

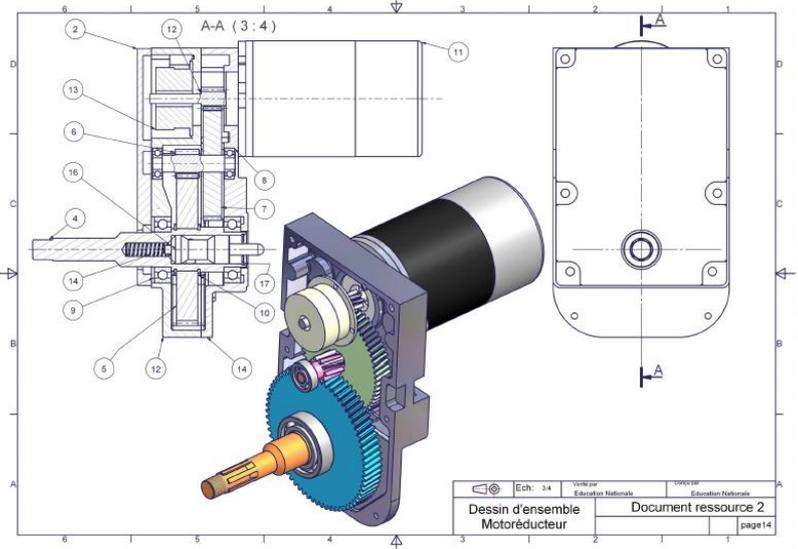
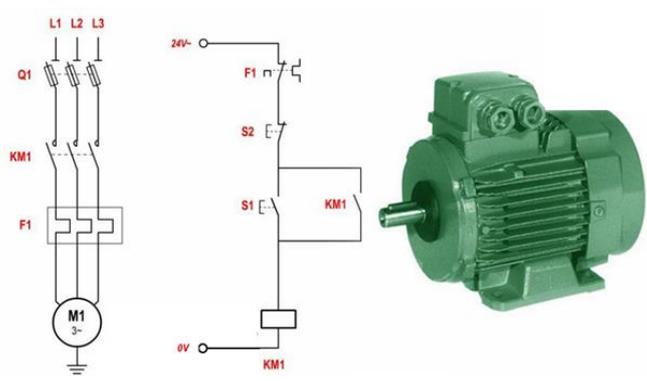
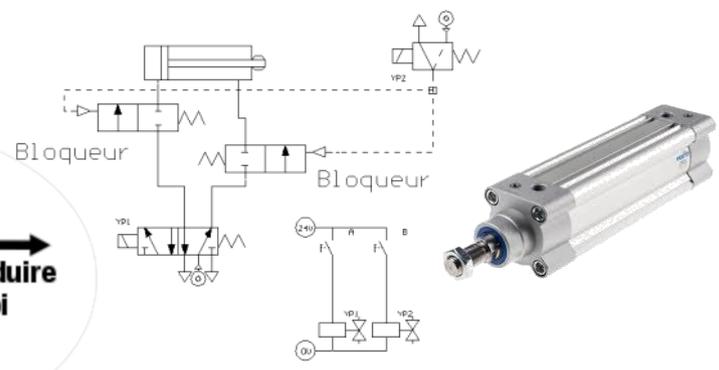
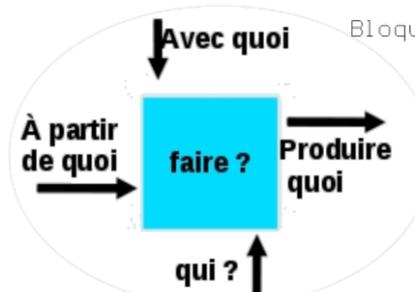
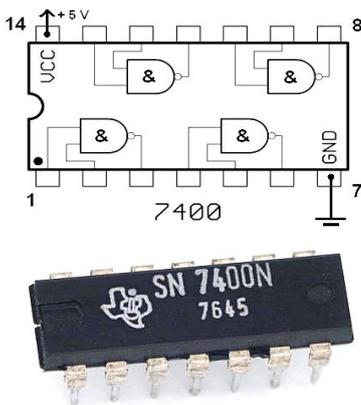


Filière : Sciences Mathématiques Option « B »

Sciences de l'ingénieur

Cours et exercices

Professeur : EL MIMOUNI EL HASSAN



Année scolaire : 2020/2021

Avant-Propos

Dans notre environnement quotidien, on utilise de plus en plus des **systèmes techniques** dont la complexité exige une démarche d'étude structurée. Pour aborder de tels systèmes, il faut alors un minimum de connaissances, soit une certaine **culture technologique**.

L'**enseignement des Sciences de l'ingénieur (SI)** apporte alors les concepts élémentaires d'une telle culture pour approcher de tels systèmes. Il a pour **objectifs** de :

- Contribuer à développer chez l'élève les **compétences** de raisonnement, de communication, d'expression, d'organisation de travail et de recherche méthodique.
- Contribuer à développer chez l'élève les capacités **d'auto-apprentissage**.
- Faire découvrir à l'élève les constituants des **divers champs technologiques** pour l'aider à mieux affirmer son **projet personnel**.

L'enseignement des Sciences de l'ingénieur se base sur des **produits-support** qui peuvent être aussi bien de l'environnement quotidien et **domestique** que de l'environnement **industriel**. Le produit-support met en évidence principalement **3 approches** :

- Une **approche fonctionnelle** répondant à la question « **A quoi sert le produit ?** ».
- Une **approche technologique** répondant à la question « **Comment est construit le produit ?** ».
- Une **approche physique** répondant à la question « **Comment le produit se comporte-t-il ?** ».

La structure de ce cours est le reflet de cet aspect **pluridisciplinaire** qu'offre cet enseignement. Il est conforme aux directives et programmes officiels. Il est axé principalement sur **3 modules** :

- **Module 1 : L'analyse fonctionnelle** pour l'étude de l'aspect fonctionnel d'un système.
- **Module 2 : La chaîne d'énergie** pour l'étude de l'aspect énergétique d'un système.
- **Module 3 : La chaîne d'information** pour l'étude de l'aspect informationnel d'un système.

Chaque module est structuré en **parties et chapitres** pour permettre aux élèves un apprentissage progressif, qui leur facilite l'appréhension peu à peu de la pluridisciplinarité d'un système technique. En résumé, ce cours contient :

- **L'essentiel des connaissances** à maîtriser, conformes au programme officiel.
- Assez **d'exercices** pour l'application et la bonne préparation à **l'examen de Baccalauréat**.

Je souhaite que ce document de travail, qui est conçu dans un **esprit de partage**, permette alors aux :

- **Elèves** d'avoir un cours de plus, question de **varier les ressources**.
- **Professeurs**, notamment débutants, d'avoir un **cours de base** qu'ils sauront certainement améliorer et enrichir, par les détails, les exercices et les applications nécessaires.
- **Inspecteurs** pédagogiques, d'avoir une **référence de plus**, parmi d'autres, qui accompagne le document du programme officiel.

Enfin, je rappelle qu'un travail de longue haleine est rarement le fruit du travail d'une seule personne. Ainsi, je tiens à **remercier** vivement et fortement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, par leurs :

- Différents documents de qualité, **partagés** généreusement notamment sur le **Web**.
- Explications, discussions, conseils, soutiens, etc.

La partie **Références** n'est absolument **pas exhaustive** ; mais elle rend compte des principales ressources, dont le recours à elles avait une certaine **constance**.

Et comme un travail n'est jamais parfait, alors sûrement subsisteront des **erreurs**, que je n'espère pas surtout d'ordre scientifique et technique ; dans le cas échéant, les lecteurs avertis sauront faire le nécessaire et ils en sont remerciés d'avance.

L'auteur :

EL MIMOUNI EL HASSAN

Inspecteur pédagogique de Génie Electrique



Sommaire

Module 1 : Analyse fonctionnelle

Chapitre 1 : Analyse fonctionnelle externe	<u>1</u>
Chapitre 2 : Analyse fonctionnelle interne	<u>3</u>
Chapitre 3 : Structure fonctionnelle d'un système	<u>6</u>

Module 2 : Chaîne d'énergie

Fonction Transmettre	Chapitre 1 : Eléments de base du dessin technique	<u>15</u>
	Chapitre 2 : Les coupes et sections	<u>31</u>
	Chapitre 3 : Les formes techniques	<u>43</u>
	Chapitre 4 : Filetage et taraudage	<u>45</u>
	Chapitre 5 : Cotation, tolérances et ajustements	<u>55</u>
	Chapitre 6 : Les liaisons mécaniques	<u>66</u>
	Chapitre 7 : Assemblages mécaniques – Encastrement	<u>83</u>
	Chapitre 8 : Assemblages mécaniques – Guidage en rotation	<u>90</u>
	Chapitre 9 : Assemblages mécaniques – Guidage en translation	<u>98</u>
	Chapitre 10 : Assemblages mécaniques – Lubrification/Etanchéité	<u>100</u>
	Chapitre 11 : Transmission de puissance sans transformation de mouvement	<u>110</u>
	Chapitre 12 : Transmission de puissance avec transformation de mouvement	<u>147</u>
	Chapitre 13 : Accouplements, embrayages et freins	<u>162</u>
Fonction Alimenter	Chapitre 1 : Alimentation électrique	<u>185</u>
Fonction Convertir	Chapitre 1 : Actionneurs électriques	<u>209</u>
Fonction Distribuer	Chapitre 2 : Pre-actionneurs électriques	<u>217</u>
Fonction Alimenter	Chapitre 1 : Alimentation pneumatique	<u>233</u>
	Chapitre 2 : Alimentation hydraulique	<u>236</u>
Fonction Convertir	Chapitre 1 : Actionneurs pneumatiques et hydrauliques	<u>240</u>
Fonction Distribuer	Chapitre 2 : Pre-actionneurs pneumatiques et hydrauliques	<u>245</u>

Module 3 : Chaîne d'information

Fonction Acquérir	Chapitre 1 : Les capteurs	<u>255</u>
	Chapitre 2 : Le conditionnement de signal	<u>265</u>
Fonction Traiter	Chapitre 1 : Le système de numération binaire et codage de l'information	<u>275</u>
	Chapitre 2 : Les fonctions logiques de base	<u>277</u>
	Chapitre 3 : Simplification des fonctions logiques	<u>281</u>
Références	<u>293</u>	

Module 1

Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle est une approche et démarche scientifique appliquée largement dans le monde de **l'entreprise industrielle**. En effet, dans la démarche de **projet industriel**, on raisonne en termes de **fonctions** devant être assurées par un **produit** ou système pour répondre à un **besoin**. L'analyse fonctionnelle consiste donc à **recenser, caractériser, ordonner** et **hiérarchiser** les fonctions d'un système. Elle s'applique à la création ou à l'amélioration d'un système. Elle a pour objectif de décomposer le système pour y distinguer :

- Les **fonctions de service** qui permettent de répondre au besoin.
- L'organisation et l'**interaction** de **l'ensemble** de ces fonctions.
- Les **fonctions techniques** qui permettent d'assurer les fonctions de service.

Selon qu'on s'intéresse aux fonctions de service ou aux fonctions techniques, on parle d'analyse **fonctionnelle externe** ou **interne**, à chacune ses outils. Les plus utilisés de ces outils sont :

- Le **diagramme de bête à cornes** pour formuler un besoin.
- Le **diagramme Pieuvre** pour rechercher les fonctions de service.
- Les diagrammes **FAST** et le **SADT** pour rechercher les fonctions techniques.



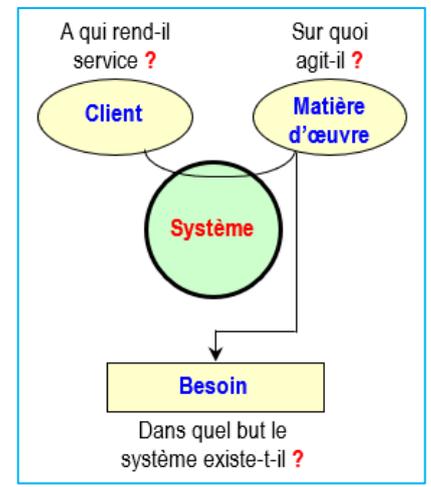
Introduction

- Dans la vie quotidienne, on utilise des **produits** divers.
- Chacun de ces produits satisfait à un de nos **besoins**.
- Le **besoin** est donc une **nécessité** ou un **désir** éprouvé par un **utilisateur**. Il permet de **justifier** l'existence d'un produit.
- **Exemple** : on utilise le **produit ordinateur** pour satisfaire le **besoin** de traiter, stocker et communiquer des données.



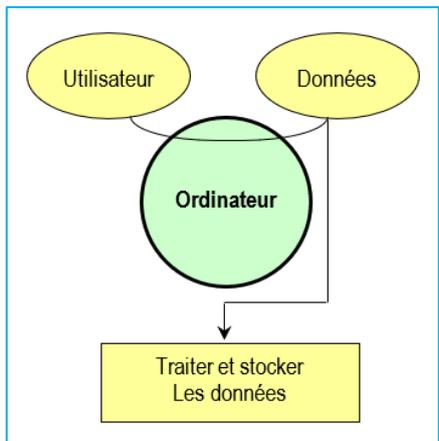
Diagramme de Bête à cornes

- L'outil « **bête à cornes** » permet de s'assurer que le **besoin existe** ; par conséquent, l'étude du système se justifie et a donc raison d'être.
- Enoncé du besoin : On pose **3 questions** :
 - A **qui** rend-il service ?
 - Sur **quoi** agit-il ?
 - Dans **quel** but le système existe-t-il ?



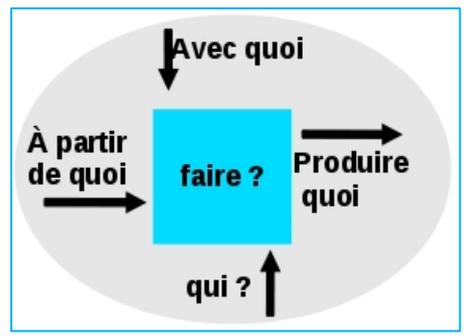
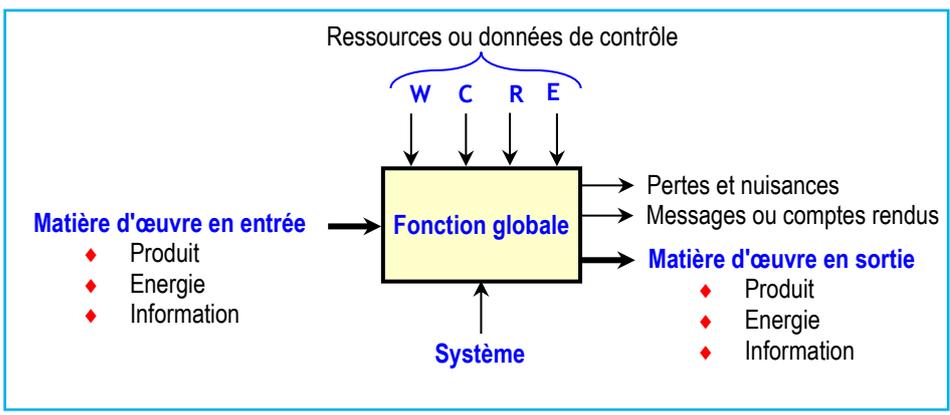
Le produit rend service au client en agissant sur la matière d'œuvre pour satisfaire le besoin.

- **Exemple** : Le produit Ordinateur



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** : Ce sont des données non modifiées qui imposent une contrainte à l'activité ou la déclenche. Ces données de contrôle se classent en **4 catégories** :
 - Energie (**W**) : Présence d'énergie pour effectuer l'action.
 - Configuration (**C**) : Programmes et Modes de marches (manuel, automatique, pas à pas, etc.).
 - Réglage (**R**) : Paramètres de vitesse, seuils de déclenchement, etc.
 - Exploitation (**E**) : Interface Homme/Machine (Départ de cycle, arrêt, etc.).
- **Nom du système** : Il est indiqué en bas du rectangle.
- **Exemple** : Store automatisé

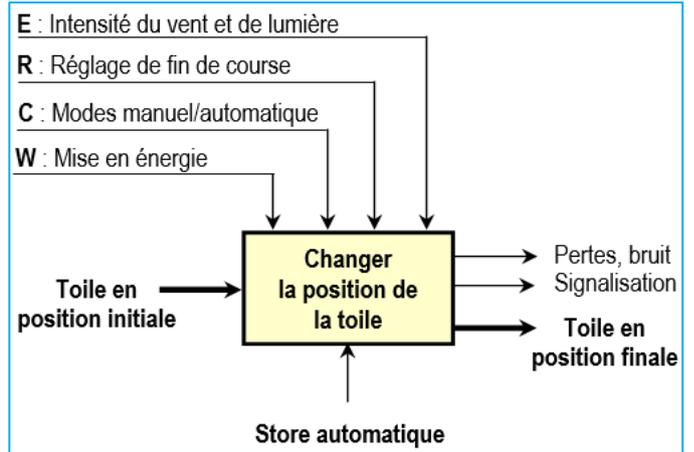
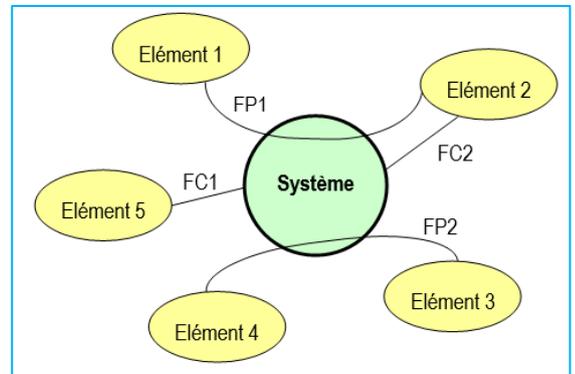


Diagramme Pieuvre

- Le **diagramme Pieuvre** recense tous les éléments de **l'environnement extérieur** du système (humain, physique, etc.), qui sont en interaction avec lui.
- Un produit assure un nombre de fonctions de natures différentes dont certaines sont plus importantes que d'autres. Une classification courante et simple est donnée dans ce qui suit :
 - **Les Fonctions Principales (FP)** : Elles lient plusieurs éléments de l'environnement pour 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**.
- **Exemple** : Store automatisé



Fonction	Description
FP1	Positionner correctement la toile pour créer de l'ombre
FC1	S'adapter aux supports
FC2	Utiliser l'énergie électrique du secteur
FC3	Résister aux agressions de l'environnement
FC4	Prendre en compte les consignes de l'utilisateur
FC5	Capter l'intensité des rayons solaires
FC6	Capter la vitesse du vent

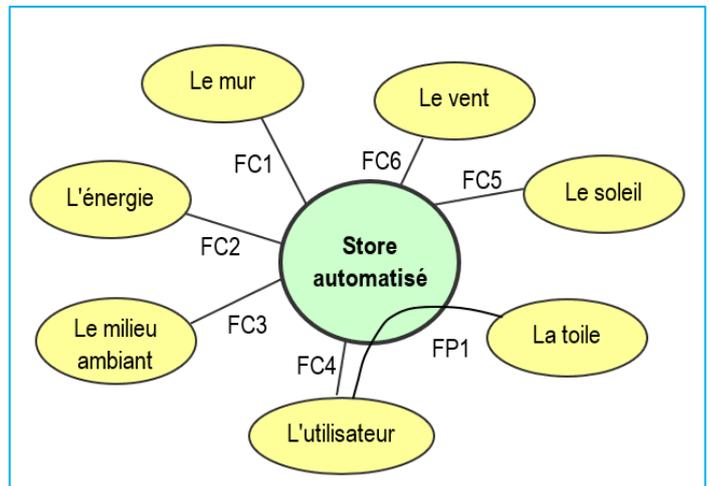
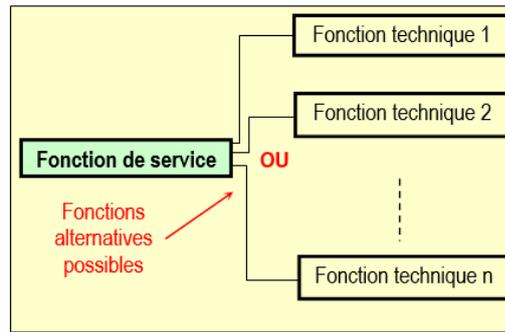
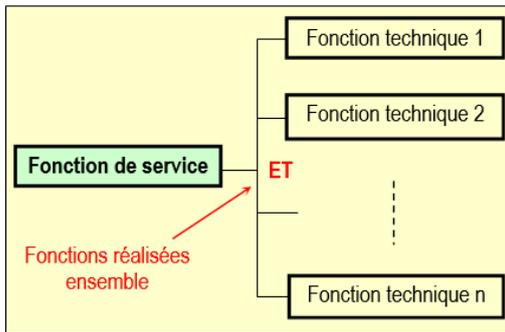
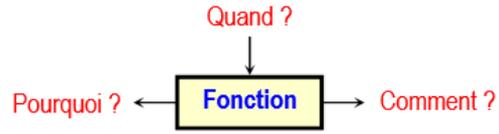


Diagramme FAST (Functional Analysis System Technique)

- Une **fonction technique** représente une action **interne** au système, pour assurer une ou des fonctions de service ; elle est définie par le **concepteur**. Elle conduit à la **solution technologique ou constructive**, qui participe à **construire** techniquement le système.
- Le FAST est donc une **décomposition hiérarchisée** des fonctions d'un système, allant des fonctions de service jusqu'aux solutions technologiques ou constructives, en passant par les fonctions techniques :

- **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

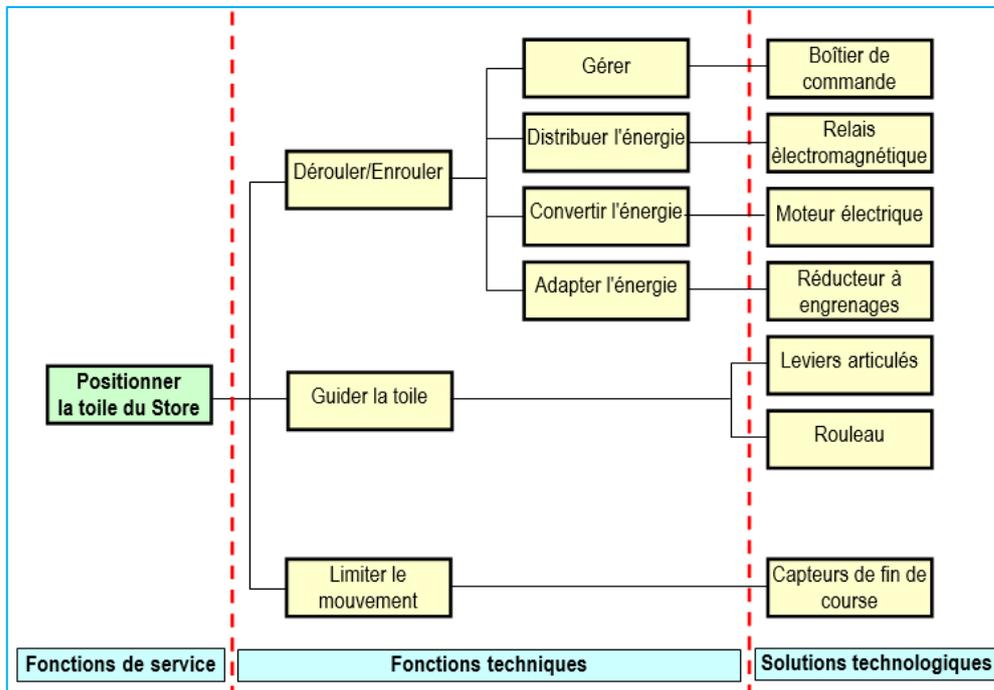
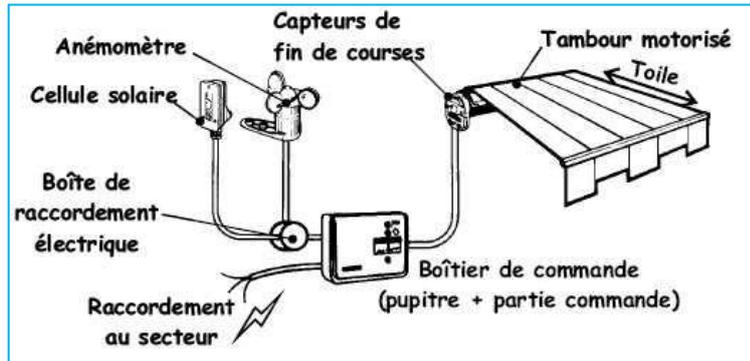
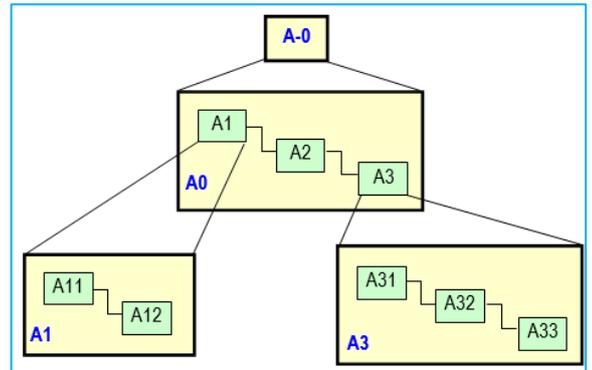




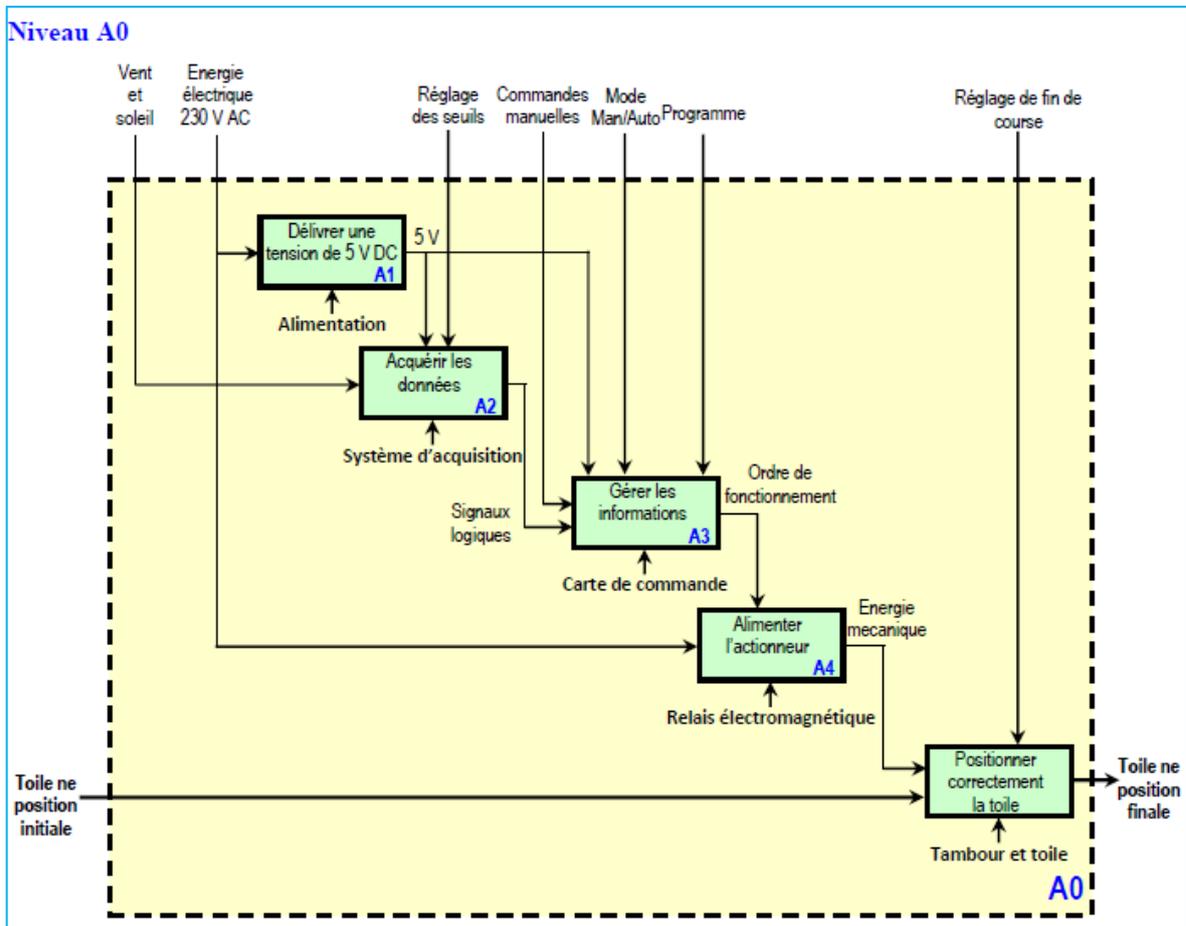
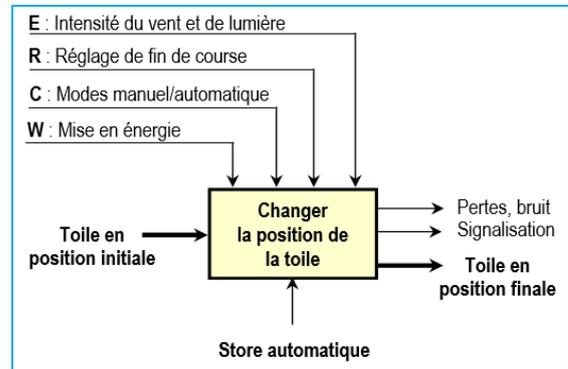
Diagramme SADT (Structured Analysis and Design Technics)

- 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 boites **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.



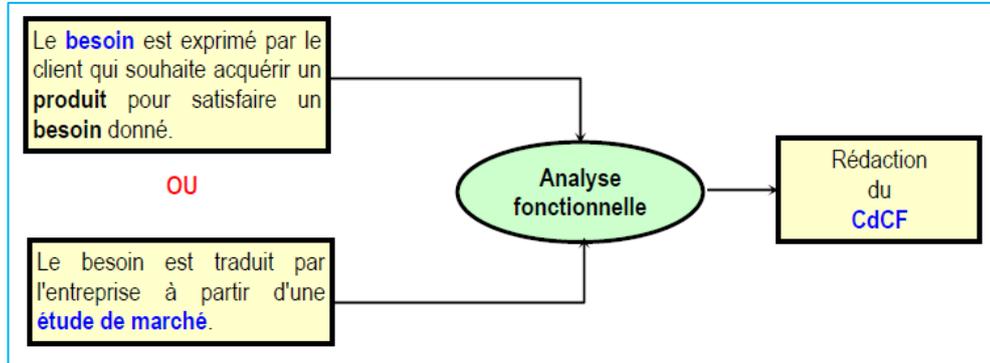
- Exemple :** SADT partiel du store automatisé.





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 leurs 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"> ▪ Délai de descente du store ▪ Délai de montée du store 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 mn ▪ 15 mn 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ± 2 s ▪ ± 2 s
...
FC4	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Niveau sonore ▪ MTBF* 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 20 dB ▪ 10 ans 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ± 2 dB ▪ Minimum

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

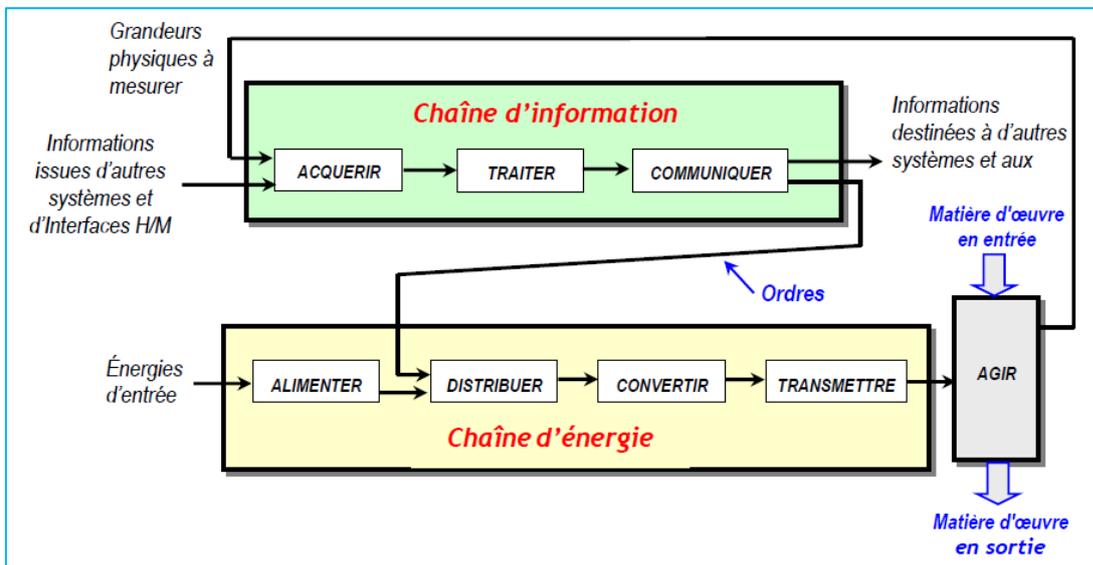


Structure fonctionnelle d'un système

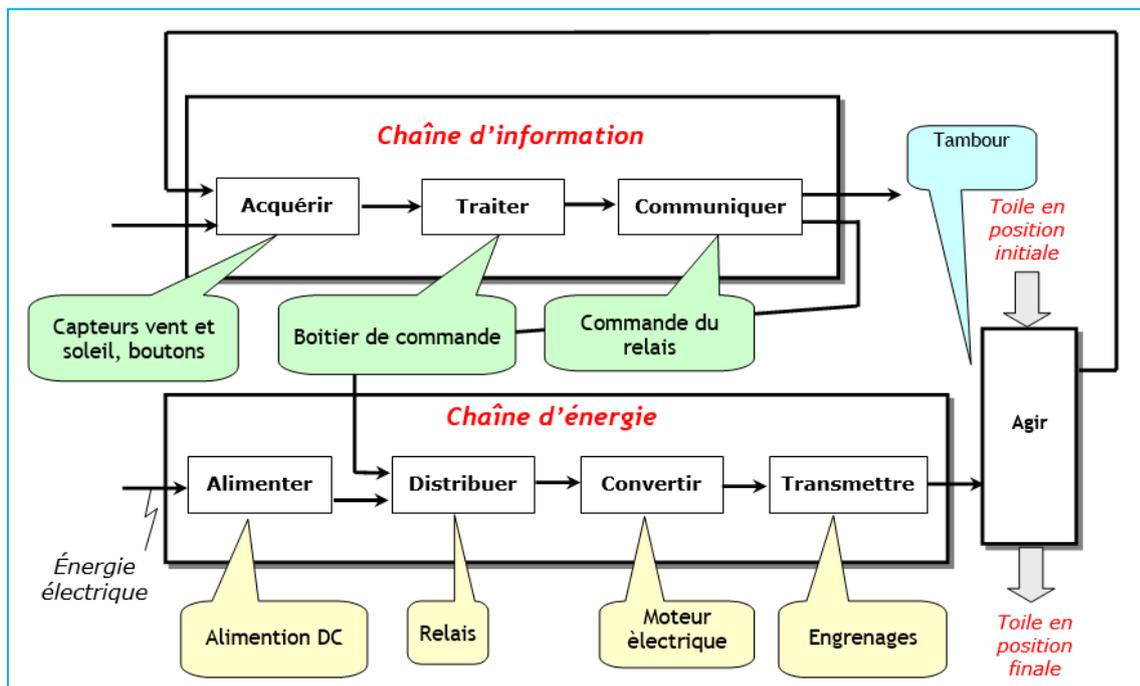
- Tout système automatisé, peut être décomposé en **chaînes fonctionnelles**.
- Une chaîne fonctionnelle est **l'ensemble des constituants organisés** en vue de l'obtention d'une tâche opérative, c'est-à-dire d'une tâche qui agit directement sur la matière d'œuvre.
Exemples : Serrer une pièce, percer une pièce, déplacer une charge, etc.
- Les constituants d'une chaîne fonctionnelle participent :
 - Soit à des opérations de gestion de l'énergie ; il s'agit de d'une **chaîne d'énergie**.
 - Soit à des opérations de gestion d'informations ; il s'agit de d'une **chaîne d'information**.

Schéma générique

- Ce schéma fonctionnel contient des fonctions **génériques**, i.e. de telles fonctions s'appliquent en principe à presque tous les systèmes automatisés de ce **genre** ; elles ne sont pas donc spécifiques.



- **Exemple** : Store automatisé

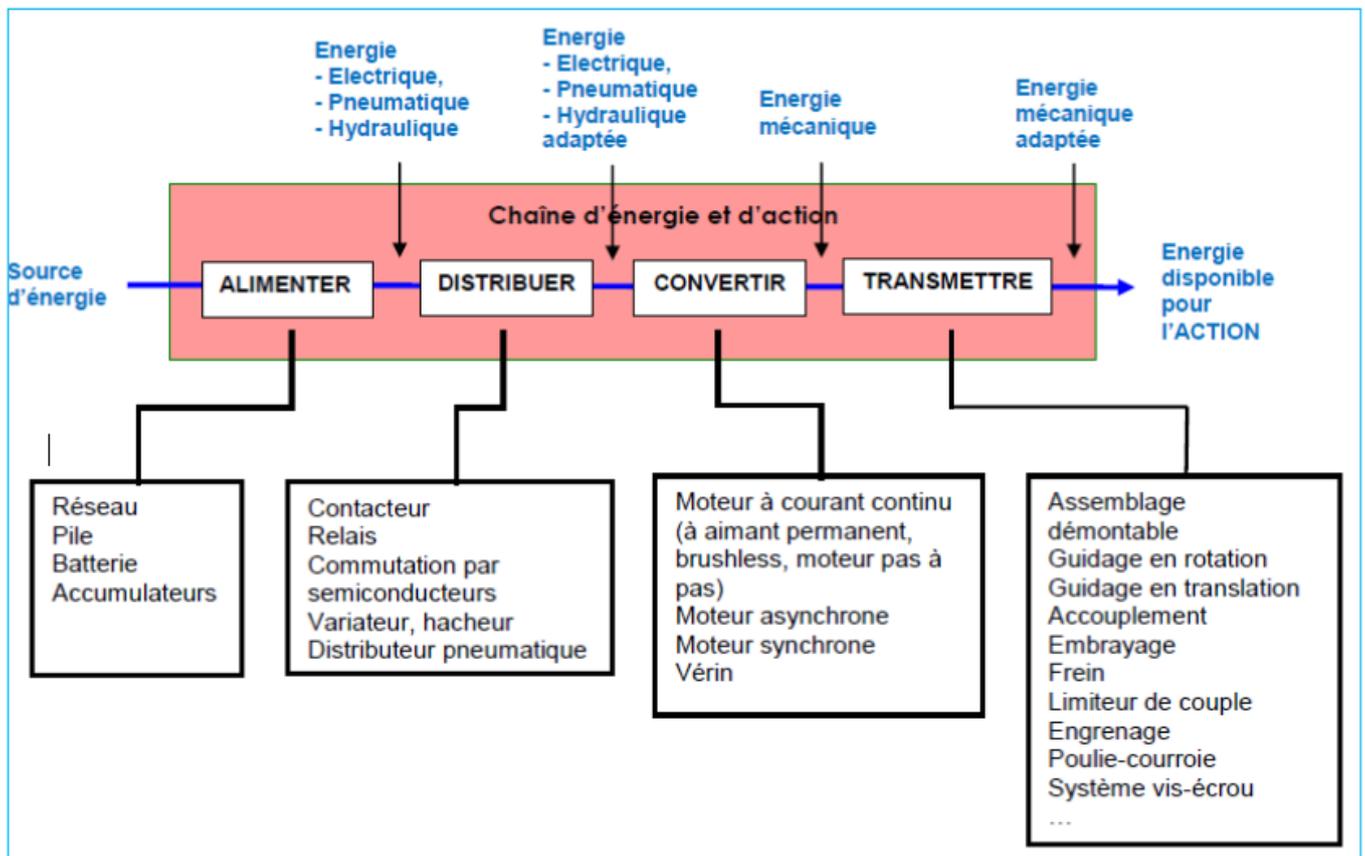
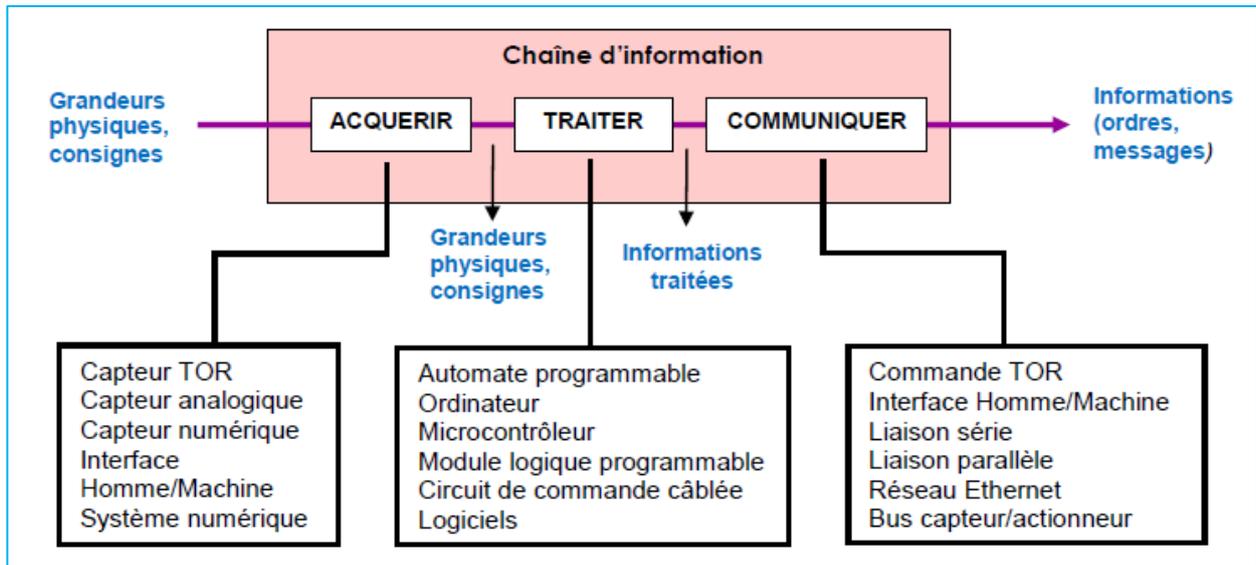




Action sur la matière d'œuvre (Effecteur)

- La chaîne d'énergie et la chaîne d'information concourent ensemble, pour « agir » sur la matière d'œuvre.
- On appelle généralement l'élément responsable de cette dernière opération « **Effecteur** », qui provient du mot **effet**.
- En fait, un effecteur est l'élément terminal de la chaîne d'action, convertissant l'action de l'actionneur en un **effet final** sur la matière d'œuvre pour lui donner une **valeur ajoutée**.
- **Exemples :**
 - **Forêt** de perceuse pour effectuer des trous.
 - **Tambour** de store pour enrouler ou dérouler une toile.
 - **Convoyeur** (tambour + tapis) pour effectuer un déplacement de pièces sur un tapis roulant.

Exemples de solutions constructives pour les 2 chaînes





Exercices (Enoncés)

Exercice 1 : Analyse de besoin

Cocher les réponses justes correspondantes pour chacun des 3 systèmes suivants et en déduire le diagramme de la fonction globale.

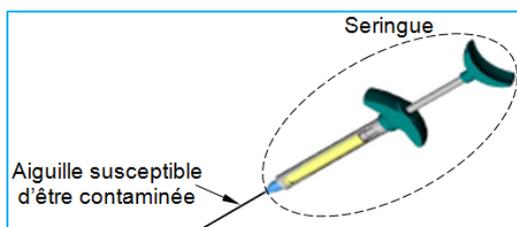
Matière d'œuvre entrante	Matière d'œuvre sortante	Fonction globale	Données de contrôle		
			Sortie principale	Sortie secondaire	
Pain non grillé			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1- Grille pain 
Chaleur			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Electricité			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Faire des tartines			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Mise en marche			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Pain grillé			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Miettes			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Choix de la durée			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Faire du pain			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Griller du pain			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Chargement manuel du pain			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2- Tondeuse 
Déchets verts			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Bac à déchets			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Pelouse tondue			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Tondre la pelouse			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Jardinier			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Pelouse haute			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Pilotage de la tondeuse			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Cultiver de la pelouse			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Energie (électrique ou thermique)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Mise en marche			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3- Bétonnière 
Choix de la hauteur de coupe			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Eau			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Energie (électrique ou thermique)			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Chargement manuel			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Béton			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ciment			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Calculer le dosage			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Préparer du béton			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Sable			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Sécher le béton			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Contrôle visuel du mélange			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ouvrier			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Mise en marche			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Exercice 2 : Destructeur d'aiguille (Extrait du sujet principal 2010)

1- INTRODUCTION

Un dentiste utilise très souvent un anesthésique local pour pouvoir travailler sur son patient sans sensation de douleur. Cet anesthésique, injecté sous forme de piqûre, implique un stockage, une destruction adaptée et hygiénique de la seringue usagée. La destruction de la seringue impose la séparation de l'aiguille et de l'ampoule. L'aiguille doit être stockée sans manipulation jusqu'à son élimination et l'ampoule doit pouvoir être jetée dans un conteneur de déchets médicaux. Pour satisfaire à ces exigences, le destructeur d'aiguille, notre système d'étude, doit :

- Séparer l'aiguille de la seringue (partie infectée) sans contact physique.
- Stocker l'aiguille dans un conteneur hermétique.



Séparation seringue-aiguille



Dévisser en toute sécurité la partie de l'embase restée dans la seringue



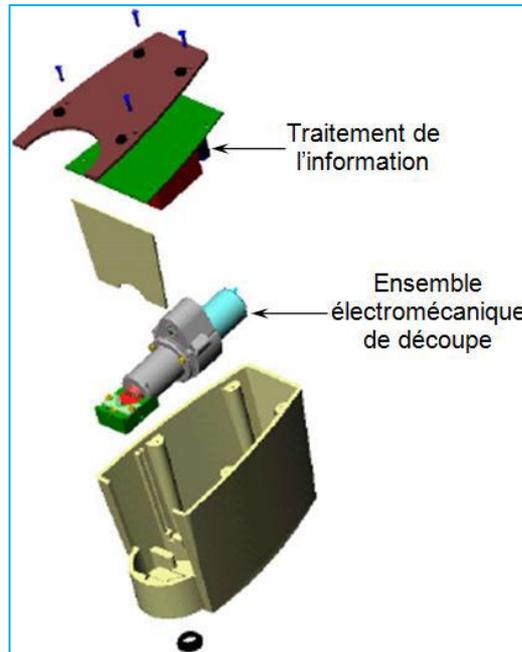
Stockage des déchets susceptibles d'être contaminés dans le conteneur hermétique

2- DESCRIPTION DU SYSTÈME

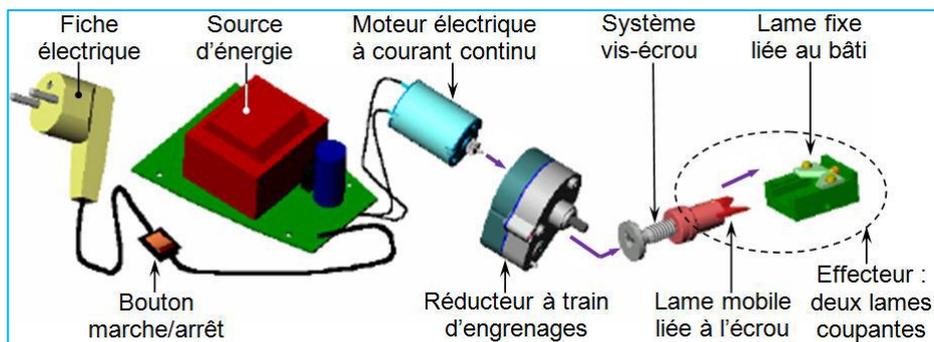
Le destructeur d'aiguilles est constitué d'un gobelet, permettant le stockage temporaire des aiguilles usagées et d'un appareil (ensemble électromécanique) permettant de séparer l'aiguille et l'ampoule de la seringue. La découpe s'effectue par 2 lames : l'une fixe et l'autre mobile en translation par motorisation. L'action se déroule automatiquement dès la mise en place de la seringue dans l'appareil. Ainsi, la procédure de la mise en service du système est comme suit :

- Présenter la seringue verticalement, aiguille vers le bas, dans l'orifice destiné à cette fin.
- Appuyer la seringue jusqu'à la butée.
- Un voyant rouge s'allume, le mécanisme coupe l'embase de l'aiguille.
- Au signal sonore retirer la seringue. Un voyant vert s'allume, la partie sectionnée de l'aiguille tombe dans le gobelet.

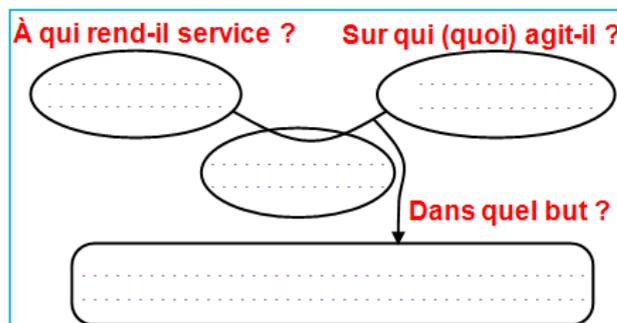
3- ÉCLATÉ DU DESTRUCTEUR D'AIGUILLE



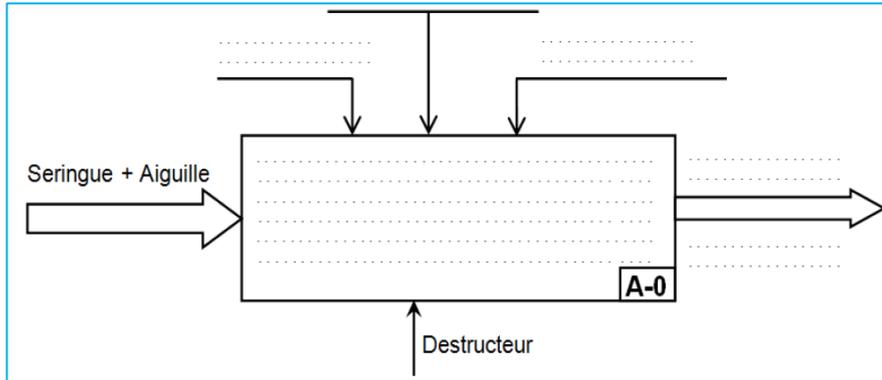
4- LA CHAÎNE D'ÉNERGIE DU DESTRUCTEUR



1- Compléter le diagramme de bête à cornes du système.

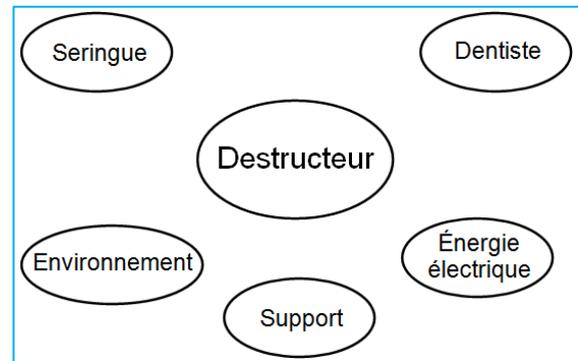


2- Compléter l'actigramme A-0 du système.

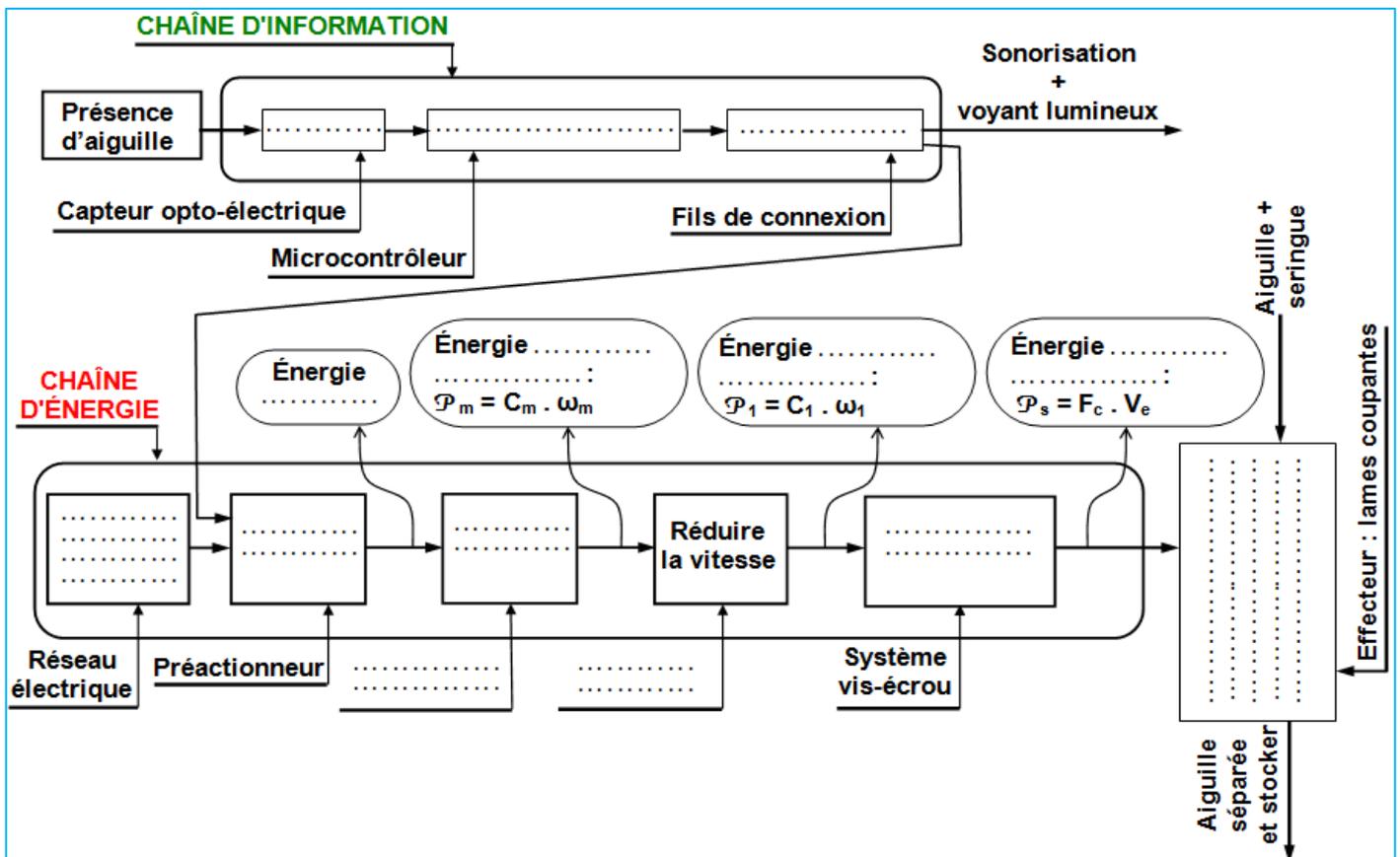


3- Compléter le diagramme « PIEUVRE » du système en plaçant les repères des fonctions de service citées en face du diagramme.

Fp : Séparer l'aiguille contaminée de la seringue et la stocker dans le conteneur hermétique ;
FC1 : S'adapter à l'environnement ;
FC2 : S'adapter à la source d'énergie disponible ;
FC3 : Être stable sur une table au cours de son utilisation ;
FC4 : Recevoir les consignes de l'opérateur ;
FC5 : Recevoir et détecter l'aiguille de la seringue.



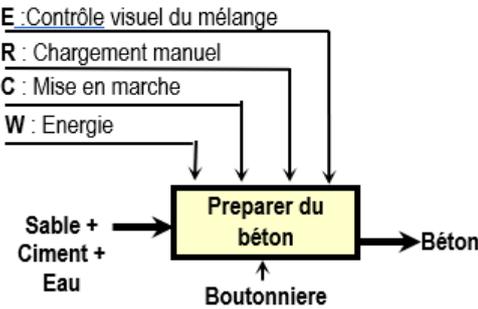
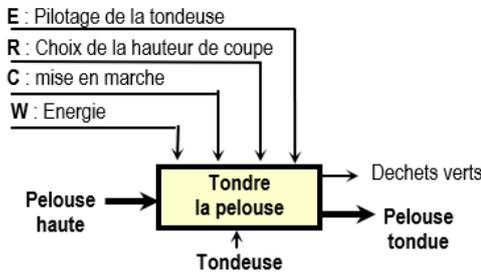
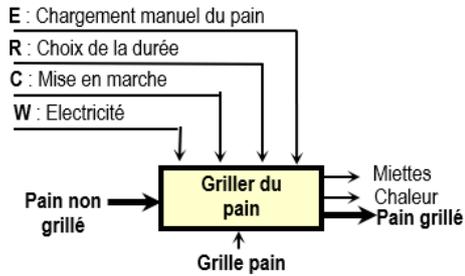
4- Compléter le schéma fonctionnel du système (chaîne d'information et chaîne d'énergie).





Exercices (Corrigés)

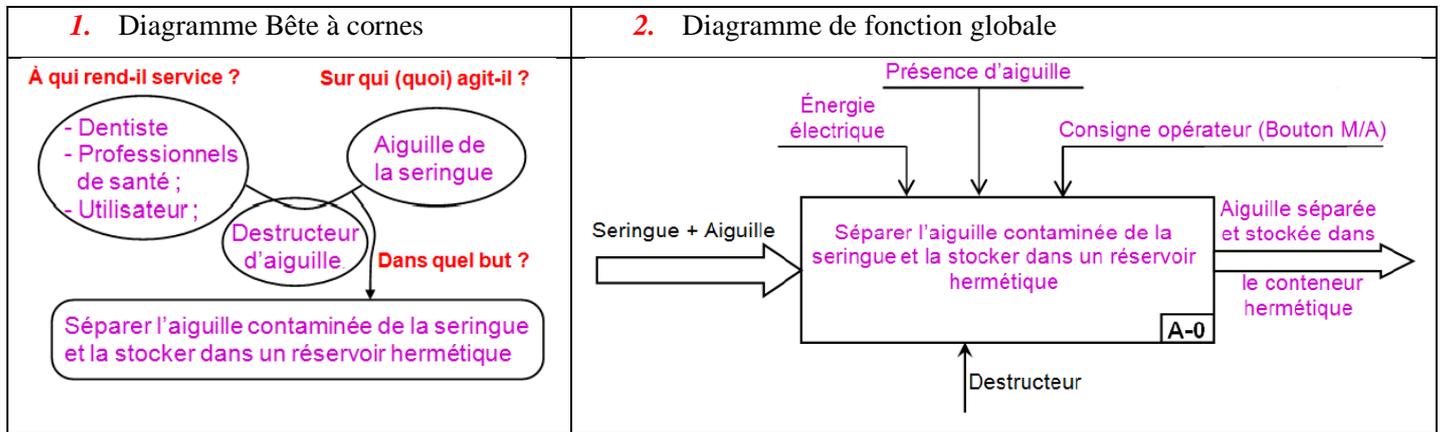
Exercice 1 : Analyse de besoin



Matière d'œuvre entrante	Matière d'œuvre sortante		Fonction globale	Données de contrôle	
	Entrée	Sortie		Entrée	Sortie
Pain non grillé	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Chaleur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Electricité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Faire des tartines	<input type="checkbox"/>				
Mise en marche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Pain grillé	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Miettes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Choix de la durée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Faire du pain	<input type="checkbox"/>				
Griller du pain	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Chargement manuel du pain	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Déchets verts	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Bac à déchets	<input type="checkbox"/>				
Pelouse tondue	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tondre la pelouse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Jardinier	<input type="checkbox"/>				
Pelouse haute	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pilotage de la tondeuse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Cultiver de la pelouse	<input type="checkbox"/>				
Energie (électrique ou thermique)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mise en marche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Choix de la hauteur de coupe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Eau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Energie (électrique ou thermique)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Chargement manuel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Béton	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ciment	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Calculer le dosage	<input type="checkbox"/>				
Préparer du béton	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sable	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sécher le béton	<input type="checkbox"/>				
Contrôle visuel du mélange	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ouvrier	<input type="checkbox"/>				
Mise en marche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

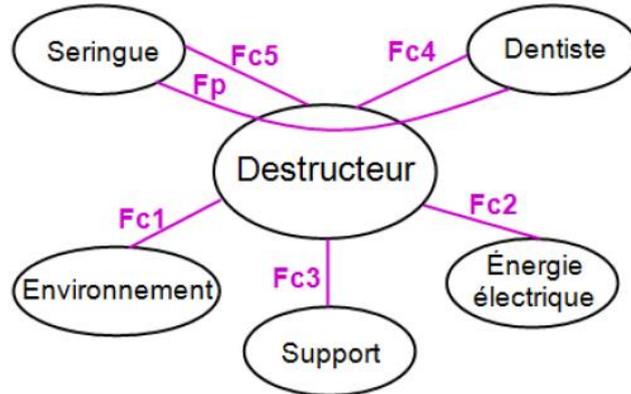


Exercice 2 : Destructeur d'aiguille (Extrait du sujet principal 2010)

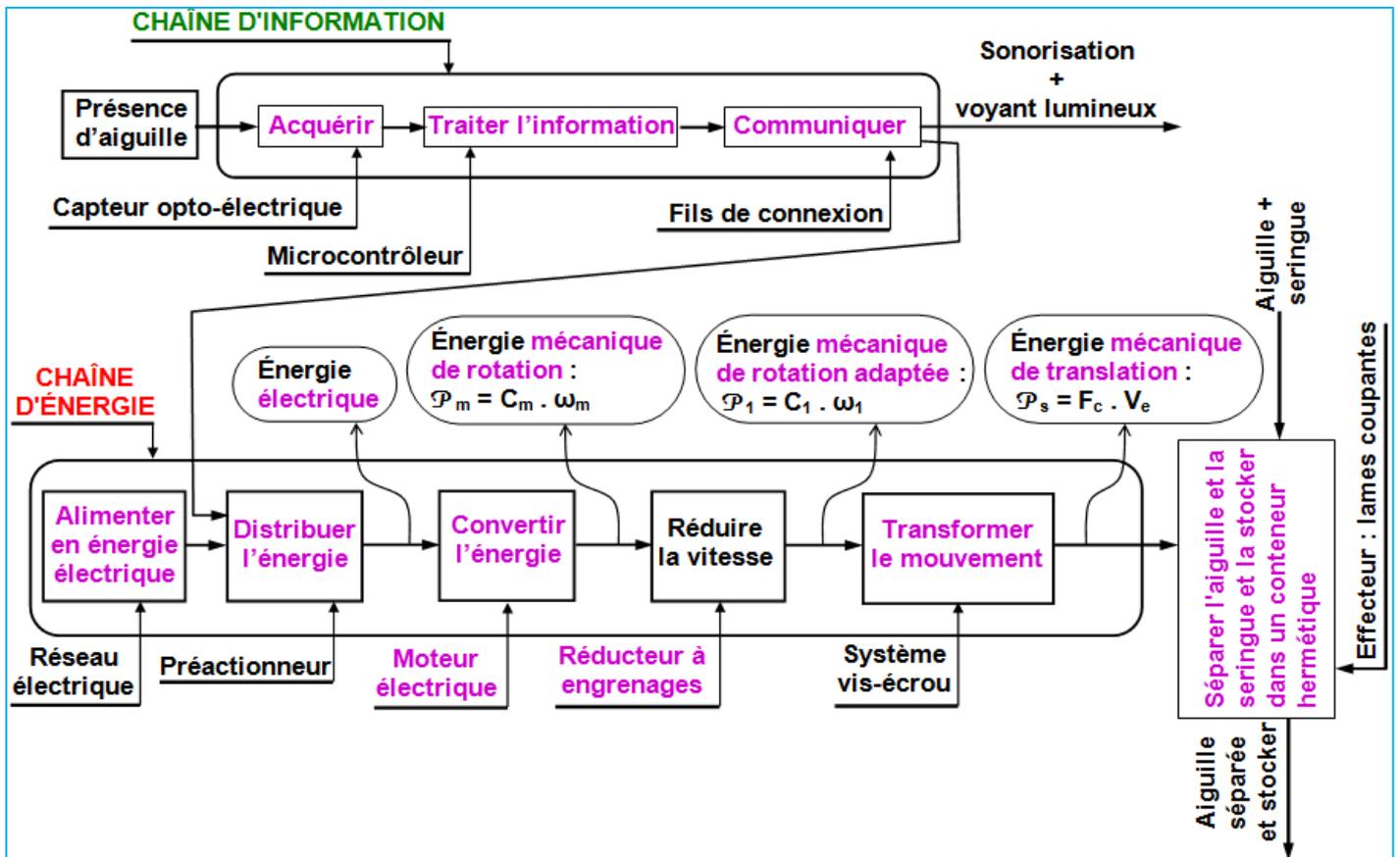




3. Diagramme Pieuvre



4. Chaines fonctionnelles



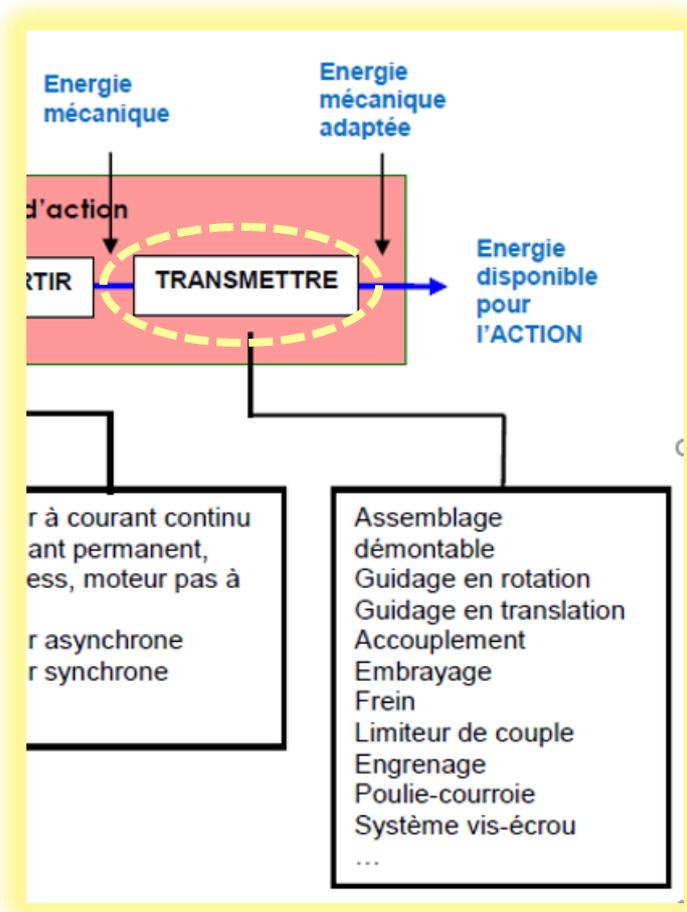
Module 2

Chaîne d'énergie

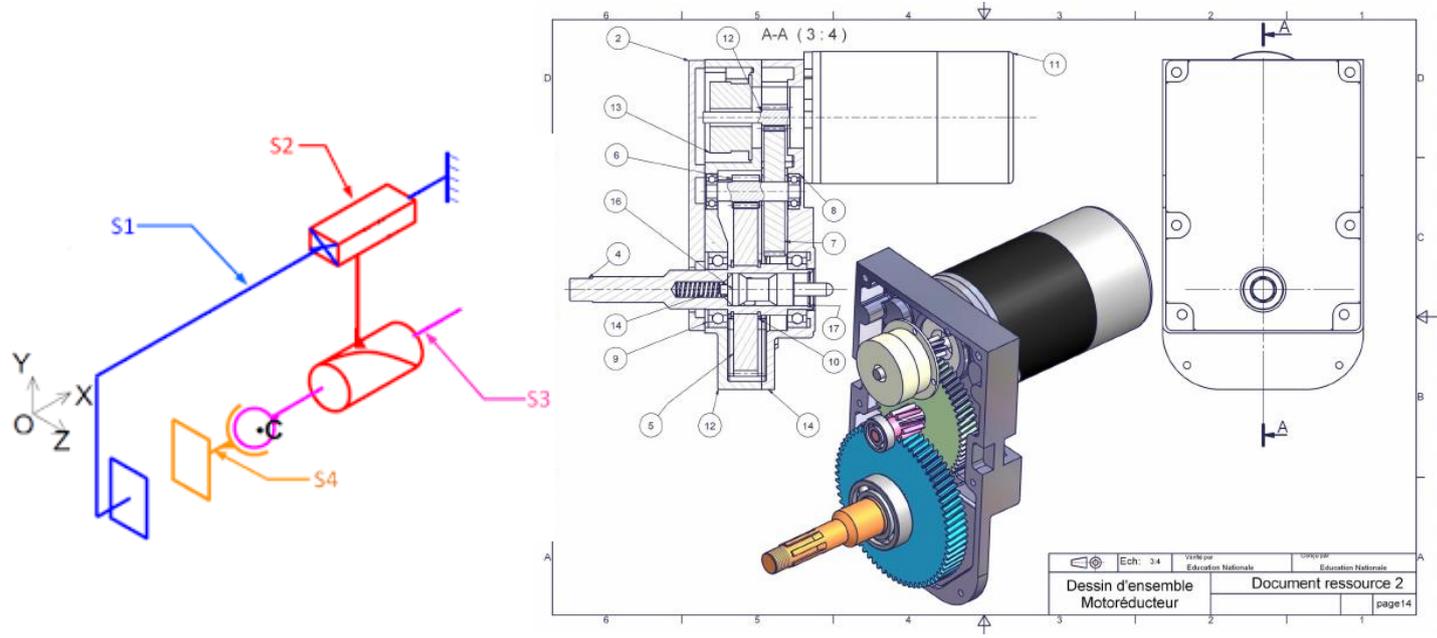
Pour agir sur la **matière d'œuvre**, un système automatisé a besoin **d'énergie**, qui subira de nombreux traitements pour être adaptés à la nature de l'action sur la matière d'œuvre.

Le **module 2** traite donc de ces aspects qui peuvent être modélisés par les **fonctions génériques**, i.e. elles s'appliquent sur la plupart des systèmes ; il s'agit des fonctions :

- **Alimenter** le système avec les énergies nécessaires.
- **Distribuer** l'énergie aux moments opportuns aux actionneurs.
- **Convertir** l'énergie pour l'adapter aux effets voulus.
- **Transmettre** l'énergie convenablement pour agir sur la matière d'œuvre.



Fonction Transmettre



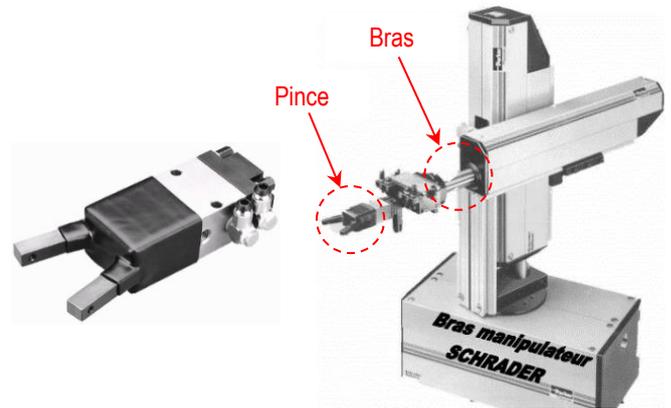


Le dessin industriel

- Le **dessin industriel** ou **dessin technique**, manuel ou assisté par ordinateur, est l'outil graphique le plus utilisé par les techniciens pour passer de l'idée à la réalisation d'un produit technique. C'est un **langage de communication universel** dont les règles précises sont donc **normalisées**.

Principaux types de dessins

- Il existe plusieurs types de dessins techniques, tous complémentaires. Parmi les plus utilisés, on trouve la vue écorchée, la vue éclatée, le croquis ou esquisse, le **dessin d'ensemble** et le **dessin de définition**.
- Comme exemple pour illustrer ces différents dessins, nous prenons l'exemple d'une **pince pneumatique** d'un bras manipulateur, en l'occurrence un certain robot Schrader. La pince est montée sur le bras du robot et est utilisée pour déplacer des pièces d'un point à un autre dans un atelier ou un laboratoire.

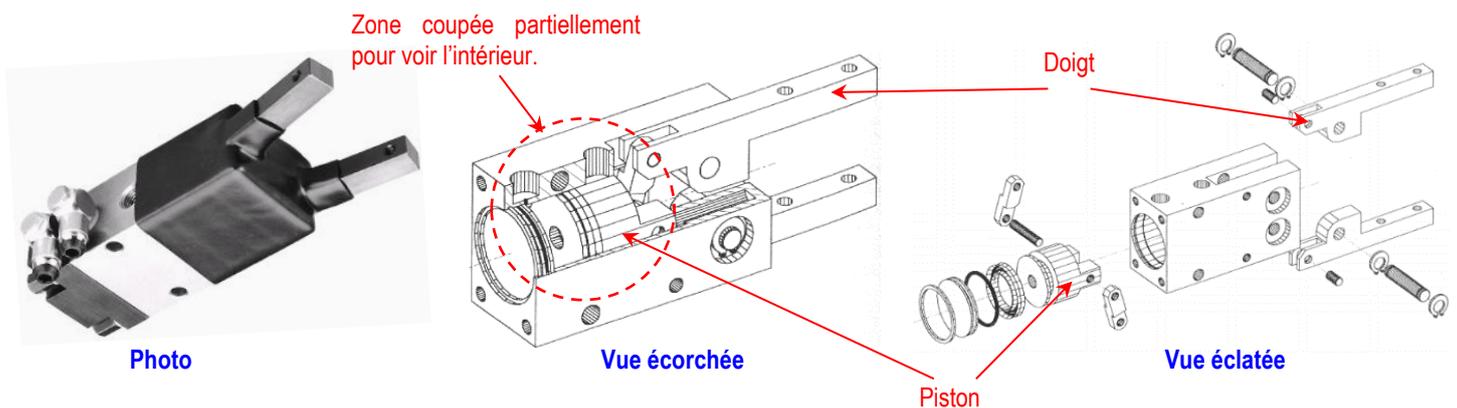


Vue écorchée

- La vue en écorché est un dessin à 3 dimensions (3D), qui permet de visualiser de **façon volumique** un système en montrant l'ensemble monté en **coupe partielle**. On note d'ores et déjà qu'une coupe est un enlèvement de la matière, en sciant le système en question virtuellement selon un plan précis, pour mieux voir son **intérieur**.
- La vue écorchée permet alors de comprendre le fonctionnement global d'un système et situe l'emplacement et le rôle des principaux composants (voir figure ci-dessous).

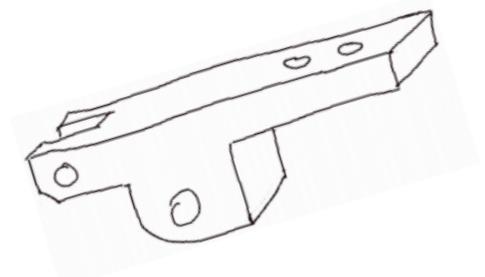
Vue éclatée

- La vue **éclatée** est un dessin 3D, qui permet de visualiser les composants d'un système afin d'en appréhender l'**agencement**. Elle est surtout utilisée dans les catalogues et les **notices de maintenance** (voir figure ci-dessous).



Croquis ou dessin à main levée

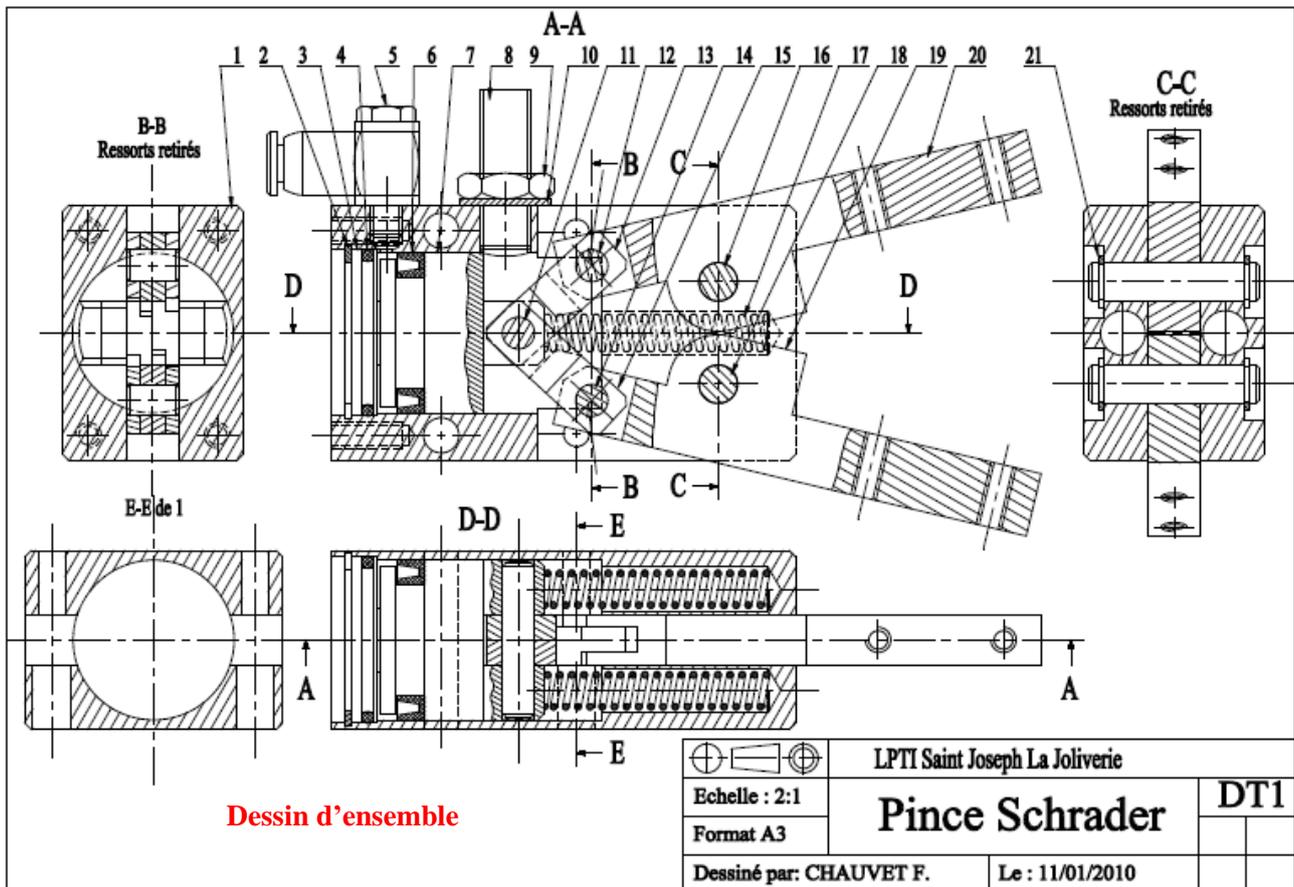
- C'est un dessin ou une **esquisse** fait à **main levée**, c'est à dire, **sans instruments de dessin** et **sans respecter de règles** précises. Malgré son manque de précision, Il permet de visualiser rapidement une idée ou un avant-projet. La figure ci-contre représente un croquis d'un **doigt** de la pince pneumatique du bras Schrader.





Dessin d'ensemble

- Le dessin ou **plan** d'ensemble est un dessin à 2 dimensions (**2D**) ; il indique de façon détaillée la représentation normalisée de **tout ou partie du système**.
- Il montre comment les différentes pièces, repérées par des numéros, sont assemblées.
- Il est accompagné d'une **nomenclature** qui dresse la liste complète des pièces constitutives, ainsi que certaines de leurs caractéristiques (nombre, matière, dimension, etc.).



Dessin d'ensemble

rep	Nb	Désignation	Matière	Observ.
1	1	Corps	Acier	
2	1	Anneau élastique pour alésage 25 * 1.2		
3	1	Couvercle	Acier	
4	1	Joint torique 1.5 * 23		
5	1	Raccord d'air comprimé	laiton	
6	1	Joint U 25 * 4	Rilsan	
7	1	Piston	Acier	
8	1	Capteur inductif	Acier	
9	1	Ecrou Hm M8		
10	1	Rondelle à dents DE 8		
11	1	Axe du piston	Acier	
12	1	Axe bielle	Acier	
13	1	Biellette supérieure	Acier	
14	1	Axe bielle	Acier	
15	1	Biellette inférieure	Acier	
16	1	Axe	Acier	
17	2	Ressort		
18	1	Axe	Acier	
19	1	Branche inférieure	Acier	
20	1	Branche supérieure	Acier	
21	1	Anneau élastique pour arbre 6 * 0.7		

Nomenclature

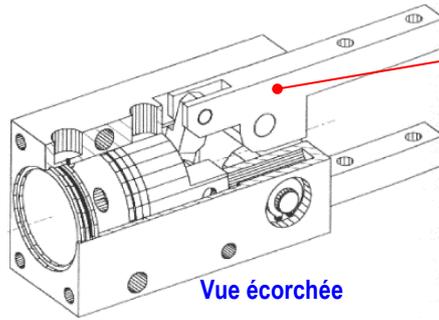


Dessin de définition

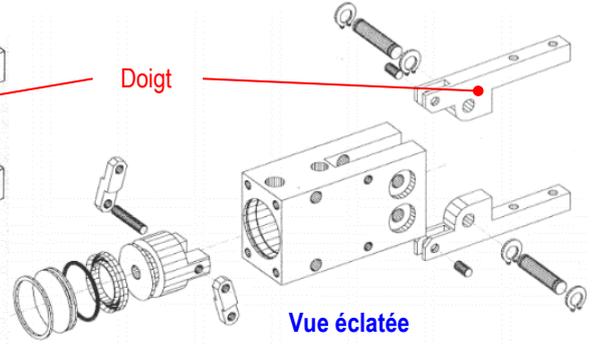
- Le dessin de définition est un dessin 2D ; il représente **une pièce** et la définit complètement. Il comporte alors toutes les indications nécessaires pour la **fabrication** de la pièce.
- Il comporte ainsi toutes les vues utiles à sa compréhension ainsi que la cotation complète, qui permet de préciser les différentes dimensions de la pièce ; il sert de contrat entre concepteur et réalisateur (**cahier des charges**).
- L'exemple suivant représente le dessin de définition du **doigt** de la pince pneumatique du bras Schrader.



Photo

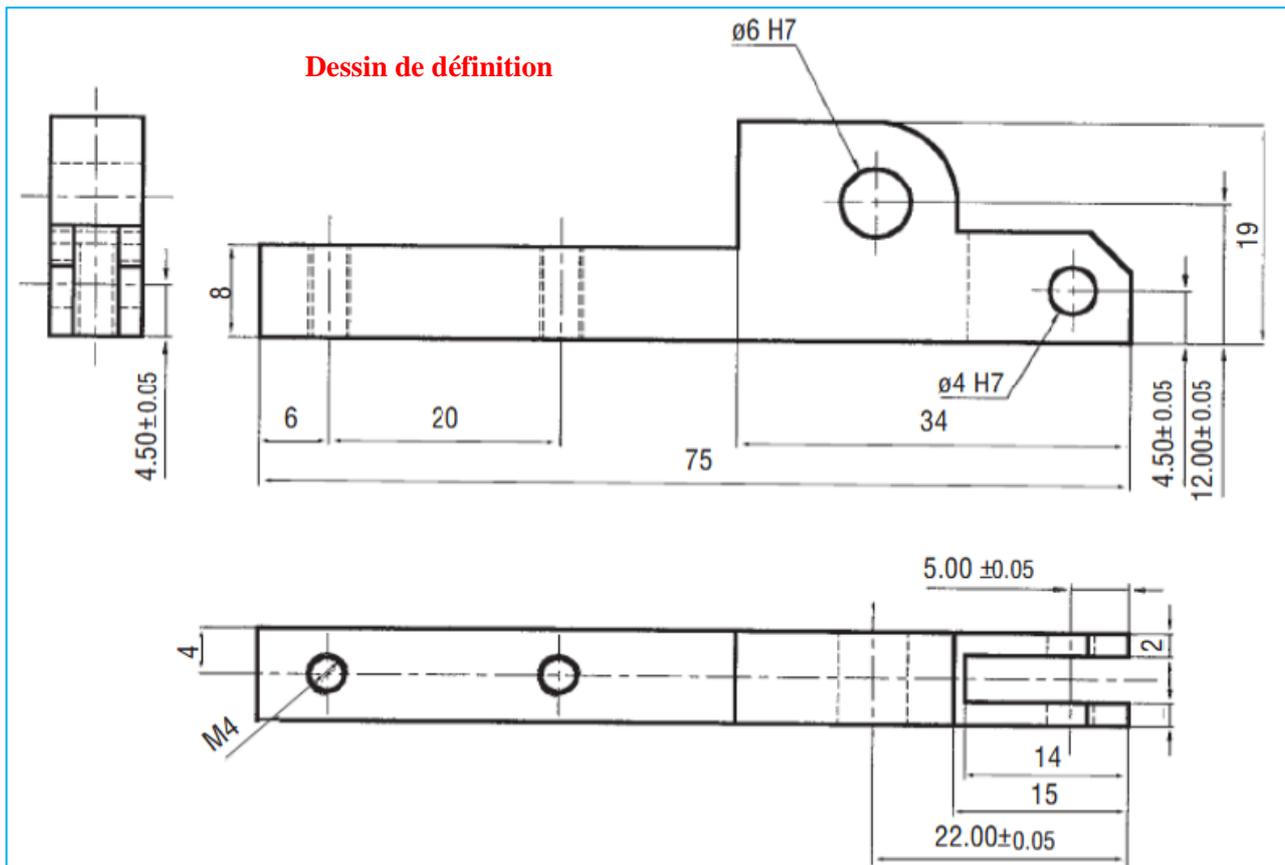


Vue écorchée



Doigt

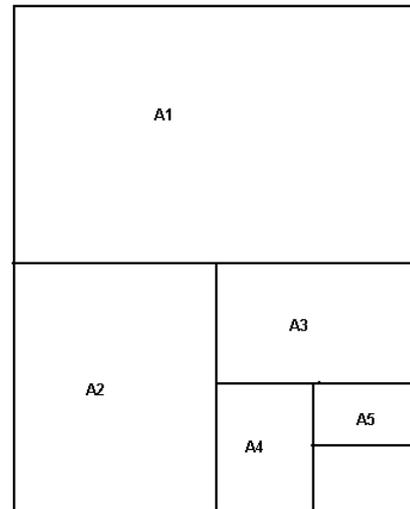
Vue éclatée



Présentation des dessins

Formats normalisés

- Les dessins techniques sont représentés sur des feuilles de dimensions normalisées, appelées **formats**.
- La série normalisée notée **A** (A0, A1, A2, A3, A4) est donc universellement utilisée.
- Le format **A0** (1 m²) est le format de base.
- Tous les autres formats se **déduisent** les uns des autres, en divisant le plus grand côté par 2.
- Les formats peuvent être utilisés **horizontalement** ou **verticalement**.
- A4** est le plus petit format souvent utilisé en dessin technique (297 mm x 210 mm), ce qui correspond à la taille du papier standard de type courrier.



