, par exemple 12.
- On divise le cercle minimal de la came en **n parties égales**, donc 12.
- On reporte les longueurs AA', BB', etc. mesurées sur le graphe à **l'extérieur du cercle minimal**, en tenant compte des échelles du graphe et de la came.
- On trace la **courbe enveloppe**, en joignant les points A', B', etc., ce qui donne le **profil** de la came.



- Exemple : Système Bielle-Manivelle (compresseur pneumatique)

Rep	Qté	Désignation
1	1	Carter
2	1	Cylindre
3	12	Rondelle ISO 7093-1 - 6 - 300 HV
4	8	Vis tête cylindrique hexagonale creuse ISO 4762 M6-20
5	1	Couvercle
6	16	Rondelle ISO 7093-1 - 5 - 300 HV
7	8	Vis à tête hexagonale NF EN ISO 4017- M5x16
8	2	Joint torique Ø3.53xØ78.97
9	1	Boite à roulements
10	8	Vis à tête hexagonale NF EN ISO 4017- M5x20
11	1	Roulement 20 BC 02
12	1	Roulement 25 BC 02
13	1	Vilebrequin
14	1	Rondelle Frein pour écrou n°5
15	1	Ecrou à Encoche n° 5 - M20x1
16	1	Bielle
17	1	Anneau élastique pour arbre d: 16x1
18	2	Cale de bielle
19	1	Piston
20	1	Axe piston
21	2	Jonc (Anneau élastique)
22	1	Segment
23	1	Racleur
24	1	Culasse
25	1	Clapet aspiration
1	1	Porte clapet aspiration
1	1	Bille
1	1	Porte bille
1	1	Poussoir bille
1	1	Ressort
1	1	Joint torique Ø2,62 x Ø15,54
26	1	Clapet refoulement
1	1	Joint torique Ø2,62 x Ø15,54
27	1	Boite a joints
28	1	Joint à lèvres, type IE 18x30x7
29	1	Joint torique Ø1,78 x Ø21,95
30	2	Joint circulaire, type B, d: 10
31	4	Vis à tête Hexagonale NF EN ISO 4017, M6 x 1
32	1	Rondelle ISO 7093-1 - 10 - 300 HV
33	1	Ecrou hexagonal NF EN ISO 4032 - M10
34	2	Bouchon vidange (M8x1,5)
35	1	Joint torique Ø3,53 x Ø68,74



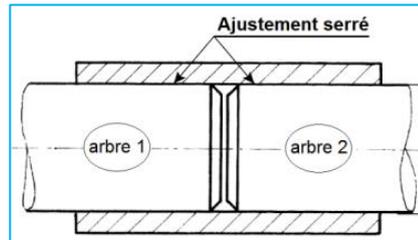
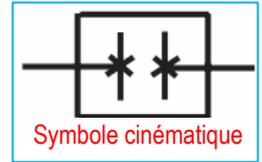
## Accouplements permanents

### Accouplements rigides

- Ils sont utilisés pour les arbres **correctement alignés**.

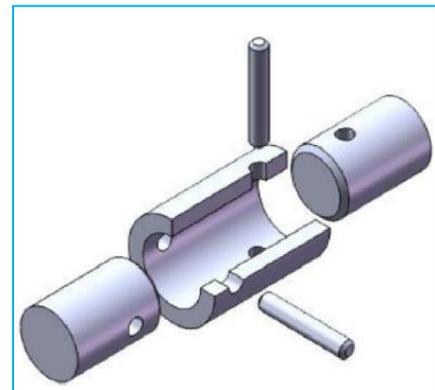
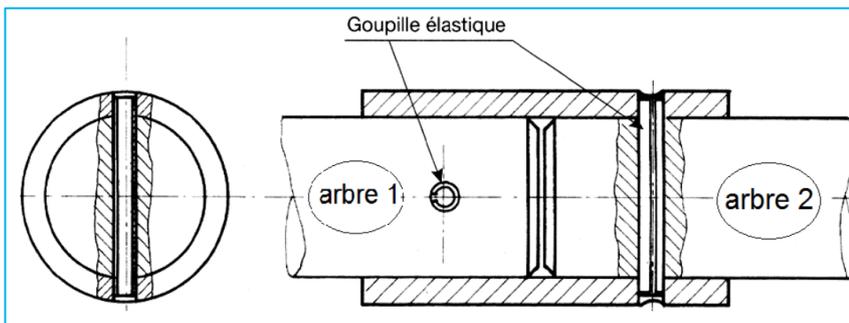
### Accouplement par adhérence

- On relie les 2 arbres avec un manchon ajusté **serré**.

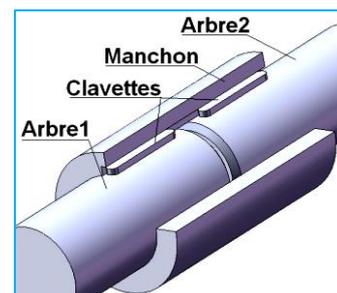
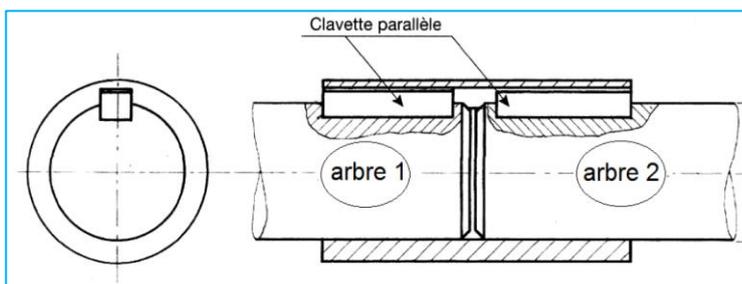


### Accouplement par manchons à goupilles ou clavettes

- C'est un accouplement par **obstacle** (goupille ou clavette) ; la mise en position est effectuée par un manchon.
- Montage avec **goupilles** :

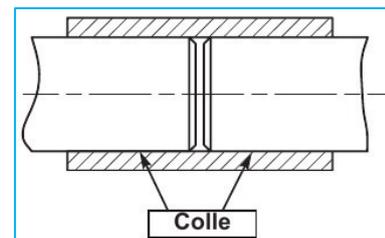
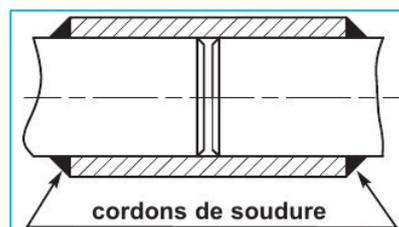


- Montage avec **clavettes** :



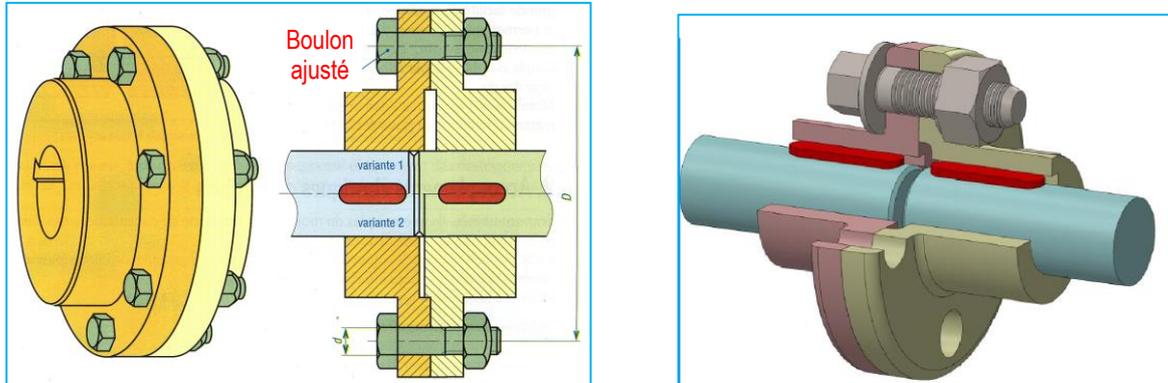
### Accouplement par soudage ou collage

- La liaison entre les 2 arbres est obtenue avec un manchon rendu solidaire par un cordon de **soudure** ou une couche de **colle**.



## Accouplement par plateaux et boulons

- C'est un accouplement par **obstacle** ; il est précis et très utilisé.
- La transmission du couple est en général obtenue par une série de **boulons ajustés**.



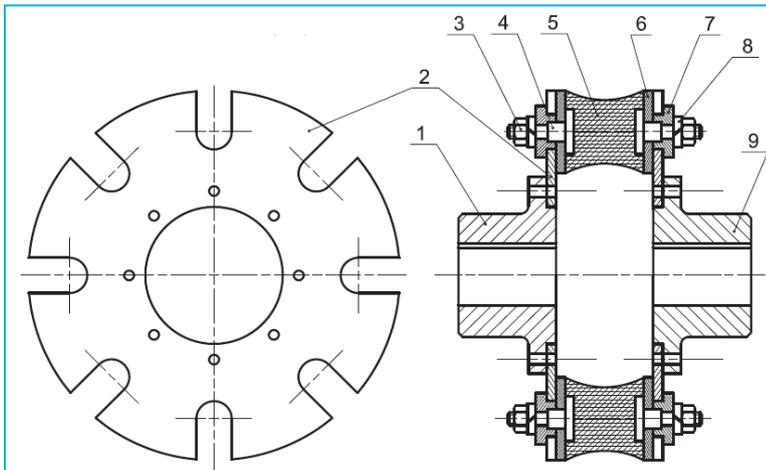
## Accouplements élastiques ou flexibles

- Ils tolèrent plus ou moins, des **défauts d'alignement** entre les 2 arbres.
- Ils se composent de parties totalement **élastiques**, qui permettent la **flexibilité**.



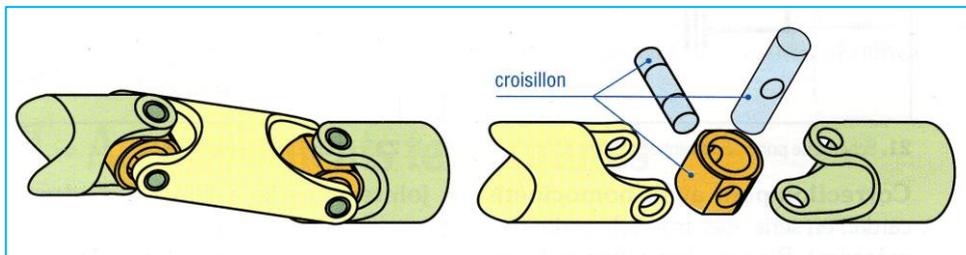
## Accouplement à plots d'élastomère (Radiaflex)

- Cet accouplement élastique permet de supporter en particulier la **flexion**, grâce aux **plots** (5) en **élastomère**.



## Joint de Cardan

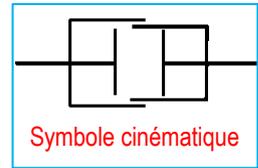
- C'est un **joint articulé**, qui permet un accouplement pour **arbres concourants**.
- Le mouvement se transmet par l'intermédiaire d'un **croisillon** libre en rotation par rapport aux 2 arbres, avec 2 liaisons pivots d'axes perpendiculaires et concourants.
- Permet aux arbres d'avoir une **liberté angulaire** variable et importante au cours du fonctionnement.



## Accouplements temporaires

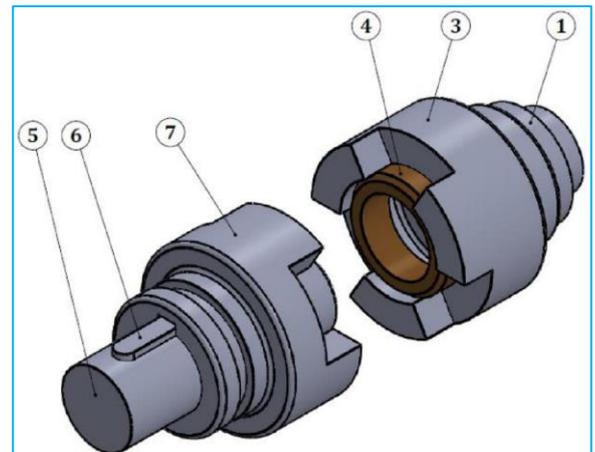
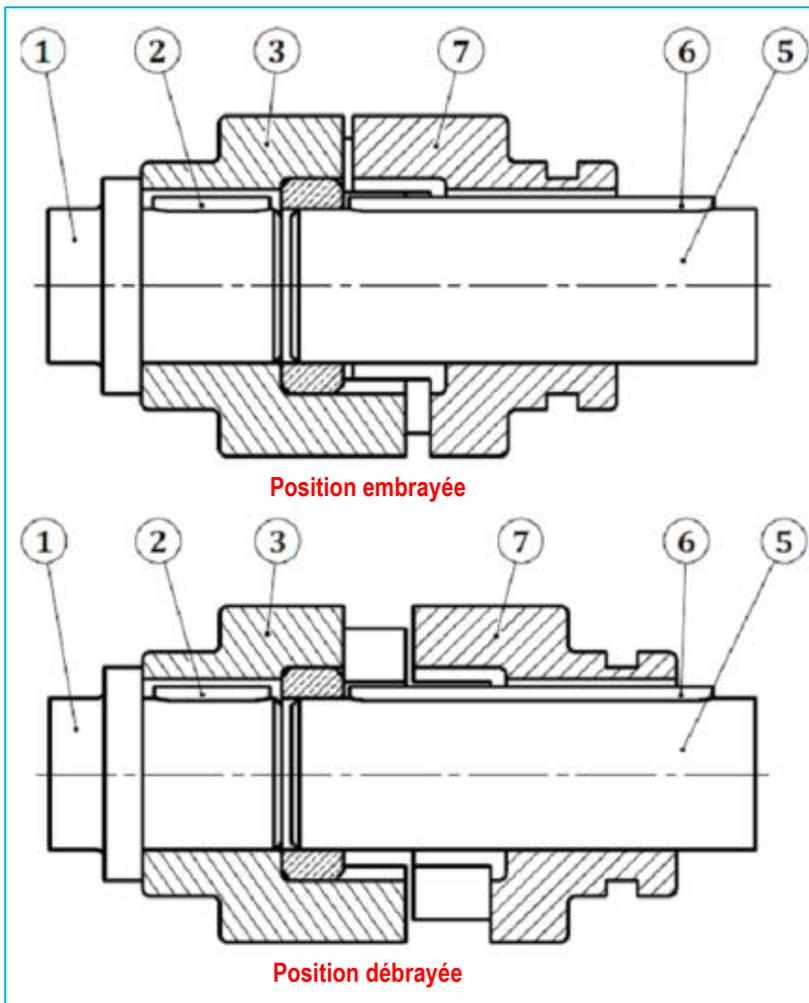
### Embrayages

- Les embrayages réalisent l'**accouplement**, ou le **désaccouplement**, de 2 arbres au gré d'un utilisateur ou d'un automatisme.



### Embrayage par obstacle

- C'est un embrayage **instantané**, par contact direct entre 2 solides indéformables sans possibilité de glissement.
- La manœuvre se fait **à l'arrêt**.
- Exemple** : Embrayage à **crabots**
  - Un **crabot** est un dispositif d'accouplement direct de 2 pièces par **dents** et **rainures**.
  - Les 2 crabots 3 et 7 sont liés en rotation avec les arbres 1 et 5, via les clavettes 2 et 6.
  - Les 2 crabots présentent des formes **complémentaires**, qui leur permettent de s'emboîter entre eux.
  - Le montage coulissant de 7 permet **la manœuvre à l'arrêt** pour :
    - L'embrayage** : arbres solidaires, le couple moteur est transmis.
    - Le débrayage** : arbres indépendants, le couple moteur n'est pas transmis.

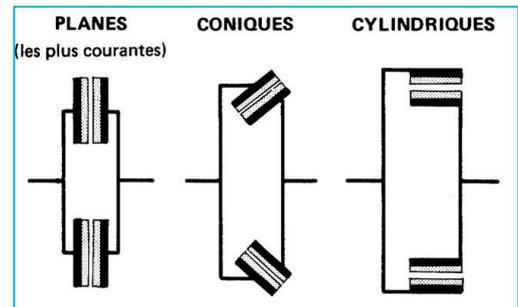
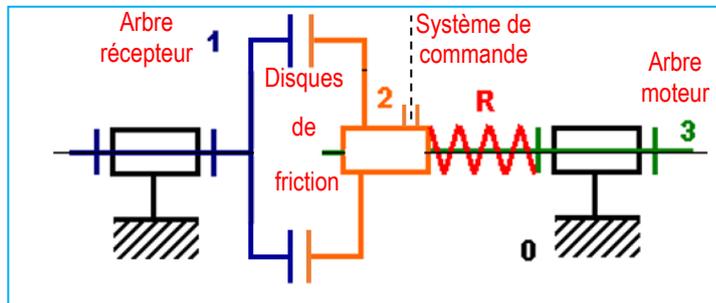
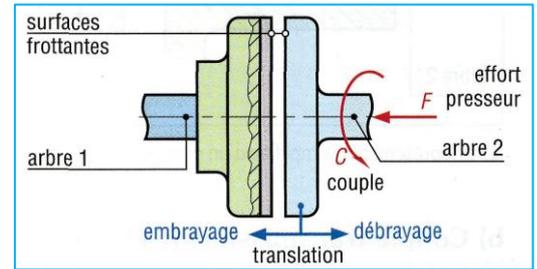


1	Arbre Moteur
2	Clavette
3	Crabot Fixe
4	Bague de centrage
5	Arbre Récepteur
6	Clavette
7	Crabot Mobile Baladeur

## Embrayage par adhérence

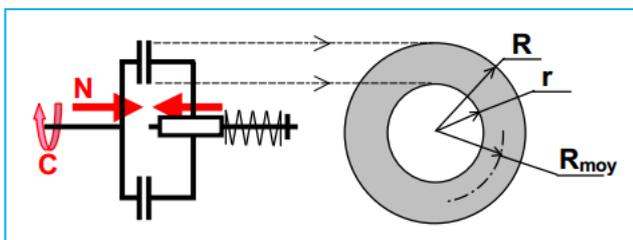
### Principe

- C'est un embrayage **progressif**, qui est basé sur les propriétés du **frottement** (friction).
- La manoeuvre peut être effectuée **en marche**.
- **Exemple** : Embrayage à disque de **friction**
  - C'est le type d'embrayage le plus utilisé.
  - Le nombre de disques est variable et dépend du couple à transmettre.
  - Il est constitué de :
    - Un **plateau** en liaison glissière avec **l'arbre moteur (3)**.
    - Un **plateau** en liaison **encastrement** avec **l'arbre récepteur (1)**.
    - Un **dispositif presseur**, par **exemple** un ressort.
    - Un **dispositif de commande**, qui peut être en général **manuel, hydraulique** ou **électromagnétique**.
- La transmission est assurée par l'adhérence des **surfaces de friction** du disque récepteur et du plateau de pression lié à l'arbre moteur :
  - Les surfaces de friction peuvent être **planes, coniques** ou **cylindriques**.
  - Le matériau de friction est moulé et contient des poudres à **grand coefficient** de frottement et des fibres de renforcement ; le tout est bien **résistant à l'usure et à l'échauffement** dû aux hautes températures de fonctionnement.
  - Généralement le matériau le plus utilisé porte le nom de **Ferodo**, qui est la **marque** de l'équipementier automobile britannique **Ferodo**.



- **L'arbre moteur (3)** entraîne **(2)** en rotation par rapport au **bâti (0)** grâce à une **liaison glissière**.
- Ce mouvement est donc transmis à **l'arbre récepteur (1)** ou non, suivant qu'il y a **adhérence ou non** entre les **disques de friction** respectivement solidaires de **(2)** et **(1)**.
- L'adhérence des disques est obtenue par :
  - Un fort coefficient de frottement entre **(1)** et **(2)**.
  - L'application d'un effort sur **(2)** développé par le ressort **R**.

### Couple transmissible



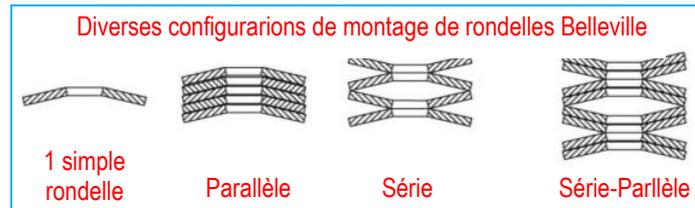
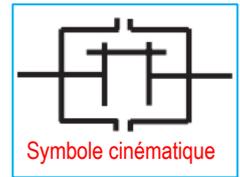
- **C** : Couple transmissible en N.m
- **F** : Effort presseur des surfaces de friction en N
- **f** : Coefficient de frottement
- **n** : Nombre de surfaces de friction
- **R** : Rayon extérieur du disque de friction en m
- **r** : Rayon intérieur du disque de friction en m

$$C_f = \frac{n \cdot F \cdot f}{3} \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} = \frac{2n \cdot F \cdot f}{3} \left( \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right)$$

## Limiteur de couple ou accouplement de sécurité

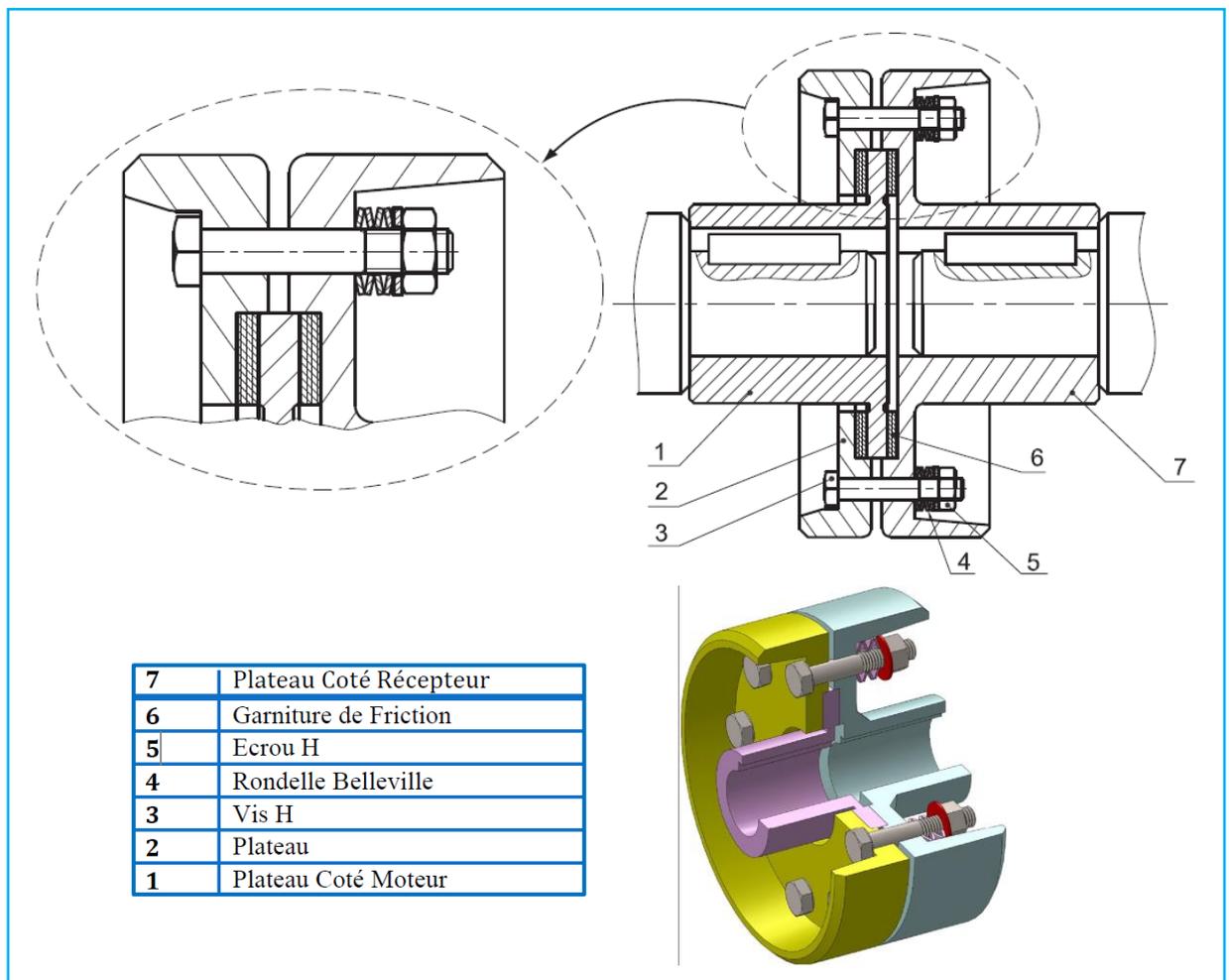
### Principe

- L'accouplement est par **friction** ; lorsqu'un **seuil de couple** est atteint, il y a glissement ou **patinage** et il en résulte une **sécurité du matériel et des personnes**.
- Les surfaces de friction sont soumises à la **pression d'un ressort** et le couple de glissement est prédéterminé par le réglage de la force de ce ressort.
- Le rôle du ressort peut être joué par une **rondelle élastique**, une rondelle « **Belleville** ».



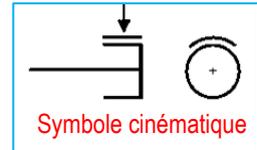
### Exemple de montage

- Le plateau moteur (1) et le plateau récepteur (7) sont liés, par l'intermédiaire du plateau (2), grâce à la **garniture de friction** (6), qui est collée aux plateaux (2) et (7).
- La force pressante nécessaire à cette adhérence est assurée par les **rondelles Belleville** (4).
- Si un couple limite est atteint, le plateau moteur (1) **patine** entre les plateaux (2) et (7) ; de ce fait, le mouvement n'est pas transmis au plateau récepteur (7).
- On peut faire **varier la valeur limite** du couple à transmettre en serrant ou en desserrant les écrous (5), qui forment des boulons avec les vis (3).



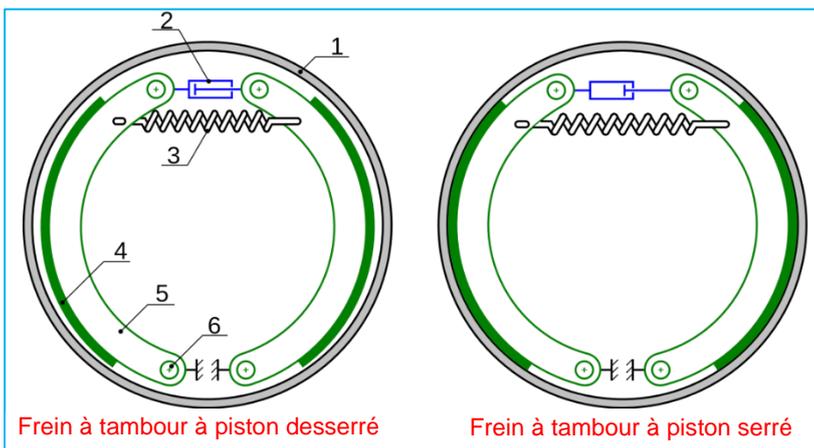
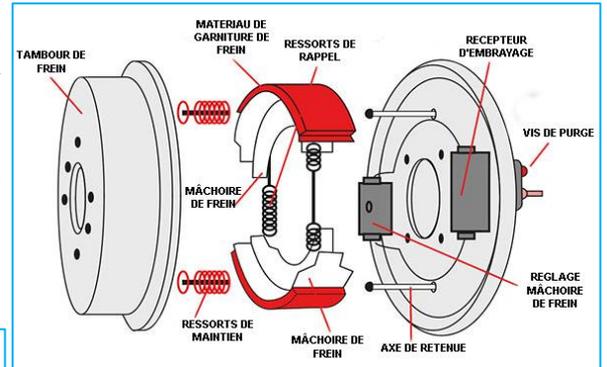
## Les freins

- Dans un frein, l'un des 2 arbres, sert pour **arrêter** progressivement le second.