A0 = 841 x 1189
A1 = 594 x 841
A2 = 420 x 594
A3 = 297 x 420
A4 = 210 x 297
A5 = 148 x 210

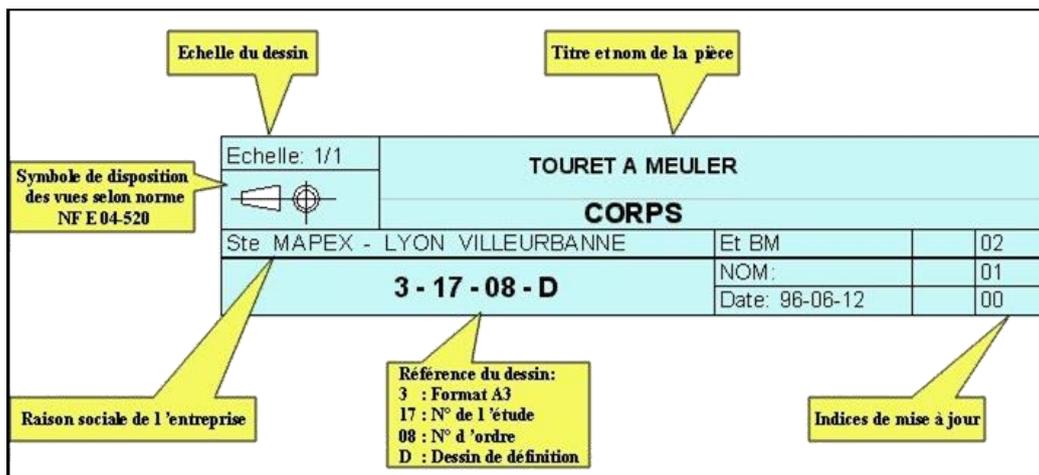
A0 = 841 x 1189

L'échelle

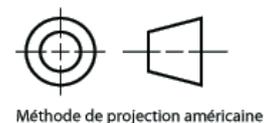
- Si les objets sont grands ou petits par rapport aux formats A, on fait des réductions ou des agrandissements. L'échelle d'un dessin est donc le rapport entre les dimensions dessinées et les dimensions réelles de l'objet :
 - Vraie grandeur** : Echelle 1:1.
 - Réduction** : Echelles 1:2, 1:5, 1:10, etc.
 - Agrandissement** : Echelles 2:1, 5:1, 10:1, etc.
- On appelle **cote** une mesure de dimension indiquée dans un dessin. Les cotes inscrites sur le dessin sont toujours les **cotes réelles** quel que soit l'échelle utilisée.

Le cartouche

- Le cartouche est un tableau qui comporte les informations suivantes : le titre du dessin, l'échelle du dessin, l'identité du dessinateur, la date, le format, le nom de l'établissement, le symbole de disposition des vues, etc.
- Le cartouche **n'est pas normalisé** ; il est donc propre à chaque propriétaire du dessin.



- Ce qu'on observe à gauche, on le représente à droite.
- Ce qu'on observe en dessous, on le représente en dessus.



- Ce qu'on observe à gauche, on le représente à gauche.
- Ce qu'on observe en dessous, on le représente en dessous.

Nomenclature

- C'est la liste complète des pièces qui constituent un ensemble dessiné. Elle est liée au dessin par les repères des pièces (1, 2, 3, etc.). La nomenclature est composée de 5 colonnes :

REP	NBR	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
-----	-----	-------------	---------	-------------

- Le repère de chaque pièce (REP).
- Le nombre de chaque pièce (NBR).
- Le nom des pièces (DESIGNATION).
- La matière de chaque pièce (MATIERE).
- Une observation si nécessaire (OBSERVATION).

Exemple :

repère	nombre	matière	observations	
5	1	Ecrou H, M12-8		
4	2	Rondelle CS 12-24	Cadmié	
3	1	Bras	E 28	
2	1	Vis H, M 12-45, 8-8		
1	1	Bâti	E 24	
Rep.	Nb	Désignation	Mat.	Obs.

cartouche

Les traits

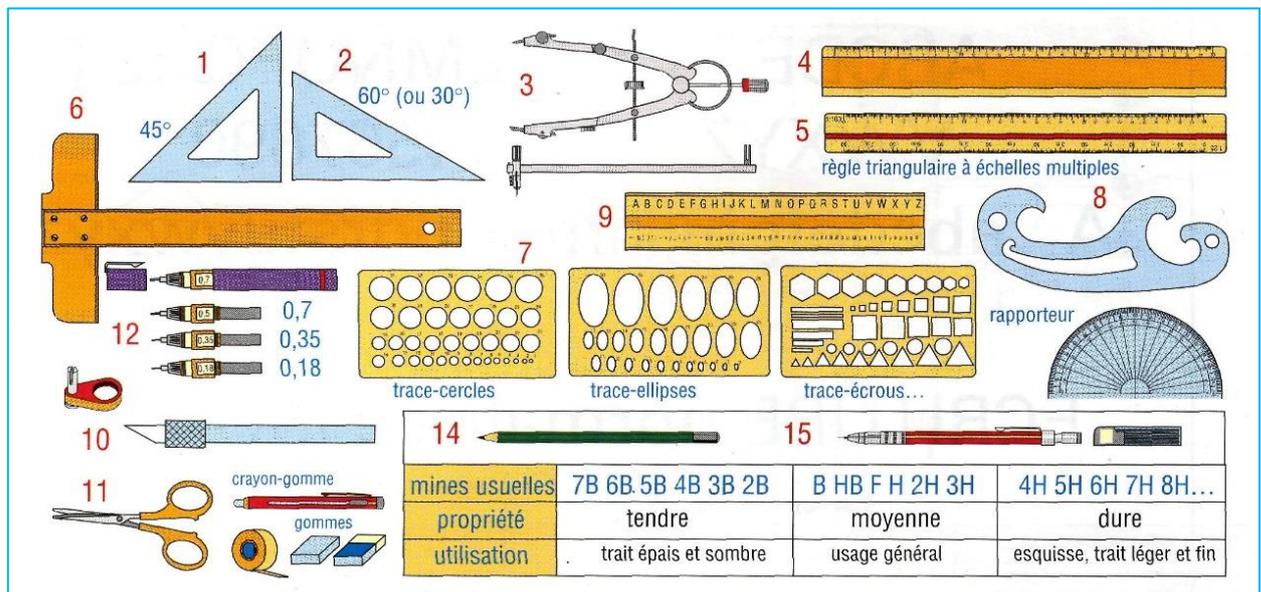
- Plusieurs types de traits sont employés en dessin technique ; chaque type est destiné à un usage bien précis. Un trait est donc caractérisé par :
 - La nature** : continu ou interrompu ou mixte.
 - L'épaisseur** : fort ou fin.
- Ci-dessus, est présenté un tableau montrant les principaux différents types de trait :

Type	Désignation	Epaisseur	Application ou usage
	Continu fort	0.7 mm	<ul style="list-style-type: none"> Arêtes et contours vus Cadre et cartouche
	Interrompu fin	0.3 mm	Arêtes et contours cachés
	Mixte fin	0.3 mm	<ul style="list-style-type: none"> Axes Plan de symétrie ou de coupe Élément primitif (en engrenage par exemple)
	Continu fin	0.2 mm	Ligne d'attache de repères ou de côtes, hachures, filetages
	Continu fin ondulé ou en zigzag	0.2 mm	Limites de vues ou de coupes partielles

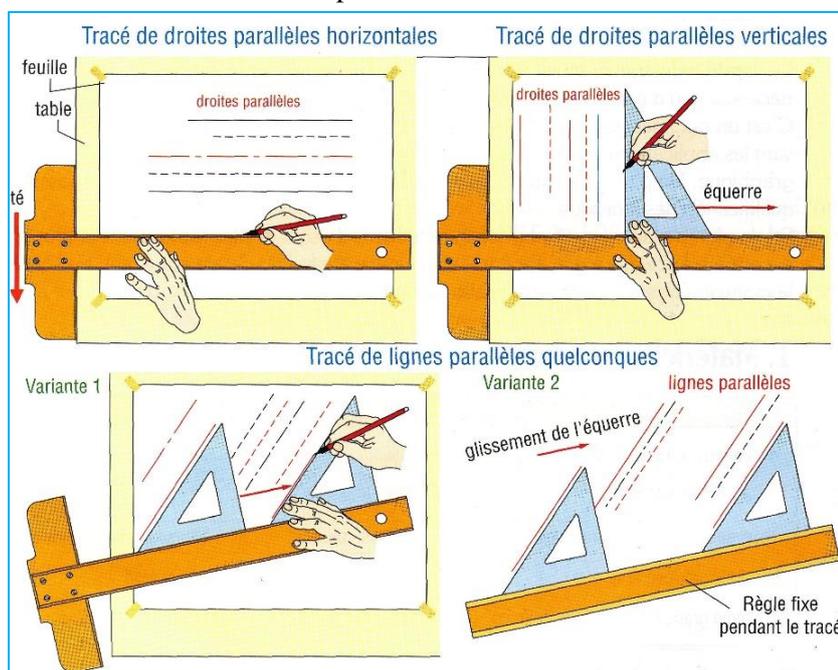
Matériel et équipement usuel manuel

- Le dessin industriel manuel, à **main levée ou aux instruments**, est facile à mettre en œuvre et nécessite peu d'équipements, cependant il exige un minimum de **dextérité et de soin**.
- C'est un outil nécessaire au technicien et à l'ingénieur, car dans certaines circonstances et suivant les applications, il n'est pas toujours possible ni même avantageux d'utiliser un ordinateur graphique. De plus il fournit un savoir-faire supplémentaire augmentant les possibilités et la qualification des individus.
- Instruments typiques** pour le dessin technique :

1 : équerre à 45°	6 : té	11 : ciseaux
2 : équerre à 60° et 30°	7 : trace-cercles, etc.	12 : plumes à encre calibrées
3 : grand compas avec rallonge	8 : trace-courbes	13 : adaptateur plume sur compas
4 : règle graduée (300 mm)	9 : trace-lettre	14 : crayon
5 : règle graduée à échelles multiples	10 : cutter « grattoir »	15 : porte-mine (0,5...)



- Exemple d'utilisation :** Tracés des droites parallèles

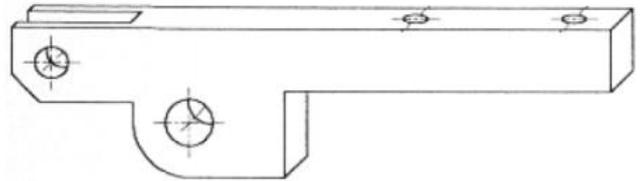
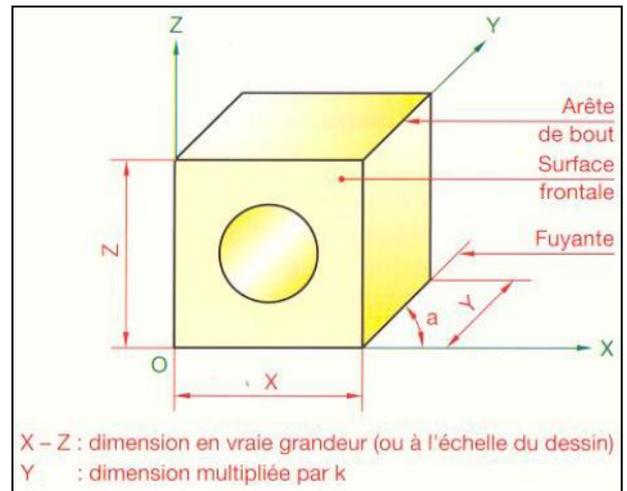


Perspectives

- Naturellement, les feuilles sont des supports de dessin à 2 dimensions (2D) : une largeur et une hauteur. Alors pour faire un dessin 3D sur un support 2D, on utilise les techniques géométriques de projection, à savoir :
 - Les **perspectives cavalière** et **isométrique**, qui permettent de voir rapidement l'aspect tridimensionnel d'un objet, mais déforment l'objet et induisent des illusions optiques.
 - Les **projections orthogonales**, qui permettent grâce aux différentes vues 2D d'un objet, sa conception et sa fabrication tout en pouvant aussi appréhender son aspect tridimensionnel.

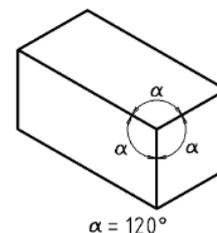
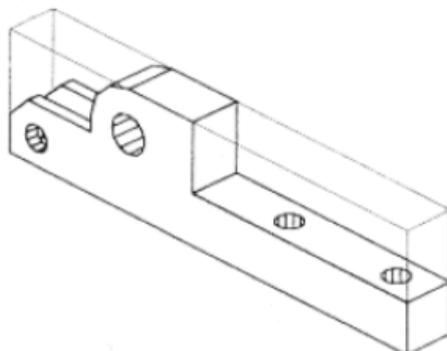
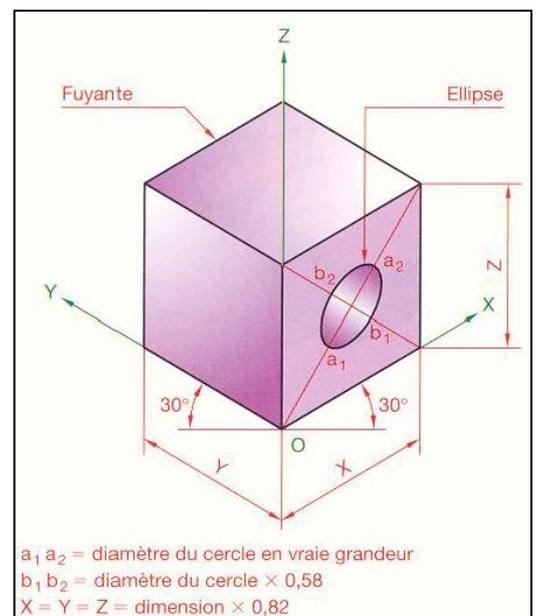
La perspective cavalière

- La perspective cavalière est une projection **oblique** parallèle à une direction donnée, sur un **plan parallèle à la face principale** de l'objet à représenter. Elle est caractérisée par ce qui suit :
 - La face principale se projette en vraie grandeur.
 - Les arêtes perpendiculaires au plan de projection se projettent suivant des droites obliques parallèles appelées « **fuyantes** » et dont les dimensions sont obtenues en multipliant les longueurs réelles par un même **coefficient de réduction k**.
 - L'**inclinaison** des fuyantes (**angle de fuite a**) et le coefficient de réduction sont normalisés : $a = 45^\circ$ et $k = 0,5$.
 - Exemple** : Doigt de la pince Schrader.



Perspective isométrique

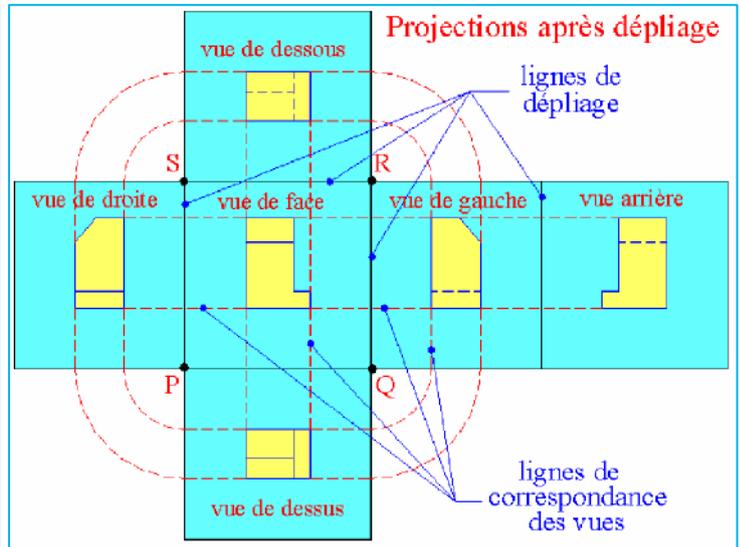
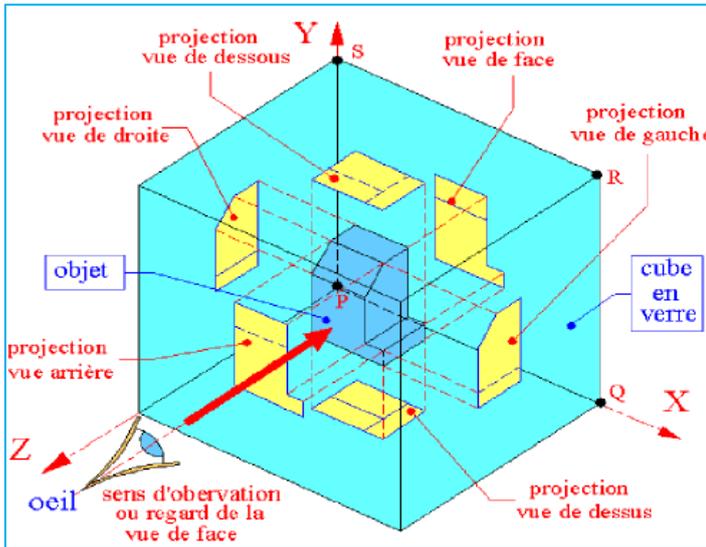
- C'est une projection de l'objet sur un plan non parallèle à une face principale de l'objet. C'est donc une projection orthogonale de la pièce sur un **plan oblique par rapport aux faces principales de la pièce**. Cette perspective donne une bonne vision spatiale de l'objet. En revanche, aucune dimension n'est représentée en vraie grandeur. Elle est caractérisée par ce qui suit :
 - Les arêtes verticales restent verticales.
 - Toutes les fuyantes sont inclinées de 30° par rapport à l'horizontale.
 - Les trois angles de fuite sont identiques (120°).
 - Les valeurs des dimensions X, Y et Z sont égales et réduites dans le rapport $k = 0,82$.
 - Exemple** : Doigt de la pince Schrader.



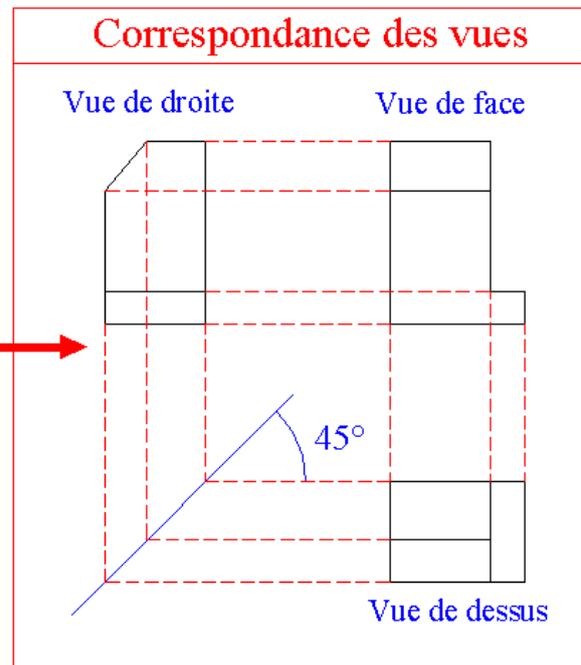
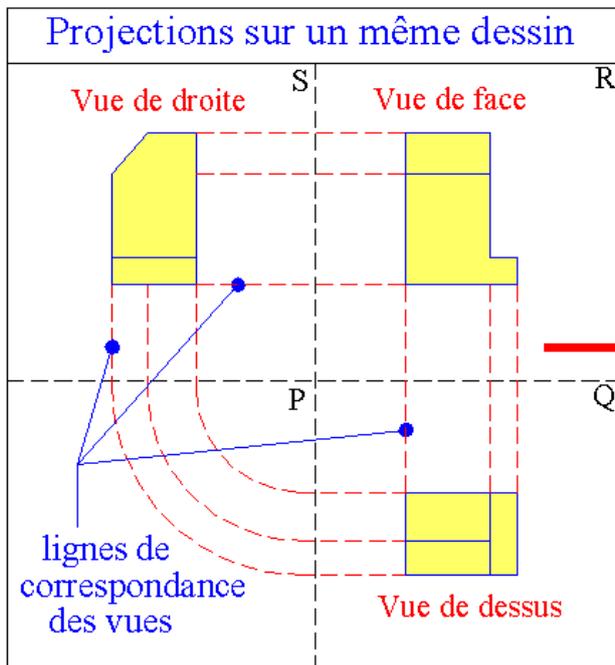


Projection orthogonale

- On imagine l'objet à représenter à l'intérieur d'un **cube** et on **projette orthogonalement** 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.

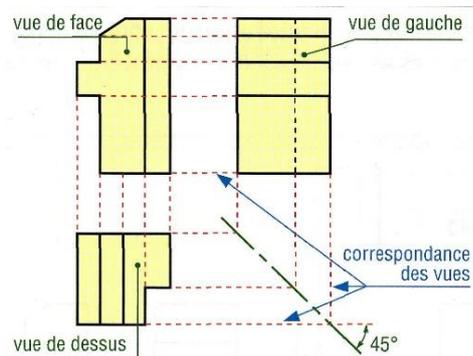
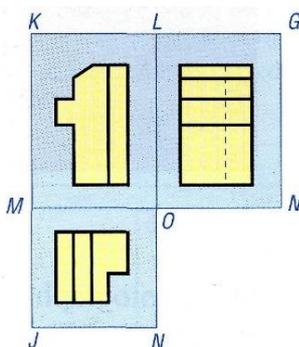
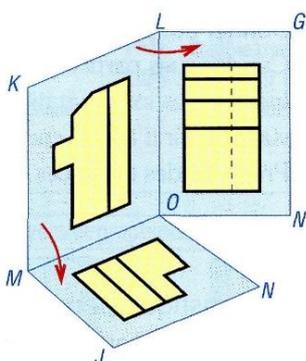
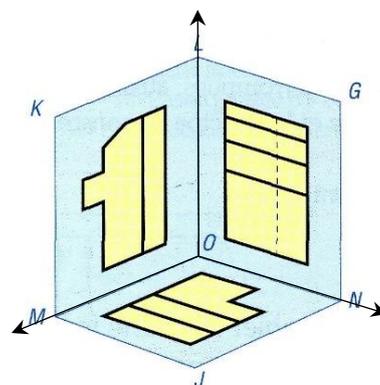
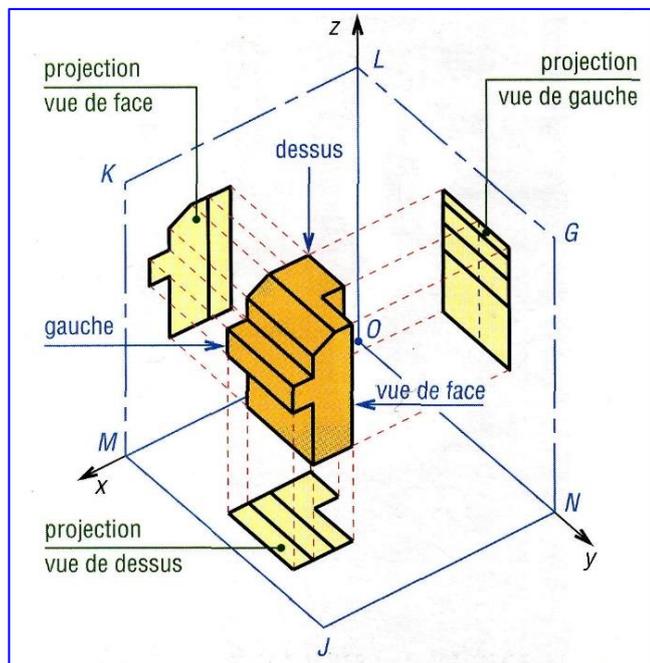


- On note ce qui suit :
 - 3 vues** sont suffisantes pour décrire les caractéristiques et les dimensions d'un objet.
 - Par convention, on utilise les vues de **face**, de **droite** et de **dessus**, sauf si un détail n'apparaîtrait pas sur ces trois vues.
 - La **vue la plus représentative** de la 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°**.

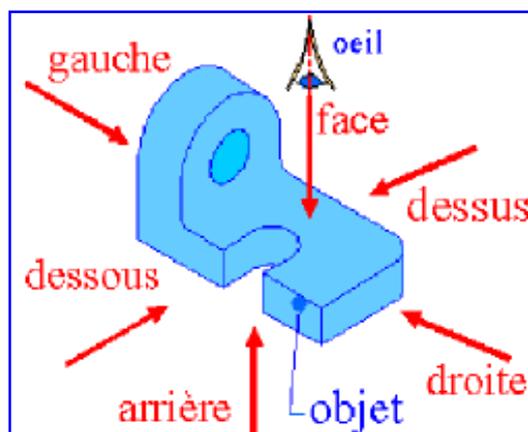
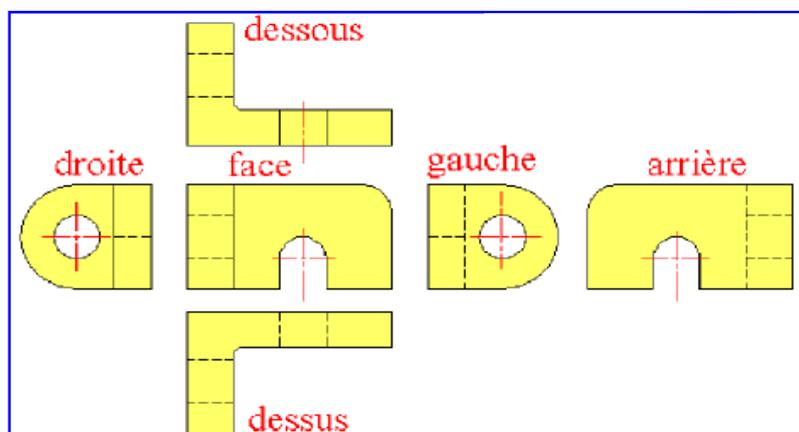




Exemple 1



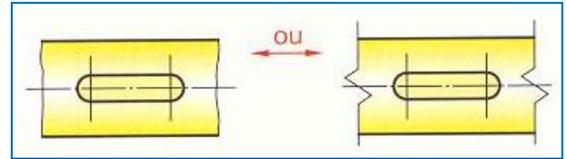
Exemple 2



Vues ou représentations particulières

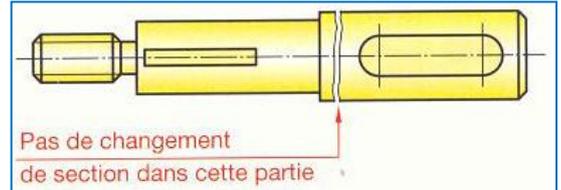
Vue partielle

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



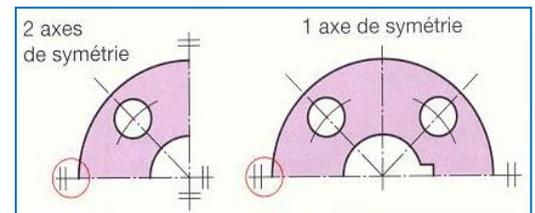
Vue interrompue

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.



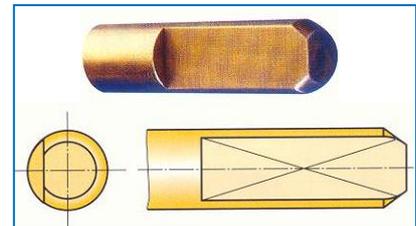
Pièce symétrique

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. On repère les extrémités des axes de symétrie par 2 petits traits fins perpendiculaires à ces axes.



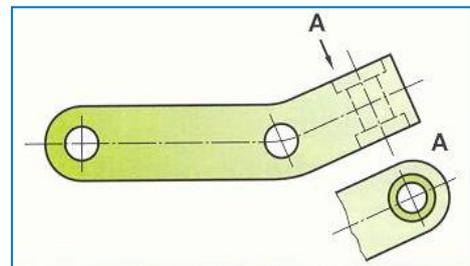
Pièce avec méplat

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



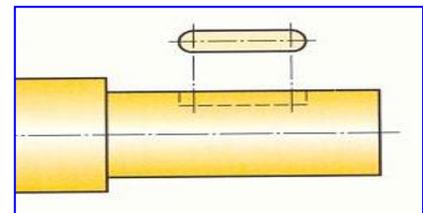
Vue oblique

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. On repère la direction de l'observation par la même lettre majuscule.



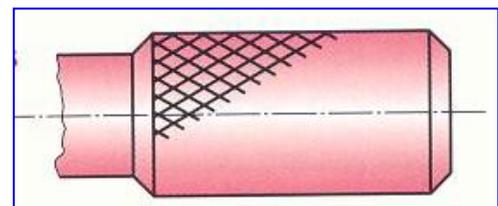
Vue locale

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.



Surface moletée

Le moletage est une technique d'usinage de **stries** sur une surface pour permettre d'améliorer l'adhérence dans sa manœuvre ; il est représenté en trait continu fort et le tracé complet d'une grande surface est inutile.



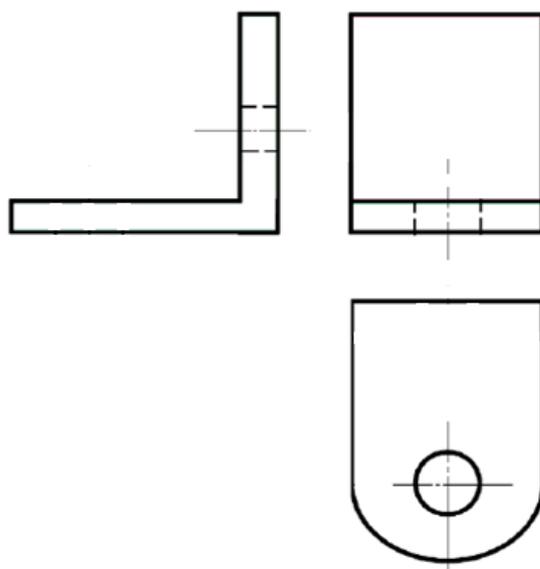
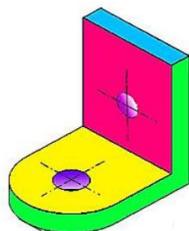


Exercices (Enoncés)

Exercice 1 : Equerre support de petit moteur

La pièce en question sert généralement de support de petit moteur (à courant continu, pas à pas, etc.). On l'appelle équerre, car elle a la forme d'une équerre de dessin ou l'instrument de menuisier par exemple.

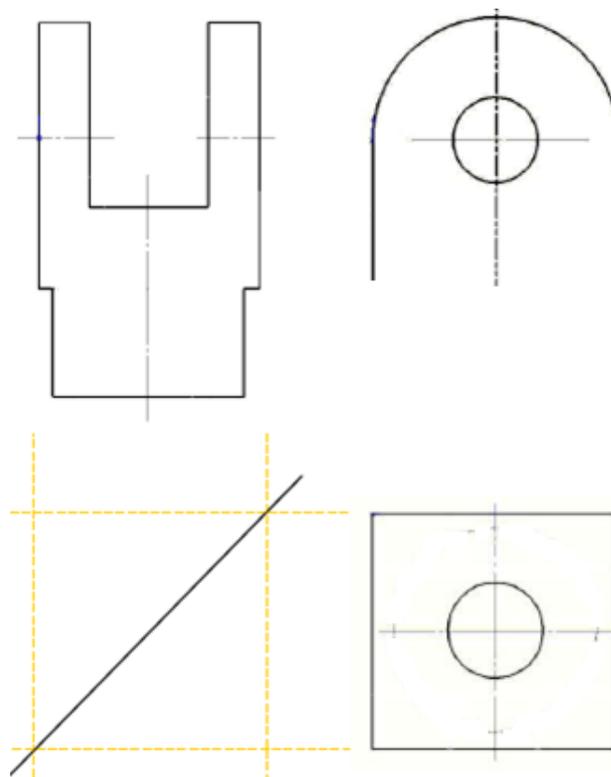
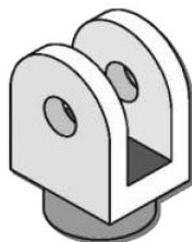
Compléter les vues suivantes, tout en construisant la droite à 45°.



Exercice 2 : Chape pour articulation

Il y a des chapes d'articulation partout où interviennent de simples mouvements de rotation avec glissement. La pièce en question sert par exemple pour la tige d'un vérin. On l'appelle chape car elle a la forme d'un chapeau.

Compléter les vues suivantes.

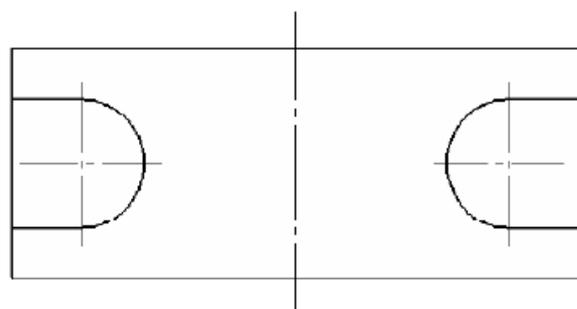
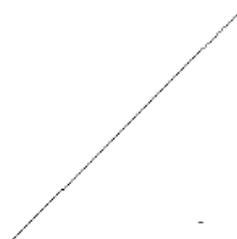
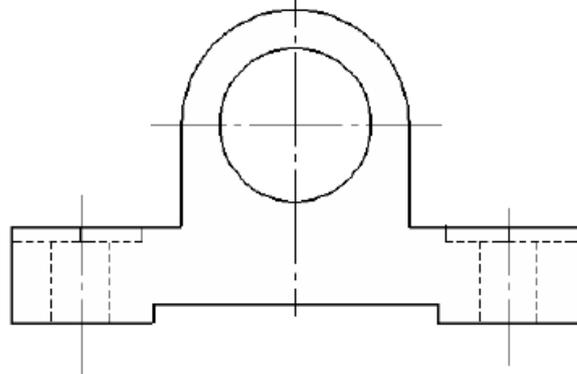
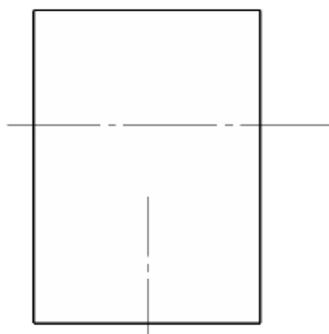
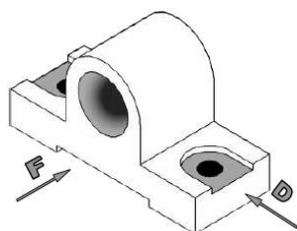




Exercice 3 : Palier à semelle

Les paliers sont des organes utilisés en construction mécanique pour supporter et guider en rotation, des arbres de transmission de puissance.

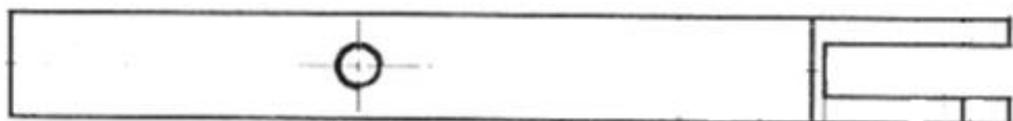
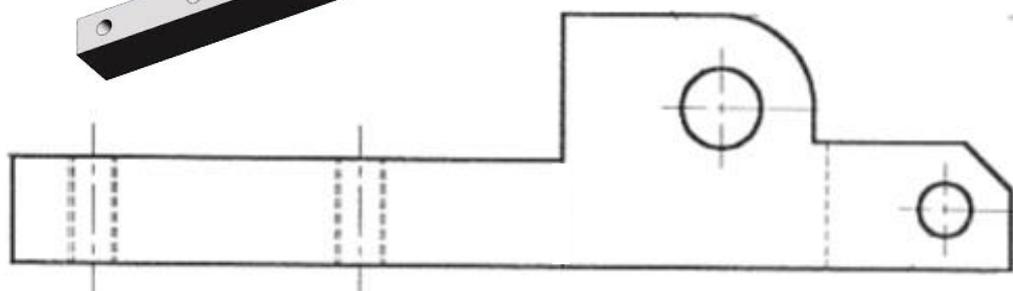
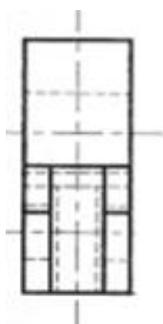
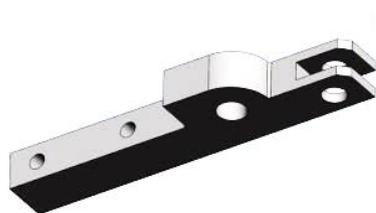
Compléter les vues suivantes.



Exercice 4 : Doigt de la pince Schrader

Il s'agit du dessin de définition du doigt de la pince Schrader.

Indiquer par une flèche la vue de face dans la perspective et compléter la vue de dessus.



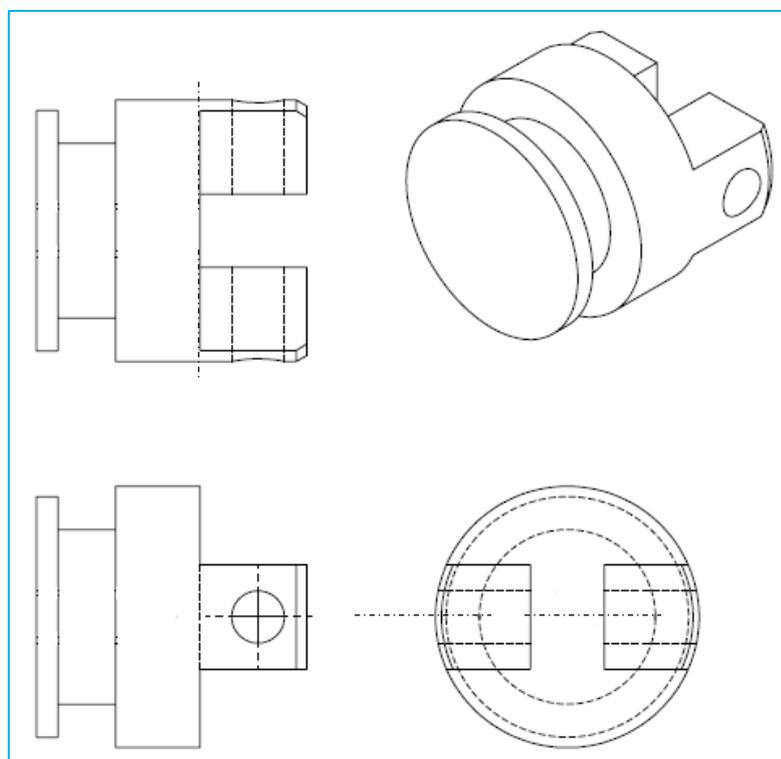


Exercice 5 : Piston de la pince Schrader

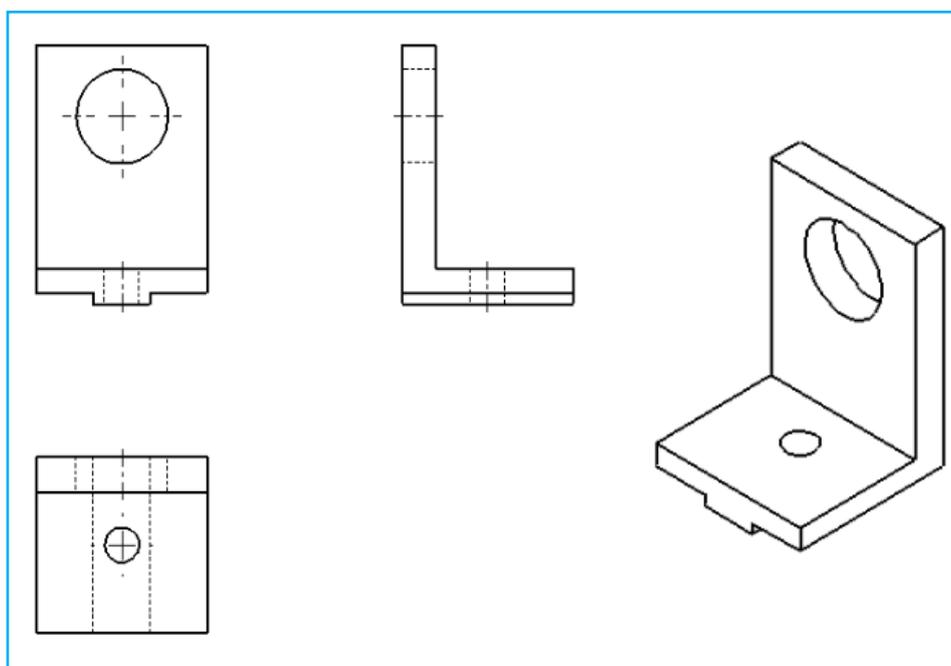
Il s'agit d'un exercice pour plus d'entraînement à la lecture du dessin technique.

1. Lire les 2 dessins suivants et en vérifier l'exactitude.

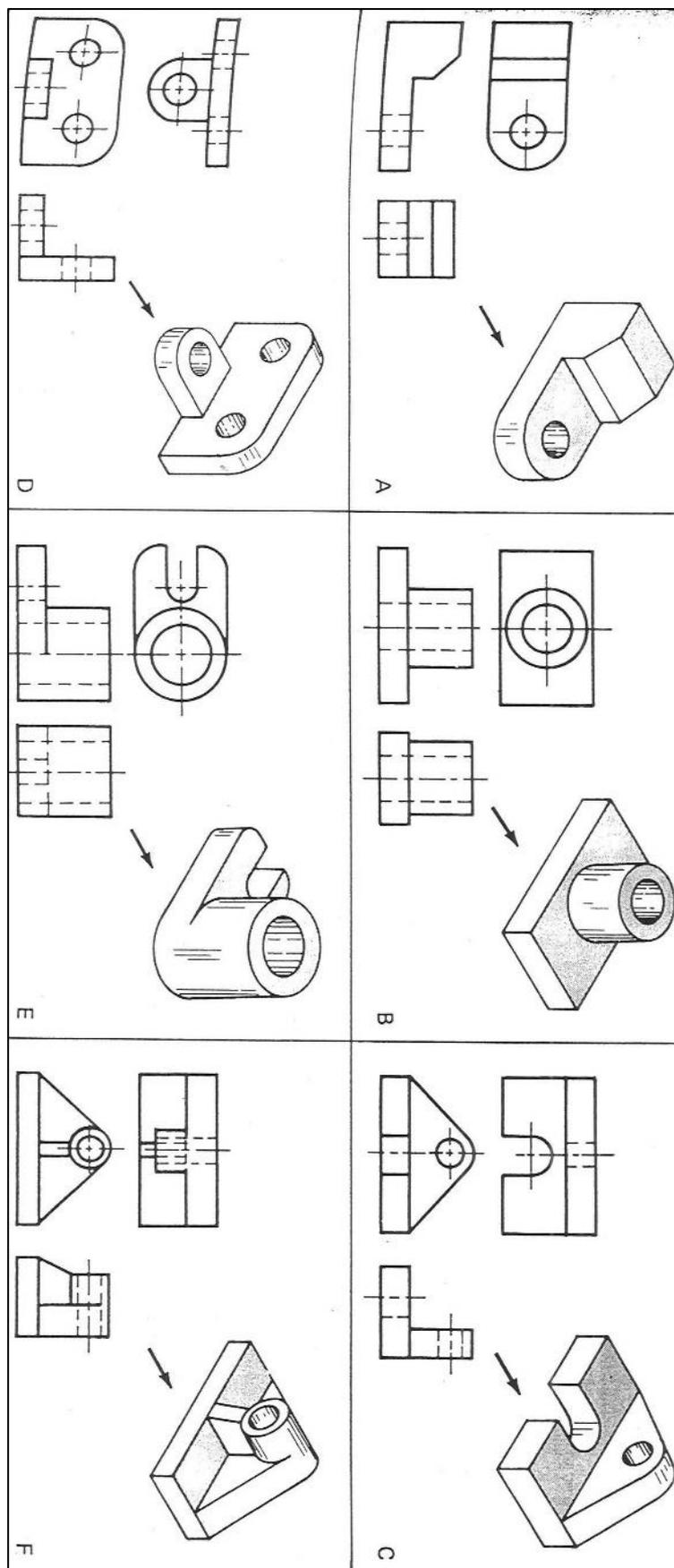
Piston de la pince Schrader
en projection américaine



Equerre



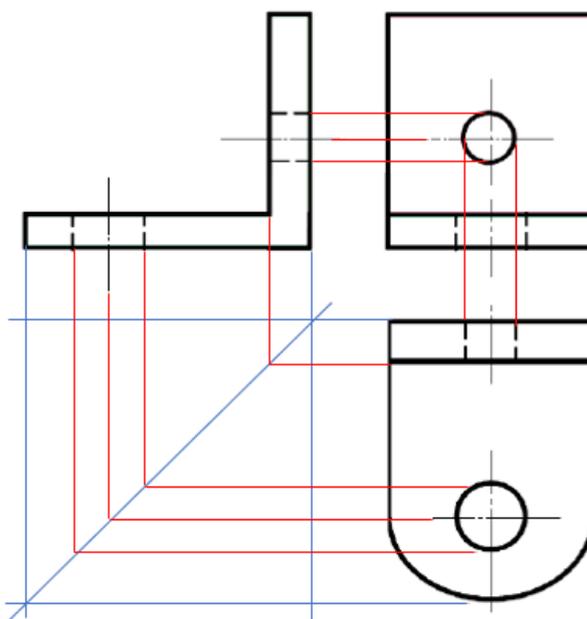
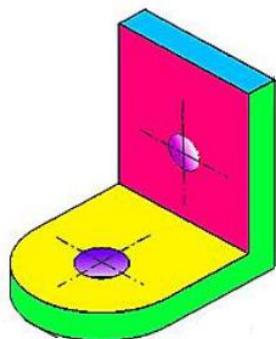
2. Lire les dessins du tableau suivant et en vérifier l'exactitude, en notant qu'on y utilise la **projection américaine** et qu'il faut utiliser la feuille en orientation « **Paysage** » pour une meilleure lecture.



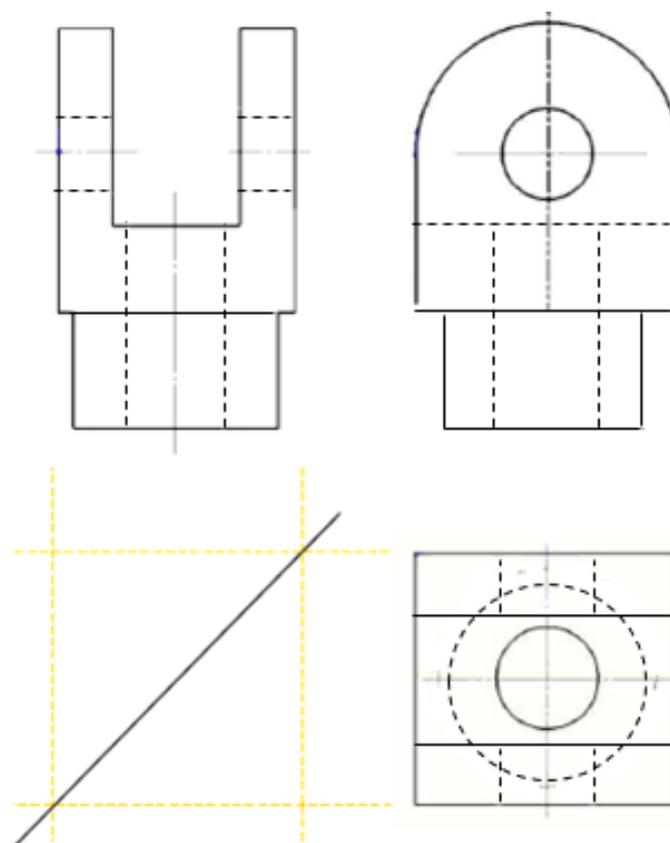
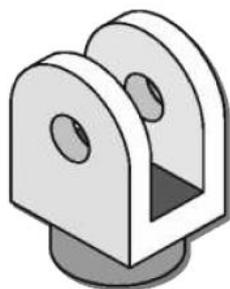


Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Equerre support de petit moteur

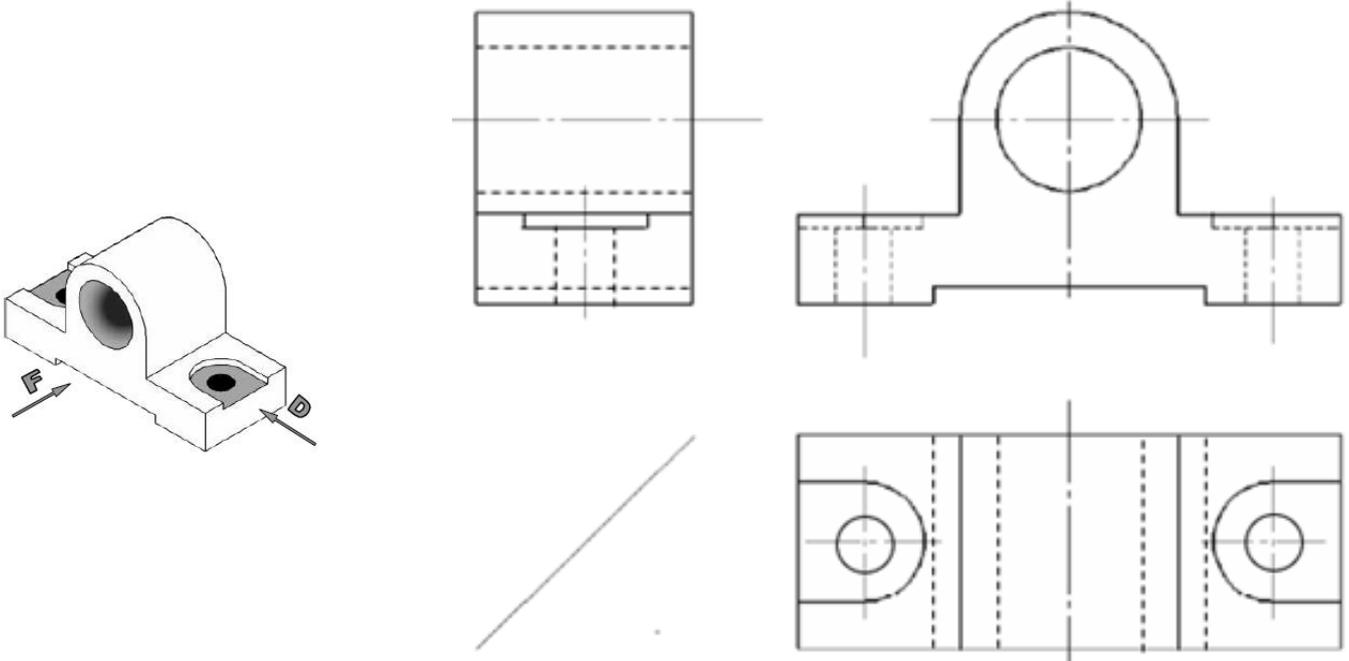


Exercice 2 : Chape pour articulation

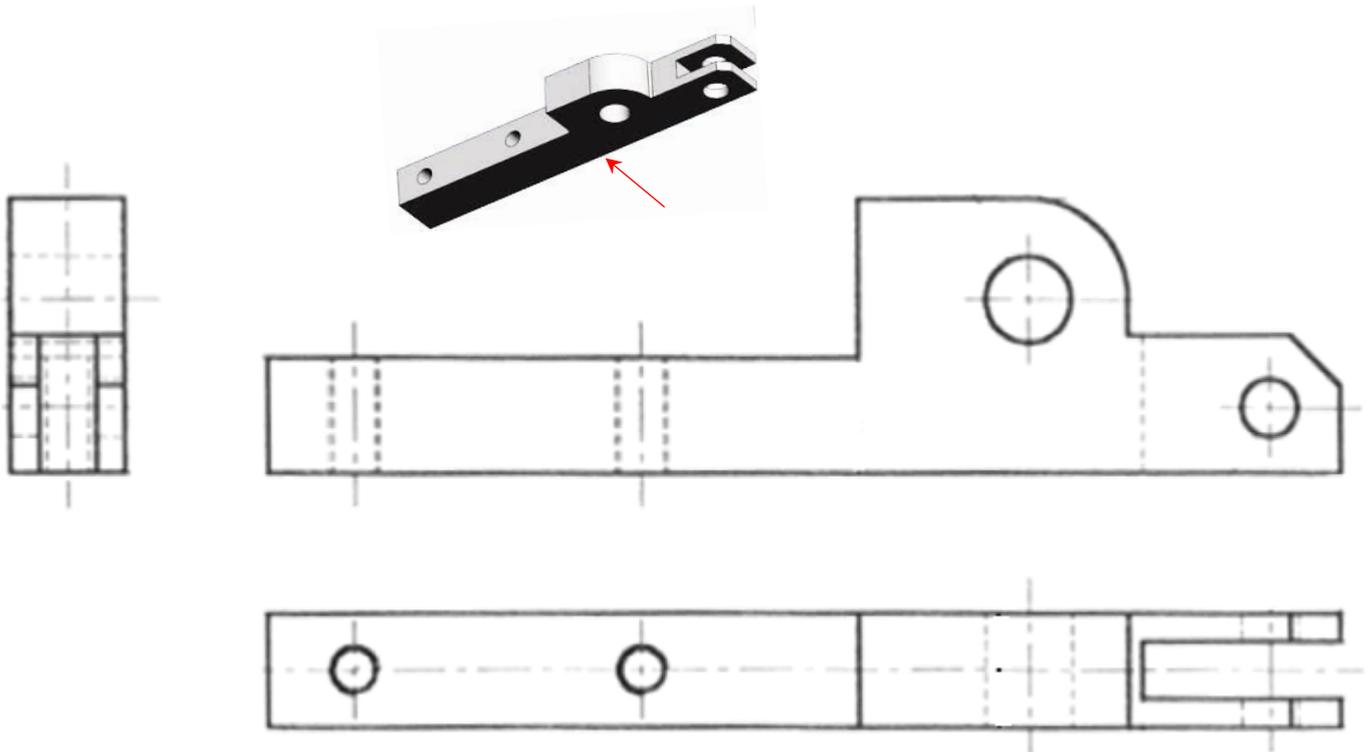




Exercice 3 : Palier à semelle



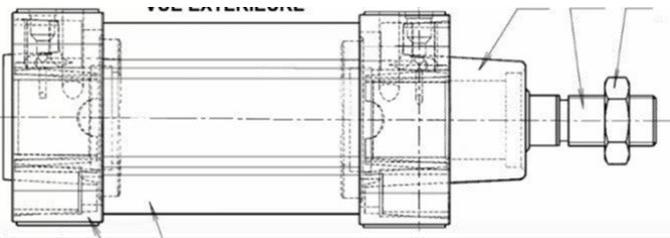
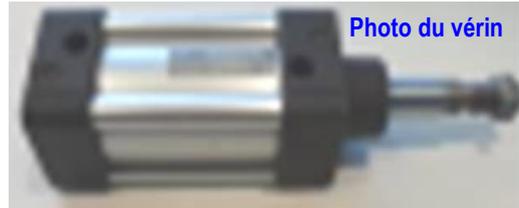
Exercice 4 : Doigt de la pince Schrader



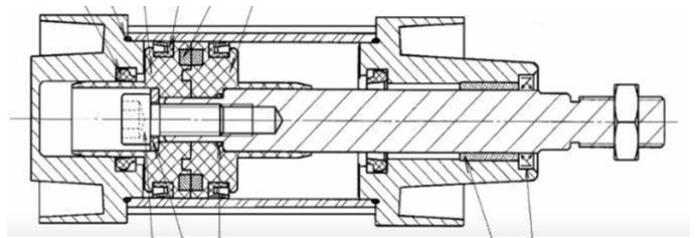
Les coupes

Principe

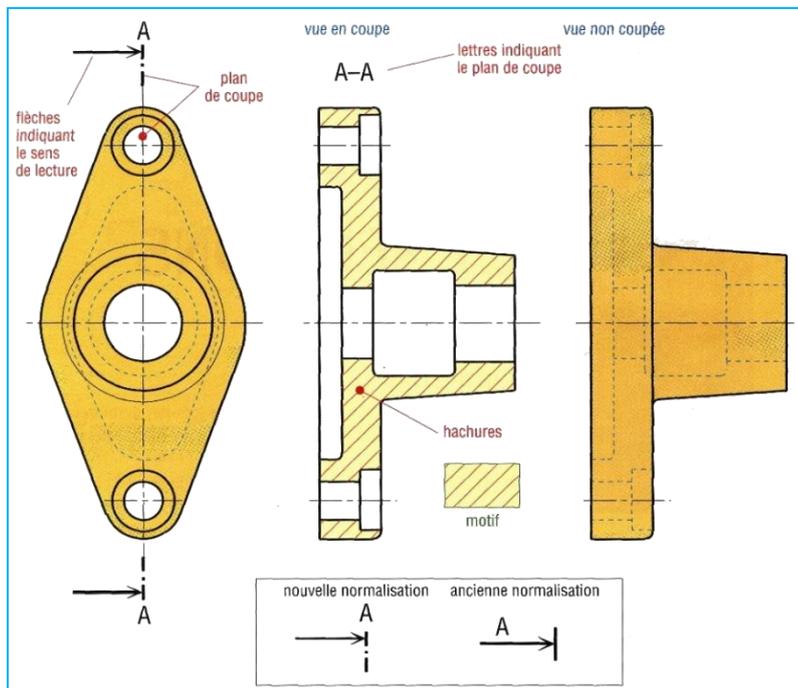
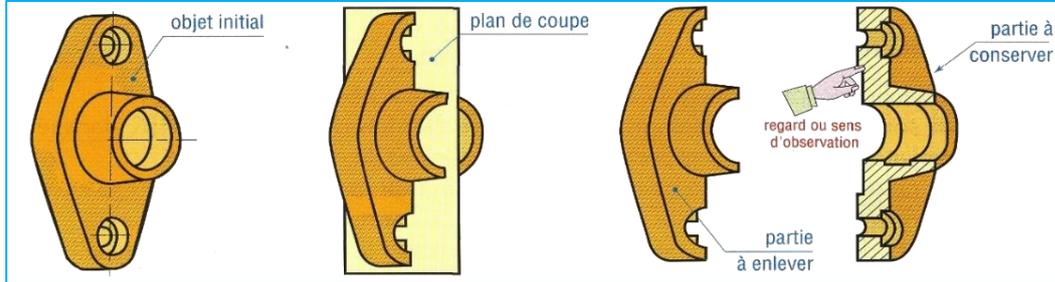
- Pour améliorer la lecture d'un dessin, on utilise des **vues en coupe** pour voir **l'intérieur** d'un système.
- En effet, si les formes intérieures (**cachées**) représentées par des traits interrompus deviennent nombreux, cela rend alors les tracés illisibles et l'identification des pièces et des formes très difficile.
- L'exemple du vérin pneumatique suivant illustre ces aspects de la représentation.



Vue extérieure : Vue de face, avec beaucoup de traits cachés, qui sont difficiles à décoder.

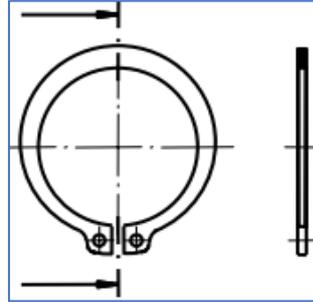


Vue en coupe : Vue de face en coupe, qui montre l'amélioration de la lecture du dessin, puisqu'on voit l'intérieur du vérin grâce à la coupe.



Hachures

- Les hachures sont des traits, généralement obliques, parallèles et équidistants, utilisés dans une coupe pour mettre en évidence les parties coupées ; les hachures apparaissent donc **là où la matière a été coupée**.
- Elles sont tracées en trait continu fin et sont de préférence inclinées avec 30° , 45° ou 60° par rapport aux lignes générales du contour ; elles sont à 45° dans le cas où un seul objet est coupé.
- Elles ne traversent pas ou ne coupent jamais un trait fort.
- Elles ne s'arrêtent jamais sur un trait interrompu court.
- Si l'épaisseur de la pièce est très faible, les surfaces coupées seront **noircies** ; c'est le cas, par exemple, d'un anneau élastique ou circlips :



On peut remarquer que la zone coupée de cette pièce est noircie au lieu d'être hachurée ; aussi les trous de manipulation du circlips ne sont pas représentés

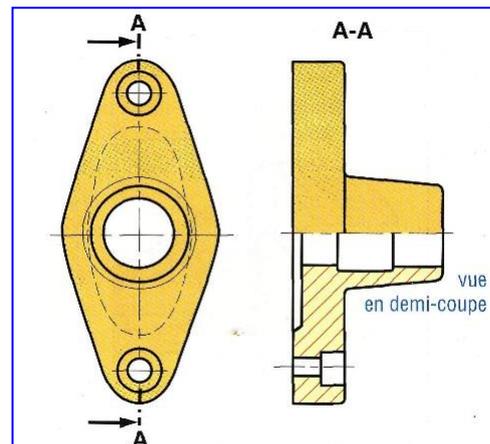
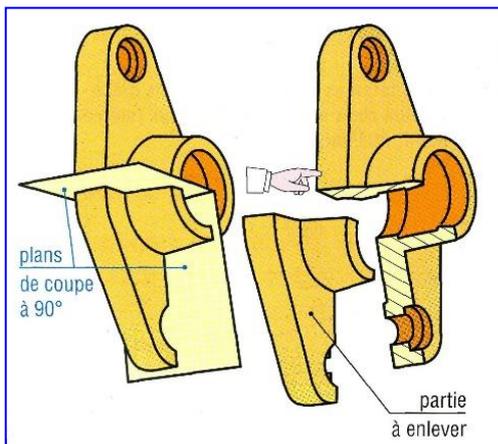
- Le **motif** des hachures ne précise pas la nature de la matière coupée. Cependant, en l'absence de nomenclature, les matériaux (ferreux, plastiques, alliages légers, etc.) peuvent être différenciés par les motifs d'emploi usuel.

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	

Règles

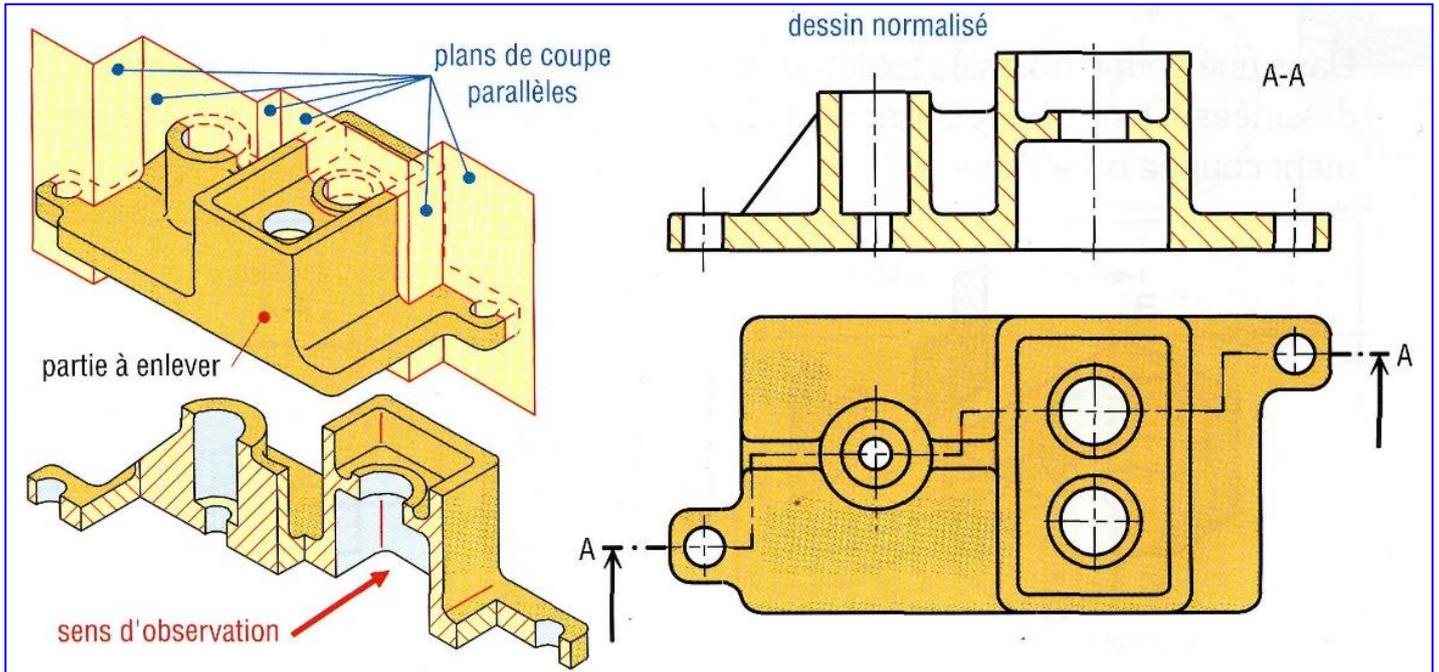
Demi-coupe

- Les vues en demi-coupe sont intéressantes dans le cas des pièces **symétriques**. Dans cette représentation, la moitié de la vue est dessinée en coupe, afin de définir les formes et les contours intérieurs, alors que l'autre moitié reste en mode de représentation normale pour décrire les formes et les contours extérieurs.



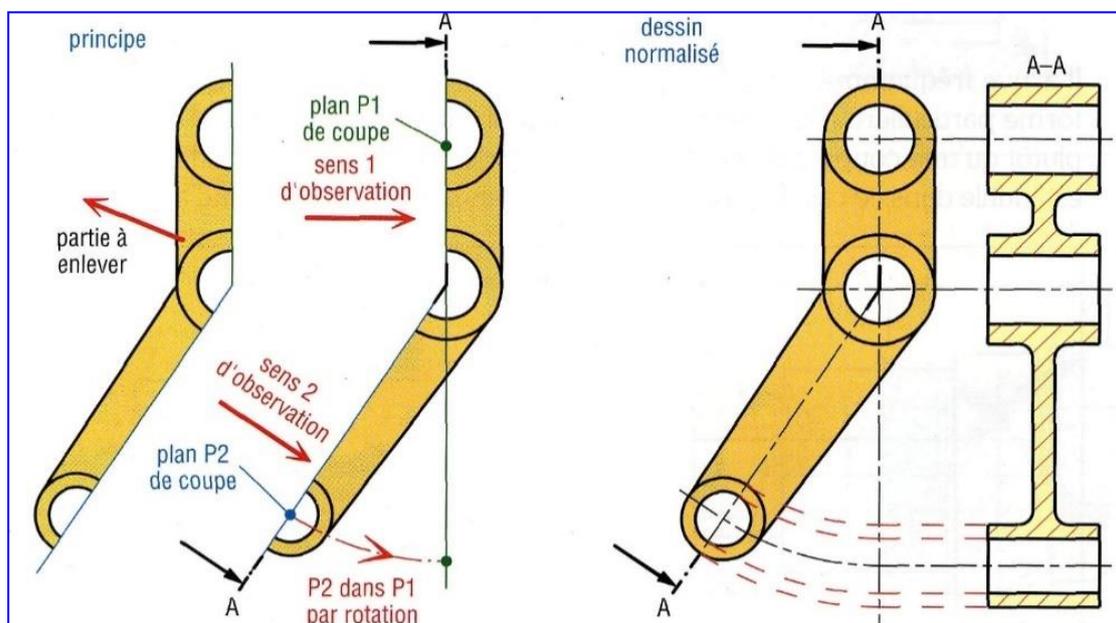
Coupe brisée à plans parallèles

- Cette coupe est fréquemment utilisée avec des objets présentant plusieurs détails intéressants **ne se trouvant pas sur le même plan** :
 - Elle présente l'avantage d'apporter, **dans une seule vue**, un grand nombre de renseignements et évite l'emploi de plusieurs coupes normales.
 - Le plan de coupe est construit à partir de plans de coupe classiques **parallèles entre eux**. La correspondance entre les vues est dans ce cas conservée.
 - Les **discontinuités** du plan de coupe ne sont pas dessinées.



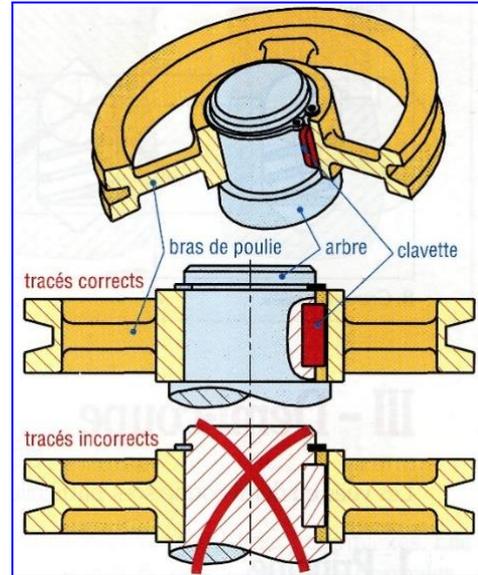
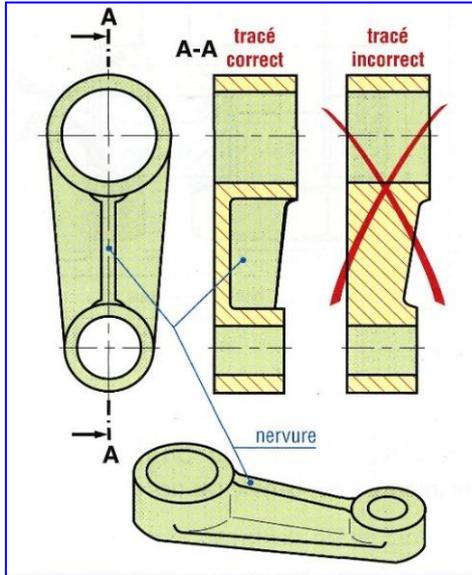
Coupe brisée à plans sécants

- Le plan de coupe est constitué de 2 plans sécants.
- La vue coupée est obtenue en ramenant dans un même plan les tronçons coupés par les plans de coupe successifs ; les parties coupées s'additionnent.
- Dans ce cas la correspondance entre les vues n'est que partiellement conservée.
- Les discontinuités du plan de coupe (arêtes ou angles) ne sont pas dessinées dans la vue coupée



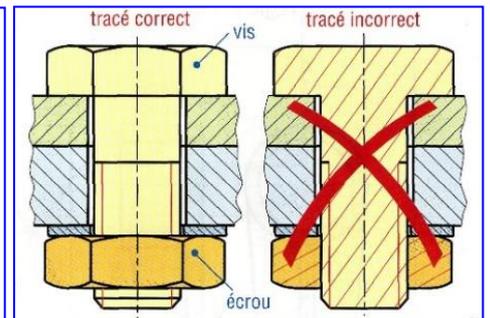
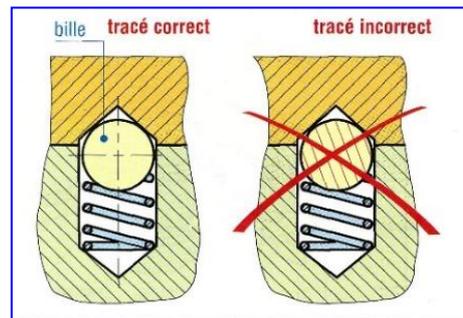
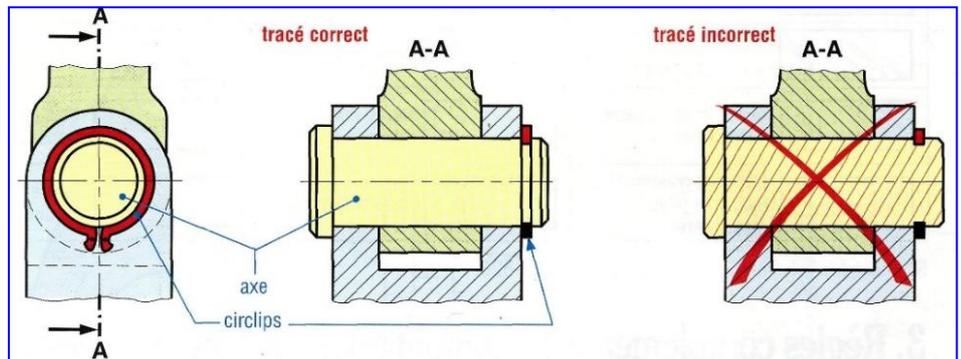
Nervures et bras de poulie ou volant

- Une nervure est un élément **saillant** reliant 2 parties d'une même pièce en vue de son **renforcement**.
- 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 et de volant ou de roue. Cela permet de différencier une pièce **massive** d'une pièce nervurée de même section.



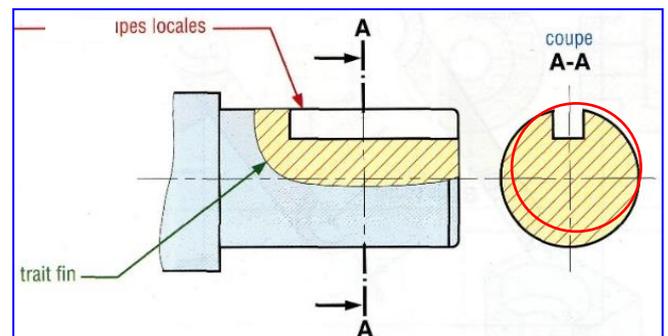
Éléments non coupés

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



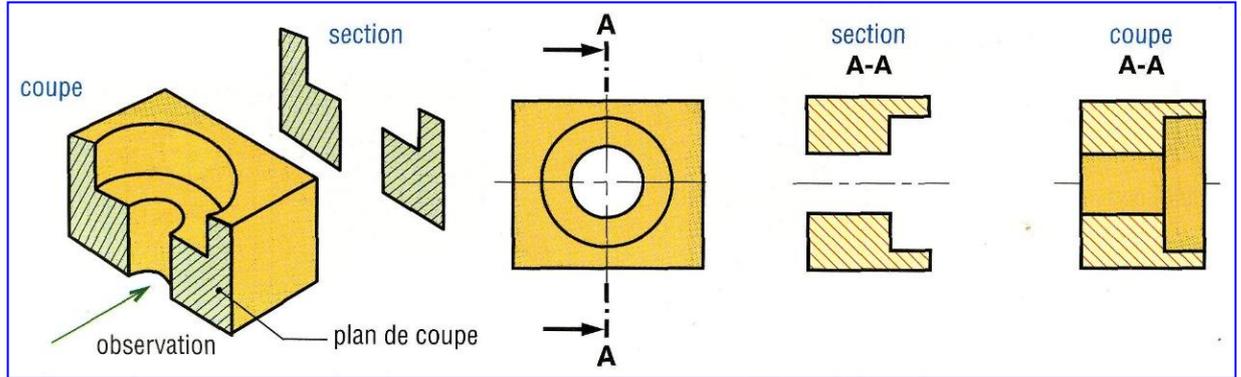
Coupe locale ou partielle

- 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

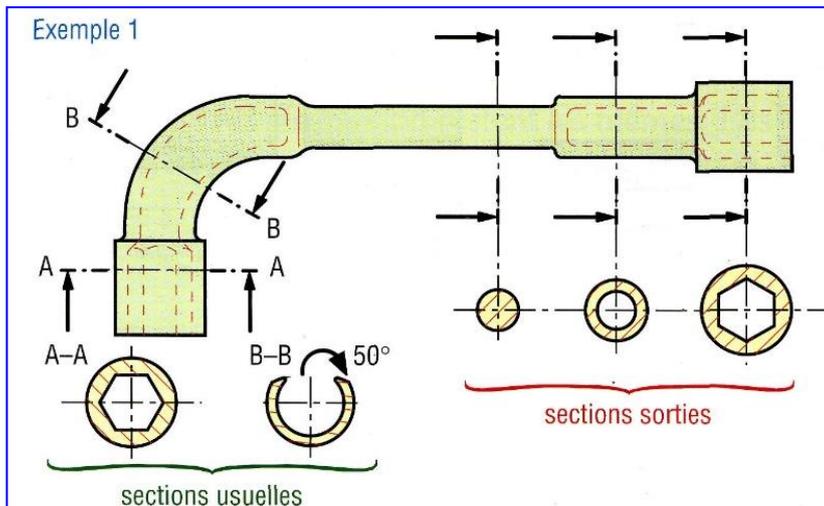
- Dans une section, **seule la partie coupée est dessinée** (là où la matière est réellement coupée ou sciée). Elles permettent de définir avec exactitude une forme en éliminant les tracés inutiles.



- On distingue **2 types de sections** : les sections de **sortie** et les sections **rabattues**.

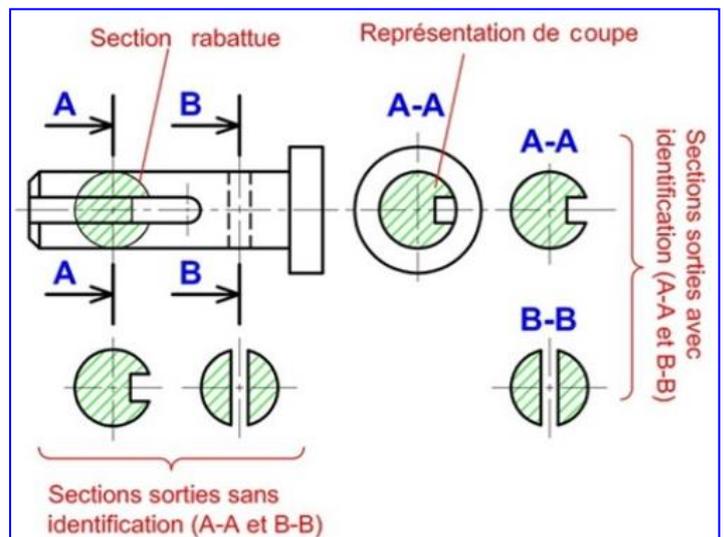
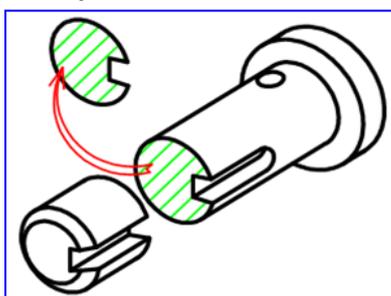
Section de sortie

- Les **contours** de cette section sont dessinés en **trait continu fort**. Elles peuvent être placées soit :
 - Près de la vue** et reliées à celle-ci au moyen d'un trait mixte fin (trait d'axe).
 - Dans une autre position** avec éléments d'identification (plan d'observation et lettres).



Section rabattue

- Les **contours** de cette section sont dessinés en **trait continu fin** directement **sur la vue choisie**. Les indications (plan de coupe, sens d'observation et désignation) sont en général inutiles. Pour plus de clarté, il est préférable aussi d'éliminer ou **gommer** les formes de l'objet vues sous la section.

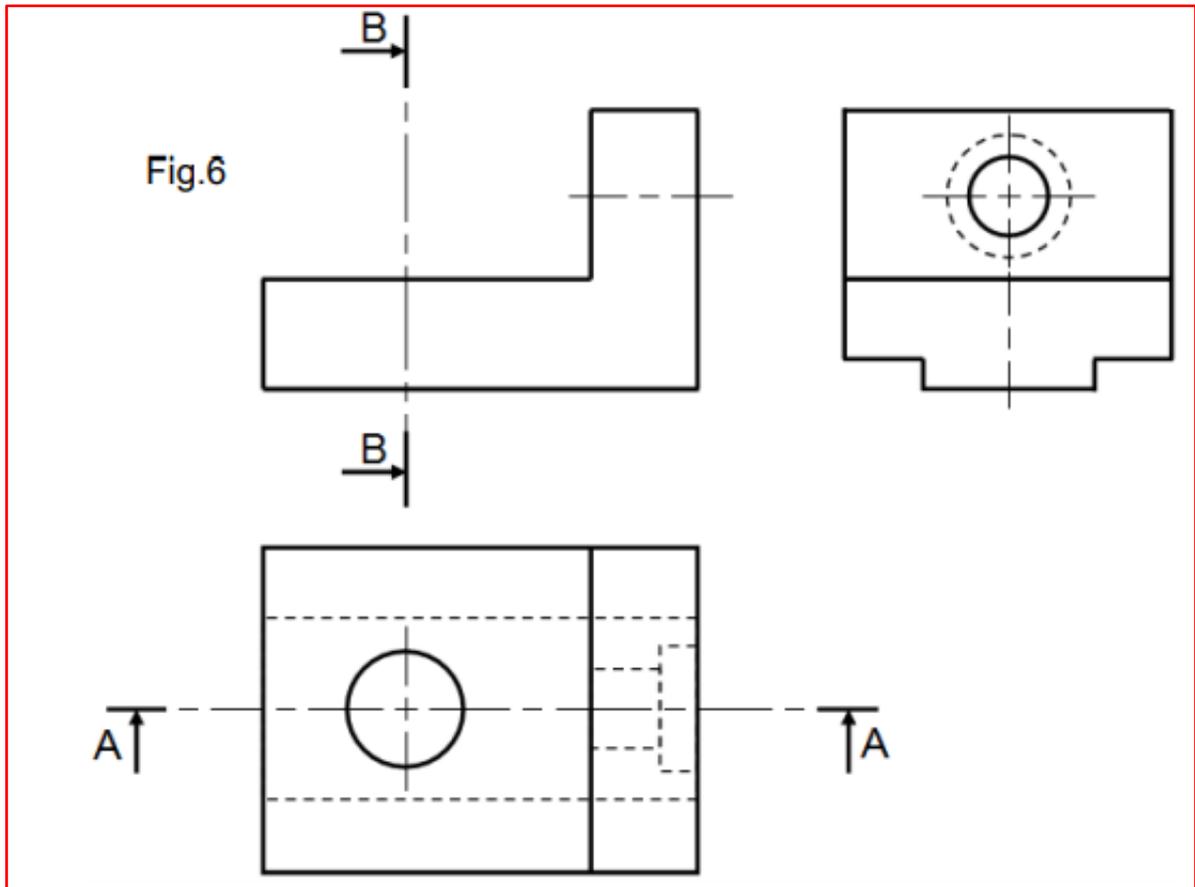
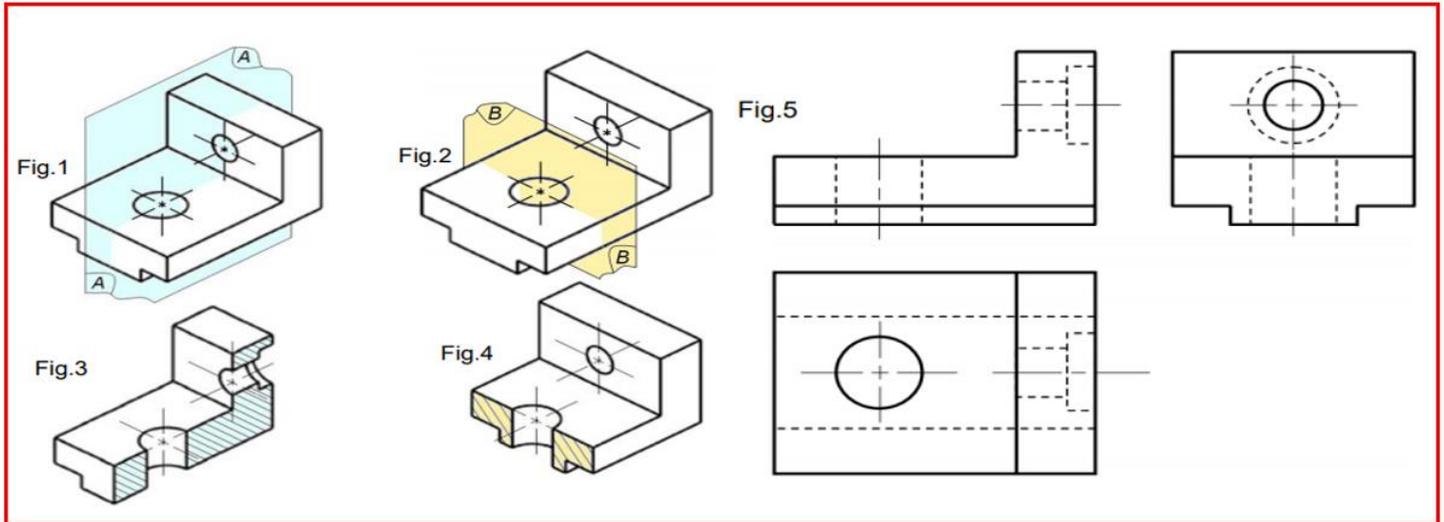




Exercices (Enoncés)

Exercice 1 : Equerre

Compléter le dessin de la figure 6 à partir des figures 1 à 5.

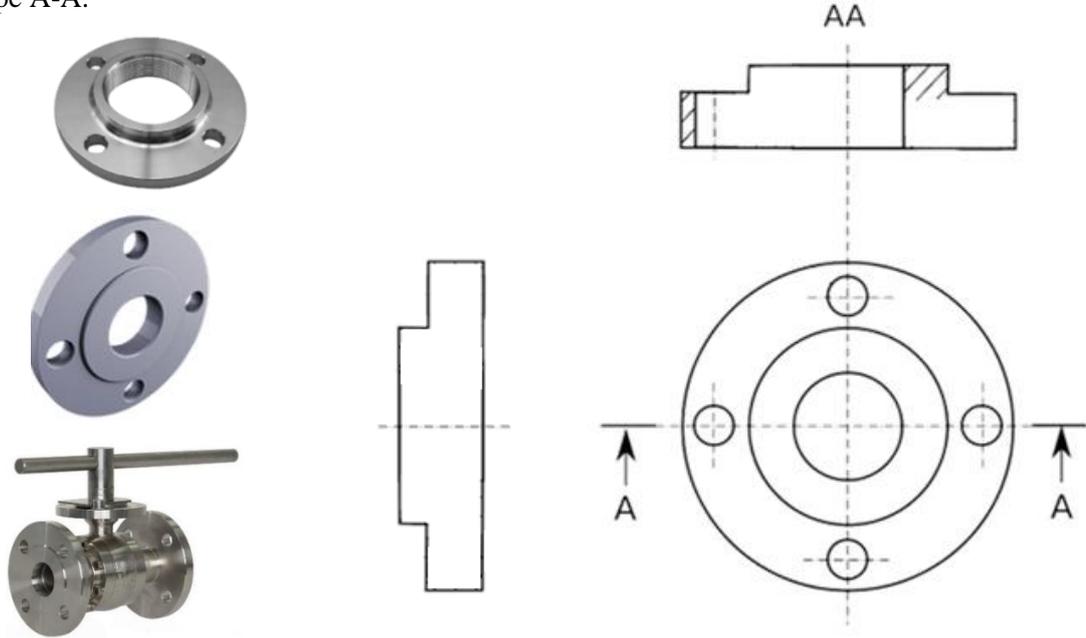




Exercice 2 : Bride de raccordement

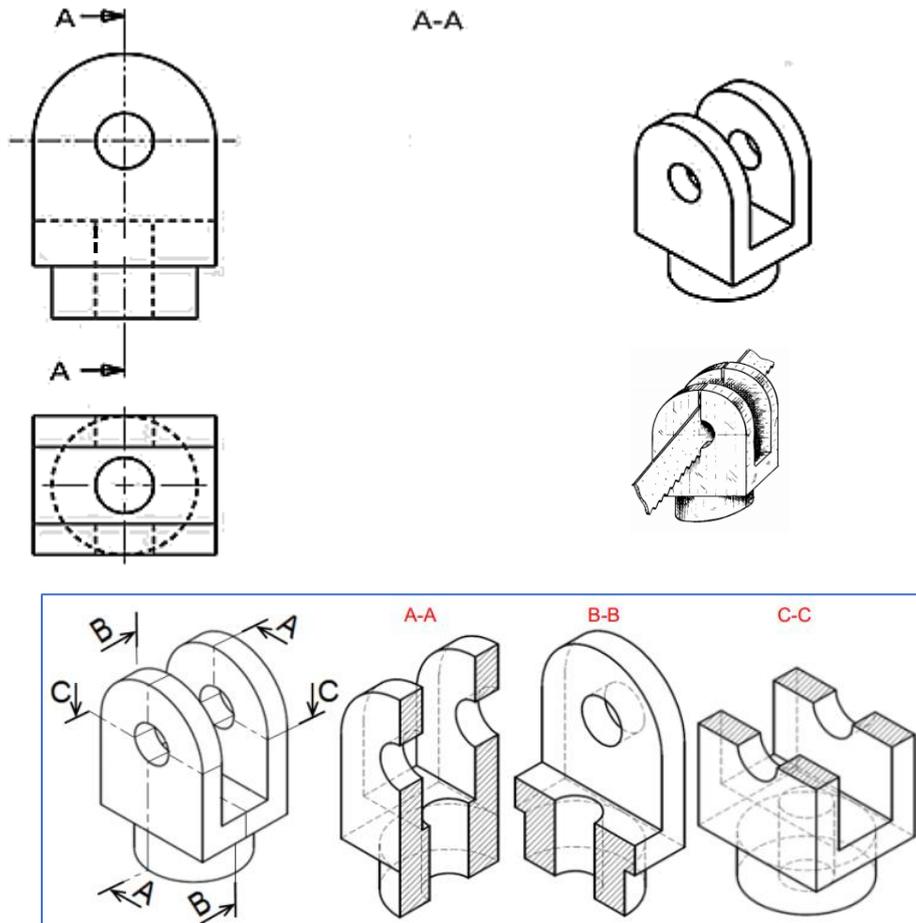
Les brides de raccordement permettent, par exemple la liaison étanche sur la robinetterie de process.

Compléter la coupe A-A.



Exercice 3 : Chape

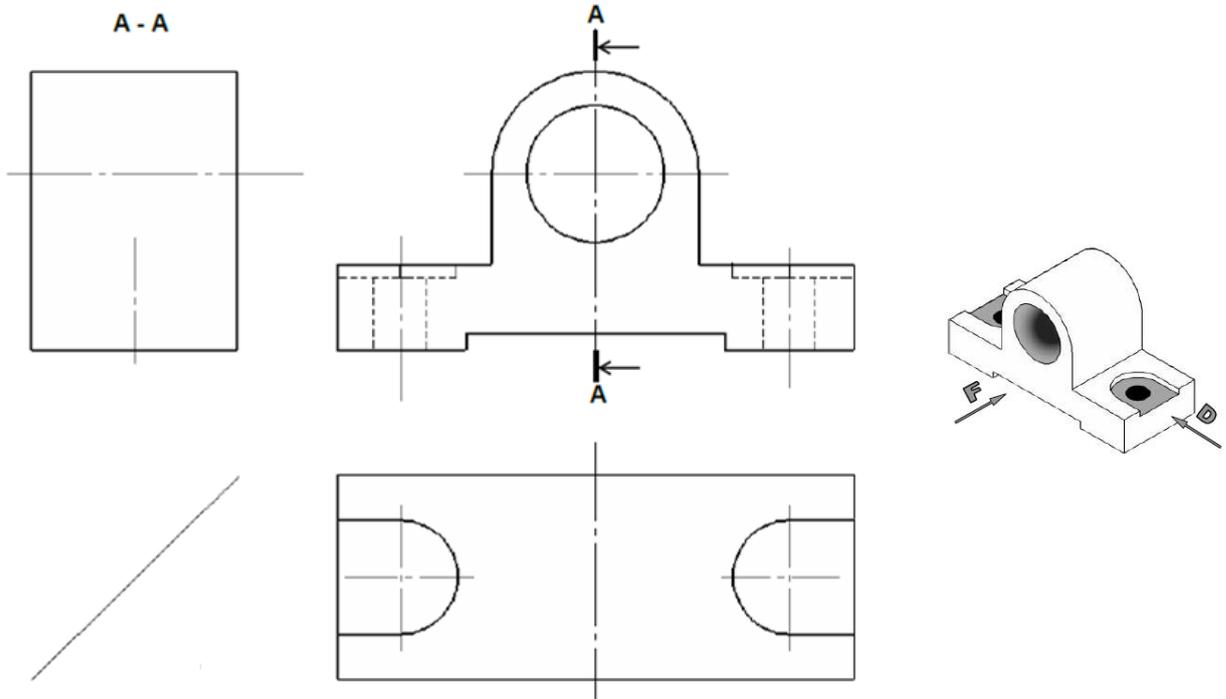
Compléter la coupe A-A en représentant aussi les traits cachés.





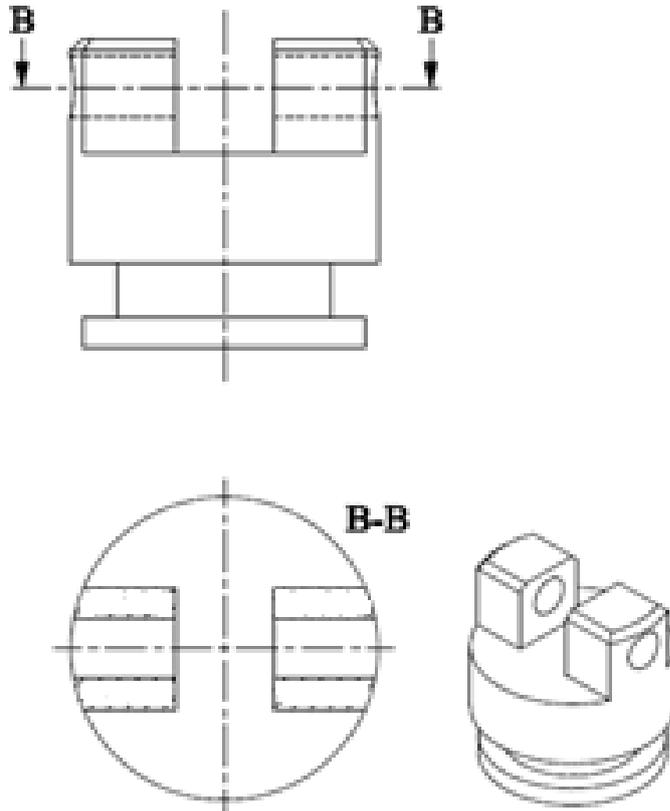
Exercice 4 : Palier

Compléter les 3 vues avec les arrêtes cachées.



Exercice 5 : Piston de pince

Compléter la coupe B-B en représentant aussi les traits cachés.

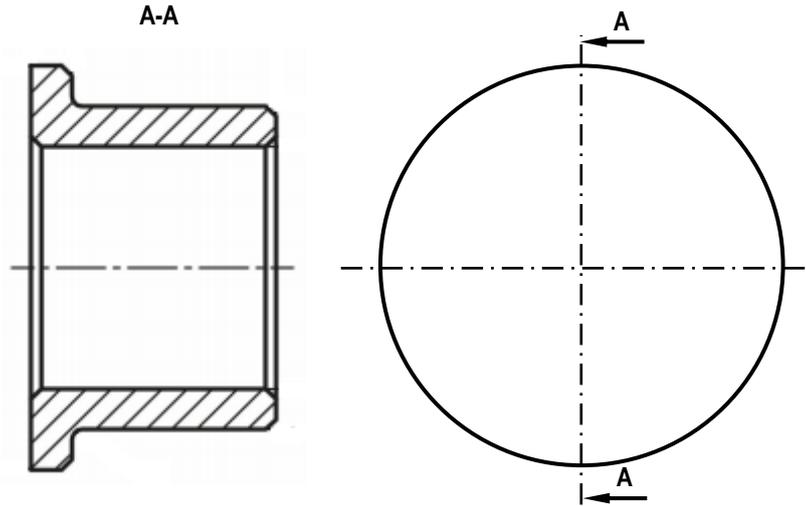
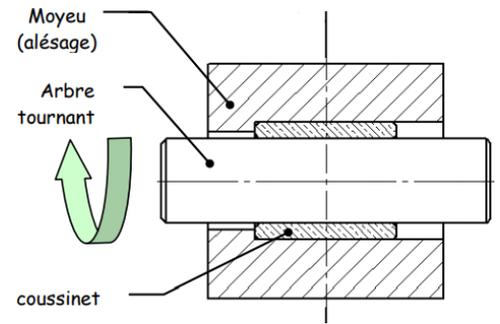




Exercice 6 : Bague de glissement

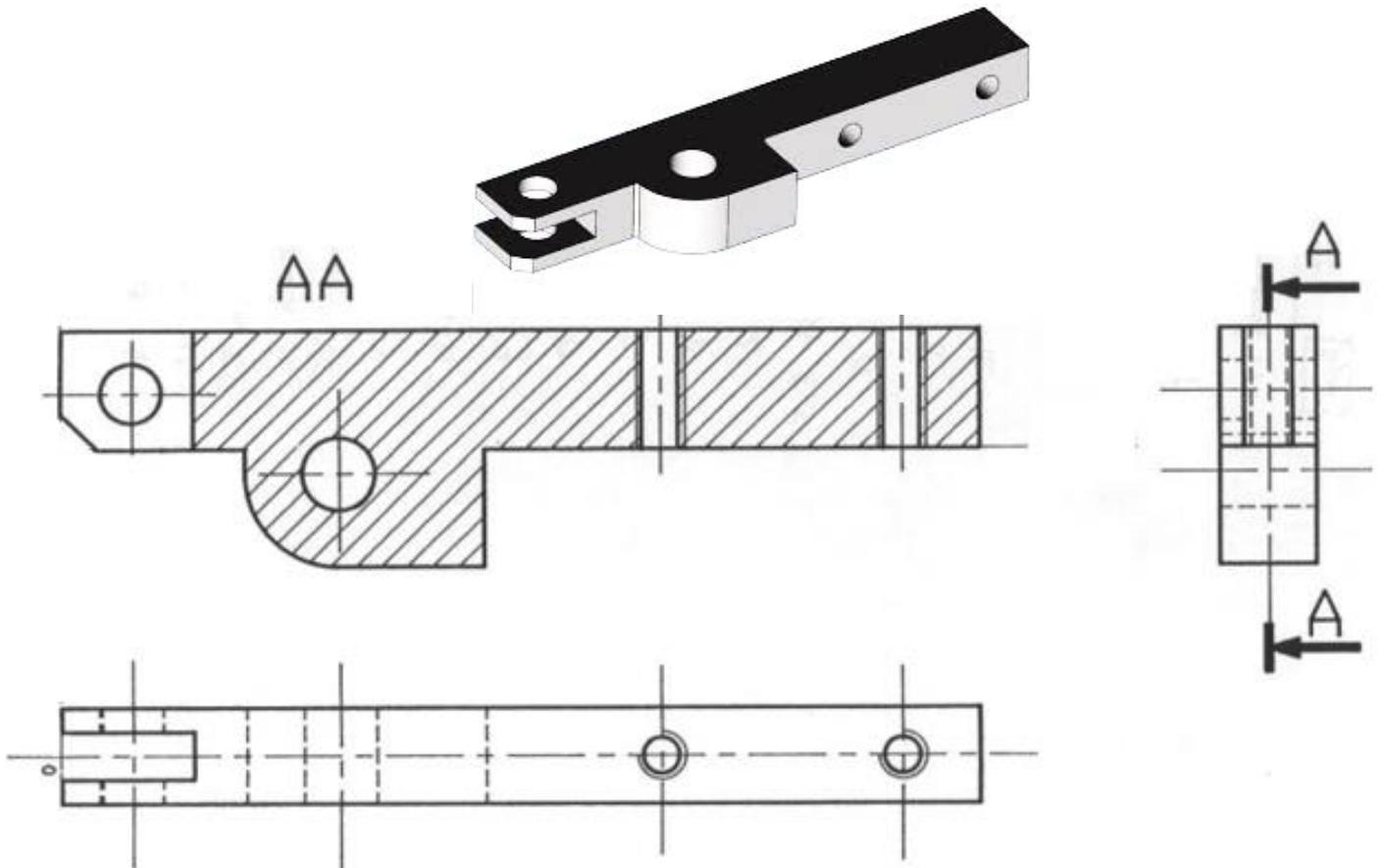
Une bague de glissement ou coussinet est une pièce cylindrique qui s'interpose entre un arbre et un alésage pour permettre une rotation avec moins de frottement (Chapitre 9).

La vue donnée étant la vue de face en coupe, compléter la vue de gauche.



Exercice 7 : Doigt de pince

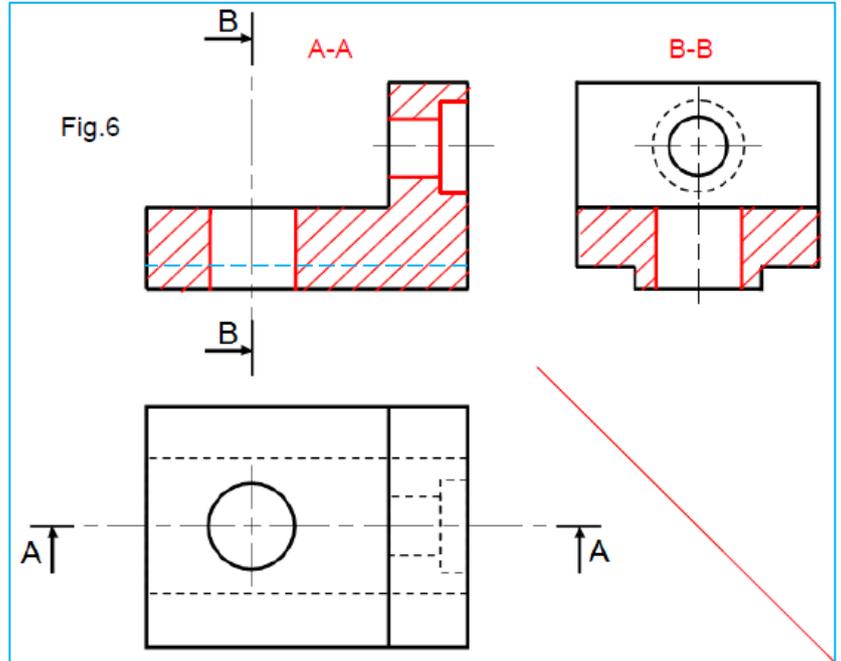
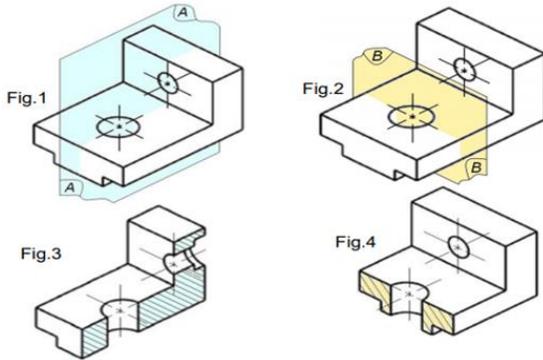
Lire le dessin de cette pièce et en vérifier l'exactitude.



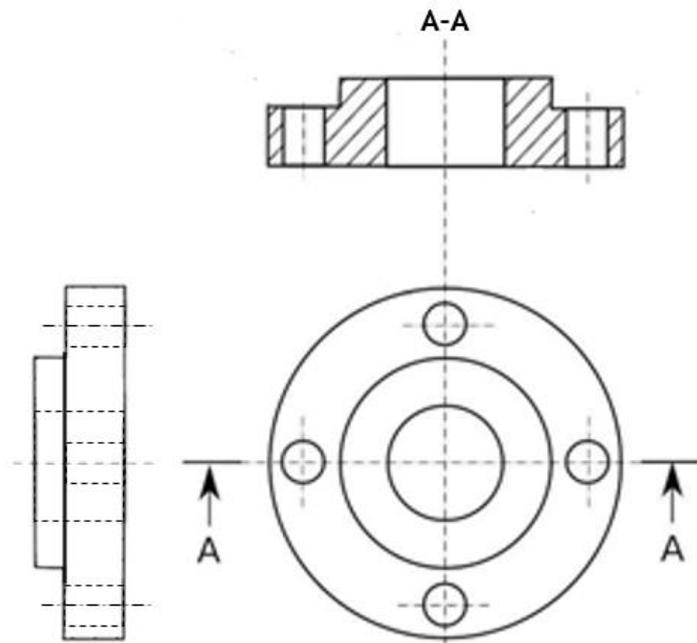


Exercices (Corrigés)

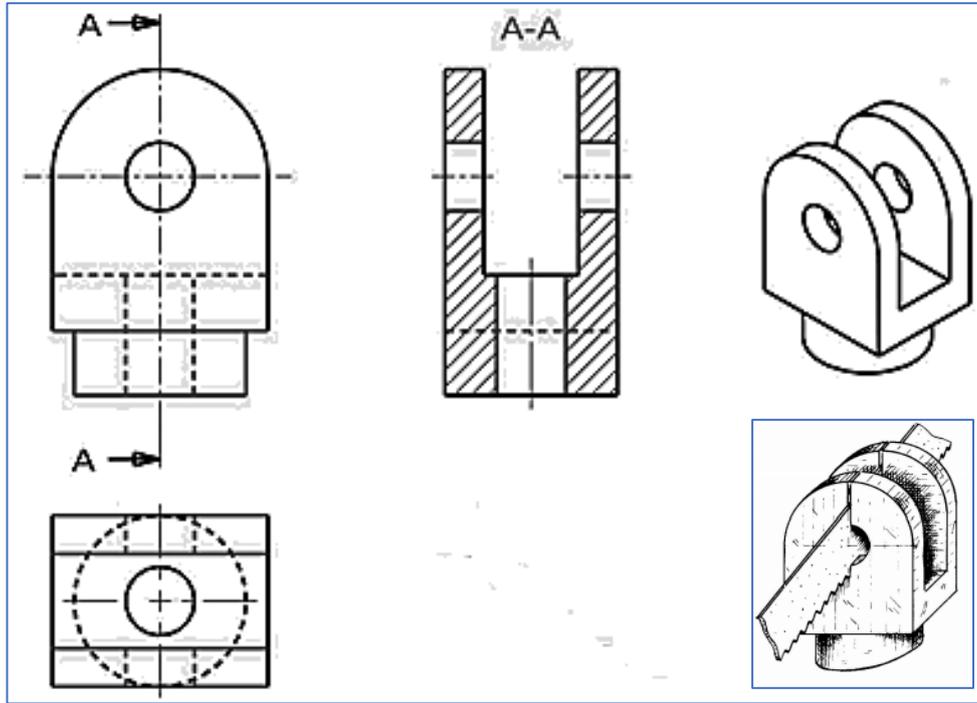
Exercice 1 : Equerre



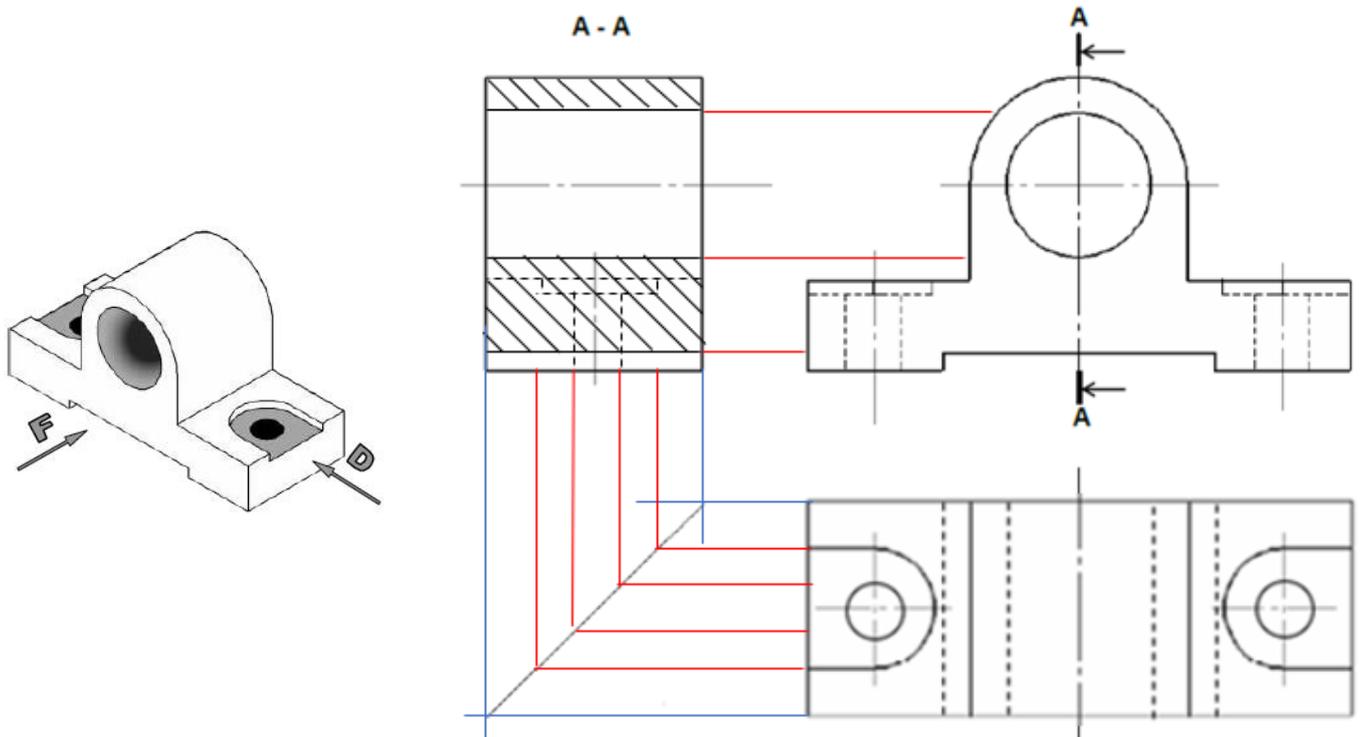
Exercice 2 : Bride de raccordement



Exercice 3 : Chape

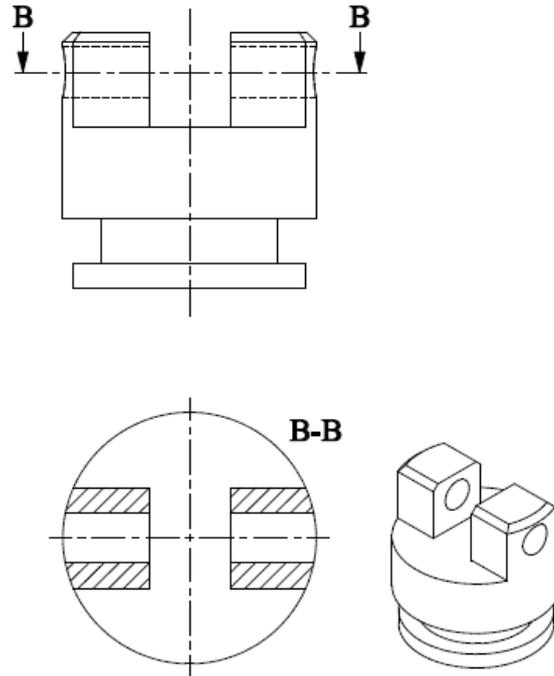


Exercice 4 : Palier

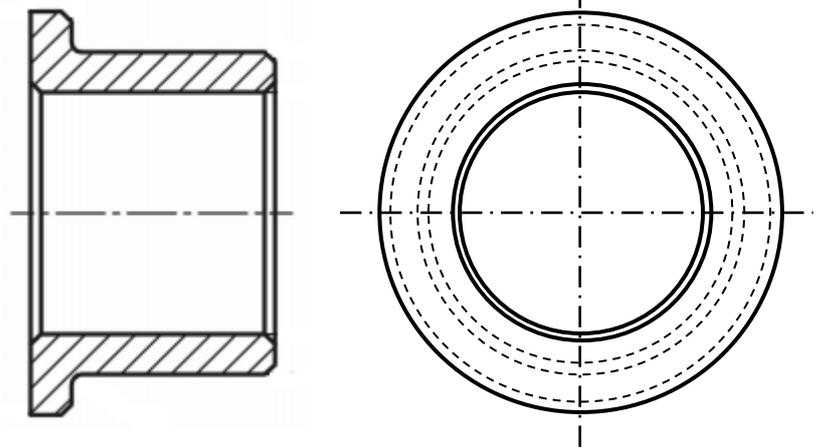




Exercice 5 : Piston de pince

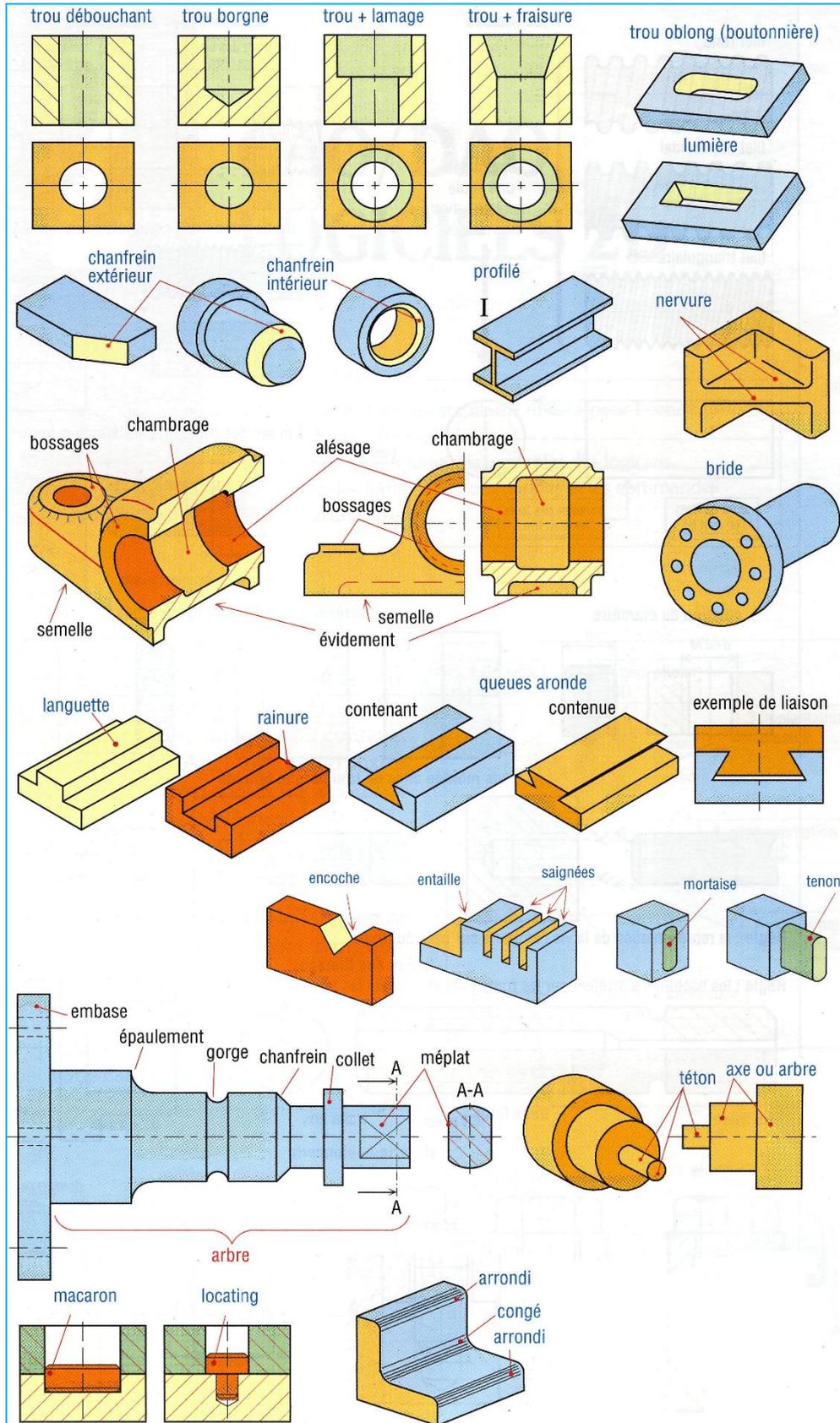


Exercice 6 : Bague de glissement



Les formes techniques

- Il s'agit d'un descriptif technique définissant certaines formes usuelles de pièces mécaniques avec le **vocabulaire courant**. La liste présentée n'est pas exhaustive, mais on y trouve les termes les plus utilisés, permettant de communiquer plus facilement :





Forme technique	Description	
Alésage	Contenant cylindrique ou prismatique.	
Arbre	Contenu cylindrique ou prismatique ; on note qu'un essieu est un arbre qui ne transmet pas de couple, mais supporte les éléments en rotation comme des roues par exemple.	
Arrondi	Surface à section circulaire partielle et destinée à supprimer une arête vive.	
Bossage	Saillie prévue sur une pièce afin de limiter la surface usinée.	
Bride	Généralement soudée en bout d'une canalisation, elle permet la jonction par boulonnage des tuyauteries.	
Chambrage	Evidement réalisé à l'intérieur d'un cylindre afin d'en réduire la portée (poids).	
Chanfrein	Petite surface obtenue par suppression d'une arête vive.	
Collet	Couronne en saillie sur une pièce cylindrique.	
Congé	Surface à section circulaire partielle destinée à raccorder 2 surfaces formant un angle rentrant.	
Embase	Elément d'une pièce destiné à servir de base à une autre pièce.	
Encoche	Petite entaille.	
Entaille	Enlèvement d'une partie d'une pièce par usinage.	
Epaulement	Changement brusque de la section afin d'obtenir une surface d'appui.	
Evidement	Vide prévu dans une pièce pour en diminuer le poids ou pour réduire une surface d'appui.	
Fraisure	Logement conique fait à l'orifice d'un trou.	
Gorge	Dégagement (évidement) étroit généralement arrondi à sa partie inférieure.	
Lamage	Logement cylindrique généralement destiné à obtenir une surface d'appui et noyer un élément de pièce.	
Languette	Tenon d'une grande longueur destiné à rentrer dans une rainure et assurer en général une liaison glissière.	
Lacating	Mot anglais utilisé pour nommer une pièce positionnant une autre pièce	
Lumière	Nom de divers petits orifices.	
Macaron	Cylindre de diamètre relativement grand par rapport à sa hauteur, assurant en général un centrage.	
Méplat	Surface plane sur une pièce à section circulaire.	
Mortaise	Evidement effectué dans une pièce et recevant le tenon d'une autre pièce pour réaliser un assemblage.	
Nervure	Partie saillante d'une pièce destinée à en augmenter la résistance ou la rigidité.	
Profilé	Métal laminé suivant une section constant.	
Queue d'aronde	Tenon en forme de trapèze pénétrant dans une rainure de même forme et assurant une liaison glissière.	
Rainure	Entaille longue pratiquée dans une pièce pour recevoir une languette ou un tenon ou une clavette	
Saignée	Entaille profonde et de faible largeur.	
Semelle	Surface d'une pièce généralement plane et servant d'appui.	
Tenon	Partie d'une pièce faisant saillie et se logeant dans une rainure ou une mortaise.	
Téton	Petite saillie de forme cylindrique.	
Trou débouchant	Un trou qui traverse complètement une pièce.	
Trou borgne	Un trou qui ne perce pas complètement un objet et s'arrête dans la matière.	
Trou oblong	Un trou qui est la combinaison d'une lumière rectangulaire et de 2 demi-cylindres (Boutonnière).	
Autres termes	Les termes suivants ne représentent pas des formes techniques, mais un vocabulaire couramment utilisé pour certains types de pièces mécaniques ; dans ce qui suit, on en donne quelques exemples :	
	Bâti	Assemblage de pièces constituant le support d'une machine, sur lequel il est bâti ; cinématiquement, il est relativement fixe et sert de solide de référence.
	Bague	Pièce annulaire assurant entre autres la fixation, le serrage, l'étanchéité, d'éléments de révolution.
	Butée	En général, pièce destinée à limiter le mouvement d'un autre organe en lui faisant obstacle.
	Carter	C'est une enveloppe protégeant de l'extérieur un système mécanique, qui est souvent étanche.
	Cloche	Pièce mécanique qui a la forme d'une cloche.
	Couronne	Elle désigne une roue à denture intérieure ; mais, elle désigne aussi toute pièce en forme circulaire.
	Disque	Objet plat et de forme circulaire et mince.
	Flasque	Une pièce, qui sert à clore un contenant comme un carter ; c'est aussi un couvercle, boîtier et bouchon.
	Entretoise	Pièce placée entre 2 éléments pour en accroître la résistance et maintenir un écartement constant.
	Palier	C'est ce qui est utilisé pour supporter et guider, en rotation, des arbres de transmission.
Plateau	Pièce circulaire, plate, généralement rotative, d'une machine.	



Bâti



Bague



Carter



Cloche



Disque



Flasque



Entretoise



Palier

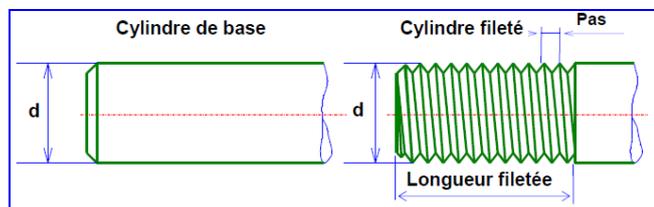
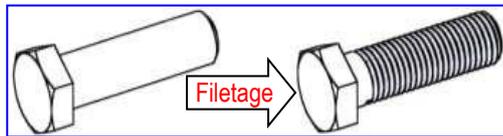


Plateau

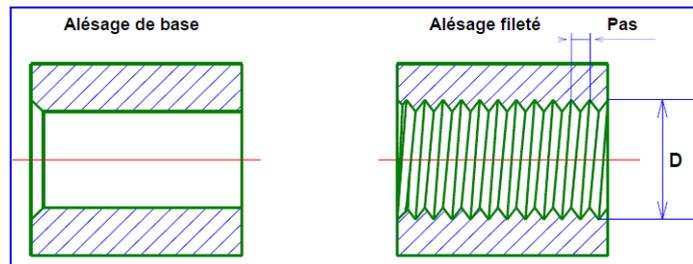
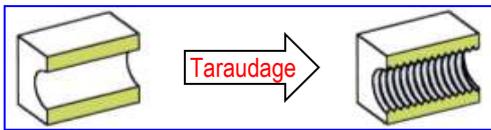
Filetage et taraudage

Définitions

- Les pièces filetées occupent une place importante dans les systèmes mécaniques. Ces éléments **filetés** sont utilisés pour assembler plusieurs pièces par pression.
- Un filetage est obtenu à partir d'un **arbre** ou d'un **alésage** sur lequel ont été réalisées une ou plusieurs **rainures hélicoïdales**. La partie pleine restante est appelée « **filet** ». Ainsi, on distingue :
- Le filetage extérieur** : On dit qu'une tige est « **filetée** » et on l'appelle généralement « **vis** ».

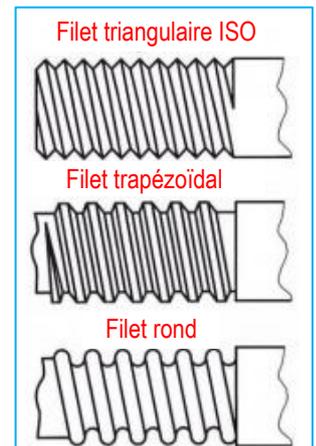
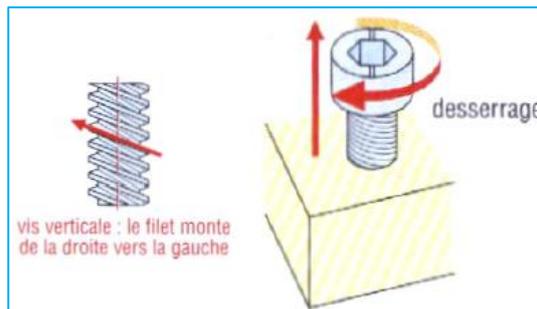
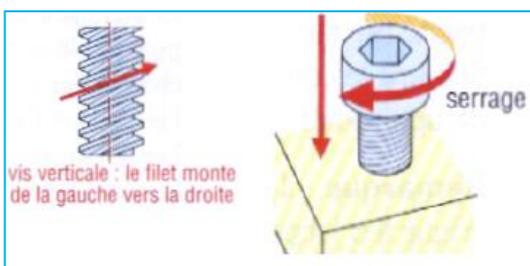


- Le filetage intérieur** : On dit qu'un trou est « **taraudé** » et on l'appelle généralement « **écrou** ».



- On note :

- « **d** » est appelé le diamètre nominal de la vis. Il correspond au diamètre du sommet des filets.
- « **D** » est appelé le diamètre nominal de l'écrou. Il correspond au diamètre de **fond de filets**.
- « **Pas** » est la distance entre 2 filets.
- Pour avoir un montage correct, il faut : **d = D** et le **même Pas** pour la vis et l'écrou.
- Il y a plusieurs types de filet (triangulaire ou ISO, trapézoïdale, rond, etc.). Le « **filetage ISO** » normalisé de symbole **M** est le plus courant (M provient de **métrique**).
- Par exemple, un écrou M10 est de diamètre nominal $D = 10$ et possédant un filetage ISO. Il se montera sur une vis de $d = 10$, de même type de filetage et de même pas.
- Il y a 2 sens de l'hélice : droite et gauche. Le filetage à droite est le plus répandu.

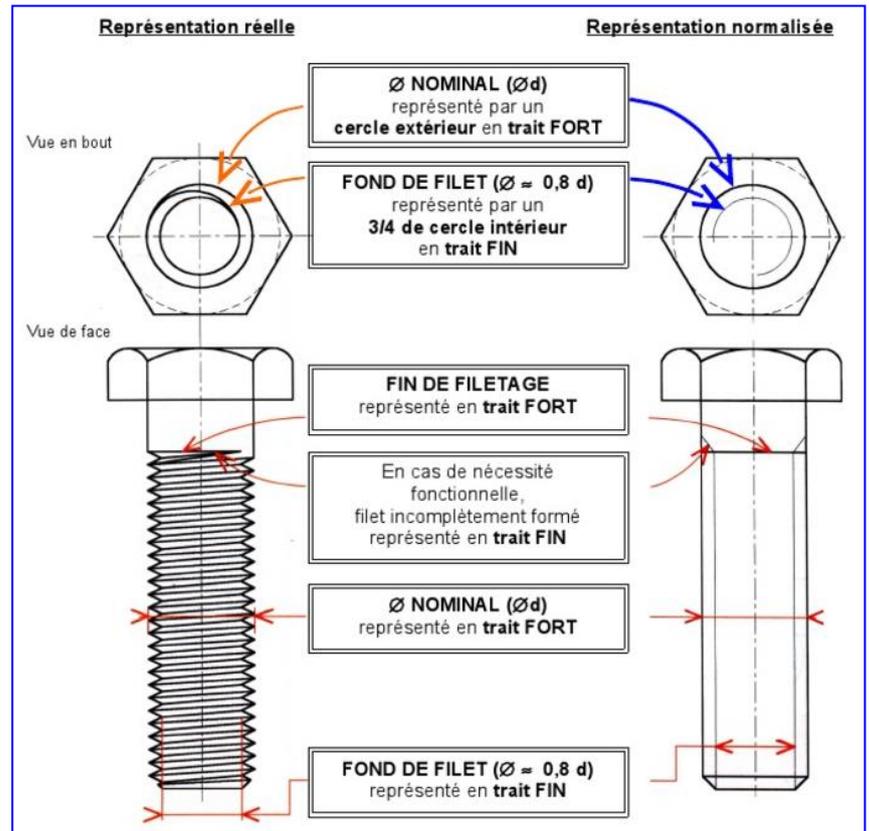




Représentation

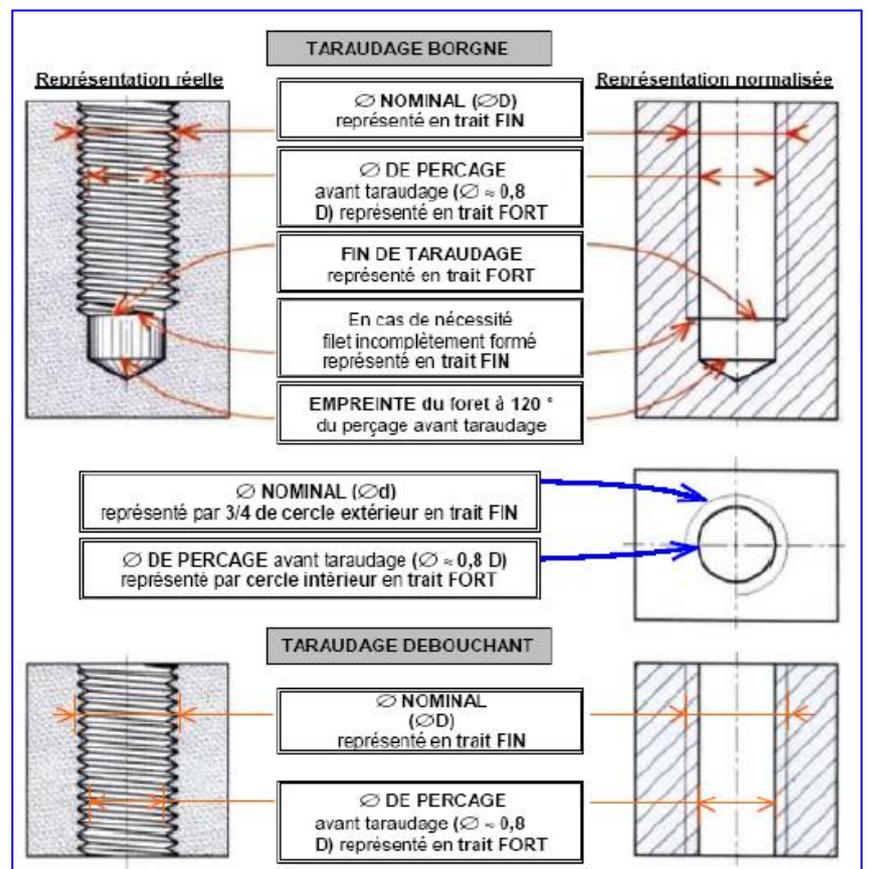
Filetage

- Le filetage : Une tige « fileté » s'appelle généralement « vis ».



Taraudage

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



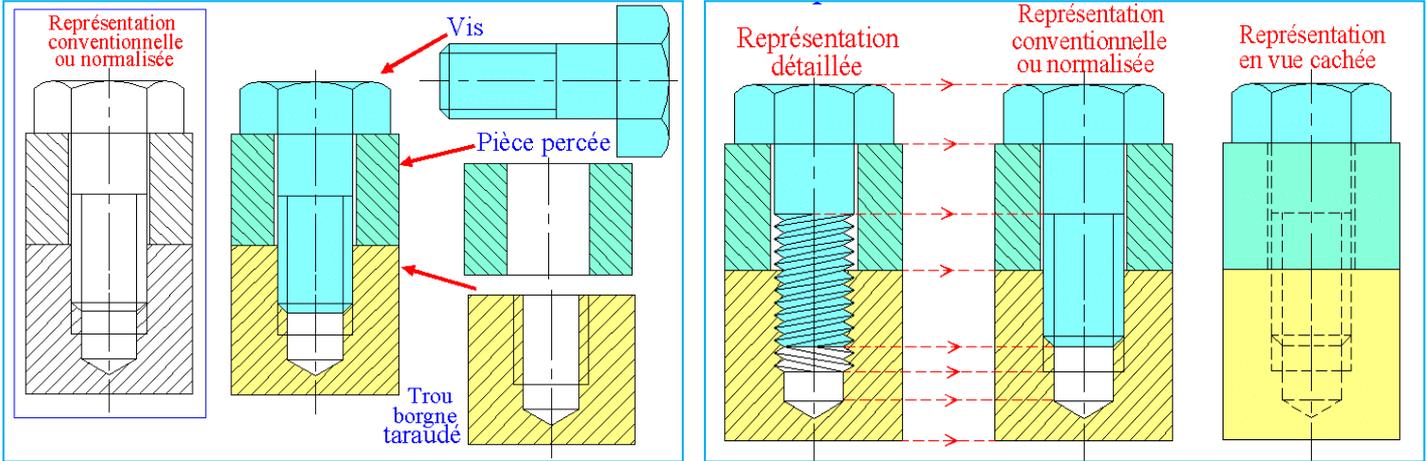


Assemblage de pièces filetées

- Lorsqu'on assemble les pièces filetées, les filetages se conjuguent avec les taraudages, ce qui fait alors superposer un trait fort à un trait fin. Pour éviter cela, on applique la règle suivante : **Les filetages sont toujours prioritaires par rapport aux taraudages.**

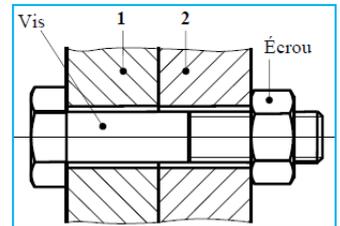
Assemblage par vis

- La pièce jaune seule possède un trou taraudé recevant la partie filetée de la vis. La pièce verte possède un **trou lisse**. L'effort de serrage nécessaire à la liaison est exercé par la tête de la vis, qui est souvent appuyée par une rondelle.



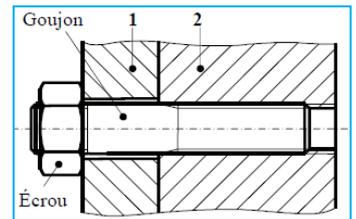
Assemblage par boulon

- Un **boulon** = Ensemble vis/écrou.
- Toutes les pièces à assembler possèdent un trou lisse et pas de taraudage, ce qui est un avantage. Le trou taraudé se trouve dans l'écrou.



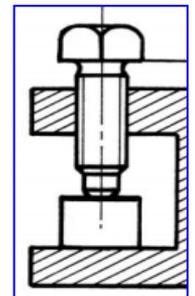
Assemblage par goujon

- Un **goujon** est composé d'une tige, filetée à ses 2 extrémités séparées par une partie lisse. Le goujon est implanté dans la pièce (2) possédant un trou taraudé. L'effort de serrage nécessaire à la liaison est réalisé par l'écrou.
- L'emploi d'un goujon se justifie, quand on doit monter ou démonter fréquemment la pièce 1, alors que la pièce 2 est en métal tendre, par exemple la culasse d'un moteur thermique en Aluminium.



Assemblage par vis de pression

- L'effort de serrage nécessaire à la liaison est exercé par l'extrémité de la vis.

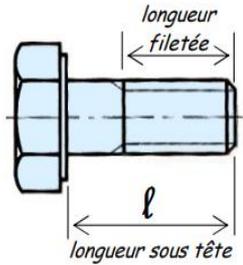




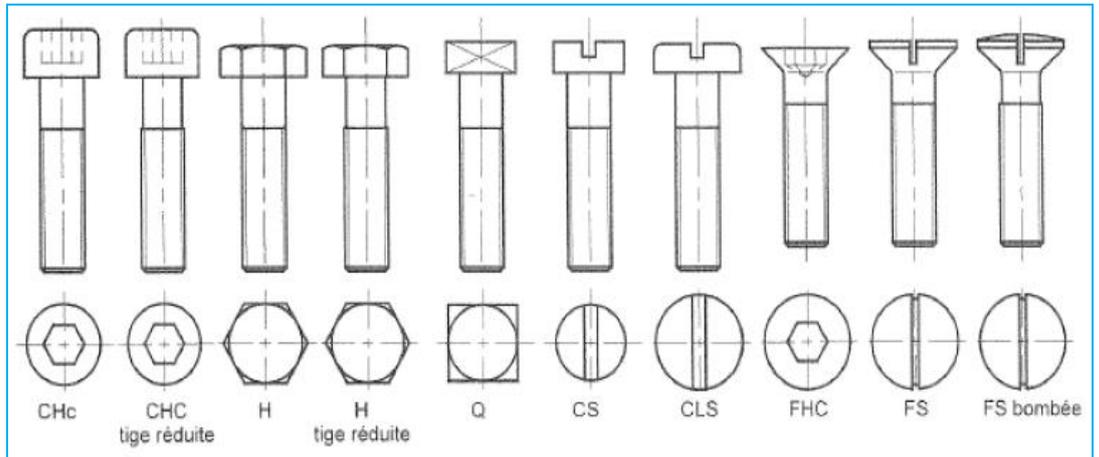
Types de vis, écrous et rondelles

- Les vis, écrous et rondelles sont d'une utilisation importante dans les assemblages mécaniques. Dans ce paragraphe, on présente les types les plus courants. Un peu plus de détails à propos des applications de certaines de ces pièces standards sera vu, notamment au chapitre (**Assemblages complets**).

Les vis



La longueur sous tête est normalisée ; elle peut être entièrement ou partiellement filetée. La longueur filetée est aussi normalisée



Désignations normalisées :

Vis à tête cylindrique à 6 pans creux NF EN ISO 4762 - M12 x 40 - 5.8

Vis **CHC** **M10** - **35** , **6.8**

Type de tête

Profil du filet

Diamètre nominal

Classe de qualité

Longueur sous tête



Les écrous

Les écrous classiques

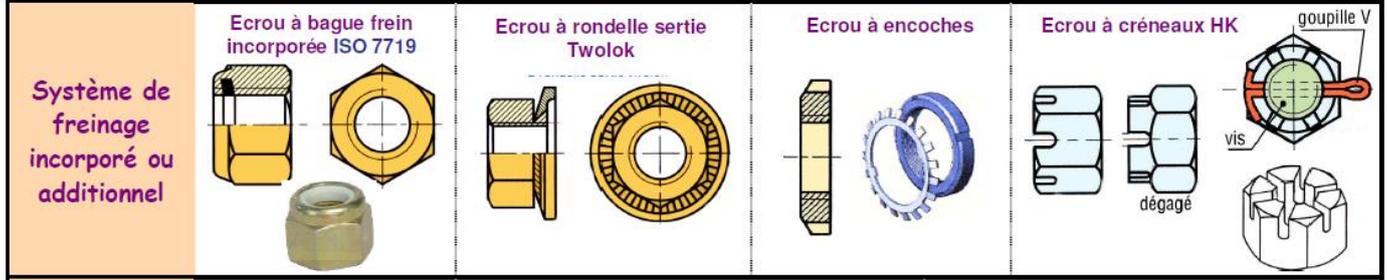
<p>Ecrou Hexagonal (H) Majorité des applications</p>	<p>écrou H ISO 4032</p>	<p>bas Hm ISO 4035</p>	<p>haut HH ISO 4033</p>	<p>à embase EN 1661</p>	<p>borgne</p> <p>L'écrou borgne est utilisé pour protéger le bout de la vis et éviter les blessures, et par esthétique.</p>	<p>à portée sphérique</p>
	<p>Ecrou carré (Q) Autorise un serrage important</p>	<p>Ecrou cylindrique Serrage peu important, industrie électrique</p>				





Les écrous de freinage

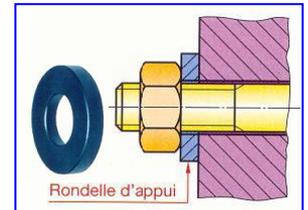
- En plus de leur rôle de serrage, ces **écrous particuliers** permettent un **freinage** de l'assemblage fileté pour réduire ou supprimer son desserrage à cause des vibrations éventuels en fonctionnement.



Les rondelles

Les rondelles d'appui

- Dans un assemblage de pièces filetées, on intercale généralement des **rondelles d'appui**. Une rondelle est un disque mince avec un trou au centre. Elle est utilisée principalement pour :
 - Augmenter la **surface d'appui** pour assurer une plus grande adhérence.
 - Eviter de marquer les pièces par l'effet du serrage.



Rondelles plates	Rondelles cuvettes	Rondelles à portée sphérique
<p>Les plus employées, elles existent en 4 séries : étroite, normale, large, très large</p>	<p>Utilisées avec des vis à têtes fraisées</p>	<p>Utilisées avec un écrou à portée sphérique, elles compensent une inclinaison de la vis/face d'appui.</p>



Les rondelles de freinage

- Elles ont pour fonction d'éviter, grâce à leurs **formes spéciales**, le desserrage des assemblages filetés, à cause des vibrations.

Les rondelles frein élastiques	Rondelle grower dessin simplifié avec bec sans bec		Rondelle conique Lisse ou striée	Rondelle ondulée à 2 ondes
	Denture extérieure		Denture intérieure	Concave à dents extérieures
Les rondelles frein à dents	Denture extérieure		Double denture	Concave à dents extérieures
	Denture intérieure		Double denture	Concave à dents extérieures



Les rondelles élastiques

- Une rondelle élastique est une rondelle qui assure une **fonction ressort**.

Rondelle Belleville	Rondelle ondulée

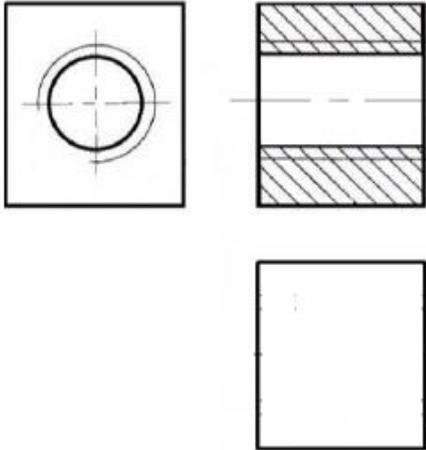


Exercices (Enoncés)

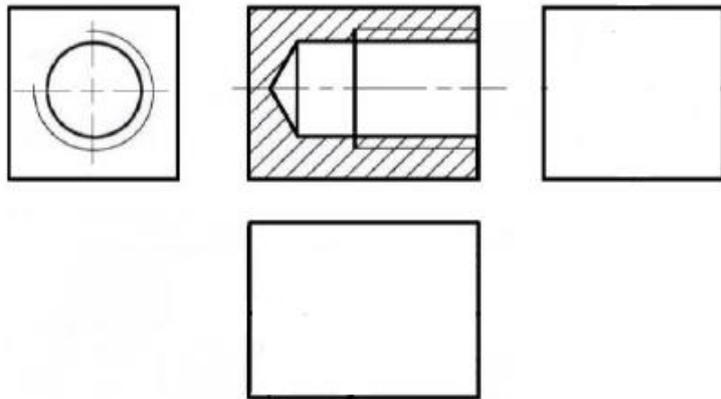
Exercice 1 : Trous taraudés

Compléter les vues des dessins des 2 types de trou taraudé.

Trou taraudé débouchant

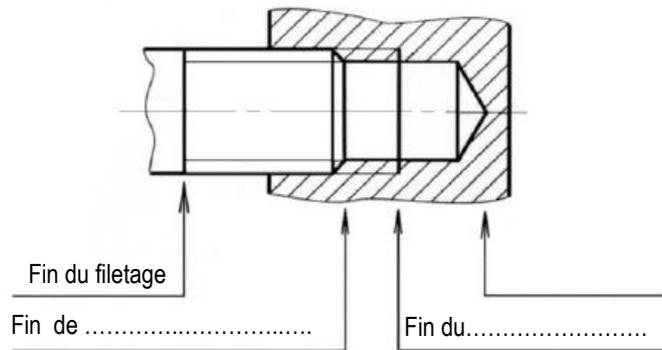
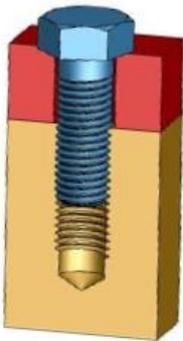


Trou taraudé borgne



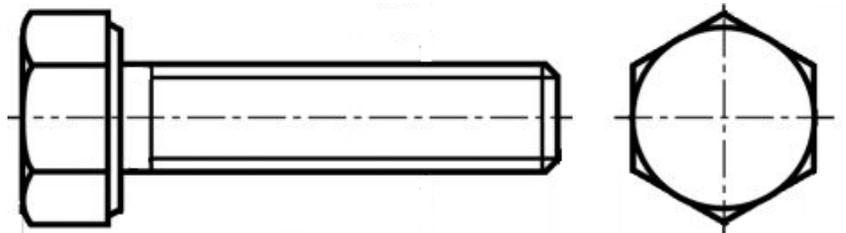
Exercice 2 : Assemblage vis + trou taraudé

Colorier en rouge la vis et en vert le trou taraudé et compléter la description du dessin de cet assemblage.



Exercice 3 : Vis H

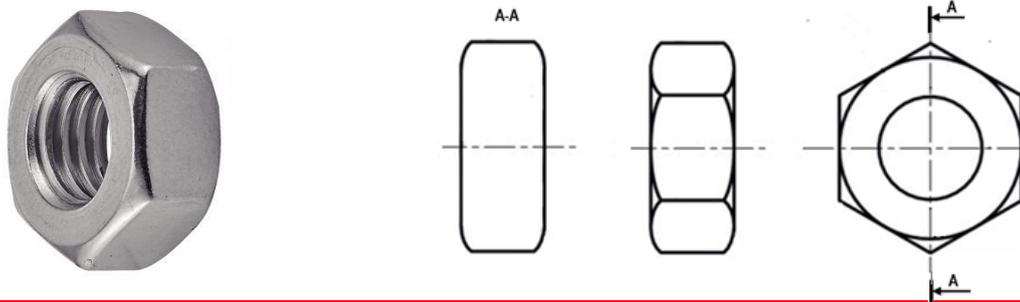
Compléter la vue de gauche de la vis H ci-dessous.





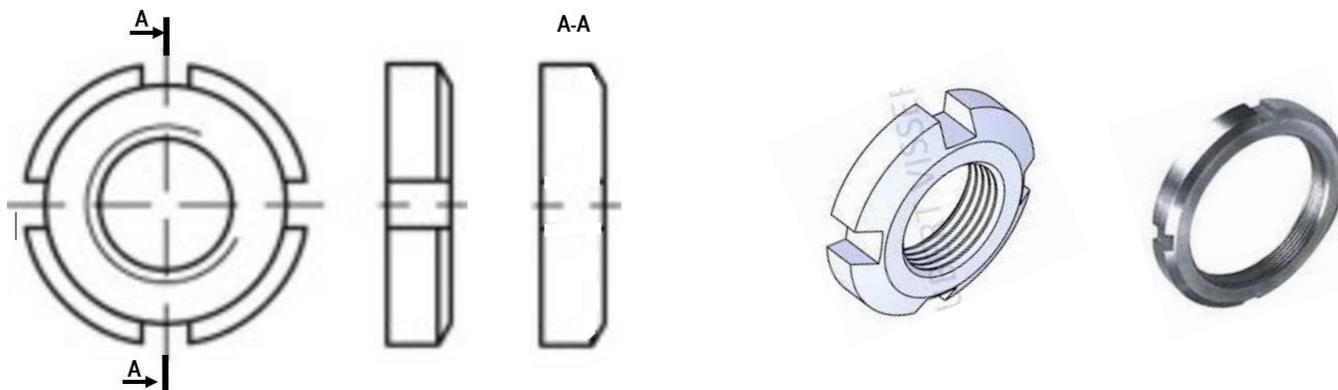
Exercice 4 : Ecrou H

Compléter la vue de droite non coupée et la vue de droite coupe A-A avec les arrêtes cachées.



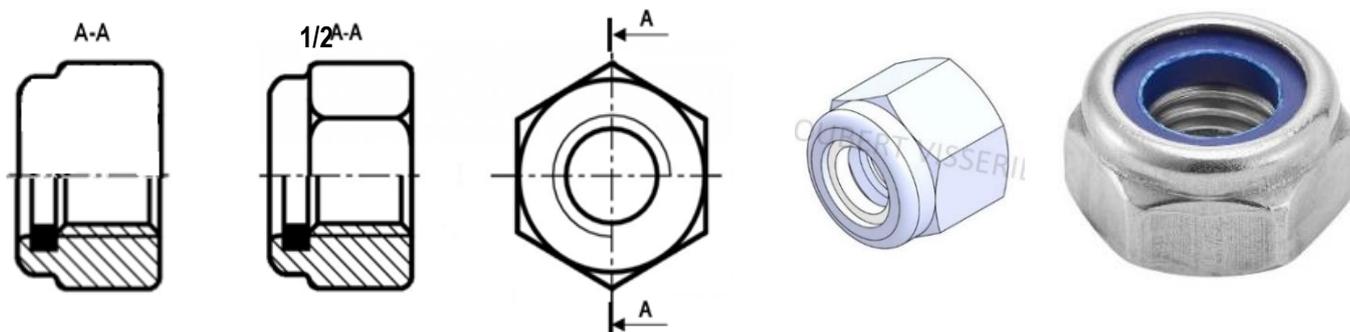
Exercice 5 : Ecrou à encoches

Compléter la vue de gauche non coupée et la vue de gauche en coupe A-A avec les arrêtes cachées.



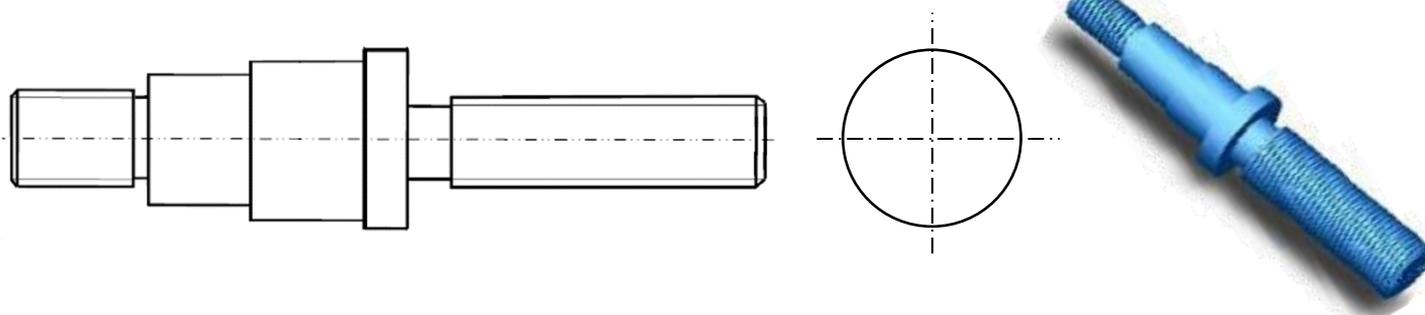
Exercice 6 : Ecrou frein à bague

Compléter la coupe A-A.



Exercice 7 : Arbre fileté

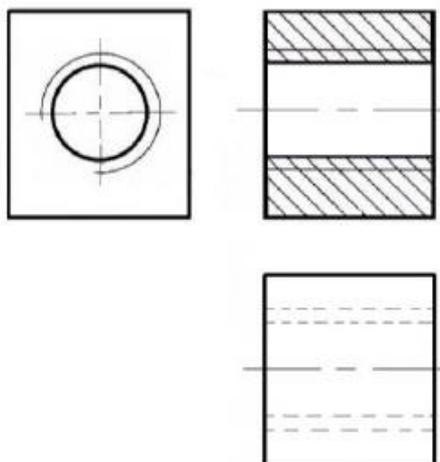
Compléter la vue de face et la vue de gauche sans les arrêtes cachées.



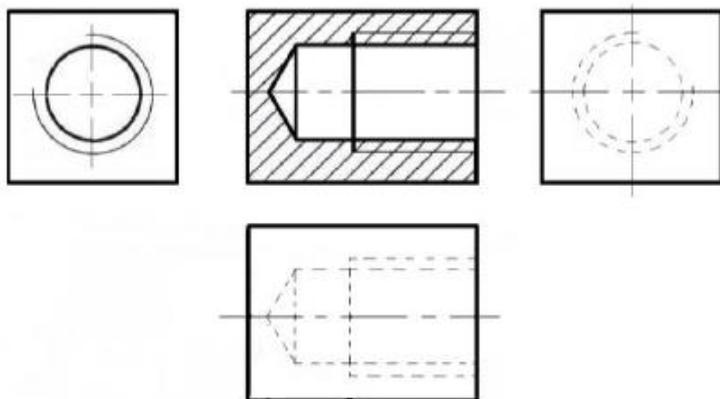
Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Trous taraudés

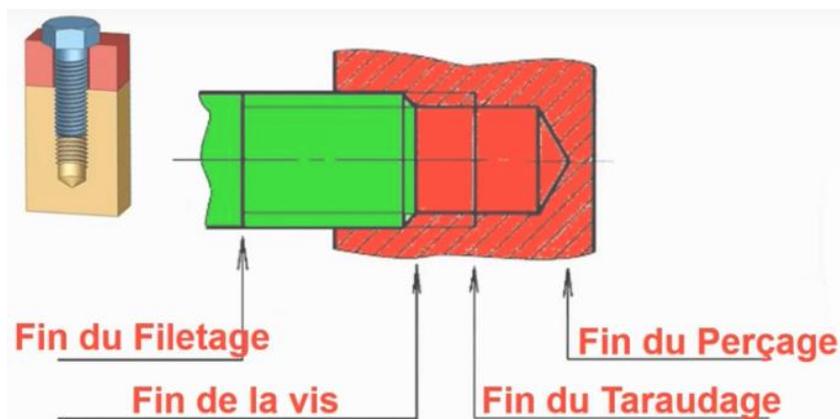
Trou taraudé débouchant



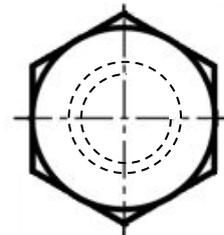
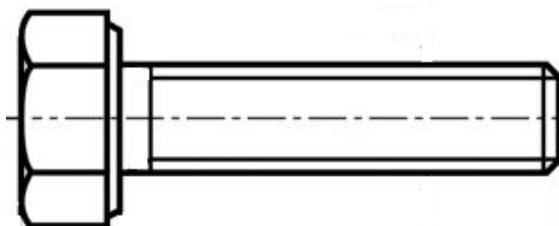
Trou taraudé borgne



Exercice 2 : Assemblage vis + trou taraudé

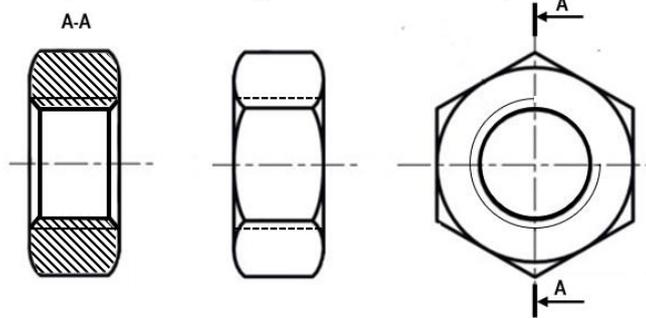


Exercice 3 : Vis H

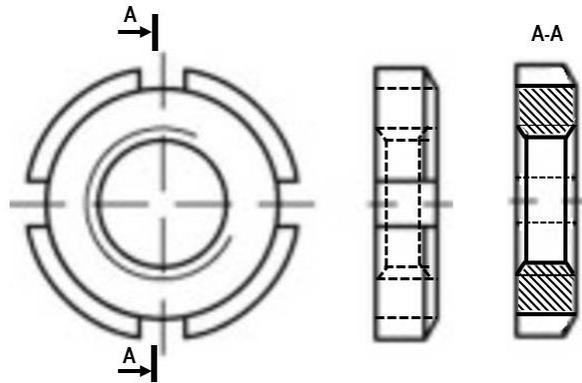
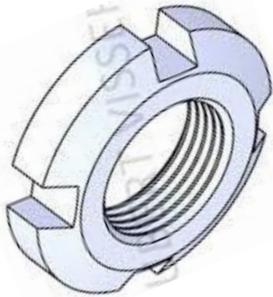




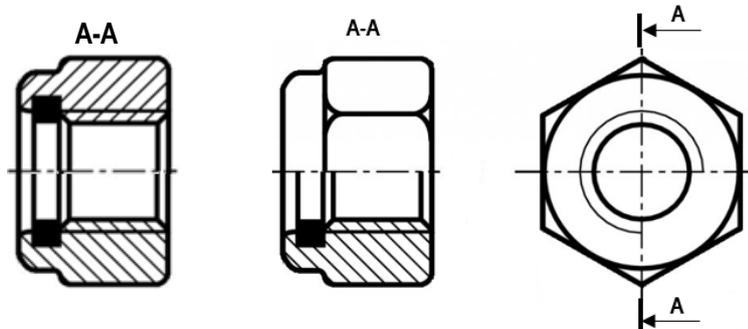
Exercice 4 : Erou H



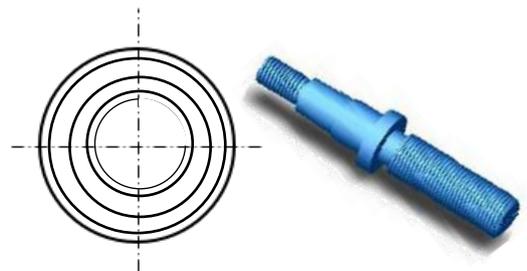
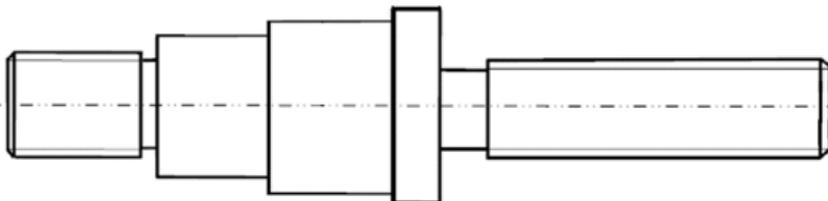
Exercice 5 : Erou à encoches



Exercice 6 : Erou frein à bague



Exercice 7 : Arbre avec différents formes techniques



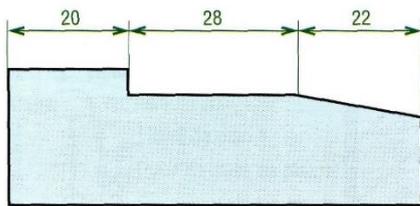
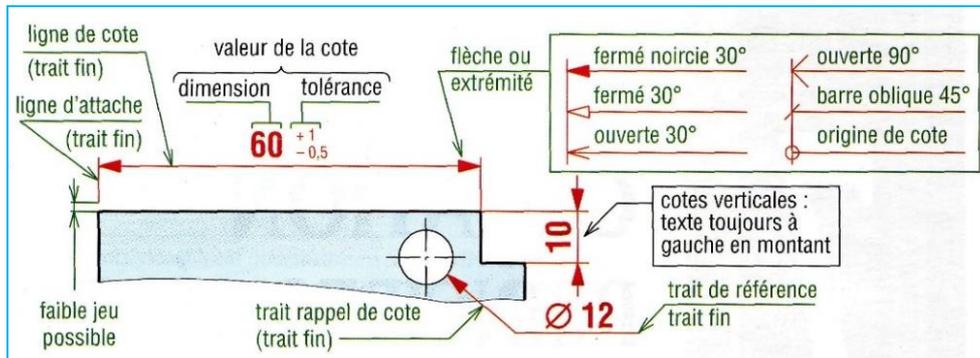
Introduction

- Pour réaliser un objet à partir d'un dessin, il faut une représentation graphique complète et précise des formes et contours (rôle des vues normalisées) et une description détaillée et chiffrée des dimensions essentielles ; c'est le rôle de la **cotation**. Ainsi, la cotation permet entre autres de :
- Réaliser la pièce sans se soucier de l'échelle du dessin ; en effet, on utilise toujours les **cotes réelles** sur un dessin.
- Indiquer d'autres renseignements que les dimensions comme les **tolérances** sur les cotes, les **ajustements** pour l'assemblage de pièces, etc.

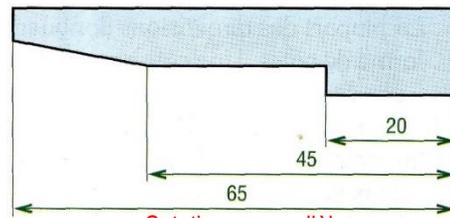
Cotation

Généralités

- Dans un dessin technique, les dimensions sont données sous forme de cotes. Comme l'illustre la figure ci-dessous, une cote se compose de 4 éléments principaux :
 - Une ligne de cote, en trait continu fin.
 - 2 lignes de rappel, d'attache ou d'extension, en trait continu fin.
 - 2 flèches précisant les limites de la ligne de cote.
 - La valeur de la dimension chiffrée de la cote et une tolérance éventuelle ; si la ligne de cote est :
 - Horizontale, le texte est écrit au milieu et au-dessus de la ligne.
 - Verticale, le texte est écrit au milieu à gauche de la ligne et de bas en haut.

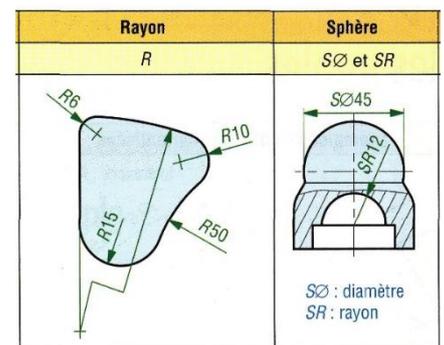
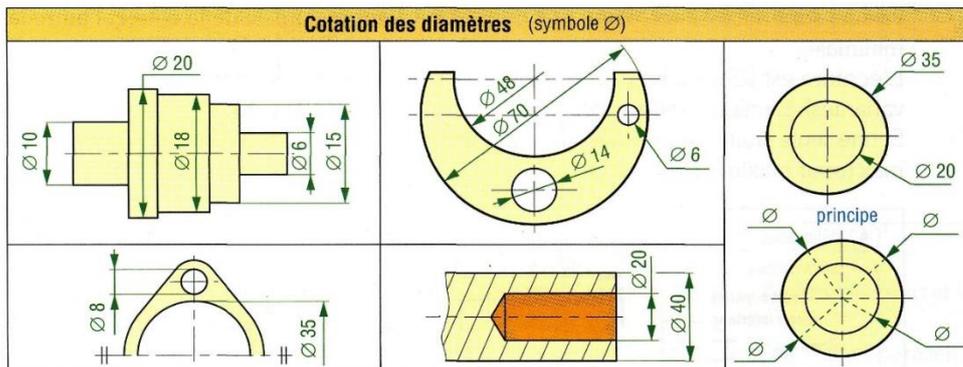


Cotation en série



Cotation en parallèle

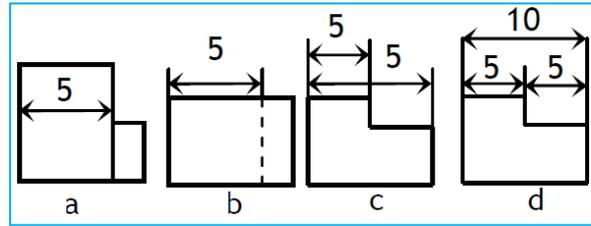
Cotation des diamètres, rayons et sphères





Quelques erreurs à ne pas commettre

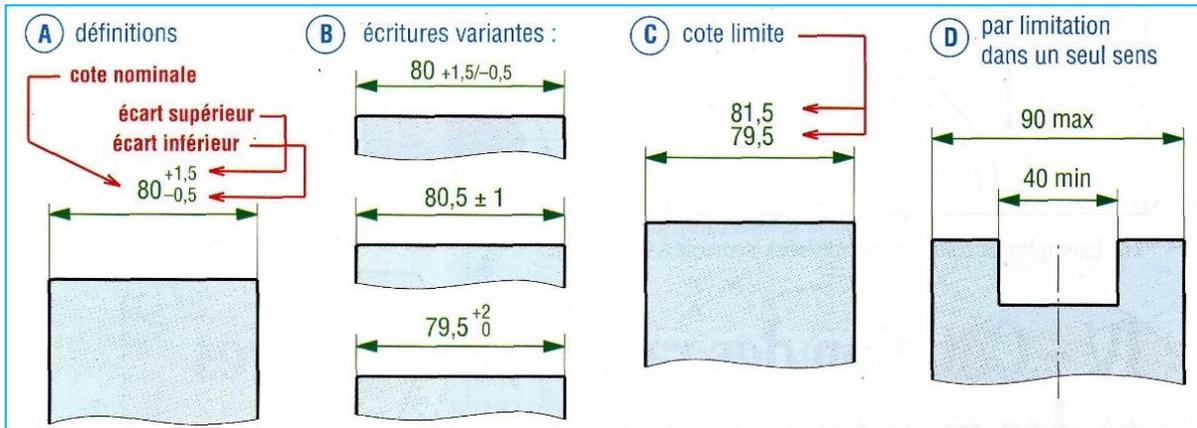
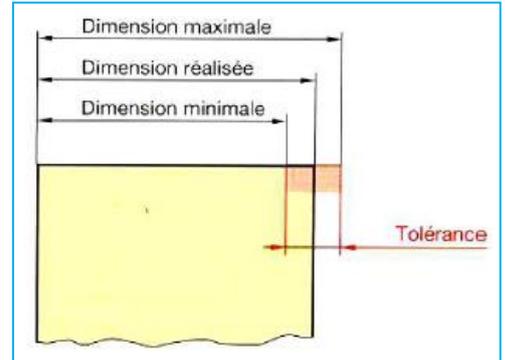
- Pas de cote dans la vue.
- Pas de cote sur des pointillés.
- Pas de ligne de cote coupée.
- Pas de cote surabondante (cote en trop).



Les tolérances

Tolérances dimensionnelles

- En **fabrication mécanique**, aucun processus de fabrication (tournage, fraisage, moulage, etc.) n'est capable de réaliser une cote parfaite à cause des imprécisions dues aux instruments de mesure, à l'usure des outils, etc. Le concepteur doit alors nécessairement tolérer des écarts entre la cote théoriquement souhaitée et celle qui sera effectivement réalisée sur la machine. Le concepteur définit donc des limites acceptables sans altérer le fonctionnement du système ; ce sont les **tolérances**, qui doivent être inscrites sous **forme chiffrée** indiquant :
 - La dimension nominale, qui est la cote souhaitée ou celle de calcul.
 - Une dimension maximale de la cote et une dimension minimale, desquelles, on déduit l'intervalle de tolérance (**IT**) = dimension maximale – dimension minimale.
- L'écriture est souvent réalisée à partir d'un **écart supérieur (es)** et d'un **écart inférieur (ei)** :
 - es** = dimension maximale - dimension nominale.
 - ei** = dimension minimale - dimension nominale.
- L'utilisation des cotes limites est aussi possible.
- Si une seule limite est imposée, il est possible d'utiliser les indications min et max.



Écriture d'une tolérance selon le système ISO

- Le système international **ISO** (International Organization for Standardization) a été créé pour standardiser et par conséquent faciliter le choix, l'écriture, et la fabrication des dimensions avec tolérances notamment pour 2 pièces devant s'insérer l'une dans l'autre (**Alésage** et **Arbre**). La notation ISO d'une cote remplace alors la convention d'écriture chiffrée habituelle, par un **code alphanumérique**, où on définit :
 - La **position** des écarts par rapport à la dimension nominale par une lettre **MAJUSCULE** pour l'**ALESAGE** (A à Z) et une lettre **minuscule** pour l'**ARBRE** (a à z).
 - Une **qualité**, représentée par un nombre allant de 1 à 16,
- La lecture d'un **tableau normalisé** donnerait les écarts correspondants.