### Freins à tambour

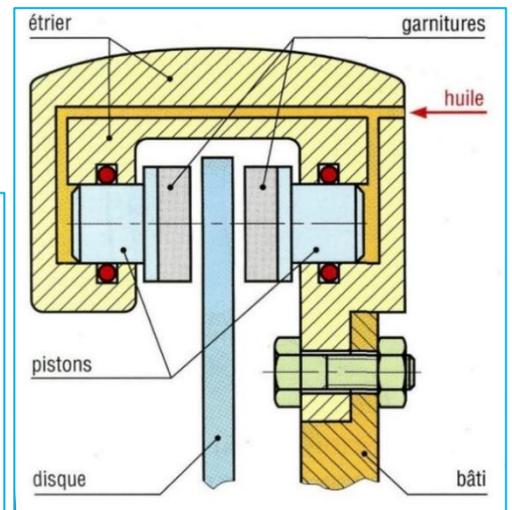
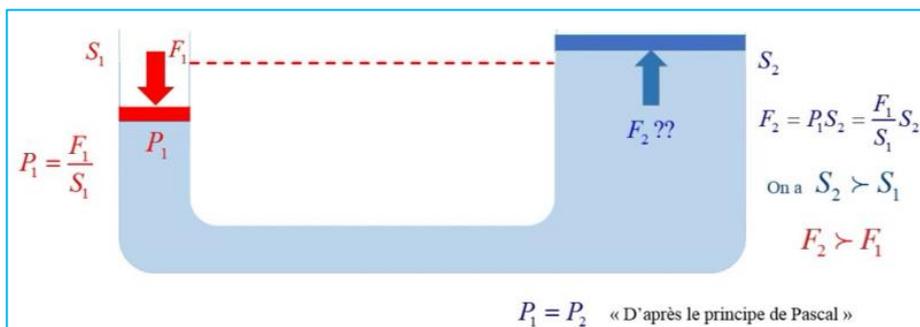
- Il comporte :
  - 2 **mâchoires** de frein frottant par l'intermédiaire de **garnitures** sur l'intérieur du tambour.
  - Des **vérins** à commande **hydraulique**, qui fournissent l'effort de freinage.
  - Des **ressorts** de rappel pour ramener les mâchoires à leur position de repos.
- Lorsque le frein est actionné, le **vérin 2** repousse les **mâchoires 5** vers le **tambour 1**. Cela entraîne, via la **garniture de friction 4**, un frottement très important qui réduit la rotation du tambour.
- Lorsque l'on relâche le frein, le **ressort de rappel 3** permet aux mâchoires de revenir à leur position de repos, libérant le tambour.
- Le **pivot 6** permet aux mâchoires de pivoter.

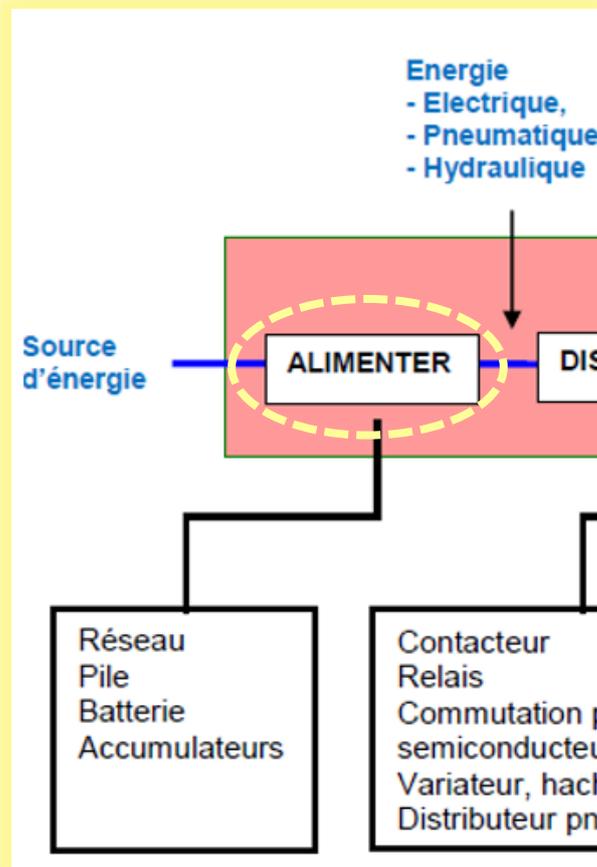


1. Tambour
2. Vérin
3. Ressort de rappel
4. Garniture
5. Mâchoire
6. Pivot

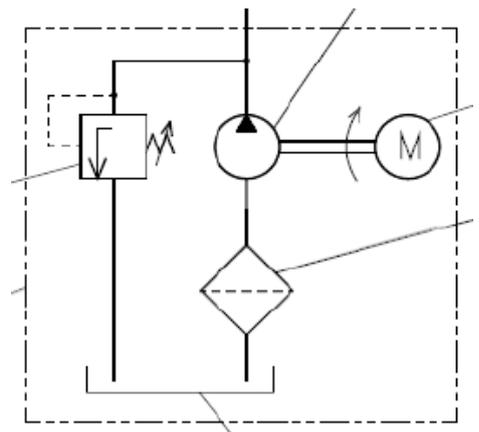
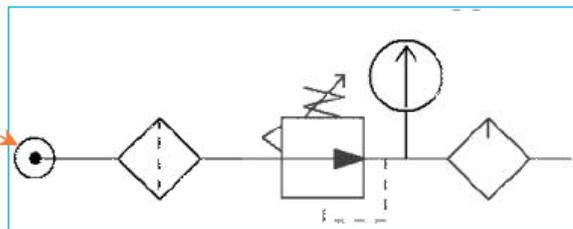
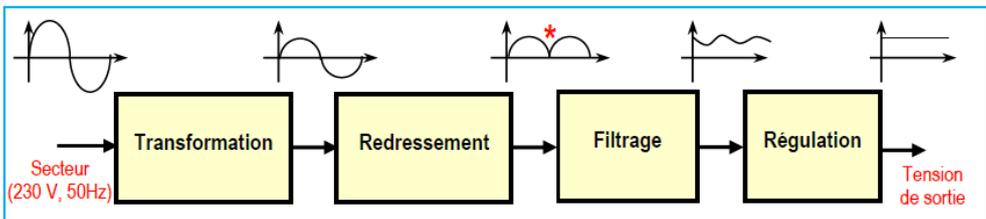
### Freins à disque

- Lorsque l'arbre à freiner tourne, le **disque** tourne aussi, car les pistons sont retirés.
- Pendant la phase de freinage, un **circuit hydraulique** actionne les 2 pistons qui pressent les **plaquettes à garnitures** contre le disque.
- On applique le **principe de Pascal** ; alors une **petite force** comme l'appui sur une pédale, engendre une **grande force** poussant les pistons et occasionnant le freinage.



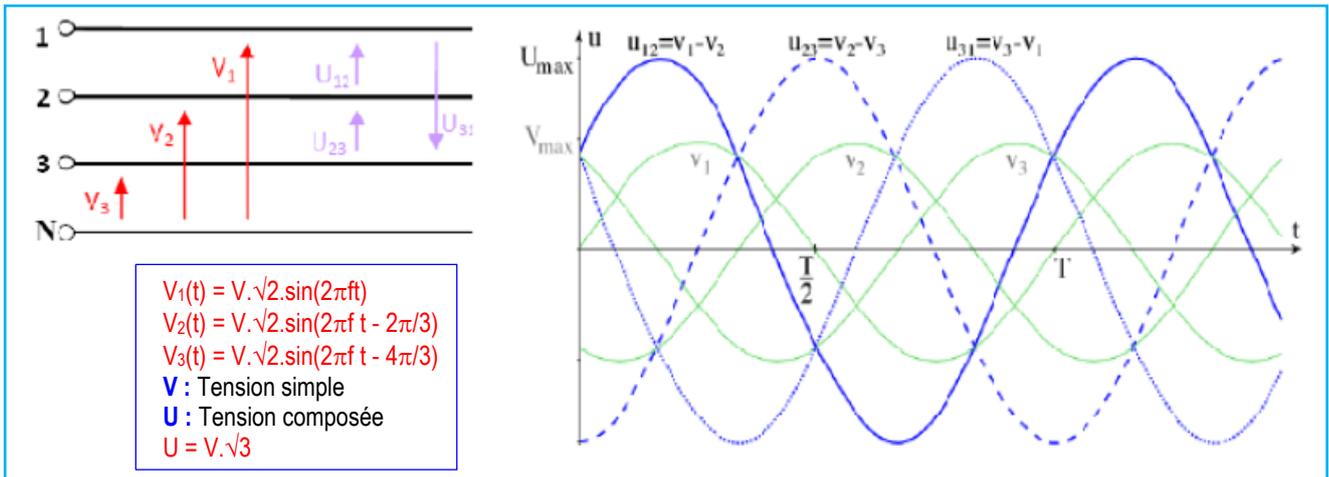


# Fonction Alimenter



## Le réseau triphasé

- L'alternateur d'une centrale électrique fournit une ligne tri-filaire formant un **système triphasé** :
  - Les tensions produites sont des sinusoïdes **déphasées de 120°** ( $2\pi/3$ ).
  - La fréquence **f** des tensions est de **50 Hz**.



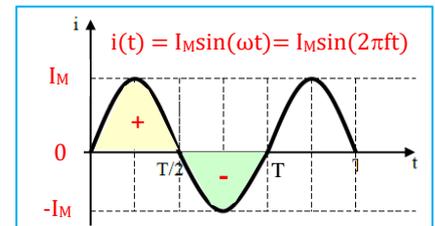
## Grandeurs électriques

### Valeur moyenne

- Mathématiquement parlant, la valeur moyenne notée  $\langle i \rangle$  ou  $\bar{I}$  d'un signal périodique de valeur instantanée  $i(t)$  et de période  $T$ , s'exprime par la relation :

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

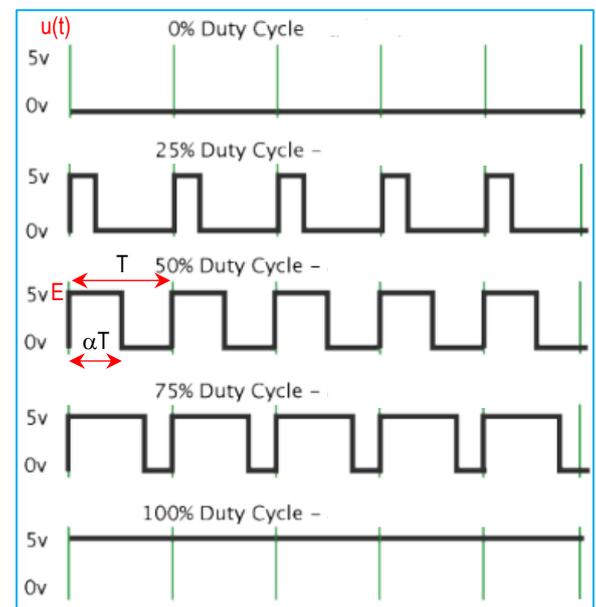
- **Exemple 1** : Cas d'un signal sinusoïdal pur.  
Pour un courant sinusoïdal pur, la **valeur moyenne est nulle** ; en effet, dans la figure ci-contre, les surfaces positive et négative pour une période  $T$ , sont égales et de signe opposé, donc la valeur moyenne est nulle.
- **Exemple 2** : Cas d'un signal rectangulaire.  
C'est un cas très fréquent dans la commande des moteurs à courant continu. C'est un signal dont :



- La période **T est fixe**.
- La durée de la présence du signal sous forme constante (E) est  $\alpha T$ , avec  $\alpha$  compris entre 0 et 1.  $\alpha$  est appelé **rappor cyclique** du signal (**Duty cycle**). Alors :

$$\bar{U} = \frac{E \cdot \alpha T + 0 \cdot (1 - \alpha)T}{T} = \alpha E$$

La valeur moyenne d'un tel signal est **proportionnelle au rapport cyclique  $\alpha$** , comme l'illustre la figure ci-dessus pour les **différentes valeurs de  $\alpha$** .



## Valeur efficace

- C'est la valeur que devrait avoir une tension ou un courant continu pour produire, dans la même **charge résistive** et pendant le **même temps**, la **même énergie calorifique** que la tension ou le courant alternatif. Alors pour :

- Un courant continu **DC** (Direct Current) :

$$W_{DC} = RI_{eff}^2 T$$

- Un courant alternatif sinusoïdal **AC** (Alternating Current) :

$$W_{AC} = \int_0^T Ri(t)^2 dt$$

$$W_{DC} = W_{AC} \Leftrightarrow RI_{eff}^2 T = \int_0^T Ri(t)^2 dt$$

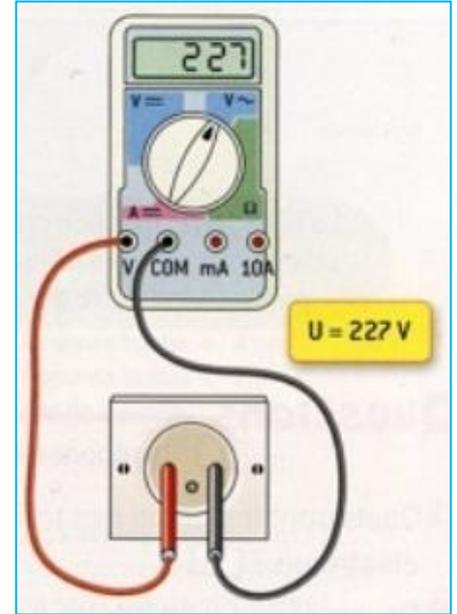
$$I_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T Ri(t)^2 dt$$

- Cas du signal sinusoïdal** :  $i(t) = I_{MAX} \sin(\omega t)$

On démontre que :

$$I_{eff} = \frac{I_{MAX}}{\sqrt{2}}$$

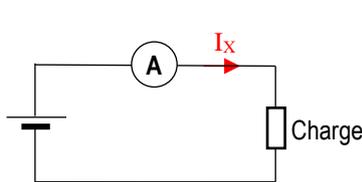
- Note** : Les valeurs des tensions et des courants alternatifs, notamment sinusoïdaux, sont données généralement en **valeurs efficaces** et sont mesurées à l'aide d'un appareil de mesure à courant alternatif.



## Mesure des grandeurs électriques

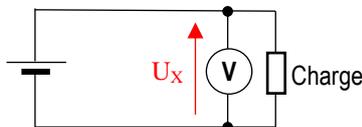
### Mesure de courant

- Un courant électrique se mesure avec un **ampèremètre**, qui se branche en **série** :



### Mesure de tension

- Une tension électrique se mesure avec un **voltmètre**, qui se branche en **parallèle** :

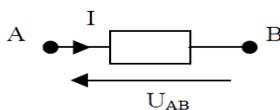


Un **Multimètre** est un instrument de mesure permettant la mesure de plusieurs grandeurs électriques : courant, tension, résistance, etc.

## Dipôle électrique

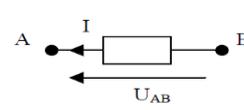
- Le comportement d'un dipôle électrique est caractérisé par la relation entre la tension à ses bornes et le courant le traversant. Il existe 2 possibilités pour le choix des **sens conventionnels** de la tension et du courant électrique :

### Convention récepteur



- Le courant et la tension sont fléchés en sens opposé
- Le dipôle reçoit de la puissance

### Convention générateur

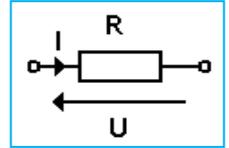


- Le courant et la tension sont fléchés dans le même sens
- Le dipôle fournit de la puissance

## Loi d'Ohm

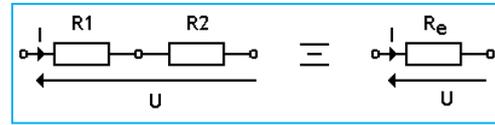
- Cette loi exprime que certains matériaux ont une **réponse linéaire en courant à une différence de potentiel imposée** ; c'est la résistance électrique R :

$$U = R \cdot I$$



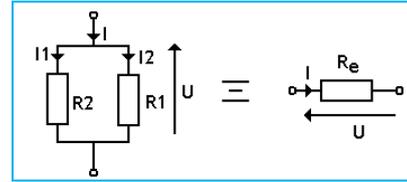
### Association des résistances en série

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$



### Association des résistances en parallèle

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

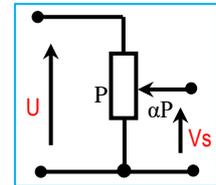
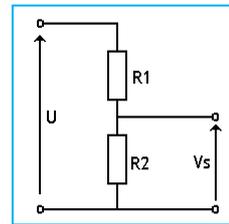


### Diviseur de tension

$$V_s = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

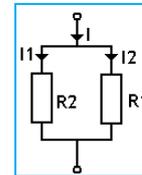
**Remarque :** Cas d'une résistance variable

$$V_s = \frac{U \cdot \alpha \cdot P}{P} = \alpha \cdot U$$



### Diviseur de courant

$$I_1 = \frac{I \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$



### Puissance électrique

- Par définition, la puissance est l'énergie consommée ou débitée par une charge pendant 1 seconde. C'est aussi le produit du courant **I** qui traverse la charge et de la tension à ses bornes **U** :

$$P = U \cdot I$$

## Piles et accumulateurs

- Parmi les générateurs de tension continue les plus rencontrés dans la pratique quotidienne, on trouve les **piles** et les **batteries d'accumulateurs**. Cette source représente une transformation de l'**énergie chimique** en énergie électrique.
- On obtient un générateur électrochimique en plongeant **2 électrodes** de natures différentes dans un **électrolyte**. L'ensemble constitue une **pile** ou un **accumulateur** électrique, dont la tension dépend de la nature des électrodes et de l'électrolyte.
- Contrairement aux **accumulateurs**, les **piles** sont des composants **non rechargeables**.



## Charge électrique

- La **charge électrique**, quantité d'électricité emmagasinée par l'accumulateur, se mesure en **Ampere.heure (Ah)**. Elle se mesure donc dans la pratique en multipliant un courant constant par le temps de charge/décharge, en Ah ou mAh, mais l'unité officielle de charge (SI) est le **Coulomb (C)**, l'équivalent de un A.s (ampère pendant une seconde) :

- 1 Ah = 3 600 C
- 1 C = 1 Ah/3600 = 0,278 mAh

- Elle est couramment désignée par le terme « **Capacité** » ; elle est donc le nombre d'Ampères ou de milliampères que l'accumulateur peut débiter en un temps donné :

$$C = I \cdot t$$

- C : Capacité en Ah.
- I : Courant en A.
- T : Temps de décharge en s.

**Exemple :** Un accumulateur de 10 Ah pourra débiter soit :

- 10 A pendant 1 h.
- 5 A pendant 2 h.

Le produit « **Courant . Temps** » reste constant et caractérise la batterie.

- La **capacité** permet de calculer l'**autonomie** et donc la **durée d'utilisation** d'une batterie.
- L'**autonomie** d'une batterie dépend de la **puissance** de l'appareil connecté, i.e. de son **courant absorbé**.
- Il est recommandé de ne pas faire fonctionner une batterie jusqu'à **zéro** pendant chaque cycle de sa décharge ; cela **diminue** sa **durée de vie**.
- Une des **règles empiriques** est alors de ne pas utiliser plus de **80 %** de sa charge, i.e. laisser **20 %** dans la batterie avant un nouveau cycle de recharge.

## Energie emmagasinée

- L'énergie **W** stockée dans une batterie est égale à sa charge électrique **Q** ou sa capacité **C** multipliée par la tension **U** sous laquelle cette charge est déchargée.

$$W = U \cdot I \cdot t = U \cdot C$$

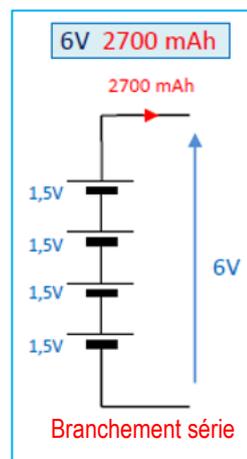
- L'unité de l'énergie W selon le SI est le **Joule (J)**. Mais, en pratique, on utilise le **Watt.heure (Wh)** :

- 1 J = 1 W.s = 1 Ws
- 1 Wh = 1 W.3600 s = 3600 J

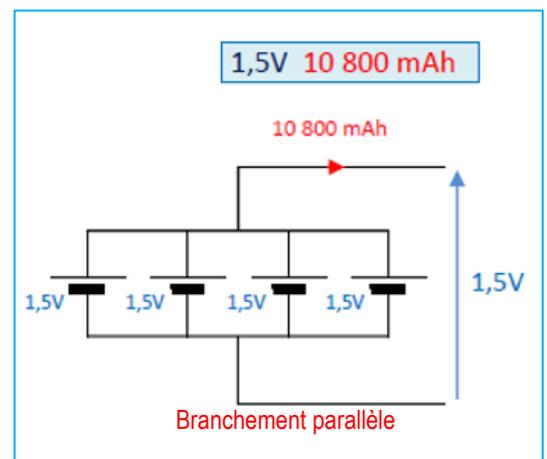
## Branchement

- Dans une batterie, les accumulateurs sont reliés entre eux de façon à créer une tension et une capacité désirées. Ces accumulateurs sont parfois appelés éléments de la batterie ou cellules. On distingue :

- **Le branchement série :** La tension totale **U** est égale la somme des tensions des éléments en série. La capacité **C** sera celle d'un seul élément. Par exemple, 4 éléments de **1,5 V-2,7Ah**, délivreront **6 V (4.1,5 V)-2,7Ah**.



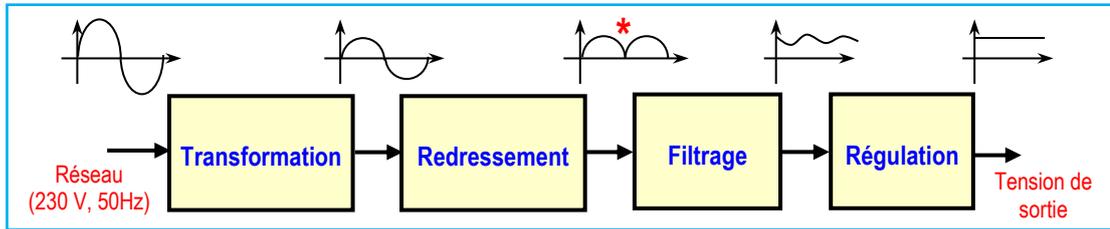
- **Le branchement parallèle :** La tension totale **U** est égale à celle d'un seul élément. La capacité **C** sera la somme des éléments en parallèle. Par exemple, 4 éléments de **1,5 V-2700 mAh**, délivreront **1,5 V-10,8 Ah**.



- La **combinaison** des 2 techniques (série et parallèle) pour augmenter à la fois la tension et le courant.

## Alimentation continue régulée

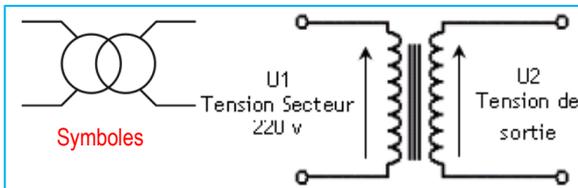
### Structure générale



\* : Pour être précis et juste, cette forme d'onde est obtenue sans le bloc fonctionnel du filtrage. Mais, pour des raisons didactiques, on se permet généralement dans la littérature, cette « **petite erreur** » !

### Transformation

- Le rôle de la transformation est **d'abaisser** la tension du réseau, qui est de 230 V. L'élément électrique qui réalise cette fonction est le **transformateur**.



$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

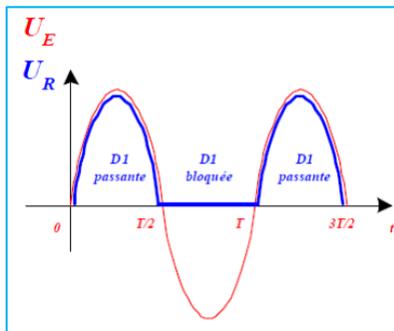
- m** est le rapport de transformation.
- n1** et **n2** sont respectivement les nombres de spires de la bobine primaire et la bobine secondaire.
- Pour avoir une tension en **sortie plus petite** qu'en entrée, il faut avoir la condition (**n2 < n1**).

### Redressement

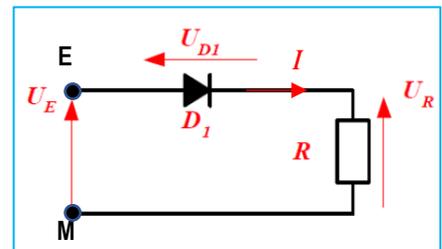
- Il a pour rôle de rendre **unidirectionnelle** la tension délivrée par le transformateur. Elle est réalisée à base de **diodes**.

#### Redressement mono-alternance

- Pendant l'alternance positive,  $U_E$  est positive, alors  $D_1$  conduit et  $U_R = U_E$ .
- Pendant l'alternance négative,  $U_E$  est négative, alors  $D_1$  est bloquée et  $U_R = R \cdot I = 0$ .

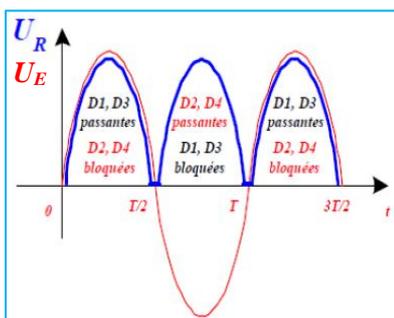


$$\langle U_R \rangle = \frac{U_{E_{MAX}}}{\pi}$$



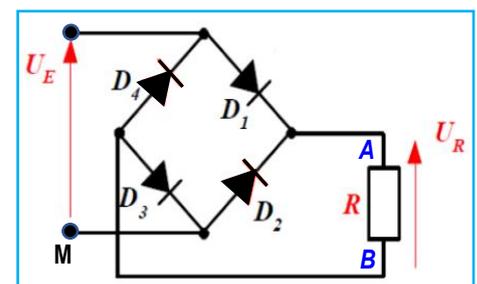
#### Redressement double-alternance

- Le montage le plus populaire est le redresseur à **pont de diodes** ; il comporte **4 diodes**.
- Pendant l'alternance positive,  $D_1$  et  $D_3$  conduisent et  $D_2$  et  $D_4$  sont bloquées ; **le courant circule de A vers B**.
- Pendant l'alternance négative,  $D_2$  et  $D_4$  conduisent et  $D_1$  et  $D_3$  sont bloquées ; **le courant circule de A vers B**.



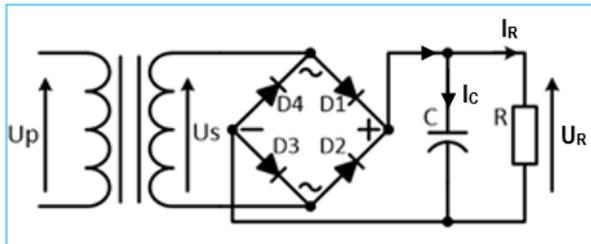
$$\langle U_R \rangle = \frac{2 \cdot U_{E_{MAX}}}{\pi}$$

Pour les 2 alternances, le courant dans la charge R circule toujours dans le même sens : **de A vers B**

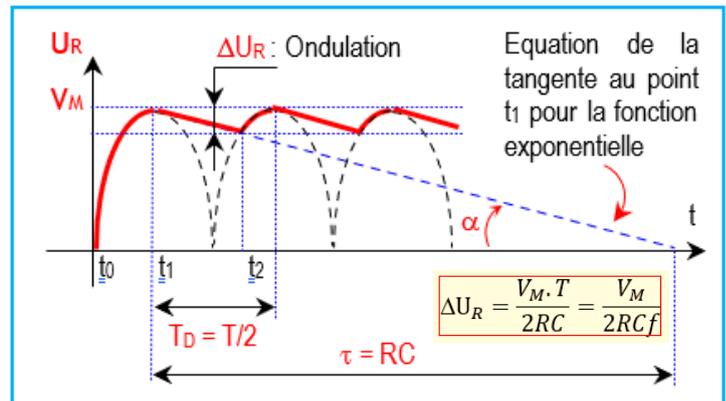


## Filtrage

- Le filtrage est basé sur l'aptitude d'un **condensateur** à pouvoir se charger et se décharger. Le principe de base consiste donc à brancher un condensateur C en parallèle avec la charge R.
- La tension obtenue à la sortie d'un filtre est une tension continue mais avec une **ondulation**, comme le montre le signal rouge de la figure ci-dessous.

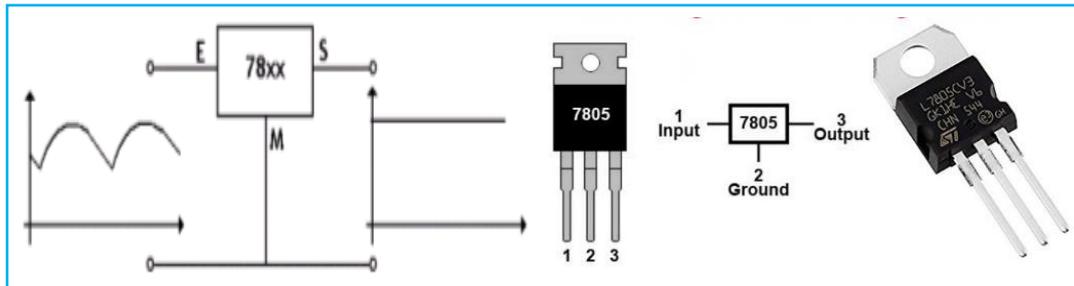


- $U_p$  : Tension primaire du transformateur.
- $U_s$  : Tension secondaire du transformateur,  $U_s = V_M \sin(\omega t)$
- $T_D$  : Période du signal redressé en Double alternance.
- $T$  : Période du signal du réseau de valeur 20 ms ( $f = 50$  Hz)



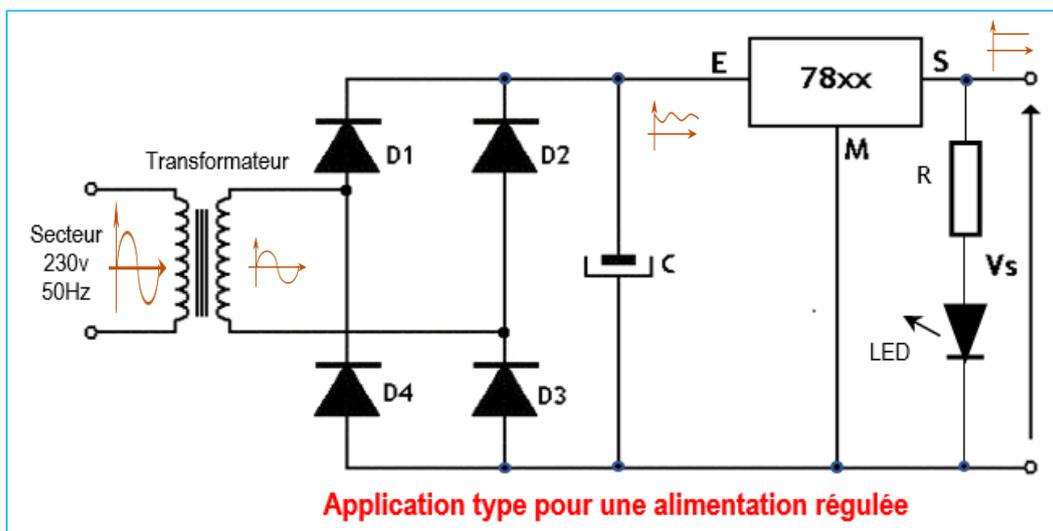
## Régulation

- La régulation permet d'avoir une tension **hautement continue** et **stable**. Elle est assurée par un **régulateur intégré** qui est un composant électronique, généralement à 3 broches.



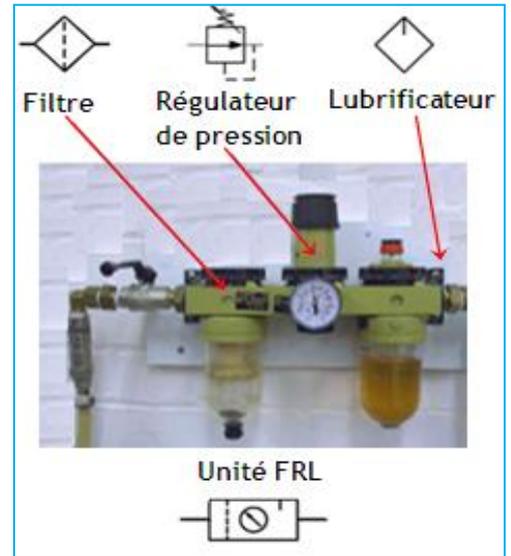
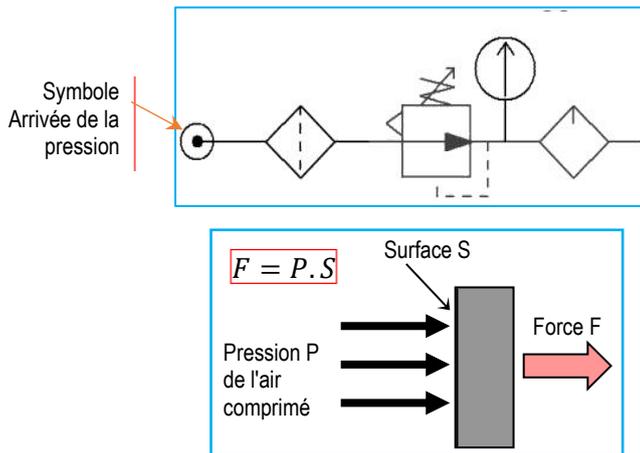
- Dans la pratique, la famille des régulateurs de type **78XX** est la plus utilisée. Un régulateur de cette famille délivre une tension constante à ses bornes de sortie égale à **XX V**.

**Exemples :**  
7805 : tension à la sortie égale à +5V.  
7812 : tension à la sortie égale à +12V.



## Alimentation pneumatique

- La distribution de l'air comprimé s'effectue par un réseau de canalisations et un **groupe de conditionnement** de l'air comprimé :
  - Filtre** pour assécher l'air et filtrer les poussières.
  - Mano-régulateur** pour régler et réguler la pression de l'air.
  - Lubrificateur** pour éviter la corrosion et améliorer le glissement.



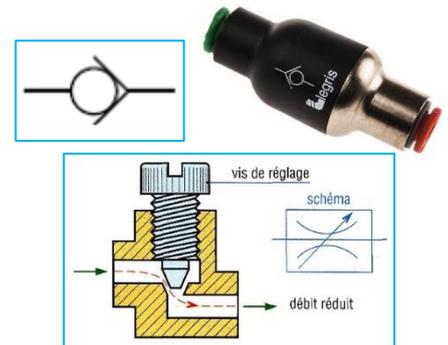
## Composants pneumatiques annexes

### Le clapet anti-retour

- Il assure le passage du fluide dans **un sens** et le bloque dans l'autre sens.

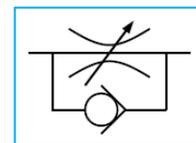
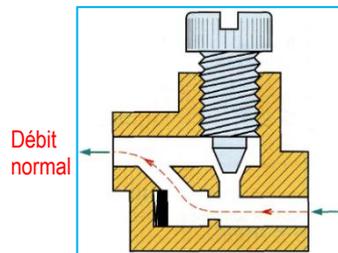
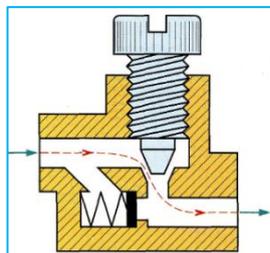
### L'étrangleur ou réducteur de débit bidirectionnel

- Un étrangleur a pour rôle de **régler le débit du fluide**, ce qui est utilisé pour le réglage de vitesse des vérins, sur chacun des **orifices d'échappement** des distributeurs.



### Le réducteur de débit unidirectionnel

- Il assure le freinage du débit de fluide dans un sens et le plein passage dans l'autre sens.



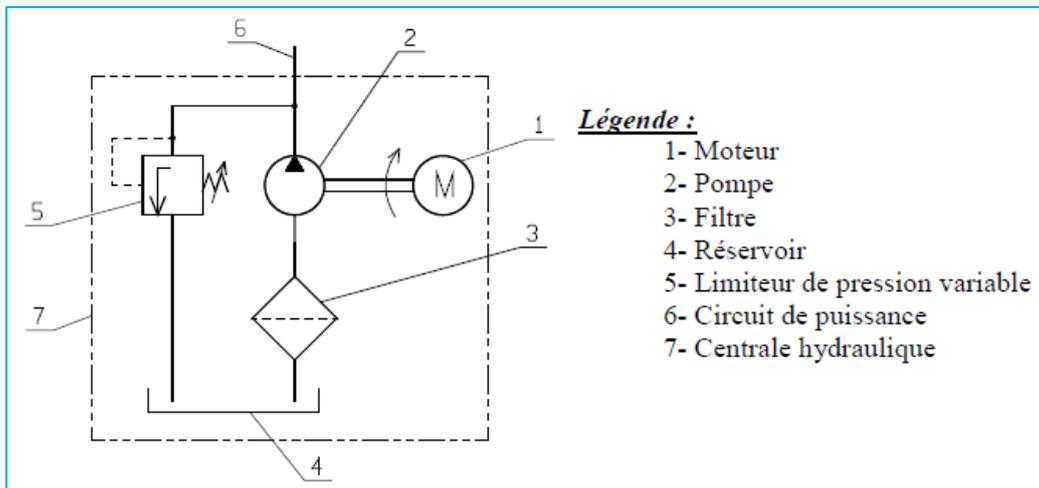
### Le silencieux

- Les silencieux sont chargés **d'atténuer les bruits d'échappement** de l'air comprimé.



## Installation hydraulique

- L'énergie hydraulique est pratiquement comparable à l'énergie pneumatique ; mais les systèmes hydrauliques permettent en particulier la transmission de forces et de couples plus élevés (pression **350 bar**).
- Une centrale hydraulique se compose principalement de :
  - Un **réservoir (4)** qui contient le fluide hydraulique.
  - Un **moteur** électrique ou thermique (**1**), qui entraîne une **pompe (2)** transformant l'énergie mécanique en énergie hydraulique.
  - Un **filtre (3)** nettoie l'huile des polluants, qui peuvent occasionner une usure prématurée des composants du circuit hydraulique.
  - Un **limiteur de pression (5)**, qui ouvre le circuit dès que la pression est trop élevée et protège les actionneurs contre des surcharges destructrices, ainsi que le personnel.



## Les grandeurs associées aux pompes hydrauliques

### La cylindrée

- La cylindrée notée **Cy** est le volume de fluide déplacé par une pompe pendant une révolution (**1 tour**) de l'arbre principal de la pompe ; elle a pour unité, le (m<sup>3</sup>/tr), le (l/min) ou le (l/tr), avec **1 m<sup>3</sup> = 1000 l**.

### Le débit

- C'est le volume refoulé par unité de temps, connaissant la cylindrée ; il est déterminé par :

$$Q = C_y \cdot N$$

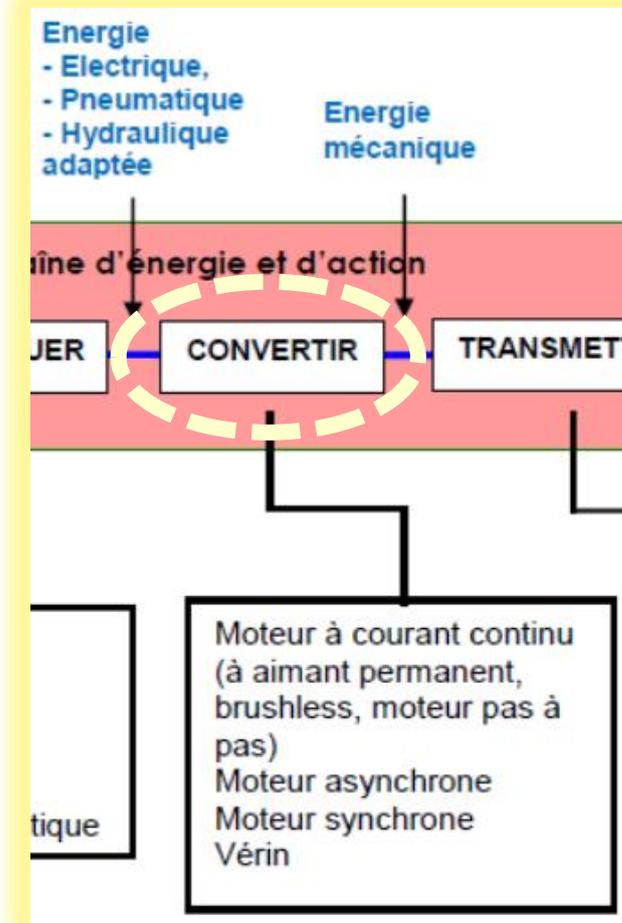
- Q : Débit (m<sup>3</sup>/s)
- N : Fréquence de rotation (tr/s)
- C<sub>y</sub> : Cylindrée (m<sup>3</sup>/tr)

### La puissance

- C'est la puissance fournie par le fluide à la sortie de la pompe ; elle est donnée par :

$$P = Q \cdot p$$

- P : Puissance (W)
- Q : Débit (m<sup>3</sup>/s)
- p : Pression (Pa)



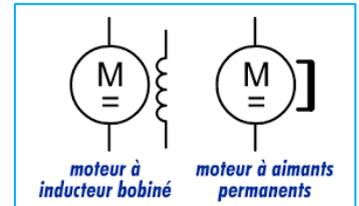
# Fonction Convertir

## Actionneurs électriques



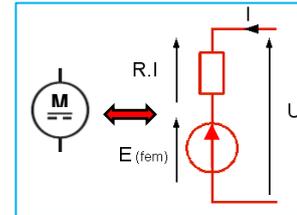
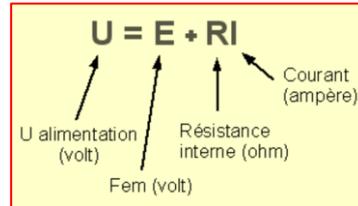
## La machine à courant continu (MCC)

- Comme toute machine tournante, la MCC est constituée d'un **stator** et d'un **rotor**.
- Le stator (**Inducteur**) à aimant permanent ou à électro-aimant est souvent non représenté, car son circuit est constant.

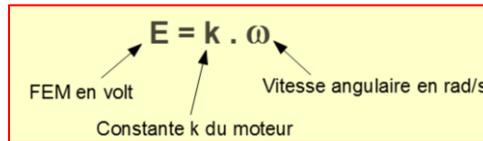


### Les équations caractéristiques de la MCC

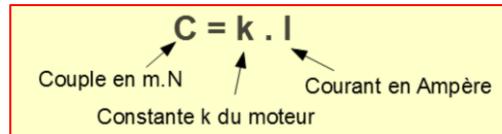
- L'équation de l'induit** : Elle découle directement du schéma équivalent de l'induit ci-dessus :



- L'équation de la fem** : La fem E est proportionnelle à la vitesse angulaire :

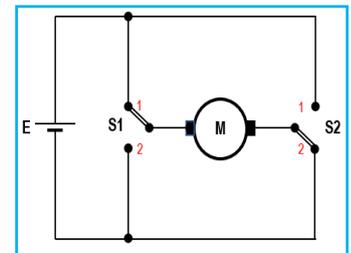


- L'équation du couple** : Le courant consommé par le moteur est proportionnel au couple résistant.



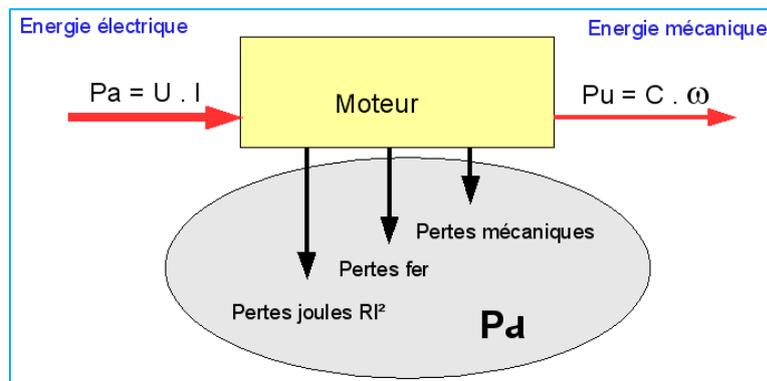
### Inversion du sens de rotation de la MCC

- Le schéma de principe est le suivant :
  - Sens 1** : le commutateur S1 en position 1 et le commutateur S2 en position 2.
  - Sens 2** : le commutateur S1 en position 2 et le commutateur S2 en position 1.



### Bilan de puissance

- La figure ci-dessous résume l'aspect énergétique d'une MCC :



- Puissance perdue (W)** : Cette puissance  $Pd$  correspond aux pertes électriques par effet Joule ( $R.I^2$ ), aux pertes mécaniques et aux pertes magnétiques.
- Dans le cas où on a uniquement des pertes Joules,  $Pu = Pa - Pd = U.I - R.I^2$
- Rendement** : C'est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée ;  $\eta = Pu/Pa$ .

## Le moteur asynchrone triphasé (MAS)

- On considère le MAS à rotor en court-circuit ou à **cage**.
- Les 3 bobines du **stator** réparties à **120°** et alimentées par un système de tensions triphasées créent un champ **magnétique tournant** à la **vitesse de synchronisme  $N_s$** .
- Le rotor métallique voit naître des courants induits et devient le siège de forces de Laplace, qui provoquent sa rotation à **une vitesse  $N$**  légèrement inférieure à la vitesse de Synchronisme  $N_s$  ; d'où le nom de moteur **asynchrone**.
- La différence entre la vitesse du champ  $N_s$  et la vitesse de rotation du rotor  $N$  est désigné par le **glissement  $g$**  :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (1)$$

- La vitesse de synchronisme  $N_s$  d'un moteur est proportionnelle à la fréquence de la tension du réseau :

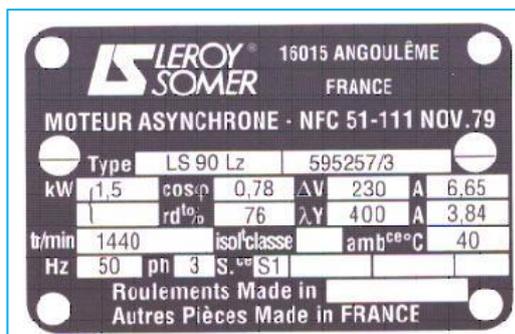
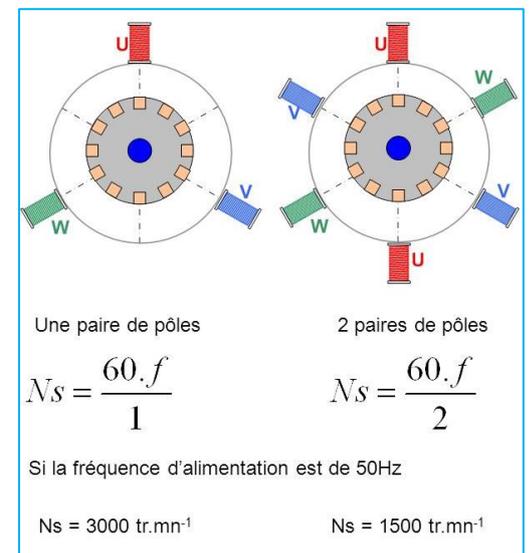
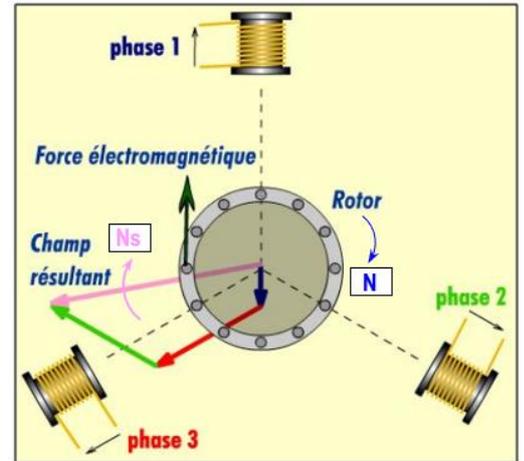
$$N_s = \frac{f}{p} \quad (2)$$

- $N_s$  : fréquence de synchronisme (tr/s).
  - $f$  : fréquence du réseau (Hz).
  - $p$  : nombre de paires de pôles produits par l'inducteur.
- De (1) et (2), on tire la relation suivante, qui montre que  **$N$  est proportionnelle à  $f$**  :

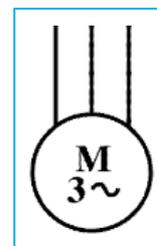
$$N = \frac{f}{p} (1 - g)$$

### Schématisation et branchement

- Sur la **plaque signalétique**, on indique, entre autres :
  - Les 2 tensions nominales du moteur pour les montages possibles : Etoile (**Y**) ou Triangle (**Δ**).
  - Les courants nominaux en (**Y**) et en (**Δ**).
  - La puissance utile (**Pu**) délivrée sur l'arbre moteur.
  - La vitesse nominale du rotor (**N**).
  - Le rendement (**η**).
  - Le facteur de puissance (**cos φ**), qui permet de calculer la puissance absorbée.



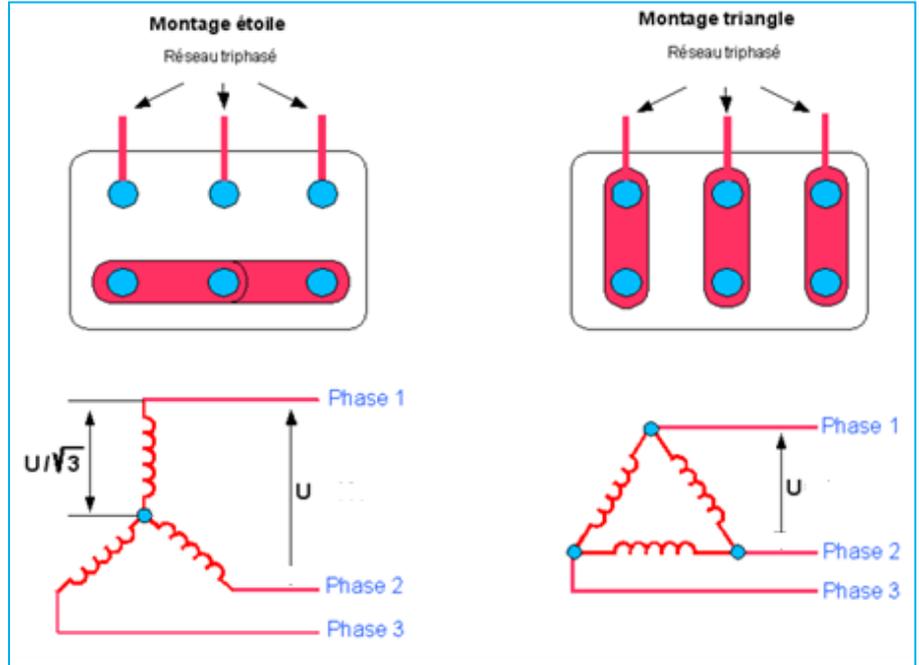
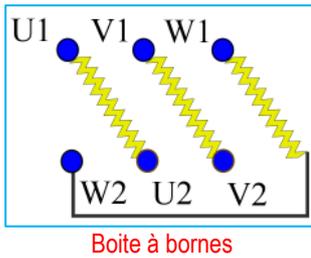
Plaque signalétique



Schématisation  
(Moteur à cage)

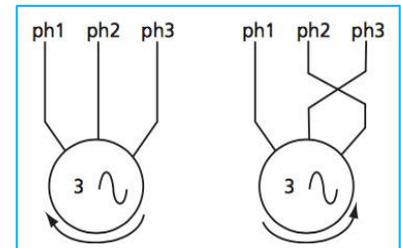
- Si le réseau a une **tension composée U** de même valeur que la valeur admissible par chacune des bobines du stator (notée **Ub**), on peut alimenter les bobinages sous **U**. Le couplage est alors le **couplage Triangle**.
- Si le réseau a une **tension simple V** de même valeur que **Ub**, la tension  $U = V\sqrt{3} = Ub\sqrt{3} > Ub$ , on ne peut pas alors alimenter directement chaque bobine sous **U**. Le couplage est alors le **couplage Etoile**.