Exemple 1 :

Décalages	Jusqu'à 3 inclus	3 à 6 inclus	6 à 10	10 à 18	18 à 30	30 à 50
D10	+60 +20	+78 +30	+98 +40	+120 +50	+149 +65	+180 +80
F7	+16 +6	+22 +10	+28 +13	+34 +16	+41 +20	+50 +25
G6	+8 +2	+12 +4	+14 +5	+17 +6	+20 +7	+25 +9
H6	+6 0	+8 0	+9 0	+11 0	+13 0	+16 0
<u>H7</u>	+10 0	+12 0	+15 0	+18 0	+21 0	+25 0
H8	+14 0	+18 0	+22 0	+27 0	+33 0	+39 0
H9	+25 0	+30 0	+36 0	+43 0	+52 0	+62 0

Tolérances

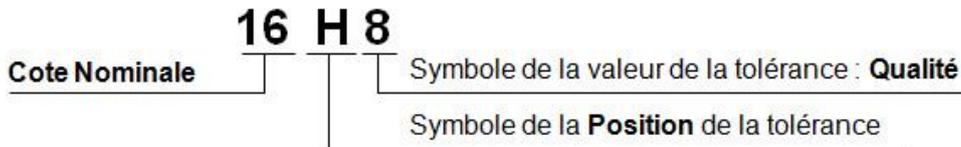
Ce tableau permet de trouver deux valeurs (+21) et (0) qui sont respectivement les écarts supérieur et inférieur exprimés en microns ($1\mu = 0.001\text{mm}$)

donc :

$$\varnothing 20 \text{ H7} = \varnothing 20_0^{+0.021}$$

$d_{\text{maxi}} = 20.021 \text{ mm}$
 $d_{\text{mini}} = 20 \text{ mm}$

Exemple 2 :

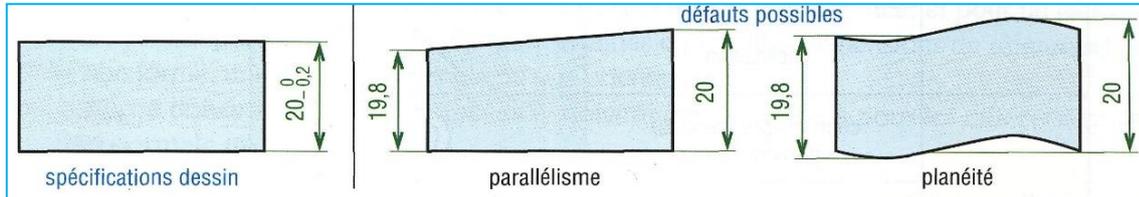


- Il s'agit alors d'un ALESAGE (**H Majuscule**) de dimension nominale 16 mm ; le tableau normalisé ci-dessous nous permet d'en déduire l'écriture chiffrée : **16₀^{+0.027}**.

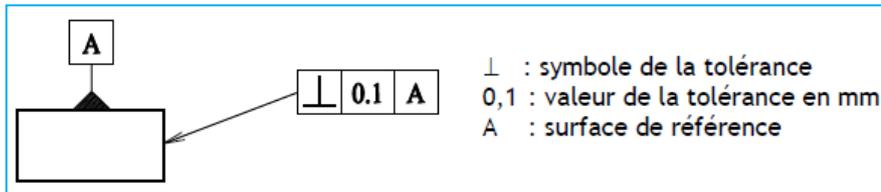
Extraits de tolérances ISO pour alésage (en microns : 1 $\mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$)														
		dimensions nominales (en mm)												
au-delà de		1	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	
à (inclus)		3	6	10	18	30	50	80	120	180	250	315	400	
D10	ES	+60	+78	+98	+120	+149	+180	+220	+260	+305	+355	+400	+440	+480
	EI	+20	+30	+40	+50	+65	+80	+100	+120	+145	+170	+190	+210	+230
E9	ES	+39	+50	+61	+75	+92	+112	+134	+159	+185	+215	+240	+265	+290
	EI	+14	+20	+25	+32	+40	+50	+60	+72	+85	+100	+110	+125	+135
F8	ES	+20	+28	+35	+43	+53	+64	+76	+90	+106	+122	+137	+151	+165
	EI	+6	+10	+13	+16	+20	+25	+30	+36	+43	+50	+56	+62	+68
G7	ES	+12	+16	+20	+24	+28	+34	+40	+47	+54	+61	+69	+75	+83
	EI	+2	+4	+5	+6	+7	+9	+10	+12	+14	+15	+17	+18	+20
H6	ES	+6	+8	+9	+11	+13	+16	+19	+22	+25	+29	+32	+36	+40
	EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H7	ES	+10	+12	+15	+18	+21	+25	+30	+35	+40	+46	+52	+57	+63
	EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H8	ES	+14	+18	+22	+27	+33	+39	+46	+54	+63	+72	+81	+89	+97
	EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tolérances géométriques

- Les tolérances dimensionnelles ne suffisent pas toujours pour définir fonctionnellement la forme d'une pièce. Dans certains cas, il se peut qu'il soit exigé de définir des tolérances géométriques. De telles tolérances indiquent au fabricant les tolérances de **forme** des surfaces et de **positions** de ces surfaces entre elles (parallélisme, planéité, cylindricité, etc.) afin d'obtenir un fonctionnement correct de la pièce.

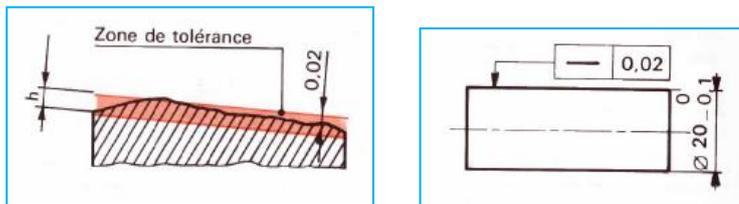


Symbolisation

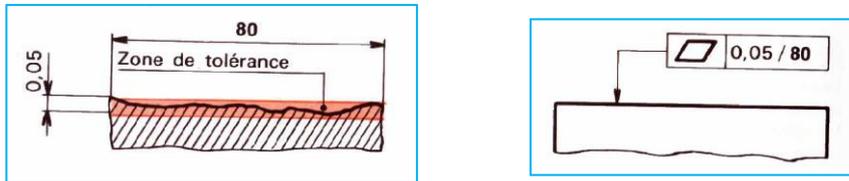


Exemples

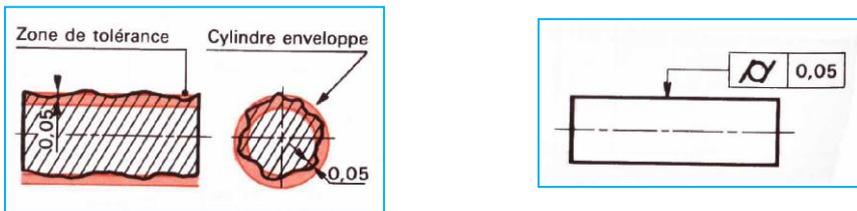
Rectitude



Planéité



Cylindricité



Récapitulatif réduit

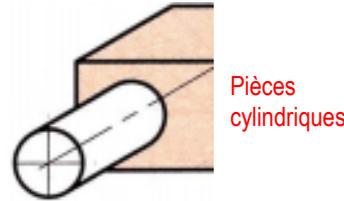
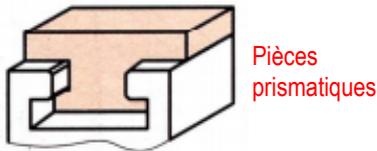
type de tolérances	cas	symbole (ISO)
tolérances de forme	rectitude	—
	planéité	▭
	circularité	○
	cylindricité	⊘

tolérances d'orientation	parallélisme	//
	perpendicularité	⊥
	inclinaison	∠
tolérances de position	concentricité (centres) coaxialité (axes)	⊙
	symétrie	≡
	localisation	⊕

Les ajustements

Principe

- Le cas de 2 pièces devant s'insérer l'une dans l'autre est très courant en **Mécanique**, où on a besoin :
 - Tantôt d'un montage **serré** qui lie complètement les 2 pièces.
 - Tantôt d'un montage **glissant** entre les 2 pièces avec plus ou moins de **jeu**.
- Ajuster** donc 2 pièces c'est les emboîter parfaitement suivant le fonctionnement désiré. Un **ajustement** concerne toujours 2 pièces : le **contenu** (arbre) et le **contenant** (alésage). Le cas le plus trivial est celui des pièces **cylindriques** ; mais, le concept s'applique aussi aux cas des pièces **prismatiques**.



- Selon le jeu **J (Alésage - Arbre)**, un ajustement peut être libre (avec jeu), incertain ou avec serrage :

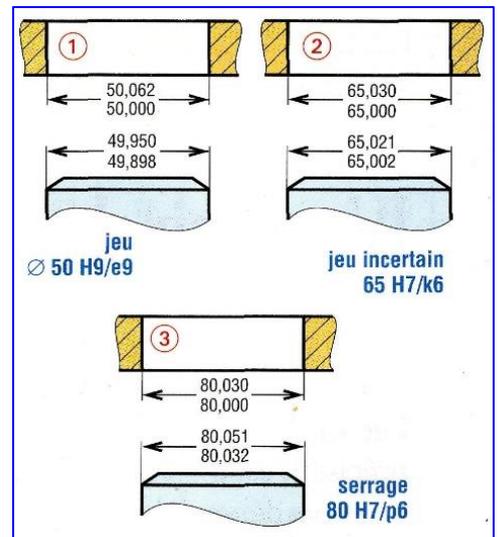
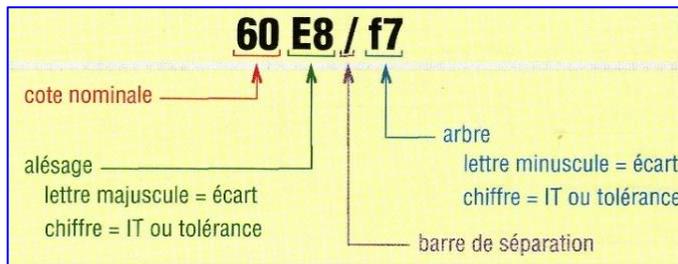
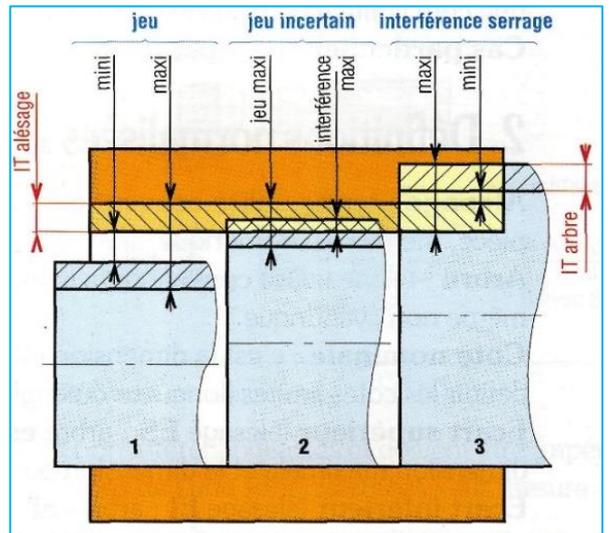
$J = (\text{Alésage} - \text{Arbre})$, alors :

$$J_{\max} = \text{Alésage}_{\max} - \text{Arbre}_{\min}$$

$$J_{\min} = \text{Alésage}_{\min} - \text{Arbre}_{\max}$$

On a alors un ajustement :

- Glissant** si ($J_{\max} > 0$ et $J_{\min} > 0$).
 - Serré** si ($J_{\max} < 0$ et $J_{\min} < 0$).
 - Incertain** (glissant ou serré) si ($J_{\max} > 0$ et $J_{\min} < 0$).
- Le système ISO d'ajustements est basé sur le système ISO des tolérances. Sa désignation est comme suit :



Exemples :

Ajustement	Alésage Maxi en mm	Alésage mini en mm	Arbre Maxi en mm	Arbre mini en mm	Jeu Maxi en mm	Jeu mini en mm	Type d'ajustement
$\varnothing 30 \text{ H7 g6}$ <small>+21 -7 0 -20</small>	30,021	30	29,993	29,980	0,041	0,007	LIBRE
$\varnothing 180 \text{ H7 p6}$ <small>+40 +68 0 +43</small>	180,040	180	180,068	180,043	-0,003	-0,068	SERRE
$\varnothing 16 \text{ H7 f6}$ <small>+18 -16 0 -27</small>	16,018	16	15,984	15,973	0,045	0,016	LIBRE
$\varnothing 50 \text{ H7 m6}$ <small>+25 +25 0 +9</small>	50,029	50	50,025	50,009	0,016	-0,025	INCERTAIN



Extraits de tables de choix des Ajustements

Cas des alésages

Alésages	Jusqu'à 3 inclus	de 3 à 6 inclus	de 6 à 10 inclus	de 10 à 18 inclus	de 18 à 30 inclus	de 30 à 50 inclus	de 50 à 80 inclus	de 80 à 120 inclus	de 120 à 180 inclus	de 180 à 250 inclus	de 250 à 315 inclus	de 315 à 400 inclus	de 400 à 500 inclus
D 10	+ 60	+ 78	+ 98	+ 120	+ 149	+ 180	+ 220	+ 260	+ 305	+ 355	+ 400	+ 440	+ 480
	+ 20	+ 30	+ 40	+ 50	+ 65	+ 80	+ 100	+ 120	+ 145	+ 170	+ 190	+ 210	+ 230
F 7	+ 16	+ 22	+ 28	+ 34	+ 41	+ 50	+ 60	+ 71	+ 83	+ 96	+ 108	+ 119	+ 121
	+ 6	+ 10	+ 13	+ 16	+ 20	+ 25	+ 30	+ 36	+ 43	+ 50	+ 56	+ 62	+ 68
G 6	+ 8	+ 12	+ 14	+ 17	+ 20	+ 25	+ 29	+ 34	+ 39	+ 44	+ 49	+ 54	+ 60
	+ 2	+ 4	+ 5	+ 6	+ 7	+ 9	+ 10	+ 12	+ 14	+ 15	+ 17	+ 18	+ 20
H 6	+ 6	+ 8	+ 9	+ 11	+ 13	+ 16	+ 19	+ 22	+ 25	+ 29	+ 32	+ 36	+ 40
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 7	+ 10	+ 12	+ 15	+ 18	+ 21	+ 25	+ 30	+ 35	+ 40	+ 46	+ 52	+ 57	+ 63
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 8	+ 14	+ 18	+ 22	+ 27	+ 33	+ 39	+ 46	+ 54	+ 63	+ 72	+ 81	+ 89	+ 97
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 9	+ 25	+ 30	+ 36	+ 43	+ 52	+ 62	+ 74	+ 87	+ 100	+ 115	+ 130	+ 140	+ 155
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 10	+ 40	+ 48	+ 58	+ 70	+ 84	+ 100	+ 120	+ 140	+ 160	+ 185	+ 210	+ 230	+ 250
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 11	+ 60	+ 75	+ 90	+ 110	+ 130	+ 160	+ 190	+ 210	+ 250	+ 290	+ 320	+ 360	+ 400
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 12	+ 100	+ 120	+ 150	+ 180	+ 210	+ 250	+ 300	+ 350	+ 400	+ 460	+ 520	+ 570	+ 630
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 13	+ 140	+ 180	+ 220	+ 270	+ 330	+ 390	+ 460	+ 540	+ 630	+ 720	+ 810	+ 890	+ 970
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J 7	+ 4	+ 6	+ 8	+ 10	+ 12	+ 14	+ 18	+ 22	+ 26	+ 30	+ 36	+ 39	+ 43
	- 6	- 6	- 7	- 8	- 9	- 11	- 12	- 13	- 14	- 16	- 16	- 18	- 20
K 6	0	+ 2	+ 2	+ 2	+ 2	+ 3	+ 4	+ 4	+ 4	+ 5	+ 5	+ 7	+ 8
	- 6	- 6	- 7	- 9	- 11	- 13	- 15	- 18	- 21	- 24	- 27	- 29	- 32
K 7	0	+ 3	+ 5	+ 6	+ 6	+ 7	+ 9	+ 10	+ 12	+ 13	+ 16	+ 17	+ 18
	- 10	- 9	- 10	- 12	- 15	- 18	- 21	- 25	- 28	- 33	- 36	- 40	- 45
M 7	- 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 12	- 12	- 15	- 18	- 21	- 25	- 30	- 35	- 40	- 46	- 52	- 57	- 63
N 7	- 4	- 4	- 4	- 5	- 7	- 8	- 9	- 10	- 12	- 14	- 14	- 16	- 17
	- 14	- 16	- 19	- 23	- 28	- 33	- 39	- 45	- 52	- 60	- 66	- 73	- 80
N 9	- 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 29	- 30	- 36	- 43	- 52	- 62	- 74	- 87	- 100	- 115	- 130	- 140	- 155
P 6	- 6	- 9	- 12	- 15	- 18	- 21	- 26	- 30	- 36	- 41	- 47	- 51	- 55
	- 12	- 17	- 21	- 26	- 31	- 37	- 45	- 52	- 61	- 70	- 79	- 87	- 95
P 7	- 6	- 8	- 9	- 11	- 14	- 17	- 21	- 24	- 28	- 33	- 36	- 41	- 45
	- 16	- 20	- 24	- 29	- 35	- 42	- 51	- 59	- 68	- 79	- 88	- 98	- 108



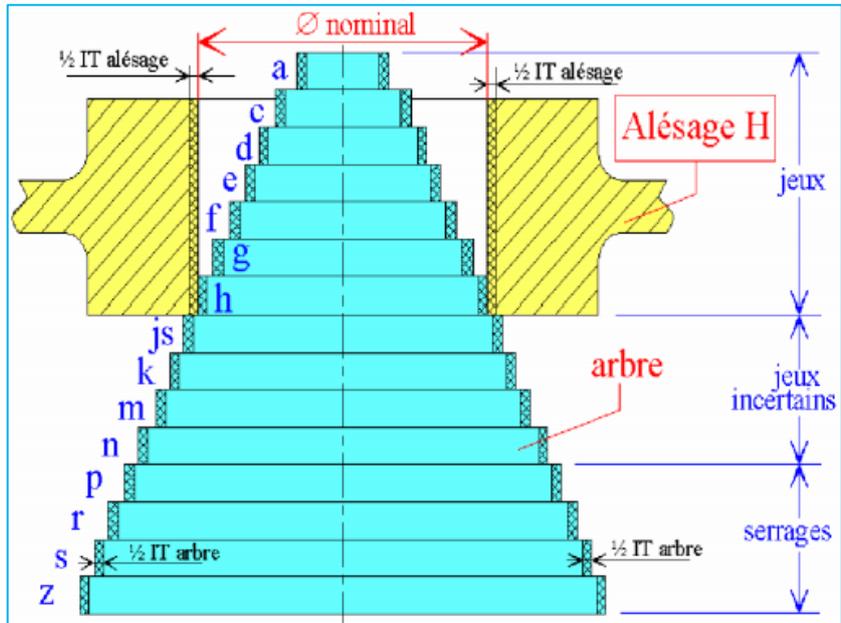
Cas des arbres

Arbres	Jusqu'à 3 inclus	de 3 à 6 inclus	de 6 à 10 inclus	de 10 à 18 inclus	de 18 à 30 inclus	de 30 à 50 inclus	de 50 à 80 inclus	de 80 à 120 inclus	de 120 à 180 inclus	de 180 à 250 inclus	de 250 à 315 inclus	de 315 à 400 inclus	de 400 à 500 inclus
a 11	- 270	- 270	- 280	- 290	- 300	- 320	- 360	- 410	- 580	- 820	- 1050	- 1350	- 1650
	- 330	- 345	-370	-400	- 430	- 470	- 530	- 600	- 710	- 950	- 1240	- 1560	- 1900
c 11	- 60	- 70	- 80	- 95	- 110	- 130	- 150	- 180	- 230	- 280	- 330	- 400	- 480
	- 120	- 145	- 170	- 205	- 240	- 280	- 330	- 390	- 450	- 530	- 620	- 720	- 840
d 9	- 20	- 30	- 40	- 50	- 65	- 80	- 100	- 120	- 145	- 170	- 190	- 210	- 230
	- 45	- 60	- 75	- 93	- 117	- 142	- 174	- 207	- 245	- 285	- 320	- 350	- 385
d 10	- 20	- 30	- 40	- 50	- 65	- 80	- 100	- 120	- 145	- 170	- 190	- 210	- 230
	- 60	- 78	- 98	- 120	- 149	- 180	- 220	- 250	- 305	- 355	- 400	- 440	- 480
d 11	- 20	- 30	- 40	- 50	- 65	- 80	- 100	- 120	- 145	- 170	- 190	- 210	- 230
	- 80	- 105	- 130	- 160	- 195	- 240	- 290	- 340	- 395	- 460	- 510	- 570	- 630
e 7	- 14	- 20	- 25	- 32	- 40	- 50	- 60	- 72	- 85	- 100	- 110	- 125	- 135
	- 24	- 32	- 40	- 50	- 61	- 75	- 90	- 107	- 125	- 146	- 162	- 182	- 198
e 8	- 14	- 20	- 25	- 32	- 40	- 50	- 60	- 72	- 85	- 100	- 110	- 125	- 135
	- 28	- 38	- 47	- 59	- 73	- 89	- 106	- 126	- 148	- 172	- 191	- 214	- 232
e 9	- 14	- 20	- 25	- 32	- 40	- 50	- 60	- 72	- 85	- 100	- 110	- 125	- 135
	- 39	- 50	- 61	- 75	- 92	- 112	- 134	- 159	- 185	- 215	- 240	- 265	- 290
f 6	- 6	- 10	- 13	- 16	- 20	- 25	- 30	- 36	- 43	- 50	- 56	- 62	- 68
	- 12	- 18	- 22	- 27	- 33	- 41	- 49	- 58	- 68	- 79	- 88	- 98	- 108
f 7	- 6	- 10	- 13	- 16	- 20	- 25	- 30	- 36	- 43	- 50	- 56	- 62	- 68
	- 16	- 22	- 28	- 34	- 41	- 50	- 60	- 71	- 83	- 96	- 106	- 119	- 131
f 8	- 6	- 10	- 13	- 16	- 20	- 25	- 30	- 36	- 43	- 50	- 56	- 62	- 68
	- 20	- 28	- 35	- 43	- 53	- 64	- 76	- 90	- 106	- 122	- 137	- 151	- 165
g 5	- 2	- 4	- 5	- 6	- 7	- 9	- 10	- 12	- 14	- 15	- 17	- 18	- 20
	- 6	- 9	- 11	- 14	- 16	- 20	- 23	- 27	- 32	- 35	- 40	- 43	- 47
g 6	- 2	- 4	- 5	- 6	- 7	- 9	- 10	- 12	- 14	- 15	- 17	- 18	- 20
	- 8	- 12	- 14	- 17	- 20	- 25	- 29	- 34	- 39	- 44	- 49	- 54	- 60
g 7	- 2	- 4	- 5	- 6	- 7	- 9	- 10	- 12	- 14	- 15	- 17	- 18	- 20
	- 12	- 16	- 20	- 24	- 28	- 34	- 40	- 47	- 54	- 61	- 69	- 75	- 83
g 8	- 2	- 4	- 5	- 6	- 7	- 9	- 10	- 12	- 14	- 15	- 17	- 18	- 20
	- 16	- 22	- 27	- 33	- 40	- 48	- 56	- 66	- 74	- 87	- 98	- 107	- 117
h 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 4	- 5	- 6	- 8	- 9	- 11	- 13	- 15	- 18	- 20	- 23	- 25	- 27
h 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 6	- 8	- 9	- 11	- 13	- 16	- 19	- 22	- 25	- 29	- 32	- 36	- 40
h 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 10	- 12	- 15	- 18	- 21	- 25	- 30	- 35	- 40	- 46	- 52	- 57	- 63
h 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 14	- 18	- 22	- 27	- 33	- 39	- 46	- 54	- 63	- 72	- 81	- 89	- 97

Système de l'alésage normal H

Principe

- C'est le système le plus utilisé et le plus facile à mettre en œuvre. Dans ce système, **l'alésage H**, dont la dimension minimale est toujours égale à la cote nominale, est pris comme base. Seule la dimension de l'arbre est à choisir pour obtenir l'ajustement souhaité.



Quelques ajustements pratiques à retenir

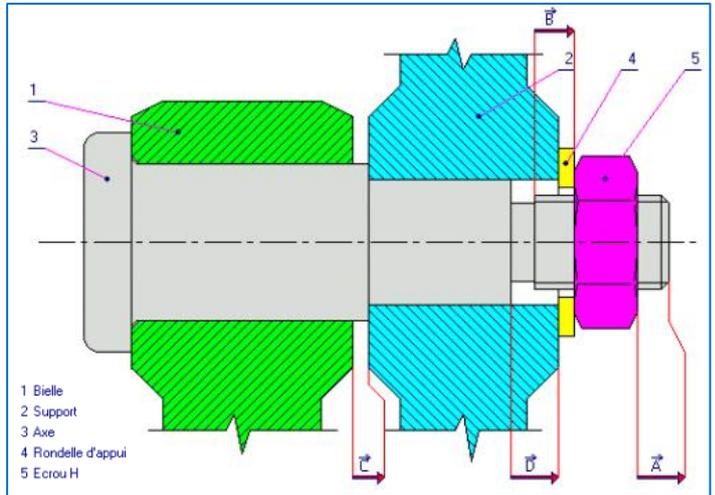
- Pour simplifier, on peut conclure qu'un ajustement est :
 - Glissant** si l'alésage mini est plus grand que l'arbre maxi (le jeu est toujours positif).
 - Serré** si l'alésage maxi est plus petit que l'arbre mini (le jeu est toujours négatif).
 - Incertain** lorsqu'il peut y avoir jeu ou serrage (le jeu peut être positif ou négatif). Dans la pratique, on considère cet ajustement comme serré.

H7g6	Ajustement glissant .
H7p6	Ajustement serré (se monte à la p resse) 
H7m6	Ajustement serré (se monte au m aillet) 

Cotation fonctionnelle

Principe

- Un mécanisme est constitué de différentes pièces. Pour que ce que mécanisme fonctionne, des conditions fonctionnelles doivent être assurées (jeu, serrage, garde, etc.) :
 - Pour serrer efficacement l'écrou 5, il faut disposer d'une partie excédentaire de filetage de l'arbre de chaque côté après montage : A et B sont des conditions de **garde**.
 - L'articulation de la bielle 1 autour de l'axe 3 nécessite un jeu axial : c'est une condition de **jeu**.
 - La liaison complète démontable de l'axe 3 nécessite le « non-contact » de la rondelle 4 et d'un épaulement de l'arbre : D est une condition de **serrage**.
- Ces conditions fonctionnelles sont susceptibles d'être modifiées en fonction des dimensions de certaines pièces. La **cotation fonctionnelle** permet alors, à partir des **chaînes de côtes**, de rechercher les cotes fonctionnelles à respecter afin que les conditions fonctionnelles soient assurées.

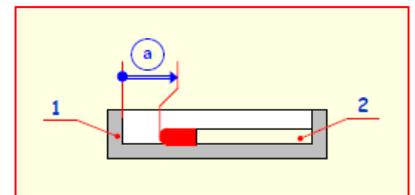


Définitions

Cote-Condition

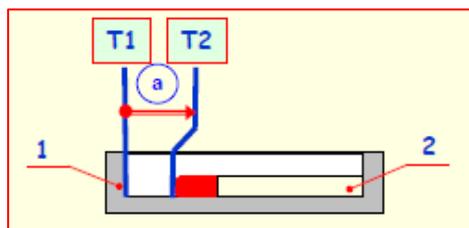
Exemple : Boite d'allumettes

- La **condition** pour que l'allumette (2) puisse être placée dans la boîte (1), est qu'il ait un **jeu** entre l'allumette et la boîte. Ce jeu est appelé **cote fonctionnelle** ou **cote-condition**. Conventionnellement, la cote condition est représentée, dans un dessin d'ensemble, par un **vecteur à double trait** (vecteur **a** de la figure ci-contre). Son orientation peut être horizontale ou verticale :



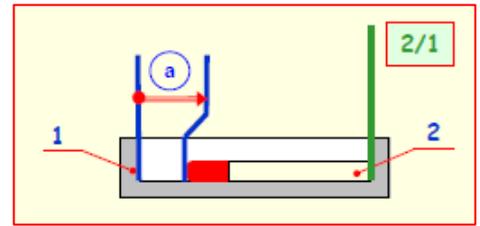
Surfaces terminales

- Les surfaces terminales sont les surfaces perpendiculaires à la cote-condition et qui limitent celle-ci. Dans notre exemple :
 - **T1** : Surface terminale en contact avec la boîte (1).
 - **T2** : Surface terminale en contact avec l'allumette (2).



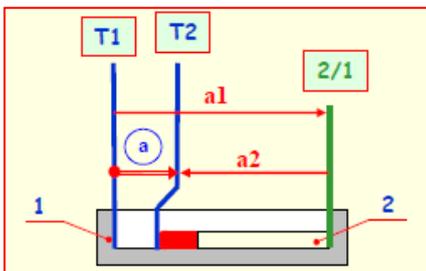
Surfaces de liaison

- Les surfaces de liaison ou de **contact** ou d'**appui** sont les surfaces de contact entre les pièces assurant la cote-condition. Elles sont perpendiculaires à la direction de la cote-condition. Dans notre exemple, **2/1** est la surface de liaison entre (1) et (2) qui assure la cote-condition **a**.



Etablissement d'une chaîne de cotes

- La chaîne de cotes débute à l'origine (**point**) du vecteur cote-condition et se termine à son extrémité (**flèche**) tel que :
 - Chaque cote de la chaîne commence et se termine sur la même pièce.
 - Il ne peut y avoir qu'une seule cote par pièce dans une même chaîne de cotes.
 - Le passage d'une cote de la chaîne à la suivante se fait par la surface de liaison entre les 2 pièces.



On nomme la cote fonctionnelle obtenue de la façon suivante :

a_i
Nom de la cote condition N° de la pièce

- Dans le cas général, les vecteurs sont tous parallèles entre eux. La projection sur un axe parallèle et de même sens que **J** permet d'obtenir une relation algébrique définissant le jeu : **J** est égal à la somme des vecteurs de sens positifs moins la somme des vecteurs de sens négatifs :

$$J = (A_{i+1} + \dots + A_n) - (A_1 + A_2 + \dots + A_i)$$

$$J_{\max} = (A_{i+1} + \dots + A_n)_{\max} - (A_1 + A_2 + \dots + A_i)_{\min}$$

$$= (A_{i+1\max} + \dots + A_{n\max}) - (A_{1\min} + A_{2\min} + \dots + A_{i\min})$$

$$J_{\min} = (A_{i+1} + \dots + A_n)_{\min} - (A_1 + A_2 + \dots + A_i)_{\max}$$

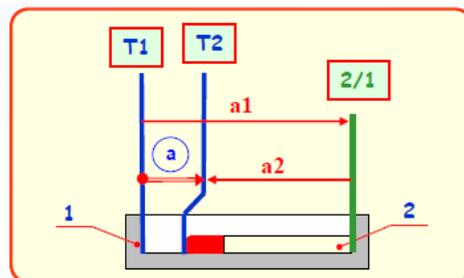
$$= (A_{i+1\min} + \dots + A_{n\min}) - (A_{1\max} + A_{2\max} + \dots + A_{i\max})$$

$$ITJ = J_{\max} - J_{\min} = (A_{1\max} - A_{1\min}) + (A_{2\max} - A_{2\min}) + \dots + (A_{n\max} - A_{n\min})$$

$$ITJ = ITA_1 + ITA_2 + \dots + ITA_n$$

la fermeture vectorielle de la chaîne de cotes conduit à la relation vectorielle suivante :

$$\vec{a} = \vec{a1} + \vec{a2}$$



La relation vectorielle écrite plus haut conduit en projection, aux relations suivantes :

Pour les cotes nominales

$$a = a1 - a2$$

pour les conditions extrêmes

$$a_{\max} = a1_{\max} - a2_{\min}$$

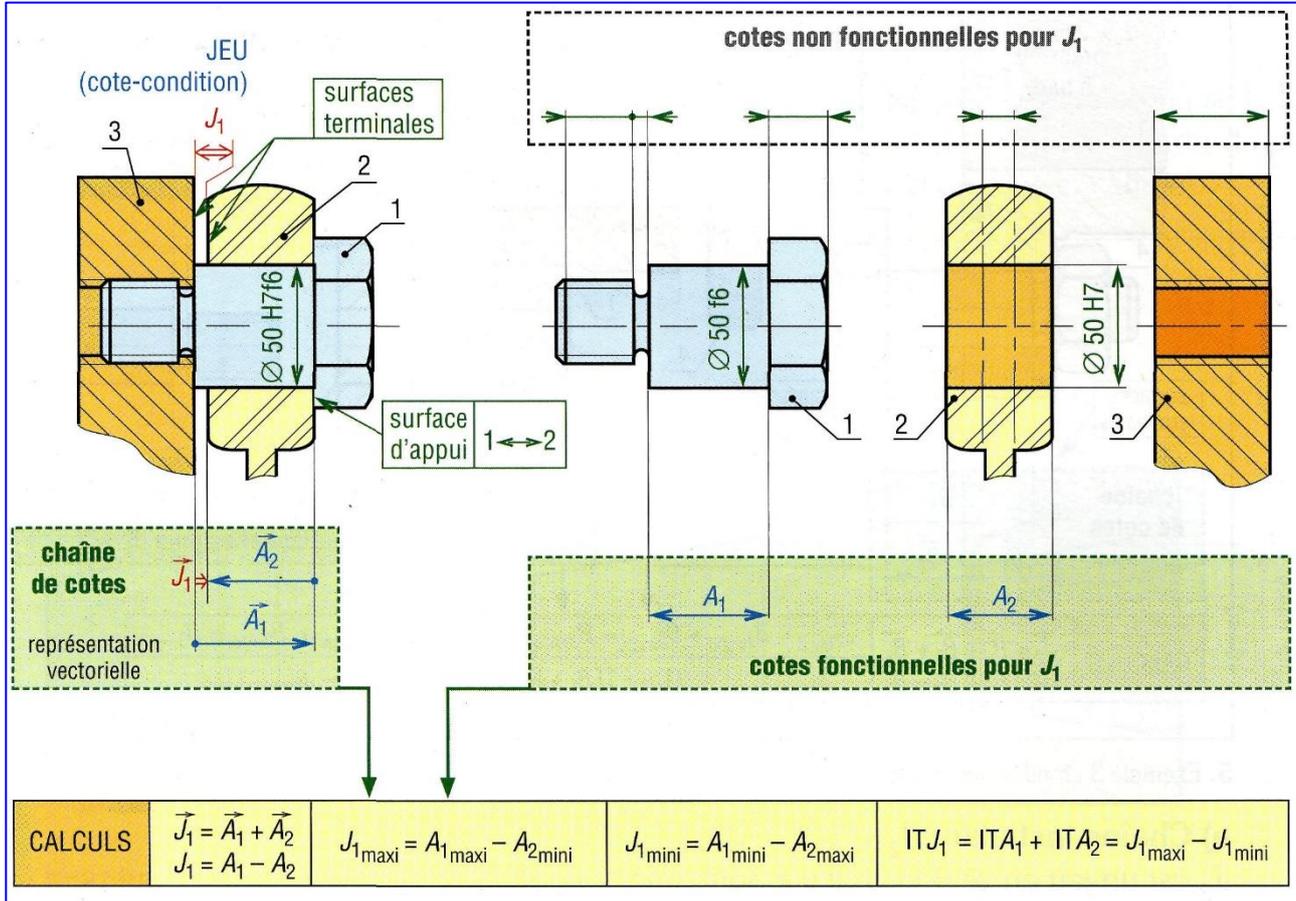
$$a_{\min} = a1_{\min} - a2_{\max}$$

La différence entre les deux dernières équations conduit à la relation sur les intervalles de tolérance :

$$ITa = ITa1 + ITa2$$

Exemple d'application : Articulation cylindrique

- Le dispositif se compose d'un bâti fixe 3, d'un axe 1 serré et bloqué sur 3 et d'une biellette 2 pouvant tourner librement autour de 1. Le jeu J_1 nécessaire au fonctionnement, évite le serrage et garantit la libre rotation de la pièce 2.

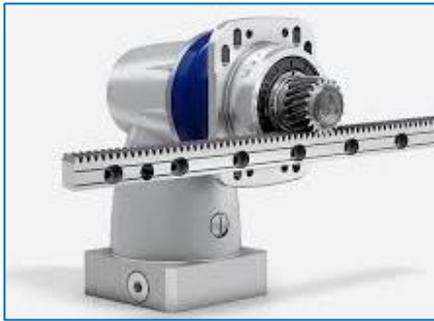




Les liaisons mécaniques

Introduction

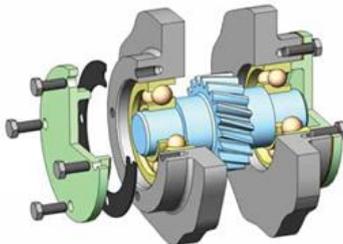
- Un **mécanisme** est un ensemble de pièces dont le but est de réaliser un mouvement tout en effectuant un effort (déplacer, serrer, etc.). La **conception** d'un mécanisme exige une étude théorique, afin d'optimiser le fonctionnement, la forme des éléments, le choix des matériaux. Cette étude s'appuie sur une représentation du réel appelée **Modélisation** : schémas des **liaisons** du mécanisme, représentation des forces, vitesses et accélérations, etc. Cela relève de différents domaines :
 - La **Statique** qui étudie les forces qui s'appliquent sur les solides.
 - La **Cinématique** qui étudie les mouvements des solides.
 - La **Dynamique** qui étudie les mouvements des solides en relation avec les forces qui les produisent.
 - La **Resistance des Matériaux**, qui en fonction des études précédentes, et des matériaux choisis, permet le dimensionnement des éléments du mécanisme.
- Analyser un mécanisme, c'est d'abord comprendre la chaîne cinématique définie pour que l'énergie utile fournie par les actionneurs soit transmise comme souhaitée aux effecteurs. Dans une chaîne cinématique, on trouve en principe le même type de **relation Entrée/Sortie** :
 - Transmission de puissance **sans modification** de mouvement entre l'entrée et la sortie du mécanisme, par exemple un **moto-réducteur**.
 - Transmission de puissance **avec modification** de mouvement entre l'entrée et la sortie du mécanisme, par exemple un système à **pignon et crémaillère**.



- Pour réaliser ces types de relation Entrée/Sortie, on regroupe les fonctions techniques, qui sont des **assemblages mécaniques complets ou partiels** de pièces standards, dans les cas les plus courants suivants :
 - Les assemblages complets dont le rôle est de supprimer tout mouvement entre un ensemble de pièces ; cet ensemble devient alors comme un seul solide, un **solide cinématique**.
 - Les assemblages partiels pour les **guidages** entre 2 solides cinématiques : guidage en rotation et guidage en translation, avec les **immobilisations** partielles correspondantes, l'arrêt en translation et l'arrêt en rotation.
 - La **lubrification** et **l'étanchéité** pour augmenter le rendement et la durée de vie d'un mécanisme.



Assemblage complet



Guidage en rotation



Immobilisation partielle



Lubrification



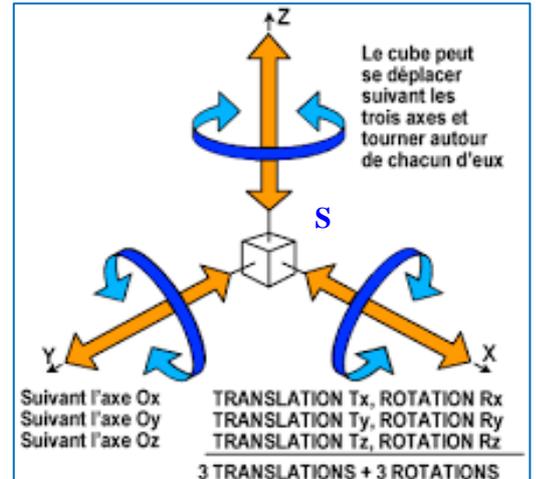
Etanchéité

- La première étape de l'analyse d'un système mécanique, passe par l'étude de ses **mobilités**, donc des **liaisons** entre les différents solides cinématiques qui le composent.



Degrés de liberté

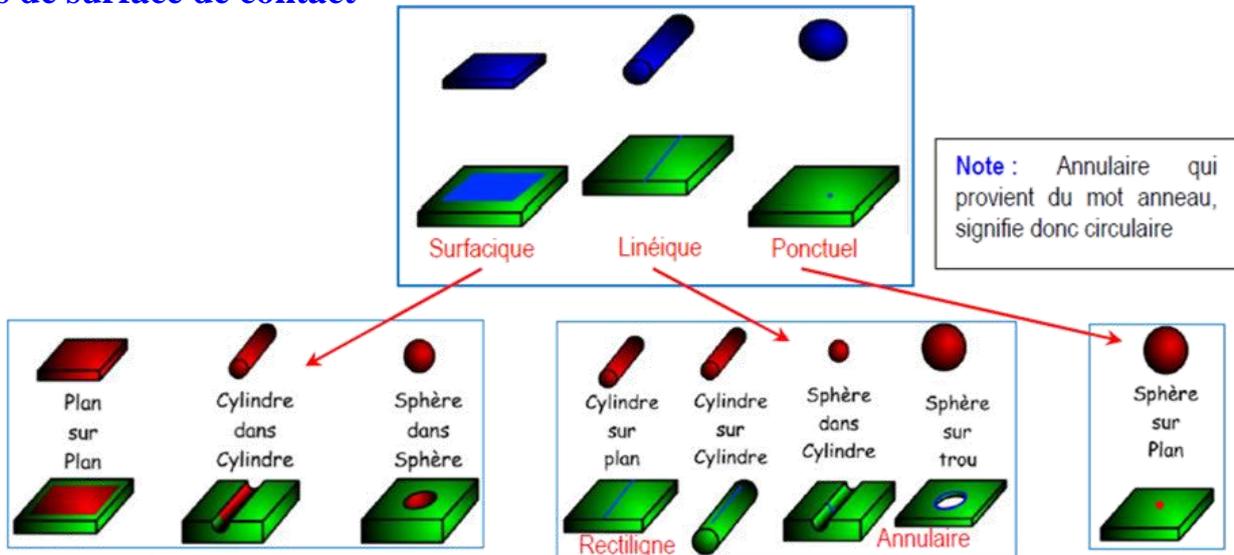
- Un **solide S** libre dans l'espace à **3 dimensions**, peut se déplacer dans tous les sens, ce qui donne :
 - 3 translations** T_x , T_y et T_z .
 - 3 rotations** R_x , R_y et R_z .



Hypothèses simplificatrices

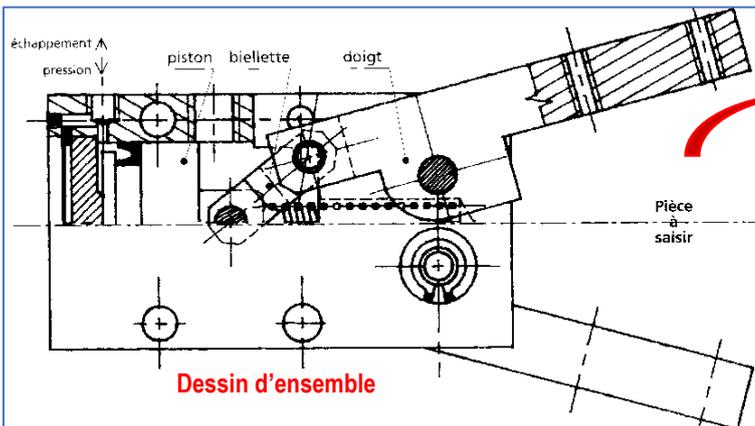
- Les modèles cinématiques à étudier des systèmes peuvent s'avérer très complexes si on ne fait pas les simplifications suivantes :
 - Les sous-ensembles cinématiquement liés sont **indéformables**.
 - Pas d'**irrégularités** des surfaces de contact, pas de jeu et pas de frottement.

Types de surface de contact

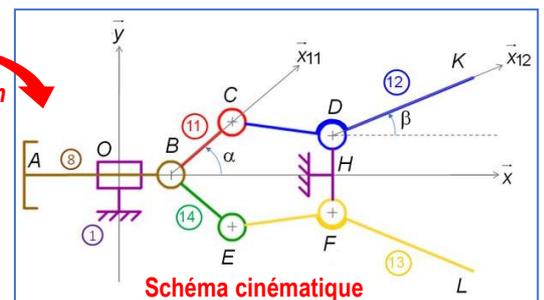


Liaison mécanique

- 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.
- Il existe **11 liaisons** usuelles et normalisées (**ISO**) entre 2 solides.
- Pour 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, comme l'illustre la figure ci-dessous.
- Les 2 solides sont représentés, comme en dessin technique, mais sous **forme filaire (squelettique)**, avec une vue de face, une vue de côté et une vue en perspective.
- Les symboles utilisés sont bien représentatifs des liaisons sous forme de **figures mnémoniques**.



Modélisation

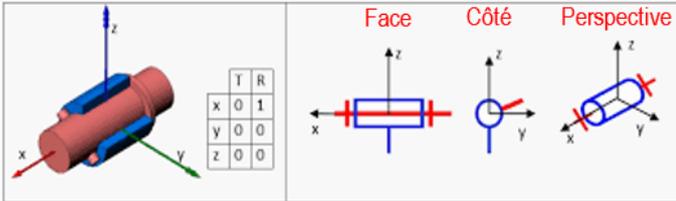




Liaisons très courantes

- A titre d'illustration, on étudie quelques-unes des **plus rencontrées**, à savoir les liaisons Pivot, Pivot glissant, Glissière et Hélicoïdale.

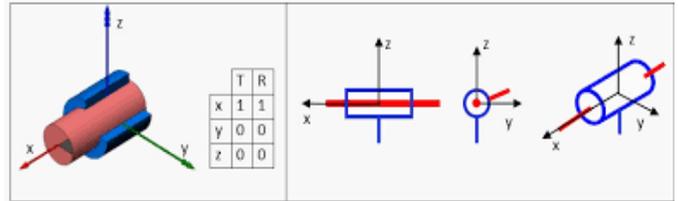
Liaison pivot



Elle est pratiquement la liaison la **plus rencontrée** dans les systèmes mécaniques. Elle **guide en rotation** une pièce : ne permet qu'une rotation autour de l'axe de la liaison. Dans la figure ci-dessus, les 2 solides (rouge et bleu) sont assemblés avec ajustement glissant ; ainsi :

- La pièce **bleue** (Alésage) peut se mettre en rotation par rapport à la pièce **rouge** (Arbre) suivant l'axe X.
- La pièce **bleue** ne peut pas se mettre en translation par rapport à la pièce **rouge** suivant l'axe X, à cause des **arrêts en translation** assurés par l'épaule et la goupille.
- De même pour la pièce rouge.

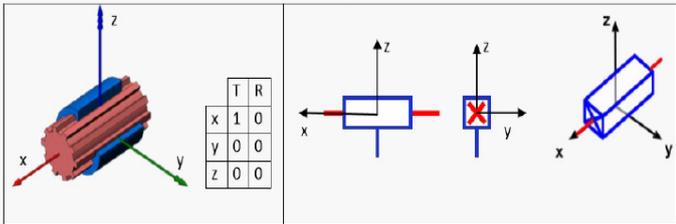
Liaison pivot glissant



C'est une liaison à 2 degrés de liberté, une rotation et une translation selon un seul axe commun, qui est aussi l'axe de la liaison. Elle **guide en rotation et/ou translation** une pièce autour de l'axe de la liaison. Dans la figure ci-dessus, les 2 solides (rouge et bleu) sont assemblés avec ajustement glissant ; ainsi :

- La pièce **bleue** (Alésage) peut se mettre en rotation ou/et en translation par rapport à la pièce **rouge** (Arbre) selon l'axe X.
- De même pour la pièce rouge.

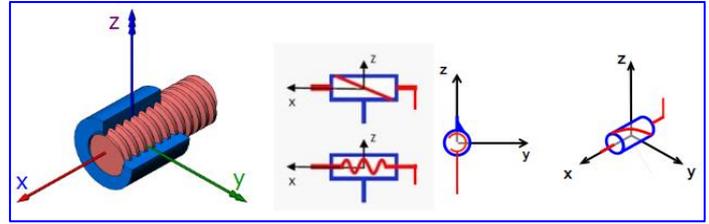
Liaison glissière



La liaison Glissière laisse subsister un seul degré de liberté en translation selon un seul axe, l'axe de la liaison ; elle permet alors le **guidage en translation**. Dans la figure ci-dessus, les 2 solides (rouge et bleu) sont assemblés avec jeu glissant en translation à l'aide de cannelures ; ainsi :

- La pièce **bleue** (Alésage) ne peut se mettre qu'en translation par rapport à la pièce **rouge** (Arbre) suivant l'axe X ; en effet, la pièce **bleue** ne peut pas se mettre en rotation par rapport à la pièce **rouge** suivant l'axe X, à cause des **cannelures**.
- De même pour la pièce rouge.
- Pour ne pas confondre avec le symbole de la liaison Pivot glissant, la pièce rouge (Arbre) n'est pas complètement représentée, en vue de face. En plus le **croisillon** de la vue de côté rappelle l'impossibilité de rotation.
- La pièce fixe est appelée **Glissière** ou **Guide** et la pièce mobile est appelée **Coulisseau**.

Liaison hélicoïdale



En principe, on rencontre cette liaison dans un système **vis-écrou** ; elle est caractérisée par un **mouvement combiné** : rotation et translation simultanées dans un rapport appelé **pas de la vis** ; ainsi :

- La pièce **rouge** (Vis) étant fixe, la pièce **bleue** (Ecrue) peut se mettre en rotation par rapport à la pièce rouge (Vis) suivant l'axe X, tout en translatant.
- De même pour la pièce rouge.
- Pour ne pas confondre avec le symbole de la liaison Pivot glissant, la pièce rouge (Arbre) est représentée par un trait oblique ou par le symbole rappelant le filetage.



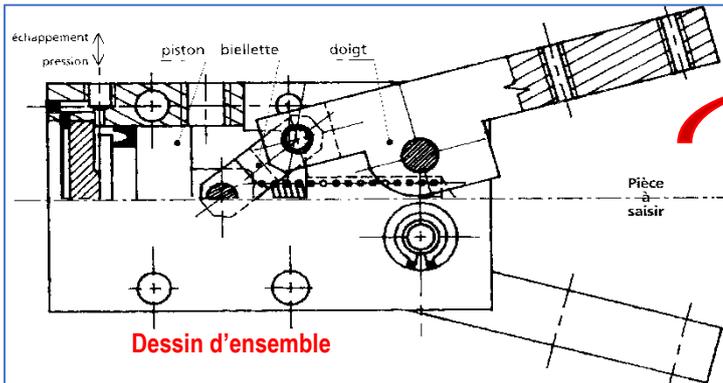
Les 11 liaisons mécaniques normalisées

- 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.

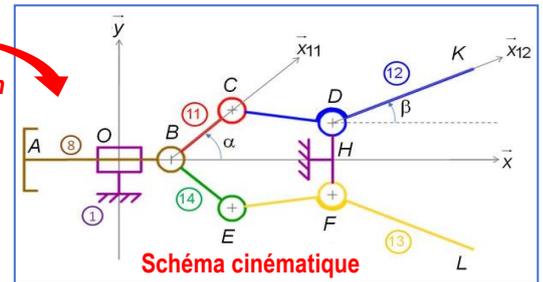
	Nom de la liaison	Représentations planes	Perspective	Degrés de liberté	Exemple	Description
1	Liaison encastrement de centre B			Translation 0 0 0 Rotation 0 0 0		La liaison Encastrement entre 2 solides 1 et 2 ne permet aucun mouvement de l'un par rapport à l'autre. Elle est aussi appelée « liaison complète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

Schéma cinématique

- La lecture cinématique d'un plan d'ensemble d'un mécanisme n'est pas toujours aisée ; il est donc utile d'en simplifier la représentation, pour faire apparaître les **mouvements possibles entre les solides** qui constituent le mécanisme.
- C'est le rôle du **schéma cinématique**, qui est un outil de description simplifiée d'un système réel ; il ne tient compte ni des formes ni des dimensions ; il présente les relations cinématiques entre les différents groupes de pièces, ce qui permet d'étudier **les performances** du mécanisme. Dans un schéma cinématique, on trouve donc :
 - Des groupes de pièces représentés sous forme de « **fils de fer** », appelés « **classes d'équivalence** » ou encore « blocs cinématiques ».
 - Des **liaisons normalisées** situées au niveau de chaque contact entre les classes d'équivalence.



Modélisation



Classe d'équivalence

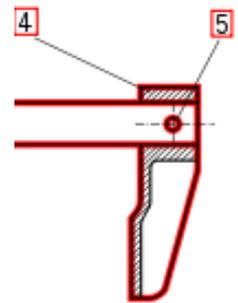
- Un mécanisme est constitué de plusieurs solides. Pour des raisons d'ordre technique (coût de fabrication, facilité d'usinage, possibilité de montage/démontage, etc.), chacun de ces solides est constitué à son tour de plusieurs pièces, mais assemblées de telle sorte de supprimer tout mouvement des uns par rapport aux autres (liaison encastrement). Chacun de ces solides cinématiques est appelé **classe d'équivalence** .
- Une classe d'équivalence est donc un groupe de pièces n'ayant aucun degré de liberté entre elles. Un tel groupe de pièces est aussi qualifié de **sous-ensemble cinématiquement lié** ou **cinématiquement équivalent** . Les pièces d'une même classe d'équivalence ont alors les mêmes mouvements.

Méthode d'élaboration d'un schéma cinématique

- Au préalable, il faut bien étudier les **documents** concernant le système : description de fonctionnement, dessin d'ensemble avec nomenclature, dessins de définition, perspectives, etc. Cela permet, entre autres, de reconnaître certaines pièces et **solutions constructives standards** , formes usuelles, etc. Ainsi, les 3 principales étapes pour la réalisation d'un schéma cinématique sont présentées ci-après.

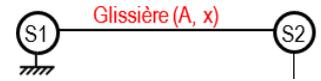
Etape 1 : Identification des classes d'équivalence (CE)

- Il s'agit de **l'identification** de toutes les **liaisons encastrement** du mécanisme pour la phase de fonctionnement étudiée. Dans cette étape, il est question donc de :
 - Rechercher et **colorier différemment chaque CE** sur les dessins techniques 2D ou 3D. On préfère ne pas colorier la partie fixe du mécanisme, **bâti** ou **carter** , afin que les éléments mobiles ressortent mieux.
 - Nommer chacune des CE (S1, S2, etc.) et lister dans des sous-ensembles, dans l'ordre croissant les pièces qui constituent chaque CE : $S1 = \{ \dots, \dots, \}$; $S2 = \{ \dots, \dots, \}$; ... ; $Sn = \{ \dots, \dots, \}$.
 - Dans la figure partielle ci-contre, la CE coloriée en rouge, comprend entre autres les pièces 4 et 5.



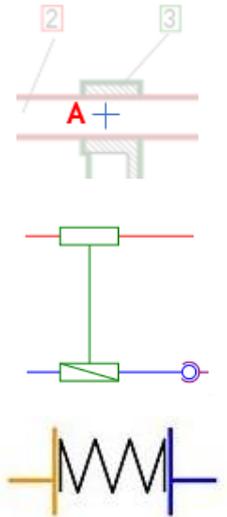
Etape 2 : Etablissement du graphe des liaisons

- Dans ce graphe, il s'agit de :
 - Représenter chaque CE par une **bulle** (petit cercle).
 - Repérer le **bâti**, le solide de référence, par le symbole de référence électrique (masse) ; en effet, généralement le bâti est lié au sol ou la terre (Ground).
 - Déterminer les **liaisons normalisées** entre les CE par l'identification de la géométrie des contacts et par suite les degrés de liberté possibles.
- Note** : Lorsque l'on cherche les liaisons entre 2 CE, on considère que les autres sous-ensembles sont démontés.



Etape 3 : Construction du schéma cinématique

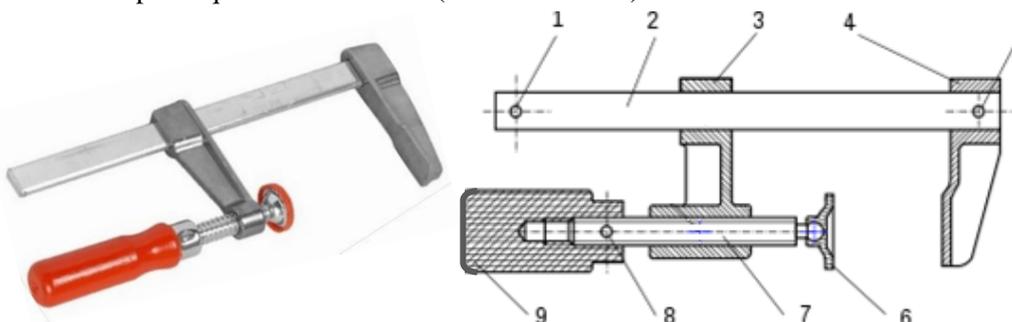
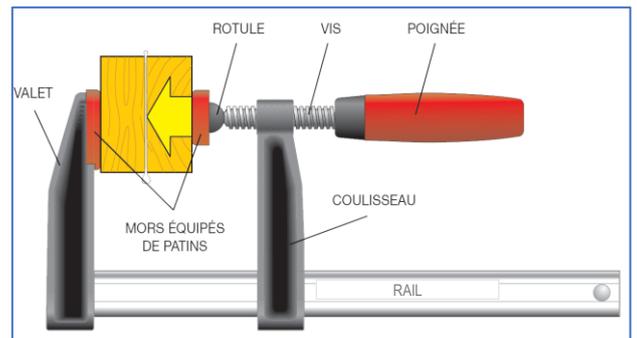
- Il s'agit d'un **schéma filaire**, qu'on établit en :
 - Positionnant les **centres et les axes** des liaisons en respectant si possible leurs positions relatives observées sur le système réel.
 - Mettant en place les représentations symboliques des **liaisons** élémentaires, en utilisant la **couleur** retenue pour chaque CE et en respectant leurs **orientations** (face ou côté) ; on représente aussi certains **éléments normalisés** (engrenages, poulies/courroies, etc.).
 - Reliant tous les éléments de **même couleur** en respectant si possible l'architecture du système réel et en évitant que des traits se croisent pour aboutir à un schéma clair.
 - Complétant éventuellement par quelques traits et **symboles** (poignée, volant, manivelle, ressort, etc.) le schéma pour faciliter la compréhension et pour s'approcher de l'aspect réel du mécanisme.
- On exclut toutes les pièces **déformables** (ressorts, joints, etc.). En effet, par exemple, un ressort n'appartient à aucune CE, car il est en contact avec 2 CE à la fois. C'est pour cela qu'il est exclu du schéma ou représenté uniquement pour des raisons esthétiques ou explicatives.
- Les éléments **roulants** (billes, rouleaux, etc.) des roulements ne sont pas pris en compte.



Exemple d'application : Système Serre-joint

Mise en situation

- Le rôle d'un tel système est de serrer des pièces les uns contre les autres, par exemple des planches de bois pour réaliser un collage, comme suit :
 - Les pièces sont serrées entre les mors.
 - Le mors mobile est porté par le coulisseau, qui, comme son nom l'indique, coulisse sur le rail, ce qui permet de s'adapter grossièrement à la largeur des pièces à assembler (manipulation manuelle sans serrage).
 - Le mors fixe est solidaire du rail.
 - Une fois les mors en contact avec les pièces, on serre la vis ; le coulisseau se met en travers du rail ce qui provoque un coincement (**arc-boutement**).

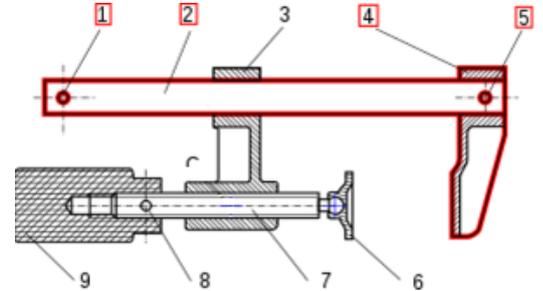


9	1	Poignée
8	1	Goupille
7	1	Vis
6	1	Mors mobile sur rotule
5	1	Rivet
4	1	Mors fixe
3	1	Coulisseau
2	1	Rail
1	1	Goupille
Rep	Nb	Désignation

Étape 1 : Identification des classes d'équivalence.

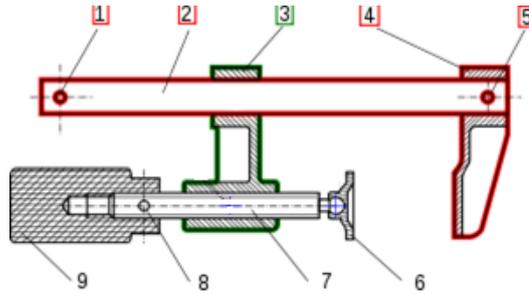
Sous-ensemble S1

- On part de **la pièce rep. 1**, la goupille d'arrêt, qui empêche le coulisseau rep. 3 de sortir du rail **rep. 2**.
- La pièce 1 **est solidaire** du rail **rep. 2**.
- Le **rivet rep. 5** permet l'immobilisation du **mors fixe rep. 4** par rapport rail **rep. 2** ; dans certaines versions de ce mécanisme, ces 2 éléments sont montés en force (ajustement serré).
- On choisit pour S1 la couleur rouge et on surligne les contours.
- Bien que dans cet exemple particulier le bâti n'a pas un grand sens, on choisit S1 comme solide de référence par principe ; en effet, ce mécanisme est amovible et n'est fixe ni au sol, ni à un carter, etc.
- **S1 = {1, 2, 4, 5}**.



Sous-ensemble S2

- La pièce libre suivante est la **rep. 3**, le coulisseau.
- Cette pièce n'est fixée à aucune autre, c'est un sous-ensemble à lui tout seul. On choisit la couleur verte pour S2.
- **S2 = {3}**.

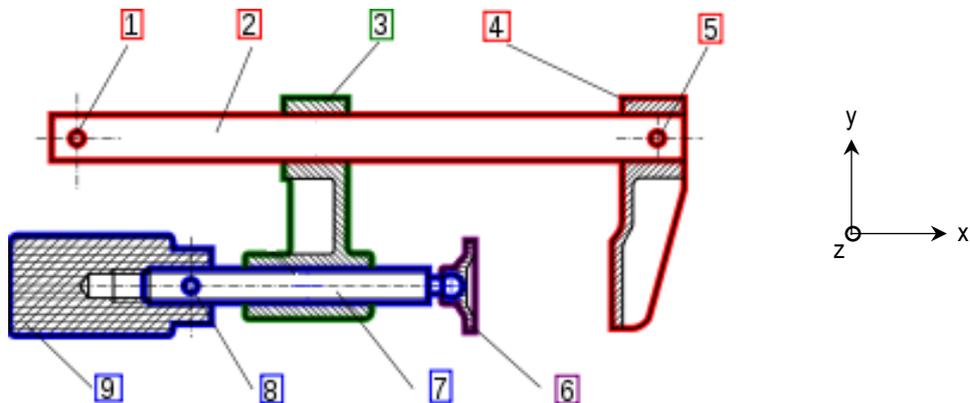


Sous-ensembles S3

- La pièce libre suivante est le mors mobile **rep. 6**. Il constitue un sous-ensemble à lui tout seul ; on lui associe la couleur violette.
- **S3 = {6}**.

Sous-ensembles S4

- La dernière classe d'équivalence est l'ensemble poignée et vis. La poignée **rep. 9** est vissée sur la vis **rep. 7**, et est immobilisée par la goupille **rep. 8** ; on associe à S4 le bleu.
- **S4 = {7, 8, 9}**.

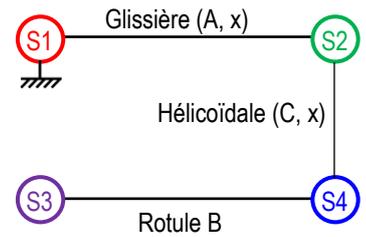


Étape 2 : Etablissement du graphe des liaisons.

- L'identification des liaisons passe en général par le remplissage d'un tableau des liaisons. On utilise les axes habituels : x pour l'horizontale sur le dessin, y pour la verticale sur le dessin et z pour la direction perpendiculaire au papier.

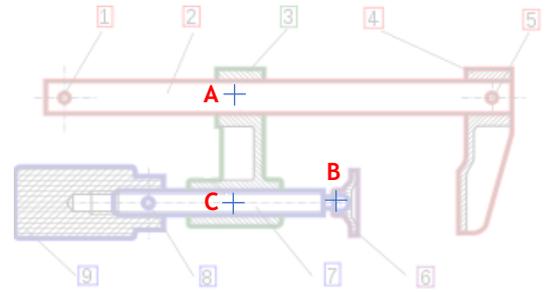
Sous-ensembles	Translations			Rotations			Désignation de la liaison
	TX	TY	TZ	RX	RY	RZ	
S1/S2	1	0	0	0	0	0	Glissière
S2/S4	1	0	0	1	0	0	Hélicoïdale
S3/S4	0	0	0	1	1	1	Rotule

- S1 est en liaison glissière avec S2 : la surface de contact est prismatique.
- S2 est en liaison hélicoïdale avec S4 (système vis-écrou).
- S4 est en liaison rotule avec S3 (surface de contact sphérique).
- On voit que selon la liaison :
 - Soit la surface de contact indique les degrés de liberté, ce qui permet d'en déduire la nature de la liaison.
 - Soit on reconnaît une liaison classique, ce qui permet d'en déduire les degrés de liberté.

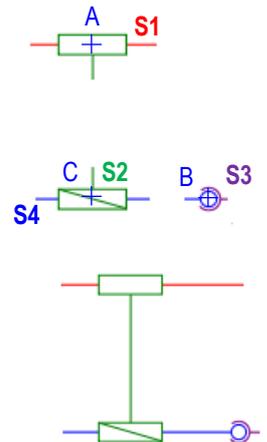


Étape 3 : Construction du schéma cinématique.

- Dans le dessin d'ensemble, on place les repères A, B et C désignant les centres des différentes liaisons.

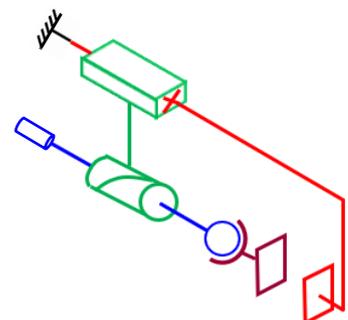
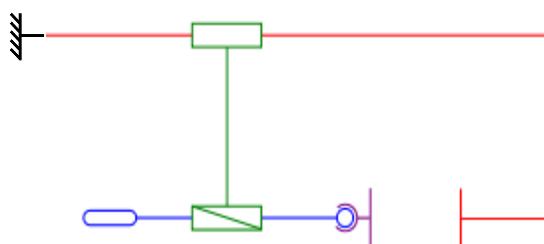


- Centrées sur les repères A, B et C, les symboles des différentes liaisons sont dessinés, tout en respectant les différentes couleurs adoptées et la **relation Contenant/Contenu** pour les différentes CE.



- On complète le schéma cinématique, en reliant les différentes CE des différentes liaisons, en utilisant les **bonnes couleurs**.

- Enfin, on **habille** un peu le schéma cinématique, en le rendant plus explicite par la représentation des mors et de la poignée.



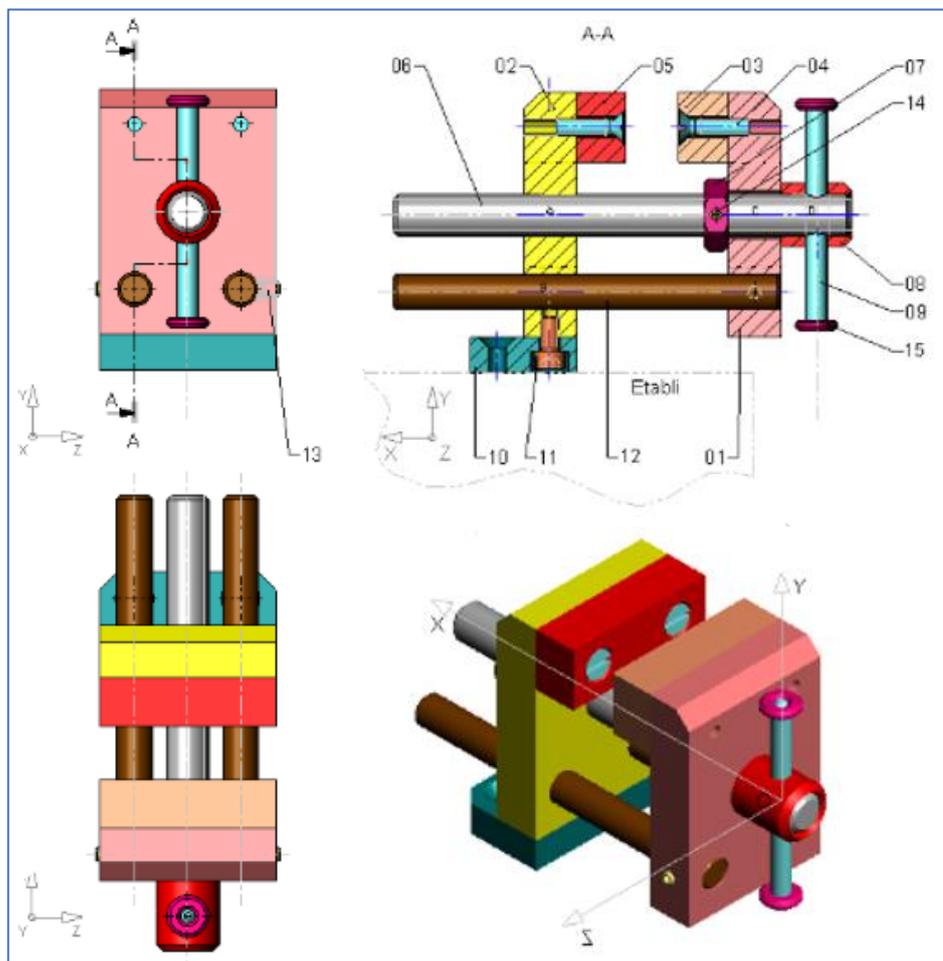
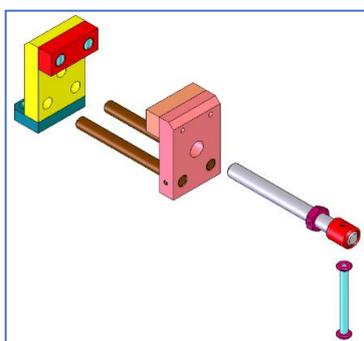


Exercices (Enoncés)

Exercice 1 : Etau de modélisme

L'étau de modéliste est un outil employé par les modélistes pour maintenir en position une ou plusieurs pièces entre elles afin de réaliser des opérations diverses telles que : collage, perçage, etc. la photo ci-dessous représente un modèle parmi d'autres ; pour le modèle étudié, on présente ci-dessous les documents nécessaires. Ainsi, le fonctionnement simplifié du mécanisme est comme suit :

- La semelle de l'étau (10) est fixée à un établi, via des boulons dans les 2 trous avec fraisure ; c'est donc le solide de référence.
- En tournant la poignée (09) selon l'axe X, le mors mobile (01) translate par rapport à la semelle (10) suivant l'axe X et provoque l'écartement ou le rapprochement du mors mobile (01) par rapport au mors fixe (02).

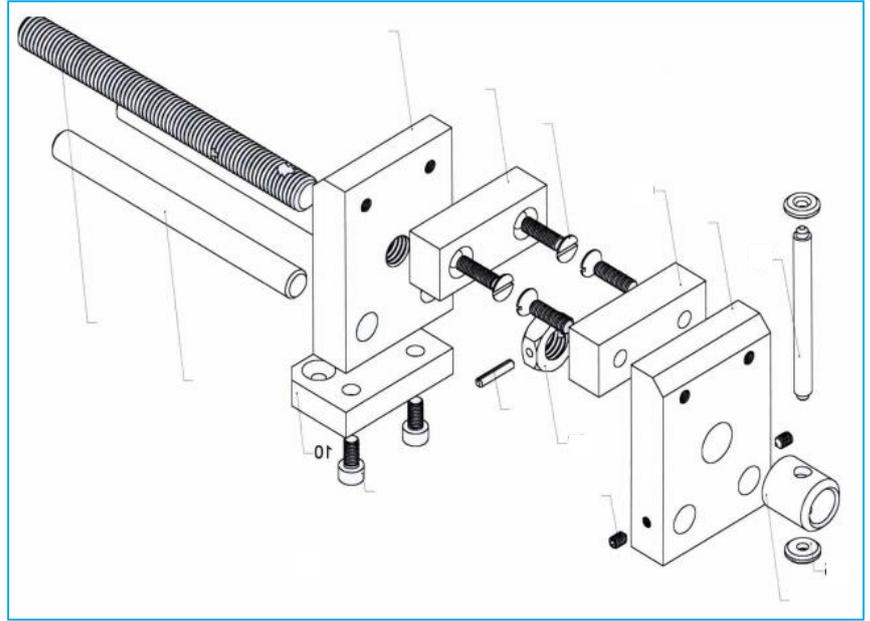
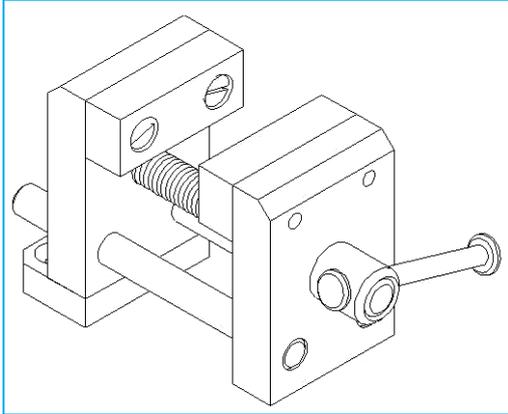


Rep.	Image	Désignation
1		Mors mobile
2		Mors fixe
3		Garniture de mors mobile
4		Vis FS M5-20 5-6 (x4)
5		Garniture de mors fixe
6		Vis de manœuvre
7		Écrou H M12-8
8		Bague de renfort
9		Tige de poignée
10		Semelle
11		Vis CHc M5-10 - 8.8 (x2)
12		Tige guide (x2)
13		Vis sans tête HC M4-6 (x2)
14		Goupille élastique
15		Embout de tige de poignée (x2)

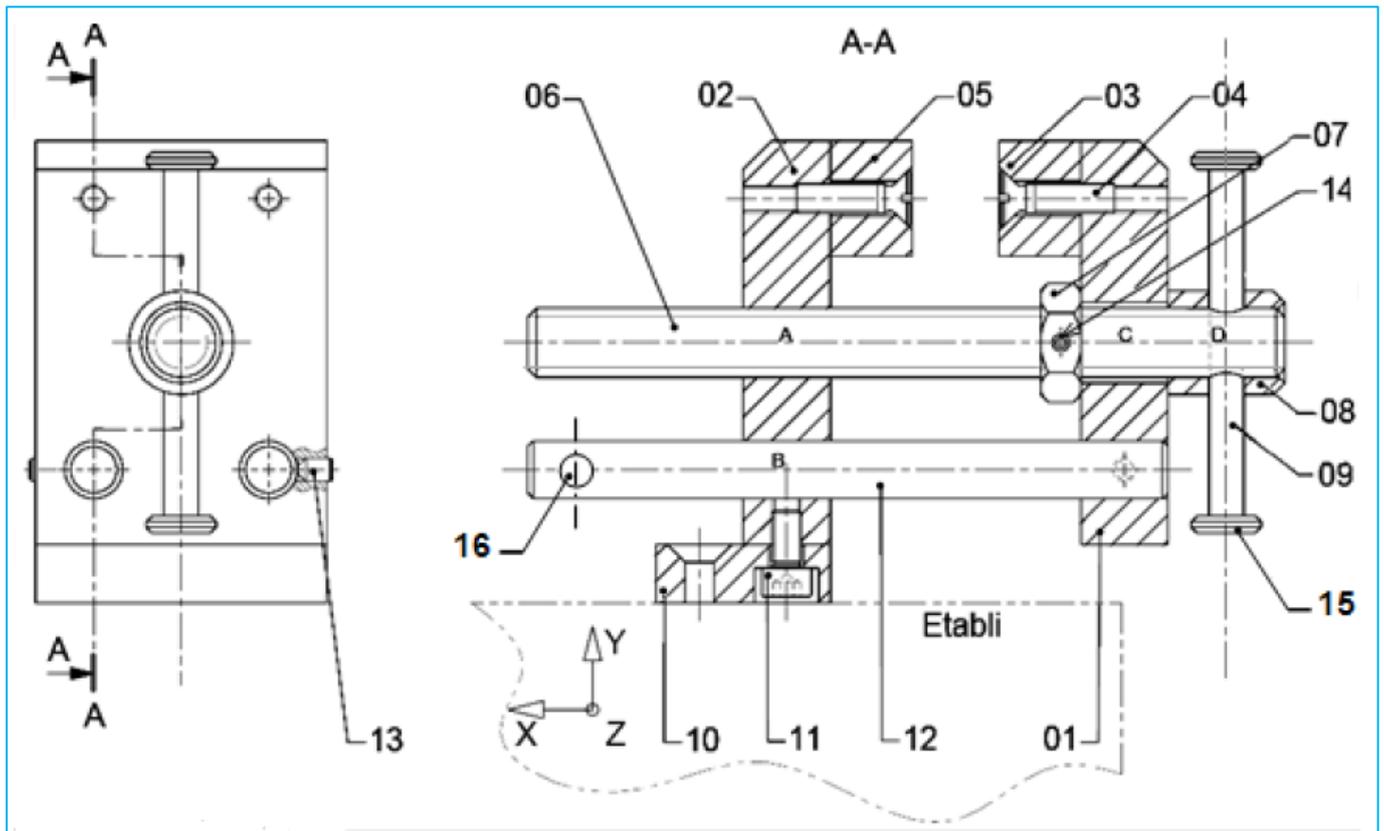
Etablir le schéma cinématique du système selon les 3 étapes.



Perspectives du système



Dessin d'ensemble du système



Exercice 2 : Butée réglable

Cette butée réglable peut être utilisée comme élément dans les montages d'usinage. Elle réalise un contact localisé réglable en position verticale. Pour cela, la **semelle (6)** est fixée sur le montage d'usinage, et le contact avec la pièce à usiner se fait par la **butée (2)**. La position verticale de cette butée est réglée en actionnant la **vis moletée (4)**.

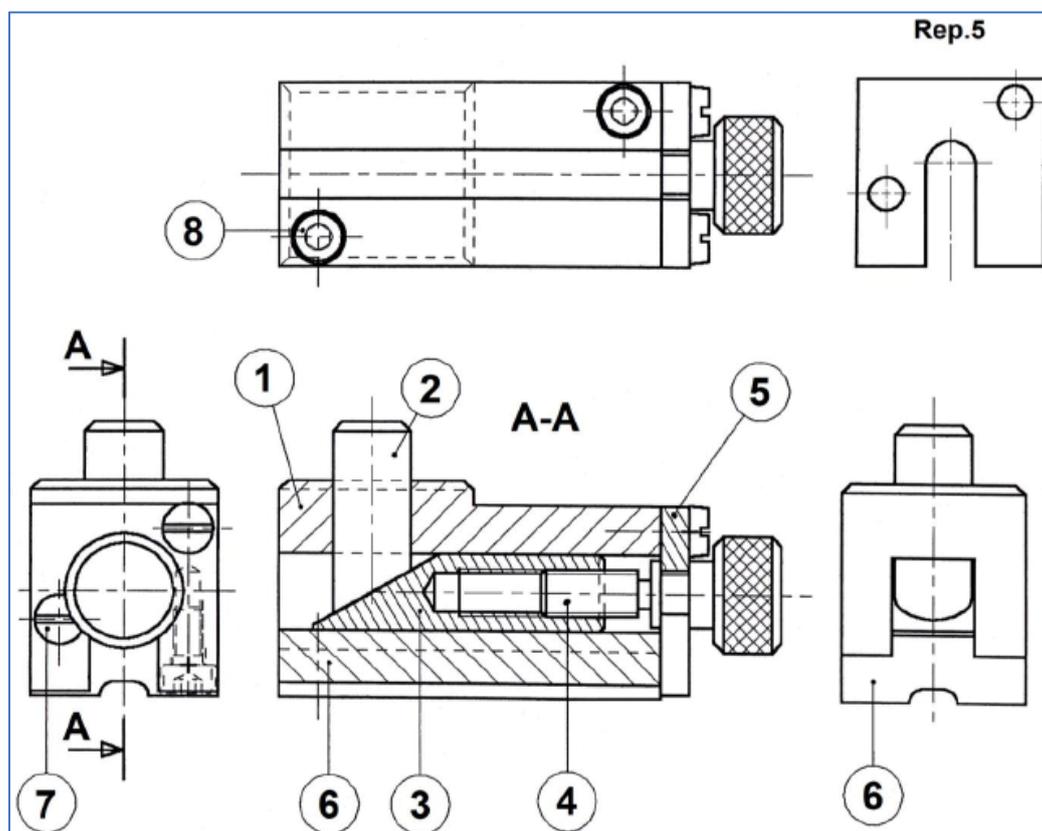
Elle réalise un contact localisé réglable en position verticale. Ainsi :

- La semelle 6 est fixée sur le montage d'usinage et le contact avec la pièce à usiner se fait par la butée (2).
- La position verticale de cette butée (2) est réglable par la vis moletée (4), qui est associée avec le coulisseau (3).
- Ce dernier se déplace le long du corps (1) et la semelle (6).
- À l'autre bout de la pièce, la butée (2), de forme cylindrique, est logée dans un alésage cylindrique du corps (1) ; elle se déplace verticalement pour le serrage de la pièce à usiner.
- Ce déplacement est assuré par le contact plan entre (2) et (3), ainsi que par la forme en biseau de ces 2 surfaces fonctionnelles.

1. Donner le nom de chacune des perspectives de la page suivante, ainsi que leurs rôles et repérer les différentes pièces du système sur ces 2 vues.
2. Colorier les 4 classes d'équivalence sur le dessin d'ensemble de la page suivante, selon le choix suivant :

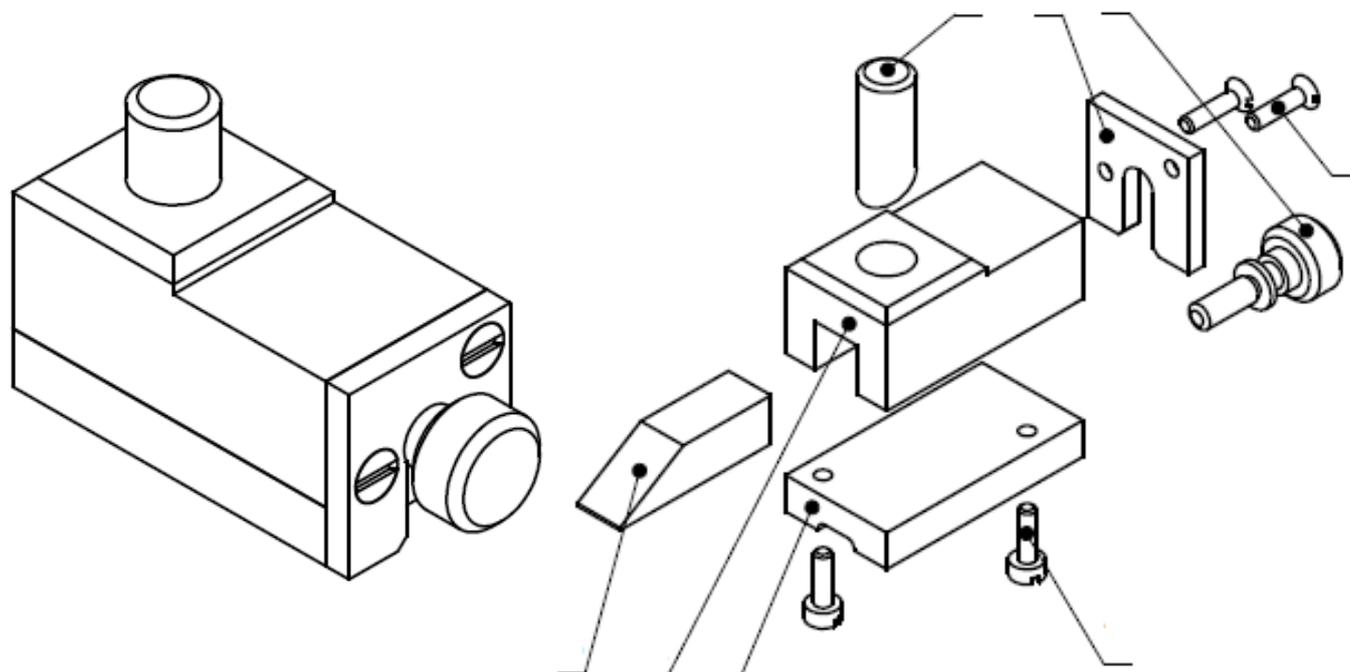
En bleu : S1 = {1,	En vert : S2 = {2,
En jaune : S3 = {3,	En rouge : S4 = {4,
3. Compléter dans la page suivante, le tableau des liaisons avec le nom de la liaison, ainsi que le symbole correspondant, tout en utilisant les couleurs adoptées pour les différentes classes d'équivalence.
4. Etablir le graphe des liaisons du système.
5. Compléter le schéma cinématique du système en respectant les couleurs.