- Montage Etoile et montage Triangle conformément à la **boîte à bornes** d'un MAS :

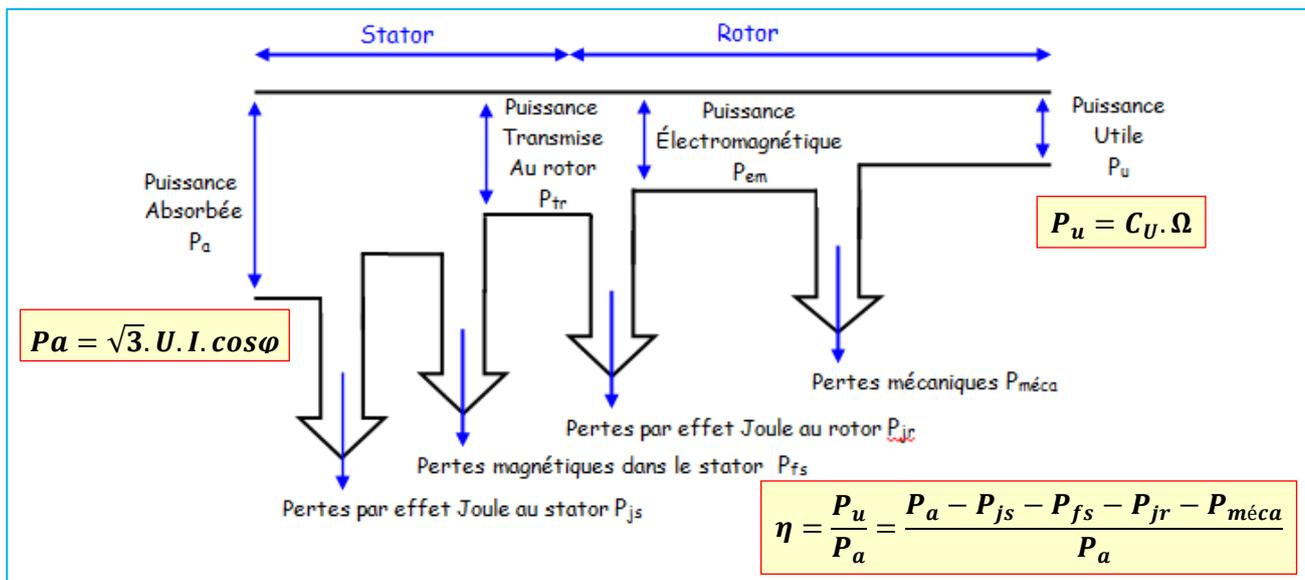


### Inversion du sens de rotation

- Un MAS peut tourner dans les 2 sens de rotation (horaire et anti-horaire) ; il suffit de **permuter 2 des 3 phases** pour changer le sens de rotation.
- La figure ci-contre montre un exemple de schéma de câblage :

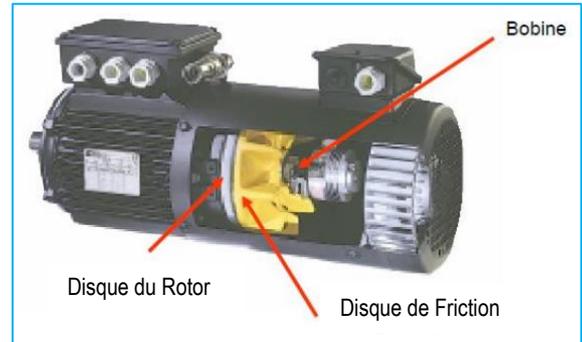
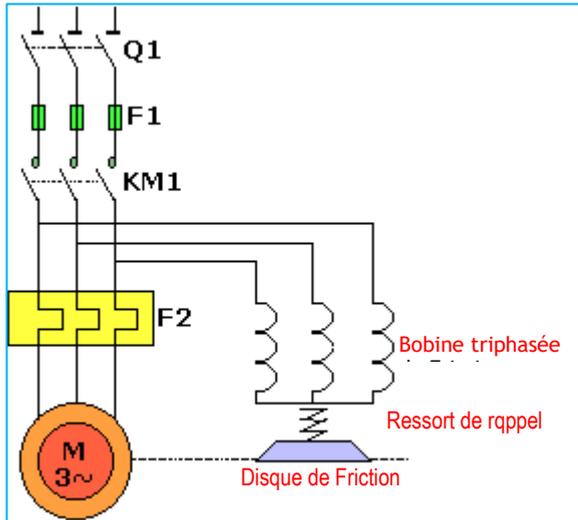


### Bilan des puissances



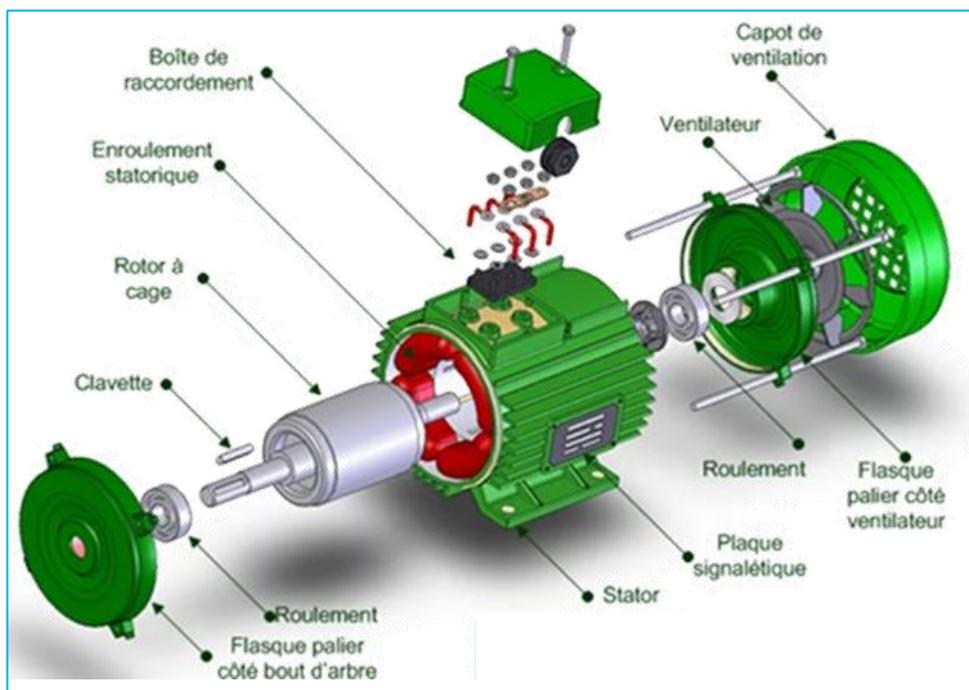
## Le MAS avec freinage à manque de courant

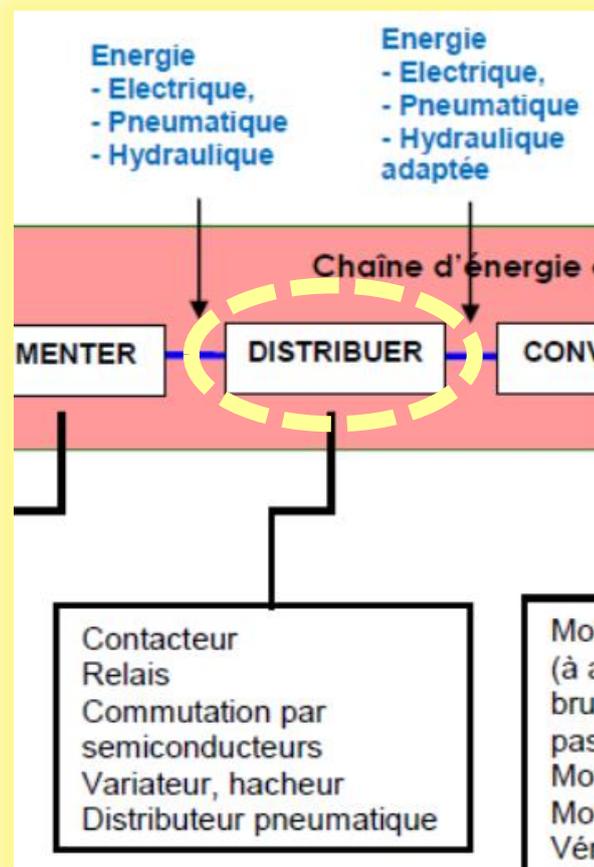
- L'arrêt d'un moteur est obtenu simplement par décélération naturelle ; le temps de décélération dépend alors de l'inertie de la machine entraînée. Mais il est souvent nécessaire de réduire ce temps ; le freinage électrique apporte dans ce cas une solution simple et efficace.
- Une des solutions courantes est le « **Freinage à manque de courant** ».
- **Schéma de principe :**



- Le moteur est muni d'un **frein électromagnétique** à disque monté du côté opposé à l'arbre de sortie ; ce disque est encastré avec le bâti.
  - La bobine de l'électroaimant du frein est raccordée en **parallèle** avec le moteur.
  - Quand le moteur est en Marche (fermeture de KM1), la bobine du frein est aussi alimentée, le disque de friction est séparé du disque du rotor ; il n'y a pas de freinage.
  - En l'absence ou **manque de courant** (ouverture de KM1 ou coupure du réseau), le **ressort** de rappel permet d'assurer le freinage, en mettant en contact le disque de friction fixe avec le disque du Rotor.
- Il existe des moteurs freins avec un électroaimant à courant continu, par l'intermédiaire d'un pont de diodes.

## Le MAS : Une vue éclatée





# Fonction Distribuer

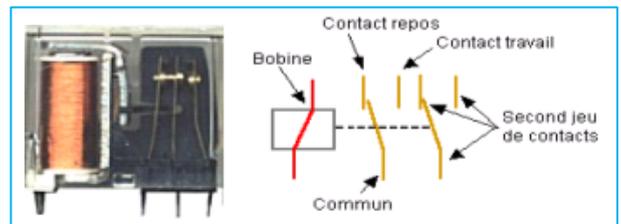
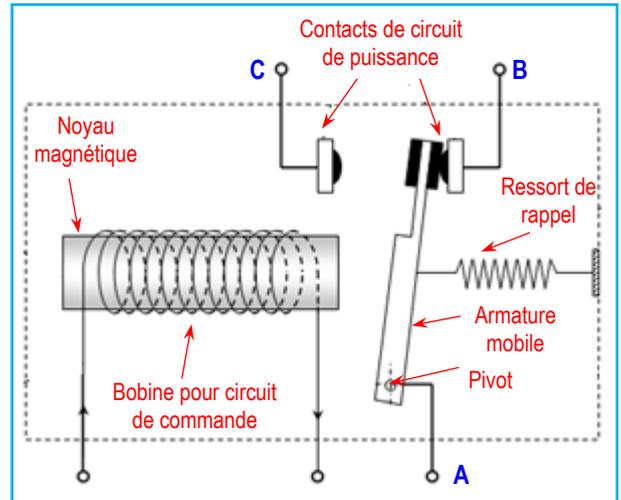
## Pré-actionneurs électriques



## Le relais

### Constitution et principe de fonctionnement

- Le fonctionnement d'un relais électromagnétique est comme suit :
  - Lorsqu'un courant circule dans la bobine, il se crée **champ magnétique**.
  - Le noyau attire l'armature, fermant ainsi le contact **A-C** et ouvrant le contact **A-B**.
  - Lorsque le courant cesse dans la bobine, le champ magnétique disparaît.
  - L'effet du **ressort** force l'armature à retourner à sa position initiale et les contacts retournent à leur position initiale.
- Les relais sont munis de 2 types de contacts :
  - **NO** : Normalement Ouvert.
  - **NF** : Normalement Fermé.

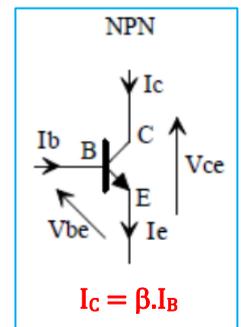


### Application : Commande d'une MCC

- Généralement une MCC est commandée par unité de commande, qui est de faible de courant, i.e. elle ne peut pas commander la MCC directement ; d'où la nécessité d'un circuit **d'interface** à base de **transistor**.

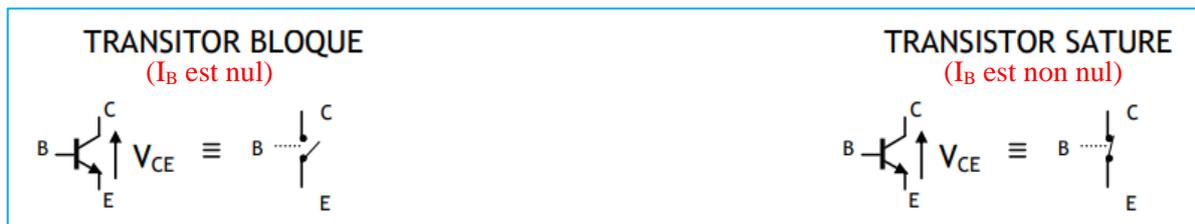
### Le transistor

- Le transistor est un **semi-conducteur** qui permet 2 types de fonctionnement :
  - Fonctionnement en régime linéaire (amplificateur).
  - Fonctionnement en régime de commutation (**bloqué / saturé**).
- Il existe 2 types de transistor bipolaire : le NPN et le PNP.
- On considère le transistor **NPN** dont :
  - Le symbole est donné par la figure ci-contre, ou les broches B, C et E représentent respectivement la **Base**, le **Collecteur** et l'**Emetteur**.
  - $\beta$  représente le gain en courant entre  $I_C$  et  $I_B$  ; il est typiquement égal à 100.



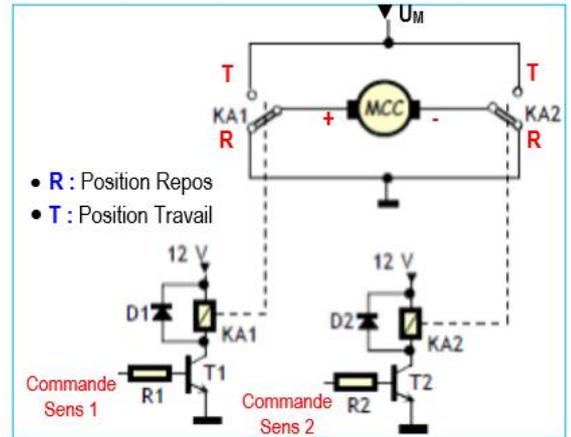
### Le transistor en commutation

- Le transistor en **commutation** est utilisé afin d'ouvrir ou de fermer un circuit.



## Commande de MCC avec 2 sens de rotation

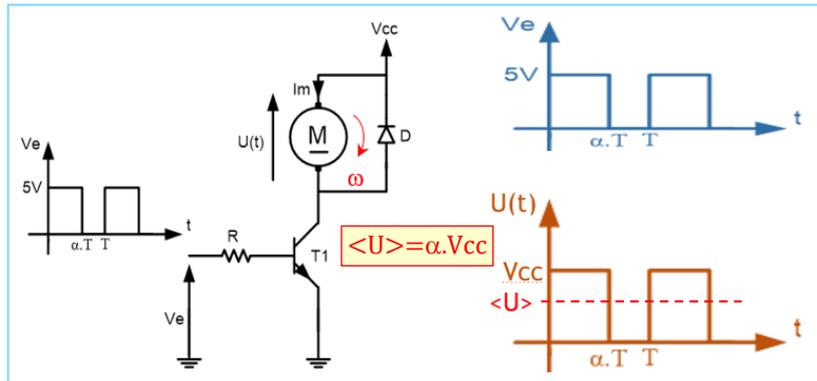
- La commande du sens 1 sature **T1** et **KA1** est excité (**position T**) ; la MCC est alimentée et tourne dans le sens 1, avec le + de  $U_M$  relié au + de la MCC.
- La commande du sens 2 sature **T2** et **KA2** est excité (**position T**) ; la MCC est alimentée et tourne dans le sens 2, avec le + de  $U_M$  relié au - de la MCC.
- Les diodes **D1** et **D2** n'interviennent pas en fonctionnement normal ; elles ont pour rôle la **protection de T1 et T2** contre les **surtensions provoquées par les bobines** des relais dans le cas du blocage de T1 et T2 ; elle sont connue sous la désignation de « **diode de roue libre** ».



## Variation de la vitesse d'une MCC par Hacheur

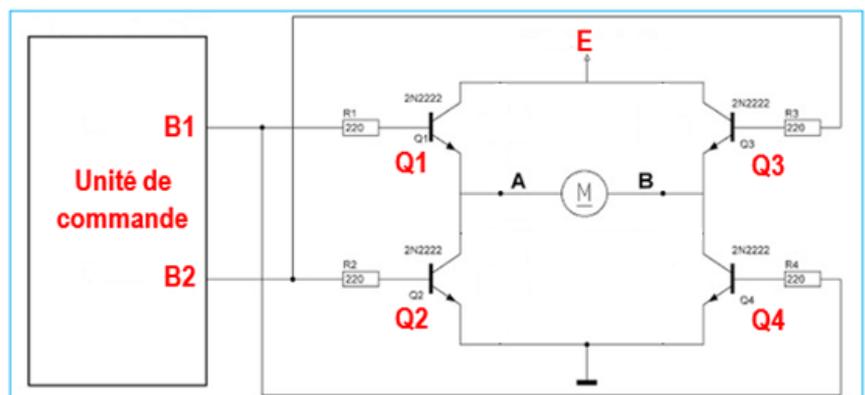
### 1 seul sens de rotation

- $V_e = 5\text{ V}$ , le transistor est saturé (équivalent à un interrupteur fermé), le moteur est alimenté par  $V_{cc}$ .
- $V_e = 0\text{ V}$ , le transistor est bloqué (équivalent à un interrupteur ouvert), le moteur n'est plus alimenté.
- On a alors la forme des signaux  $V_e$  et  $U$  (figure ci-dessous).
- La fréquence est suffisamment élevée pour avoir une rotation continue et sans bruit du moteur ; la MCC est sensible à la valeur moyenne ( $\langle U \rangle = \alpha \cdot V_{cc}$ ).
- Alors, en faisant varier  $\alpha$ , on fait varier  $\langle U \rangle$ , ce qui fait varier  $\omega$ , puisque  $\langle U \rangle = k \cdot \omega$ .



### 2 sens de rotation par pont en H

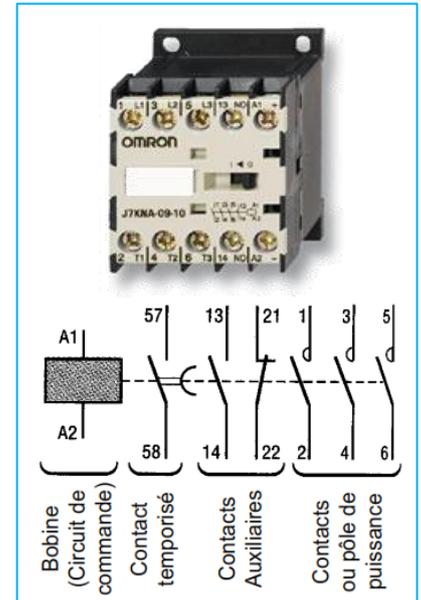
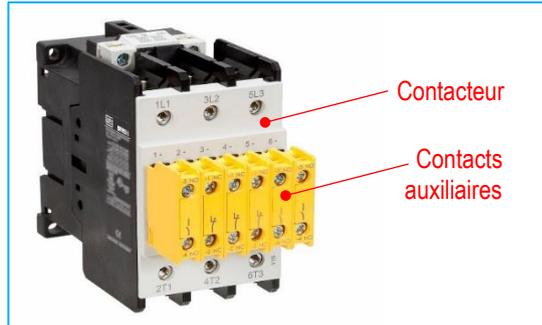
- $V_{B2} = 5\text{ V}$  et  $V_{B1} = 0$**  : Q2 et Q3 sont passants et le courant circule dans le moteur **M** dans le sens (**B vers A**).
- $V_{B1} = 5\text{ V}$  et  $V_{B2} = 0$**  : Q1 et Q4 sont passants et le courant circule dans le moteur **M** dans le sens (**A vers B**).
- $V_{B1} = 0$  et  $V_{B2} = 0$**  : Q1, Q2, Q3 et Q4 sont bloqués et le courant dans le moteur **M** est nul ; les diodes D1, D2, D3 et D4 sont des diodes de roue libre, qui protègent les 4 transistors.
- $V_{B1} = 5\text{ V}$  et  $V_{B2} = 5\text{ V}$**  : Dans une telle situation, un **court-circuit** se produit, ce qui est à éviter.
- Pour chacun des 2 sens de fonctionnement, **on varie la vitesse de M en variant le rapport cyclique** des signaux de commande en B1 et B2.



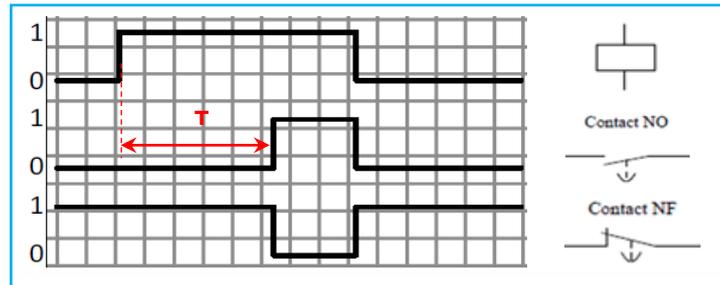
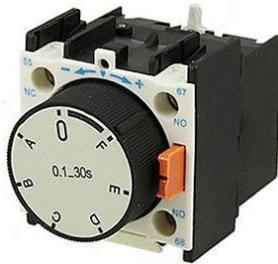
## Le contacteur

### Constitution et principe de fonctionnement

- Un contacteur est constitué de :
  - Une **bobine** de commande, qui peut être à courant continu ou à courant alternatif.
  - Des **pôles principaux** de puissance.
  - Un **contact auxiliaire**, avec la possibilité d'ajouter un bloc de contacts auxiliaires instantanés ou temporisés.



- L'exemple suivant montre un contact temporisé à l'enclenchement, i.e. quand la bobine est alimentée, le contact temporisé, attend un moment d'une **durée pré réglée T**, après laquelle il s'enclenche.

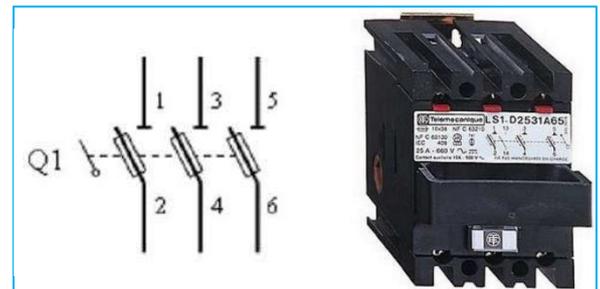


### Application : Commande d'un MAS

- Dans une installation électrique à base d'un MAS, on utilise le montage de base suivant, qui permet au moteur de fonctionner dans de bonnes conditions, avec une protection pour les biens et les personnes par :
  - Sectionneur** porte fusible contre les courts-circuits.
  - Relais thermique** contre les surcharges.
  - Disjoncteur** contre les surcharges et les courts-circuits.

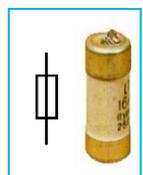
### Le sectionneur

- Le sectionneur permet **d'isoler** un circuit du réseau pour effectuer des opérations de maintenance ou de modification sur les circuits électriques.
- Généralement, un sectionneur contient aussi des fusibles (**Sectionneur porte-fusible**).



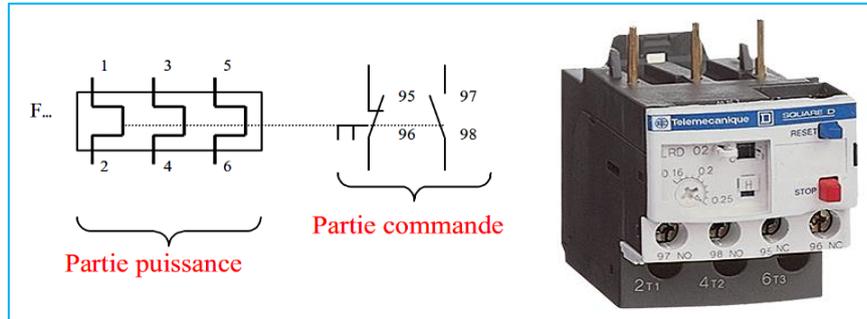
### Le fusible

- Le fusible est un composant de protection d'un circuit électrique contre un **court-circuit**.
- Il permet d'ouvrir un circuit par **fusion** d'un élément calibré, lorsque le courant dépasse une valeur précise.



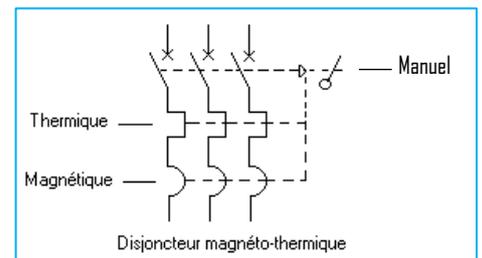
## Le relais thermique

- L'apparition d'une **surcharge en courant** se traduit par l'**augmentation de la chaleur** (effet joule).
- Le relais thermique détecte cette augmentation de chaleur et ouvre ou ferme des **contacts auxiliaires**, qui déclenchent le circuit de commande pour **protéger un moteur**.

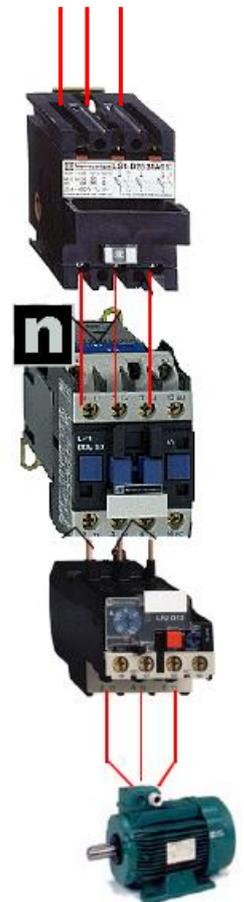
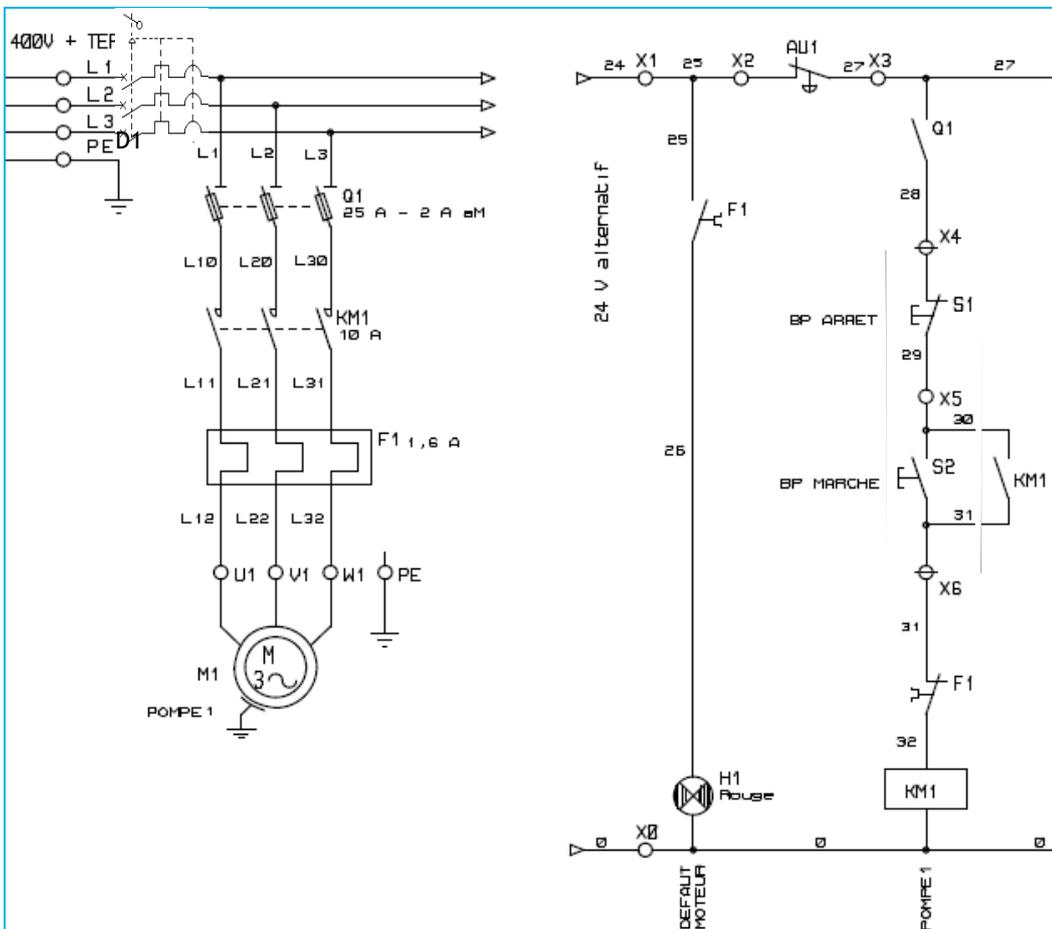


## Le disjoncteur magnétothermique

- Un disjoncteur magnétothermique est un appareillage de **protection des biens** ; il est composé de 2 parties :
  - Une partie **thermique** qui protège les biens contre les fortes surcharges.
  - Une partie **magnétique** qui protège les biens contre les courts-circuits.
- Donc, en cas de problème (forte surcharge ou court-circuit), l'appareillage **disjuncte** (coupe) le circuit, ce qui peut aussi être fait manuellement.



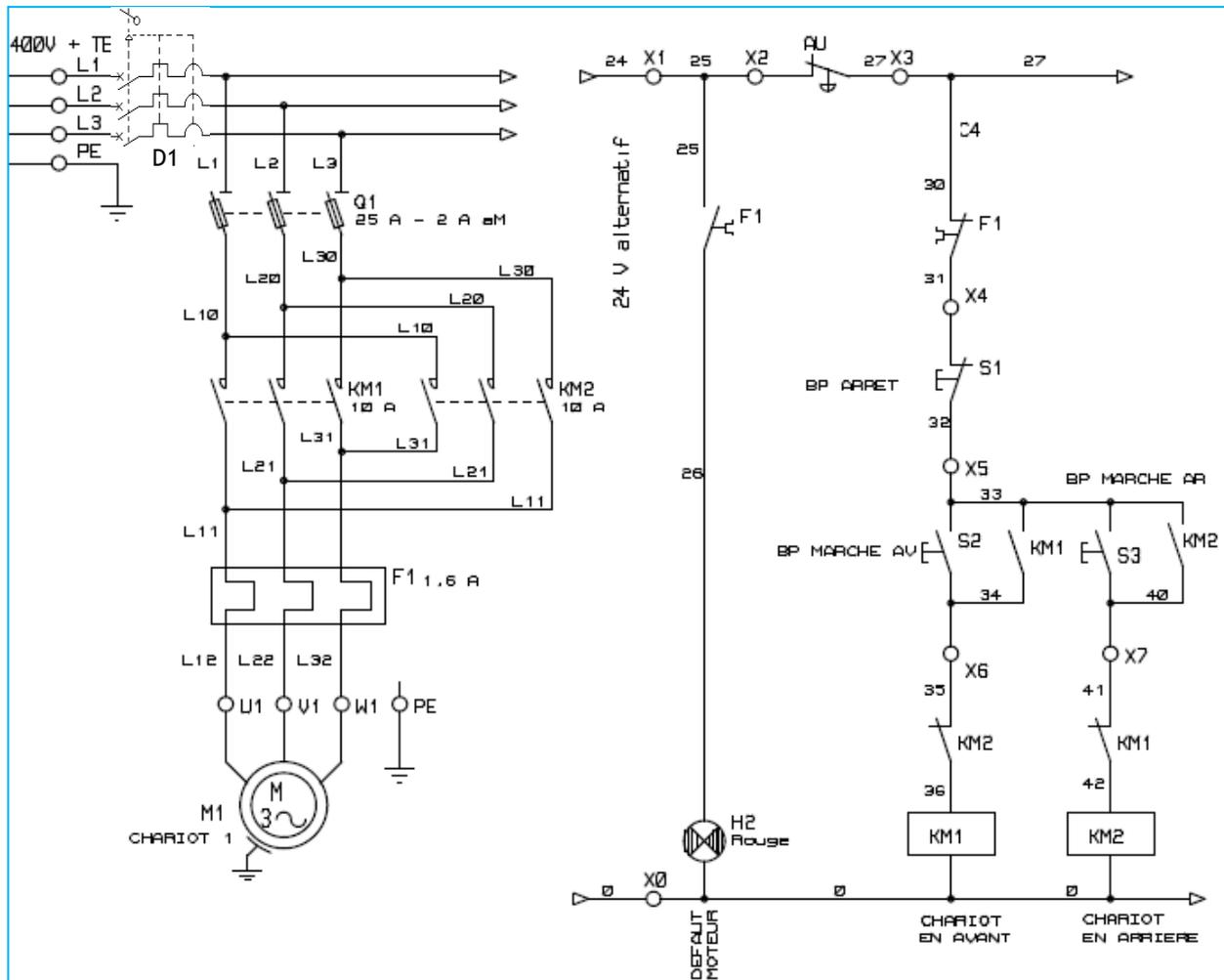
## Montage avec un seul sens de rotation



- Si **S2** est actionné, la bobine de **KM1** est alimentée ; le contact auxiliaire KM1 se ferme, ainsi que les contacts KM1 du circuit de puissance, ce qui entraîne la rotation du moteur M.
- Si **S2** est relâché le contact auxiliaire **KM1** maintient l'alimentation de la bobine du contacteur (mémoire) ; on parle alors d'**auto-maintien**.
- Si **S1** est actionné, on ouvre le circuit de commande ; la bobine **KM1** n'est plus alimentée et les contacts KM1 (commande et puissance) sont ouverts.
- Si au cours du fonctionnement (KM1 fermé), il y a une surcharge, le relais thermique F1 détecte cette surcharge et ouvre de ce fait le contact **F1** qui lui est associé, ce qui ouvre le circuit de commande, désalimente **M** et le protège.
- Le bouton d'arrêt d'urgence **AU** permet l'arrêt du moteur en cas de problème ; il est de type «**coup de poing**».
- Le disjoncteur **D1** protège l'ensemble de l'installation contre les surcharges et les courts-circuits.



### Montage avec 2 sens de rotation



- **S2** permet le fonctionnement dans le **sens 1**.
- **S3** permet le fonctionnement dans le **sens 2**.
- Il y a **verouillage électrique** de KM1 et KM2 (leur fonctionnement est **exclusif**) :
  - Si KM1 est actionné, son **contact fermé au repos** en série avec la bobine KM2 empêche celle-ci d'être alimentée et vice versa.
  - Cela évite leur fonctionnement simultané, ce qui provoque un court-circuit entre 2 phases.
- On peut renforcer la sécurité de ce point de vue, en ajoutant un **verouillage mécanique** symbolisé comme ci-contre par un triangle placé entre les 2 jeux de pôles principaux des 2 contacteurs.



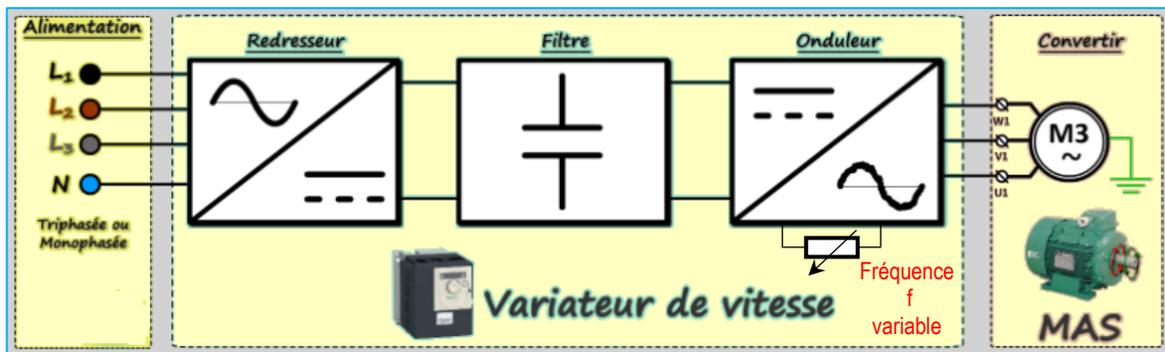
## Variation de vitesse d'un MAS avec Onduleur

- On sait que :

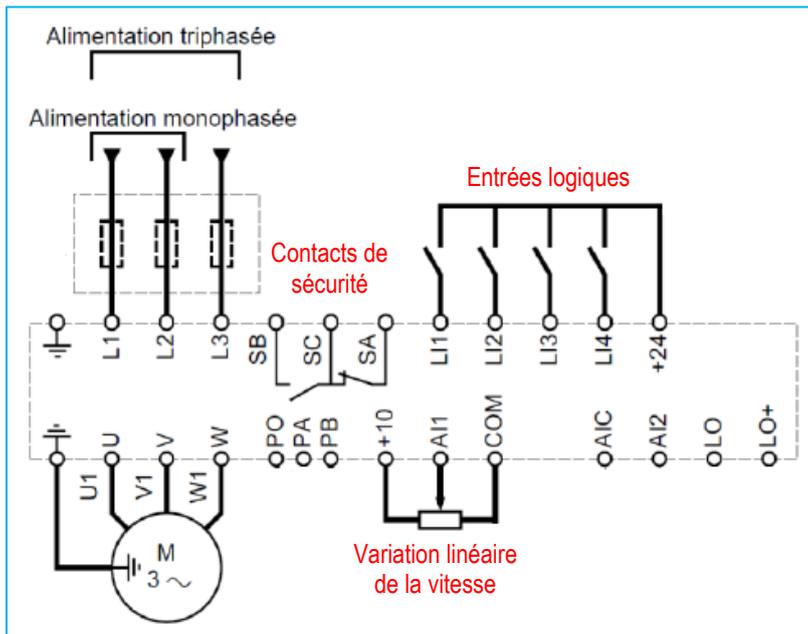
$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \text{ et } N_s = \frac{f}{p} \Rightarrow N = \frac{f}{p}(1 - g) \Rightarrow N \text{ dépend de } f.$$

Or  $f$  du réseau électrique est **fixe** ( $f = 50 \text{ Hz}$ ).

- Le principe consiste donc à **varier la fréquence  $f$**  de la tension d'alimentation triphasée du moteur.
- On utilise alors un **variateur de vitesse** dont la pièce maîtresse est un **onduleur** ; ce dernier permet de créer une **tension triphasée de fréquence variable**, à partir d'une tension continue.
- Structure d'un variateur de vitesse** : A partir d'une tension monophasée ou triphasée du secteur **50 Hz**, on crée une tension continue filtrée, qui commande l'onduleur, qui permet à son tour d'avoir une **tension triphasée à fréquence variable**, sous **contrôle électronique**.
- Un **variateur de vitesse** est considéré comme une solution constructive de la fonction « **Distribuer** » pour un MAS de **même puissance**.



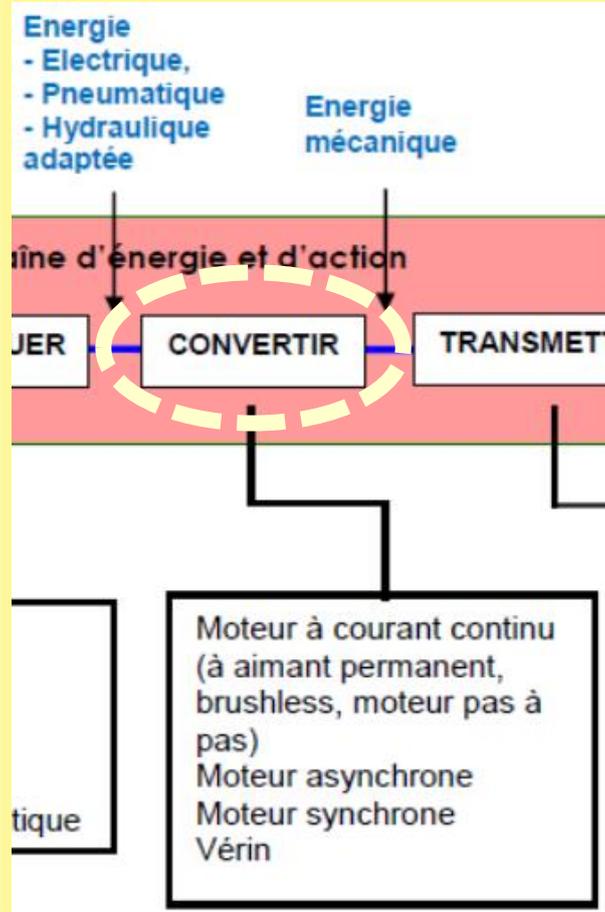
- Exemple de montage** : On note en particulier la possibilité de :
  - Varier la vitesse avec un potentiomètre.
  - Le fonctionnement avec 2 sens de marche.
  - Le fonctionnement avec des vitesses présélectionnées.



- AI1** : Entrée analogique pour consigne de vitesse (0 à 10 V) → (0 à 50 Hz).
- LI1** : Marche Avant.
- LI2** : Marche Arrière.
- LI3, LI4** : 4 vitesses présélectionnées :

LI3	LI4	Vitesse
0	0	0 Hz
0	1	10 Hz
1	0	25 Hz
1	1	50 Hz

- SA, SB et SC** : Contact de sécurité ; SB et SC reliés en cas de bon fonctionnement du variateur.



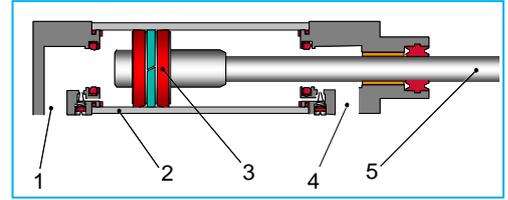
## Fonction Convertir

## Actionneurs pneumatiques



## Vérin pneumatique

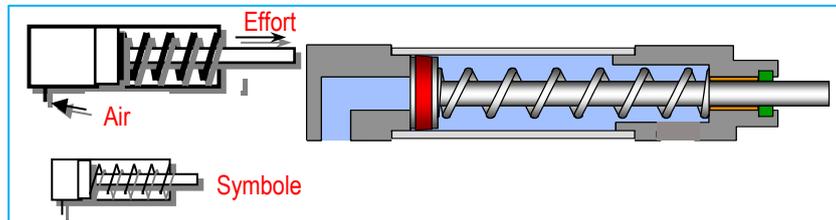
- Les vérins pneumatiques et les vérins hydrauliques sont pratiquement semblables ; la différence principale réside dans la **pression maximale** :
  - 10 bar pour les vérins pneumatiques.
  - 350 bar pour les vérins hydrauliques.
- Ils sont principalement constitués d'un **corps** et d'un **piston**, auquel est encastrée une **tige**.



- 1 et 4 : Orifice de raccordement  
2 : Tube fermé (corps du vérin)  
3 : Piston  
5 : Tige

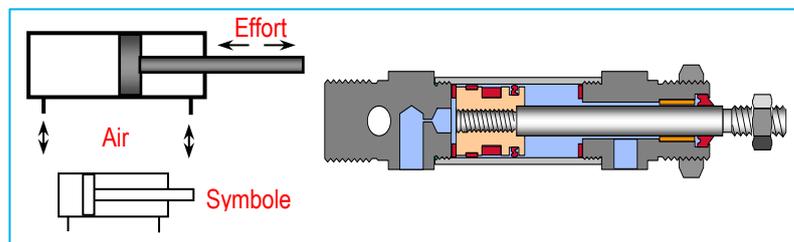
### Vérin simple effet

- Il produit l'effort dans un **seul sens** ; le retour à la position initiale s'effectue par un **ressort de rappel**.
- Il n'est donc utilisé que dans des applications où on a besoin **d'effort d'un seul côté**.



### Vérin double effet

- Dans un vérin double effet, la sortie et la rentrée de la tige s'effectue par l'application de la pression **alternativement**, de part et d'autre du piston.
- Les vérins double effet sont utilisés lorsqu'on a besoin **d'effort dans les 2 sens**.



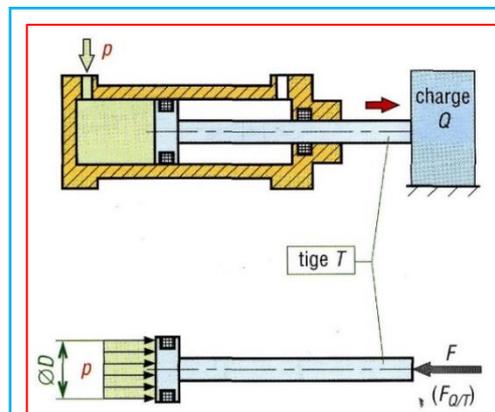
### Caractéristiques et performances d'un vérin

#### Effort transmissible

- Le choix et le dimensionnement d'un vérin s'effectuent en fonction de l'effort à transmettre.

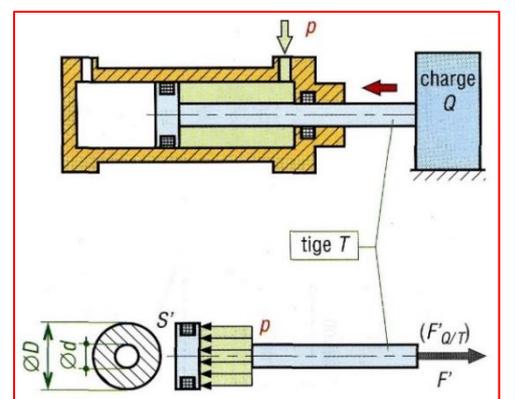
$$F = P \cdot S$$

F : Force (N)  
P : Pression (Pa)  
S : Surface (m<sup>2</sup>)



Effort disponible avec la sortie de la tige

$$F = P \cdot \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4}\right)$$



Effort disponible avec la rentrée de la tige

$$F' = P \cdot \pi \cdot \left(\frac{D^2 - d^2}{4}\right)$$

## Vitesse d'un vérin

$$V = \frac{Q}{S}$$

V	: Vitesse (m/s)
Q	: Débit volumique (m <sup>3</sup> /s)
S	: Surface (m <sup>2</sup> )

## Puissances

Puissance utile

$$P_u = F.V$$

P <sub>u</sub>	: Puissance utile (W)
F	: Force de déplacement (N)
V	: Vitesse de déplacement (m/s)

Puissance absorbée

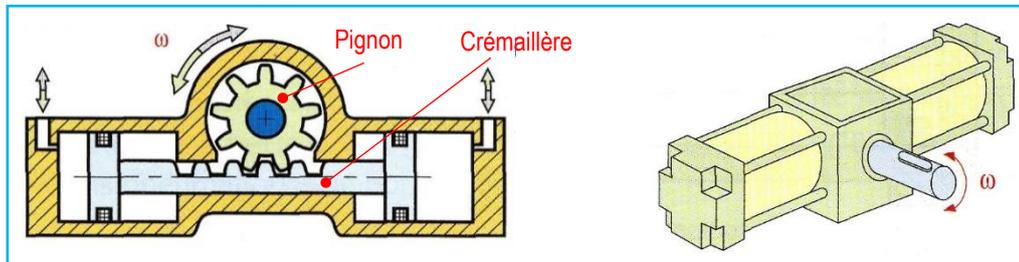
$$P_a = Q.P$$

P <sub>a</sub>	: Puissance absorbée (W)
Q	: Débit volumique (m <sup>3</sup> /s)
P	: Pression (Pa)

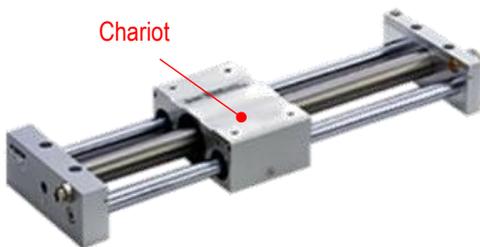
## Autres actionneurs pneumatiques

### Le vérin rotatif

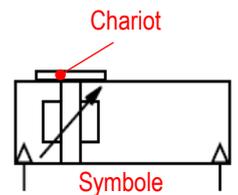
- Il est basé sur un système **pignon-crémaillère** ; la translation de la crémaillère par l'effet de la pression est transformée en rotation du pignon.



### Le vérin sans tige



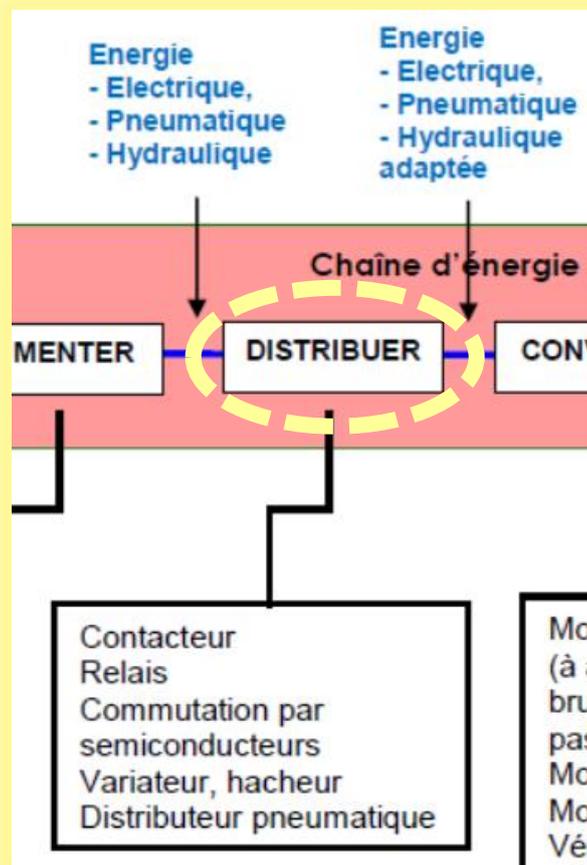
- C'est un vérin double effet, qui est 2 fois **moins encombrant** qu'un vérin classique à tige et permet **des courses plus grandes**.
- Il comporte un piston actionné des 2 côtés avec de l'air comprimé ; le piston entraîne un **chariot** qui se trouve à l'extérieur du corps du vérin.
- Parmi ses **applications** les plus courantes, on trouve le **transfert** de matériel,



### La pompe à vide

- Cet actionneur est aussi désigné par générateur de vide **Venturi** ; il a pour rôle la transformation de l'énergie pneumatique en surpression en une énergie pneumatique en **dépression**, ce qui permet une aspiration permettant de soulever des charges.





**Fonction  
Distribuer**

**Pré-actionneurs pneumatiques**

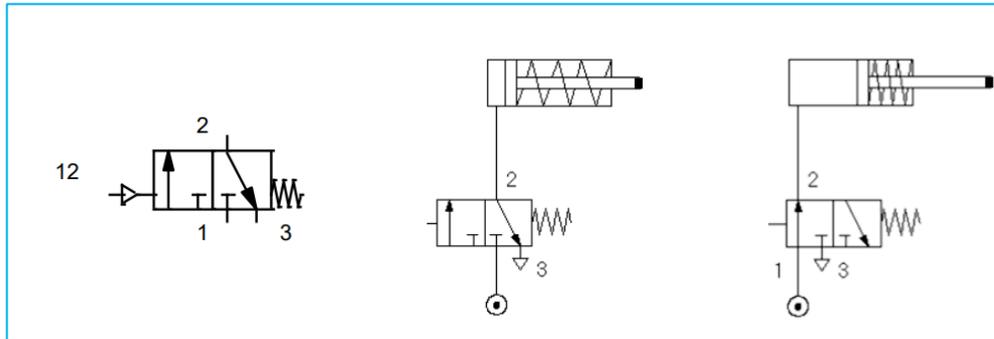


## Les distributeurs usuels

- Un distributeur pour un actionneur pneumatique, est ce qu'est un contacteur pour un moteur électrique.

### Distributeur 3/2

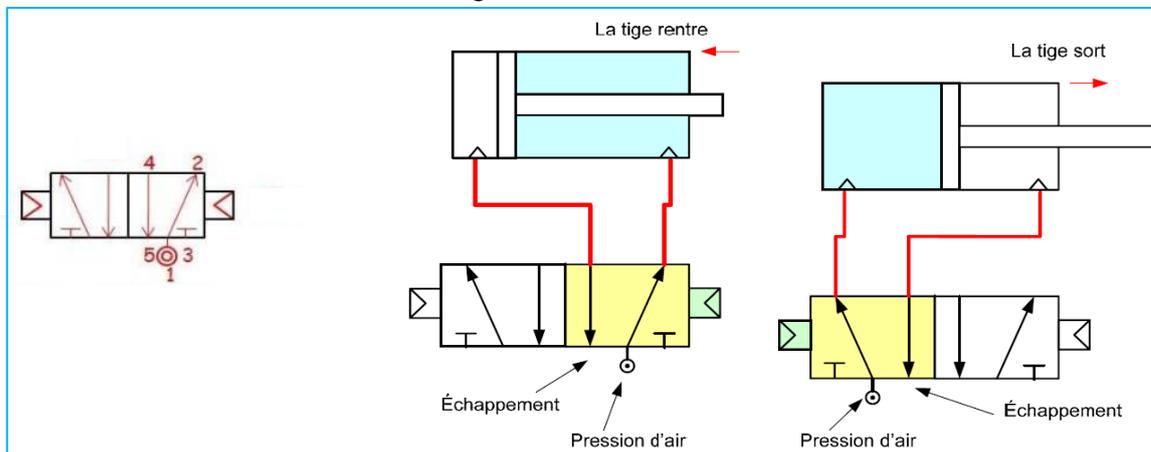
- Un **vérin simple effet** est commandé par un **distributeur 3/2** ; on a donc 3 orifices (pression, 1 sortie et 1 échappement) et 2 positions (repos et travail) :



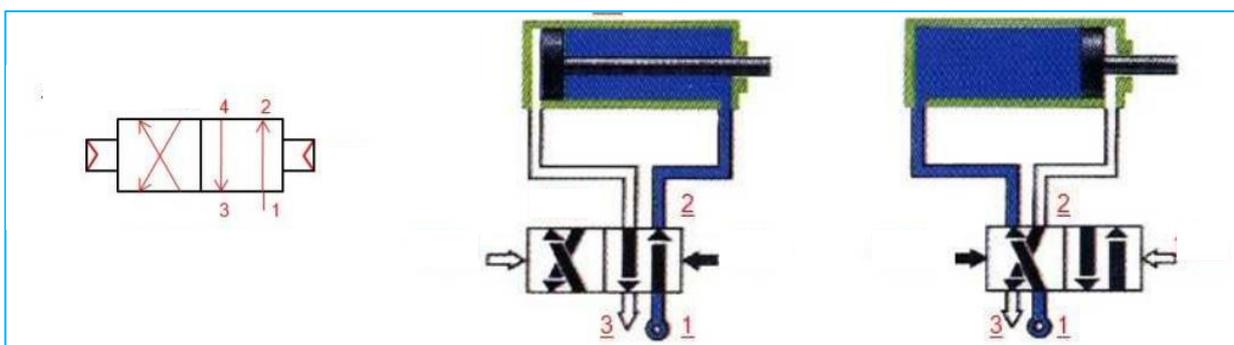
- **En position repos**, l'orifice de **sortie 2** vers le vérin est relié à l'orifice d'**échappement 3** et l'**alimentation 1** est bloquée ; la tige du vérin rentre.
- **En position travail**, l'orifice sortie 2 vers le vérin est mis en liaison avec la source d'air comprimé 1 ; l'orifice d'échappement 3 est bloqué ; la tige du vérin sort.

### Distributeurs 5/2 et 4/2

- Un **vérin double effet** a **2 possibilités** de commande :
  - L'utilisation d'un **distributeur 5/2** avec donc 5 orifices (pression, 2 sorties et 2 échappements) et 2 positions. On a un échappement différent pour chaque chambre, ce qui permet une **régulation différente** de la vitesse des 2 mouvements de la tige.



- L'utilisation d'un **distributeur 4/2** avec 4 orifices (pression, 2 sorties et échappement) et 2 positions.



## Distributeur 5/3

- Ce distributeur permet d'arrêter un vérin double effet dans une **position intermédiaire** (centre) :
  - Le distributeur 5/3 à **centre fermé** : les chambres du vérin sont isolées et maintiennent leurs pressions.

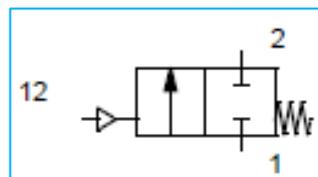


- Le distributeur 5/3 à **centre ouvert** : les chambres du vérin sont mises à l'échappement.



## Distributeur 2/2

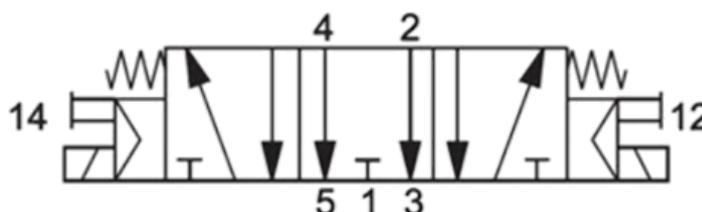
- C'est le distributeur le plus simple ; il se comporte comme un **robinet d'arrêt** de pression :
  - Dans une position, il laisse passer la pression.
  - Dans l'autre position, il bloque la pression.
- Il possède :
  - 2 orifices : l'arrivée et la sortie de la pression.
  - 2 positions : ouvert ou fermé.



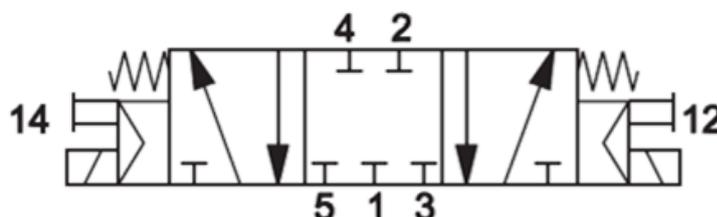
## Applications

### Montage pneumatique : Distributeurs 5/3

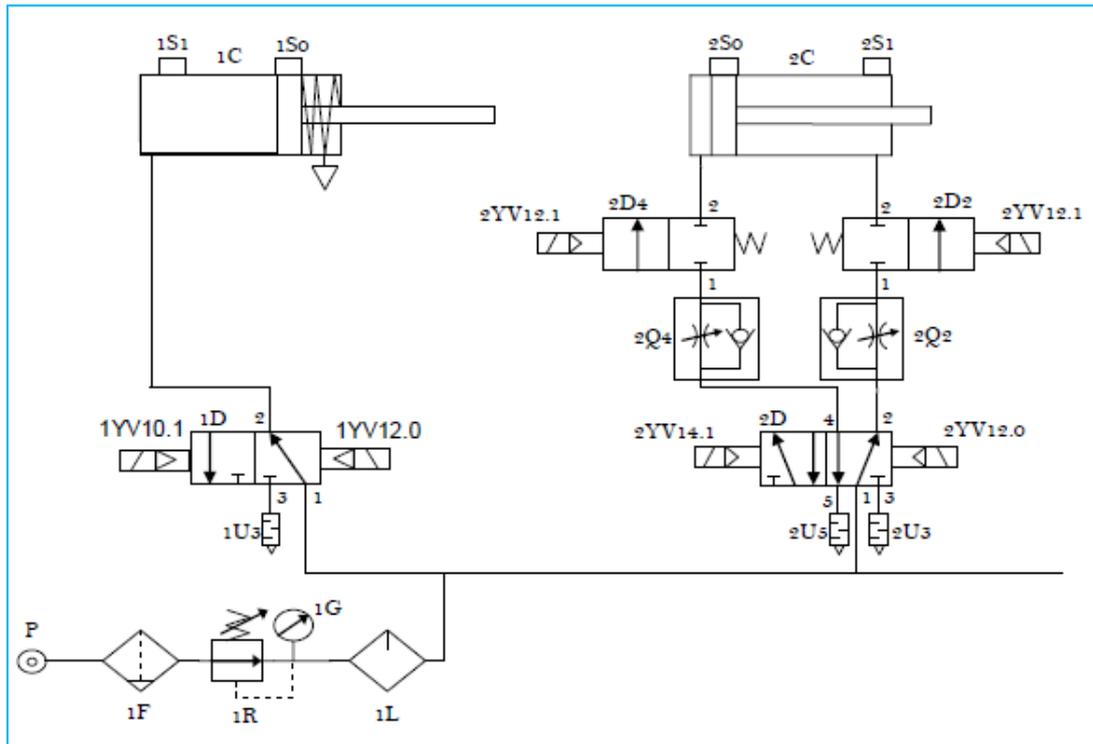
- La position centrale d'un 5/3 avec centre à l'échappement bloque l'arrivée d'air comprimée. Les 2 chambres sont mises à l'échappement. En cas d'aucune activation de bobine, ou de coupure électrique, les 2 chambres du vérin se vident. le vérin n'a plus aucune pression.