Dessin d'ensemble du système



8	Vis d'assemblage
7	Vis d'assemblage
6	Semelle
5	Couvercle
4	Vis moletée de manoeuvre
3	Coulisseau
2	Butée (borne)
1	Corps
Repère	Désignation

Perspectives du système



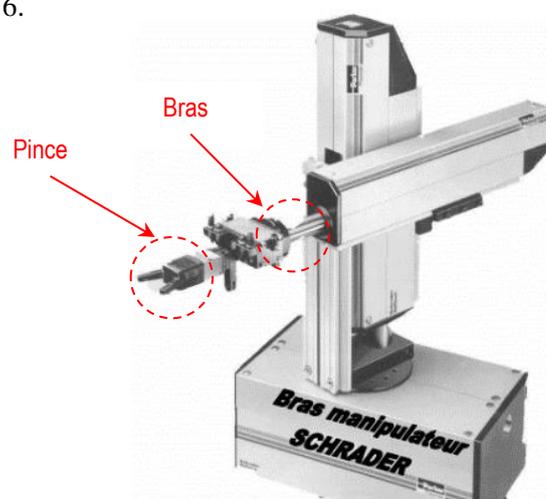
Exercice 3 : Pince pneumatique Schrader

La pince est montée sur le bras d'un robot et est utilisée pour déplacer des pièces d'un point à un autre dans un atelier ou un laboratoire. Elle comprend :

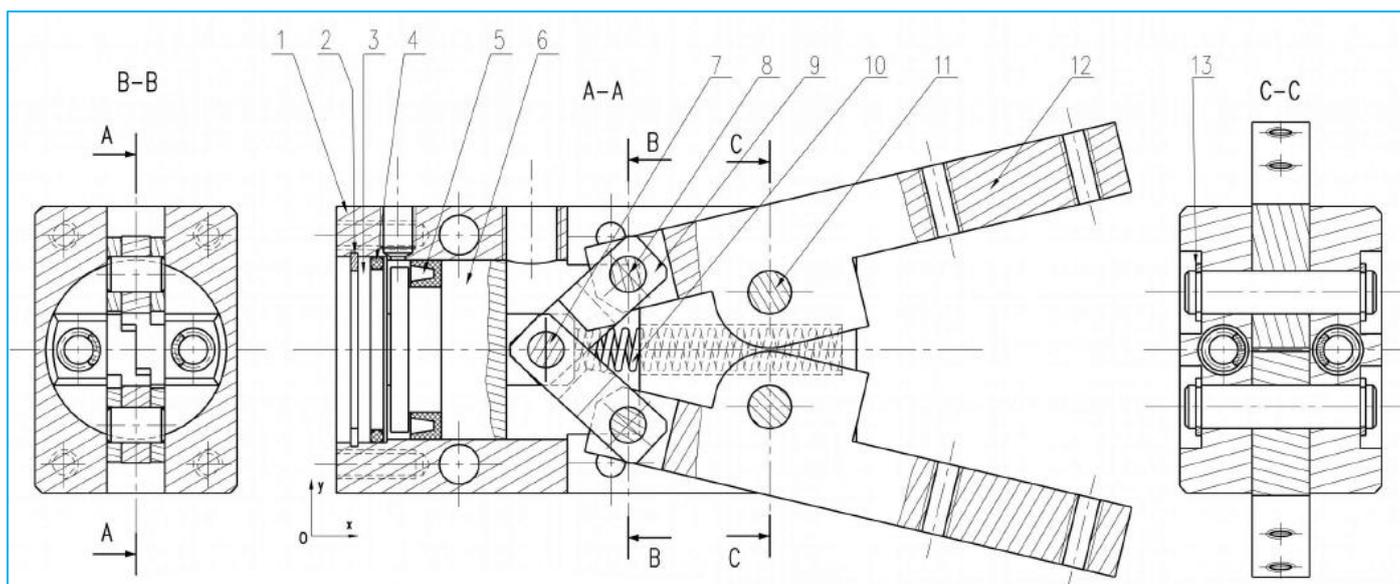
- Un actionneur pneumatique de type vérin simple effet.
- Des transmetteurs de mouvement constitués de biellettes.
- Des effecteurs qui représentent les doigts de la pince.

Le fonctionnement est comme suit :

- Sous l'action de l'air comprimé, le piston 6 se déplace et fait pivoter les doigts 12, par l'intermédiaire des biellettes 9 afin de serrer une pièce.
- La mise à l'échappement du volume d'air coincé entre le piston 6 et le corps 1 permet à la pince de s'ouvrir.
- Cette ouverture est due au retour du piston 6 grâce aux 2 ressorts 10, comprimés lors de la phase de serrage ; les 2 ressorts sont installés en parallèle entre le corps 1 et le piston 6.



13	4	Anneaux élastiques (Circlips)
12	2	Doigts
11	2	Axes des doigts
10	2	Ressorts cylindriques de compression
9	2	Biellettes
8	2	Axes des biellettes
7	1	Axes du piston
6	1	Piston
5	1	Joint à lèvres
4	1	Joint torique
3	1	Couvercle du corps
2	1	Anneau élastique (Circlips)
1	1	Corps
Rep.	Nb.	Désignation



Etablir le schéma cinématique du système selon les 3 étapes.



Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Etau de modélisme

Étape 1 : Identification des classes d'équivalence.

Classe d'équivalence S1

- Les pièces 1 et 3 sont assemblées à l'aide des vis 4 ; les tiges de guidage 12 sont encastrées dans 1 à l'aide des vis sans tête 13.
- Alors $S1 = \{01, 03, 04 (x2), 12 (x2), 13 (x2)\}$.



Classe d'équivalence S2

- Les pièces 2 et 5 sont assemblées à l'aide des vis 4 ; la semelle 10 est aussi assemblée avec 2 à l'aide des vis 11.
- Alors $S2 = \{02, 04 (x2), 05, 10, 11 (x2)\}$.

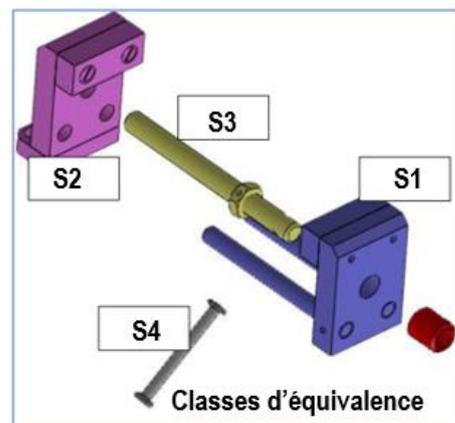
Note : En principe, ici les vis 4 devraient avoir un autre numéro de repère.

Classe d'équivalence S3

- La bague de renfort 8 est encastrée avec la vis de manœuvre 6 par un ajustement serré ; l'écrou 7 est immobilisé avec la vis 6 par la goupille élastique 14.
- Alors $S3 = \{06, 07, 08, 14\}$.

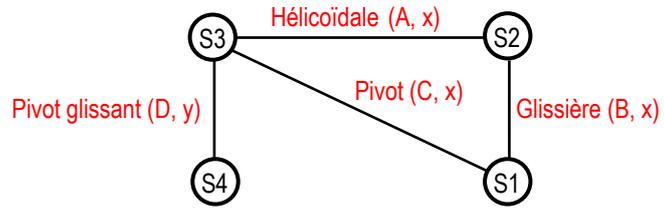
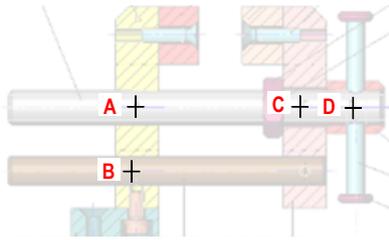
Classe d'équivalence S4

- Les 2 embouts 15 sont solidaires de la poignée 9.
- Alors $S4 = \{09, 15 (x2)\}$

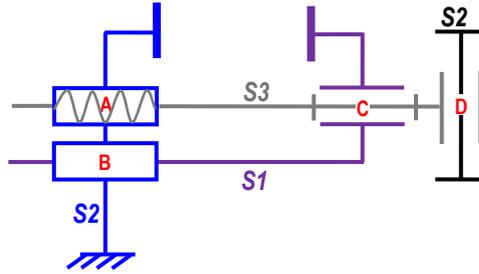


Étape 2 : Etablissement du graphe des liaisons.

CE	CE en liaison	Translations			Rotations			Désignation de la liaison
		TX	TY	TZ	RX	RY	RZ	
S1/S2		1	0	0	0	0	0	Glissière
S1/S3		0	0	0	1	0	0	Pivot
S2/S3		1	0	0	1	0	0	Hélicoïdale
S3/S4		0	1	0	0	1	0	Pivot glissant



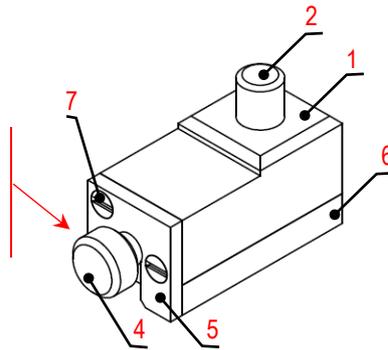
Étape 3 : Construction du schéma cinématique.



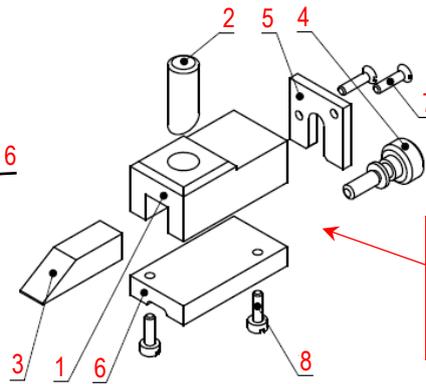
Exercice 2 : Butée réglable

1. Repérage des pièces du système

Perspective isométrique :
Elle donne une bonne idée sur l'ensemble des formes du système.



Perspective éclatée :
Elle aide au montage/démontage d'un système.



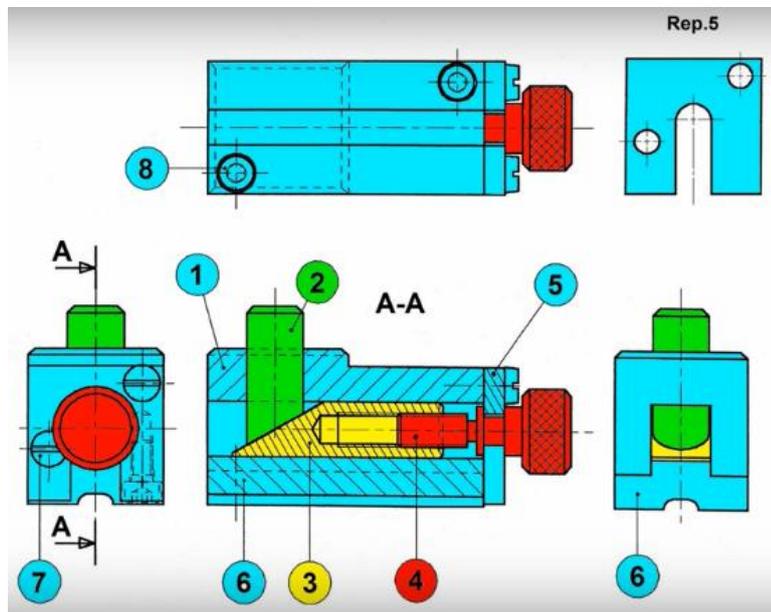
2. Coloriage des classes d'équivalence du système

S1 = {1, 5, 6, 7, 8}

S2 = {2}

S3 = {3}

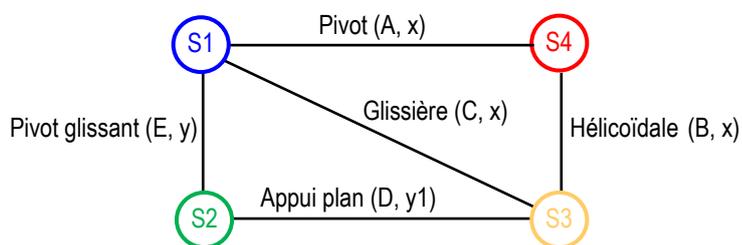
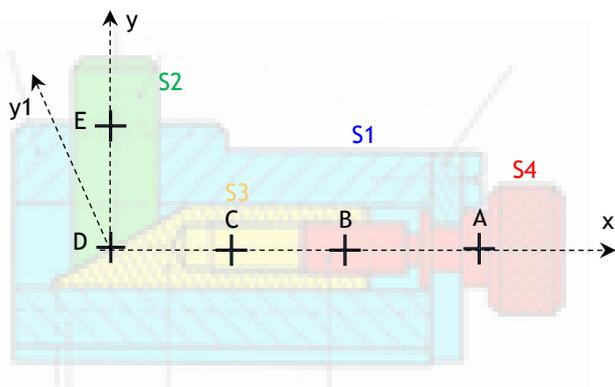
S4 = {4}



3. Tableau des liaisons du système

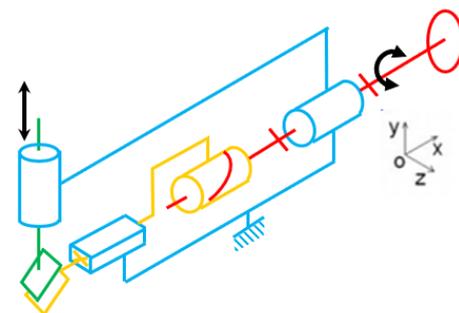
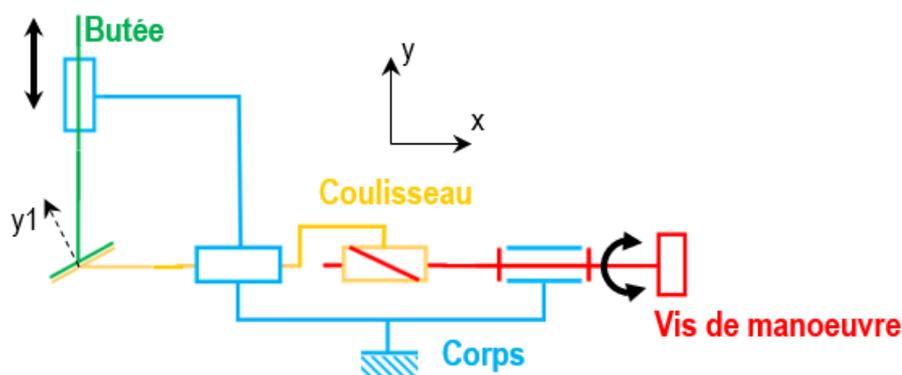
	S1	S2	S3	S4
S1				
S2				X
S3				
S4				

4. Graphe des liaisons du système



5. Schéma cinématique du système

On peut résumer la fonction principale du mécanisme comme suit : transformer un mouvement de rotation autour de l'axe x de la vis de manœuvre, en un mouvement de translation de la butée suivant l'axe y.



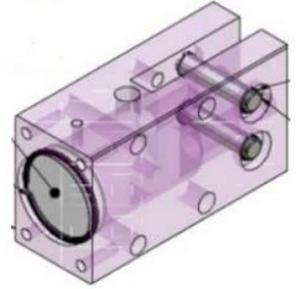


Exercice 3 : Pince pneumatique Schrader

Étape 1 : Identification des classes d'équivalence.

Classe d'équivalence S1 (Corps)

- Le couvercle (bouchon) 3 et le le corps 1 sont montés serrés ; le tout est bloqué en translation par l'anneau 2. Les 2 axes 11 des 2 doigts sont solidaires au corps 1 à l'aide des anneaux élastiques 13. C'est le solide de référence.
- Alors $S1 = \{1, 2, 3, 11, 13\}$.



Classe d'équivalence S2 (Piston)

- L'axe 7 est solidaires du piston 6.
- $S2 = \{6, 7\}$

Classe d'équivalence S3 (Biellette supérieure)

- $S3 = \{2s\}$; s pour supérieure (biellette rouge)

Classe d'équivalence S4 (Biellette inférieure)

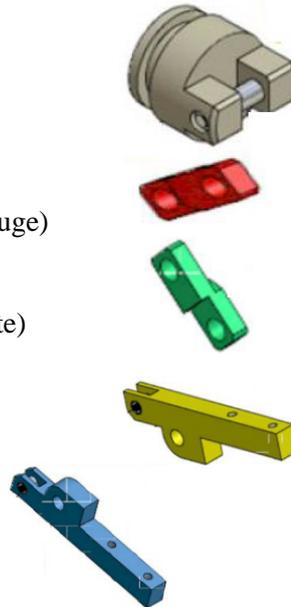
- $S4 = \{2i\}$; i pour inférieure (biellette verte)

Classe d'équivalence S5 (Doigt supérieur)

- $S5 = \{12s\}$

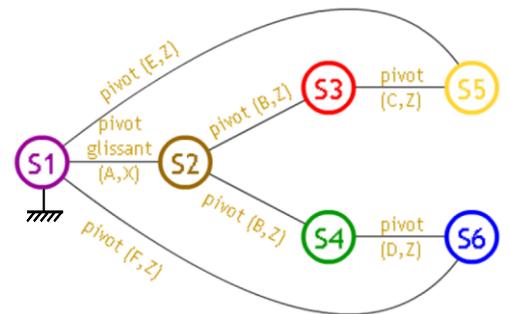
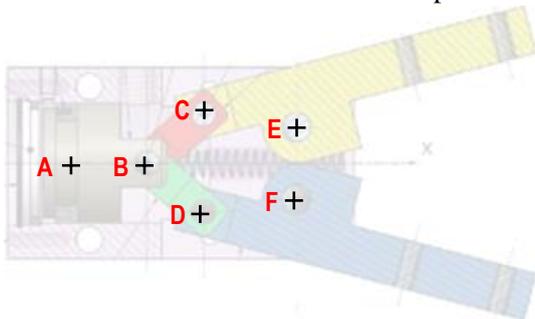
Classe d'équivalence S6 (Doigt inférieur)

- $S6 = \{12i\}$



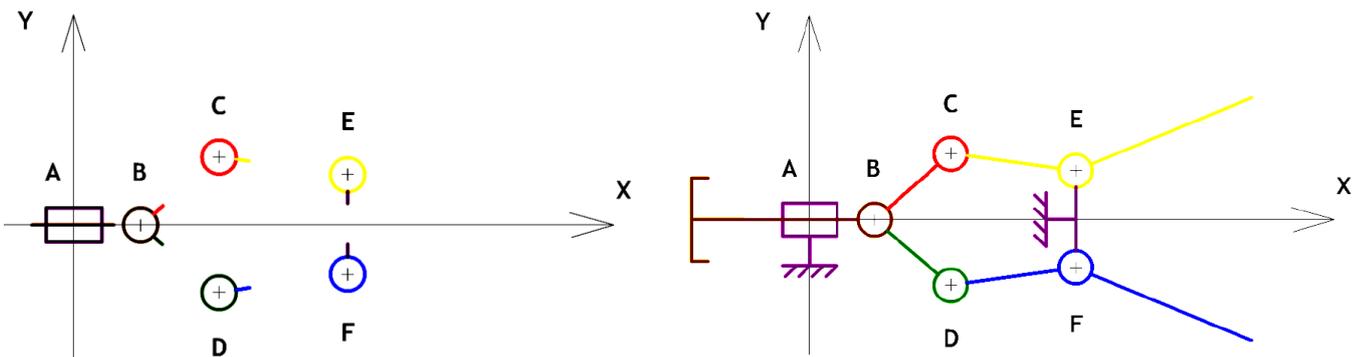
Étape 2 : Etablissement du graphe des liaisons.

En analysant la géométrie des surfaces de contact et les mouvements relatifs entre les différentes CE, on reconnaît et on en déduit la modélisation des liaisons représentée par le graphe de liaisons suivant :



Étape 3 : Construction du schéma cinématique.

On place alors les différentes les liaisons conformément aux repères et les différentes couleurs des différents solides, tout en faisant bien la différence entre contenu et contenant. Enfin, on lie les différents solides, avec un peu d'habillage.





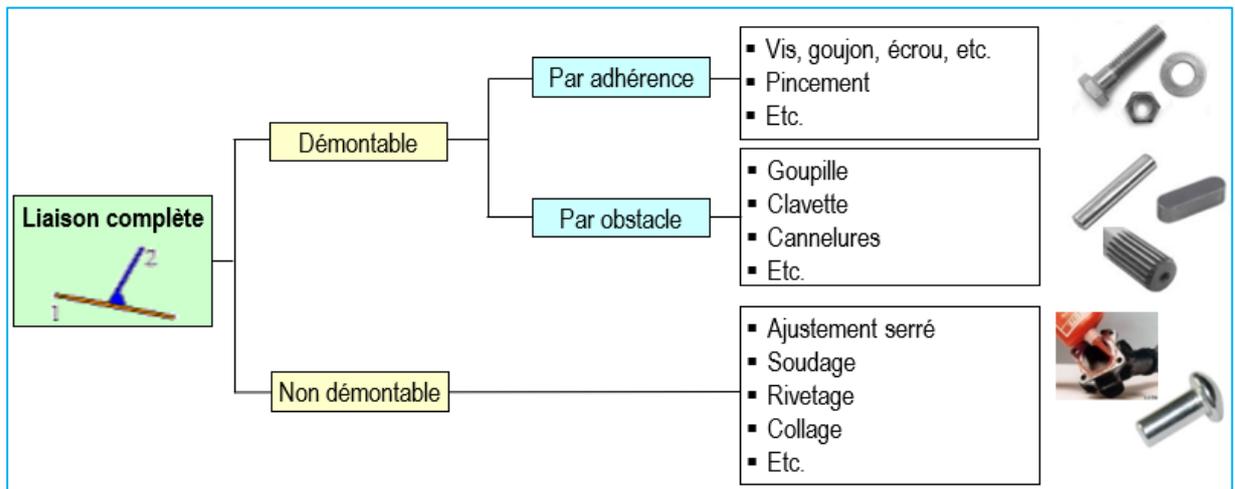
Liaison encastrement : solutions constructives

Définitions

- Les **assemblages mécaniques** représentent les solutions technologiques des liaisons mécaniques, qui ont certains caractères résumés par les **mnémoniques** dans le tableau ci-contre avec explication ci-dessous. Ainsi, une liaison peut être :

<i>c</i>	<i>r</i>	<i>de</i>	<i>a</i>	<i>di</i>
\bar{c}	\bar{r}	\bar{de}	\bar{a}	\bar{di}

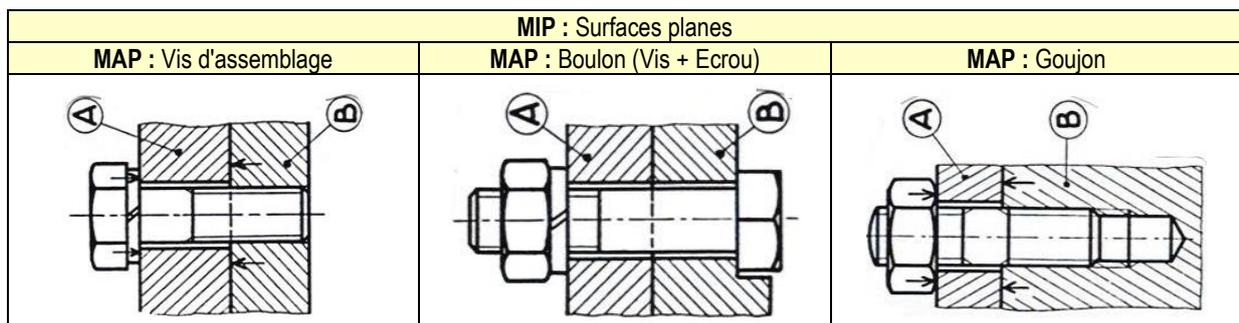
- Complète (*c*)** : Aucun mouvement relatif n'est possible, : **6 degrés de liberté supprimés**.
 - Partielle (\bar{c})** : Certains **mouvements** relatifs sont possibles.
 - Rigide (*r*)** : Aucune pièce de la liaison **n'est déformable**.
 - Elastique (\bar{r})** : Une ou **plusieurs** pièces de la liaison sont déformables comme un ressort par exemple.
 - Démontable (*de*)** : La **séparation** et la réutilisation des pièces **sans détérioration** est possible.
 - Non démontable (\bar{de})** : La **séparation** des pièces ne peut se faire sans la **destruction** de la liaison.
 - Par adhérence (*a*)** : Le **phénomène** de frottement (**adhérence**) s'oppose au démontage de la liaison.
 - Par obstacle (\bar{a})** : La rupture d'un **obstacle** est nécessaire pour provoquer la suppression de la liaison.
 - Directe (*di*)** : Les pièces liées participent **directement** à la liaison.
 - Indirecte (\bar{di})** : Les pièces liées nécessitent un **élément intermédiaire** pour assurer la liaison.
- 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.



Liaison démontable

Par éléments filetés

- Les 2 solides sont serrés fortement l'un contre l'autre, notamment avec les vis d'assemblage, les boulons, les goujons et les vis de pression.

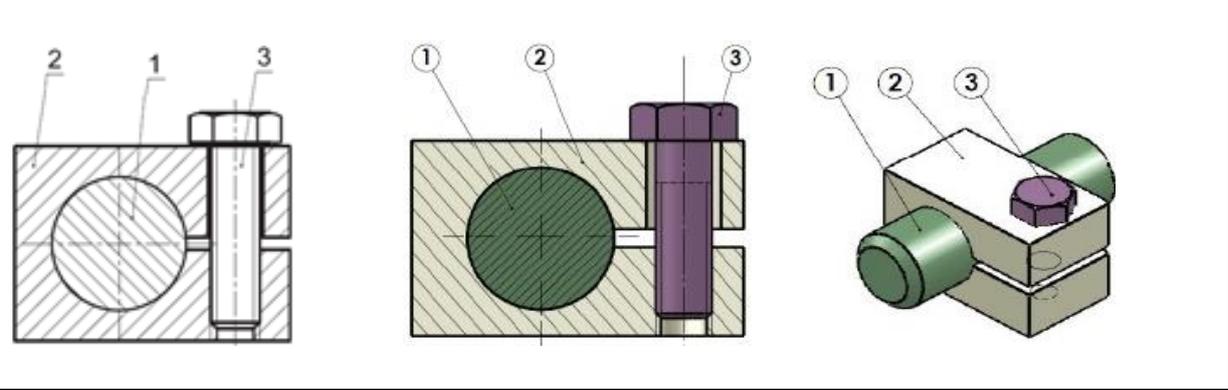


Par pincement

- Le principe consiste à serrer la pièce 1 (arbre) par la pièce 2 (Moyeu fendu) qui **se déforme** sous l'effet de serrage par la vis 3.

MIP : Surfaces cylindriques

MAP : Pincement par boulon ou vis d'assemblage Pincement

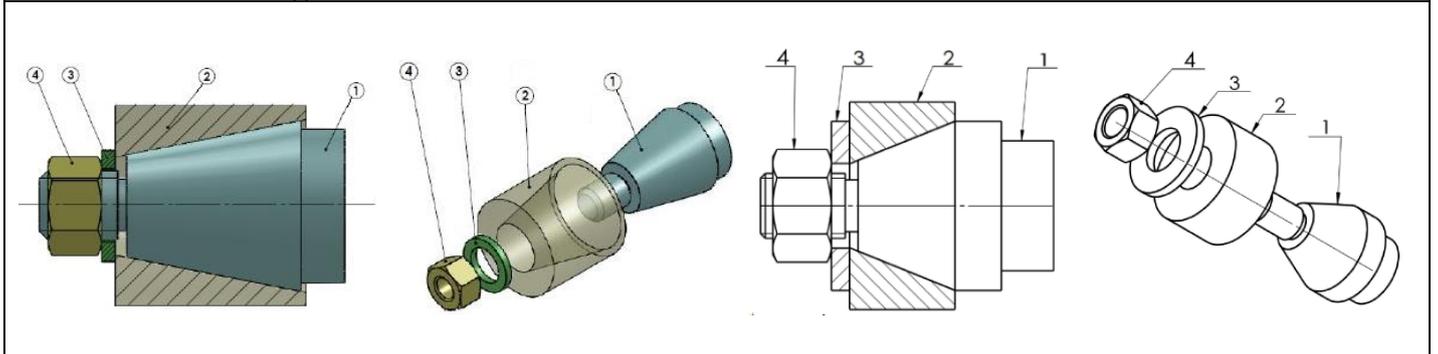


Par emmanchement conique et écrou

- L'effort d'**emboîtement** des 2 pièces coniques 1 et 2 provoque le **coincement**, ce qui crée l'**adhérence**.

MIP : Surfaces coniques

MAP : Ecrou + Rondelle d'appui + cone



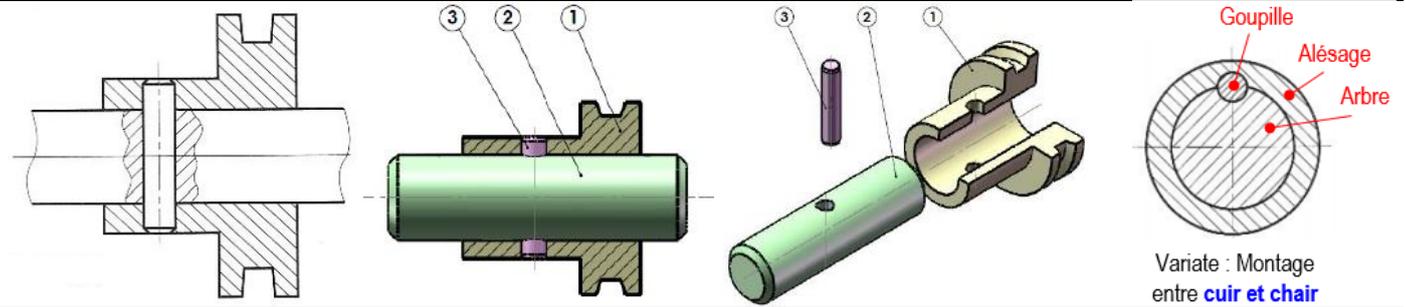
Par Goupille (Gouillage)

- Une goupille est un organe de liaison simple d'un composant par rapport à un autre ; on trouve :
 - La goupilles d'arrêt** pour l'immobilisation des 2 composants.
 - La goupilles de positionnement ou de centrage** pour le positionnement ou le centrage des 2 composants.
- La goupille est **montée serrée** dans un trou cylindrique traversant les 2 pièces. Elle travaille le plus souvent au cisaillement, ce qui protège le mécanisme en cas d'anomalie de surcharge (**sécurité**).



Goupille cylindrique	Goupille conique	Goupille cannelée	Goupille élastique
<p>Elle exige des usinages avec des ajustements très précis</p>	<p>La forme conique permet le maintien de la goupille dans son logement par coincement</p>	<p>Le plus souvent, 3 cannelures à 120°, assurent le maintien par déformation élastique.</p>	<p>Obtenu par enroulement d'une tôle d'acier, elle se maintient dans son logement par déformation élastique.</p>

MIP : Surfaces cylindriques
MAP : Goupille

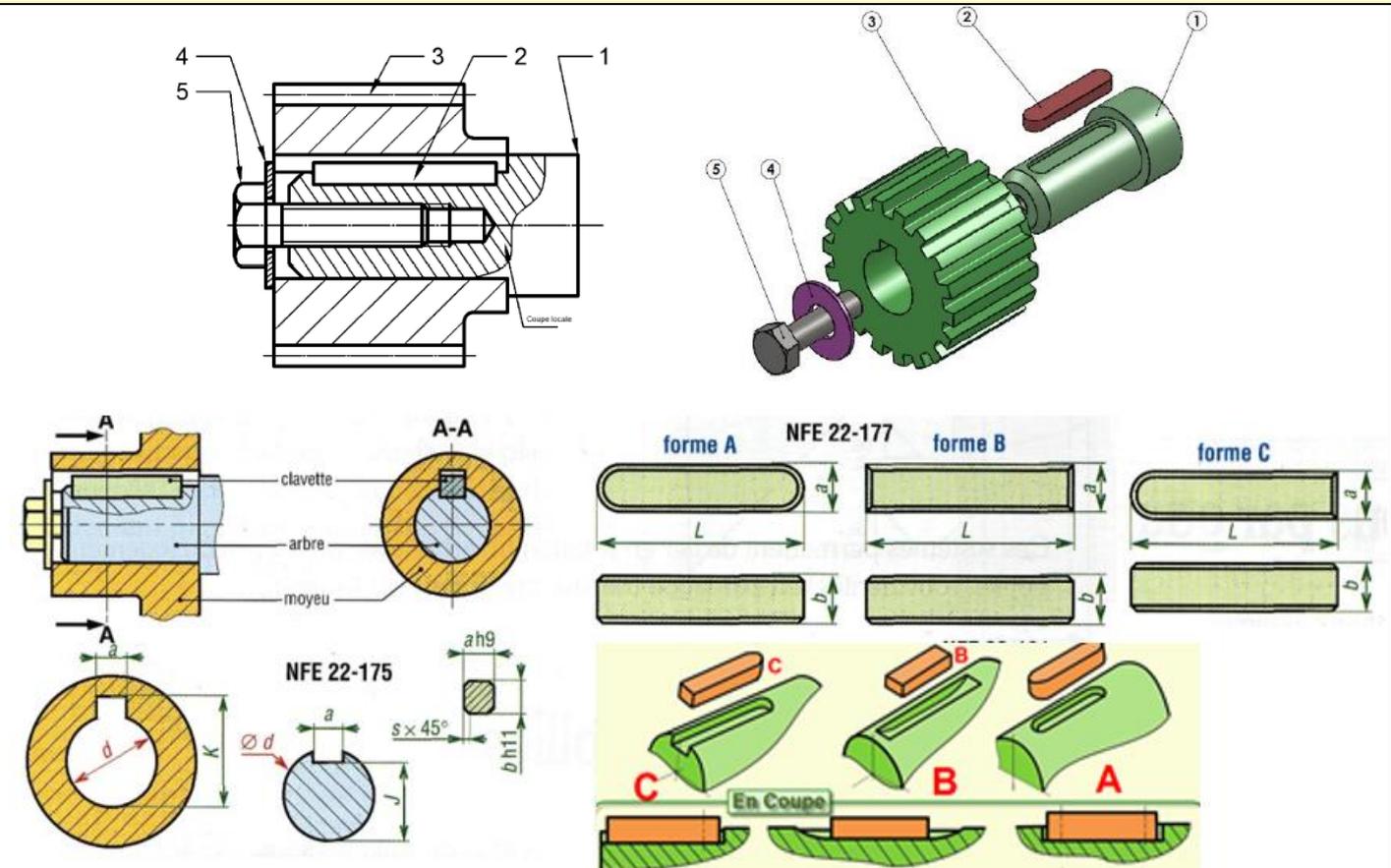


Par Clavette (Clavetage)

- Une clavette est une simple pièce mécanique qui a pour fonction de lier en rotation 2 pièces (arbre et moyeu). Elle se loge dans la mortaise ou rainure du moyeu (alésage) et la rainure de l'arbre.
- Elle peut être dimensionnée pour se rompre par cisaillement lorsque le couple transmis est trop important (**sécurité**).
- Dans une liaison Encastrement, la clavette est **accompagnée d'autres éléments** notamment les vis, écrous, les rondelles et les anneaux élastiques (circlips), pour les arrêts en translation.
- Dans l'exemple d'illustration suivant, on utilise une vis pour le serrage et donc l'arrêt en translation de l'arbre, qui a un perçage taraudé dans son embout, pour recevoir la vis de serrage accompagné d'une rondelle.



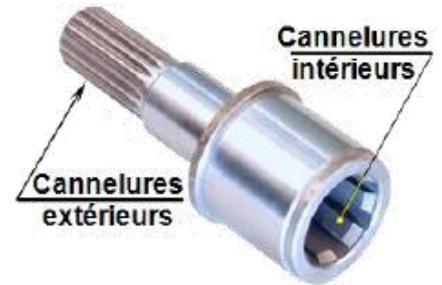
MIP : Surfaces cylindriques + Surface planes + Clavette
MAP = Rondelle + Vis



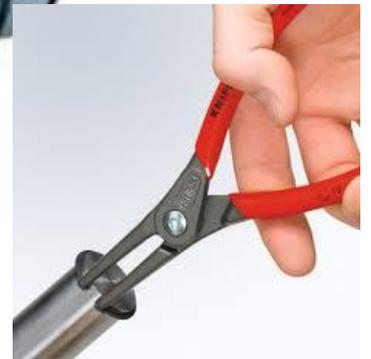
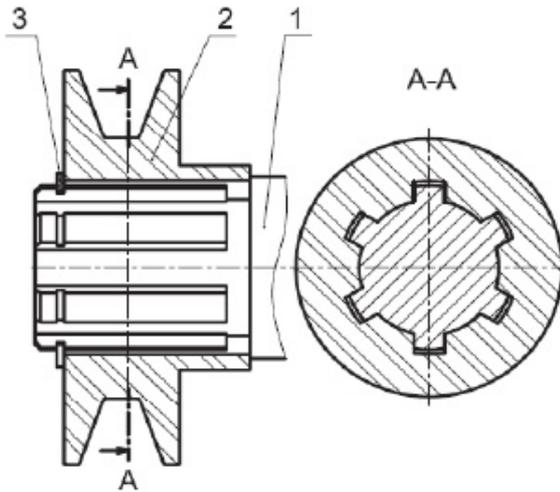
- L'assemblage arbre-clavette-alésage est tel que :
 - La clavette est **montée serrée sur l'arbre**.
 - La clavette est **montée glissante sur l'alésage**.

Par Cannelures

- Une cannelure est un sillon creusé dans un matériau. Sur une pièce mécanique de révolution cannelée, chacune des rainures longitudinales (sillons) régulièrement réparties sur la circonférence, permettent de réaliser un **accouplement** avec une pièce complémentaire munie de cannelures analogues.
- Les cannelures permettent des **efforts plus importants** que les clavettes et goupilles.

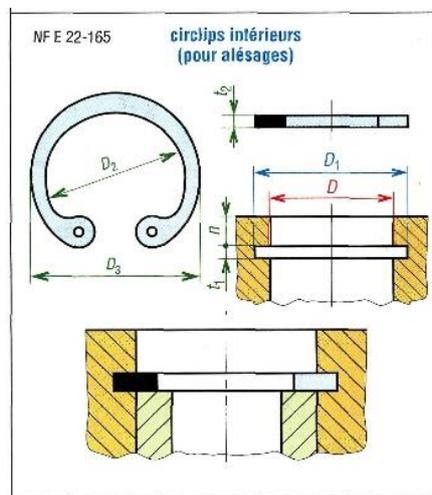
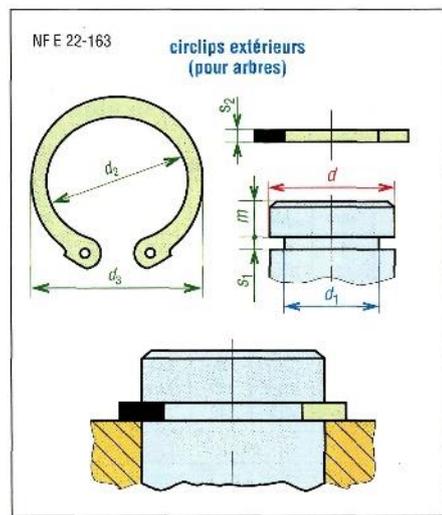


MIP : Surfaces cylindriques + Surfaces planes
MAP : Anneau élastique



Anneaux élastiques :

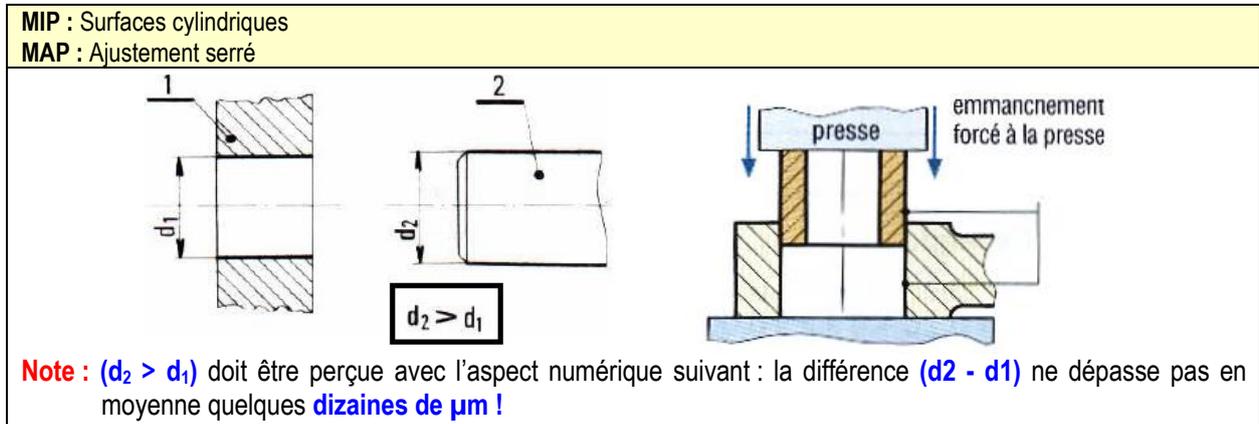
- Les anneaux élastiques sont des composants **d'assemblage mécanique**.
- Ils permettent la **fixation axiale ou l'épaulement** d'éléments de machines sur des arbres ou dans des alésages ; ils permettent alors les arrêts en translation.
- Ils ont la forme d'anneaux fendus dont **l'élasticité** permet le montage et le maintien en position après assemblage. Ils se montent avec des pinces spéciales.
- Ils sont couramment appelés « **circlips** » du nom d'une marque de fabricant.



Liaison non démontable

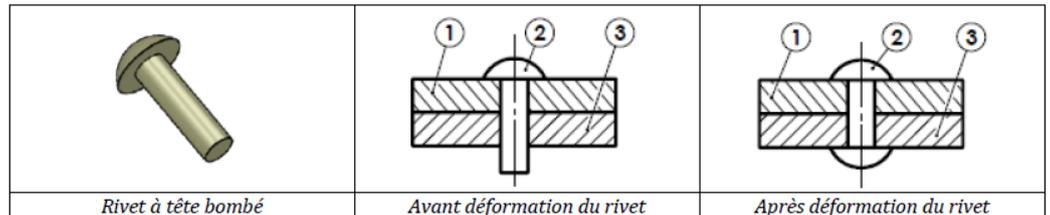
Emmanchement forcé

- Cette technique permet de réaliser une liaison encastrement non démontable par adhérence entre 2 pièces généralement cylindriques, montées 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 2 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.

Rondelle à dents (éventails)	Rondelle élastique (Grower)	Contre-écrou
<p>Les dents de la rondelle sont incrustées dans les pièces assemblées. L'incrustation permet également un meilleur contact électrique.</p>	<p>Les rondelles Grower présentent une coupure et sont déformées de manière à empêcher un desserrage du montage par incrustation.</p>	<p>Les jeux dans les filets de l'écrou principal sont annulés par le serrage de l'écrou secondaire (contre-écrou). La cause du desserrage a été relativement supprimée.</p>

Freinage par obstacle

- Cette solution représente une **sécurité absolue**, puisque le desserrage est définitivement supprimé ; parmi les solutions très courantes, on trouve :

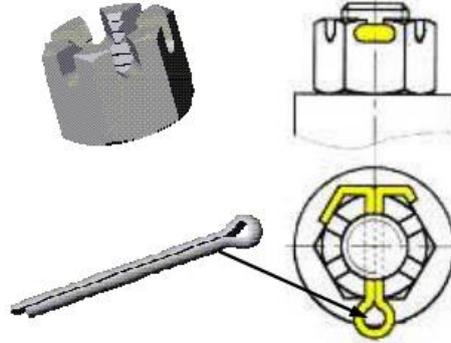
Écrou à encoches et rondelle frein

La **rondelle frein** à languette se loge, via la languette interne dans une rainure sur l'arbre. Une des languettes externes est rabattue dans une **encoche de l'écrou**. Ainsi, l'écrou à encoches associé à la rondelle frein, qui lie en rotation l'écrou et l'arbre ; si l'écrou tend à se desserrer, il devrait aussi faire tourner l'arbre, ce qui ne serait pas possible.

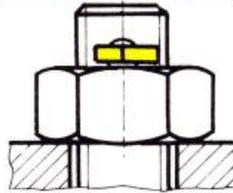


Par goupille V

A TRAVERS L'ECROU (écrou à créneaux)

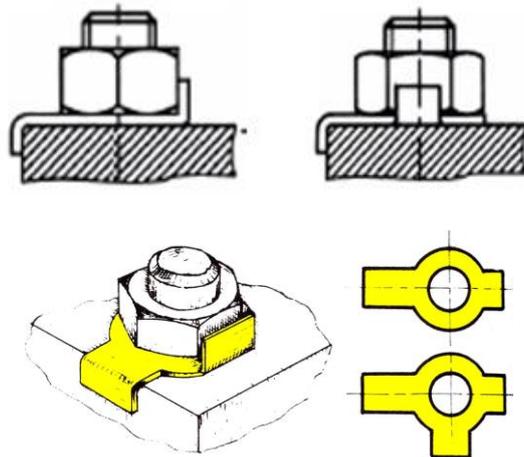


DERRIERE L'ECROU



L'écrou hexagonal muni de créneaux, est associé à une goupille fendue de **type V** montée sur un trou usiné dans l'arbre, ce qui assure un freinage absolu.

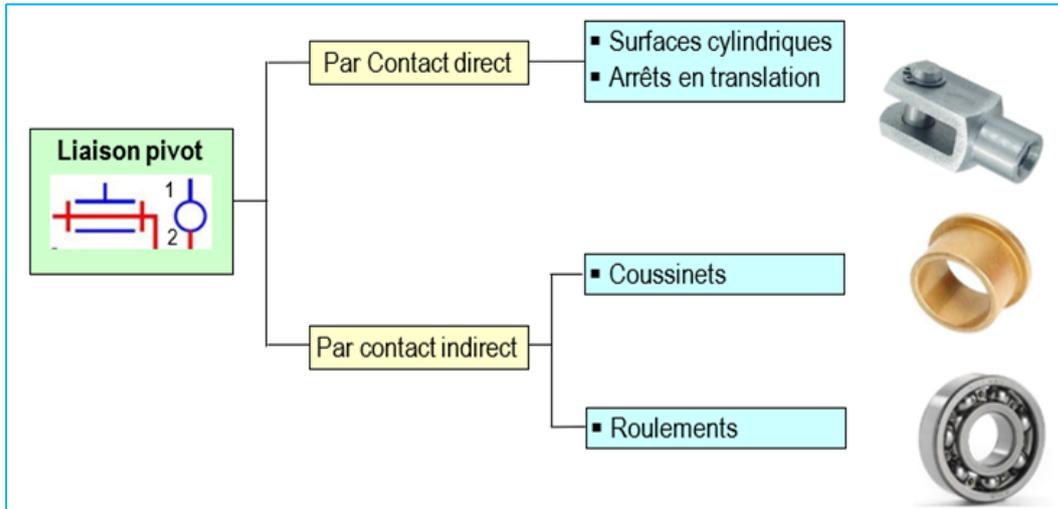
Plaquette arrêtoir à ailerons



C'est un frein en plaque de tôle à 2 ailerons, dont l'un est plié sur une des faces de l'écrou et l'autre sur une des faces de la pièce.

Liaison pivot : solutions constructives

- La solution constructive qui réalise une liaison pivot est appelée **guidage en rotation**. On retrouve cette fonction technique dans de nombreux cas : arbres de moteurs, roues de véhicules, hélices d'avions, etc.



Guidage en rotation par contact direct

- Le guidage est obtenu à partir du **contact direct** entre 2 surfaces cylindriques.
- Cette solution est d'un coût peu élevé, mais elle présente des frottements importants qui limitent ses possibilités d'utilisation à de faibles vitesses et à des efforts transmissibles modérés.

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

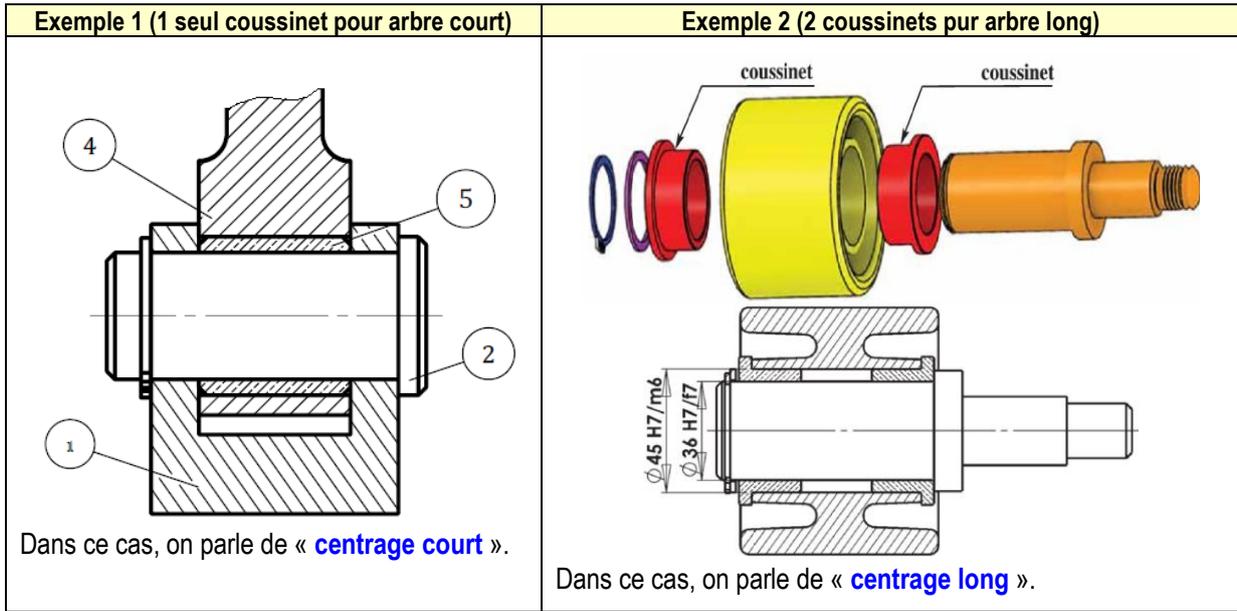
- Les coussinets sont des bagues cylindriques généralement en **bronze**. De nature **porreuse**, par le procédé de fabrication (**frittage**), elle retient l'huile lubrificateur dans une proportion de **25 %** de son volume. La rotation de l'arbre crée une aspiration de l'huile et crée un film d'huile entre la bague et l'arbre, ce qui améliore le glissement.
- Le coussinet **est monté serré dans l'alésage et l'arbre est monté glissant dans le coussinet**.
- Un montage à coussinets permet donc de diminuer le coefficient de frottement, diminuer le bruit et augmenter la durée de vie.

Bague pour charge radiale

Bague pour charge radiale et axiale

Bague à collerette Bague ordinaire

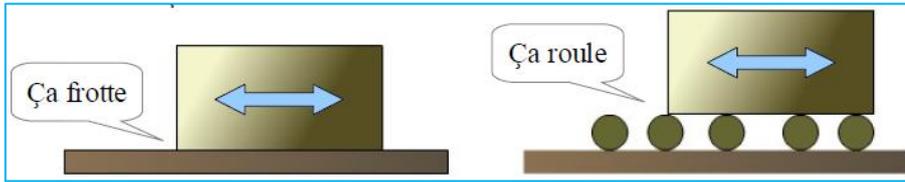
Une bague à **collerette** permet de supporter les efforts axiaux de l'arbre.



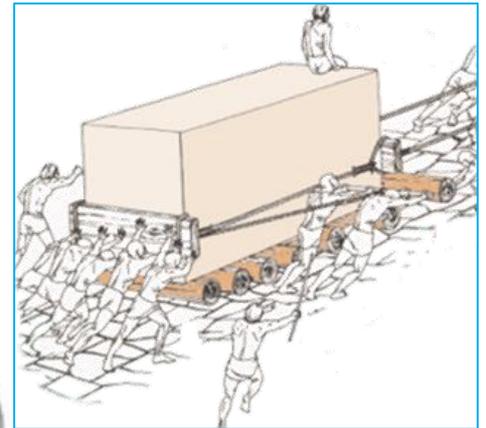
Guidage en rotation par contact indirect à l'aide de roulement

Principe

- On remplace le frottement de glissement par du frottement de roulement.

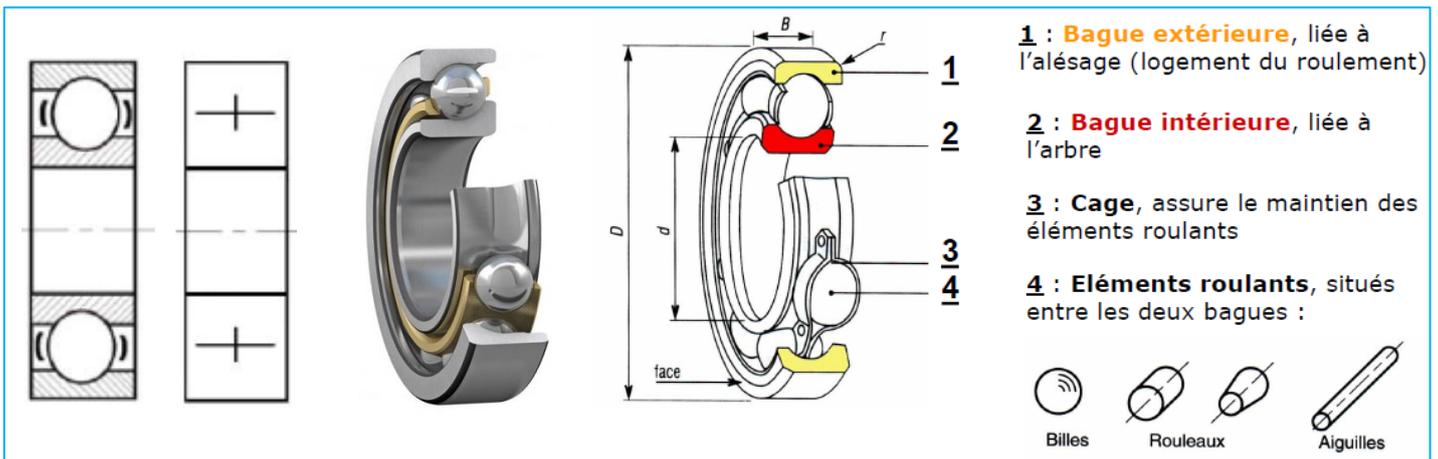


- Cela revient à interposer entre un arbre et un moyeu un élément roulant appelé « **roulement** », qui sert pour le guidage tout en supportant les charges extérieures.



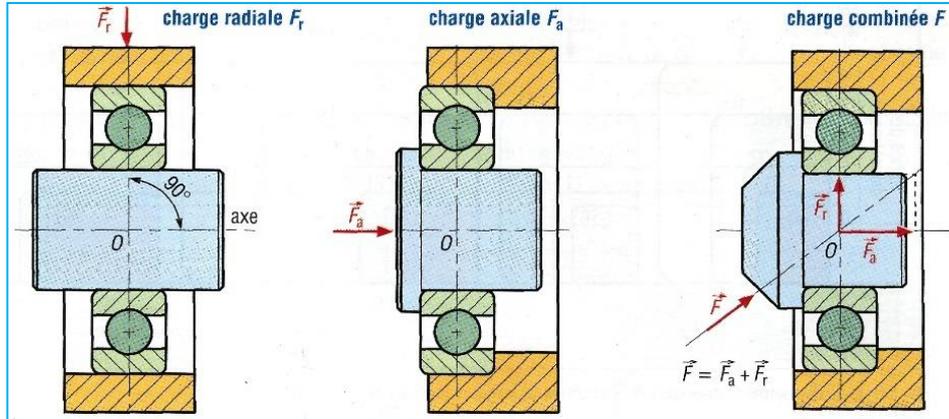
Constitution

- 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 (type BC)**, qui est le plus courant et le plus économique.



Types de charges supportées

- Parmi les critères de choix d'un roulement, il y a les **charges supportées** qui sont des 3 types suivants :



Principaux critères de choix d'un roulement

Principaux types de roulement	Symbole	Charges admissibles			Aptitude à la vitesse
		radiale	axiale	combinée	
A une rangée de billes à contact radial		**	* ↔	** ↔	****
A une rangée de billes à contact oblique		**	** ←	*** ←	***
A deux rangées de billes à contact oblique		***	** ↔	*** ↔	**
A rouleaux cylindriques		****	0	0	****

Légende

**** : Très élevé

*** : Elevé

** : Modéré

* : Passable

0 : Nul

- On peut donc classer les roulements en **3 catégories** :

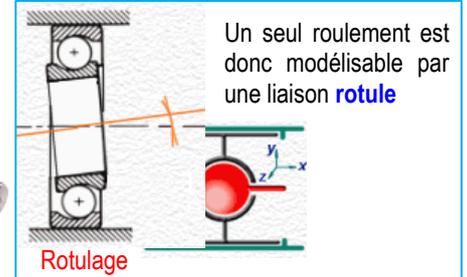
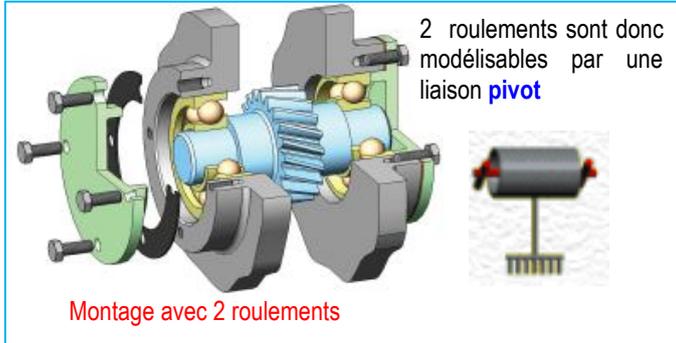
- Les roulements **radiaux** qui supportent mieux les charges radiales (**objet d'étude principale**).
- Les roulements **obliques et coniques**, qui supportent mieux les 2 types de charge.
- Les roulements axiaux ou **butées**, qui supportent mieux les charges axiales.





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.

En effet, la bague serrée est en contact avec l'élément roulant et se comporte comme un prolongement de la partie tournante : la bague serrée fait partie de la classe d'équivalence de la partie tournante.

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

En effet, cela permet un déplacement axial pour un **montage facile**. En plus, pour un bon fonctionnement, un réglage optimal est nécessaire pour garder un jeu de fonctionnement compensant les éventuelles dilatations des arbres. Dans ces conditions, on parle de **précharge**, sorte de charge axiale initiale donnée aux roulements.

- On a alors les 2 cas suivants :

Montage arbre tournant	Montage alésage tournant
<ul style="list-style-type: none"> La bague intérieure est ajustée serrée La bague extérieure est ajustée glissante 	<ul style="list-style-type: none"> La bague intérieure est ajustée glissante La bague extérieure est ajustée serrée

Règle 2 : Arrêts en translation des bagues

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

En effet, un ajustement serré est, à lui seul, en général insuffisant pour immobiliser axialement une bague de roulement sur une portée cylindrique.

Arbre tournant	Alésage tournant
<p>Les différentes configurations pour les arrêts axiaux présentées dans ce tableau, indiquent uniquement le principe et ne donnent pas de solutions technologiques ; de telles solutions présentées dans la page suivante.</p>	

Exemples

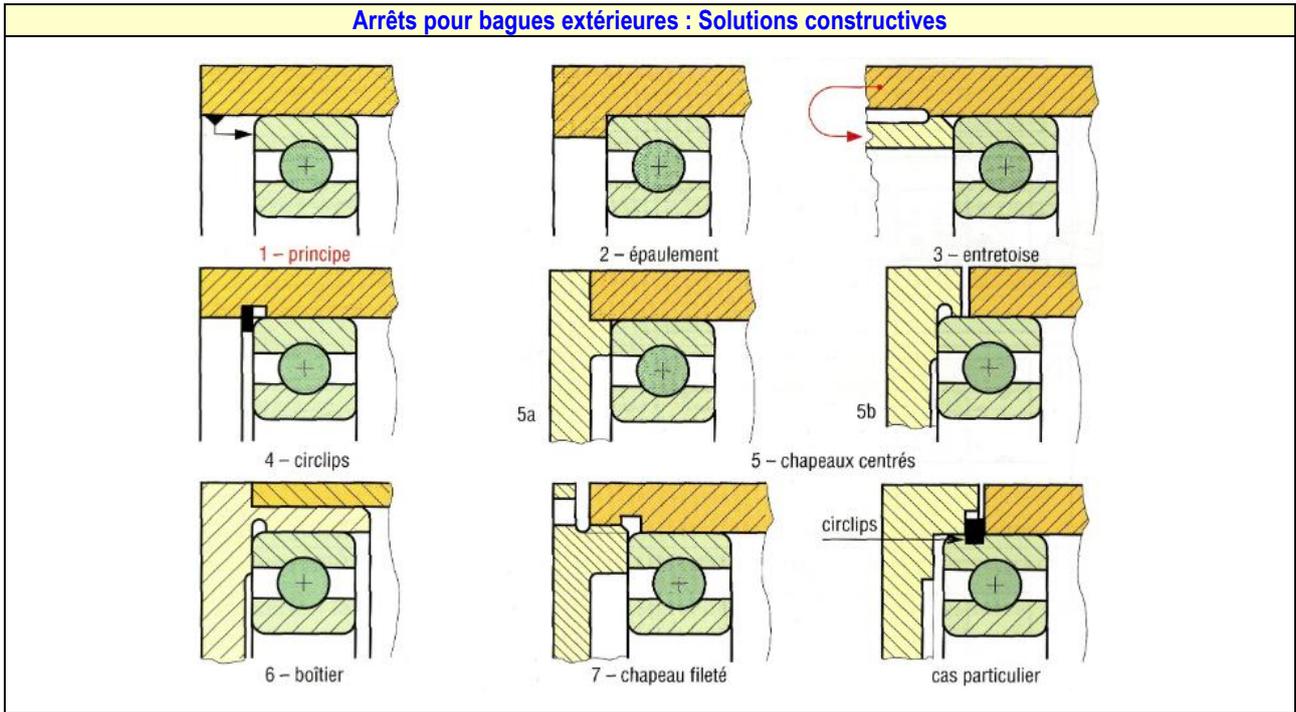
Arbre tournant	Alésage tournant
<p>Exemple</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les bagues intérieures sont arrêtées axialement par l'écrou frein (7), une entretoise (4) et l'épaulement de l'arbre (2). • Les bagues extérieures sont arrêtées axialement par l'épaulement du bâti (1) et le couvercle (3) serré contre le bâti par les vis (8). • Le jeu J2 est prévu pour une éventuelle dilatation de l'arbre avec les efforts et la température. 	<p>Exemple</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les bagues extérieures sont arrêtées axialement par le chapeau (5) vissé avec (9), l'entretoise (11) et un épaulement usiné à l'intérieur de la poulie (12). • L'arrêt des bagues intérieures est assuré par un écrou frein (6) et un épaulement usiné sur l'arbre (1).

Arrêts pour bague intérieures : Solutions constructives

Permet de régler la précharge

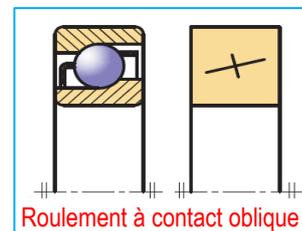
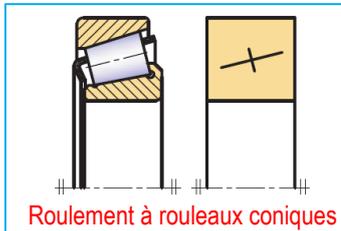
1 – principe 2 – écrou à encoches 3 – circlips

4 – épaulement d'arbre 5 – entretoise 6 – bague en deux parties



Cas des roulements à contact oblique et à rouleaux coniques

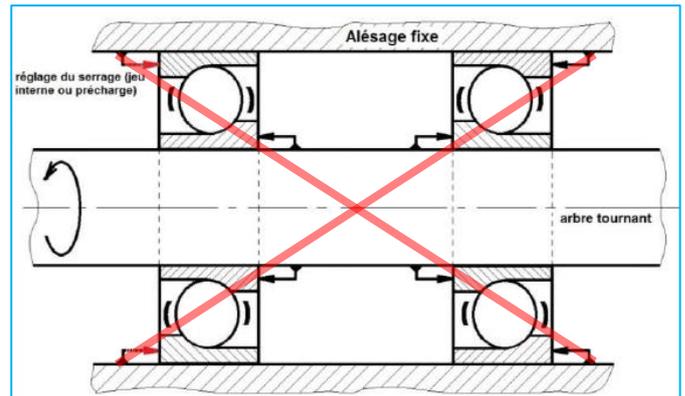
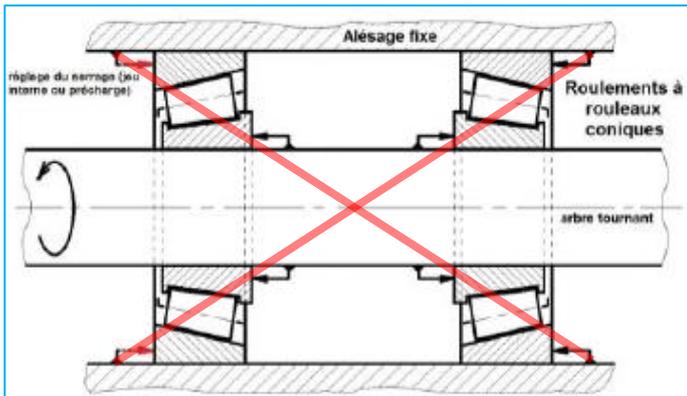
- Ces roulements supportent des **charges axiales** relativement importantes dans un seul sens et des charges axiales et radiales combinées ; ils doivent être montés par **paire et en opposition**.



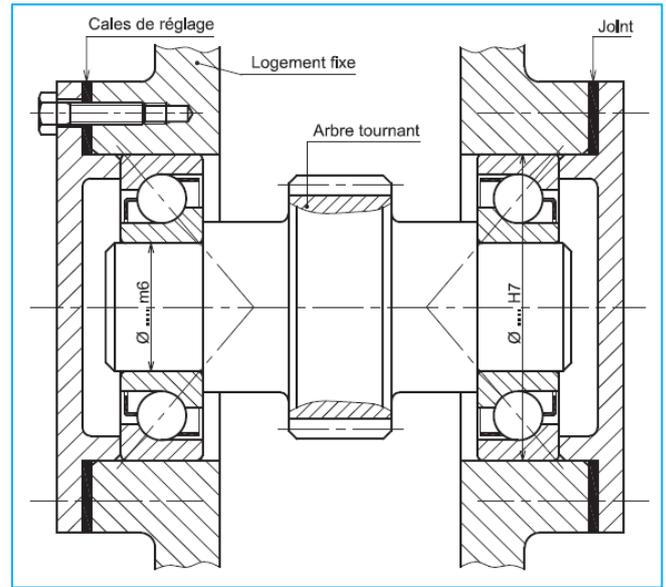
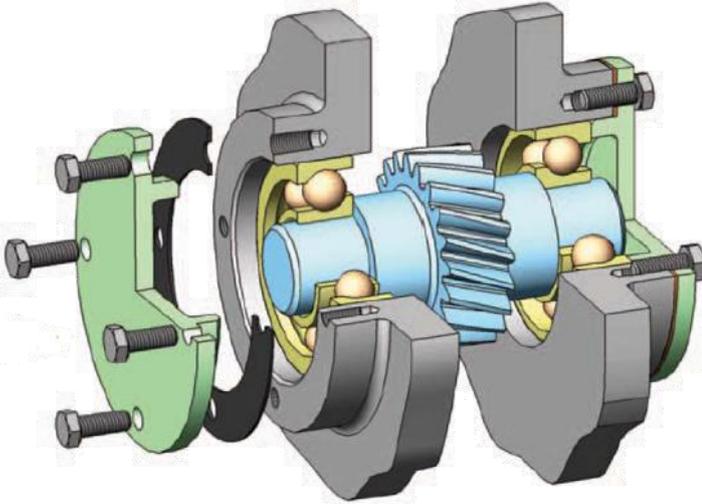
- Pour ces types de roulement, les montages les plus utilisés sont dits montage en « X » et montage en « O ».

Le montage en X

- Dans ce montage, les **perpendiculaires** aux chemins de roulement dessinent un « X » ou encore les **arrêts axiaux** sur les bagues forment un « X », ce qui est le cas de la figure d'illustration ci-dessous.
- Ce type de montage est utilisé :
 - Habituellement** dans le cas des **arbres tournants** avec organes de transmission comme un engrenage situé entre les 2 roulements.
 - Lorsque l'écart entre les 2 roulements est faible (**arbre court**).

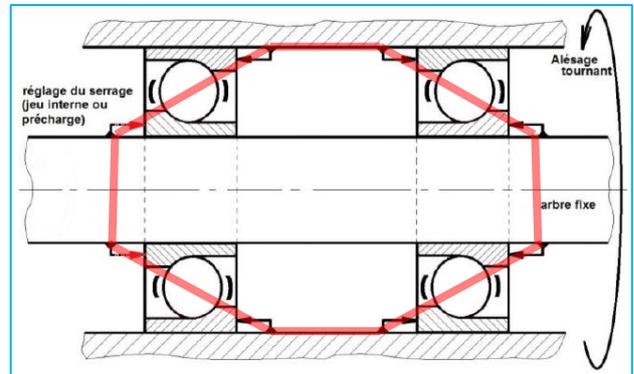
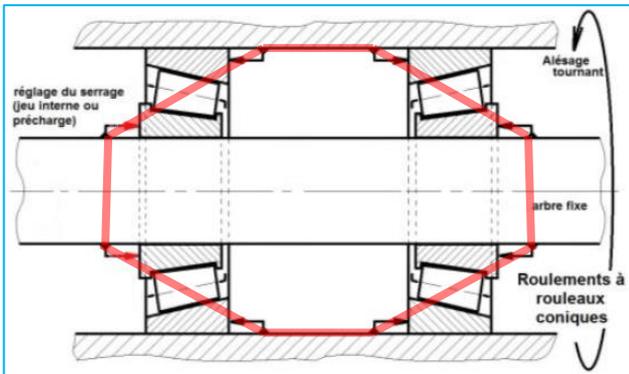


Exemple :

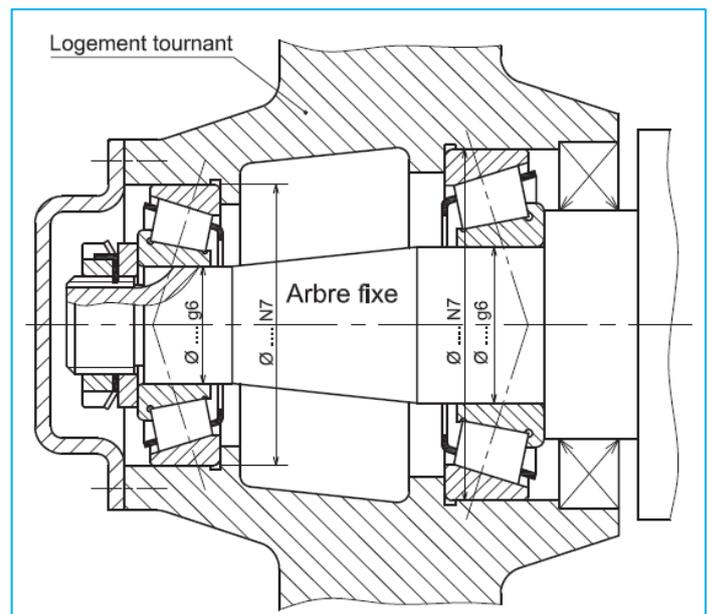
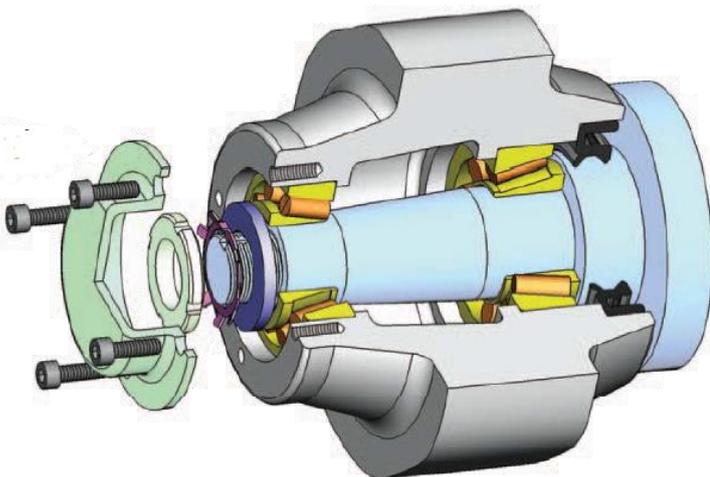


Le montage en O

- Dans ce montage, les **perpendiculaires** aux chemins de roulement dessinent un « O » ou encore les **arrêts axiaux** sur les bagues forment un « O », ce qui est le cas de la figure d'illustration ci-dessous.
- Ce type de montage est utilisé :
 - Habituellement** dans le cas des **moyeux tournants**.
 - Lorsque l'écart entre les 2 roulements est important (**arbre long**).

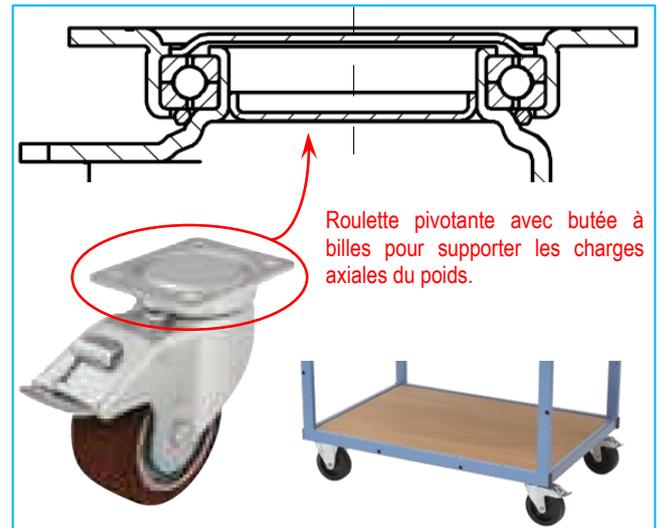
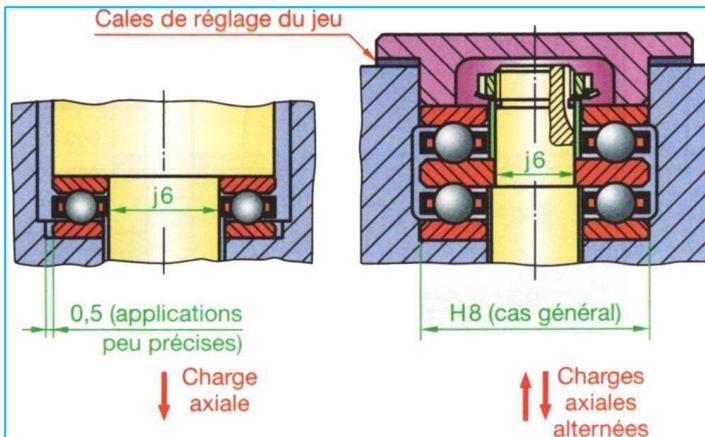
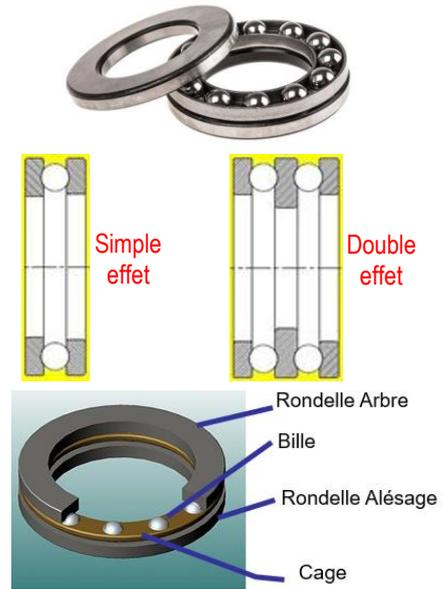


Exemple :



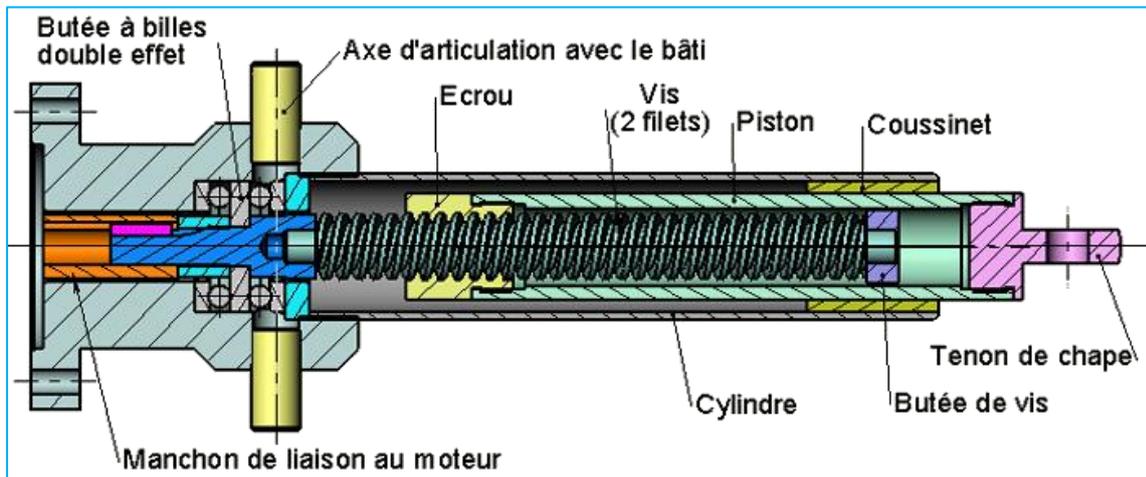
Cas des butées à billes

- Ce type de roulement est le moins utilisé. Il ne supporte que des **efforts axiaux** et ne peut pas guider un arbre en rotation ; il est alors utilisé avec d'autres roulements, qui eux supportant les charges radiales de la liaison.
- On distingue les butées à **simple effet** qui ne **supportent** des **forces** que dans un seul sens et des butées à **double effet** qui supportent des charges dans les 2 sens.
- Comme pour les roulements classiques, les **éléments** roulants **peuvent** être des billes, des rouleaux ou des aiguilles.
- Via ses rondelles, la butée est montée de part et d'autre de l'arbre et de l'alésage ; elle est montée légèrement serrée avec **l'arbre (ajustement j6)**.
- S'il n'y avait pas de butée, l'arbre frottera avec toute la surface de **contact** entre l'arbre et le moyeu, en cas de poussée axiale ; alors qu'avec la butée, ce frottement sera considérablement réduit grâce aux billes selon le **principe de roulement**.



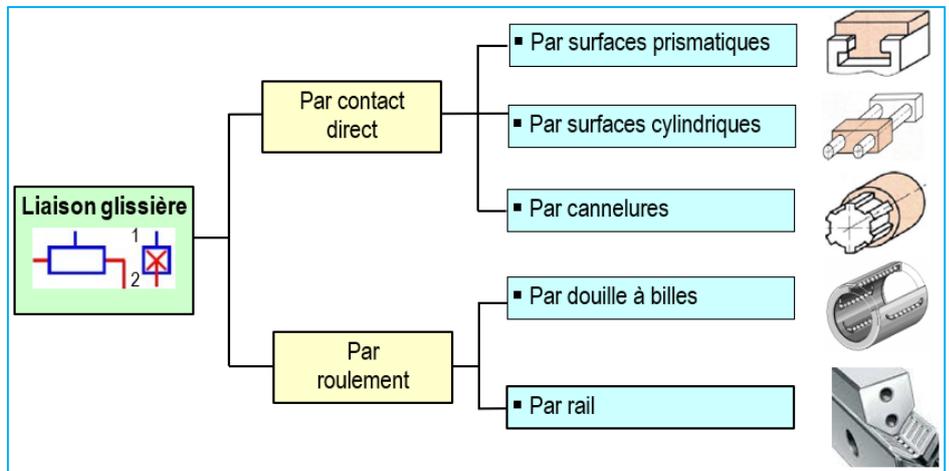
• Application : Vérin électrique :

- La pièce orange (manchon), est encastrée d'un côté avec l'arbre moteur (non représenté ici) et de l'autre côté avec la pièce bleue et la vis.
- L'écrou jaune est encastré avec la tige (piston).
- Donc le système vis-écrou fait déplacer axialement la charge par le piston.
- Sans la butée à billes double sens, il y aura, dans les 2 sens, plus de frottement entre l'ensemble tournant et le corps du vérin.



Liaison glissière : solutions constructives

- La solution constructive qui réalise une liaison glissière est appelée **guidage en translation**. On retrouve cette technique dans les portes coulissantes de magasins, les machines-outils à commande numérique, etc.
- On rappelle qu'on désigne par :
 - Le **coulisseau** la partie mobile de la liaison.
 - La **glissière** (guide) la partie fixe de la liaison, généralement liée au bâti.



Guidage en translation par contact direct ou glissement

Guidage par surfaces cylindriques

<p>Guidage par vis de pression</p>	<p>Dans cette solution, la rotation est supprimée par une vis à téton et une rainure dans l'arbre.</p>
<p>Guidage par clavette</p>	<p>Ici, on utilise une clavette et une rainure dans l'arbre.</p>
<p>Guidage par cannelures</p>	<p>Ici, le principe de base est le même qu'avec une clavette, mais avec des efforts plus élevés.</p>
<p>Guidage par double tige</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"> L'usure entre les surfaces de contact nécessite l'emploi d'un dispositif de rattrapage de jeu : la vis de pression sans tête ajuste la position de la cale en fonction du jeu à rattraper ; le contre-écrou diminue l'effet d'un desserrage éventuel.

Guidage en translation par roulement

- Les éléments roulants entre la glissière et le coulisseau permet de réduire les pertes par frottement.

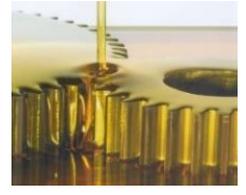
Guidage par cages à éléments roulants

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.).



Lubrification

- Dans un mécanisme, lors du mouvement relatif entre 2 pièces en contact, la puissance perdue, est directement proportionnelle au coefficient de frottement. La lubrification, liquide ou par graisse, a donc pour rôle de réduire les frottements et le bruit, évacuer la chaleur produite par le frottement et protéger les pièces contre l'oxydation.



Types de lubrifiants

Huile

- Elle est extraite de pétrole brut. Un mécanisme lubrifié à l'huile comporte :
 - Un dispositif de remplissage.
 - Un dispositif de vidange.
 - Un dispositif de contrôle de niveau.



Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> Bonne pénétration entre les éléments. Bon refroidissement. Contrôle facile de niveau de l'huile. Evacuation des corps étrangers. 	<ul style="list-style-type: none"> Etanchéité nécessaire.

Graisse

- Elle est d'origine animale ou végétale. Des dispositifs graisseurs sont utilisés pour appliquer la graisse à la zone à graisser.



Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> Etanchéité facile à réaliser. Manipulation facile 	<ul style="list-style-type: none"> Coefficient de frottement plus élevé que celui de l'huile. Evacuation thermique faible. Impossibilité de vérification de niveau de la graisse.

Modes de lubrification

Lubrification ponctuelle

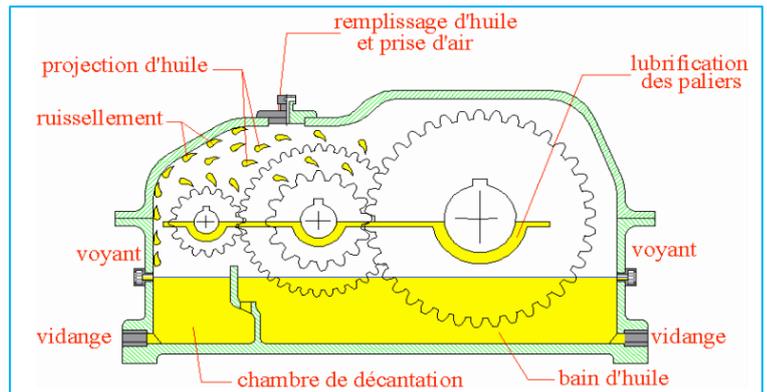
- La première méthode consiste à mettre le lubrifiant avant le mouvement ou durant le mouvement. Cela peut se faire de manière manuelle, par exemple en déposant des gouttes d'huile avec une **burette** dans le cas liquide.



Burette

Alimentation continue

- Une **pompe** assure la circulation du lubrifiant vers les parties en mouvement et le lubrifiant retourne vers le réservoir lorsque le dispositif est à l'arrêt. C'est le cas d'un moteur thermique d'une automobile par exemple. On peut également faire tremper le dispositif dans un **bain d'huile**. Par exemple, dans une boîte à vitesse d'automobile une roue dentée trempée dans un bain emporte par adhérence de l'huile vers les points à lubrifier.



Etanchéité

- L'état de surface** des pièces d'un assemblage mécanique n'est pratiquement jamais parfait ; d'où la possibilité de fuite d'huile entre les pièces vers l'extérieur d'une part, et la possibilité de rentrée de poussière de l'extérieur. A l'aide de différents types de **joint**, l'étanchéité a pour rôle donc d'empêcher :
 - Un **fluide** de s'échapper vers le milieu extérieur.
 - Des **impuretés** du milieu extérieur d'accéder aux surfaces à protéger.
- Exemple** : Pour un vérin pneumatique, il faut empêcher l'air de s'échapper et le garder propre.