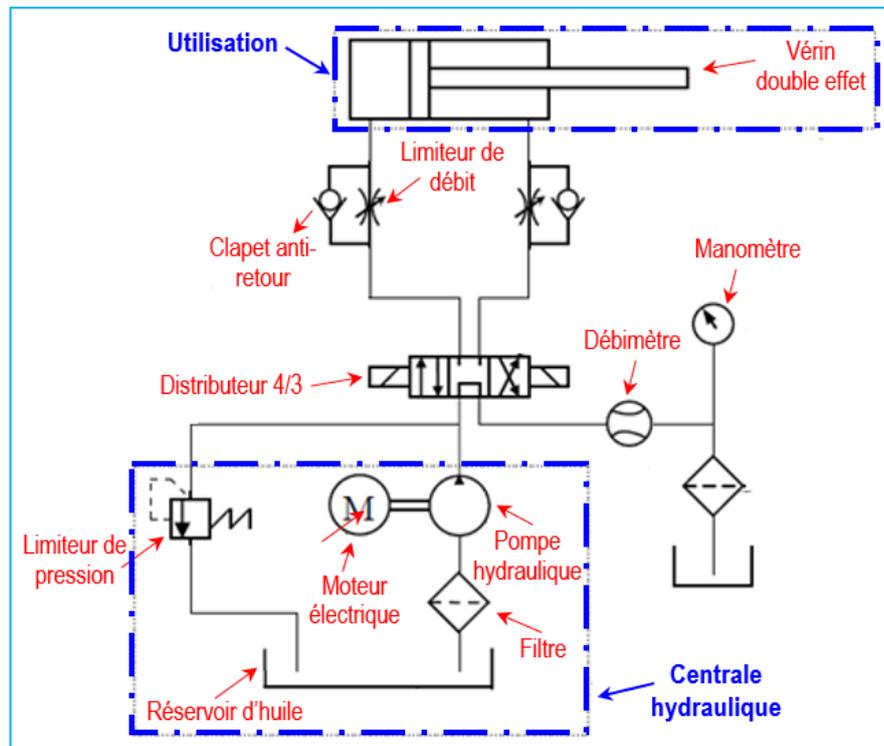
- Sur la position centrale d'un 5/3 avec centre fermé, tous les ports sont bloqués. En cas d'aucune activation de bobine, ou de coupure électrique, les 2 chambres du vérin restent avec la même pression qu'à l'état précédent. Le vérin s'immobilise à sa dernière position.



### Montages pneumatiques : Distributeurs 3/2 et 5/2



### Montage hydraulique

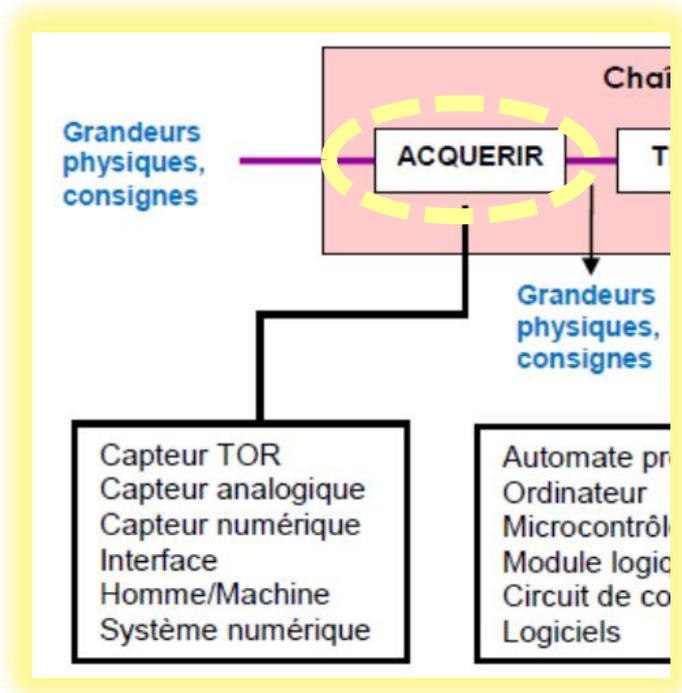


---

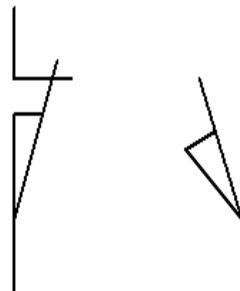
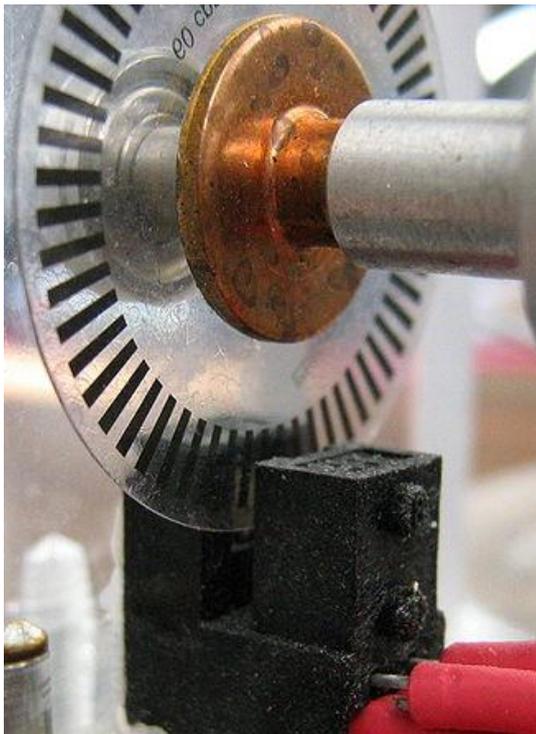
## **Module 3**

# **Chaîne d'information**

---



# Fonction Acquérir

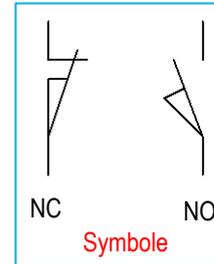


## Capteurs logiques (Tout Ou Rien : TOR)

- Les capteurs TOR fournissent **une information logique**, généralement sous forme d'un contact électrique qui se ferme ou s'ouvre suivant l'état du capteur.

### Capteurs avec contact

- Ce type de capteur est constitué d'un **contact électrique sec** qui s'ouvre ou se ferme selon que l'objet à détecter est présent ou non.



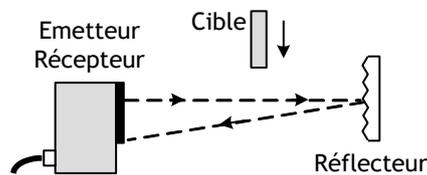
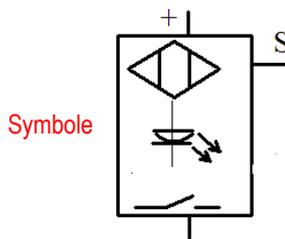
### Capteurs sans contact

- Les capteurs sans contact ou de **proximité**, agissent à distance et sans contact avec l'objet à détecter ; on trouve principalement :

- Les **capteurs inductifs** pour détecter des **objets métalliques**
- Les **capteurs capacitifs** pour détecter des **objets plus divers**.
- Les **capteurs photoélectriques** pour détecter des **objets opaques**.

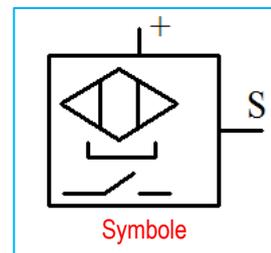
#### Exemple 1 : Capteur photoélectrique

- Ce type de capteurs se compose essentiellement d'un :
  - **Emetteur** de lumière InfraRouge (**IR**).
  - **Récepteur** photosensible.
- Une des techniques de montage parmi les plus utilisées est le **système reflex** : l'émetteur et le récepteur sont situés dans le **même boîtier**, avec l'utilisation d'un **réflecteur** qui renvoie le faisceau lumineux en cas d'absence de cible :

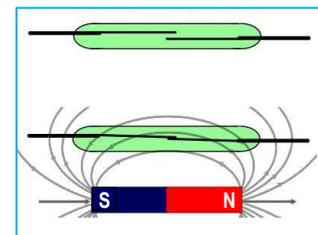
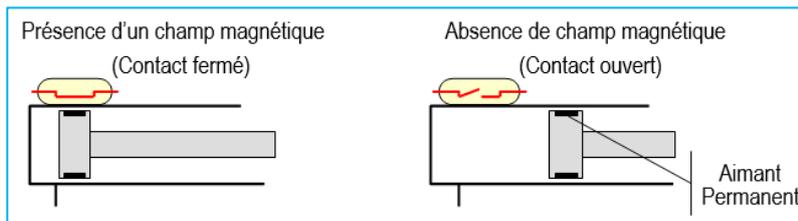


#### Exemple 2 : Capteur magnétique

- C'est un interrupteur à lame souple (**I.L.S.**), qui est constitué d'un boîtier en verre à l'intérieur duquel est placé un contact électrique métallique souple sensible aux **champs magnétiques**.



- Il est par exemple très utilisé pour la détection de la **position d'un vérin** (tige sortie ou rentrée).



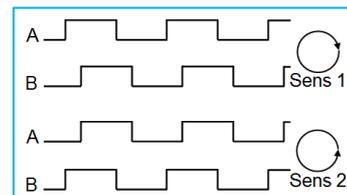
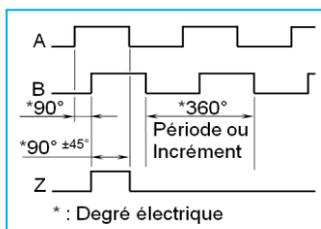
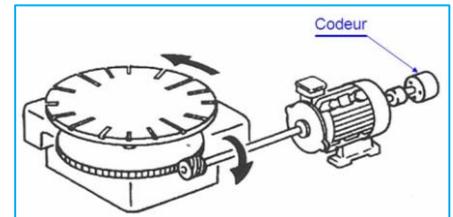
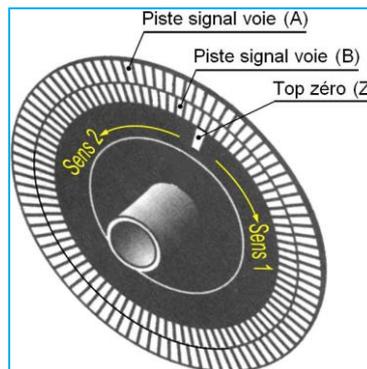
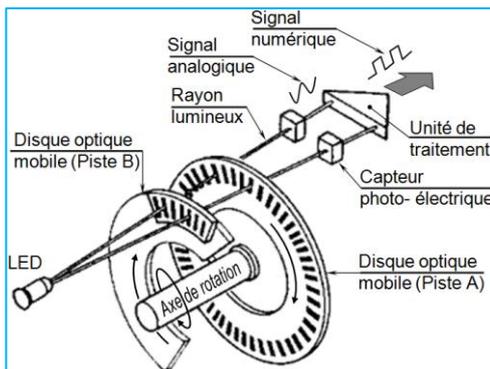
## Capteurs numériques

- Ils fournissent **une information numérique**, i.e. un nombre binaire image de la grandeur physique à mesurer ; le capteur le plus connu est le **codeur optique**, plus particulièrement le codeur incrémental.
- Les codeurs optiques sont utilisés pour la **mesure de déplacement** d'un mobile.

### Codeur incrémental

#### Principe

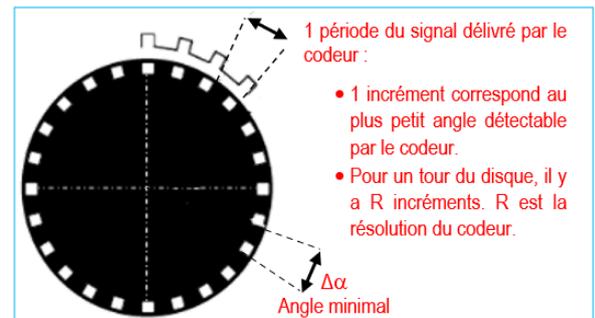
- Le disque rotatif comporte au maximum **3 pistes** :
  - Une ou 2 pistes extérieures divisées en **n intervalles** égaux alternativement opaques et transparents :
    - Pour un tour complet du codeur, le faisceau lumineux est interrompu n fois et délivre n impulsions carrées (A et B) en quadrature.
    - La quadrature de phase entre 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.
  - La piste intérieure **Z** délivre une seule impulsion par tour ; le signal Z détermine une position de référence et permet la réinitialisation à chaque tour.
- Le comptage impulsions par l'unité de traitement permet de définir la position du mobile.



#### Caractéristiques d'un codeur

- **Résolution** : C'est le **nombre total R des positions ou points** sur un tour du codeur (pts/tr) ; elle détermine la précision de mesure du codeur.
- **Précision** : C'est la distance parcourue pour **une position, 1 incrément** :
  - Dans le cas d'un déplacement angulaire, elle correspond donc à l'angle décrit entre 2 impulsions du disque ; cet angle est souvent exprimé en degré :

$$\Delta\alpha = \frac{360}{R}$$



Dans le cas où il y a un rapport de réduction **K** entre le dernier engrenage entraînant le mobile et le codeur, la relation devient :

$$\Delta\alpha = \frac{360}{R} \cdot K$$

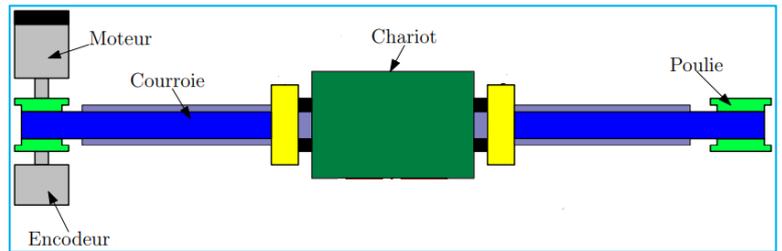
- Dans le cas d'un déplacement linéaire, on considère les 2 cas suivants parmi les très courants :
  - **Système Poulie-Courroie** : La poulie ayant un **rayon r**, l'angle  $\Delta\alpha$  correspond à l'arc, vérifiant la relation ( $x = r \cdot \theta$ ), avec  $\theta$  en rd ; alors :

$$\begin{cases} \Delta x = r \cdot \Delta\theta \\ \Delta\theta = \frac{2\pi}{360} \cdot \Delta\alpha \end{cases} \Rightarrow \Delta x = r \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot \Delta\alpha = r \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{360}{R} = \frac{2\pi \cdot r}{R}$$

$$\Delta x = \frac{2\pi \cdot r}{R}$$

Dans le cas où il y a un rapport de réduction **K** entre le codeur et le dernier engrenage entraînant le mobile, la relation devient :

$$\Delta x = \frac{2\pi \cdot r}{R} \cdot K$$



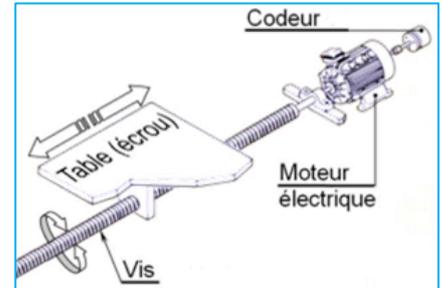
- **Système Vis-Ecrou** : Le système ayant un **pas p**, l'angle  $\Delta\alpha$  correspond au déplacement, vérifiant la relation ( $x = \frac{p}{2\pi} \cdot \theta$ ), avec  $\theta$  en rd ; alors :

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{p}{2\pi} \cdot \Delta\theta \\ \Delta\theta = \frac{2\pi}{360} \cdot \Delta\alpha \end{cases} \Rightarrow \Delta x = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot \Delta\alpha = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{360}{R} = \frac{p}{R}$$

$$\Delta x = \frac{p}{R}$$

Dans le cas où il y a un rapport de réduction **K** entre le dernier engrenage entraînant le mobile et le codeur, la relation devient :

$$\Delta x = \frac{p}{R} \cdot K$$



- **Précision** : Les signaux carrés **A** et **B** sont généralement de **fréquence élevée** et il faut s'assurer que leur valeur est supportée par l'unité de traitement. D'où la détermination de cette fréquence **f**, qui est effectuée comme suit :

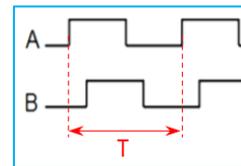
1 tour  $\rightarrow$  R.T (R est la résolution et T la période de A et B)

$$N \text{ tours/min} \rightarrow R.N.T = \frac{R.N}{f} = 1 \text{ min} = 60 \text{ s}$$

D'où la formule suivante :

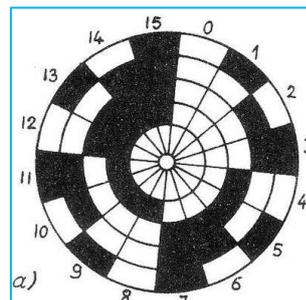
$$f = \frac{N \cdot R}{60}$$

- **f** : Fréquence (Hz).
- **N** : Vitesse du codeur (tr/min).
- **R** : Résolution (pts/tr).

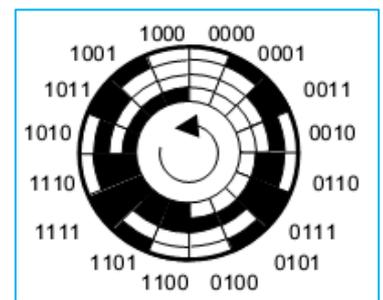


## Codeur absolu

- Un codeur absolu mesure un déplacement d'un mobile en fournissant directement la mesure sous forme d'un nombre binaire ; il comporte donc **plusieurs pistes**. A chaque position angulaire de l'axe du codeur correspond un **nombre binaire**, généralement représenté en code **GRAY**.



Code binaire pur



Code GRAY

## Capteurs analogiques

- La sortie d'un capteur analogique est une **grandeur électrique** dont la valeur est une **fonction** de la grandeur physique mesurée ; elle peut prendre une infinité de valeurs au sens de la **continuité** mathématique.
- Il y a une **grande variété** de capteurs analogiques : température, pression, contraintes mécaniques, débit, niveau, vitesse, etc.
- On traite à titre d'exemple la **dynamo tachymétrique**., qui permet de mesurer la **vitesse** d'un mobile en **rotation**.

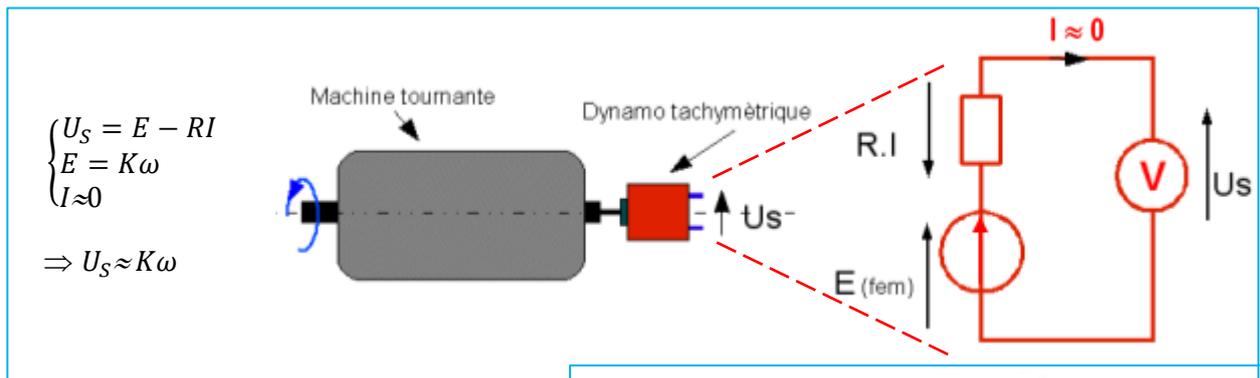
### Principe d'une dynamo tachymétrique

- Une machine à courant continu (**MCC**) peut se comporter comme une **génératrice** pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Dans ce mode de fonctionnement, la MCC peut être utilisée comme **capteur de vitesse** pour une machine tournante ; elle est désignée par **dynamo tachymétrique**.
- La dynamo tachymétrique délivre alors une tension  $U_s$  proportionnelle à la fréquence de rotation du mobile :



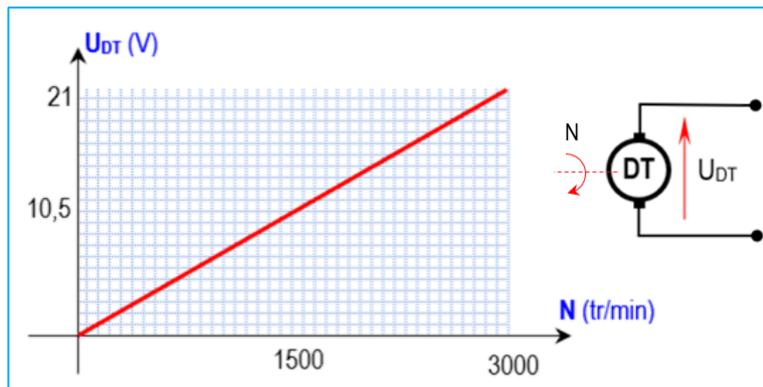
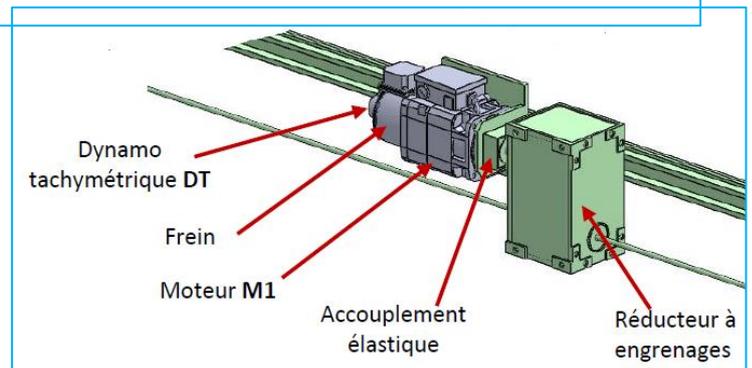
$$U_s \approx E = K_e \cdot N$$

- **E (fem)** : Force électromotrice.
- **$K_e$**  : Constante de fem (V/tr/min).



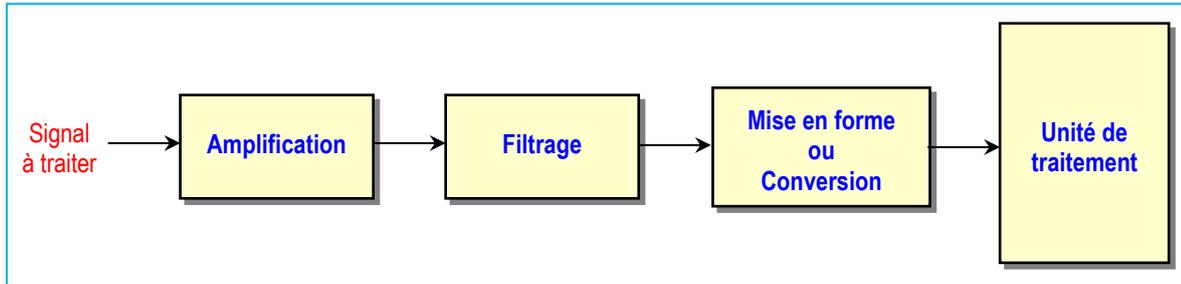
### Exemple d'application

- Soit l'extrait du système ci-contre, où on utilise une dynamo tachymétrique (**DT**) pour mesurer la vitesse **N** du moteur asynchrone **M1**.
- La DT a pour  $K_e = 7.10^{-3}$  V/tr/min.
- La caractéristique  $U_{DT} = f(N)$  pour  $N \in [0, 3000]$  :



## Conditionnement de signal

- Généralement, un capteur fournit un signal électrique qui peut se mettre sous différentes formes (tension, courant, etc.) et qui n'est **pas directement exploitable**.
- Le conditionnement du signal consiste à transformer et **adapter le signal** de départ afin de lui donner la forme la plus appropriée pour son **traitement**. Plusieurs fonctions contribuent à cette fin comme indiqué dans la figure suivante :



- **L'amplification** consiste à modifier l'amplitude du signal sans changer sa forme ni sa nature.
- Le **filtrage** consiste en une structure adaptée et calculée, qui laissera passer certains signaux et pas d'autres.
- La mise en forme ou la conversion consiste en une **modification de la nature du signal**. Par exemple, cela peut être une transformation :
  - D'un **courant en une tension** et inversement.
  - D'un signal **analogique en un signal logique ou numérique**.

### L'amplification à base d'un amplificateur opérationnel

- L'amplification se justifie dans les cas où le **signal est très faible**. Par exemple, un capteur fournit quelques microvolts ( $\mu\text{V}$ ), alors que l'unité de traitement ne peut reconnaître que des millivolts (mV).

### Amplificateur Opérationnel (AOP)

- L'amplificateur opérationnel est un **circuit électronique intégré**, qui est caractérisé par :

- 2 bornes d'alimentation  $+V$  et  $-V$ .
- 2 entrées  $e_+$  et  $e_-$ .
- Une tension différentielle  $\varepsilon$  de ses entrées :  $\varepsilon = (e_+ - e_-)$ .
- Une sortie  $V_s$ .

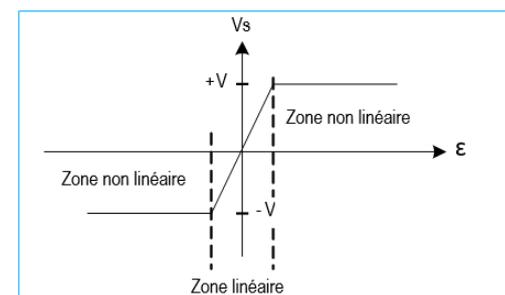
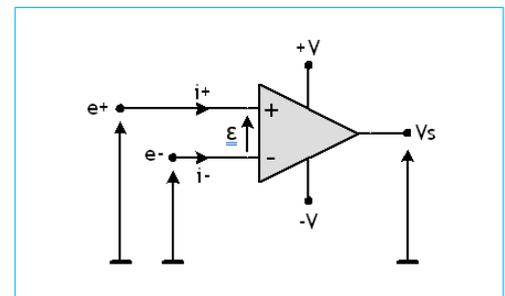


- L'AOP est caractérisé par une amplification différentielle ( $A_D = V_s/\varepsilon$ ), très grande et typiquement de  $10^5$ .
- L'examen de sa caractéristique de transfert permet de distinguer entre 2 modes de fonctionnement :
  - **Régime linéaire** d'amplification où  $V_s = A_D \cdot \varepsilon$ .
  - Régime non linéaire ou de **commutation**, où  $V_s$  peut prendre 2 valeurs :

- $V_s = +V_{CC}$  si  $\varepsilon > 0$ , i.e.  $e_+ > e_-$ .
- $V_s = -V_{CC}$  si  $\varepsilon < 0$ , i.e.  $e_+ < e_-$ .

- Dans ce qui suit, on considère l'AOP idéal, en adoptant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- $A_D \rightarrow \infty$
- Résistance d'entrée  $\rightarrow \infty$



## Montages amplificateurs à base d'AOP

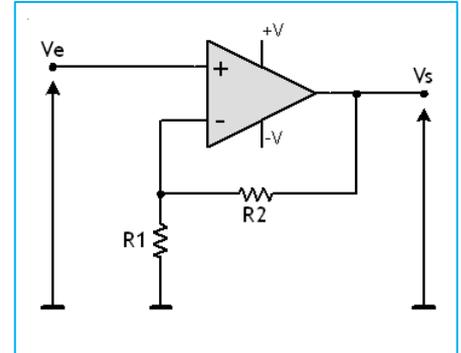
- Dans ce type de montages, il y a toujours une **réaction de la sortie vers l'entrée e<sub>-</sub>** ; on parle dans ce cas de **réaction négative**, qui a pour conséquence de considérer que ( $e_+ = e_-$ ).

### Amplificateur non inverseur

- Le montage de la figure ci-contre représente un amplificateur de tension non inverseur à base d'AOP.
- En considérant les hypothèses simplificatrices, on a :
  - $(i_+ = i_-) = 0$  et  $(e_+ = e_-)$
  - $e_- = V_s \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  et  $e_+ = V_e$

Donc :

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



### Suiveur

- Le montage suiveur est utilisé comme adaptateur d'impédance.

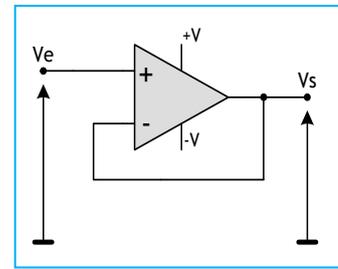
$$e_- = e_+$$

$$e_- = V_s$$

$$e_+ = V_e$$

Donc :

$$V_s = V_e \Rightarrow A_v = \frac{V_s}{V_e} = 1$$



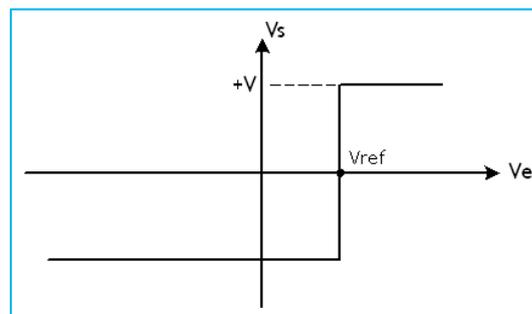
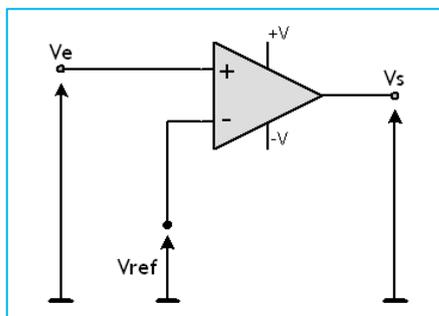
### Mise en forme par comparateur à un seuil

- Cette fonction correspond à une **conversion d'un signal analogique en un signal logique** comme le montre la figure ci-dessous ; en effet, le comparateur à un seuil consiste à comparer le signal analogique d'entrée par rapport à un seuil de référence :
  - Si ce seuil n'est pas atteint, alors la sortie du comparateur est au niveau logique **0**.
  - Si ce seuil est atteint, alors la sortie du comparateur **bascule** à l'autre état logique, i.e. le niveau logique **1**.
- En effet, l'AOP fonctionne en régime non linéaire (**commutation**).

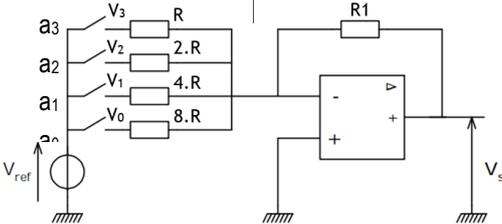
$$e_+ = V_e \quad \text{et} \quad e_- = V_{ref}$$

Il y a 2 cas à envisager :

- Si  $V_e > V_{ref}$  alors :  $V_s = +V$ , ce qui est considéré comme niveau logique 1.
- Si  $V_e < V_{ref}$  alors :  $V_s = -V$ , ce qui est considéré comme niveau logique 0.



## Mise en forme par conversion

<b>Convertisseur Numérique/Analogique (CNA)</b>	
<b>Principe</b>	 <p>Un CNA transforme un <b>nombre N</b> de n bits en une tension <b>V<sub>s</sub></b>, qui lui est proportionnelle :</p> $V_s = q \cdot N$ <ul style="list-style-type: none"> <li>N : Valeur du mot binaire de n bits <math>N = a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0</math></li> <li>q : Résolution (pas ou quantum).</li> </ul>
<b>Exemple : CNA à résistances pondérées</b>	 <p>On note <math>V_i = a_i \cdot V_{ref}</math> ; <math>i = 0 \dots 3</math></p> $V_s = -\frac{R1 \cdot V_{ref}}{R} \cdot (8 \cdot a_3 + 4 \cdot a_2 + 2 \cdot a_1 + a_0)$ $= -\frac{R1 \cdot V_{ref}}{R \cdot 2^3} \cdot (a_3 \cdot 2^3 + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0)$ $V_s = q \cdot N \quad \text{avec } q = -\frac{R1 \cdot V_{ref}}{R \cdot 2^3}$ $N = a_3 \cdot 2^3 + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0$
<b>Convertisseur Analogique/Numérique (CAN)</b>	
<b>Principe</b>	 <p>Un CAN est un circuit qui transforme <b>une grandeur analogique Vin</b> en un <b>nombre N</b> qui lui est proportionnel :</p> $V \xrightarrow{\text{can}} N = \sum_0^{n-1} b_i 2^i$ $\text{Résolution} = \text{Pas} = \frac{V_{PE}}{2^n}$ <p>Un CAN est caractérisé par la plage de la tension d'entrée, appelée <b>Pleine Echelle (PE)</b> ; cette tension est notée <b>V<sub>PE</sub></b>.</p>

## Application

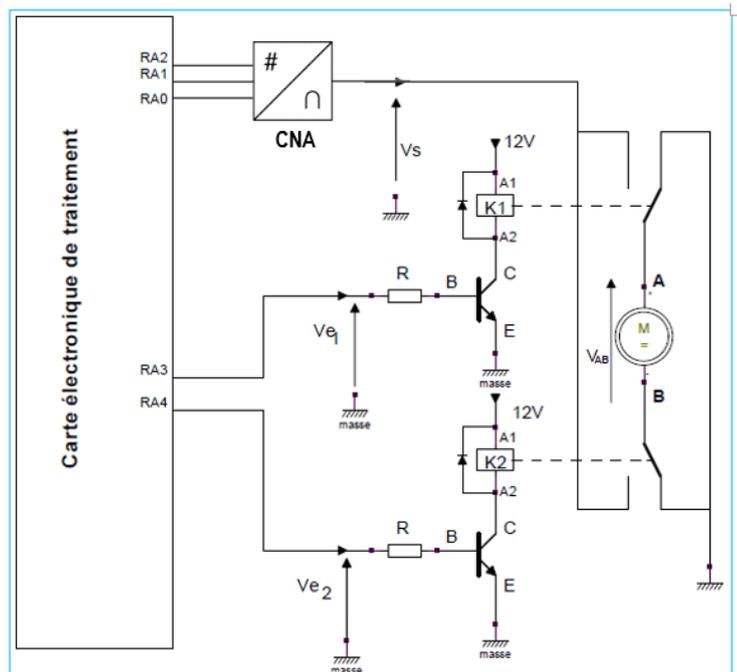
- Le **moteur M** commande une porte automatique. Etant fermée, la porte commence l'ouverture avec une vitesse  $\Omega 1$  de M pendant 75% de la course, puis ralentit à une vitesse  $\Omega 2$  ( $\Omega 2 < \Omega 1$ ) pour terminer sa course en douceur.
- Les vitesses  $\Omega 1$  et  $\Omega 2$  correspondent respectivement à  $V_s = 7,5$  V et  $V_s = 3$  V.
- La carte électronique de traitement numérique commande :
  - L'ouverture ou la fermeture de la porte, via les signaux **RA4** et **RA3**.
  - Le **CNA**, via les 3 bits **RA2 RA1 RA0**, qui délivre une tension **V<sub>s</sub>** correspondant à la vitesse  $\Omega 1$  ou  $\Omega 2$  :

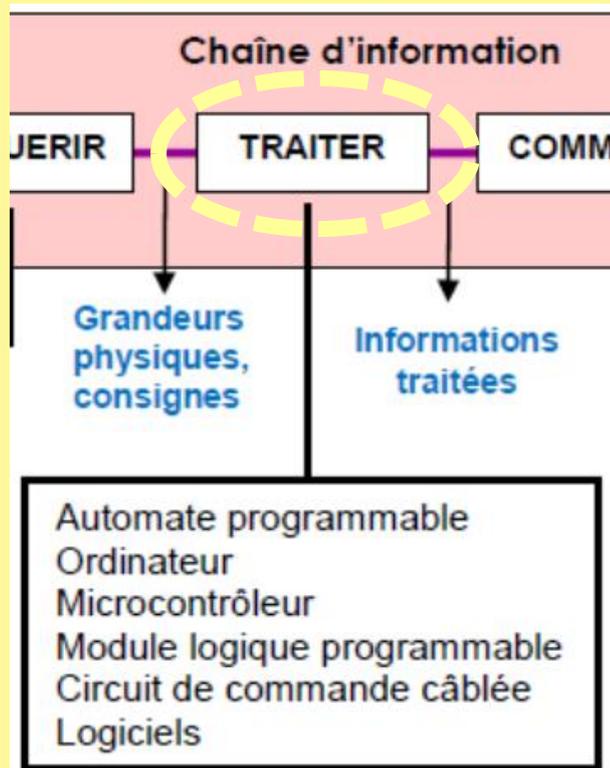
$$V_s = -\frac{12}{2^3} \cdot (RA2 \cdot 2^2 + RA1 \cdot 2^1 + RA0 \cdot 2^0)$$

RA2	RA1	RA0	Vs (V)
0	0	0	0
0	0	1	1,5
0	1	0	3
0	1	1	4,5
1	0	0	6
1	0	1	7,5
1	1	0	9
1	1	1	10,5

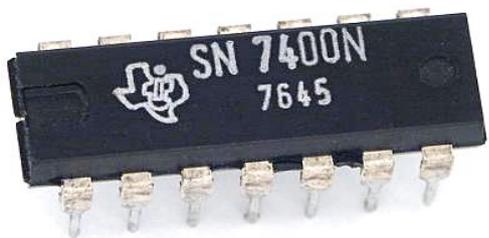
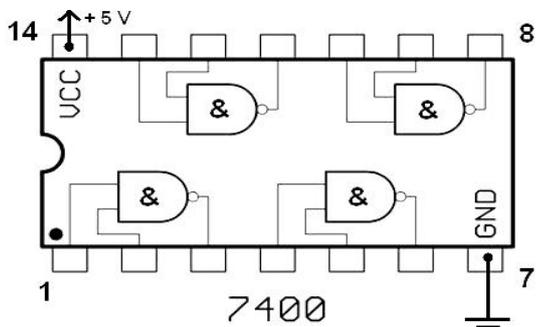
Donc, on envoie sur RA2 RA1 RA0 :

- 101 pour  $\Omega 1$ .
- 010 pour  $\Omega 2$ .





# Fonction Traiter



## Les systèmes de numération de base 2

### Système binaire (base 2)

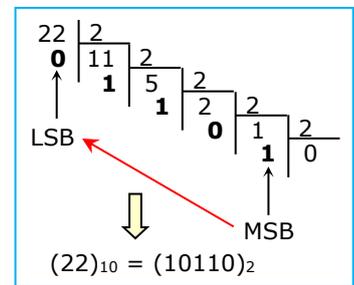
- La base 2 a les caractéristiques suivantes :
  - Un nombre N s'écrit :  $N = A_{n-1} \dots A_j \dots A_1 A_0 = \sum_{i=0}^{n-1} A_i \cdot 2^i$  avec  $A_i \in \{0, 1\}$  ; c'est la **forme polynomiale**.
  - Ce nombre a pour valeur décimale  $N = A_{n-1}2^{n-1} + \dots + A_j2^j + \dots + A_12^1 + A_02^0$   
**Exemple** :  $N = 110101$  ; il a pour valeur  $N = 1.2^5 + 1.2^4 + 0.2^3 + 1.2^2 + 0.2^1 + 1.2^0 = 53$ .
  - Chaque chiffre est appelé couramment **bit**, contraction de **binary digit** (chiffre binaire).
  - $A_{n-1}$  est le chiffre le plus significatif, couramment appelé **MSB** (Most Significant Bit) ;
  - $A_0$  est le chiffre le moins significatif, couramment appelé **LSB** (Less Significant Bit).

### Conversion de la base 2 vers la base 10

- On exploite directement la forme polynomiale.  
**Exemple** :  $(1011)_2 = 1.2^3 + 0.2^2 + 1.2^1 + 1.2^0 = 8 + 0 + 2 + 1 = (11)_{10}$ .

### Conversion de la base 10 vers la base 2

- La méthode de division est la plus utilisée.
- On effectue des **divisions successives** de  $(N)_{10}$  par 2, jusqu'à un quotient nul.
- Les **restes** des divisions successives, écrits dans l'ordre inverse, constituent le nombre  $(N)_{10}$  dans la base 2  $(N)_2$ .  
**Exemple** :  $(22)_{10} = (?)_2$ .



## Codage de l'information n binaire

- Un système électronique traite en binaire des informations, qui sont de différentes natures ; il faut associer alors à chaque type d'information des nombre binaires. Cette association s'appelle « **codage** » de l'information binaire et permet d'utiliser plusieurs **codes binaires** suivant le domaine d'application.
- On présente ici en particulier, le code **binaire pur** et le code **GRAY**.

### Le code binaire pur et le code GRAY

- Le code binaire pur découle directement du **principe général de la numération**.
- Avec le code GRAY, dans le passage d'une combinaison à une autre, **il n'y a qu'une variable qui change**.

Valeur décimale	Code binaire			
	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

Valeur décimale	Code binaire				Code GRAY			
	B <sub>3</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	G <sub>3</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>0</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	1	0
5	0	1	0	1	0	1	1	1
6	0	1	1	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	0	1	0	0
8	1	0	0	0	1	1	0	0
9	1	0	0	1	1	1	0	1
10	1	0	1	0	1	1	1	1
11	1	0	1	1	1	1	1	0
12	1	1	0	0	1	0	1	0
13	1	1	0	1	1	0	1	1
14	1	1	1	0	1	0	0	1
15	1	1	1	1	1	0	0	0

## Opérations booléennes élémentaires

### Opération Inversion

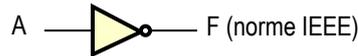
- C'est une opération définie sur une seule variable. La sortie prend la valeur que n'a pas l'entrée. On dit que la sortie est l'inverse ou le **complément** de l'entrée.

Table de vérité

A	F
0	1
1	0

$$F = \bar{A} \text{ (se lit A barre)}$$

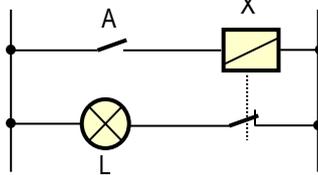
Symbole



IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IEC : International Electrotechnical Commission

Illustration électrique



- L'interrupteur A ouvert (A=0) ; le relais X est non excité et le contact qui lui est associé reste fermé (position de repos) ; la lampe L est allumée (L=1) : A=0  $\Rightarrow$  L=1.
- L'interrupteur A fermé (A=1) ; le relais X est excité et le contact qui lui est associé est ouvert ; la lampe L est éteinte (L=0) : A=1  $\Rightarrow$  L=0.
- Alors, L = Not A ou  $L = \bar{A}$

- Propriété :

$$\bar{\bar{F}} = F$$

### Opération ET (AND)

- C'est une opération sur 2 variables d'entrée au moins. Dans le cas simple de 2 entrées A et B, la sortie est vraie (égale à 1) si A **ET** B sont vraies aussi.

Table de vérité

A	B	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

$$F = A \cdot B = AB \text{ (se lit A ET B)}$$

Symbole

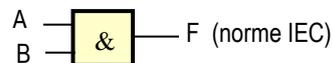
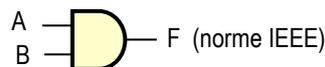
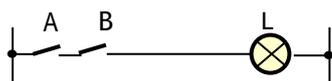


Illustration électrique



- La lampe L est allumée (L=1) si l'interrupteur A **ET** l'interrupteur B sont fermés (A=B=1), soit  $L = A \cdot B$

- Propriétés :

- La fonction AND est commutative :  $F = A \cdot B = B \cdot A$ .
- La fonction AND est associative :  $F = A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C = A \cdot B \cdot C$ .
- La fonction AND est généralisable pour n entrées.
- Identités remarquables :  $X \cdot 0 = 0$  ;  $X \cdot 1 = X$  ;  $X \cdot X = X$  ;  $X \cdot \bar{X} = 0$ .

## Opération OU (OR)

- C'est une opération sur 2 variables d'entrée au moins. Dans le cas simple de 2 entrées A et B, la sortie est vraie (égale à 1) si seulement A est vraie **OU** B est vraie.

Table de vérité

A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

$$F = A + B \text{ (se lit A OU B)}$$

Symbole

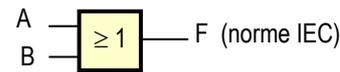
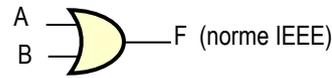


Illustration électrique



- L est allumée (L=1) si A est fermé **OU** B est fermé (A=1 **OU** B=1), soit  $L = A + B$ .

- Propriétés :
  - Comme la fonction AND, la fonction OR est commutative, associative et généralisable pour n entrées.
  - Identités remarquables :  $X + 0 = X$ ;  $X + 1 = 1$ ;  $X + X = X$ ;  $X + \bar{X} = 1$ .

## Autres opérations

### Opération NAND

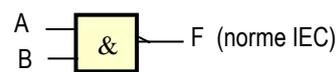
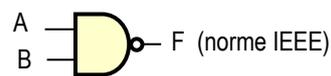
- C'est le complément de l'opération AND.

Table de vérité

A	B	F
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$$F = \overline{A \cdot B} \text{ (se lit (A ET B) tout barre)}$$

Symbole



### Opération NOR

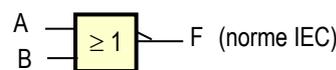
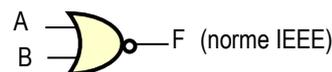
- C'est le complément de l'opération OR.

Table de vérité

A	B	F
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

$$F = \overline{A + B} \text{ (se lit (A OU B) tout barre)}$$

Symbole



## Opération XOR

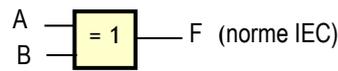
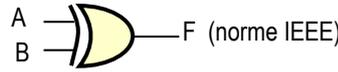
- Cette opération diffère du OR classique ou inclusif ; l'examen de sa table de vérité ci-dessous montre que F est égale à 1 si [(A=0 ET B=1) OU (A=1 ET B=0)] ; formellement, on écrit :

$$F = \bar{A}B + A\bar{B} \text{ qu'on note } F = A \oplus B$$

Table de vérité		
A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$F = A \oplus B$  (se lit A OU exclusif B)

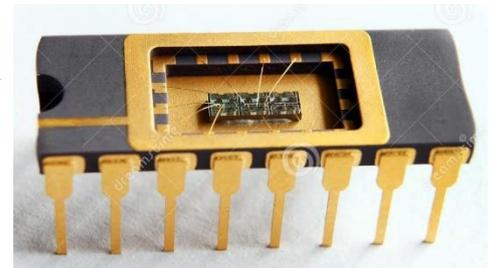
### Symbole



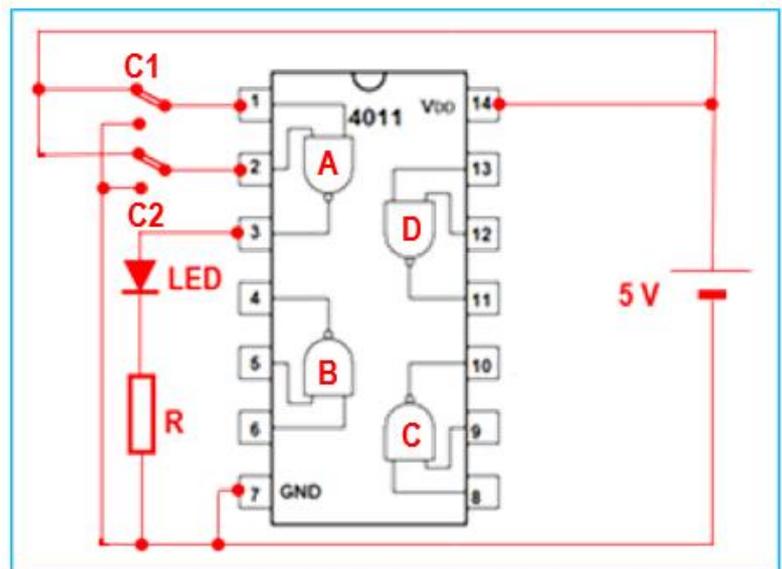
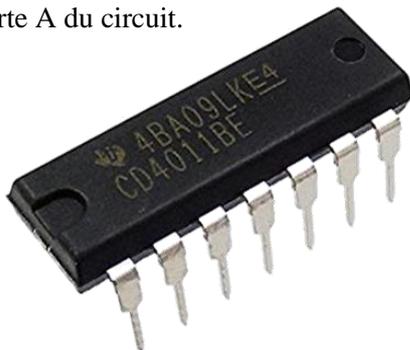
- Le signe « = » indique que la sortie est égale à 1 si une entrée et une seule est égale à 1.
- Propriétés :
  - L'opération XOR est commutative :  $F = A \oplus B = B \oplus A$ .
  - L'opération XOR est associative :  $F = A \oplus (B \oplus C) = (A \oplus B) \oplus C = A \oplus B \oplus C$ .
  - L'opération XOR n'est pas généralisable pour n entrées.

## Circuits logiques électroniques

- Les **circuits logiques électroniques** représentent l'outil technologique le plus utilisé pour réaliser pratiquement les opérations de l'algèbre de Boole.
- Un circuit logique se présente sous forme de **circuit intégré** ; l'exemple de la figure ci-dessous montre un circuit contenant 4 opérateurs NAND à 2 entrées. Dans de tels circuits, les fonctions logiques de base (NOT, AND, OR, etc.) sont désignées souvent par « **portes logiques** ».
- Pour de tels circuits :
  - L'alimentation est typiquement ( $V_{DD} = 5 \text{ V}$ ).
  - Le niveau logique **1** est **5 V**.
  - Le niveau logique **0** est **0 V**.
- Exemple** de montage de test du circuit logique **4011**, circuit à **4 portes NAND à 2 entrées** :



- Les commutateurs C1 et C2 permettent d'appliquer le 5 V (1 logique) ou le 0 V (0 logique) aux entrées 1 et 2 de la **porte A** du circuit.
- Le circuit de signalisation à base de la diode LED est branché à la sortie 3 de la porte A du circuit.



## Représentation des fonctions logiques

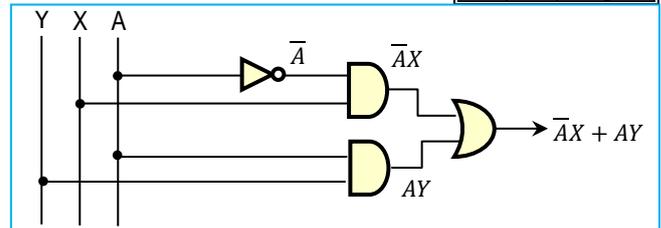
- Pratiquement, une fonction logique est représentée par :
  - Son **équation logique**, qui est une association de sommes et de produits logiques.
  - Sa table de vérité ou son **tableau de Karnaugh**, qu'on verra dans le prochain chapitre.
  - Son **logigramme** qui est une représentation symbolique, sous forme d'un schéma, formé par les différentes liaisons entre les symboles des opérateurs logiques élémentaires.
- **Exemple** : Voilà les 3 représentations d'un exemple de fonction à 3 variables A, X et Y :

- **L'équation logique** donnée est :  $F(X, Y, A) = \bar{A}X + AY$ .
- La **table de vérité** est déduite à partir de l'équation comme suit :
  - On a 3 variables d'entrées  $\Rightarrow$  on a  $2^3$  combinaisons possibles ( $2^3$  lignes de la table) ; d'une façon générale, on a  **$2^n$  combinaisons pour n variables** d'entrée.
  - On déduit l'équation logique de la fonction F, à partir de la table de vérité comme suit :
    - ♦ On cherche les lignes où la fonction F est égale à 1.
    - ♦ On note la combinaison des entrées pour chacune de ces lignes.
    - ♦ On somme logiquement ces combinaisons.
  - Ainsi, la fonction F est égale à 1 si on a  $\bar{A}X\bar{Y}$  **OU**  $\bar{A}XY$  **OU**  $A\bar{X}Y$  **OU**  $AXY$ , ce qui donne :

A	X	Y	F
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

$$\begin{aligned}
 F &= \bar{A}X\bar{Y} + \bar{A}XY + A\bar{X}Y + AXY \\
 &= \bar{A}X(Y + \bar{Y}) + AY(X + \bar{X}) \\
 &= \bar{A}X + AY \quad (\text{fonction simplifiée})
 \end{aligned}$$

- Le **logigramme** déduit de l'équation simplifiée est comme dans la figure ci-contre :



- Pratiquement, on cherche toujours à **simplifier** une fonction pour la réaliser avec le minimum de portes logiques possibles. Pour cette fin, on utilise, en général, **3 méthodes** :
  - La méthode algébrique.
  - La méthode graphique à base du diagramme de **Karnaugh**.
  - Les méthodes programmables (non étudiée dans ce cours).

## Méthode algébrique

- Cette méthode utilise les **principes de l'Algèbre de Boole**. On en rappelle ci-après 2 parmi les plus importants :
  - $A + AB = A(1 + B) = A$
  - $AB + A\bar{B} = A(B + \bar{B}) = A$
- Le principe consiste donc à mettre en œuvre ces propriétés, dans l'expression à simplifier, par exemple en ajoutant un terme déjà existant :

$$\begin{aligned}
 Z &= ABC + \bar{A}BC + A\bar{B}C + AB\bar{C} \\
 Z &= ABC + \bar{A}BC + \mathbf{ABC} + A\bar{B}C + \mathbf{ABC} + AB\bar{C} \\
 Z &= BC(A + \bar{A}) + AC(B + \bar{B}) + AB(C + \bar{C}) \\
 Z &= BC + AC + AB
 \end{aligned}$$

- Vue sa difficulté, cette méthode n'est pratiquement plus utilisée systématiquement.

## Méthode graphique

### Tableau de Karnaugh et principe de simplification

- Cette méthode plus simple est basée sur l'utilisation du tableau de **Karnaugh**.
- Le tableau de Karnaugh d'une fonction logique est la transformation de sa table de vérité sous forme d'une table contractée à 2 dimensions. La méthode consiste principalement à :

- Mettre en évidence visuellement, les groupements de cases, de type :

$$AB + A\bar{B} = A(B + \bar{B}) = A$$

- Utiliser une case plusieurs fois selon la relation de la **redondance** :

$$X + X + \dots + X = X$$

- Le passage de la table de vérité au tableau de Karnaugh se fait selon la procédure suivante :

- Chaque ligne de la table de vérité correspond à une case du tableau de Karnaugh.
- Les cases sont disposées de telle sorte que le passage d'une case à une case voisine se fasse par changement de l'état **d'une seule variable** à la fois en utilisant le code **GRAY**.

A	B	C	F2
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

		BC			
		00	01	11	10
A	0	0	1	0	1
	1	1	0	1	0

### Procédure de la méthode

- La mise en œuvre de cette méthode se fait alors en 2 phases :
  - La **transcription** de la fonction à simplifier dans le tableau de Karnaugh.
  - La recherche des **groupements de cases** qui donneront des expressions simplifiées.
  - On ne regroupe pas des cases qui ne sont pas symétriques, car cela ne donne pas de termes vérifiant la forme simplificatrice :  $AB + A\bar{B} = A(B + \bar{B}) = A$ .
  - Un groupement de  $2^k$  cases entraîne la suppression de **k variables** ; par exemple, un groupement de 4 cases symétriques ( $2^2$ ), entraîne la suppression de 2 variables.

#### Exemples d'application :

Exemple 1 :

		BC			
		00	01	11	10
A	0	0	1	1	1
	1	0	0	0	1

$F1 = \bar{A}C + B\bar{C}$

- Dans le groupement 1, c'est B qui a varié, ce qui donne  $\bar{A}C$ .
- Dans le groupement 2, c'est A qui a varié, ce qui donne  $B\bar{C}$ .