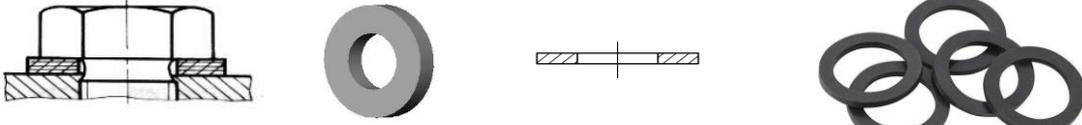
Types d'étanchéité

Etanchéité statique

- Elle concerne les pièces **sans mouvement relatif** de l'une par rapport l'autre. Le joint ne subit pas de frottement et il ne s'use pas. Les principaux joints utilisés sont les joints plats et toriques.

Etanchéité avec joint plat

- Joint plat** peut être en caoutchouc, carton, plastique ou métalloplastique.

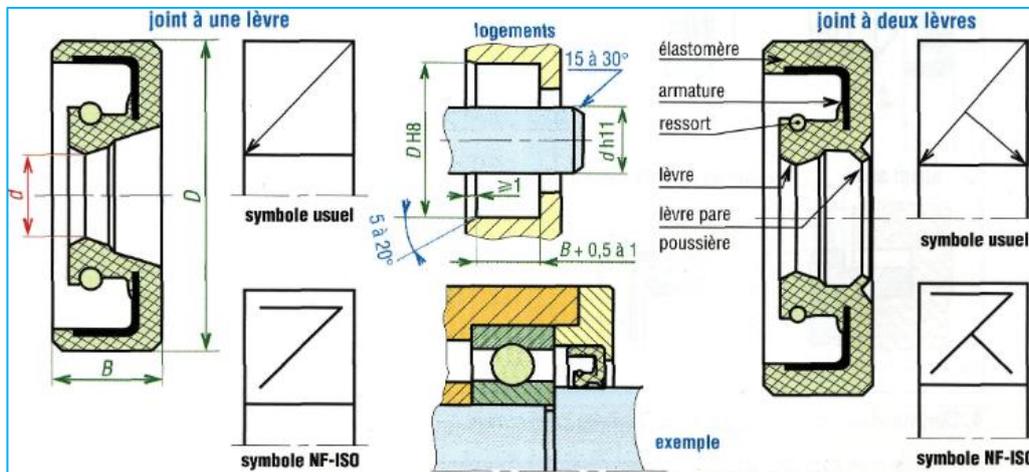


Etanchéité avec joint torique



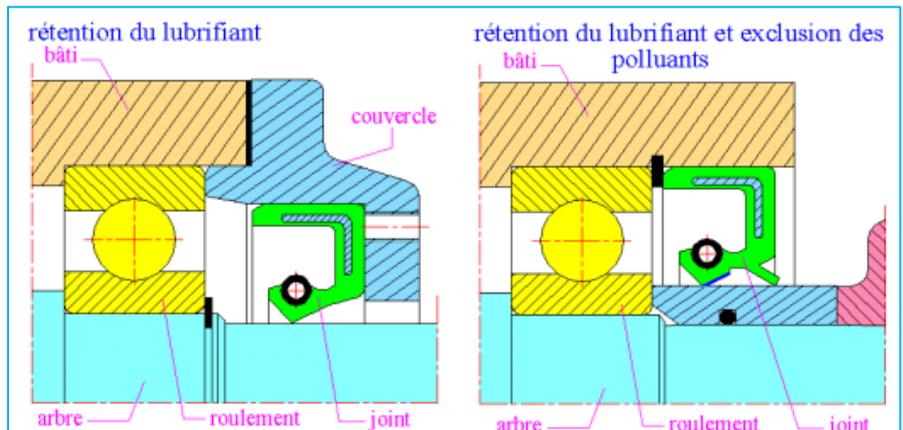
Etanchéité dynamique

- Elle concerne les pièces **avec mouvement relatif** de l'une par rapport l'autre. Le joint subit des frottements, il s'use et nécessite donc un remplacement régulier. Les principaux joints utilisés sont :
 - Le joint torique qui assure une étanchéité en translation.
 - Le **joint à 1 seule lèvre** qui assure une étanchéité en rotation dans un seul sens en évitant la fuite d'huile vers l'extérieur du mécanisme.
 - Le **joint à 2 lèvres** qui assure en plus une protection contre la poussière venant de l'extérieur.



- Un joint à lèvre est monté serré sur l'alésage ; le ressort exerce une pression sur l'arbre pour assurer l'étanchéité.

Exemple :



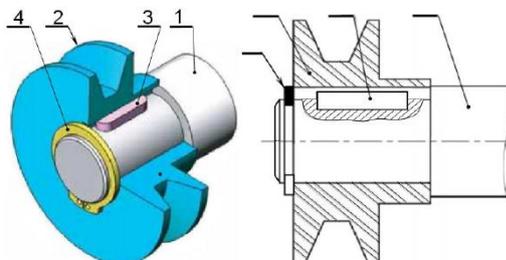


Exercices (Enoncés)

Exercice 1 : Assemblage complet

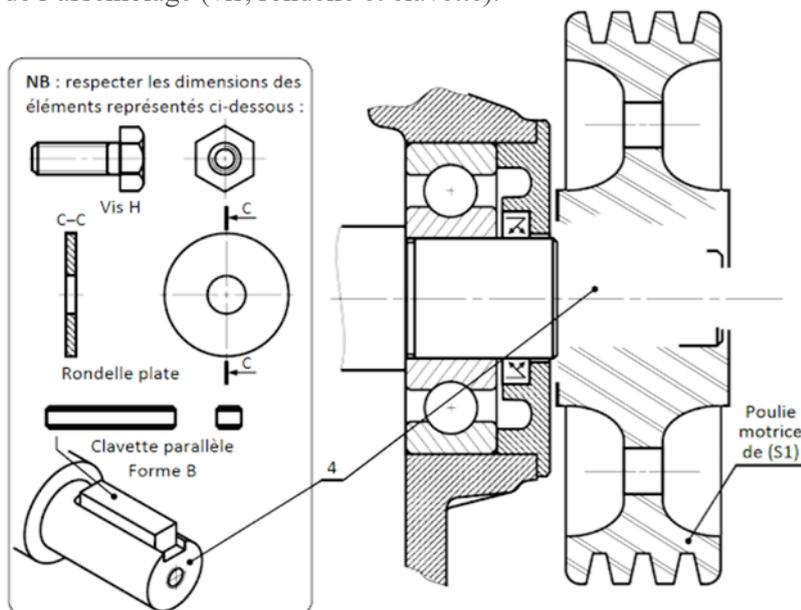
Indiquer le repère et le nom des pièces sur le dessin et préciser la MIP et la MAP de cet assemblage complet.

Pièce	Nom	MIP	MAP
1			
2			
3			
4			



Exercice 2 : Assemblage complet

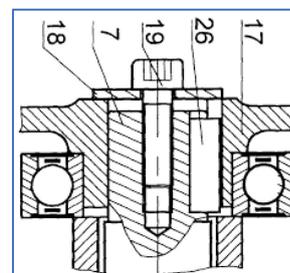
Compléter le dessin ci-dessous, qui représente un assemblage complet entre une poulie et un arbre, en respectant les dimensions des éléments de l'assemblage (vis, rondelle et clavette).



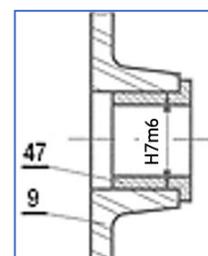
Exercice 3 : Assemblage complet

Entourer les caractères exacts des 2 assemblages suivants et commenter chaque cas.

\bar{c}	r	$\frac{de}{de}$	a	$\frac{di}{di}$
c	\bar{r}	$\frac{de}{de}$	\bar{a}	\bar{di}
Pas de mouvement possible				

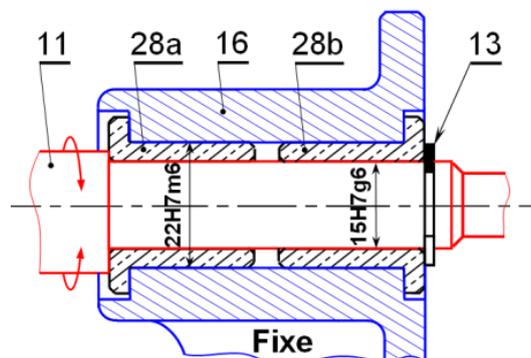
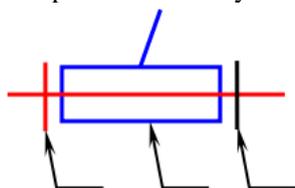


c	r	$\frac{de}{de}$	a	$\frac{di}{di}$
\bar{c}	\bar{r}	$\frac{de}{de}$	\bar{a}	\bar{di}



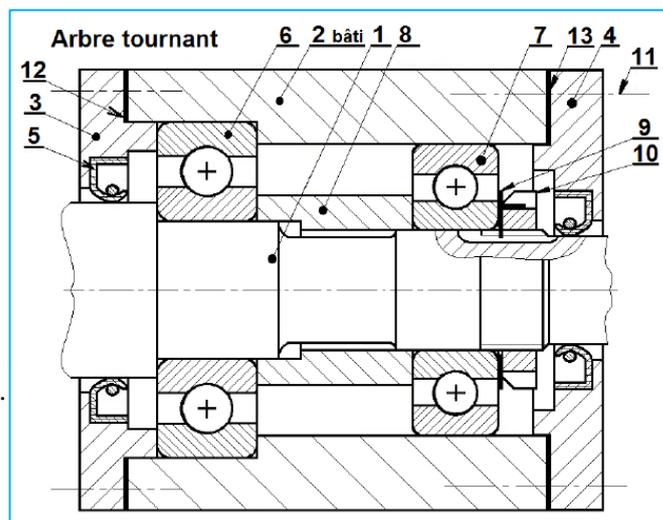
Exercice 4 : Guidage en rotation (Coussinet)

1. Préciser le type de coussinet utilisé et pourquoi.
2. Préciser le type d'ajustement entre :
 - 28 et 16.
 - 28 et 11.
3. Indiquer les repères des pièces dans le symbole de la liaison :



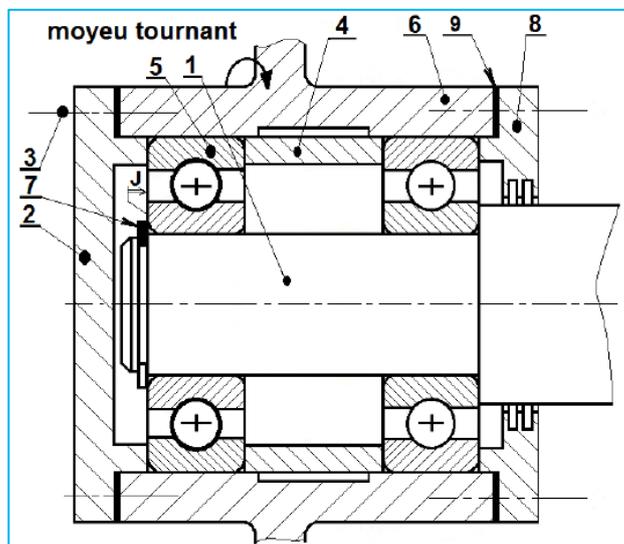
Exercice 5 : Guidage en rotation (roulement avec arbre tournant)

1. Donner le type de roulement utilisé.
2. Colorier en rouge les pièces mobiles.
3. Le montage étant à arbre tournant, indiquer :
 - Les bagues montées serrées.
 - Les bagues montées libres.
4. Donner le nom et la fonction des Rep.5.
5. Quels sont le nom et la fonction de la pièce Rep.8 ?
6. Quels sont le nom et la fonction de la pièce Rep.10.
7. Que représente l'axe Rep.11 ?
8. Donner le nombre d'arrêts axiaux sur les bagues intérieures.
9. Donner le nombre d'arrêts axiaux sur les bagues extérieures.
10. Préciser le type d'ajustement pour l'arbre et l'alésage.
11. Une lubrification du système est-elle possible à :
 - L'huile ?
 - La graisse ?



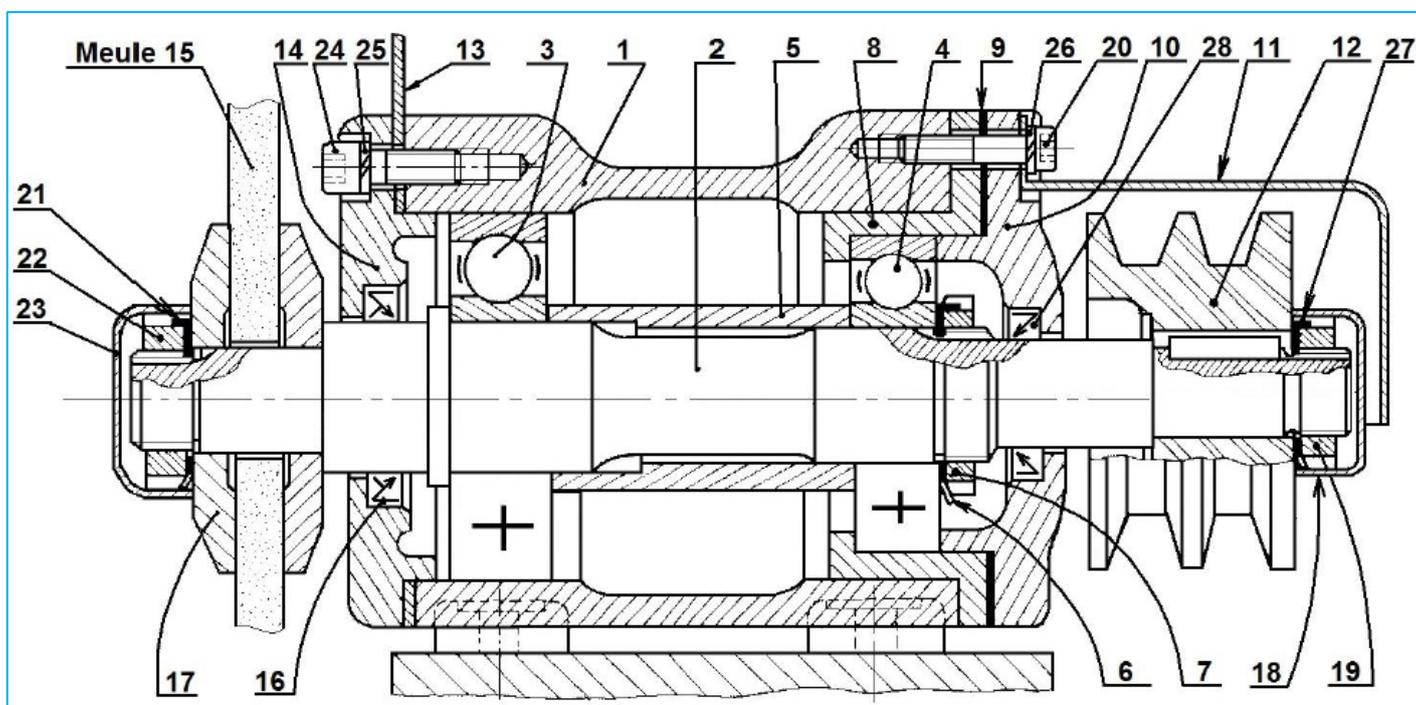
Exercice 6 : Guidage en rotation (roulement avec alésage tournant)

1. Donner le type de roulement utilisé.
2. Colorier en rouge les pièces mobiles.
3. Le montage étant à alésage tournant, indiquer :
 - Les bagues montées serrées.
 - Les bagues montées libres.
4. Donner le nom et la fonction du Rep.7.
5. Que représente l'axe Rep.3 ?
6. Donner le nombre d'arrêts axiaux sur les bagues extérieures.
7. Donner le nombre d'arrêts axiaux sur les bagues intérieures.
8. Préciser le type d'ajustement pour l'arbre et l'alésage.
9. Une lubrification du système est-elle possible à :
 - L'huile ?
 - La graisse ?

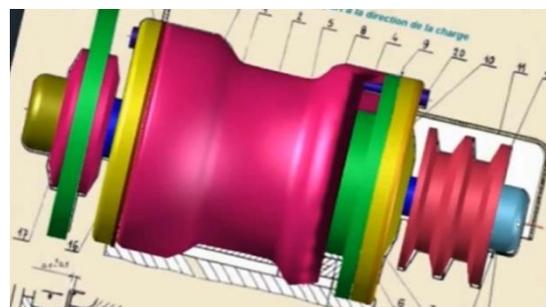


Exercice 7 : Application (Touret à meuler)

Un touret à meuler est une machine-outil de petite dimension, qui met en rotation une roue abrasive. Cet outil est utilisé en principe pour meuler, polir, affûter des pièces métalliques.



1. De quel type de roulement s'agit-il ?
2. Donner le nombre d'arrêts axiaux sur les bagues extérieures.
3. Donner le nombre d'arrêts axiaux sur les bagues intérieures.
4. En déduire les bagues qui sont serrées et celles qui sont libres.
5. En déduire le type de montage : arbre tournant ou alésage tournant ?
6. Colorier alors en rouge l'ensemble des pièces en rotation.
7. Préciser le type d'ajustement pour l'arbre et l'alésage.
8. Donner le nom et la fonction du Rep.16.
9. Donner le nom et la fonction du Rep.26.

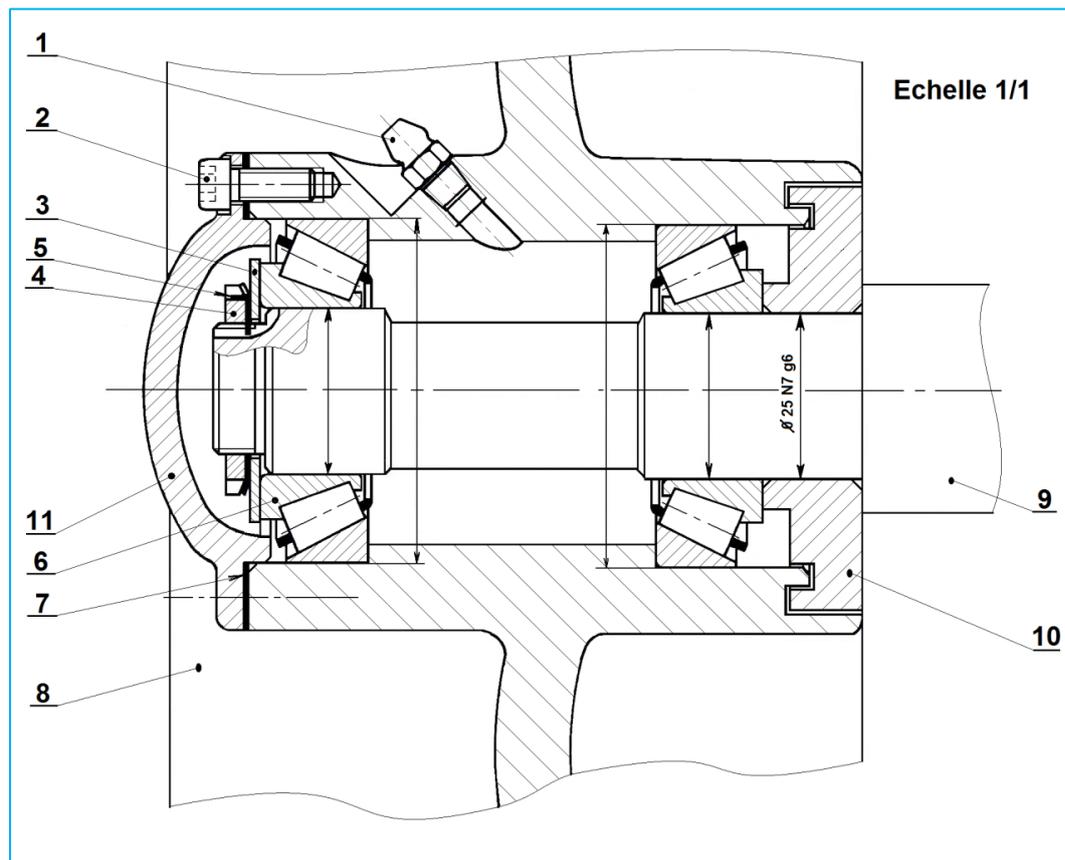


Exercice 8 : Roue folle

Le plan d'ensemble ci-dessous représente la liaison pivot existant entre l'essieu ou arbre Rep.9 et la roue Rep.8 d'un wagonnet. On note que :

- Un essieu est un arbre qui ne transmet pas de couple, mais qui sert uniquement à supporter un élément rotatif comme une roue, par exemple.
- La roue est dite « folle », car elle est libre autour de son axe.

Le wagonnet est équipé de 4 roues folles guidées sur rails.



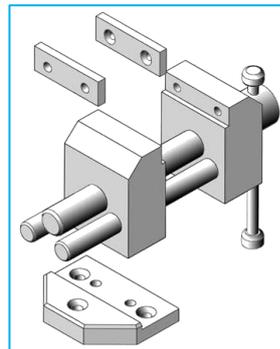
11	1	Chapeau	S 185
10	1	Défecteur	S 185
9	1	Essieu arrière	35 Cr Mo 4
8	1	Roue	EN-JL 1020
7	1	Joint plat papier Kraft armé	
6	2	Roulement à rouleaux coniques	
5	1	Rondelle frein Type MB 20	
4	1	Ecrou à encoches Type KM M20	
3	1	Rondelle plate ISO 10673 – Type L – 20 –	X 5 Cr Ni 18 10
2	6	Vis	
1	1	Graisser droit	Hydraulic
Rep.	Nbr.	Désignation	Observations

1. Colorier en rouge les pièces mobiles.
2. Le montage est à arbre tournant ou à alésage tournant ?
3. Donner le type de montage des roulements : en X ou en O.
4. Donner le type d'ajustement sur les bagues extérieures et les bagues intérieures.
5. Une lubrification à l'huile est-elle possible ? (Justifier votre réponse)

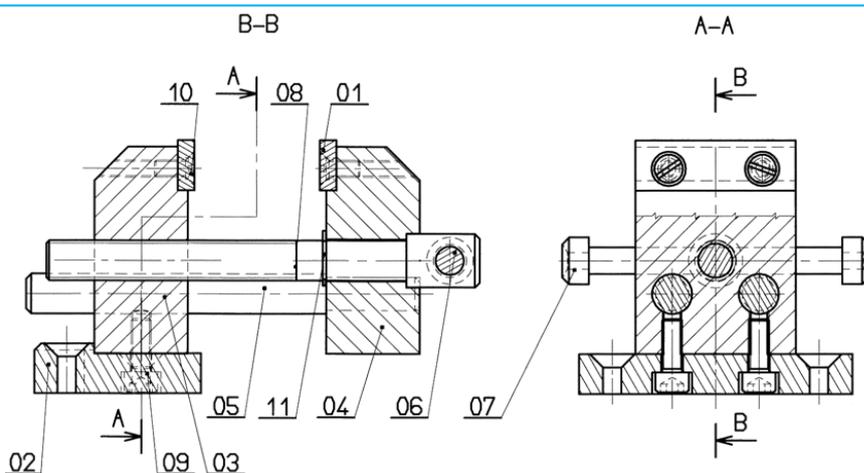


Exercice 9 : Etau de modélisme

Il s'agit d'un étau de modélisme ou de bricolage très semblable à ce que l'on a vu dans les exercices du chapitre sur les liaisons mécaniques (**Chapitre 6**) ; ainsi, en manipulant la manivelle (7), on déplace le mors mobile (4) qui serre ou desserre la pièce à travailler contre le mors fixe (3), via une liaison hélicoïdale. On note que les 2 guides (5) sont encastrés avec le mors mobile (4) comme dans l'exercice 1 du chapitre 6.



11	1	Ecrou
10	4	Vis
9	2	Vis
8	1	Vis de manoeuvre
7	1	Manivelle
5	2	Guide
4	1	Mors mobile
3	1	Mors fixe
2	1	Semelle
1	1	Patin
Repère	Nombre	Désignation

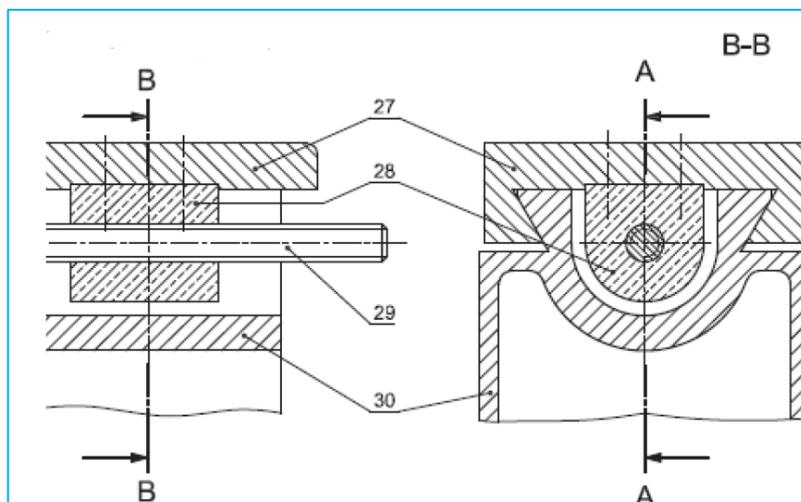
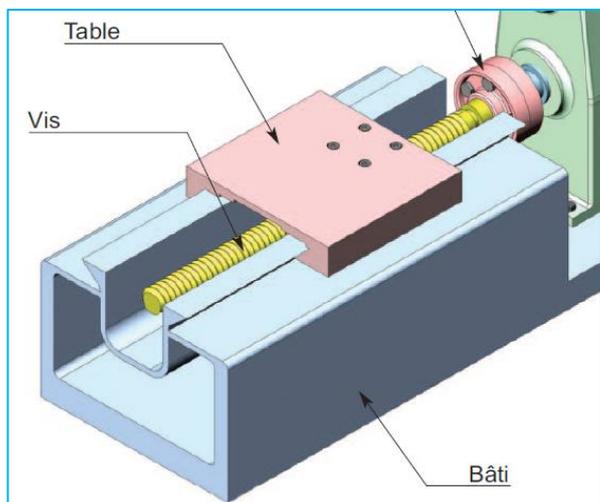


1. Préciser la solution technologique choisie pour assurer le guidage en translation du mors mobile (4), tout en indiquant les pièces rentrant en jeu dans cette liaison, ainsi que le type de contact.
2. Préciser la solution technologique choisie pour assurer le guidage en rotation de la vis de manoeuvre (8) et indiquer les pièces rentrant en jeu dans cette liaison.
3. Colorier en rouge dans les 2 vues le guide ou la glissière de cette liaison glissière.

Exercice 10 : Table coulissante

Le système suivant représente une vue partielle d'une table coulissante motorisée. La vis (29) en liaison hélicoïdale avec l'écrou spécial (28) engendre le mouvement de translation, par rapport au bâti (30), à la table coulissante (27).

1. Préciser la solution choisie pour le guidage en translation de la table coulissante (27), ainsi que le type de contact.
2. Comment sont encastrés la table (27) et l'écrou (28) ?
3. Colorier en rouge dans les 2 vues, le coulisseau de cette liaison Glissière.

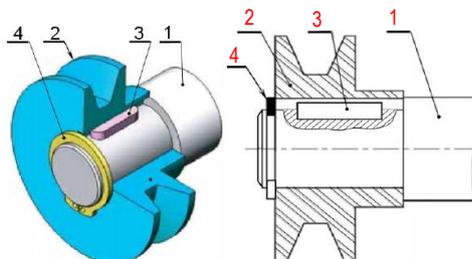




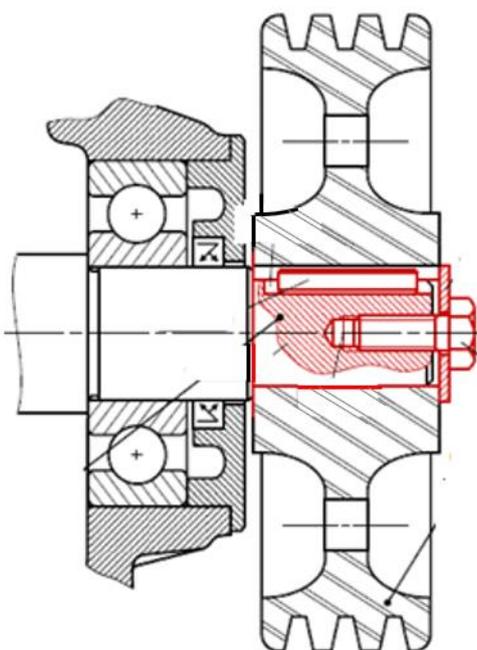
Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Assemblage complet

Pièce	Nom	MIP	MAP
1	Arbre	Surfaces cylindriques +	Circlips +
2	Poulie		
3	Clavette	Surfaces planes (Clavette)	Epaulement
4	Circlips		

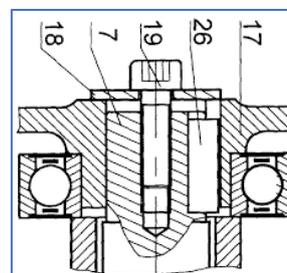


Exercice 2 : Assemblage complet

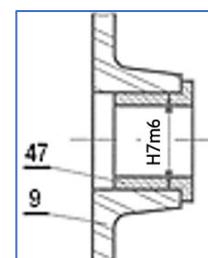


Exercice 3 : Assemblage complet

\underline{c}	\underline{r}	\underline{de}	\underline{a}	\underline{di}
\bar{c}	\bar{r}	\bar{de}	\bar{a}	\bar{di}
Pas de mouvement possible	Pas d'élément élastique	Grace à la vis 19	Par la clavette 26	A travers les pièces 18, 19 et 26



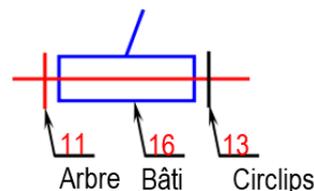
\underline{c}	\underline{r}	\underline{de}	\underline{a}	\underline{di}
\bar{c}	\bar{r}	\bar{de}	\bar{a}	\bar{di}
Pas de mouvement possible	Pas d'élément élastique	Car montée à la presse	Ajustement serré	Pas de pièces intermédiaires





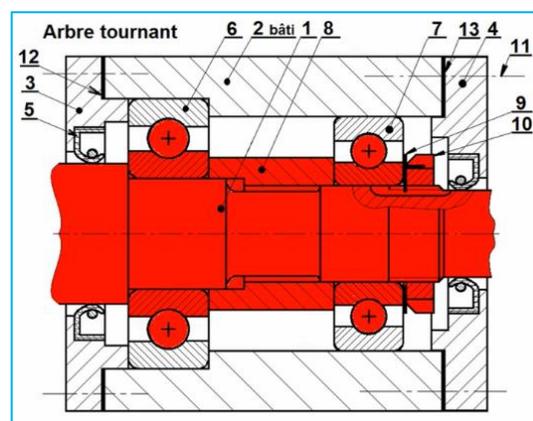
Exercice 4 : Guidage en rotation (Coussinet)

1. Coussinet à collerette pour supporter les efforts axiaux.
2. Types d'ajustement entre :
 - 28 et 16 (H7m6) : Serré (**m** comme maillet)
 - 28 et 11 (H7g6) : Glissant (**g** comme glissant)
3. Repères des pièces dans le symbole de la liaison :



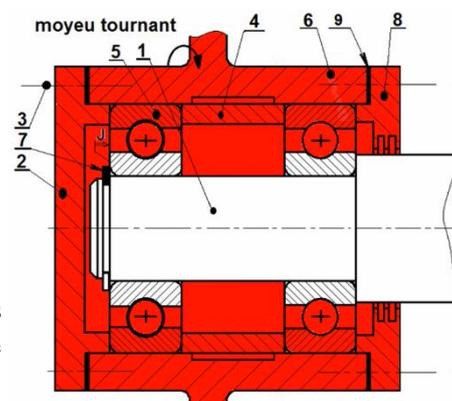
Exercice 5 : Guidage en rotation (roulement avec arbre tournant)

1. Roulement à billes à contact radial ou type BC.
2. Voir figure ci-contre.
3. Bagues intérieures serrées et bagues extérieures libres.
4. Joint à 1 seule lèvre pour assurer l'étanchéité dynamique entre Rep. 1 et Rep 3.
5. Entretoise pour l'arrêt en translation des bagues intérieures.
6. Ecrou à encoches pour l'arrêt des bagues intérieures.
7. Il représente l'axe d'une vis d'assemblage.
8. 4 arrêts : Epaulement de l'arbre Rep. 1, entretoise Rep. 8 et écrou à encoches rep. 10.
9. 2 arrêts : Couvercle 3 et bâti 2.
10. Alésage : ajustement glissant et arbre : ajustement serré.
11. Oui puisqu' il y a un joint à lèvre et oui pour la graisse, puisque si l'huile ne fuit pas, la graisse le risque moins.



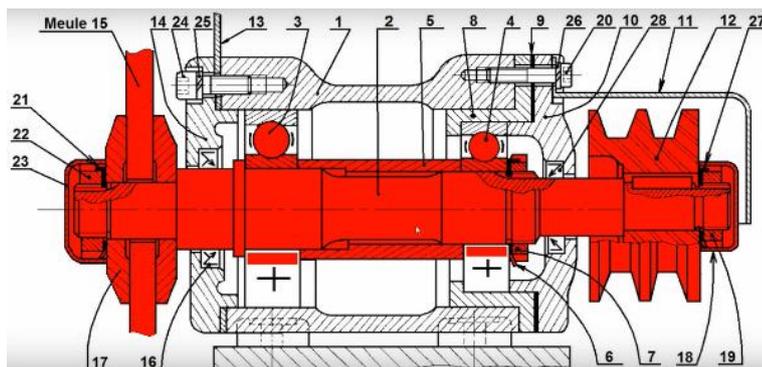
Exercice 6 : Guidage en rotation (roulement avec alésage tournant)

1. Roulement à billes à contact radial.
2. Voir figure ci-contre.
3. Bagues extérieures serrées et bagues intérieures libres.
4. Anneau élastique (circlips) pour l'arrêt en translation de l'arbre Rep. 1.
5. Il représente l'axe d'une vis d'assemblage.
6. 2 arrêts : Anneau élastique Rep. 7 et épaulement de l'arbre Rep. 1.
7. 4 arrêts : Couvercle Rep. 3, entretoise Rep. 4 et bâti Rep. 2.
8. Arbre : ajustement glissant et alésage : ajustement serré.
9. La lubrification à l'huile n'est pas possible à cause des 2 petites rainures dans le couvercle Rep. 8, qui sont en fait destinées à une lubrification à la graisse qui protégera aussi le système de la poussière.



Exercice 7 : Application (Touret à meuler)

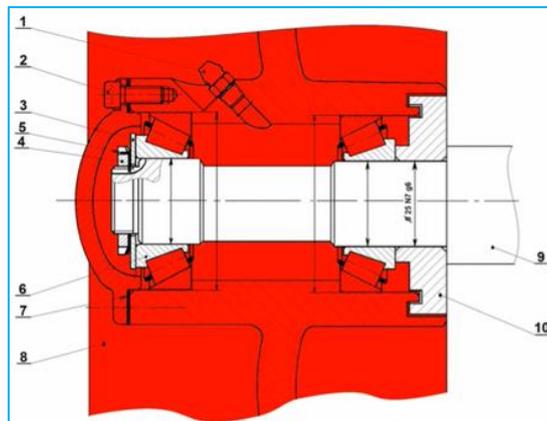
1. Roulement à billes à contact radial.
2. 2 arrêts : le couvercle Rep. 28 et la pièce Rep. 8 (boîtier de montage pour roulement).
3. 4 arrêts : Epaulement sur l'arbre Rep. 2, entretoise Rep. 5 et écrou à encoches Rep. 7.
4. Bagues internes serrées et bagues externes libres.
5. Arbre tournant.
6. Voir figure ci-contre.
7. Alésage : ajustement glissant et arbre : ajustement serré.
8. Joint à lèvre pour étanchéité dynamique.
9. Rondelle Grower pour frein de la vis 20.



Exercice 8 : Roue folle

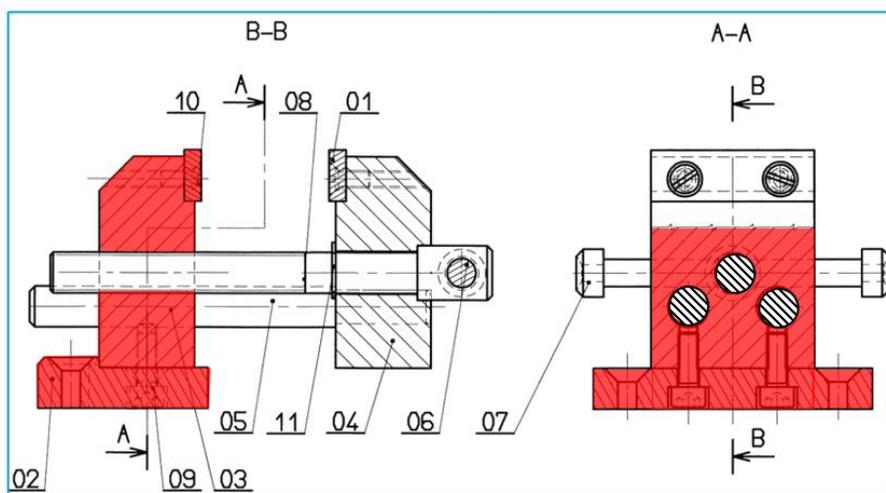
1. Voir figure ci-contre.
2. Le montage est à alésage tournant.
3. C'est un montage en **O**.
4. Les bagues extérieures sont serrées et les bagues intérieures libres.
5. Non, car l'huile s'échappera à travers la chicane au niveau du déflecteur Rep. 10.

Une **chicane** en Mécanique est une voie de circulation, faite de telle sorte de retenir la graisse et protéger le mécanisme contre la pénétration d'impuretés.



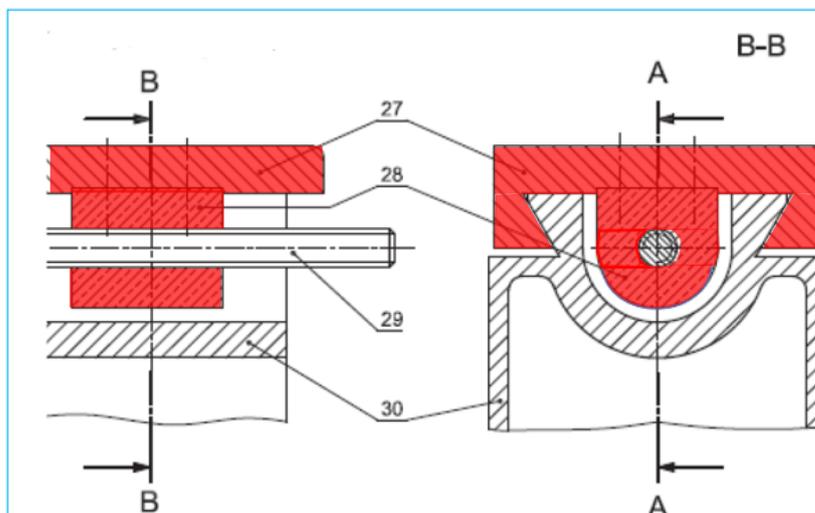
Exercice 9 : Etau de modélisme

1. Les 2 guides cylindriques et parallèles (5) permettent la translation du mors mobile (4), par contact direct.
2. Par contact direct entre la vis de manœuvre (8) et le mors mobile (4), avec comme arrêts axiaux l'écrou (11) et l'épaulement de la vis (8).
3. Coloriage du guide.



Exercice 10 : Table coulissante

1. On utilise des formes prismatiques en forme de queue d'aronde, avec contact direct.
2. C'est un assemblage complet par 4 vis. Ces 4 vis ne sont pas explicitement représentées, mais la perspective et les traits d'axe du dessin 2D attestent de leur évidente présence.
3. Coloriage du coulisseau.





Introduction

- Pour transmettre la puissance entre les mécanismes, le **mouvement de rotation** continu est le plus utilisé, qui est généralement produit et émis par un moteur électrique.
- Mais, dans pas mal de cas, le récepteur doit avoir un mouvement de rotation dont la **vitesse angulaire**, le **sens** de rotation, **l'axe** de rotation sont différents du moteur.
- Il est donc nécessaire d'interposer dans la chaîne cinématique, un **mécanisme de transmission de puissance** capable de modifier les paramètres cités. Parmi ces mécanismes, on cite :

- Les roues de friction.
- Les poulies et courroie.
- Les pignons et chaîne.
- Les engrenages.

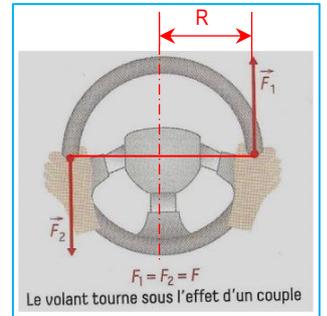


Formulaire

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 :

$$C = F \cdot R$$

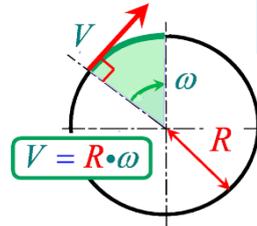


Vitesse linéaire et vitesse angulaire

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

$$V = R \cdot \omega$$

R : Rayon en mètres (m)
 ω : Vitesse angulaire (rad/s)
 V : Vitesse linéaire (m/s)



Vitesse angulaire ω en (rad/s) et fréquence de rotation N en (tr/min)

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

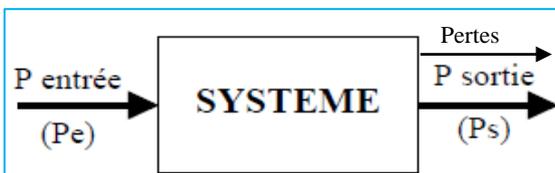
$$\omega = \frac{2\pi \cdot N}{60}$$

Puissance mécanique

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

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.

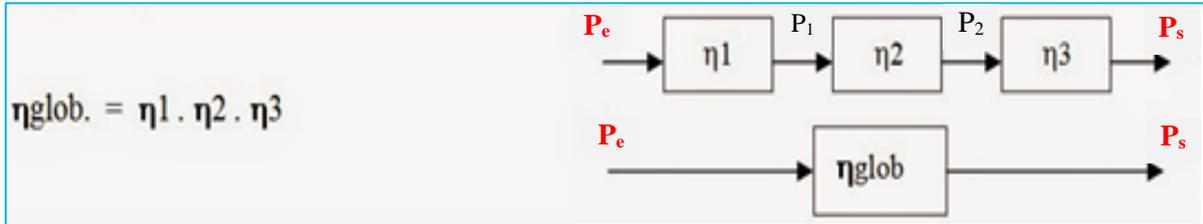


$$\eta = \frac{\text{Puissance sortie}}{\text{Puissance entrée}} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{\text{Puissance entrée} - \text{Pertes}}{\text{Puissance entrée}}$$

$$0 \leq \eta \leq 1$$

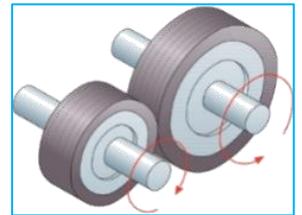
- Dans un système à n sous-systèmes, ayant des rendements $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$, le rendement global (η_{global}) du système est égal au **produit** de ces n rendements ; par exemple, pour un système avec 3 sous-systèmes, on a :

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



Roues de friction

- 2 roues cylindriques (ou coniques), une **menante** ou motrice et l'autre **menée** ou réceptrice, sont en contact direct et soumises à un **effort presseur**.
- Le **frottement** au contact des 2 roues permet de transmettre une puissance de la roue motrice vers la roue réceptrice, par **adhérence**.
- Ce type de transmission de puissance est utilisé pour des **arbres rapprochés**.

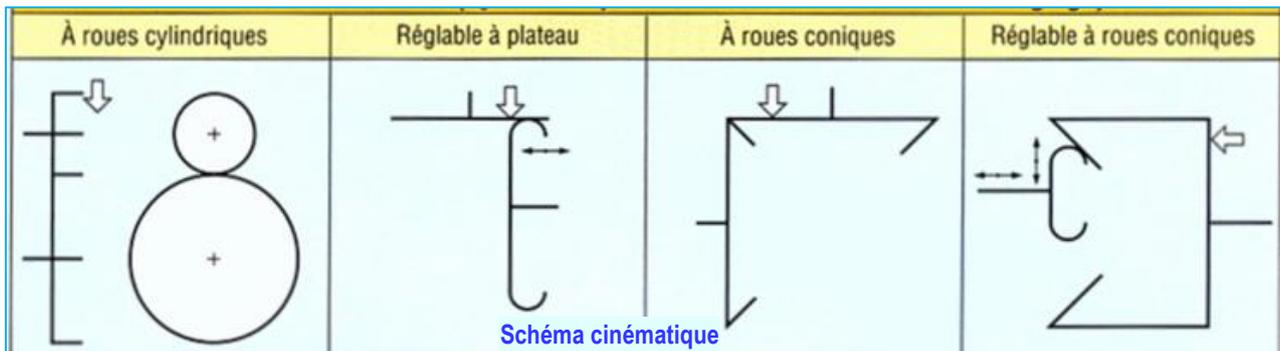
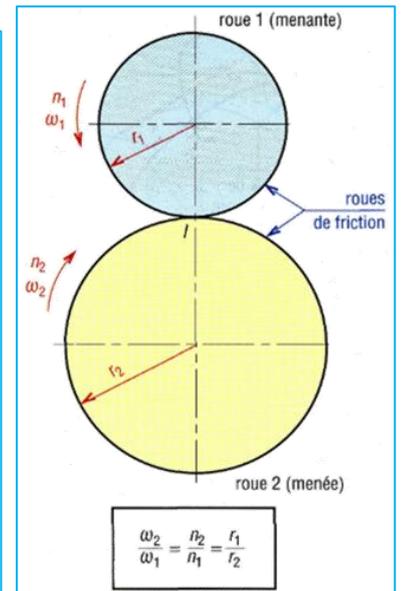
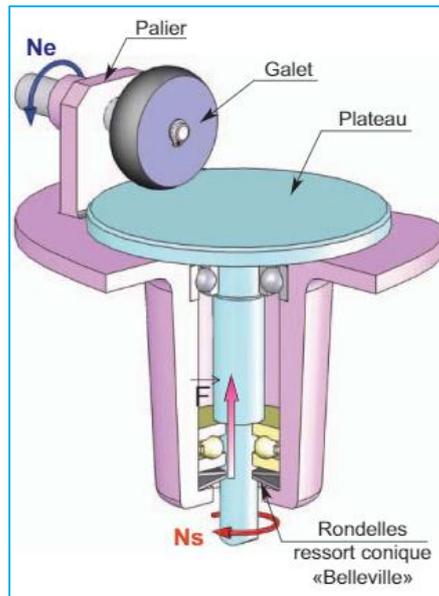


Rapport des vitesses

- Au point de contact **I** des 2 roues 1 et 2, la vitesse linéaire étant la même, ($n_1 = n_2$), on a alors : **$r_1\omega_1 = r_2\omega_2$** .
D'où le rapport de réduction des vitesses :

$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{d_1}{d_2}$$

- d_1 et d_2 sont respectivement les diamètres de la roue menante et de la roue menée.
- ω_1 et ω_2 sont respectivement les vitesses angulaires de la roue menante et de la roue menée.
- Ce type de transmission de puissance est simple, économique et silencieux. Mais, le rapport de réduction n'est pas certain, à cause du **glissement**.
- Le principe reste le même pour des **roues coniques** ou **galet et plateau**.

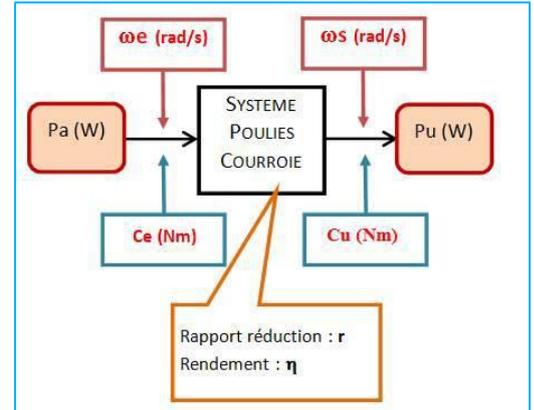


Poulies et Courroie

Constitution

Principe

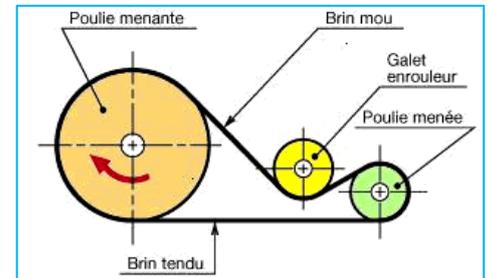
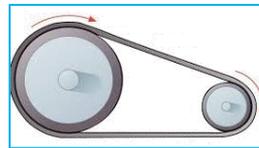
- Le système poulies/courroie permet de transmettre la puissance mécanique entre **2 arbres relativement éloignés**.
- Les poulies sont équipées d'un lien flexible qui peut être une **courroie ou un câble**. Par **adhérence**, la poulie motrice ou menante entraîne la courroie, qui à son tour entraîne la poulie réceptrice ou menée.
- Un **galet tendeur** permet de régler la tension initiale et compenser l'allongement des courroies au cours du temps, à cause de l'usure.



Rapport des vitesses

- Avec un raisonnement identique au cas des roues de friction, le rapport de réduction des vitesses est :

$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{d_1}{d_2}$$



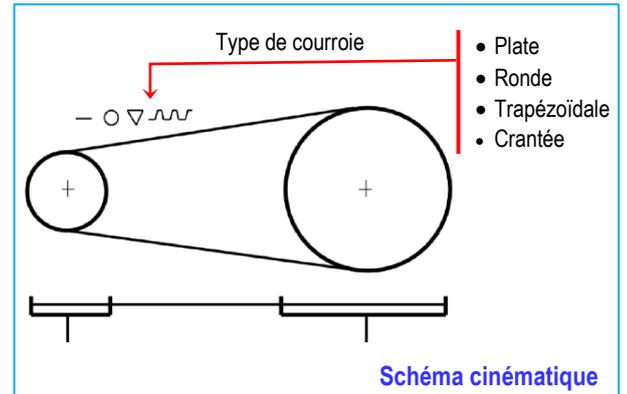
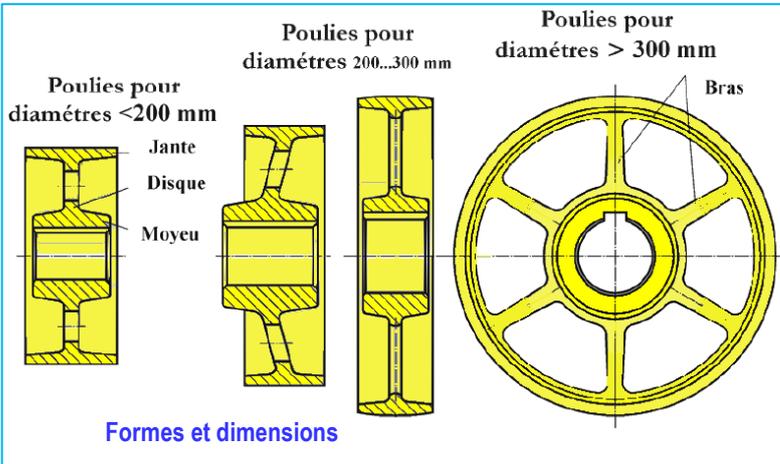
On note que :

- d_1 et d_2 sont respectivement le diamètre de la poulie menante et le diamètre de la poulie menée.
- ω_1 et ω_2 sont respectivement la vitesse angulaire de la poulie menante et la vitesse angulaire de la poulie menée.

Types de courroie

- Il existe une **variété de types de courroie**, qui se différencient par la forme et le matériau, dont le choix dépend des conditions d'utilisation (couple transmis, température de travail, etc.). Le tableau suivant décrit 3 des plus utilisées (représentation en dessin technique et caractéristiques).

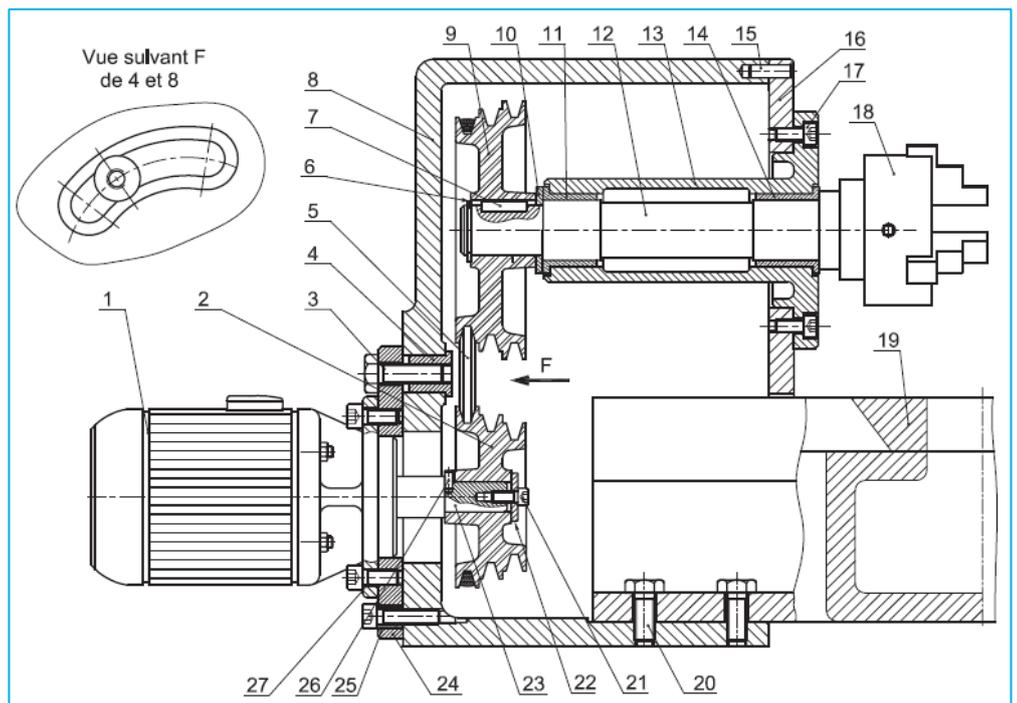
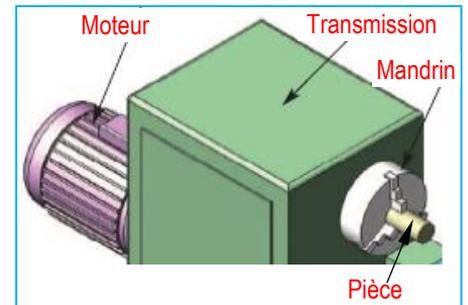
Courroie plate	Courroie trapézoïdale	Courroie crantée
<p>Simple et silencieuse, elle convient pour de grandes vitesses et des puissances moyennes.</p>	<p>Avec une meilleure adhérence, elle convient pour transmettre de plus fortes puissances. Dans ce cas, on parle de poulie à gorge.</p>	<p>Grace aux crans qui engrènent dans les dents de la poulie, la transmission se fait par obstacle et le rapport de vitesse est synchrone et rigoureux (pas de glissement). Le flasque permet de maintenir la courroie sur la poulie.</p>



Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Emetteur et récepteur relativement éloignés. • Vitesses relativement grandes et fonctionnement silencieux. • Non-besoin de lubrification. 	<ul style="list-style-type: none"> • Glissement sauf pour le cas des courroies crantées. • Sensibilité à l'humidité, à la température et à la poussière.

Application

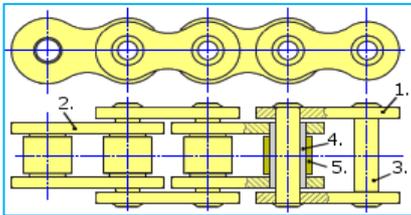
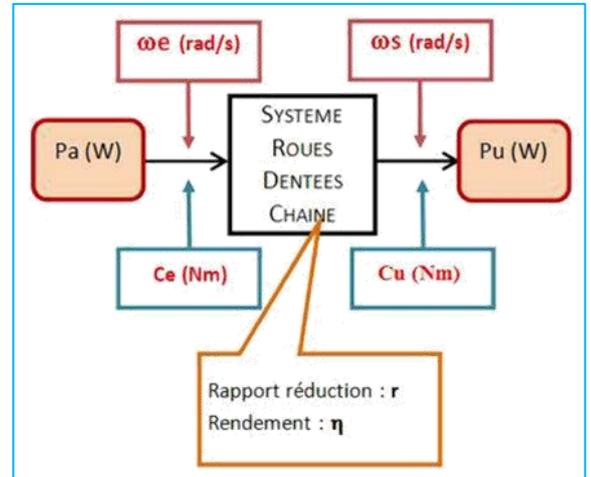
- Le plan d'ensemble ci-dessous représente la partie transmission d'une machine-outil (tour), constituée d'un système poulies/courroie.
- L'arbre de sortie (12) lié au mandrin (18), qui porte la pièce objet du tournage, peut tourner à 3 vitesses de rotation différentes : NG, NP, et NM.
- Pour cela, on dispose de 2 **poulies étagées**, l'équivalent de 3 poulies de différents diamètres.
- La rotation de l'arbre moteur (23) est transmise au mandrin porte-pièce (18) par l'intermédiaire des 2 poulies étagées (9-2) et la courroie (5).
- Pour changer de vitesse, il faut détendre la courroie (5) à l'aide du mécanisme montré par la vue partielle F de (4) et (8). En effet, c'est l'ensemble {3, 4, 8, 24, 25} qui permet ce réglage de vitesses.
- La forme en lumière de (8) permet le déplacement de (4) et du coup de tout l'ensemble avec le moteur (1), dans un sens ou dans l'autre ce qui permet de détendre ou tendre la courroie.
- La poulie (2) est encastrée avec l'arbre moteur (23) via la vis (21), la rondelle (22) et l'ergot (26).
- La poulie (9) est encastrée avec l'arbre (12) via l'épaulement de l'arbre, la rondelle (10), le circlips (6) et la clavette (7).



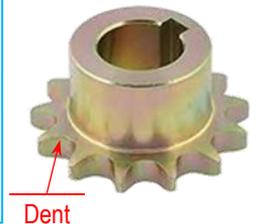
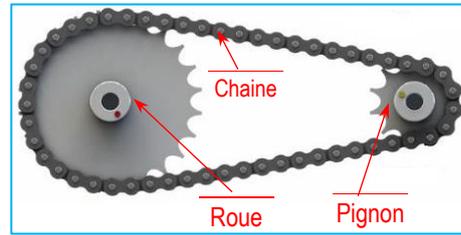
Roues et chaîne

Constitution

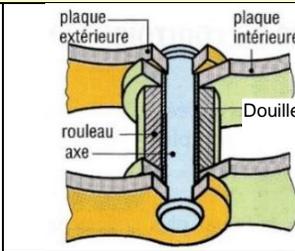
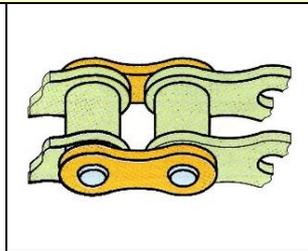
- Désigné couramment par système **Pignon-Chaine**, il permet de transmettre par **obstacle** et sans glissement, à l'aide d'une **chaîne**, un mouvement de rotation continu entre **2 arbres éloignés**.
- Il est constitué de 2 roues dentées, dont la plus petite est appelé **Pignon**.
- Une chaîne est formée d'une suite de **maillons articulés**, qui engrenent sur les **dents** des 2 roues. Ces maillons peuvent être de plusieurs type. On décrit ci-après la chaîne la plus couramment rencontrée, à savoir la **chaîne à rouleaux** :



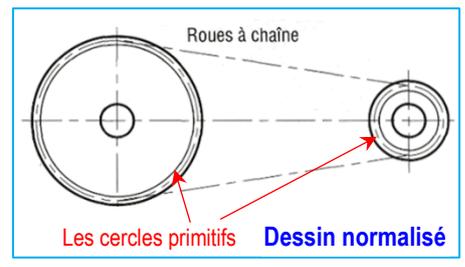
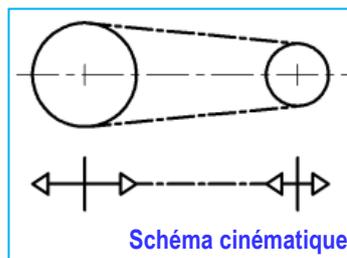
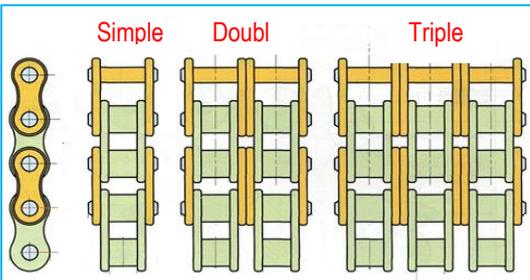
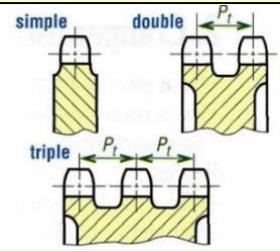
1. Plaque extérieure
2. Plaque intérieure
3. Goupille supérieure
4. Douille
5. Rouleau



Maillons de chaîne à rouleaux



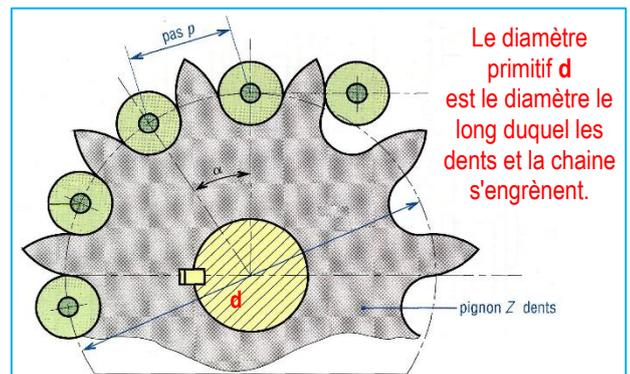
Roues



Rapport des vitesses

- On a : $Z \cdot p = \pi \cdot d \Rightarrow d = \frac{Z \cdot p}{\pi}$
- p** est le pas de la roue et **Z** est le nombre de dents d'une roue de diamètre primitif **d** ; le diamètre primitif **d** est le diamètre le long duquel les dents et la chaîne s'engrènent. Alors, Le rapport de réduction des vitesses est alors :

$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{\frac{Z_1 \cdot p}{\pi}}{\frac{Z_2 \cdot p}{\pi}} = \frac{Z_1}{Z_2}$$



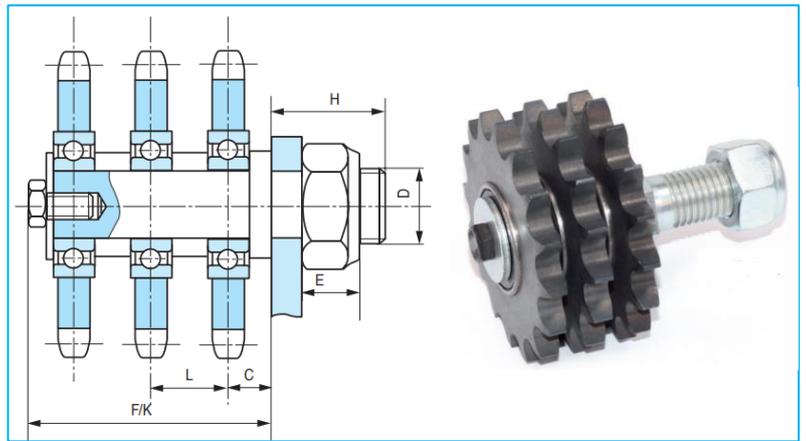
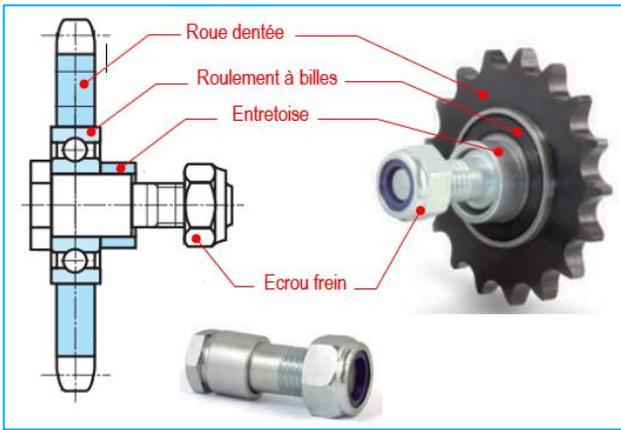
Le diamètre primitif **d** est le diamètre le long duquel les dents et la chaîne s'engrènent.

- Z_1 et Z_2 sont respectivement le nombre de dents du pignon et le nombre de dents de la roue.
- ω_1 et ω_2 sont respectivement la vitesse angulaire du pignon et la vitesse angulaire de la roue.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Pas de glissement et meilleur rendement par rapport au système Poulies-Courroie. • Supportent des conditions de travail plus rudes, par exemple des températures plus élevées. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bruyant et vitesses admissibles relativement faibles • Nécessité de lubrification.

Application : Pignon tendeur pour chaîne à rouleaux avec roulement à billes

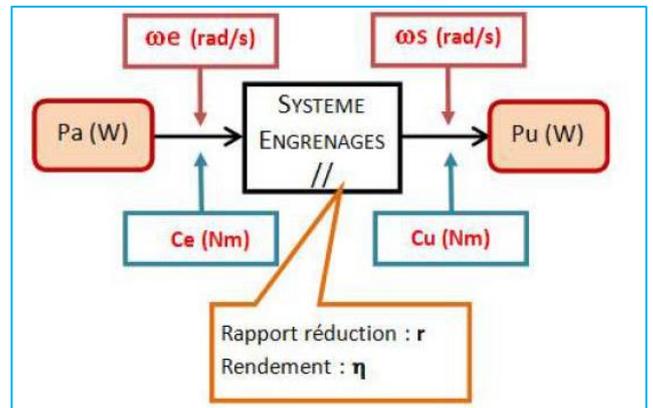
- C'est un produit compact qui sert pour **régler la tension de chaînes** simples, doubles et triples, dans lequel un **roulement à billes est emmanché** à la presse dans le disque denté (récepteur ou libre) et bien évidemment monté avec jeu sur l'axe. Il compense l'allongement des chaînes en cours de fonctionnement en cas de fortes charges.
- Au montage, et après serrage de l'écrou de sécurité, l'entretoise vient serrer latéralement la bague intérieure du roulement et l'immobilise.

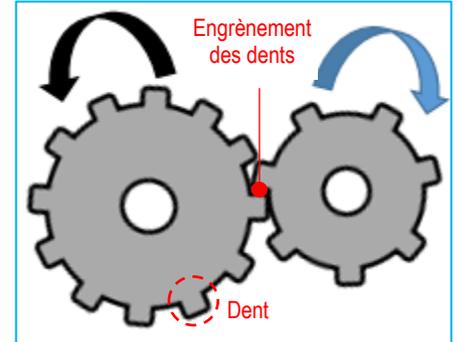
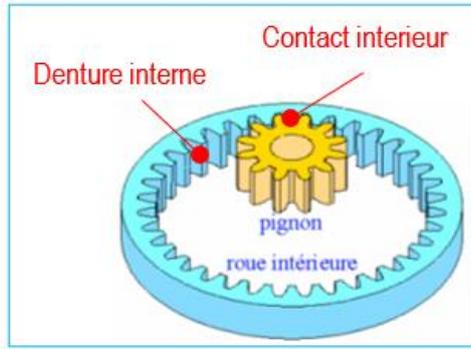
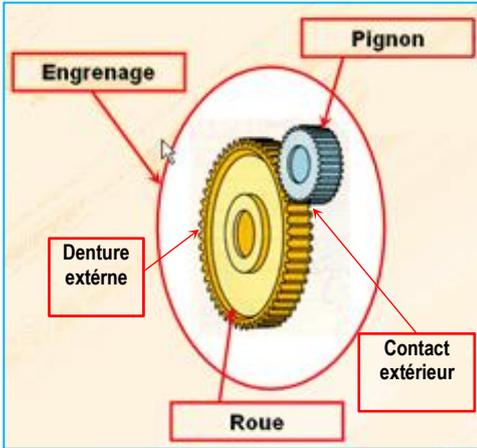


Les engrenages

Principe

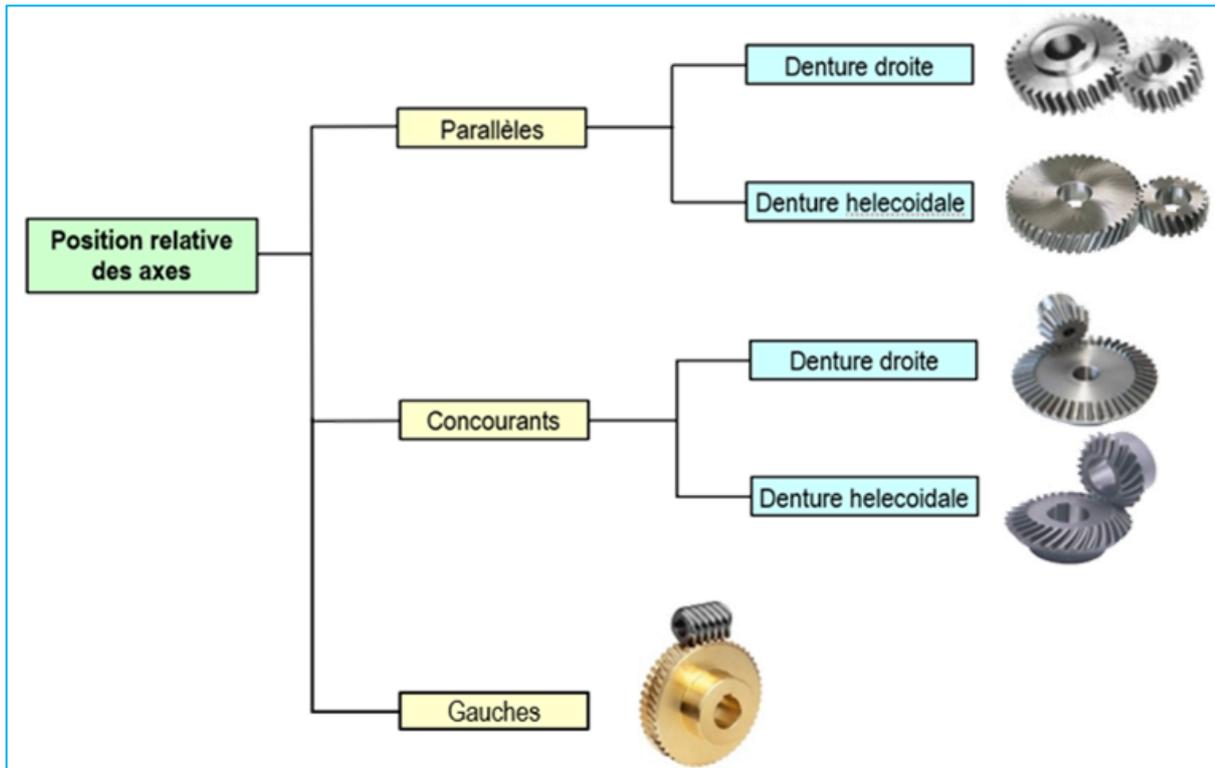
- Les engrenages remplacent les roues de friction et permettent une transmission par **obstacle** (pas de glissement).
- Un engrenage est composé de 2 **roues dentées**. L'une des 2 roues entraîne l'autre par l'action des **dents** qui sont successivement en contact.
- La roue ayant le plus petit nombre de dents, est appelée **pignon**.
- Les engrenages sont parmi les systèmes de transmission **les plus utilisés**, les plus résistants et les plus durables. Ils sont normalisés et présentent donc l'avantage d'être **interchangeables**.





Classification

- La **position relative des axes** permet de distinguer principalement :
 - Les engrenages à **axes parallèles** à denture droite ou hélicoïdale.
 - Les engrenages à **axes concourants**.
 - Les **engrenages gauches**, qui sont à axes ni parallèles ni concourants.



Les engrenages à axes parallèles à denture droite

Présentation et Caractéristiques

- Ce sont les **plus simples** et les **plus économiques** ; les dents des 2 roues de l'engrenage sont parallèles à l'axe de rotation des arbres.
- Du fait de leur relative simplicité, ils sont souvent utilisés pour introduire les relations de cinématique et les définitions normalisées concernant la géométrie des engrenages.



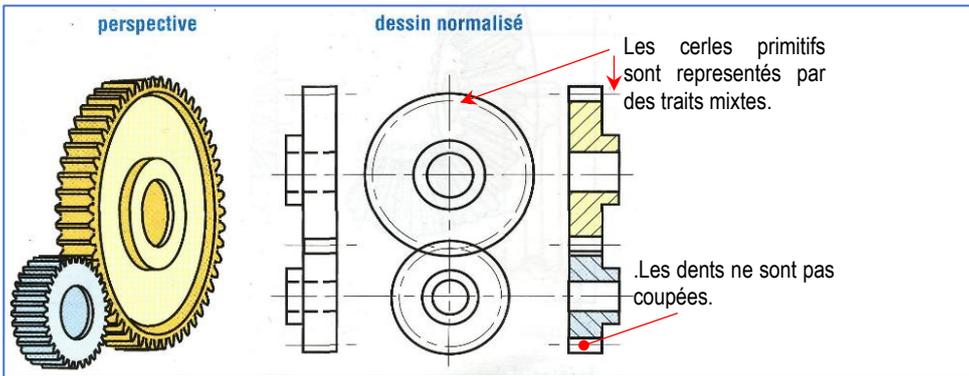
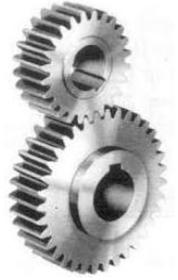
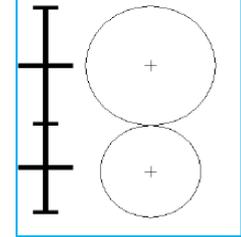


Schéma cinématique



• Parmi les caractéristiques du tableau ci-dessous, on retient en particulier les suivantes, vue leur utilisation très pratique :

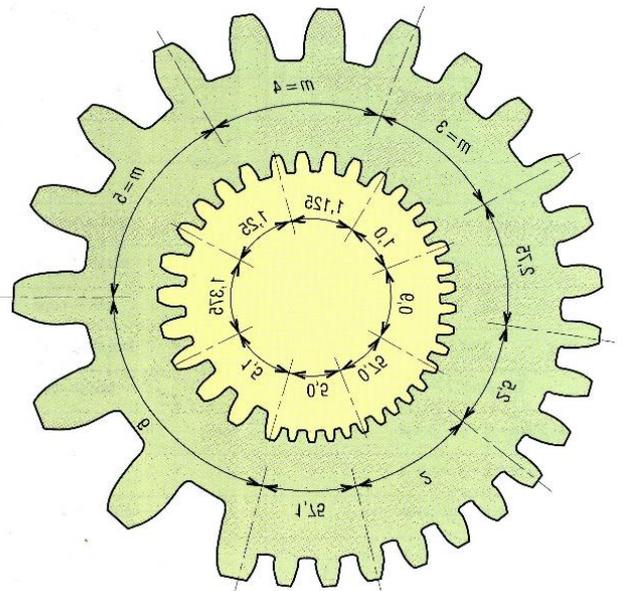
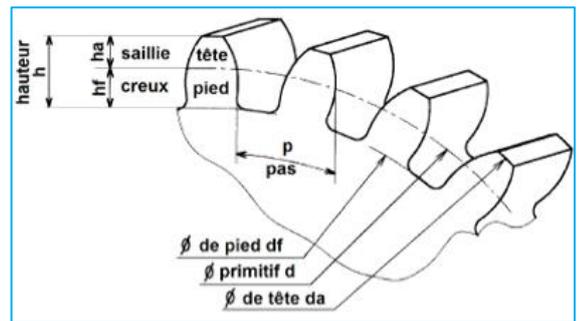
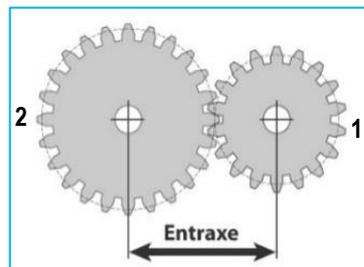
- **Le diamètre primitif d :** C'est le diamètre le long duquel les dents s'engrènent. C'est la valeur fondamentale de l'engrenage et c'est le point de départ pour le calcul des transmissions ; c'est comme si on utilisait 2 roues de friction qui auraient ce diamètre.
- **Le module m :** C'est un paramètre normalisé, qui caractérise la périodicité des dents. Il permet de calculer les principales caractéristiques (hauteur, largeur, diamètre primitif, etc.). Il est déterminé par un calcul de résistance de matériaux (RDM).
- **Le nombre de dents Z :** C'est tout simplement le nombre de dents d'une roue dentée ; on note en particulier la relation liant le diamètre primitif d, le module m et le nombre de dents Z :

$$d = m \cdot Z$$

On en déduit la relation liant le pas **p** et le module **m** :

$$p = \frac{\pi \cdot d}{Z} = \frac{\pi \cdot m \cdot Z}{Z} = \pi \cdot m$$

- **L'entraxe :** C'est la distance entre les 2 axes des 2 roues.



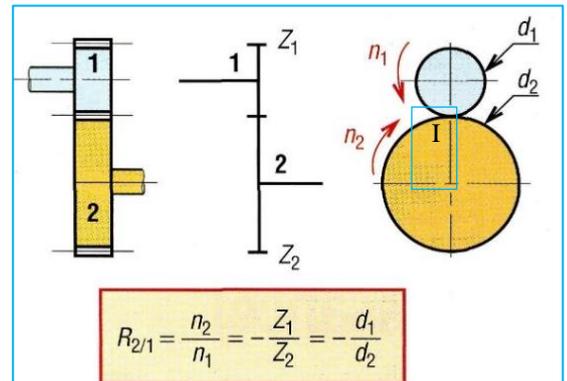
Module	m	Déterminé par un calcul de résistance des matériaux Déterminé à partir des rapports des vitesses
Nombre de dents	Z	angulaires $\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{N_A}{N_B} = \frac{Z_B}{Z_A}$
Pas	p	$p = m \cdot \pi$
Saillie	ha	$ha = m$
Creux	hf	$hf = 1,25 \cdot m$
Hauteur de dent	h	$h = ha + hf = 2,25 \cdot m$
Diamètre primitif	d	$d = m \cdot Z$
Diamètre de tête	da	$da = d + 2 \cdot m$
Diamètre de pied	df	$df = d - 2,5 \cdot m$
Largeur de denture	b	$b = k \cdot m$ (k valeur à se fixer, $6 \leq k \leq 10$)
Entraxe de deux roues A et B	a	$a = \frac{d_A + d_B}{2} = \frac{mZ_A}{2} + \frac{mZ_B}{2} = \frac{m(Z_A + Z_B)}{2}$

Rapport de vitesses

Engrenage extérieur

- Par analogie avec les roues de friction, les cylindres primitifs de rayon d_1 et d_2 roulent l'un sur l'autre au point **I**, sans glissement. Ainsi, l'expression du rapport des vitesses est :

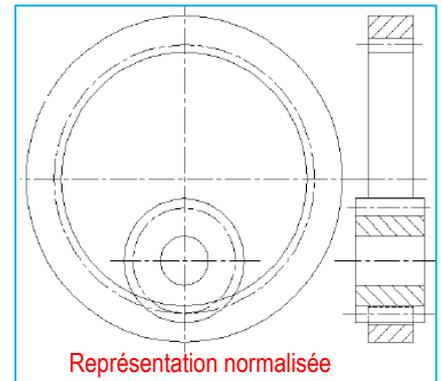
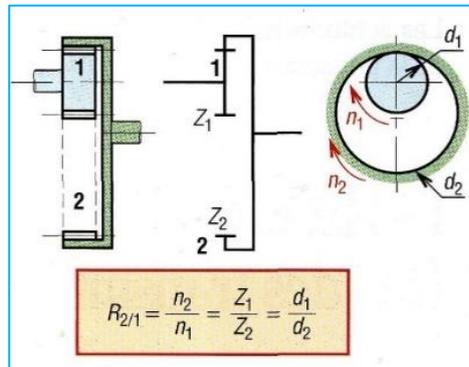
$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{m \cdot Z_1}{m \cdot Z_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$



Le signe "-" indique que le sens de rotation en sortie est inversé par rapport à celui en entrée.

Engrenage intérieur

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



Représentation normalisée

Condition d'engrènement :

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

Efforts sur la denture

Action de contact F_{2/1}

- C'est l'action exercée par la roue 2 sur la roue 1, dont la ligne d'action est inclinée de **l'angle de pression α** et passant par **I**, point de contact entre les cercles primitifs.

Effort tangentiel F_T (Effort utile)

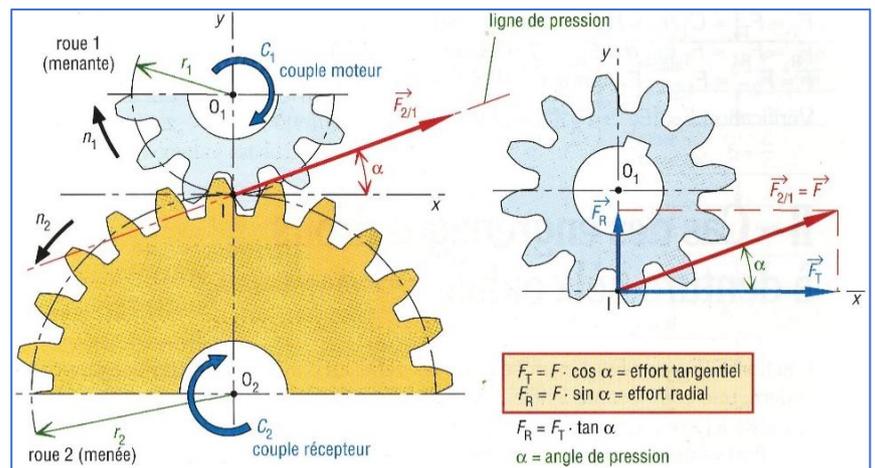
- Il est obtenu en projetant **F_{2/1}** sur la tangente en **I**, aux cercles primitifs (axe x). **F_T** est à l'origine du couple transmis.

$$F_T = F_{2/1} \cdot \cos \alpha$$

Effort radial F_R (Effort parasite)

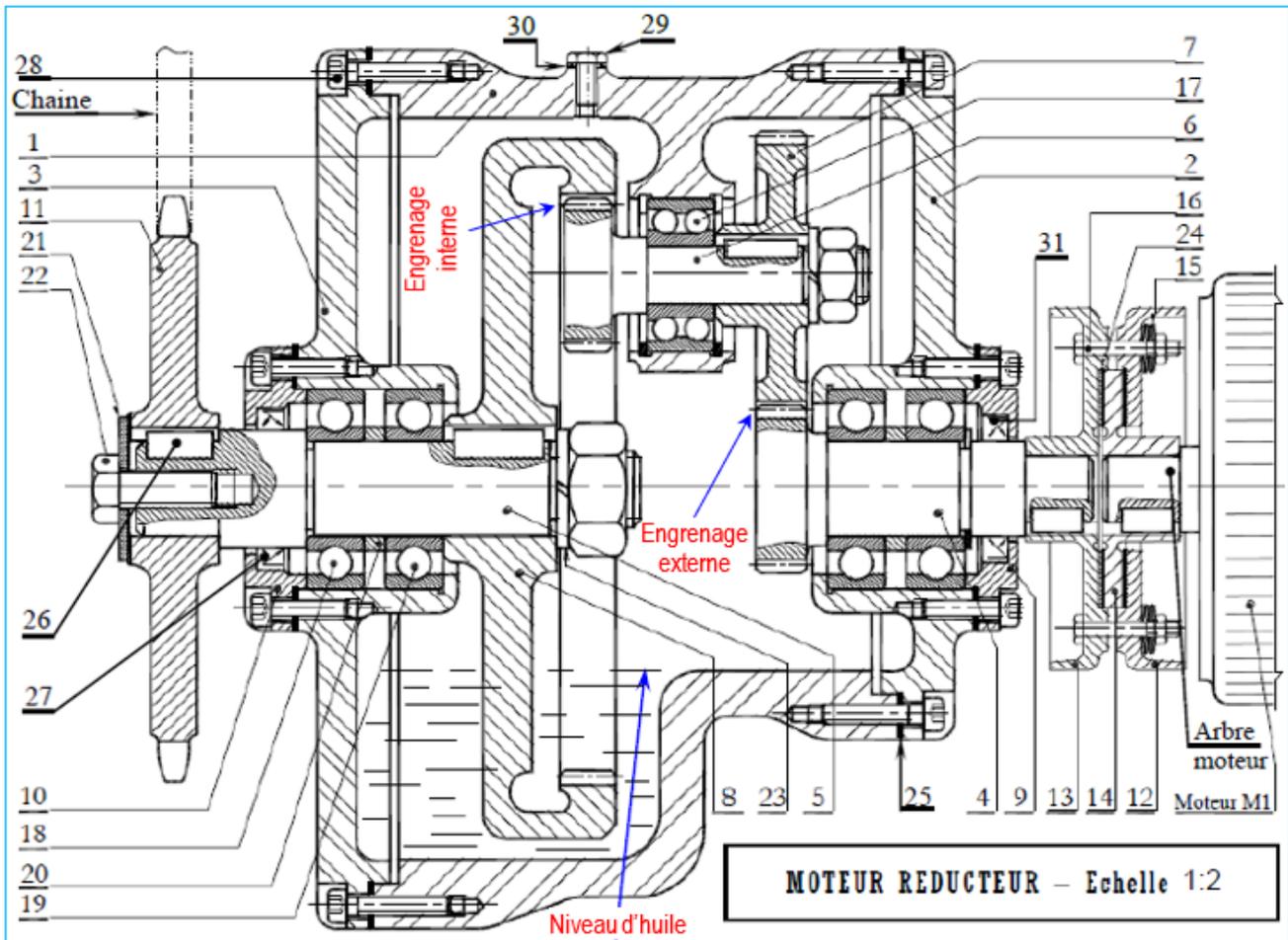
- La force **F_R** est obtenue en projetant **F_{2/1}** sur O₁O₂ (axe y). Cette force ne participe pas à la transmission du couple et son action a tendance à séparer les 2 roues et se traduit par un **fléchissement des arbres**.

$$F_R = F_{2/1} \cdot \sin \alpha$$



Application : Réducteur à engrenages à 2 étages

- Le dessin d'ensemble de la page suivante représente un **moto-réducteur** (moteur + réducteur), utilisé par exemple dans un convoyeur (tapis roulant) :
 - L'arbre moteur est accouplé, via l'ensemble {12, 13, 14, 15, 16, 24}, à l'arbre (4) à un réducteur à engrenages à 2 étages (1^e étage : 4, 7) et (2^e étage : 6, 8).
 - La roue (8) est une couronne et les arbres (4) et (6) sont 2 « **pignons arbrés** », i.e. 2 arbres où sont usinés 2 pignons.
 - Le mouvement de rotation de l'arbre de sortie du réducteur (5) est transmis, par exemple au tambour du tapis, par un système pignon-chaîne (pignon (11)).
 - La roue (7) est encastrée avec le pignon arbré (6), via un écrou H et une rondelle Grower, la vis (22), une clavette et l'épaulement (6) associé à la bague interne du roulement (17).
 - Le même principe est utilisé pour la couronne (8).
 - La roue (11) est encastrée avec l'arbre (5), via la clavette (26), la vis/rondelle (22/21) et l'épaulement de (5).