Exemple 2 :

		BC			
		00	01	11	10
A	0	0	0	1	1
	1	0	0	0	1

$F2 = \bar{A}B + B\bar{C}$

- Dans ces 2 groupements, on réutilise une case utilisée par les 2 groupements selon la loi de redondance ( $X + Y + X = X + Y$ ).

Exemple 3 :

		BC			
		00	01	11	10
A	0	1	1	1	1
	1	1	1	1	1

Out =  $\bar{C}$

Pour les groupements des côtés, on peut imaginer la table comme un **cylindre**.

		CD			
		00	01	11	10
AB	00	1	0	0	1
	01	0	1	1	0
	11	0	1	1	0
	10	1	0	0	1

$F3 = BD + \bar{B}\bar{D}$

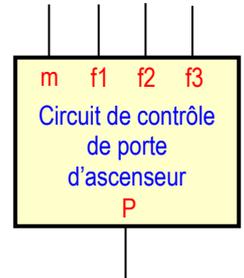
Exemple 4 :

		CD			
		00	01	11	10
AB	00	1	1	0	1
	01	1	1	0	0
	11	1	1	0	0
	10	1	1	0	1

$F3 = \bar{C} + \bar{B}\bar{D}$

### Exemple d'application : Contrôle d'une porte d'ascenseur

- Il s'agit d'un circuit simple pour contrôler l'ouverture et la fermeture d'une porte d'ascenseur à 3 étages. Les Entrées/Sorties (4/1) d'un tel circuit sont comme suit :
  - L'entrée **m** indique que l'ascenseur est en mouvement.
  - Les 3 autres entrées (**f1**, **f2** et **f3**) sont des indicateurs de l'étage où se trouve la cabine.
  - La sortie **P** qui contrôle l'ouverture de la porte, ce qui n'est possible que si la cabine de l'ascenseur n'est pas en mouvement et qu'on est dans un étage donné.



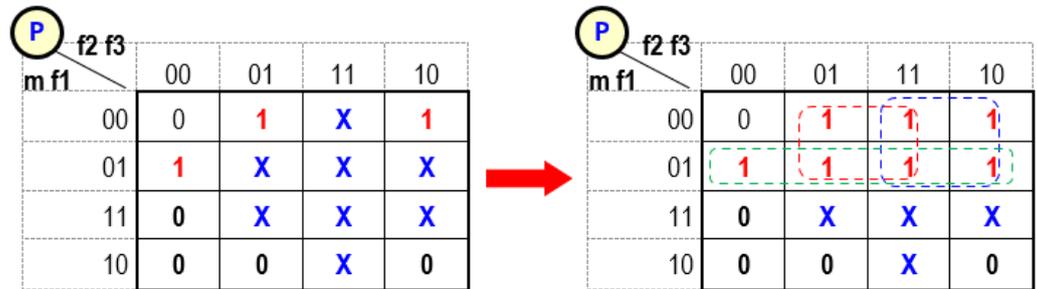
- Travail à faire :**
  - Dresser la table de vérité de ce circuit logique.
  - Dresser le tableau de Karnaugh correspondant et en déduire l'équation de P.
  - Donner son logigramme.

**Corrigé :**

**1. Table de vérité**

m	f1	f2	f3	P
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	X
0	1	0	0	1
0	1	0	1	X
0	1	1	0	X
0	1	1	1	X
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	X
1	1	0	0	0
1	1	0	1	X
1	1	1	0	X
1	1	1	1	X

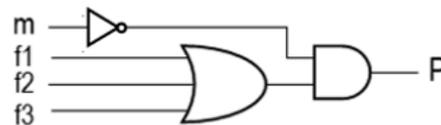
**2. Tableau de Karnaugh**



$$P = \bar{m}.f3 + \bar{m}.f1 + \bar{m}.f2$$

$$P = \bar{m}.(f1 + f2 + f3)$$

**3. Logigramme**



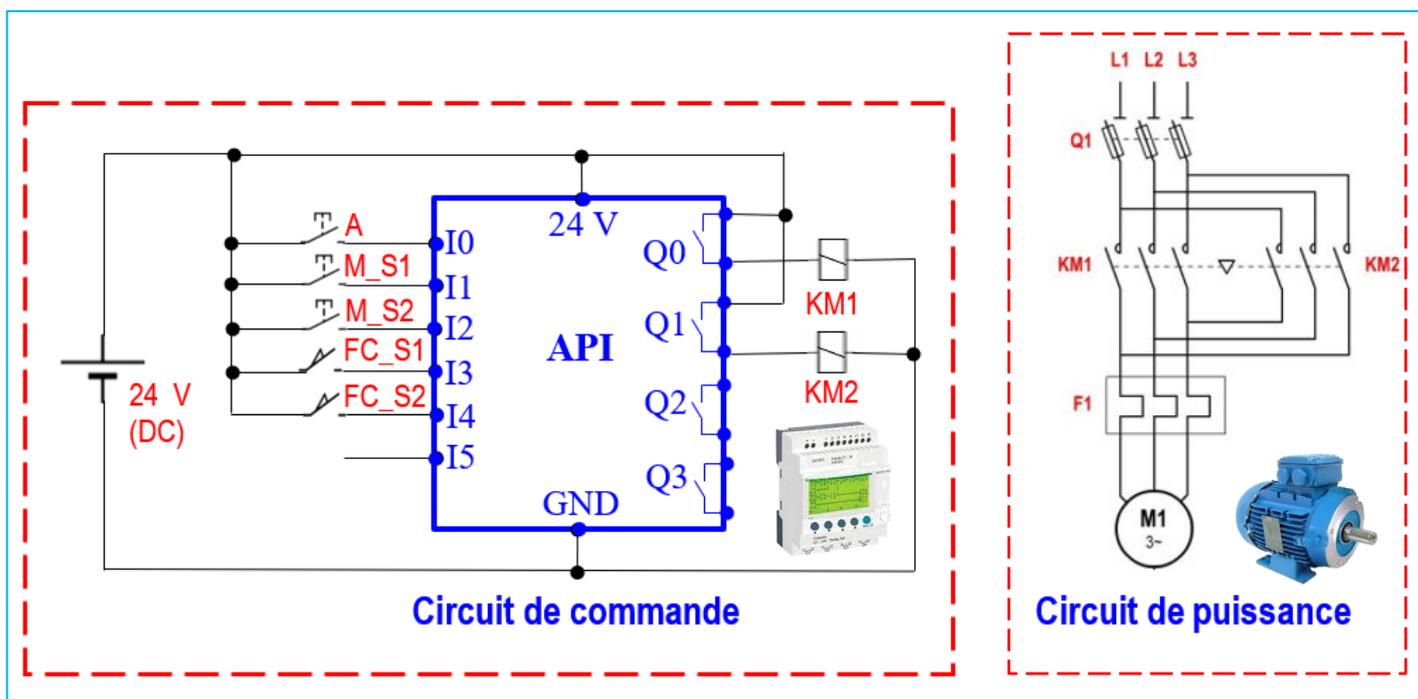
## Automate Programmable Industriel (API)

- Un **API** est une unité de traitement à base de **microprocesseur** ou microcontrôleur, qui est un composant électronique numérique pouvant réaliser des fonctions arithmétiques et logiques relativement complexes, selon un programme qu'on implémente dans sa mémoire. Il a :

- Des **entrées logiques** pour acquérir l'état des **capteurs** ou composants interface Homme/Machine (**IHM**).
- Des **sorties logiques**, souvent des contacts relais pour commander les **actionneurs**.
- **Exemple d'application** : Commande d'un MAS pour l'ouverture d'un portail, avec un API de 6 entrées et 4 sorties relais ; alors :



- L'API est **alimenté** avec du **24 V DC**.
- Les **bobines** des contacteurs sont à commande 24 V DC.
- L'entrée **I0** reçoit l'état du bouton poussoir **A** pour l'arrêt du moteur.
- L'entrée **I1** reçoit l'état du bouton poussoir **M\_S1** pour la marche en sens 1.
- L'entrée **I2** reçoit l'état du bouton poussoir **M\_S2** pour la marche en sens 2.
- L'entrée **I3** reçoit l'état du capteur **FC\_S1** pour la détection de la fin de course en sens 1.
- L'entrée **I4** reçoit l'état du capteur **FC\_S2** pour la détection de la fin de course en sens 2.
- La sortie **Q0** commande la bobine de **KM1**, pour l'ouverture.
- La sortie **Q1** commande la bobine de **KM2**, pour la fermeture.
- Le **programme** implémenté dans la mémoire de l'API correspond à **l'algorithme** suivant :
  - En appuyant sur **M\_S1** (entrée **I1** l'API), **l'API** ferme le contact **Q0**, ce qui alimente **KM1**, permettant au moteur **M** de tourner dans le sens 1 (Ouverture du portail).
  - Quand le portail s'ouvre complètement, **FC\_S1** (entrée **I3** l'API) se ferme et l'API ouvre Q0, ce qui arrête le moteur **M**.
  - En appuyant sur **M\_S2** (entrée **I2** l'API), l'API ferme le contact **Q1**, ce qui alimente **KM2**, permettant au moteur **M** de tourner dans le sens 2 (Fermeture du portail).
  - Quand le portail se ferme complètement, **FC\_S2** (entrée **I4** l'API) se ferme et l'API ouvre Q1, ce qui arrête le moteur **M**.
  - En appuyant sur **A** (entrée **I0** l'API), l'API ouvre les 2 contacts **Q0** et **Q1**, ce qui arrête le moteur **M**.

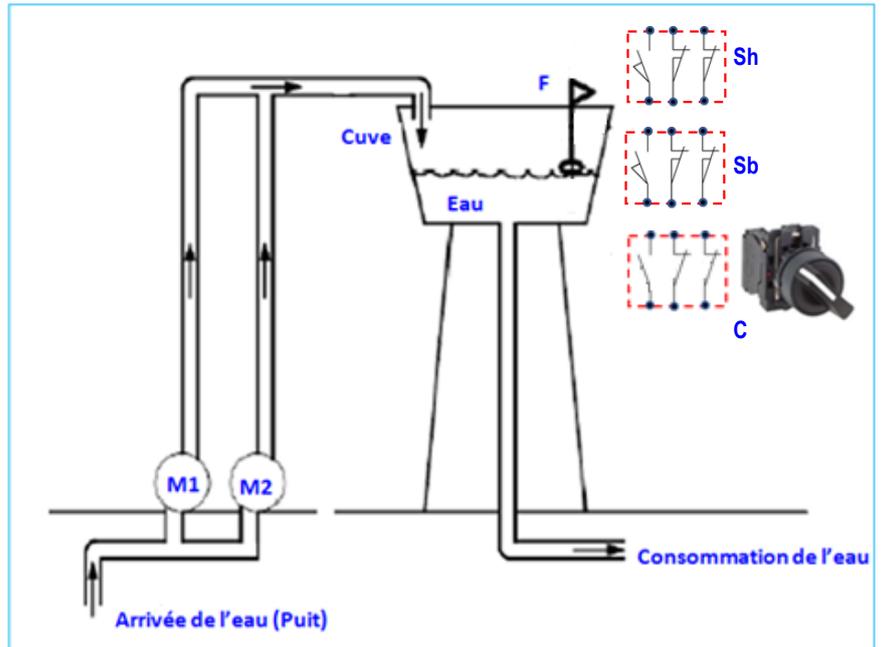


## Exercice de synthèse : Station de pompage (Enoncé)

La station de pompage suivante permet une régulation en « Tout Ou Rien » du niveau d'eau d'une cuve :

Sa description et son fonctionnement sont comme suit :

- Le capteur de niveau est un flotteur **F** qui actionne 2 ensembles de contacts secs **Sh** et **Sb**, respectivement la détection du niveau haut et du niveau bas de la cuve.
- Les pompes **P1** et **P2** sont associées à 2 moteurs asynchrones **M1** et **M2**, qui ont pour pré-actionneurs 2 contacteurs **KM1** et **KM2**.
- Quand la cuve est pleine (**Sh=1 et Sb=1**), aucune pompe ne fonctionne.
- Quand la cuve est vide (**Sh=0 et Sb=0**), les 2 pompes fonctionnent.
- Quand la cuve est à moitié vide (**Sh=0 et Sb=1**), une seule pompe fonctionne ; dans ce cas, un commutateur **C** permet le choix de la pompe qui fonctionne :
  - La pompe P1 si C = 0 ;
  - La pompe P2 si C = 1.



1. Dresser la table de vérité du système, avec comme sorties : M1 et M2 et comme entrées : Sh, Sb et C.
2. Donner les équations simplifiées des sorties en utilisant le tableau de Karnaugh.
3. Donner le **schéma électrique** du système (circuit de commande et circuit de puissance). L'ensemble du système est contrôlé par un relais-maitre **KA1**, avec une tension de bobine de 24 V AC ; ainsi, le système est mis :
  - En service par un bouton MA.
  - A l'arrêt par :
    - Un bouton AR.
    - Un bouton ARU pour la sécurité.
    - Les contacts associés aux relais thermiques pour la sécurité.
4. Donner le logigramme du circuit de commande à base de portes logiques.
5. Donner le logigramme du circuit de commande uniquement à base de portes logiques NAND à 2 entrées.
6. Dans ce dernier cas, donner le schéma complet du système, i.e. le circuit de commande (logigramme, capteurs et bobines des contacteurs, etc.) et le circuit de puissance.  
On note que dans ce cas, on suppose que les bobines des contacteurs sont commandées par du 24 V DC.
7. Donner le schéma complet du système avec un API de type de la **page 88** :

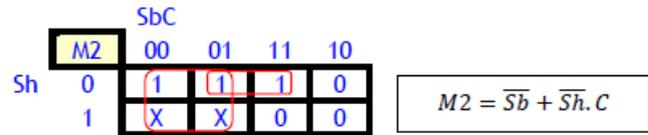
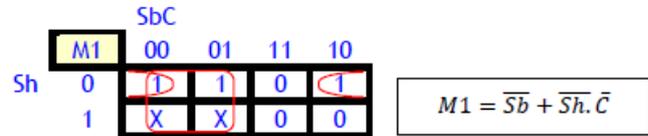
Capteur	Désignation	API	Actionneur	Désignation	API
Sh	Capteur du niveau haut	I0	KM1	Contacteur M1	Q0
Sb	Capteur du niveau bas	I1	KM2	Contacteur M2	Q1
C	Commutateur	I2			

## Exercice de synthèse : Station de pompage (Corrigé)

### 1. Table de vérité :

Sh	Sb	C	M1	M2
0	0	0	1	1
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	X	X
1	0	1	X	X
1	1	0	0	0
1	1	1	0	0

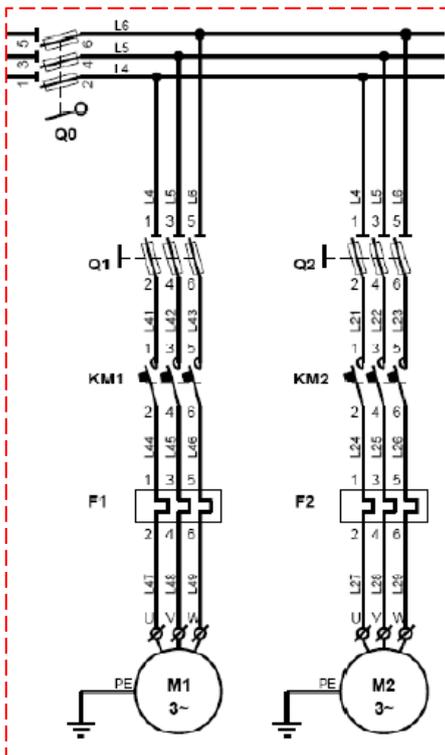
### 2. Tableau de Karnaugh et équations :



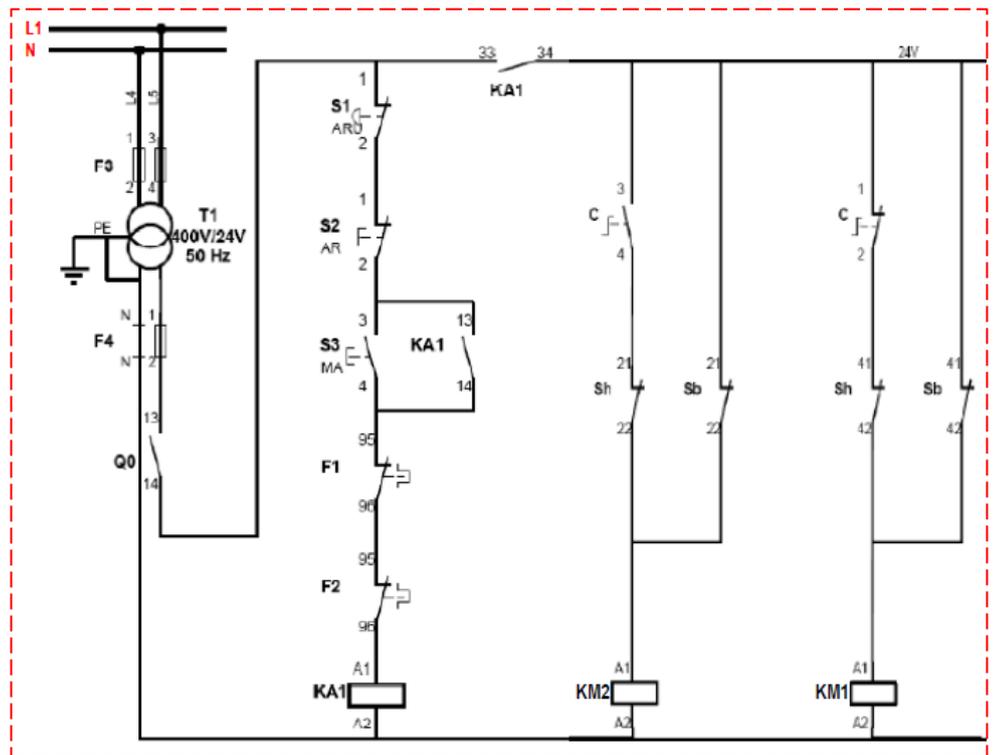
**X** : Les 2 lignes avec un l'arrière-plan en jaune correspond à des combinaisons indéfinies ou impossibles pratiquement ; on peut mettre ce qu'on veut, 1 ou 0 (X), selon ce qui amène des simplifications, en l'occurrence on met des 1.

### 3. Circuit de de puissance et circuit commande :

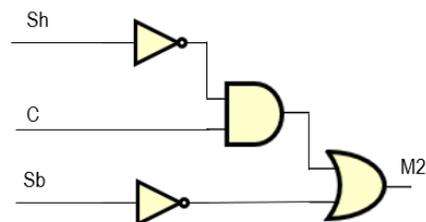
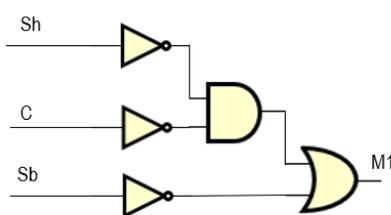
#### Circuit de puissance



#### Circuit de commande



### 4. Logigramme avec portes variées :



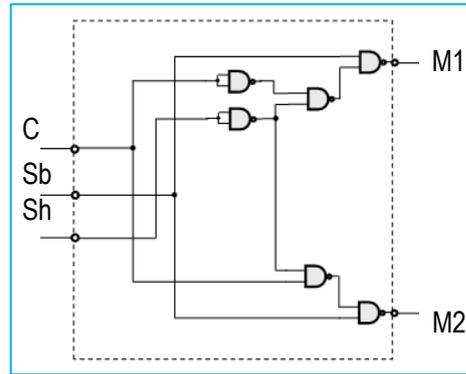
5. Logigramme avec NAND 2 :

$$M1 = \overline{\overline{Sb} + \overline{Sh}.C}$$

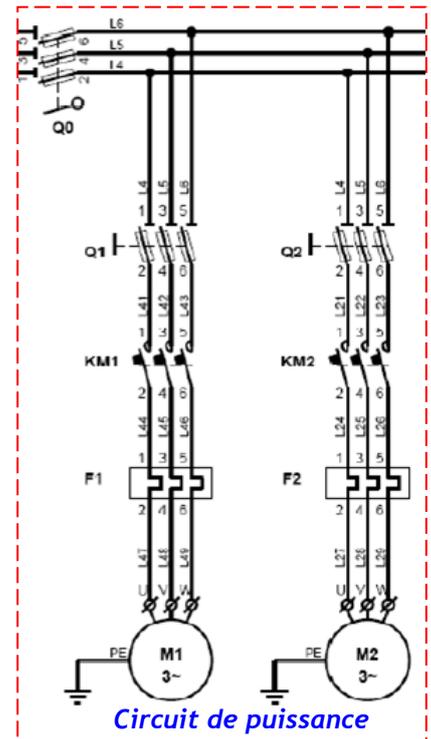
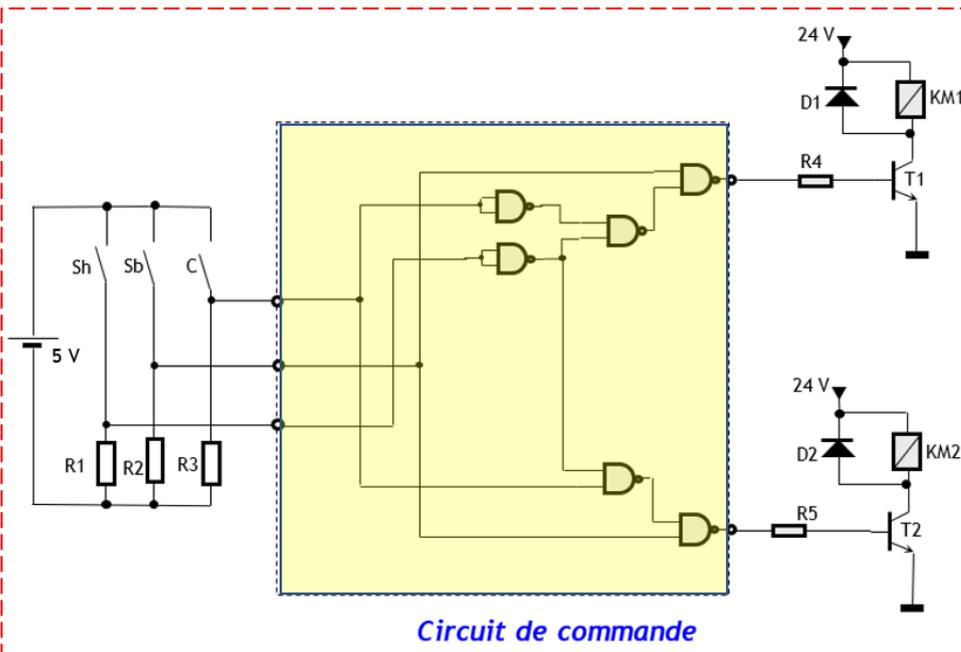
$$M1 = Sb.\overline{Sh}.C$$

$$M2 = \overline{\overline{Sb} + \overline{Sh}.C}$$

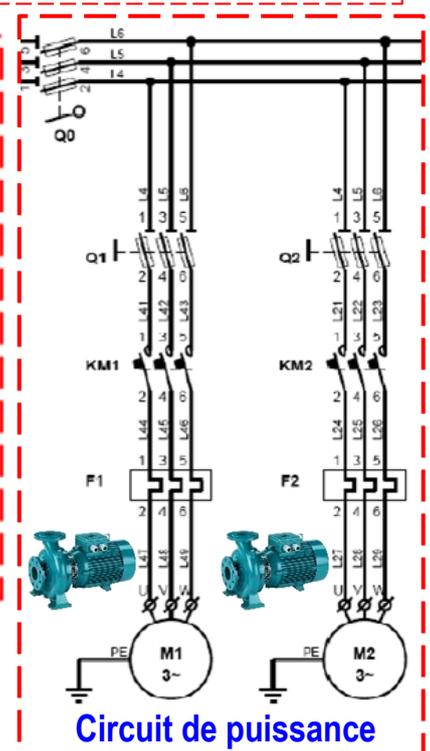
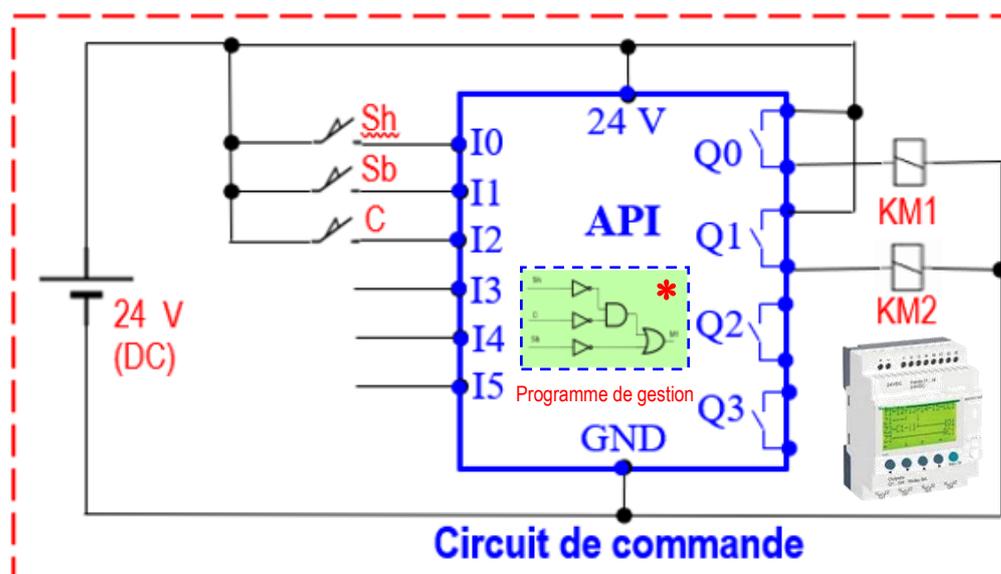
$$M2 = Sb.\overline{Sh}.C$$



6. Circuit complet avec commande électronique :



7. Commande par API :



\* Note : Le programme de gestion du système, correspondant principalement aux 2 équations de commande de M1 et M2, est contenu dans la mémoire de l'AP.

---

# Références

---

- J.-L. Fanchon, Guide des sciences et technologies industrielles, Nathan, Paris, 2001.
- A. Chevalier, Guide du dessinateur industriel, Hachette, 2004.
- A. Ricordeau et C. Corbet, Dossier de technologie de construction, Castella, Paris, 2007.
- F. Benielli et al., Technologie des systèmes automatisés. Foucher, Paris, 1994.
- R. Gourant et al., Initiation aux sciences de l'ingénieur. Hachette, Paris, 2001.
- C. Bryselbout et al., Sciences de l'ingénieur, Première S. Foucher, Paris, 2003.
- C. Bryselbout et al., Sciences de l'ingénieur, Terminale S. Foucher, Paris, 2003.
- R. Boucault et al., Construction mécanique, Tome 1, Foucher, Paris, 1994.
- R. Boucault et al., Construction mécanique, Tome 2, Foucher, Paris, 1994.
- M. Lauzier et G. Colombari, Automatique et informatique industrielle, Tome 1, Foucher, 1994.
- M. Lauzier et G. Colombari, Automatique et informatique industrielle, Tome 2, Foucher, 1995.
- C. Barlier et al., Construction mécanique industrielle. Foucher, Paris, 1993.
- R. Bourgeois et al., Electrotechnique automatique et informatique industrielle. Foucher, Paris, 1995.
- J.C. Bossy et D. Merat, Automatisation appliqué, Castella, Paris, 1985.
- Marcel Gindre et al., Electronique Numérique, logique combinatoire, McGraw-Hill, Paris, 1987.
- S. M. Zouhaïer et al., Génie Mécanique, 4e année, Manuel de cours, Centre National Pédagogique, Tunisie.
- S. M. Zouhaïer et al., Génie Mécanique, 4e année, Manuel d'activités, Centre National Pédagogique, Tunisie.
- A. B. Hamadou et al., Génie Mécanique, 3e année, Manuel d'activités, Centre National Pédagogique, Tunisie.
- Le site Web du professeur Valéry Morel et son équipe (Christian Lucas et Jérôme Heulard) :  
<https://macaron33.webnode.fr/>
- Le site Web du professeur Ezzahraoui Abderrahim :  
<https://ezzahraoui.jimdofree.com/>