10	1	Couvercle
9	1	.....
8	1	Couronne
7	1	Roue d'entrée
6	1	Arbre intermédiaire
5	1	Arbre de sortie
4	1	Arbre d'entrée
3	1	Carter
2	1	Carter
1	1	Corps
Rep	Nbr	Désignation

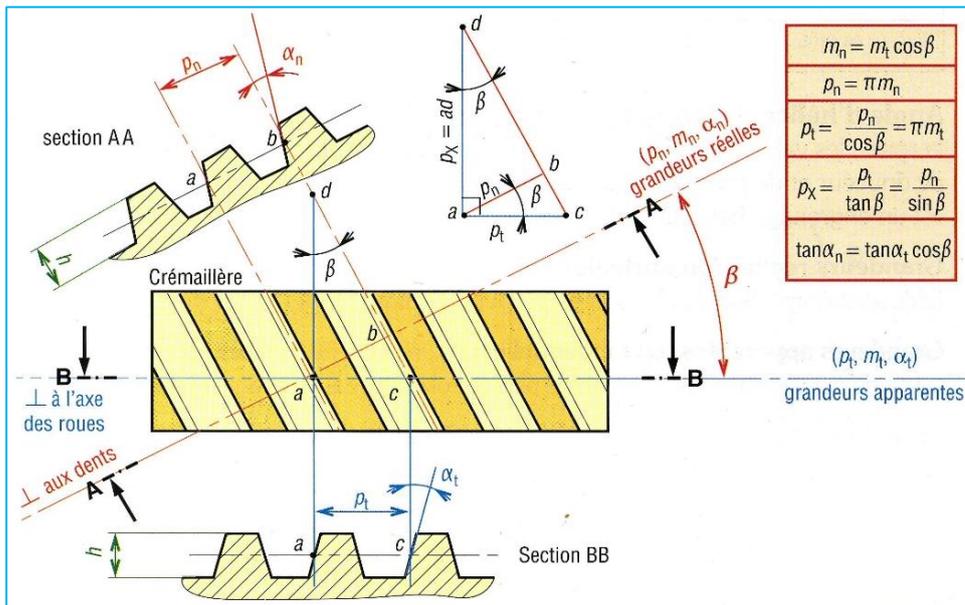
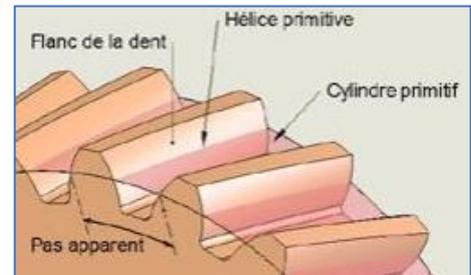
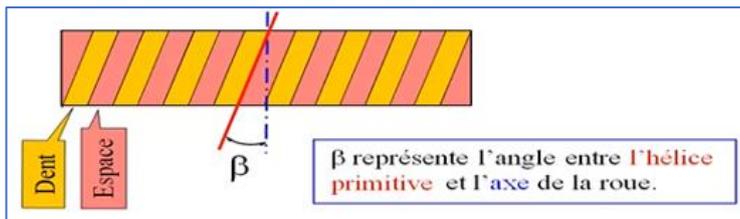
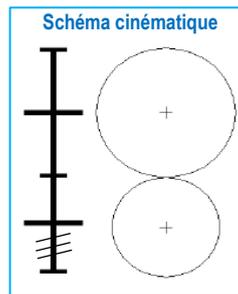
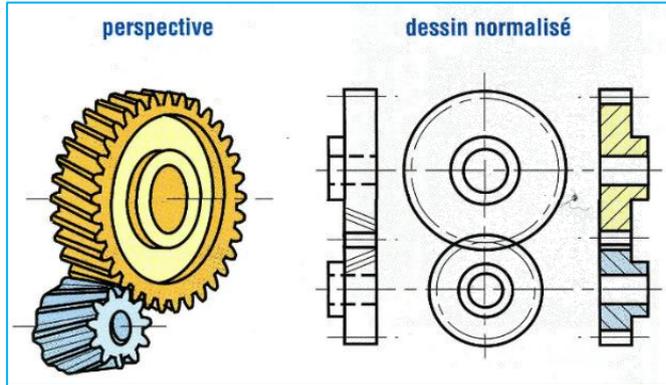
20	2	.....
19	2	Roulement BC
18	2	.....
17	1	Roulement BE
16	6	Boulon H
15	4	Rondelle Belleville
14	1	Disque
13	1	Plateau
12	1	Plateau
11	1	Roue de la chaîne
Rep	Nbr	Désignation

31	.....	.....
30	.....	.....
29	.....	.....
28	8	.....
26	1	.....
25	1	.....
24	2	Garniture
23	1	.....
22	1	.....
21	1	.....
Rep	Nbr	Désignation

Les engrenages à axes parallèles à denture hélicoïdale

Présentation

- De même usage que les engrenages à denture droite, ils sont très utilisés en transmission de puissance ; les dents des roues sont inclinées par rapport à l'axe de rotation des 2 arbres.
- L'angle d'inclinaison β est le même pour les 2 roues, mais de **sens opposé**.
- À taille égale, ils sont plus **performants** que les engrenages à denture droite.
- Du fait d'une meilleure **progressivité et continuité** de l'engrènement, ils sont aussi plus **silencieux** ; en effet, le contact entre les dents débute par un point pour gagner progressivement toute la largeur des dents.



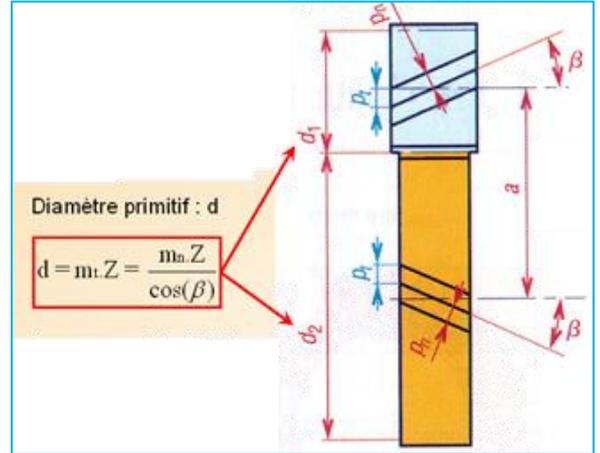
Caractéristiques principales

Désignation	Formule	Désignation	Formule
Module réel	m_n Par un calcul de RDM	Diamètre primitif	$d = m_t Z$
Nombre de dents	Z Par un rapport de vitesse	Pas apparent	$\rho_t = \rho_n / \cos \beta$
Angle d'hélice	β Entre 20° et 30°	Pas réel	$\rho_n = \pi m_n$
Module apparent	$m_t = m_n / \cos \beta$	Hauteur de dent	$h = 2,25 m_n$



- **Angle d'hélice (β)** : Il mesure l'inclinaison de la denture, ou de l'hélice, par rapport à l'axe de la roue ; il est de valeur usuelle entre 15° et 30° . De grandes valeurs de β amènent plus de douceur et de progressivité mais aussi des efforts axiaux plus grands. Un engrenage droit est un engrenage hélicoïdal avec $\beta=0^\circ$.
- **Grandeurs réelles (ou normales)** : p_n et m_n . Elles sont normalisées et sont mesurées perpendiculairement à l'hélice.
- **Grandeurs apparentes (ou tangentielles)** : p_t et m_t ne sont pas normalisées et dépendent de la valeur de β .
- **Entraxe a** : Il dépend de la valeur de l'angle β . En faisant varier β , on peut obtenir l'entraxe désiré, ce qui est particulièrement intéressant pour les trains d'engrenages.

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m_t(Z_1 + Z_2)}{2} = \frac{m_n(Z_1 + Z_2)}{2\cos\beta}$$



Condition d'engrènement

- Le **même module**.
- Le **même angle d'hélice**, mais de **sens contraire**.

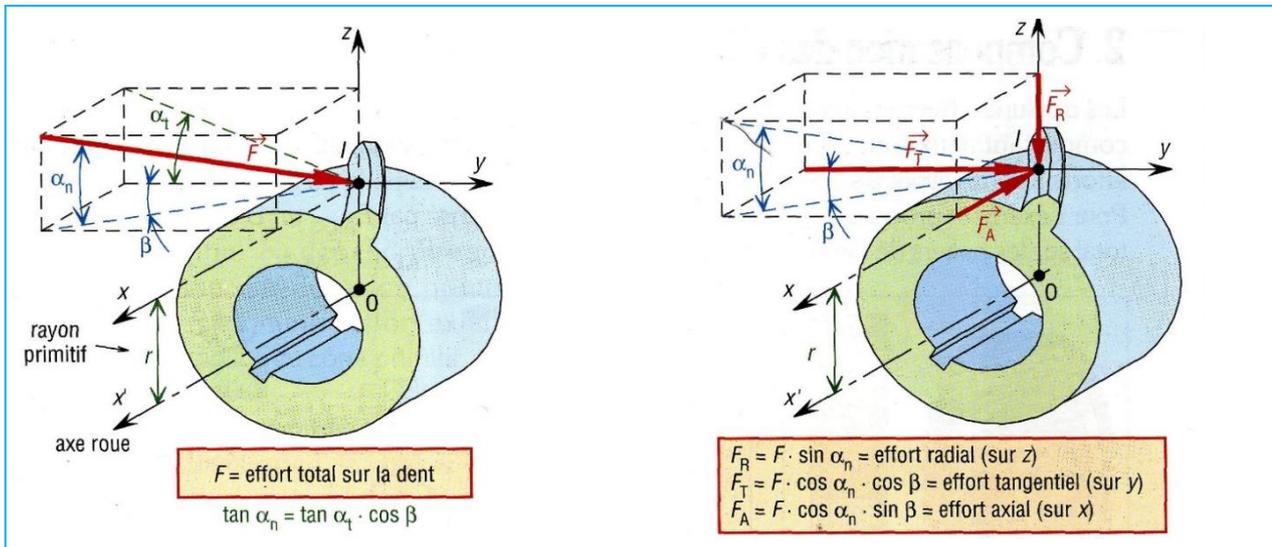
Rapport de vitesses

- Comme pour l'engrenage à denture droite, l'expression du rapport des vitesses est :

$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_1}{d_2}$$

Efforts sur la denture

- L'action F exercée entre les dents en contact présente, par rapport au cas précédent (denture droite), une **composante axiale F_A** supplémentaire due à l'inclinaison β de la denture.
- F_A est parallèle à l'axe de la roue et **se transmet aux paliers** par l'intermédiaire des arbres, ce qui exige l'utilisation de butée, de roulement à contact oblique.



- Les dentures hélicoïdales provoquent une **poussée axiale F_A** , d'où la nécessité de l'emploi de **butées**.
- F_A est **proportionnelle** à l'angle d'hélice β . On peut donc réduire la poussée axiale en diminuant l'angle d'hélice, mais on peut également la supprimer, en utilisant des roues jumelées dont les dentures sont inclinées en **sens opposé** ou encore par l'utilisation d'une **denture en chevrons** (Marque de **Citroën**).

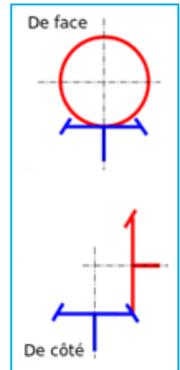
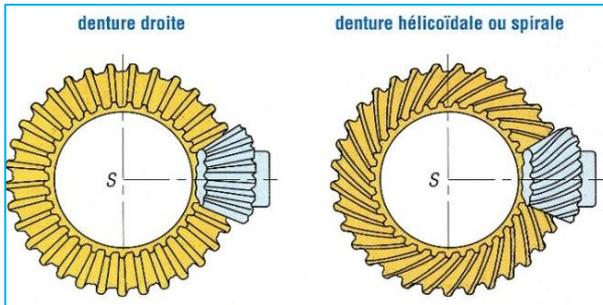
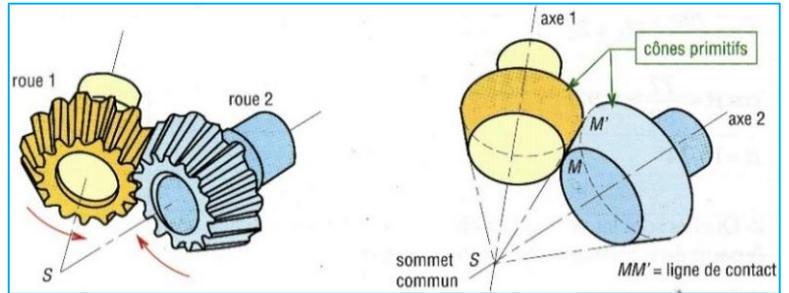
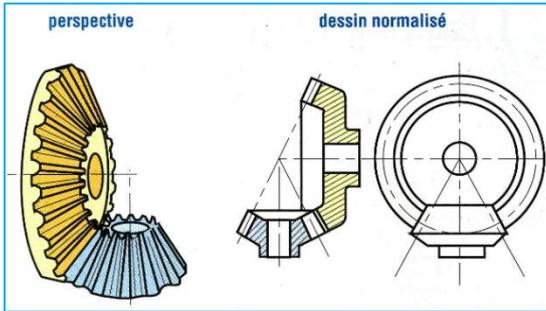




Les engrenages concourants ou coniques

Présentation

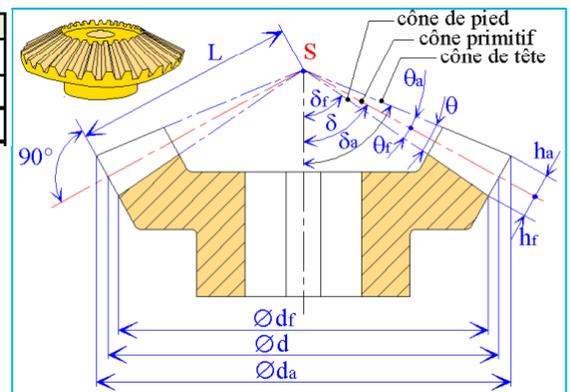
- Les engrenages coniques sont utilisés pour transmettre la puissance entre 2 arbres **généralement perpendiculaires** ; ils permettent de ce fait, ce que l'on appelle un « **renvoi d'angle** », généralement de $\pi/2$. Ils ont un rendement élevé et un fonctionnement non bruyant.
- Les surfaces primitives sont des cônes (**cônes primitifs**). Les cônes sont tangents sur une ligne de contact MM' et leur sommet commun est le point S, c'est aussi le point d'intersection des axes de rotation des deux roues.



Caractéristiques

Désignation	Formule	Désignation	Formule
Module	m Par un calcul de RDM	Saillie	$h_a = m$
Nombre de dents	Z Par un rapport de vitesse	Creux	$h_f = 1,25m$
Angle primitif	$\tan \delta_1 = Z_1/Z_2$	Hauteur de dent	$h = 2,25m$

Schéma cinématique



Condition d'engrènement

- Le **même module**.
- Leurs sommets de cône confondus**.
- Le même angle d'hélice**, en cas de denture hélicoïdale.

Rapport de vitesses

- Soit un point **M** de la ligne de contact des 2 cônes. Le sommet **S** se trouve aussi sur cette ligne.

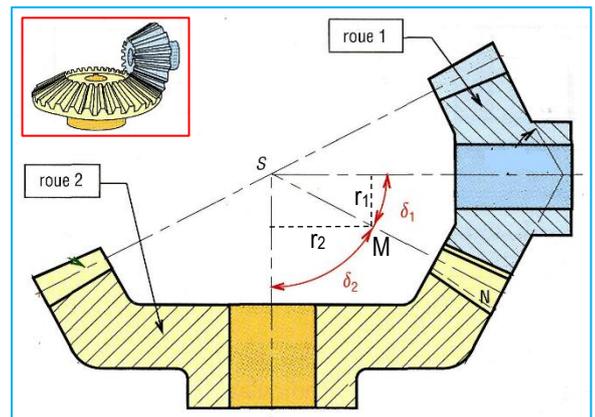
$$r_1 = SM \cdot \sin(\delta_1)$$

$$r_2 = SM \cdot \sin(\delta_2)$$

$$\delta_1 + \delta_2 = \frac{\pi}{2} ; \delta_2 = \frac{\pi}{2} - \delta_1$$

$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

$$r = \frac{SM \cdot \sin(\delta_1)}{SM \cdot \sin(\delta_2)} = \frac{\sin(\delta_1)}{\sin(\delta_2)}$$



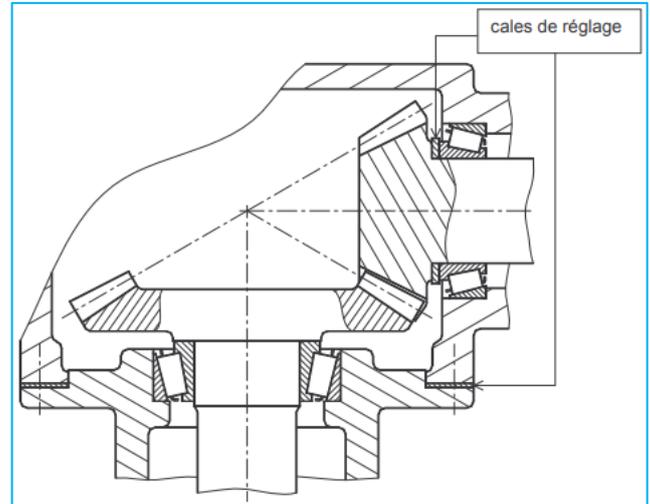
$$r = \frac{\sin(\delta_1)}{\sin(\frac{\pi}{2}-\delta_1)} = \frac{\sin(\delta_1)}{\cos(\delta_1)} = \tan(\delta_1)$$

L'expression du rapport des vitesses est alors :

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

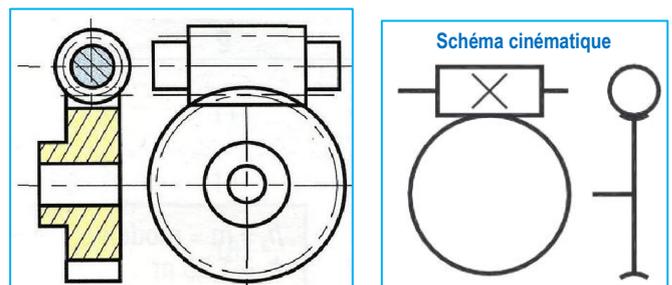
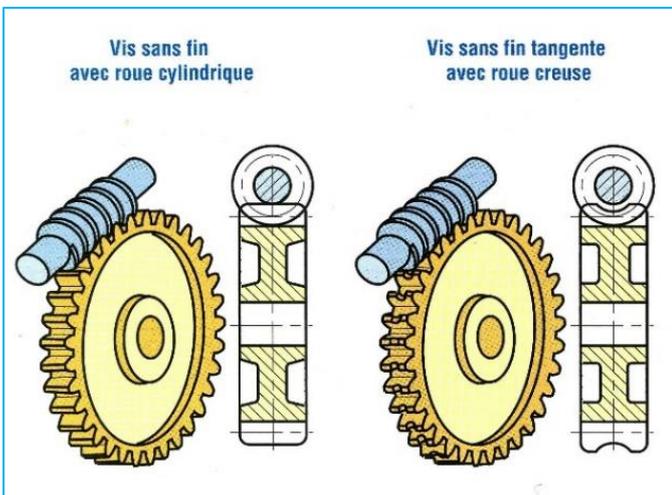
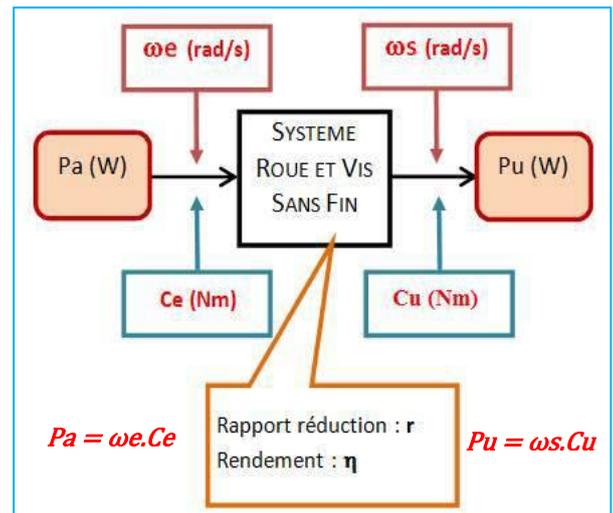
Application : Engrenage conique avec cales de réglage

- Une des conditions d'engrènement d'un engrenage conique est la **coïncidence** des **sommets** des cônes primitifs.
- Ces sommets étant comme **virtuels**, ce réglage s'en trouve difficile à réaliser.
- Ce réglage est souvent réalisé par l'intermédiaire de **cales de réglage** lors du montage des roues.
- La figure ci-contre en montre un exemple.



Roue et vis sans fin (Engrenage gauche)

- Un **engrenage gauche** est un engrenage dont les axes de la rotation ne sont ni parallèles, ni concourants ; l'exemple le plus fréquent est le système roue et vis sans fin.
- C'est un engrenage à **denture hélicoïdale**, où les axes sont donc **orthogonaux et non concourants**.
- Il a un grand **rapport de réduction** (1/200), avec un **faible encombrement** et un couple transmissible important.
- Les dents de la vis s'appellent des **filets (1 à 8 filets)**.
- C'est un système **généralement irréversible**, ce qui constitue une **sécurité** d'anti-retour, comme par exemple dans les systèmes de levage, de fermeture, etc. La réversibilité est possible en respectant certaines **conditions sur les angles** mis en jeu dans le système (angle de pression, angle d'hélice et angle de frottement).
- En revanche, un frottement important provoque un **rendement médiocre**. De ce fait, une bonne lubrification est indispensable ainsi que des couples de matériaux à faible frottement (exemple : vis acier avec **roue en bronze**). En plus, la vis n'est pas standard.
- Les efforts sur les dentures du système roue et vis sans fin ne sont pas vus dans cette section, vue leur complexité.

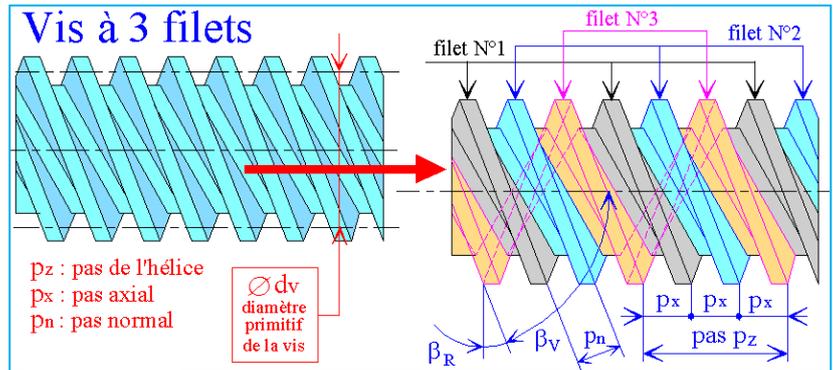
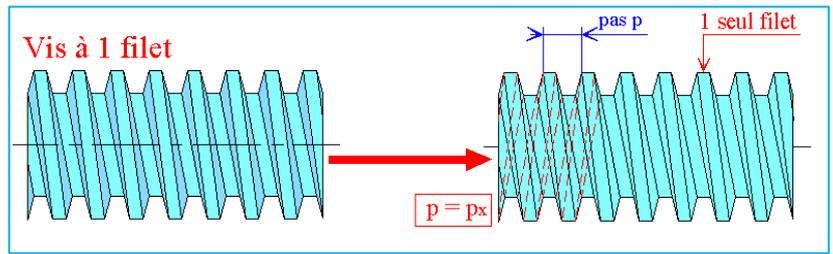


Les systèmes à roue creuse sont utilisés pour de plus grands efforts.



Caractéristiques

- Parmi les caractéristiques, on retient en particulier les suivantes, vue leur utilisation pratique :
 - **Filet** : Une des dents de la vis. On peut avoir un ou plusieurs filets (1 à 8).
 - **Nombre de filets de la vis** : Z_v .
 - **Nombre de dents de la roue** : Z_r .
 - **Pas axial** : p_x est le rapport entre le pas hélicoïdal p_z et le nombre de filets. Le pas axial est égal au pas hélicoïdal si le nombre de filet est égal à 1.
 - **Pas hélicoïdal** : $p_z = p_x \cdot Z_v$.



Condition d'engrènement

- **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

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

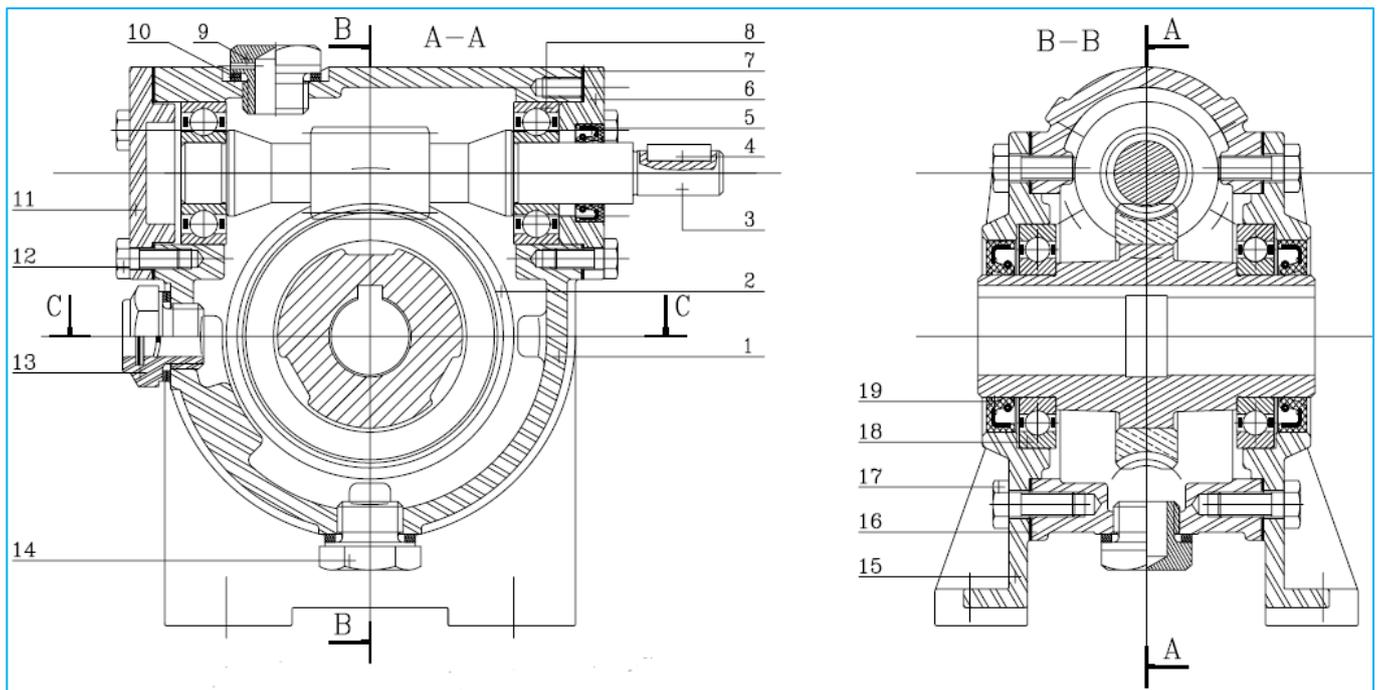
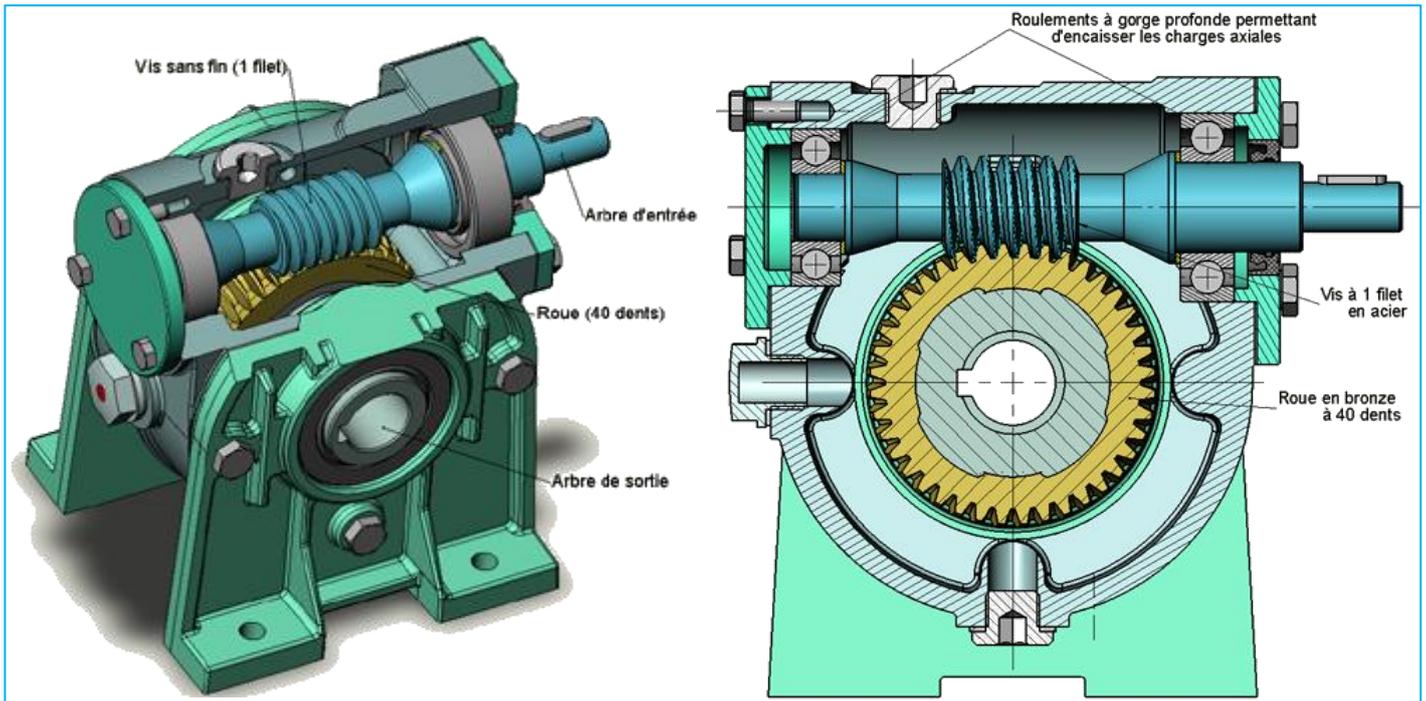
- Z_v et Z_r sont respectivement le **nombre de filets de la vis** et le nombre de dents de la roue.
- ω_1 et ω_2 sont respectivement la vitesse angulaire de la vis et la vitesse angulaire de la roue.

Application : Réducteur à Roue et vis sans fin

- La figure ci-contre est la photo d'un réducteur du commerce, le **SNT RI 40** ; il fait partie d'une famille de réducteurs à roue et vis sans fin qui se caractérise par une gamme étendue de rapports de réduction (1/7 et 1/100). La page suivante présente son plan d'ensemble.
- Il est à **roue et vis sans fin** ; le moteur est accouplé à **l'arbre** d'entrée, vis sans fin (3), via la clavette (4) ; la rotation de la vis provoque celle de la roue creuse (2) liée à **l'arbre creux** de sortie.
- Contrairement à l'arbre habituel (**arbre plein**), l'arbre creux ne possède pas un intérieur plein, mais creux ; cette propriété présente des avantages, notamment un **gain en poids**.
- La vis sans fin est guidée en rotation par les **2 roulements** (8), ce qui est de même pour la roue, les 2 roulements (18).
- On observe sur le dessin en couleur que la roue est en **bronze** et la vis en acier, ce qui correspond à une situation très courante dans ce type de transmission du fait que :
 - La zone de la vis soumise à **l'usure est limitée**, contrairement à la roue où l'usure est bien répartie.
 - Le **facteur de frottement** entre bronze et acier est relativement favorable.



- Le système est **lubrifié à l'huile** ; le bouchon (9) sert pour le remplissage le bouchon (14) sert pour la vidange.
- Les joints plats (7) et (16) assurent **l'étanchéité statique**, alors que les joints à lèvres (5) et (19) assurent **l'étanchéité dynamique**.



10	3	Rondelle d'étanchéité			
9	2	Bouchon de remplissage	19	2	Joint à 2 lèvres
8	2	Roulement	18	2	Roulement
7	1	Joint plat	17	8	Vis
6	1	Chapeau	16	2	Joint plat
5	1	Joint à lèvres	15	2	Flasque
4	1	Clavette	14	1	Boucon de vidange
3	1	Vis sans fin	13	1	Voyant du niveau d'huile
2	1	Roue creuse	12	6	Vis
1	1	Carte	11	1	Chapeau
Rp	Nb	Designation	Rp	Nb	Designation



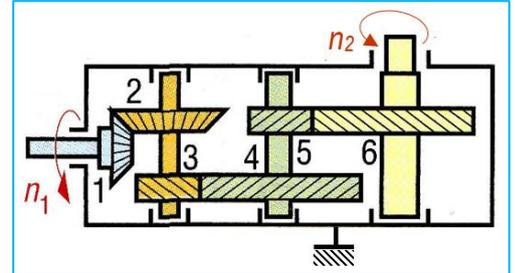
Train d'engrenages

- Une combinaison ou une cascade de plusieurs engrenages est appelée **train d'engrenages** ; il y en a 2 types :
 - Train simple.
 - Train épicycloïdal.

Train d'engrenages simple

- Un train d'engrenages est dit simple ou ordinaire, quand chacune des roues dentées tourne autour d'un **axe fixe par rapport au bâti**. Le rapport de la transmission (ou raison) d'un train d'engrenages est le quotient de la vitesse de sortie (ω_s, N_s) par la vitesse d'entrée (ω_e, N_e) :

$$r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{N_s}{N_e}$$



- 2 cas peuvent se présenter alors :
 - Si ($r < 1$), le système est un **réducteur** de vitesse et r est le rapport de réduction.
 - Si ($r > 1$), le système est un **multiplicateur** de vitesse et r est le rapport de multiplication.
- Dans la grande majorité des cas, c'est l'aspect réducteur qui est recherché pour réduire la vitesse et en même temps augmenter le couple de sortie. En effet, en supposant avoir un rendement de 1, on a alors :

$$P_s = P_e \Leftrightarrow C_s \cdot \omega_s = C_e \cdot \omega_e \Leftrightarrow C_s = C_e \cdot \frac{\omega_e}{\omega_s}$$

Alors pour une puissance d'entrée P_e donnée :

- Si ($\omega_s < \omega_e$), alors ($C_s > C_e$).
- Si ($\omega_s > \omega_e$), alors ($C_s < C_e$).

Principe sur 2 engrenages

- Soit le train d'engrenages à 2 étages ci-contre ; on a :
 - n_1 comme vitesse d'entrée et n_4 comme vitesse de sortie avec ($n_2 = n_3$).
 - $\frac{n_2}{n_1} = -\frac{Z_1}{Z_2} \Rightarrow n_2 = -n_1 \frac{Z_1}{Z_2}$
 - $\frac{n_4}{n_3} = -\frac{Z_3}{Z_4} \Rightarrow \frac{n_4}{n_3} = \frac{n_4}{n_2} = \frac{n_4}{n_1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$

On en déduit que :

$$r = \frac{n_4}{n_1} = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{Z_3}{Z_4}$$

De ce système de train d'engrenages à 2 étages, on peut tirer le principe général.

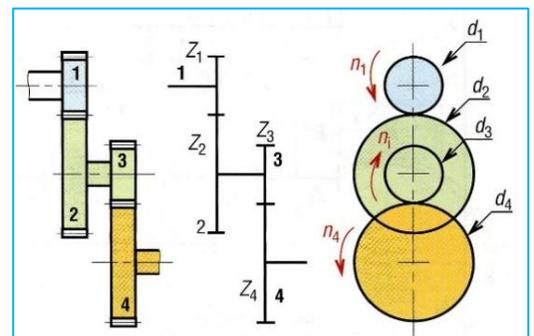
Principe général

- Le rapport de réduction d'un train d'engrenages ordinaire est égal au produit des différents rapports des différents engrenages en cascade. Dans l'exemple précédent, on a :

$$r = \frac{n_4}{n_1} = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{Z_3}{Z_4}$$

Rapport de l'engrenage formé des roues 1 et 2.

Rapport de l'engrenage formé des roues 3 et 4.



$$R_{4/1} = \frac{n_4}{n_1} = R_{4/3} \cdot R_{2/1} = \frac{Z_3 \cdot Z_1}{Z_4 \cdot Z_2} = \frac{d_3 \cdot d_1}{d_4 \cdot d_2}$$

Les roues 2 et 3 forment une seule roue : une **roue double**. Autrement dit : 1 tour de la roue 2 correspond à 1 tour de la roue 3.

- Plus précisément, on utilise la formule suivante :

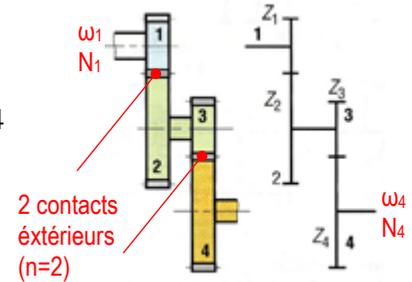
$$r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{N_s}{N_e} = (-1)^n \cdot \frac{\text{Produit des nombres de dents des roues menantes}}{\text{Produit des nombres de dents des roues menées}} = (-1)^n \cdot \frac{\prod Z_{\text{menantes}}}{\prod Z_{\text{menées}}}$$

- r est le rapport de réduction global du train d'engrenages.
 - ω_s et ω_e correspondent respectivement à la vitesse angulaire (rd/s) de sortie et la vitesse angulaire d'entrée.
 - N_s et N_e correspondent respectivement à la vitesse angulaire (tr/min) de sortie et la vitesse angulaire d'entrée.
 - n est le nombre des contacts extérieurs entre les dents ; $(-1)^n$ détermine alors le sens de rotation de la sortie par rapport à l'entrée : le même (1) ou l'inverse (-1).
- Dans l'exemple précédent à 2 étages, on a :

- $\omega_s = \omega_4$ et $\omega_e = \omega_1$.
- $N_s = N_4$ et $N_e = N_1$.
- La roue 1 et la roue 3 sont des roues menantes et la roue 2 et la roue 4 sont des roues menées.
- $N = 2$.

$$r = \frac{\omega_4}{\omega_1} = \frac{N_4}{N_1} = (-1)^2 \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2 \cdot Z_4}$$

$$r = \frac{\omega_4}{\omega_1} = \frac{N_4}{N_1} = \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2 \cdot Z_4}$$



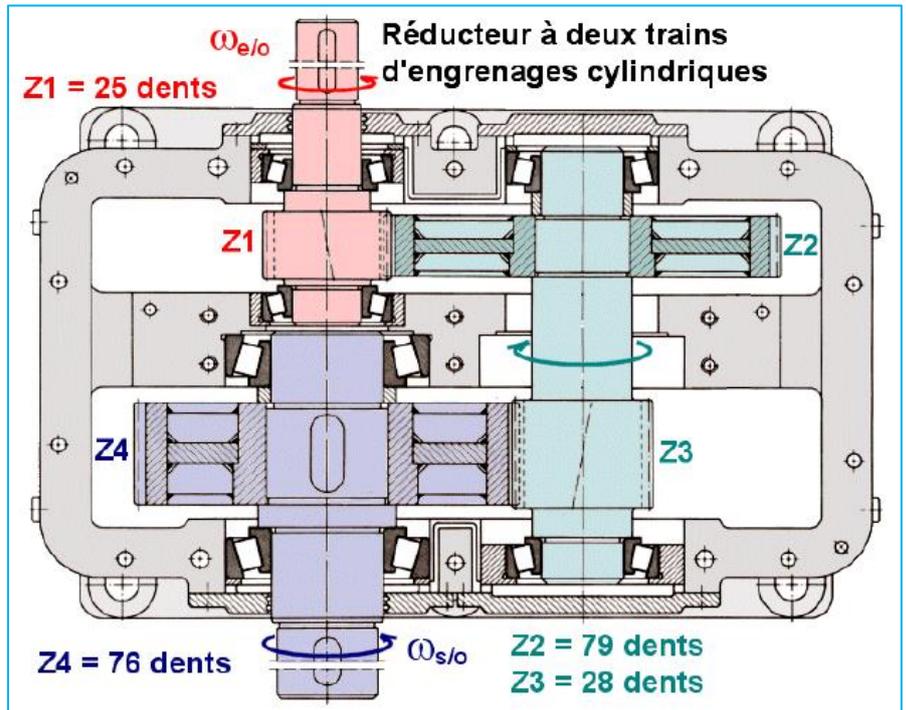
Application : Réducteur à engrenages à 2 étages

- Le 1^{er} étage est formé du pignon arbré (Z_1) et de la roue (Z_2).
- Le 2^e étage est formé du pignon arbre (Z_3) et de la roue (Z_4).
- La roue (Z_2) est encastrée avec le pignon arbré (Z_3).
- La roue (Z_4) est encastrée avec l'arbre de sortie.
- Le rapport de réduction est :

$$r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{N_s}{N_e} = (-1)^2 \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2 \cdot Z_4}$$

$$r = \frac{25.28}{79.76} = 0,116$$

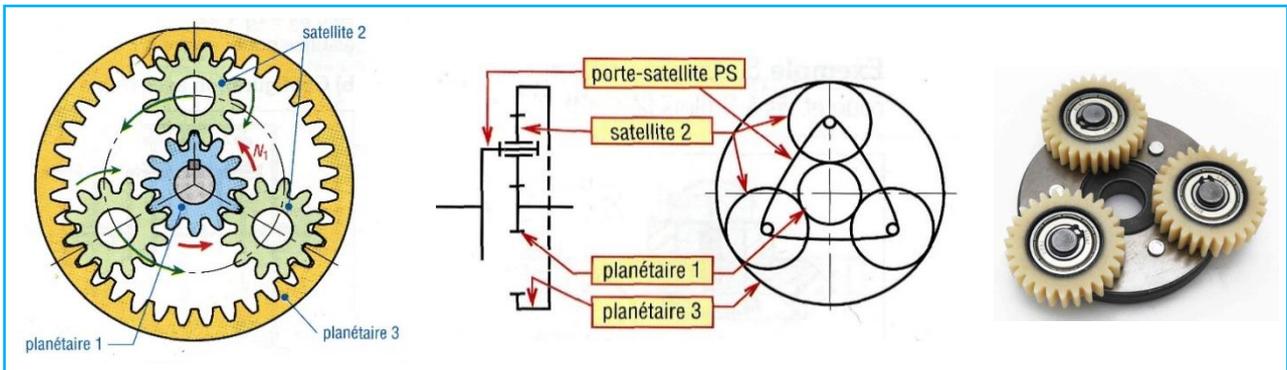
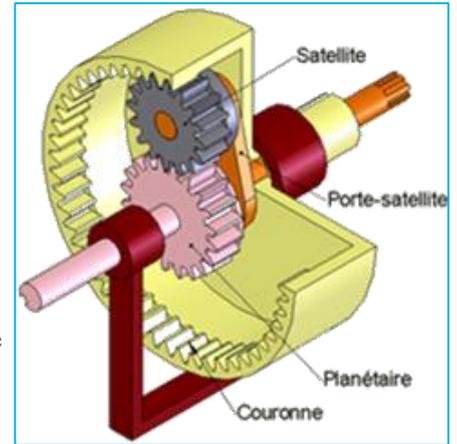
- Les 3 arbres sont guidés en rotation par des roulements coniques ; cela suppose que le système est objet aussi à des efforts axiaux.
- Le montage des roulements est en X, puisqu'il s'agit d'arbres tournants.





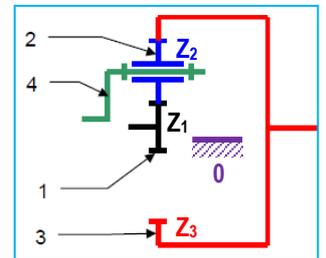
Train épicycloïdal

- C'est un train d'engrenages particulier, dans lequel l'axe d'une des roues n'est pas fixe par rapport au bâti et son déplacement est **circulaire**. Par analogie avec le système solaire, un train épicycloïdal est constitué :
 - D'un pignon central appelé **planétaire** ; on le désigne aussi de planétaire intérieur.
 - D'une roue à denture intérieure (**couronne**) ; on la désigne aussi de planétaire extérieur.
 - D'un ou plusieurs pignons appelés **satellites** engrenant avec le planétaire et la couronne. Les satellites sont portés par un **porte-satellite**.
 - Il y a **2** ou **3 satellites**, ce qui permet l'équilibrage et la répartition des efforts ; mais leur nombre est sans influence sur la raison du train.
 - Les trains épicycloïdaux permettent des **grands rapports** de réduction sous un **faible encombrement**.



Raison d'un train épicycloïdal

- La raison d'un train épicycloïdal ne se calcule pas directement. on procède alors comme suit, en considérant le schéma usuel ci-contre.
- On détermine en premier lieu, la **raison d'un train de base**, où :
 - Le **porte-satellite (4)** est **immobilisé** par rapport au **bâti (0)**.
 - Le mouvement de **sortie** se fait sur la **couronne (3)**.
 - Le **mouvement d'entrée** se fait **sur le planétaire (1)**.
 - La raison de ce train est appelée **raison basique (r_b)**, qui se calcule alors de la façon classique :



$$r_b = \frac{\omega_{3/4}}{\omega_{1/4}} = (-1)^n \cdot \frac{\text{Produit des nombres de dents des roues menantes}}{\text{Produit des nombres de dents des roues menées}}$$

$$r_b = \frac{\omega_{3/4}}{\omega_{1/4}} = (-1)^1 \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_2 \cdot Z_3} = -\frac{Z_1}{Z_3}$$

- Ensuite, on utilise une relation dite « **formule de Willis** », qui est l'application de la composition des mouvements de rotation par rapport au bâti (0) ; ainsi on a :

- $\omega_{3/4} = \omega_{3/0} - \omega_{4/0}$
- $\omega_{1/4} = \omega_{1/0} - \omega_{4/0}$

Alors

$$r_b = \frac{\omega_{3/4}}{\omega_{1/4}} = \frac{\omega_{3/0} - \omega_{4/0}}{\omega_{1/0} - \omega_{4/0}}$$

Soit

$$\frac{\omega_{3/0} - \omega_{4/0}}{\omega_{1/0} - \omega_{4/0}} = -\frac{Z_1}{Z_3}$$

Le nombre de contacts extérieurs **n** est égal à 1 :

- Entre les pignons 1 et 2 : contact extérieur.
- Entre le pignon 2 et la roue 3 : contact intérieur.

- Ainsi, en partant du rapport basique r_b (formule de Willis), on peut distinguer le rapport de réduction r , des **3 cas** de figure suivants :

Cas 1 : Couronne 3 fixe ($\omega_{3/0} = 0$)

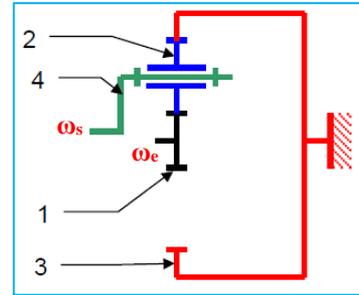
- C'est le cas **le plus utilisé**.

$$\omega_e = \omega_{1/0}$$

$$\omega_s = \omega_{4/0}$$

$$r_b = \frac{\omega_{3/0} - \omega_{4/0}}{\omega_{1/0} - \omega_{4/0}} = \frac{-\omega_{4/0}}{\omega_{1/0} - \omega_{4/0}} = \frac{-\omega_s}{\omega_e - \omega_s} = -\frac{z_1}{z_3}$$

$$\Rightarrow r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = -\frac{z_1}{z_1 + z_3}$$



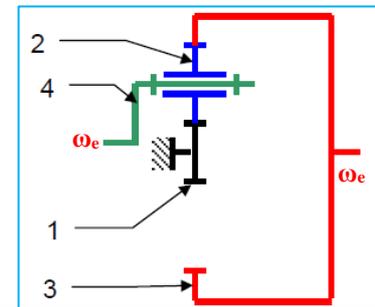
Cas 2 : Planétaire 1 fixe ($\omega_{1/0} = 0$)

$$\omega_e = \omega_{3/0}$$

$$\omega_s = \omega_{4/0}$$

$$r_b = \frac{\omega_{3/0} - \omega_{4/0}}{\omega_{1/0} - \omega_{4/0}} = \frac{\omega_{3/0} - \omega_{4/0}}{-\omega_{4/0}} = \frac{\omega_e - \omega_s}{-\omega_s} = -\frac{z_1}{z_3}$$

$$\Rightarrow r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{z_3}{z_1 + z_3}$$



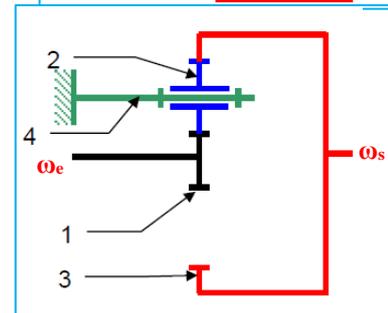
Cas 3 : Porte-satellite 4 fixe ($\omega_{4/0} = 0$)

$$\omega_e = \omega_{1/0}$$

$$\omega_s = \omega_{3/0}$$

$$r_b = \frac{\omega_{3/0} - \omega_{4/0}}{\omega_{1/0} - \omega_{4/0}} = \frac{\omega_{3/0}}{\omega_{1/0}} = -\frac{z_1}{z_3}$$

$$\Rightarrow r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = -\frac{z_1}{z_3}$$

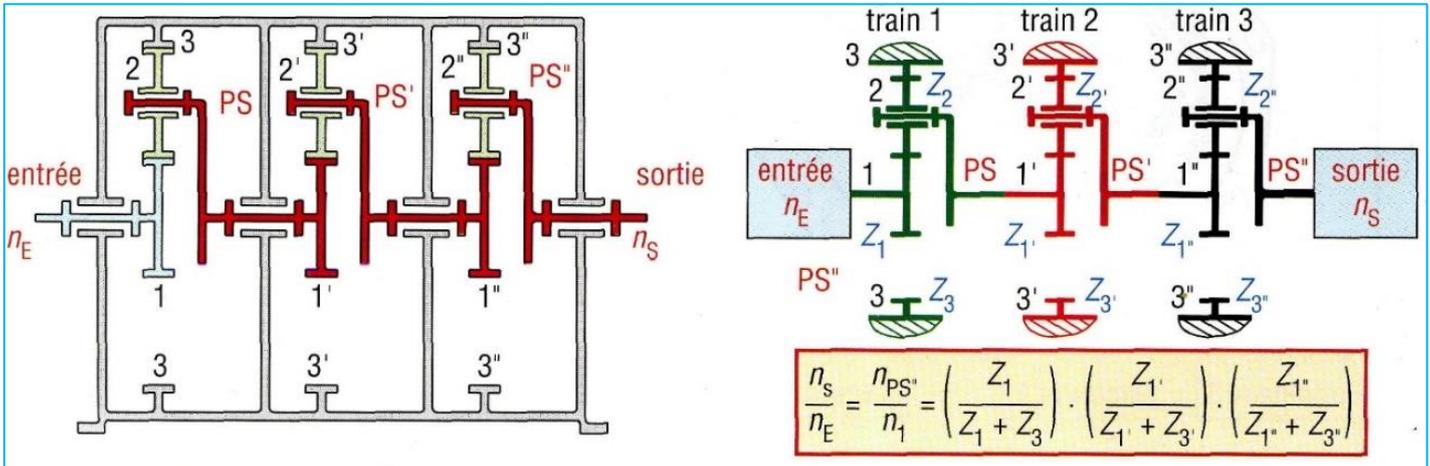


Récapitulatif des 3 cas

planétaire (3) bloqué	planétaire (1) bloqué	porte satellite (PS) bloqué
$n_3 = 0$	$n_1 = 0$	$n_{PS} = 0$
bâti 0 = 3	bâti 0 = 1	bâti 0 = PS
$\frac{n_{PS}}{n_1} = \frac{z_1}{z_1 + z_3}$	$\frac{n_{PS}}{n_3} = \frac{z_3}{z_1 + z_3}$	fonctionne en train classique
$\frac{n_3}{n_1} = -\frac{z_1}{z_3}$		$\frac{n_3}{n_1} = -\frac{z_1}{z_3}$
Cas 1	Cas 2	Cas 3

Configuration avec trains en série (cascade)

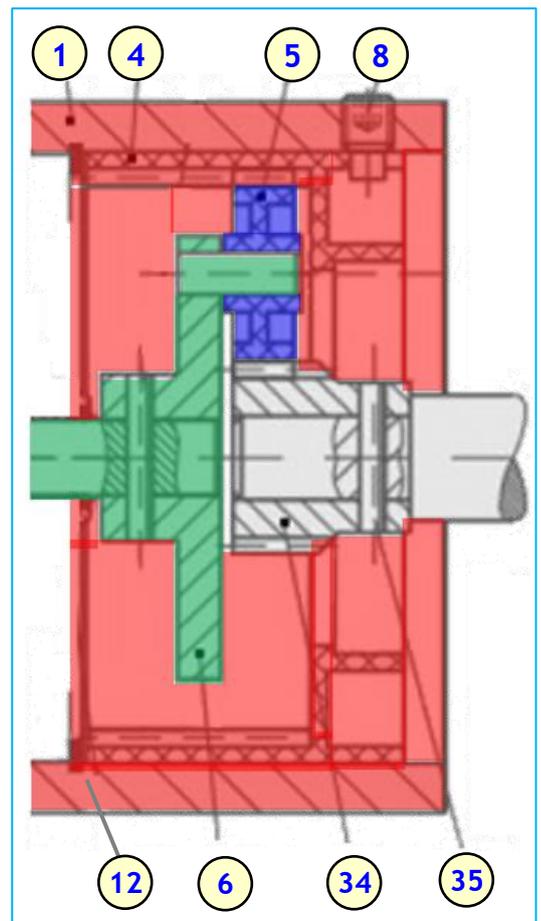
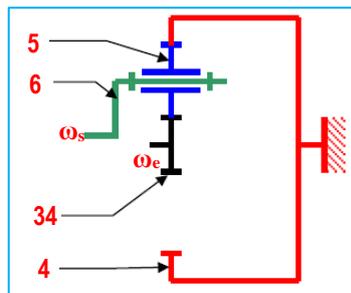
- La figure suivante montre la combinaison de trains épicycloïdaux simples, dans le cas le plus utilisé :
 - La couronne bloquée.
 - L'entrée sur le planétaire 1.
 - La sortie sur le porte-satellite.



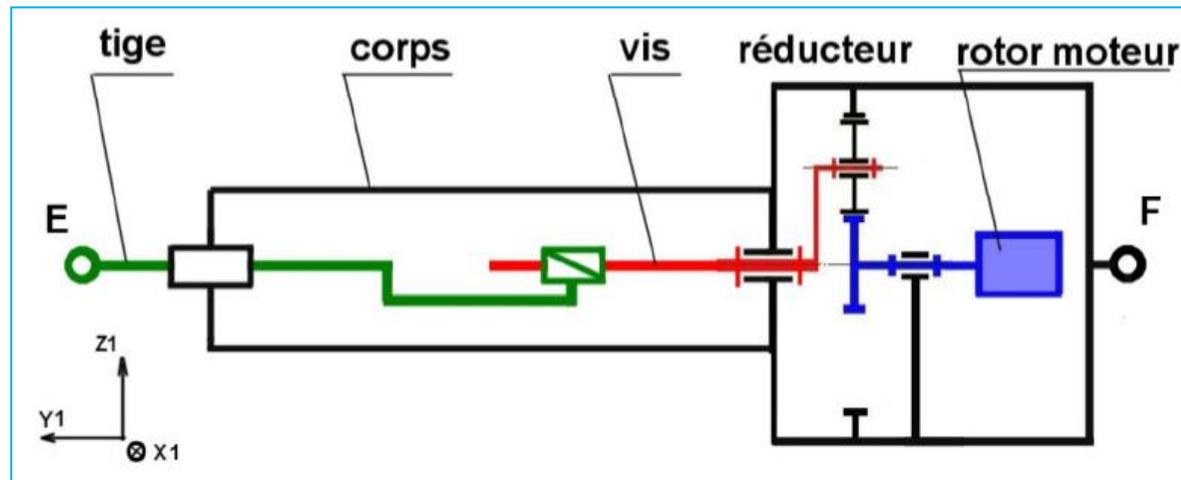
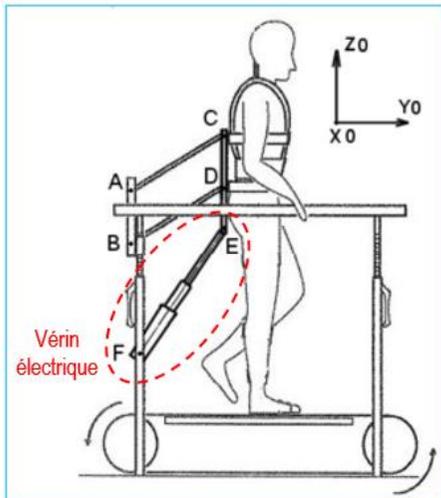
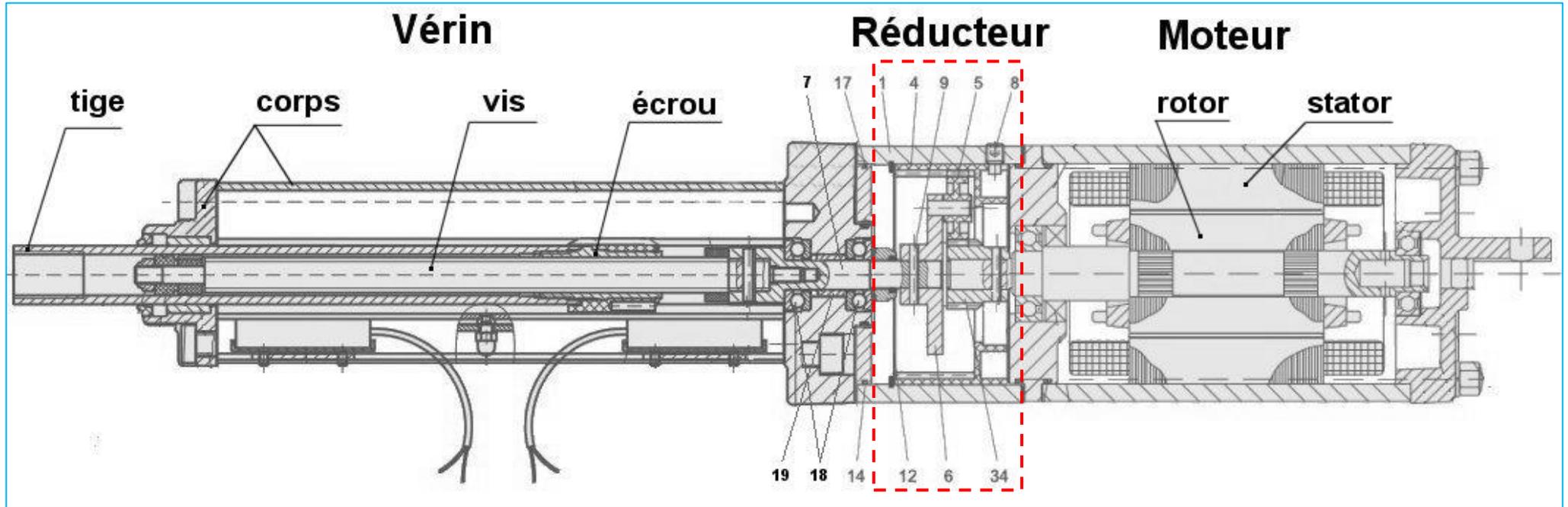
Application

- Il s'agit d'un **vérin électrique** ; la page suivante présente le dessin d'ensemble en coupe longitudinale d'un tel vérin, qui est à base de moteur à courant continu. Dans la même page, on trouve le schéma cinématique minimal du système, qui donne une bonne idée sur son fonctionnement.
- Le système étudié est utilisé, par exemple, au cours de séances de kinésithérapie pour la rééducation à la marche ; il soulève le patient pour soulager ses membres inférieurs pendant la marche.
- Le dessin partiel de la figure ci-contre représente le **réducteur à train épicycloïdal** utilisé dans ce système ; la configuration de ce cas de figure est :
 - Elément bloqué : **Couronne 4 avec bâti 1.**
Moyens de blocage : **Vis 8 et circlips 12.**
 - Entrée : **Planétaire intérieur 34** encastré avec l'arbre d'entrée ; via la goupille 35.
 - Sortie : **Porte-Satellite 6.**
 - Satellite : **Pièce 5.**
 - C'est le **cas 1** parmi les 3 configurations possibles ; alors :

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



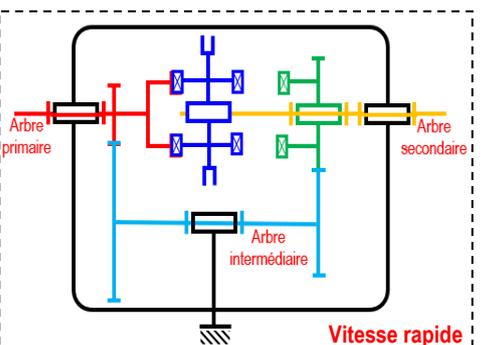
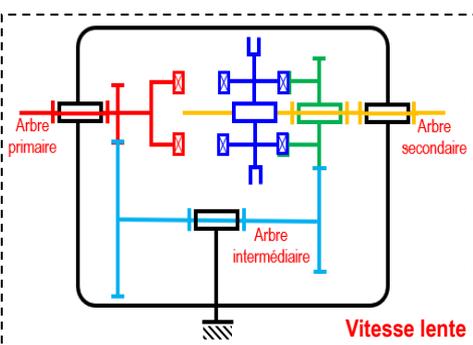
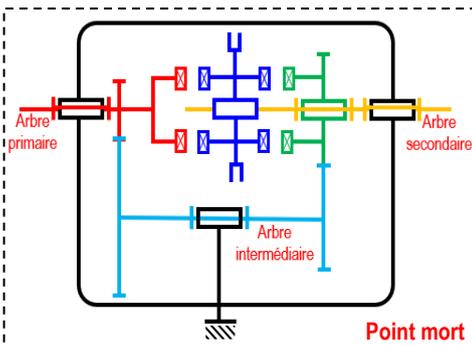
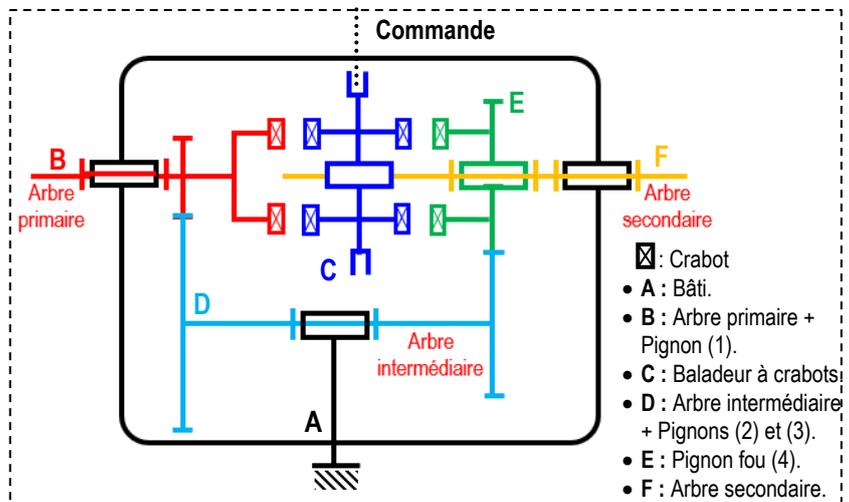
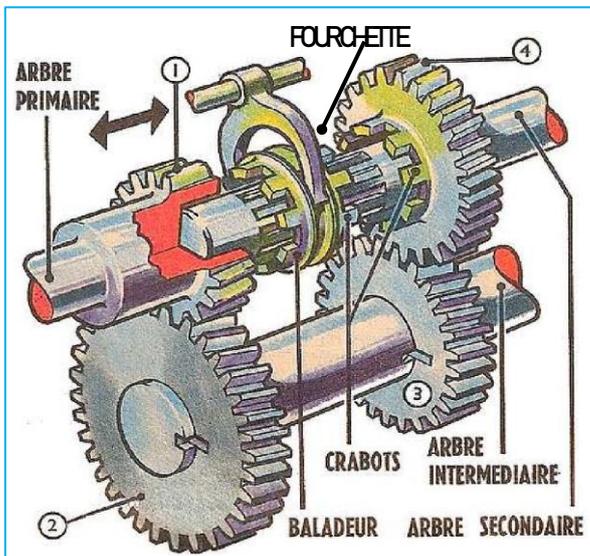
- Les 2 **butées à billes** (18) permettent d'encaisser les charges axiales dans les 2 sens.
- Le système **vis-écrou** est muni d'un sous-système **anti-rotation** ; ainsi, si la vis tourne, l'écrou translate.
- La vis et la tige sont guidées par des **bagues de frottement**.



Boîte de 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.
- C'est un groupement de **plusieurs trains d'engrenages**, dans un même carter, qui 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, ci-bas, la structure de base d'une boîte à vitesses simple, dite **non synchronisée** :
 - Le pignon (1) est un **pignon fixe**, solidaire de **l'arbre primaire** ; il est en **prise constante** avec la roue 2.
 - 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 alors résumés au tableau suivant :

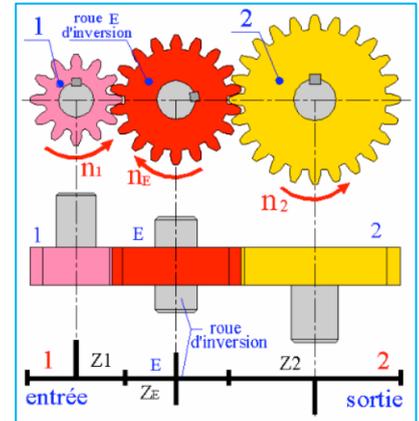
Point mort (Baladeur au centre)	Vitesse lente (Baladeur à droite)	Vitesse rapide (Baladeur à gauche)
$r = 0$	$r = \frac{Z_1 Z_3}{Z_2 Z_4}$	$r = 1$
<ul style="list-style-type: none"> • Le baladeur n'est craboté ni avec le pignon (1) ni avec le pignon (4) 	<ul style="list-style-type: none"> • Le baladeur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



Exercices (Enoncés)

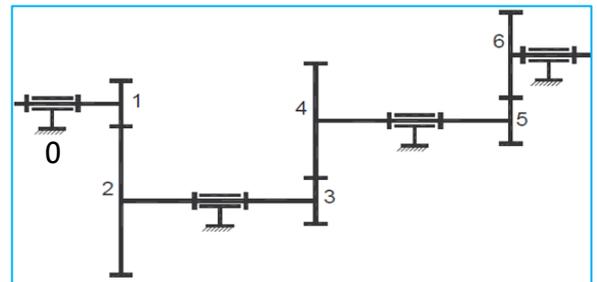
Exercice 1 : Train d'engrenages avec roue d'inversion

Donner l'expression du rapport de réduction $r \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$ du réducteur ci-contre et en déduire le rôle de la roue E.



Exercice 2 : Train d'engrenages avec 3 étages

Donner l'expression du rapport de réduction $r \left(\frac{n_6}{n_1} \right)$ du réducteur ci-contre, qui est représenté par son schéma cinématique.

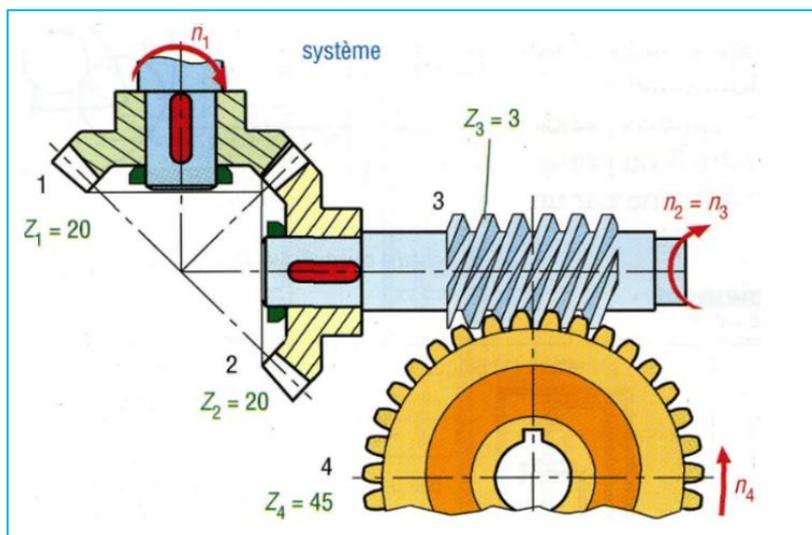


Exercice 3 : Réducteur à engrenages conique et système à roue et vis sans fin

Le réducteur de la figure ci-dessous se compose d'un renvoi d'angle de $\pi/2$ ($Z_1=20$ et $Z_2=20$) et d'un système à roue et vis sans fin ($Z_3=3$ et $Z_4=45$).

1. Donner le schéma cinématique de ce réducteur.
2. Déterminer la valeur de n_4 sachant que $n_1=1500$ tr/min.

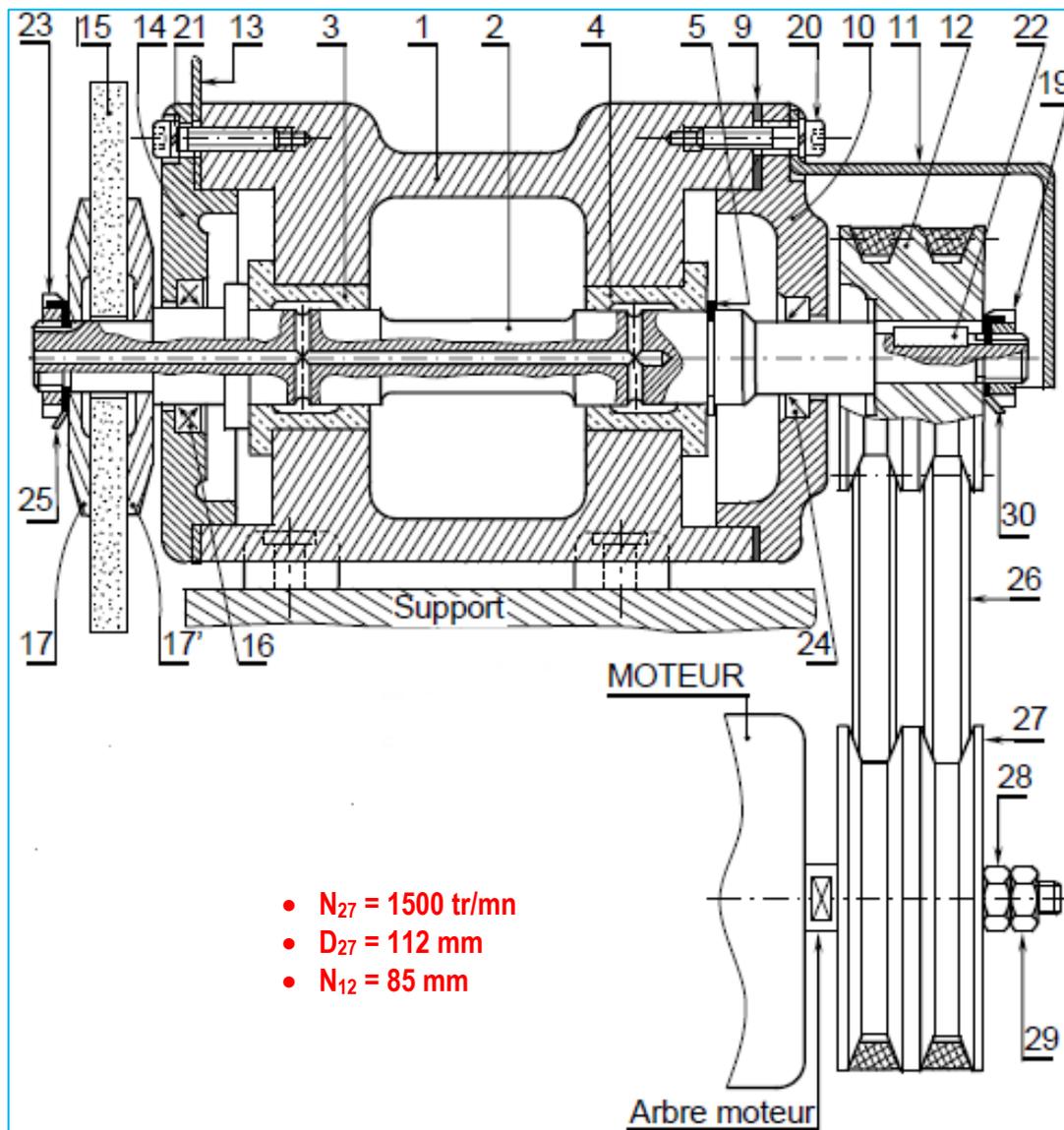
Note : La formule générale est applicable en supprimant le terme $(-1)^p$, qui n'a pas de sens ni pour un engrenage conique ni pour un engrenage avec roue et vis sans fin.



Exercice 4 : Touret à meuler

Le touret à meuler est une machine qui permet d'enlever la matière (acier, bois, caoutchouc, etc.) par abrasion (ébavurage, affûtage, etc.). Le touret à meuler représenté par le dessin d'ensemble suivant, est fixé à une table support, par 4 vis. Un moteur électrique transmet son mouvement à la machine par l'intermédiaire d'un système poulies-courroie. Ainsi :

- La meule ... est solidaire de l'arbre ..., lui-même solidaire de la poulie réceptrice ..., qui reçoit le mouvement de de l'arbre moteur via la poulie motrice ... et la courroie
- Le rapport de réduction de vitesses est alors :
 - $r = \dots$
- La fréquence de rotation N_{12} (tr/min), ainsi que la vitesse angulaire ω_{12} (rd/s) sont :
 - $N_{12} = \dots$; $\omega_{12} = \dots$
- Le desserrage de la poulie motrice est assuré par le-écrou
- Le guidage en de l'arbre moteur ... est assurée par les 2 coussinets ... et
- En plus de axial, les écrous à encoches ... et ... évitent le desserrage de l'arbre moteur 2, des 2 côtés.
- L'étanchéité est réalisée par le joint ..., alors que l'étanchéité est réalisée par les 2 joints à lèvres ... et ...; le joint à 2 lèvres ... évite aussi la pénétration de la due à l'effet du meulage.





30	1	Rondelle frein
29	1	Écrou H (Contre écrou)
28	1	Écrou H
27	1	Poulie motrice
26	2	Courroie trapézoïdale
25	1	.....
24	1	.....
23	1	.....
22	1	.....
21	6	.....
20	6	Vis CHc
19	1	Écrou à encoches
17	2	Flasque
16	1	.....
15	1	Meule
14	1	Couvercle
13	1	.....
12	1	Poulie réceptrice
11	1	Capot de protection
10	1	Couvercle
9	1	.....
5	1	.....
4	1	.....
3	1	.....
2	1	Arbre de transmission
1	1	Corps
Rep	Nbr	Désignation

Exercice 5 : Transmission de puissance avec variation mécanique de vitesse

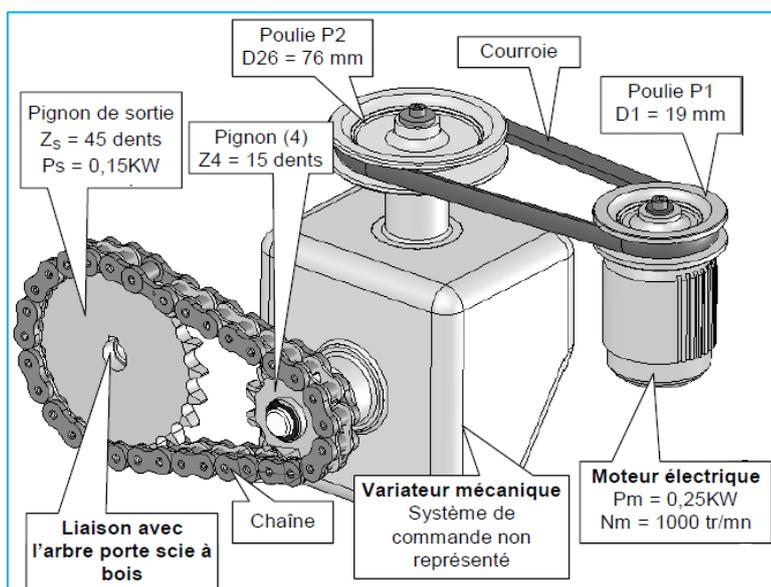
Présentation

Ce système de transmission de puissance est utilisé, par exemple dans une scie à bois ; la figure ci-contre en donne une vue en perspective.

Il permet de transmettre le mouvement du moteur électrique à l'arbre porte scie. Il utilise 3 types de transmission :

- Poulies-Courroie.
- Roues de friction.
- Pignon-Chaine.

Le système dispose d'un mécanisme de variation de vitesse mécanique.

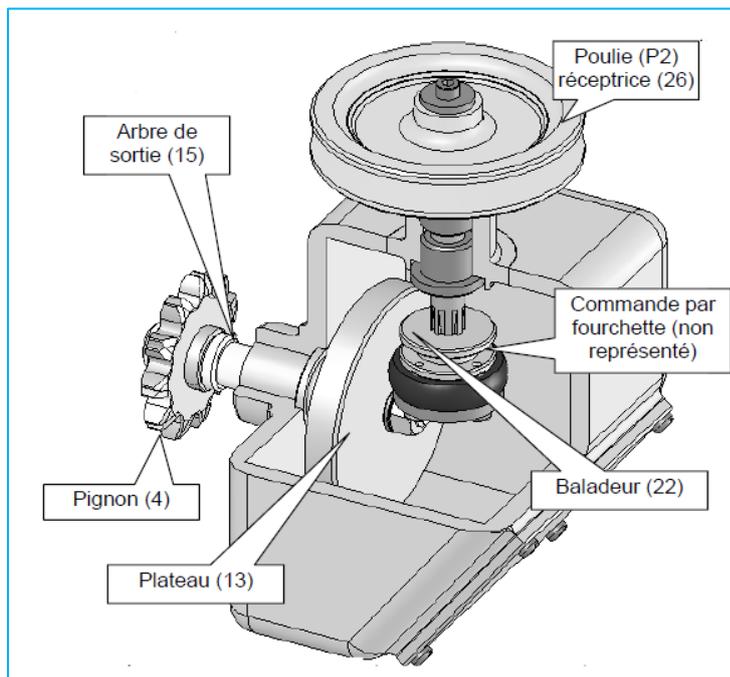


Fonctionnement du variateur mécanique

La figure ci-contre et le dessin d'ensemble de la page suivante représentent le variateur mécanique de vitesse.

- Le mouvement donné à la poulie réceptrice (26) est transmis à l'arbre de sortie (15) par l'ensemble de friction à galet (20) et plateau (13).
- Pour faire varier la vitesse de sortie, on fait varier le rapport de transmission selon la position du baladeur (22) par rapport au plateau (13).

On note que le système de commande de la variation de la position du baladeur (22) n'est pas représenté ici.



Etude de la transmission par Poulie-Courroie

1. Comment est réalisée la liaison encastrement entre l'arbre d'entrée (1) et la poulie (26) ?
2. Comment l'arbre (1) est guidé en rotation par rapport au bâti (10) ?
3. Calculer la vitesse de l'arbre (1).

Etude de la transmission par Pignon-Chaine

1. Comment est réalisée la liaison encastrement entre l'arbre de sortie (15) et le pignon (4) ?
2. Comment l'arbre (15) est guidé en rotation par rapport au bâti (10) ?
3. Calculer le rapport de réduction du système pignon-chaîne.
4. Calculer le rendement du système.

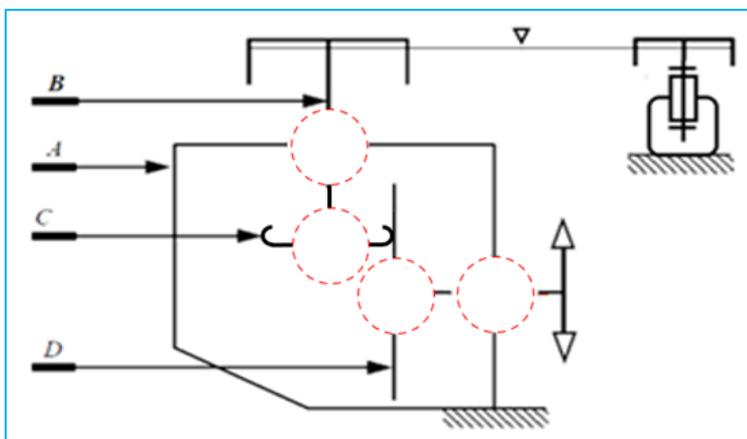
Etude du variateur mécanique de vitesse

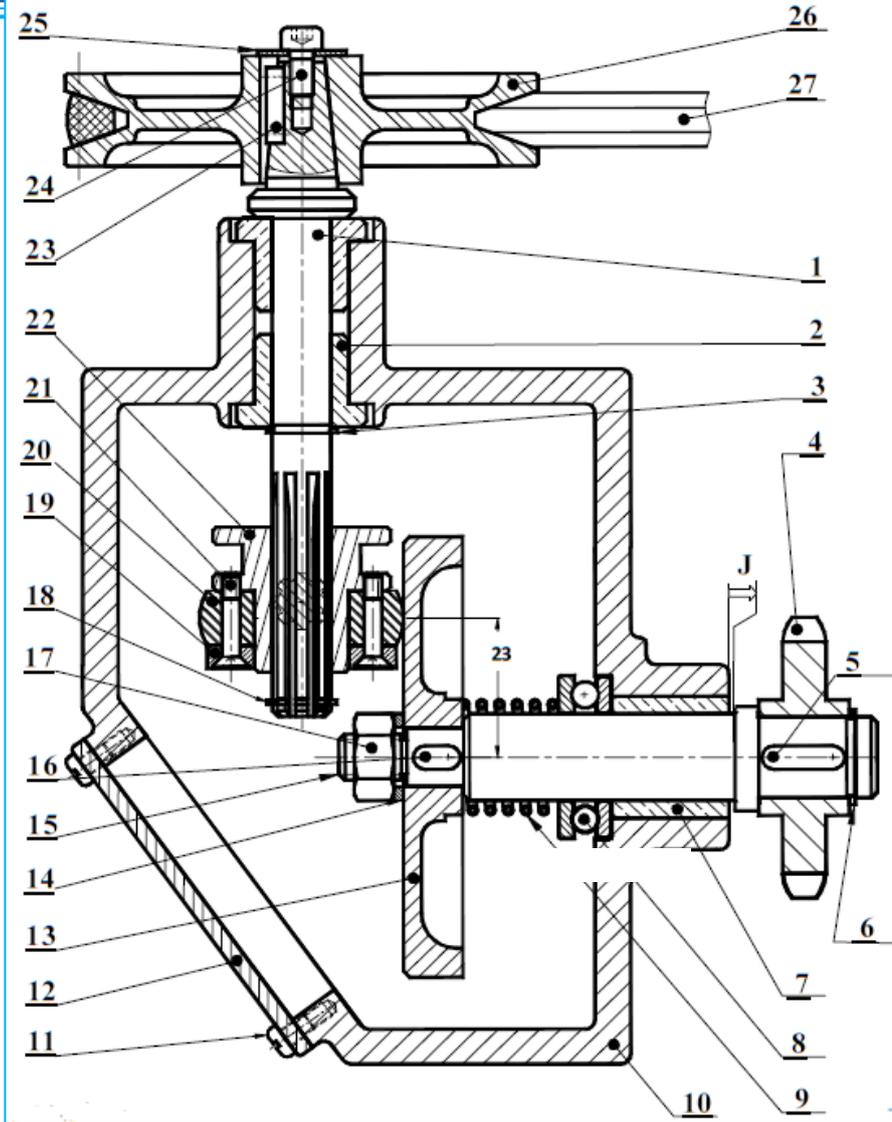
1. Que se passera-t-il entre le galet (20) et le plateau (13), s'il y a une augmentation excessive du couple résistant ?
2. Compléter le tableau suivant en précisant la solution constructive associée à chaque fonction technique.

Fonction technique	Solution constructive
Guider en rotation l'arbre de sortie (15) et le pignon (4)	Coussinets (2)
Guider en translation le baladeur (22) par rapport à l'arbre (1)
Transmettre le mouvement entre l'arbre (1) et l'arbre (15)
Créer l'effort presseur pour l'adhérence entre le galet (20) et le plateau (13)
Supporter la charge axiale sur l'arbre (15) et éviter la torsion du ressort (9)

3. Compléter le schéma cinématique et les classes d'équivalence associées, qui lui sont associées.

A = {10, Rondelle droite de 8,
B = {1, 26,
C = {22,
D = {15, Rondelle gauche de 8, 4,}





14	1	Rondelle plate ISO 10673 – Type S - 8			
13	1	Plateau	27	1	Courroie
12	1	Plaquette	26	1	Poulie réceptrice
11	4	Vis à tête cylindrique fendu ISO 1580-M3x5	25	1	Rondelle plate ISO 10673 – Type L - 4
10	1	Corps	24	1	Vis à tête cylindrique à six pans creux ISO –M4x8
9	1	Ressort cylindrique de compression	23	1	Clavette parallèle, forme A, 3 x 3 x 13
8	1	Butée à billes	22	1	Baladeur
7	1	Coussinet cylindrique fritté, 15 x 21 x 20	21	4	Vis à tête fraisée plate ISO 2009 – M3
6	1	Anneau élastique pour arbre, 14 x 1	20	1	Galet en caoutchouc
5	1	Clavette parallèle, forme A, 4 x 4 x 10	19	1	Flasque
4	1	Pignon pour chaîne	18	1	Anneau élastique pour arbre, 10 x 1
3	1	Anneau élastique pour arbre, 10 x 1	17	1	Ecrou hexagonal ISO 4032 – M8
2	1	Coussinet à collerette fritté, C 10 x 16 x 16	16	1	Clavette parallèle forme A
1	1	Arbre d'entrée	15	1	Arbre de sortie
Rep	Nbre	Désignation	Rep	Nbre	Désignation

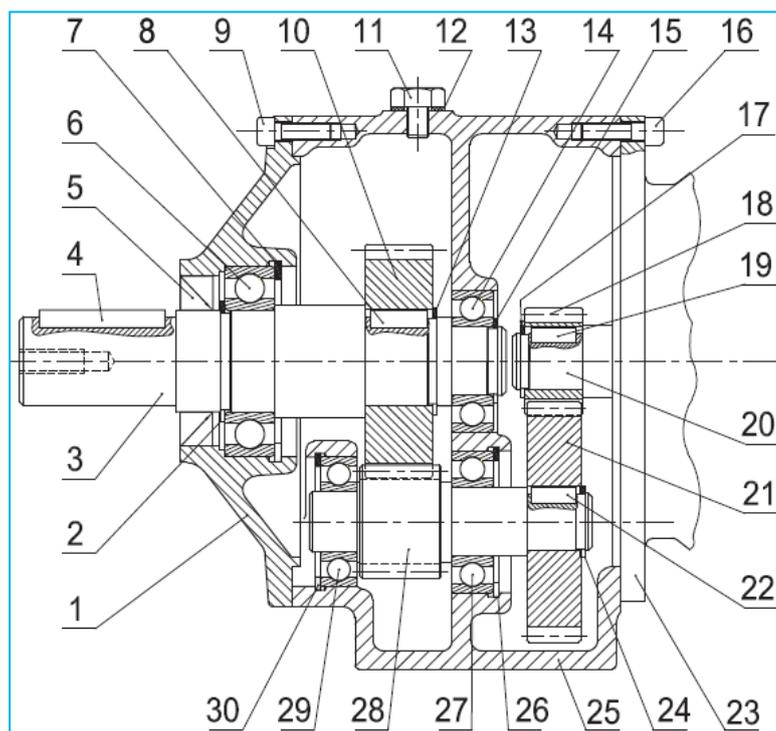
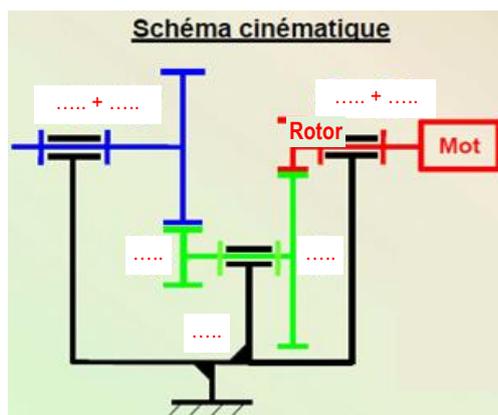
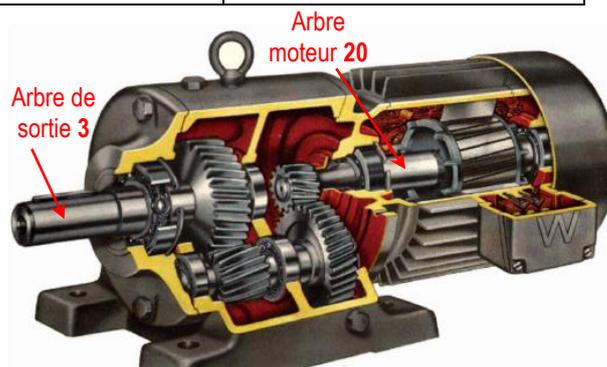


Exercice 6 : Motoréducteur avec train d'engrenages à 2 étages

Un moto-réducteur se compose d'un moteur et d'un réducteur dont les caractéristiques sont les suivantes :

Réducteur		Moteur	
Rendement global	$\eta_g = 0,96$	Puissance fournie	$P_m = 35 \text{ kW}$
Le réducteur possède 2 étages. On suppose que ces 2 étages ont le même rendement η .		Vitesse de rotation	$N_m = 750 \text{ tr/min}$

1. Compléter le schéma cinématique du réducteur en indiquant les repères des éléments principaux.
2. Colorier le dessin conformément aux couleurs adoptées pour le schéma cinématique.
3. Donner l'expression du rapport de réduction ($r=N_3/N_{20}$) et calculer sa valeur.
4. Calculer la vitesse N_3 à la sortie du réducteur.
5. Calculer la puissance utile P_u disponible en sortie du réducteur.
6. Calculer le rendement η .

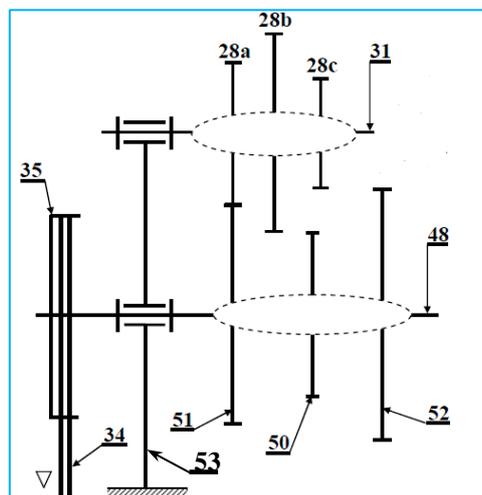
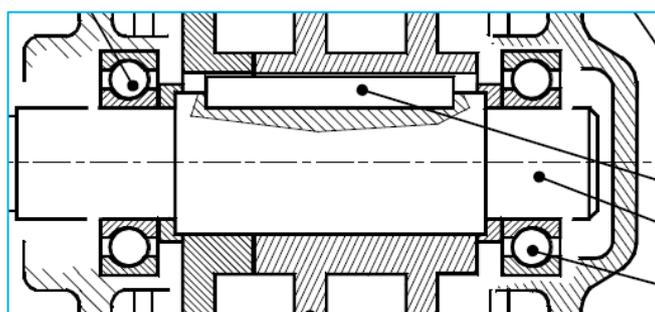
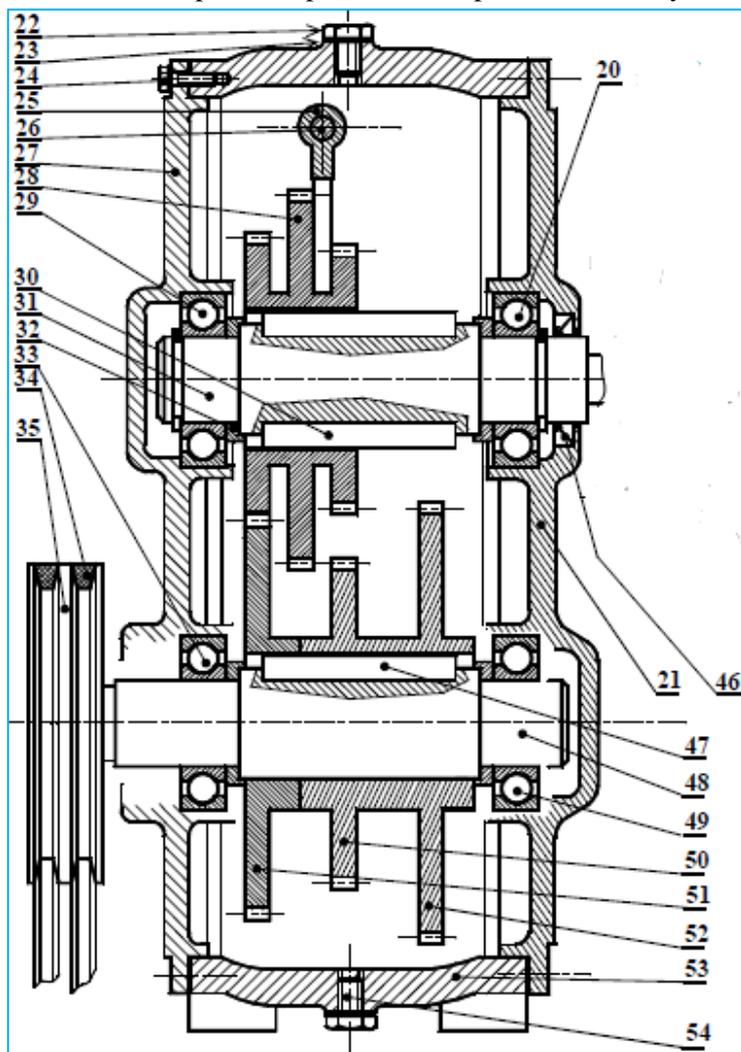
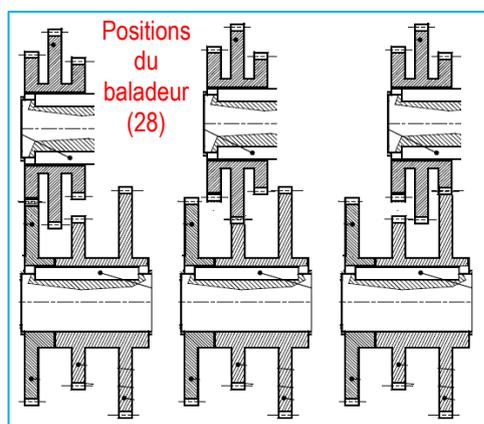


30	1	Anneau élastique pour alésage
29	1	Roulement à une rangée de billes à contact radial
28	1	Pignon arbré ($Z = 15$)
27	1	Roulement à une rangée de billes à contact radial
26	1	Anneau élastique pour alésage
25	1	Carter
24	1	Anneau élastique pour arbre
23	1	Moteur
22	1	Clavette parallèle
21	1	Roue dentée ($Z = 21$)
20	1	Arbre moteur
19	1	Clavette parallèle
18	1	Pignon ($Z = 18$)
17	1	Anneau élastique pour arbre
16	3	Vis à tête cylindrique à six pans creux
15	1	Anneau élastique pour arbre
14	1	Roulement à une rangée de billes à contact radial
13	1	Anneau élastique pour arbre
12	2	Rondelle joint
11	2	Bouchon de remplissage
10	1	Roue dentée ($Z = 18$)
9	3	Vis à tête cylindrique à six pans creux
8	1	Clavette parallèle
7	1	Anneau élastique pour alésage
6	1	Roulement à une rangée de billes à contact radial
5	1	Joint à lèvres
4	1	Clavette parallèle
3	1	Arbre de sortie
2	1	Anneau élastique pour arbre
1	1	Boîtier
Rep	Nb	Désignation

Exercice 7 : Boîte de vitesses

Le mécanisme suivant est un réducteur avec boîte de vitesses, servant par exemple dans un tapis roulant. Le système manuel de changement de vitesse n'est pas représenté.

1. Donner la fonction de chacune des pièces (22) et (54).
2. Préciser comment l'arbre (31) est guidé en rotation.
3. Préciser comment le baladeur (28) est guidé en translation.
4. Compléter le schéma cinématique de ce réducteur.
5. Quel élément permet la manipulation du baladeur (28) pour le changement de vitesse ?
6. Donner l'expression du rapport de réduction r en fonction de la position du baladeur (28) : gauche, milieu et droite.
7. Compléter le montage du roulement (33), sachant qu'on utilise 2 anneaux élastiques et un joint à 1 lèvres.



27	1	Boîtier	54	1	
26	1	Axe de Fourchette	53	1	Bâti
25	1	Fourchette	52	1	Roue dentée
24	16	Vis H, M8-28	51	1	Roue dentée
23	2	Joint plat	50	1	Roue dentée
22	1		49	1	Roulement 55 BC 03
21	1	Boîtier	48	1	Arbre de sortie
20	1	Roulement 55 BC 03	47	1	Clavette parallèle
19	4	Ecrou H, M10	46	1	Joint à lèvres
18	16	Rondelle élastique	45	2	Garniture
17	1	Plateau intermédiaire	44	2	Clavette parallèle
16	1	Plateau moteur	43	1	Joint à lèvres
15	4	Vis H, M10-70	42	1	Roulement 70 BC 03
14	1	Plateau récepteur	41	1	arbre moteur
13	1	Anneau élastique pour arbre	40	1	Roulement 70 BC 03
12	1	Couvercle	39	1	Bague entretoise
11	1	Corps	38	1	Ressort
10	1	Stator	37	1	Garniture
9	1	Rotor	36	1	Clavette parallèle
8	2	Charbon	35	1	Poulie motrice
7	1	Bobine électromagnétique	34	2	Courroie trapézoïdale
6	1	Cloche fixe	33	1	Roulement 55 BC 03
5	1	Cloche mobile	32	4	Bague
4	1	Disque	31	1	Arbre intermédiaire
3	1	Rondelle W36	30	2	Clavette parallèle
2	1	Ecrou H, M36	29	1	Roulement 55 BC 03
1	1	Capot	28	1	
Rep	Nbre	Désignation	Rep	Nbre	Désignation

Exercice 8 : Train d'engrenages épicycloïdal

Le réducteur à train épicycloïdal ci-dessous a les caractéristiques suivantes :

- $Z_1=17, Z_2=51$ et $Z_3=119$.
- $N_1= 800$ tr/min.

1. Comment sont encastrés :

- Les carters gauche (10) et droite (12) ?
- Le carter (12) et la couronne (3) ?
- L'arbre de sortie (5) et le porte-satellite (4) ?
- L'arbre d'entrée (13) et le planétaire (1) ?

2. Quel est le rôle des vis (6) ?

3. Préciser comment l'ensemble {4, 5} est guidé en rotation par rapport au bâti {10, 11, 12, 8} ? (type de roulements, bagues serrées et bagues libres et arrêts axiaux).

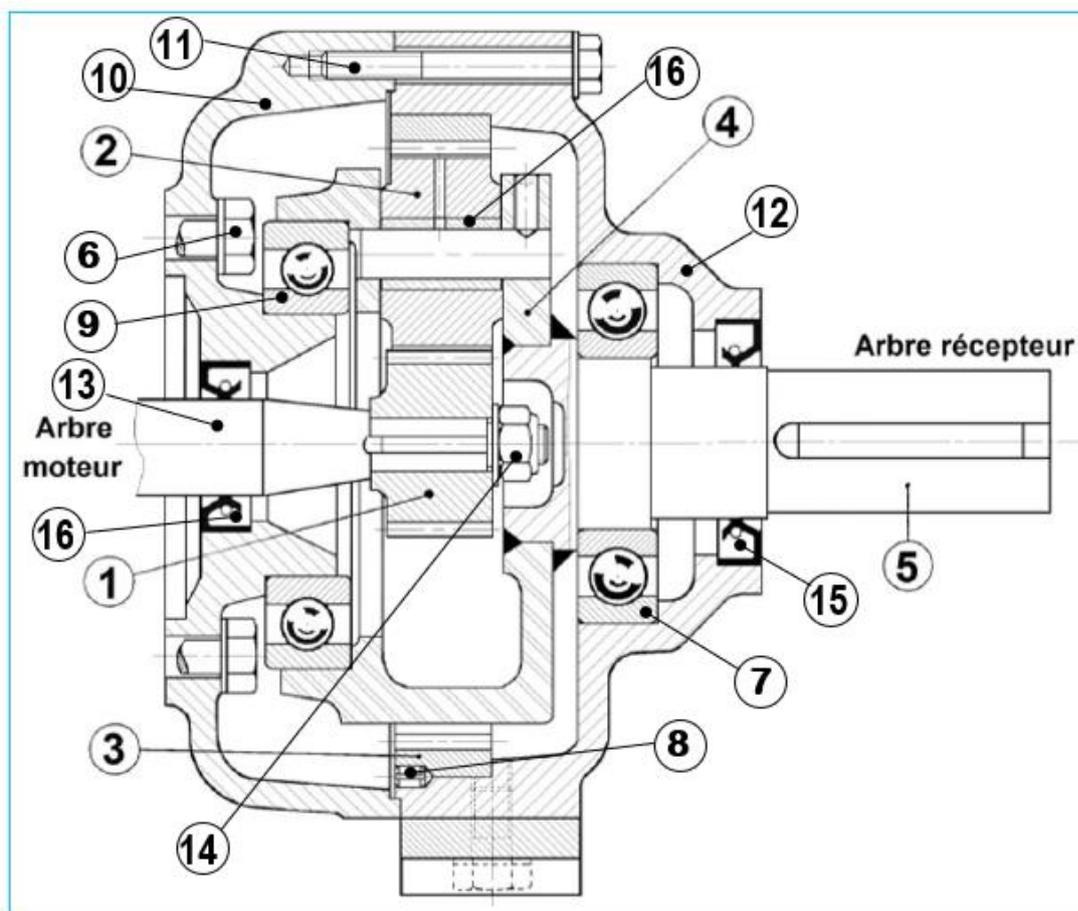
4. Préciser comment est assurée :

- La lubrification.
- L'étanchéité.

5. Colorier les classes d'équivalence et donner le schéma cinématique comme suit :

- Le rouge pour le planétaire (arbre moteur).
- Le jaune pour la couronne (3), faisant partie du bâti.
- Le vert foncé pour le satellite visible (2).
- Le vert clair pour le porte-satellite (arbre récepteur).

6. Déterminer la fréquence de sortie N_5 .



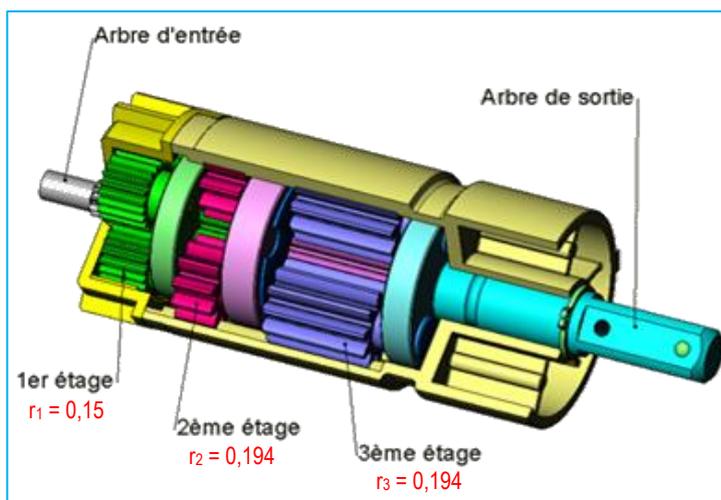
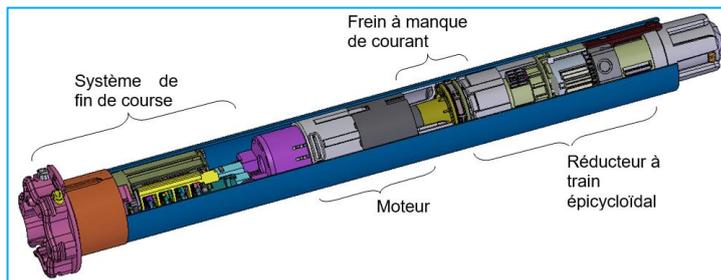
Exercice 9 : Train d'engrenages épicycloïdal du store Somfy

Le store Somfy utilise ce qu'on appelle un moteur tubulaire, qui se présente de la manière suivante :

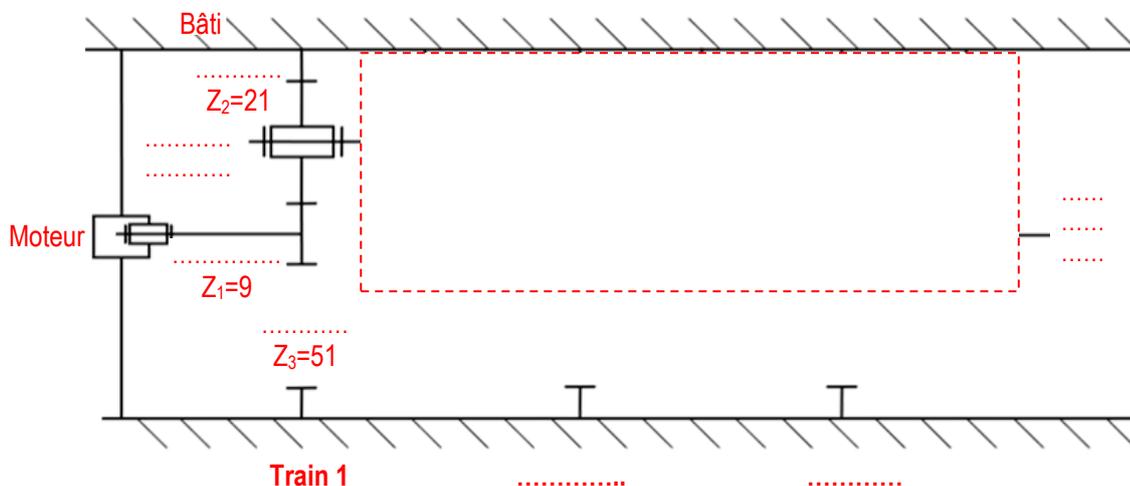
- Un moteur électrique entraîne, via un réducteur à train épicycloïdal, l'ensemble tube d'enroulement dans lequel il est monté et sur lequel s'enroule la toile.
- L'arrêt en position haute et basse est obtenu automatiquement, en fonction d'un pré réglage effectué par le système de fins de course.

Dans le réducteur du store Somfy, on observe 3 étages de réduction. Chaque étage est un train épicycloïdal avec mouvement d'entrée sur le planétaire et mouvement de sortie sur le porte-satellite. Les couronnes de chaque train sont liées au bâti.

Le moteur électrique d'entraînement est lié à l'extrémité de l'arbre du premier planétaire. L'arbre de sortie est lié au tambour d'enroulement du store.



1. Compléter le schéma cinématique



2. Vérifier que le rapport de réduction du 1^e étage est $r_1 = 0,15$.

3. Calculer le rapport de réduction global r_g .

4. On a les données suivantes :

- Vitesse du moteur N_M : 3000 tr/min.
- Diamètre du tambour D : 50 mm.
- Longueur de la toile L : 1,5 m.

4.1. Calculer la vitesse du tube N_T (sortie du réducteur).

4.2. En déduire la vitesse d'avance V_t de la toile.

4.3. Calculer le temps nécessaire t pour dérouler ou enrouler toute la toile.



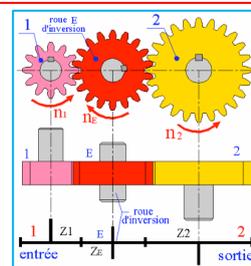
Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Train d'engrenages avec roue d'inversion

En appliquant la formule du principe général, on a alors :

$$r = \frac{n_2}{n_1} = (-1)^2 \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_E}{Z_E \cdot Z_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

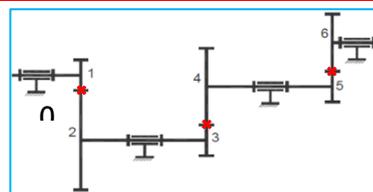
La roue E n'a qu'un rôle d'inversion de sens ; elle ne participe pas au rapport de réduction qui ne dépend que des roues 1 et 2.



Exercice 2 : Train d'engrenages avec 3 étages

On a 3 étages à contact extérieur (n=3), alors :

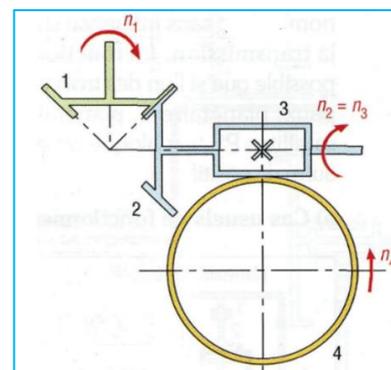
$$r = \frac{n_2}{n_1} = (-1)^3 \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_5}{Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6} = - \frac{Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_5}{Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6}$$



Exercice 3 : Réducteur à engrenages conique et système à roue et vis sans fin

1. Voir figure ci-contre.

$$r = \frac{n_4}{n_1} = \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2 \cdot Z_4} = \frac{20.3}{20.45} = \frac{1}{15} \Rightarrow n_4 = \frac{1500}{15} = 100 \text{ tr/min}$$



Exercice 4 : Touret à meuler

- La meule (15) est solidaire de l'arbre (2), lui-même solidaire de la poulie réceptrice (12), qui reçoit le mouvement de rotation de l'arbre moteur, via la poulie motrice (27) et la courroie trapézoïdale (26).
- Le rapport de réduction de vitesses est alors :

$$\blacksquare r = \frac{N_{12}}{N_{27}} = \frac{d_{27}}{d_{12}} = \frac{112}{85} = 1,32$$

- La fréquence de rotation N_{12} (tr/min), ainsi que la vitesse angulaire ω_{12} (rd/s) sont :

$$\blacksquare N_{12} = N_{27} \cdot r = 1500 \cdot 1,32 = 1976 \text{ tr/min}$$

$$\blacksquare \omega_{12} = \frac{N_{12} \cdot 2 \cdot \pi}{60} = \frac{1976 \cdot 2 \cdot \pi}{60} = 207 \text{ rd/s}$$

- Le desserrage de la poulie motrice est assuré par le contre-écrou (29).
- Le guidage en rotation de l'arbre moteur 2 est assurée par les 2 coussinets (3) et (4).
- En plus de l'arrêt axial et le réglage de précharge, les écrous à encoches (19) et (23) évitent le desserrage de l'arbre moteur (2), des 2 côtés.
- L'étanchéité statique est réalisée par le joint 9, alors que l'étanchéité dynamique est réalisée par les 2 joints à lèvres (16) et (24) ; le joint à 2 lèvres (16) évite aussi la pénétration de la poussière due à l'effet du meulage.



- Les éléments qui manquent dans la nomenclature sont comme suit :

Rep.	Désignation	Rep.	Désignation	Rep.	Désignation	Rep.	Désignation
3	Coussinet	9	Joint plat	21	Rondelle Grower	24	Joint à 1 lèvre
4	Coussinet	13	Carter de protection	22	Clavette parallèle	25	Rondelle frein
5	Anneau élastique	16	Joint à 2 lèvres	23	Ecrou à encoches		

Exercice 5 : Transmission de puissance avec variation mécanique de vitesse

Etude de la transmission par Poulies-Courroie

- L'arbre d'entrée (1) et la poulie (26) sont en liaison encastrement, par la clavette (23), la vis (24), la rondelle (25) et l'épaulement de l'arbre (1).
- L'arbre (1) est guidé en rotation par rapport au bâti (10), par les coussinets à collerette (2). Les arrêts en translation sont assurés par l'épaulement de l'arbre (1) et l'anneau élastique (3).
- La vitesse de l'arbre (1) est la même que celle la poulie (26) ; elle est calculée comme suit :

$$r = \frac{N_2}{N_1} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{19}{76} = 0,25$$

$$N_2 = N_1 \cdot r = 1000 \cdot 0,25 = 250 \frac{tr}{mn}$$

$$\omega_2 = \frac{2\pi \cdot N_2}{60} = \frac{2\pi \cdot 250}{60} = 26 \frac{rd}{s}$$

$$\omega_1 = \frac{\omega_2}{r} = \frac{26}{0,25} = 104 \frac{rd}{s}$$

Etude de la transmission par Pignon-Chaine

- L'arbre de sortie (15) et le pignon (4) sont en liaison encastrement par la clavette (5), l'anneau élastique (6) et l'épaulement de l'arbre (15).
- L'arbre (15) est guidé en rotation par rapport au bâti (10), par le coussinet 7. Les arrêts axiaux sont assurés par l'épaulement de l'arbre (15) et l'ensemble {Ecrou (17), Plateau (13), Butée à billes (8)} maintenu par le ressort (9).
- Le rapport de réduction est :

$$r = \frac{N_S}{N_4} = \frac{Z_4}{Z_S} = \frac{15}{45} = 0,33$$

$$4. \eta = \frac{P_S}{P_m} = \frac{150}{250} = 0,6$$

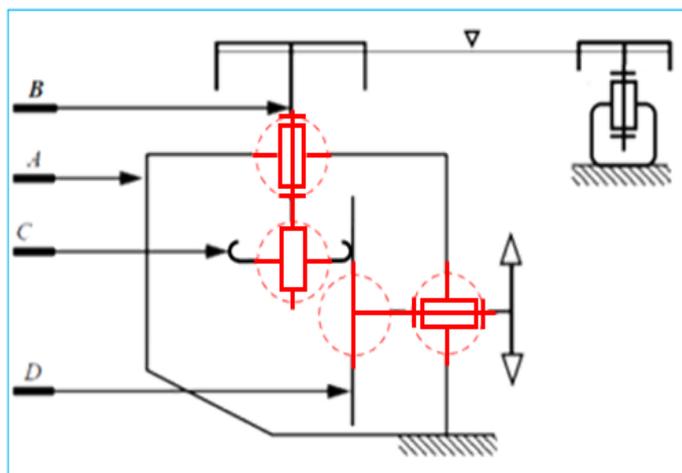
Etude du variateur mécanique de vitesse

- Il y aura glissement.
-

Fonction	Solution constructive
Guider le baladeur (22) par rapport à l'arbre (1)	Cannelures
Transmettre le mouvement entre l'arbre (1) et l'arbre (15)	Roues de friction
Créer l'effort presseur pour l'adhérence entre le galet (20) et le plateau (13)	Ressort (9)
Supporter la charge axiale sur l'arbre (15) et éviter la torsion du ressort (9)	Butée à billes (8)

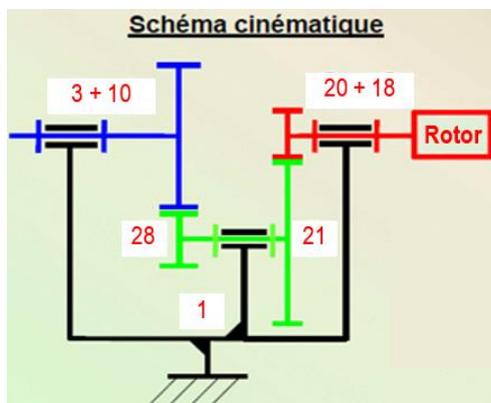
3.

- A = {10, Rondelle droite de 8, 11, 12, 7,2}
 B = {1, 26, 25, 24, 23, 3, 18}
 C = {22, 21, 20, 19}
 D = {15, Rondelle gauche de 8, 4, 13, 17, 14, 16, 7, 5, 6}

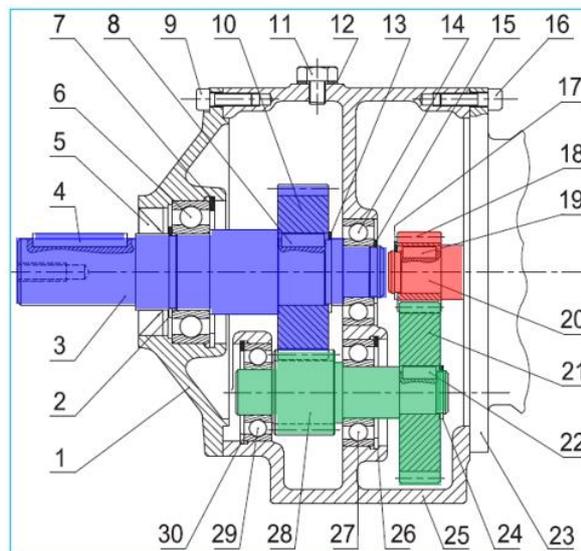


Exercice 6 : Motoréducteur avec train d'engrenages à 2 étages

1. Schéma cinématique



2. Coloriage du dessin



$$3. r = \frac{N_3}{N_{20}} = (-1)^2 \frac{Z_{18} \cdot Z_{28}}{Z_{21} \cdot Z_{10}} = \frac{14 \cdot 15}{34 \cdot 33} = 0,1871$$

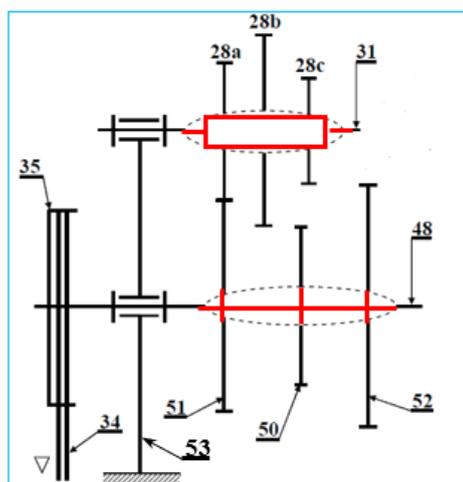
$$4. N_3 = N_{20} \cdot r = 750 \cdot 0,1871 = 140,3 \text{ tr/min}$$

$$5. \eta = \frac{P_u}{P_m} \Rightarrow P_u = P_m \cdot \eta = 35000 \cdot 0,96 = 3360 \text{ W} = 3,36 \text{ kW}$$

$$6. \eta_g = \eta \cdot \eta = \eta^2 \Rightarrow \eta = \sqrt{\eta_g} = \sqrt{0,96} = 0,98$$

Exercice 7 : Boite de vitesse

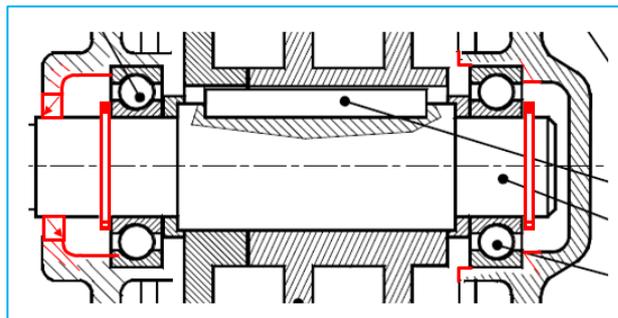
- Les pièces (22) et (54) contribuent à la fonction de lubrification du système ; (22) est le bouchon de remplissage et (54) est le bouchon de vidange.
- L'arbre (31) est guidé en rotation par les roulements (20) et (29). Les 4 arrêts axiaux pour les bagues internes sont les 2 anneaux élastiques, les 2 bagues (32) associées aux épaulements de l'arbre ; alors que les 2 arrêts axiaux pour les bagues externes sont les carters gauche (27) et droite (21) du boîtier.
- Le baladeur (28) est guidé en translation par les 2 clavettes (30).
- Schéma cinématique :



- La fourchette (25).
- Rapport de réduction :

Baladeur à gauche	Baladeur au milieu	Baladeur à droite
$r = \frac{Z_{28a}}{Z_{51}}$	$r = \frac{Z_{28b}}{Z_{50}}$	$r = \frac{Z_{28c}}{Z_{52}}$

7. Montage de roulement :



Exercice 8 : Train d'engrenages épicycloïdal

1. Liaisons encastrement entre :

- Les carters gauche (10) et droite (12) : Par les vis (11).
- Le carter (12) et la couronne (3) : Par goupilles élastiques (8).
- L'arbre de sortie (5) et le porte-satellite (4) : Par soudure.
- L'arbre d'entrée (13) et le planétaire (1) : Par clavette et l'écrou (43).

2. Les vis (6) ont pour rôle de fixer le moteur avec le boîtier du réducteur.

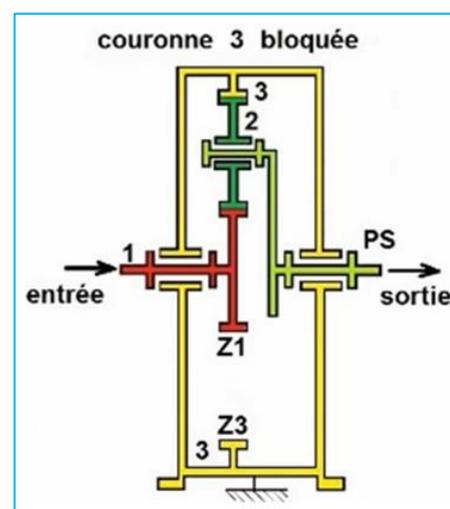
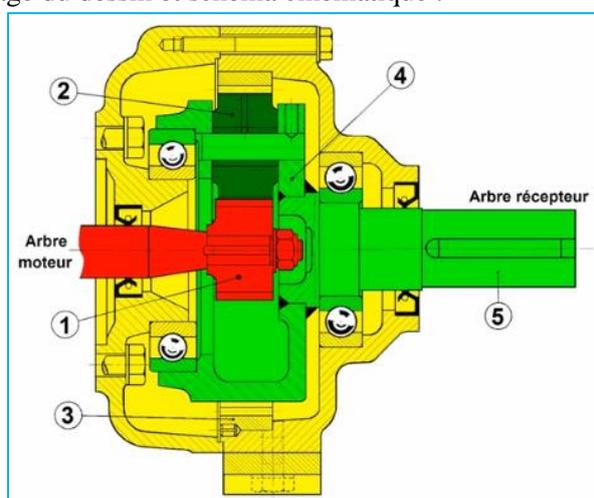
3. C'est un montage de roulement un peu particulier ; en effet, en considérant l'ensemble (arbre récepteur + porte-satellite), on remarque que :

- Du côté de l'arbre, on a « arbre tournant » par rapport au bâti, alors la bague interne du roulement (7) est serrée et arrêtée axialement par l'épaule de l'arbre ; la bague externe du roulement est libre et arrêtée axialement par l'épaule du carter (12).
- Du côté du porte-satellite, on a « alésage tournant » par rapport au bâti, alors la bague externe du roulement (9) est serrée et arrêtée axialement par l'épaule du port-satellite ; la bague interne du roulement est libre et arrêtée axialement par l'épaule du carter (10).

4. Lubrification et étanchéité :

- La lubrification est assurée par de l'huile ; le trou dans le satellite (2) contribue à une bonne répartition du lubrifiant.
- L'étanchéité est assurée par les 2 joints à 1 lèvre (16) et (15).

5. Coloriage du dessin et schéma cinématique :



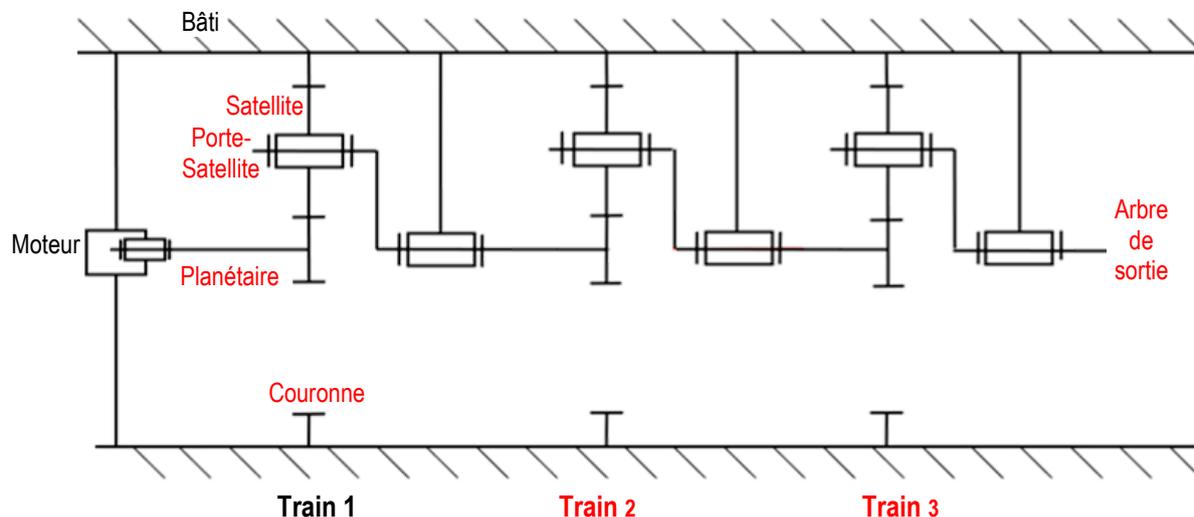
6. Calcul de N_5 :

On a la configuration (couronne bloquée), donc :

$$r = \frac{N_5}{N_{13}} = \frac{N_4}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} = \frac{17}{17 + 119} = 0,125 \Rightarrow N_5 = r \cdot N_{13} = 0,125 \cdot 800 = 100 \text{ tr/min}$$

Exercice 9 : Train d'engrenages épicycloïdal du sotre Somfy

1. Schéma cinématique :



$$2. r_1 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} = \frac{9}{9 + 51} = 0,15$$

$$3. r_g = \frac{N_T}{N_M} = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 = 0,15 \cdot 0,194 \cdot 0,194 = 5,645 \cdot 10^{-3}$$

4.

$$4.1. N_T = r_g \cdot N_M = 5,645 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^3 = 16,936 \text{ tr/min}$$

$$4.2. R \text{ étant le rayon du tube, alors } V_t = R \cdot \omega_T = \frac{D}{2} \cdot \frac{N_T}{60} \cdot 2 \cdot \pi = \frac{50 \cdot 10^{-3} \cdot 16,936 \cdot 3,14}{60} = 0,044 \text{ m/s}$$

$$4.3. t = \frac{L}{V_t} = \frac{1,5}{0,044} = 34 \text{ s}$$

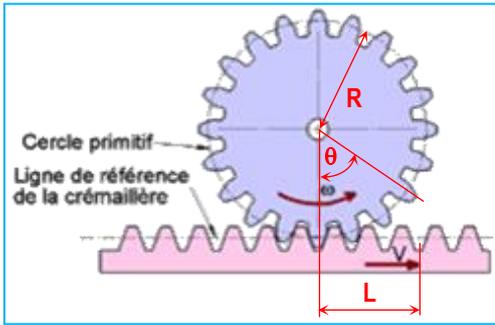
Introduction

- Dans les systèmes mécaniques, le **mouvement de rotation** est le plus utilisé ; il est généralement produit et émis par un moteur électrique (**émetteur**).
- Mais le **récepteur** peut avoir un mouvement de translation ; on a donc besoin d'interposer un **mécanisme de transmission avec transformation de mouvement**. Parmi ces mécanismes, on cite les systèmes suivants :
 - Pignon-Crémaillère.
 - Vis-Ecrou.
 - Bielle-Manivelle.
 - Système à came.



Système Pignon-Crémaillère

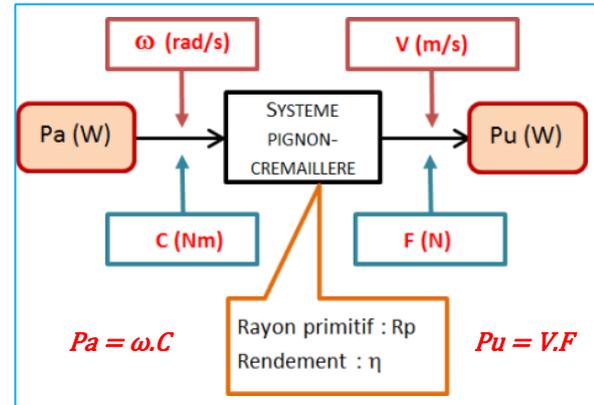
- Ce système est constitué d'une **roue dentée** (pignon) et une tige dentée appelée « **crémaillère** ».
- Il permet une conversion de **rotation en translation**.
- Condition d'engrènement** : le pignon et la crémaillère doivent avoir le **même module m**.



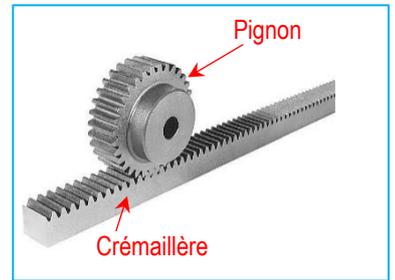
$$L = R \cdot \theta = \frac{D}{2} \cdot \theta = \frac{m \cdot Z}{2} \cdot \theta$$

$$V = R \cdot \omega = \frac{D}{2} \cdot \omega = \frac{m \cdot Z}{2} \cdot \omega$$

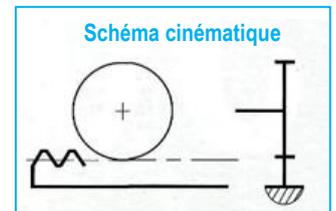
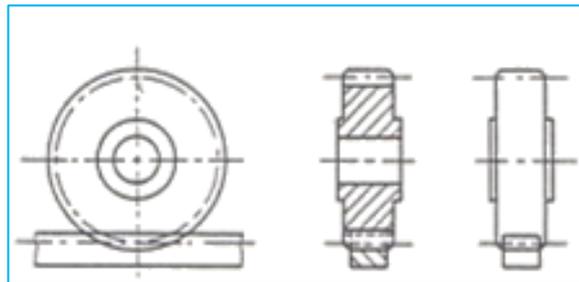
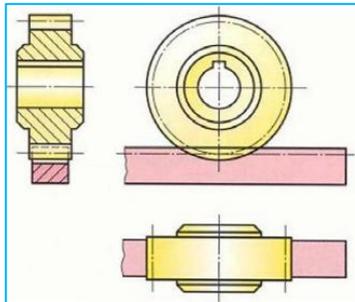
$$V = \frac{m \cdot Z}{2} \cdot \omega = \frac{m \cdot Z \cdot \pi}{60} \cdot N$$



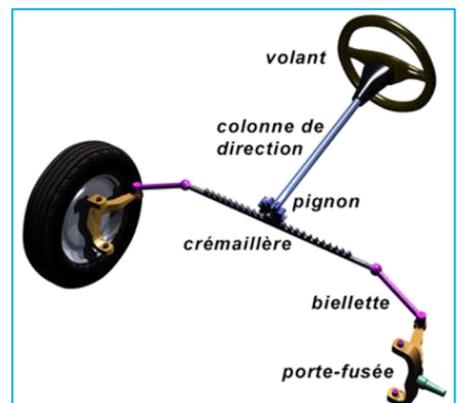
- L** : Course de la crémaillère (m)
- theta** : Angle de rotation du pignon (rd)
- N** : Fréquence de rotation (tr/min)
- omega** : Vitesse angulaire (rd/s)
- V** : Vitesse linéaire (m/s)
- R** : Rayon primitif du pignon (m)
- D** : Diamètre primitif du pignon (m)
- m** : module du pignon (mm)
- Z** : Nombre de dents du pignon



Représentation :



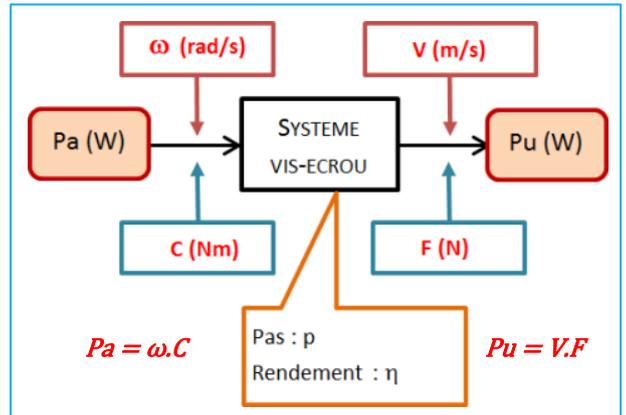
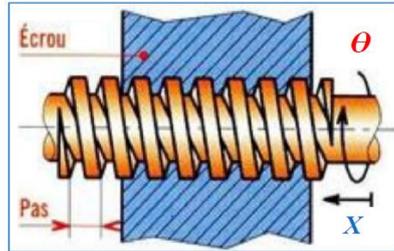
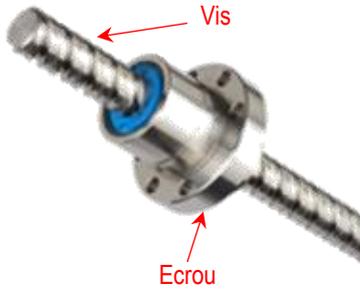
- Exemple d'application** : Direction d'une voiture
 - Lorsqu'on tourne le volant du véhicule dans un sens ou dans l'autre, la crémaillère se déplace, tire ou pousse la biellette.
 - La biellette, à son tour tire ou pousse le porte-fusée qui supporte le mécanisme lié à la roue (arbre, roulement, etc.), ce qui oriente les roues dans un sens ou dans l'autre.



Système Vis-Ecrou

Constitution et principe

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



- La **configuration la plus utilisée** est celle où la vis peut tourner, mais ne translate pas et l'écrou translate mais ne tourne pas.
- Dans ce cas, l'écrou avance de **1 pas (p) pour 1 tour (2π)** de la vis.
- A un angle α de la vis, correspond une course **L** de l'écrou, soit le rapport :

$$\frac{L}{\alpha} = \frac{p}{2\pi}$$

$$L = \frac{p}{2\pi} \cdot \alpha$$

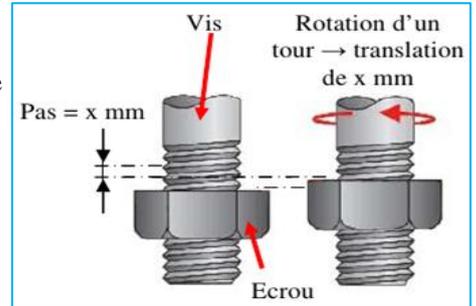
Soit aussi, avec $n = \frac{\alpha}{2\pi}$, le nombre de tours de l'écrou :

$$L = p \cdot n$$

- En dérivant par rapport au temps, on obtient la relation qui lie la rotation de la vis et le déplacement linéaire de l'écrou, soit :

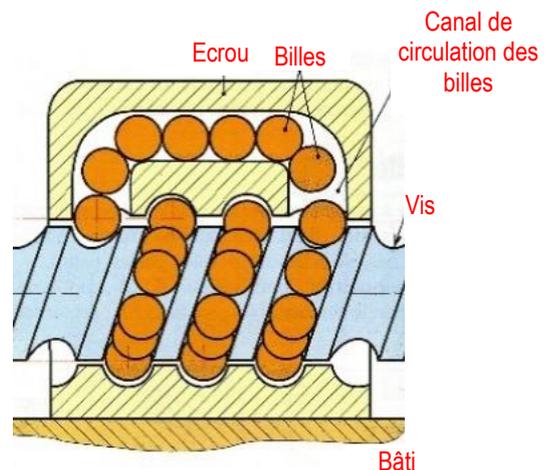
$$V = \frac{p}{2\pi} \cdot \omega = \frac{p}{60} \cdot N \quad (m/s)$$

$$V = P \cdot N \quad (m/min)$$



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

- Le système est en général **irréversible**.
- Le système vis-écrou est simple, mais il a un **faible rendement** ($\eta \approx 50\%$), à cause du frottement.
- Pour améliorer le rendement, on utilise des **éléments roulants** (billes) :



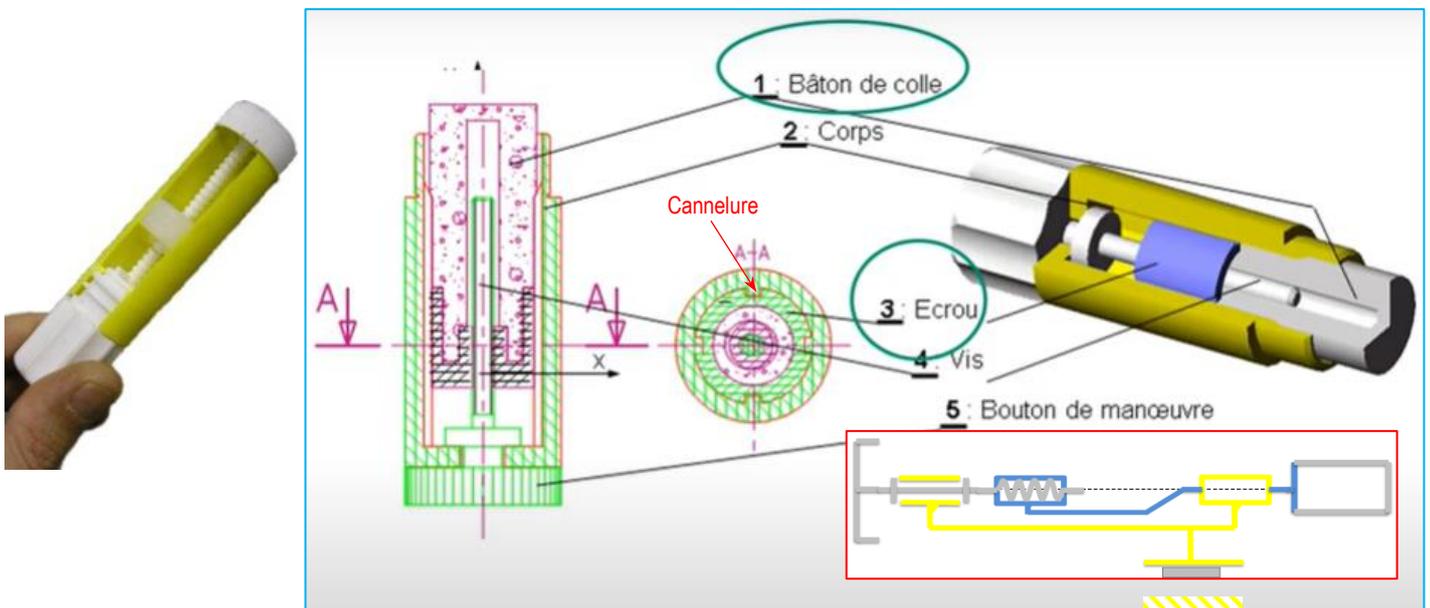
Mouvements possibles

- Les combinaisons des mouvements de rotation et de translation possibles entre la vis et l'écrou, peuvent se résumer selon le tableau suivant :

Vis		Ecrrou		Représentation	Schéma cinématique
R	T	R	T		
1	1	0	0		
0	1	1	0		
1	0	0	1		
0	0	1	1		

Application : Tube de colle

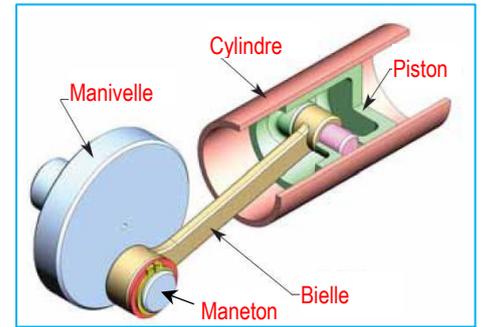
- Dans ce petit système vis-écrou, la vis qui est aussi le **bouton de manœuvre (5)**, est guidée en rotation par rapport au bâti, qui est le **corps (2)**.
- L'**écrou (3)** est bloqué en rotation par des **cannelures qu'on peut considérer** comme 4 clavettes ; c'est le **système anti-rotation** pour l'écrou. Le **bâton de colle** est encastré avec l'écrou.
- Ainsi, en faisant tourner la vis, le bâton de colle translate.



Système Bielle-Manivelle

Constitution et principe

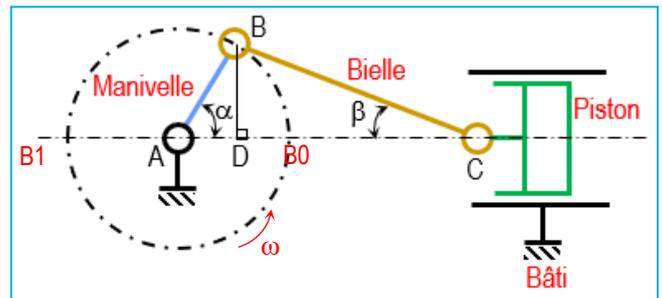
- Le **système Bielle-Manivelle** permet de transformer un mouvement de **rotation** en un mouvement de **translation alternatif**.
- Il est constitué des éléments suivants :
 - La **bielle**, qui est une pièce dotée de **2 articulations**, une à chaque extrémité.
 - La **manivelle** appelée aussi **vilebrequin**, qui est une pièce présentant une partie excentrée (**maneton**) par laquelle une force peut lui donner un mouvement de rotation autour de son axe.
 - L'**oscillateur**, qui est généralement un **piston**, est muni du mouvement de translation alternatif.
 - Dans ce cas, on parle de système Bielle-Manivelle **volumétrique**, dont l'étude est la suivante.



Etude cinématique

Analyse

- Les éléments de base de la géométrie du système sont ainsi :
 - $R = AB$, le rayon de la manivelle.
 - $l = BC$, la longueur de la bielle.
 - $\alpha = \omega t$, l'angle définissant la position de la manivelle, qui tourne à la vitesse ω .
 - $x(t) = AD + DC$, la position du piston.
- On a :



$$AD = R \cdot \cos(\omega t) \text{ et } DC = l \cdot \cos(\beta) \Rightarrow x(t) = R \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(\beta)$$

$$BD = R \cdot \sin(\omega t) = l \cdot \sin(\beta) \Rightarrow \sin(\beta) = \frac{R}{l} \cdot \sin(\omega t) \text{ et } \cos(\beta) = \sqrt{1 - \sin^2(\beta)} = \sqrt{1 - \frac{R^2}{l^2} \sin^2(\omega t)}$$

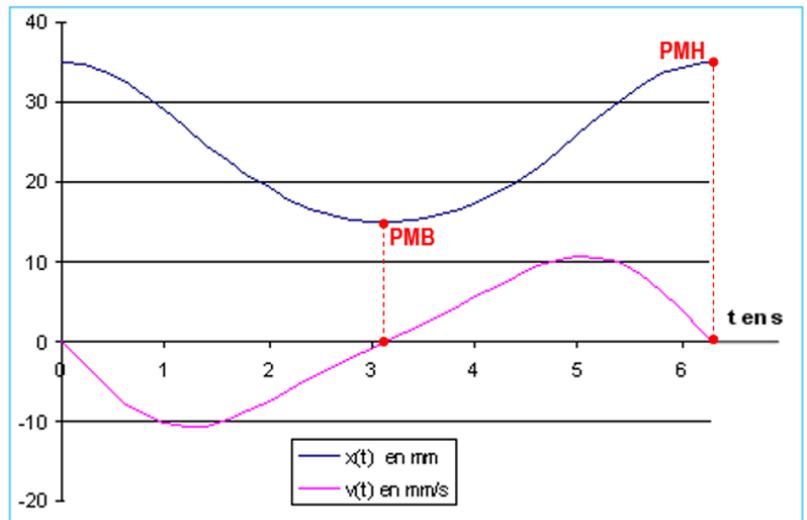
$$x(t) = R \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \sqrt{1 - \frac{R^2}{l^2} \sin^2(\omega t)} \text{ ; ainsi :}$$

$$x(t) = R \cdot \cos(\omega t) + \sqrt{l^2 - R^2 \cdot \sin^2(\omega t)} \text{ et } v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = -R \cdot \omega \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{2} \cdot \frac{R \cdot \sin(2\omega t)}{\sqrt{l^2 - R^2 \cdot \sin^2(\omega t)}} \right]$$

- A titre d'exemple, on donne les graphes de $x(t)$ et $v(t)$ pour les données suivantes :

- $R = 10 \text{ mm}$; $l = 25 \text{ mm}$ et $\omega = 1 \text{ rad/s}$, i.e. 1 tour de manivelle est effectué en 6,28 s.
- PMH** : Point Mort Haut correspond à une vitesse nulle et le maximum du déplacement de la manivelle (point B_0).
- PMB** : Point Mort Bas correspond à une vitesse nulle et le minimum du déplacement de la manivelle (point B_1).
- C : la course maximale du piston est $2R$: $x(0) - x(\pi) = (R + l) - (l - R) = 2R$.

$$C = 2 \cdot R$$





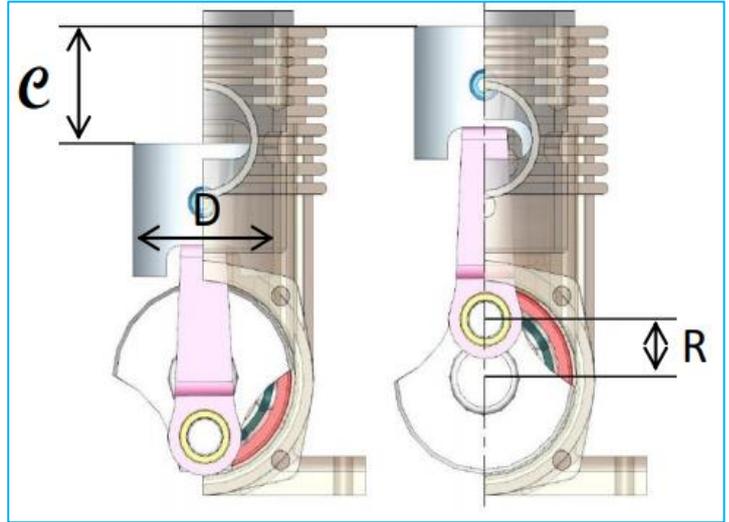
Cylindrée

- La cylindrée pour un piston représente le **volume** balayé par celui-ci entre le **PMH** et le **PMB**, en se déplaçant dans son **cylindre**. On la calcule en multipliant la course par la surface du piston.

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

Cylindrée totale = V.n

- V : Cylindrée (m³/tr)
- S : Section du piston (m²)
- C : Course du piston (m)
- D : Diamètre du piston (m)
- R : Rayon du vilebrequin (m)
- n : Nombre de cylindres



Débit volumétrique

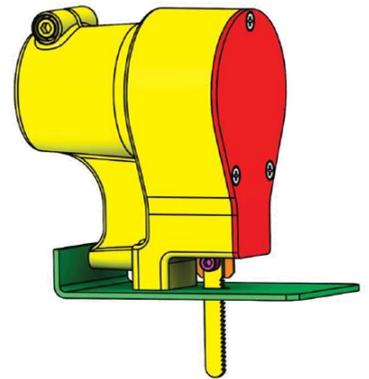
- Il quantifie le volume traversé par unité de temps, soit :

$$Q = V \cdot N$$

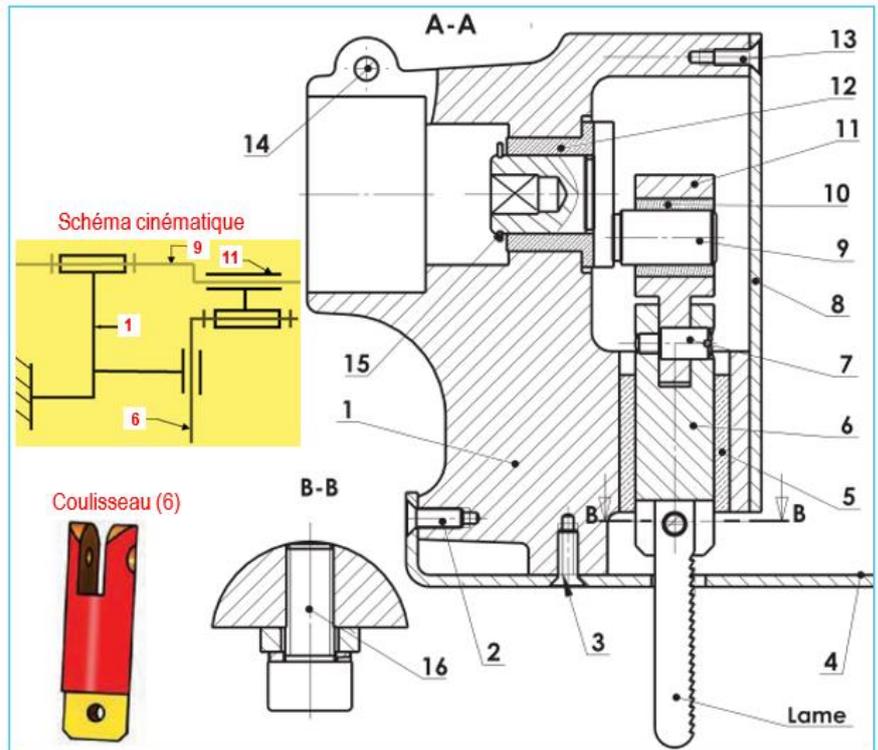
- Q : Débit (m³/min)
- V : Cylindrée (m³/tr)
- N : Vitesse (tr/min)

Application : Scie sauteuse

- Le dessin ci-dessus représente un de **scie sauteuse portable**. Ce mécanisme est basé sur la transformation du mouvement de rotation d'un arbre moteur en un mouvement de translation alternative d'une lame, grâce à un système **bielle-manivelle**, formé par les pièces (11) et (9).
- La **manivelle (9)** est entraînée en rotation par l'arbre moteur. La **bielle (11)** entraîne le **coulisseau porte-lame (6)**, en translation rectiligne alternative par rapport au **corps (1)**.
- Par la forme carrée de son embout, l'arbre moteur, non représenté ici, est lié en rotation avec la manivelle (9), qui est guidée en rotation, par rapport au bâti (1), par le coussinet (12), l'anneau élastique (15) et l'épaulement de la manivelle.
- La lame est encastrée avec le coulisseau (6) par la vis (16).
- D'un côté, la manivelle (9) est guidée en rotation par le coussinet (10); de l'autre côté, elle l'est par contact direct avec la vis spéciale (7).
- Le coulisseau (6) est guidé en translation par le coussinet (5).



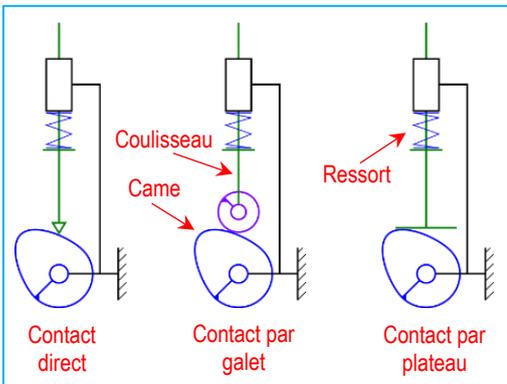
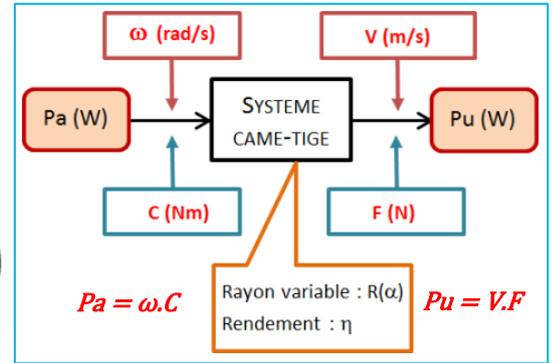
16	1	Vis à tête cylindrique à 6 pans creux
15	1	Anneau élastique pour arbre
14	1	Vis à tête fraisée à 6 pans creux
13	3	Vis à tête fraisée à 6 pans creux
12	1	Coussinet
11	1	Bielle
10	1	Coussinet
9	1	Manivelle
8	1	Couvercle
7	1	Vis spéciale
6	1	Coulisseau
5	1	Coussinet
4	1	Table
3	1	Vis à tête fraisée à 6 pans creux
2	1	Vis à tête fraisée à 6 pans creux
1	1	Corps
Rep	Nb	Désignation



Système à came

Constitution et Principe

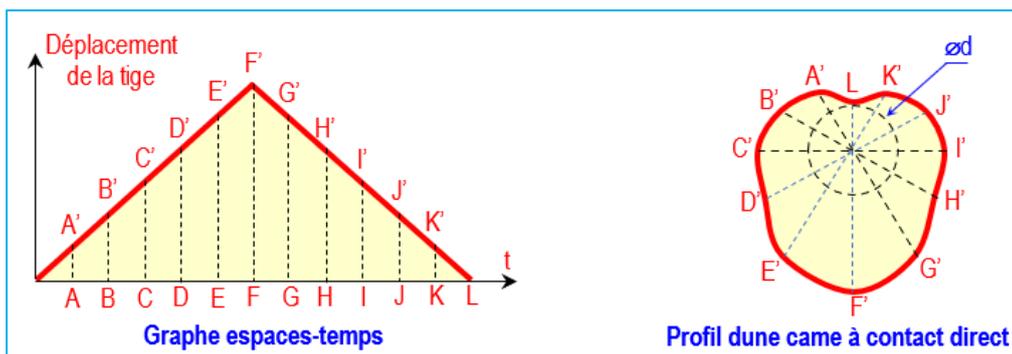
- On appelle « **came** » une roue de **forme irrégulière**.
- Dans le cas où le pivot est décentré, on parle d'**excentrique**.
- Le système à **came** permet de transformer le mouvement de **rotation** de la came en un mouvement de **translation alternatif** d'une tige.
- Le contact de la tige sur la came ne peut être maintenu que grâce à une force de rappel souvent obtenue à l'aide d'un **ressort**.
- Le contact peut se **faire directement**, par un **plateau** ou par un **galet**.
- On distingue 3 formes **principales** de cames : à **disque**, à **tambour** et à **rainure**.



Came plate ou disque	Came à tambour	Came à rainure
Direction de déplacement du suiveur perpendiculaire à l'axe de rotation	Direction de déplacement du suiveur parallèle à l'axe de rotation	Direction de déplacement du suiveur parallèle à l'axe de rotation

Profil d'une came

- La rotation de la came transmet à la tige soit :
 - Un mouvement de montée.
 - Un mouvement de descente.
 - Aucun mouvement (période de repos).
- Ces informations sont portées sur un graphe appelé **graphe espace-temps**, qui est utilisé ensuite pour tracer le profil de la came, i.e. la forme de la came.
- La procédure est la suivante :
 - Un calcul de résistance de matériaux (**RDM**) permet de définir le diamètre minimal (**d**) de la came.
 - On décompose le graphe en **n 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 et on les représente à l'extérieur du cercle minimal, en **tenant compte des échelles** du graphe de la came.
 - On trace alors la **courbe enveloppe**, en joignant les points A', B', etc., ce qui donne le profil pratique de la came.

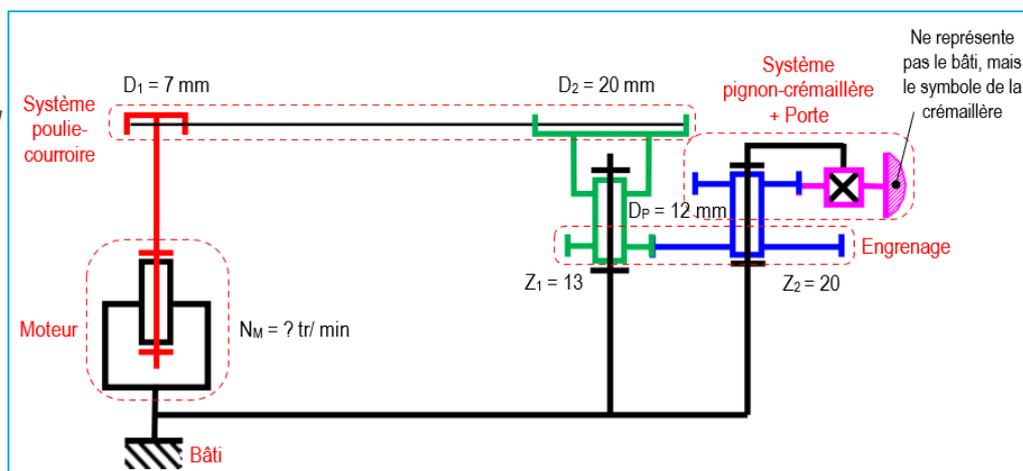
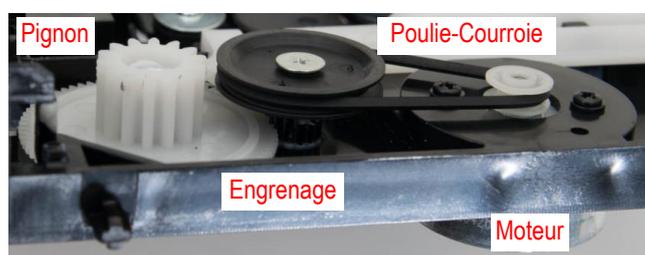


Exercices (Enoncés)

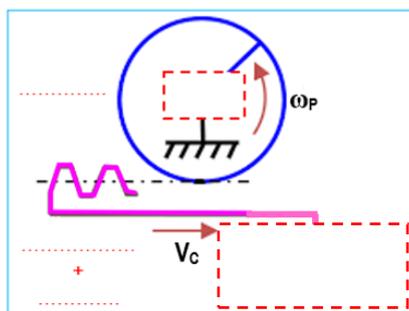
Exercice 1 : Porte de lecteur CD ROM

La chaîne de transmission de ce petit mécanisme est constituée d'un système poulies-courroie, un engrenage et un système pignon-crémaillère ; la crémaillère est encastrée avec la porte du lecteur CD ROM. Dans cet exercice, on s'intéresse surtout au système pignon-crémaillère. Ainsi, lorsque l'ordre est donné pour ouvrir ou fermer la porte, le moteur tourne, l'ensemble (poulies-courroie et engrenage) réduit la vitesse et le système pignon-crémaillère transforme le mouvement de rotation du pignon en mouvement de translation de la crémaillère, i.e. la porte.

La poulie réceptrice de diamètre ($D_2 = 20$ mm) et le pignon de l'engrenage ($Z_1 = 13$) forme une seule pièce. De même que la roue de l'engrenage ($Z_2 = 20$) et le pignon du système pignon-crémaillère, forment une roue double.



1. Compléter le schéma cinématique de la partie pignon-crémaillère en vue de face.



2. La course de la porte est ($L = 15$ cm) et le temps d'ouverture ou de fermeture de la porte est ($t = 2$ s). On désire calculer la vitesse N_M (tr/min) du moteur ; pour cela, on demande de :

- 2.1. Calculer la vitesse linéaire V_C de la crémaillère.
- 2.2. En déduire la vitesse angulaire ω_P du pignon.
- 2.3. Calculer le rapport global de réduction global r_g (système poulies-courroie (r_1) et engrenage (r_2)).
- 2.4. Calculer la vitesse angulaire ω_M du moteur.
- 2.5. En déduire la vitesse ou la fréquence de rotation N_M (tr/min) du moteur.

Exercice 2 : Mini-Compresseur

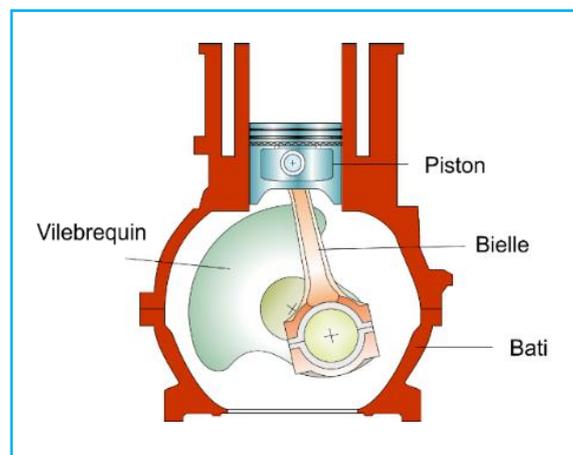
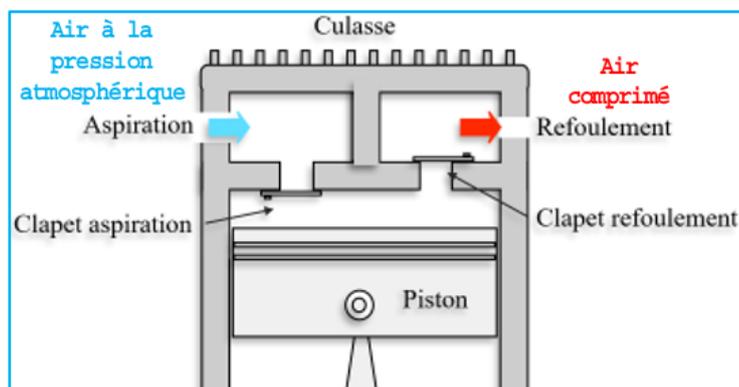
Description

Un mini compresseur est utilisé pour gonfler des objets de loisir (matelas pneumatiques, ballons, pneus de vélos ou de voitures, etc.). Il utilise, par exemple, du 12 V DC, qui peut être assurée par une batterie de voiture, pour alimenter un moteur DC qui entraîne le vilebrequin.



Fonctionnement

- La rotation de l'arbre moteur est transmise au vilebrequin ou la manivelle (13).
- La rotation continue de (13) provoque la translation alternative du piston (19) à l'aide de la bielle (16).
- Pendant la descente du piston, il se crée une dépression permettant d'aspirer de l'air ambiant à travers la soupape ou clapet (25).
- Pendant la montée, l'air aspiré est refoulé à haute pression pour l'utilisation à travers la soupape ou clapet (26).



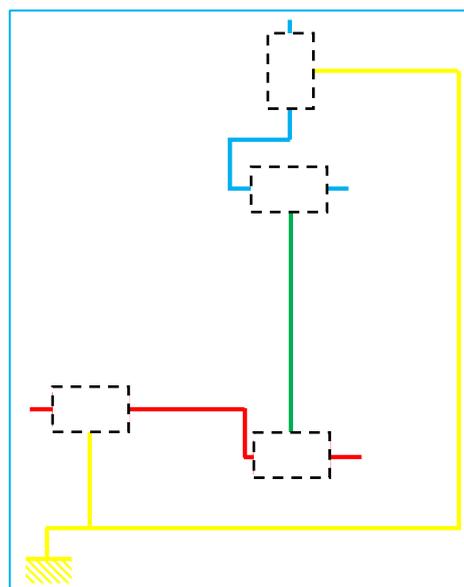
1. Compléter les classes d'équivalence du système :

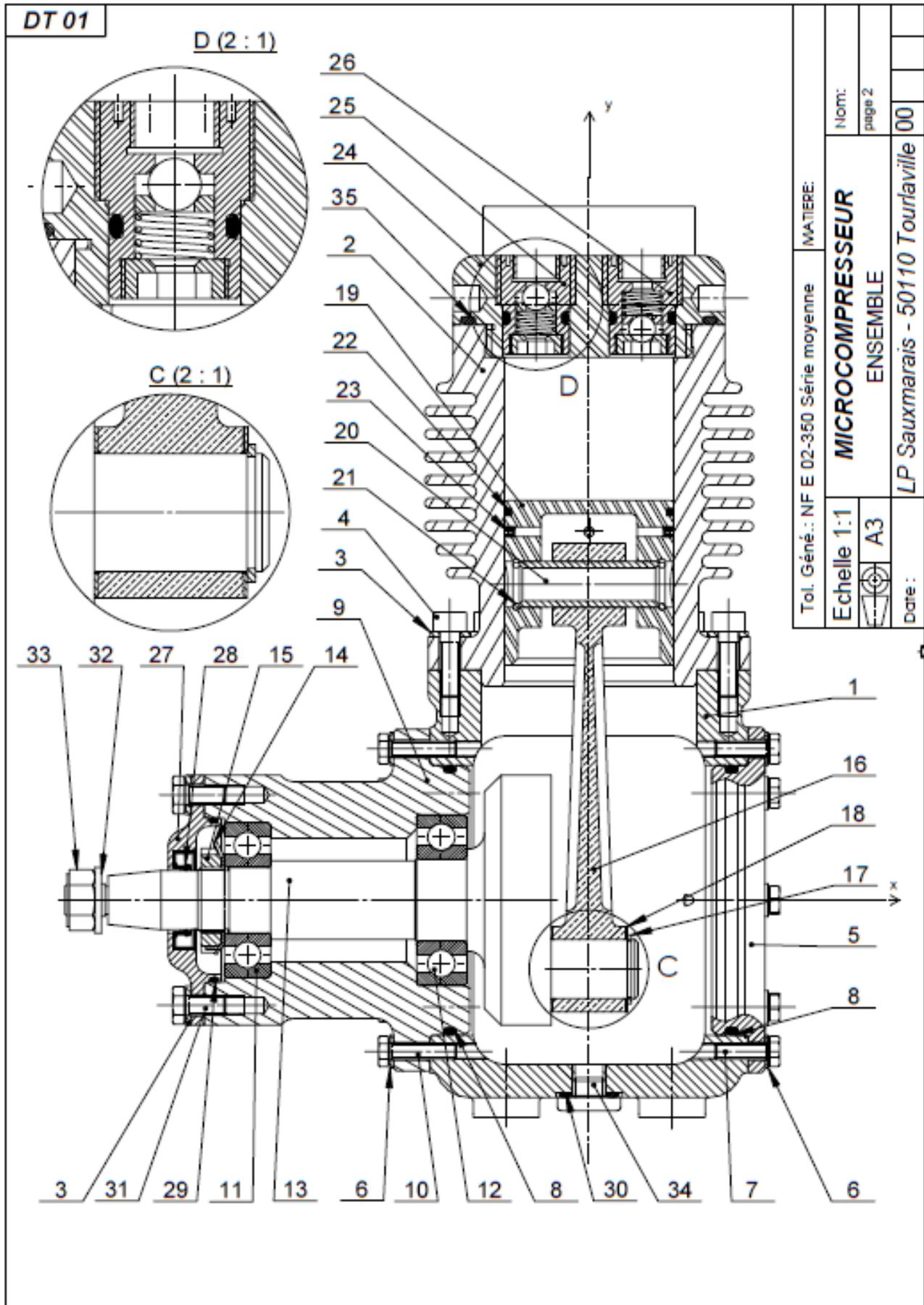
- **Bâti** : SE1 = {1,
- **Manivelle** : SE2 = {13,
- **Piston** : SE3 = {19,
- **Bielle** : SE4 = {16,

2. Colorier le dessin selon les couleurs suivantes :

- **Bâti** : Jaune.
- **Manivelle** : Rouge.
- **Piston** : Bleu.
- **Bielle** : Vert.

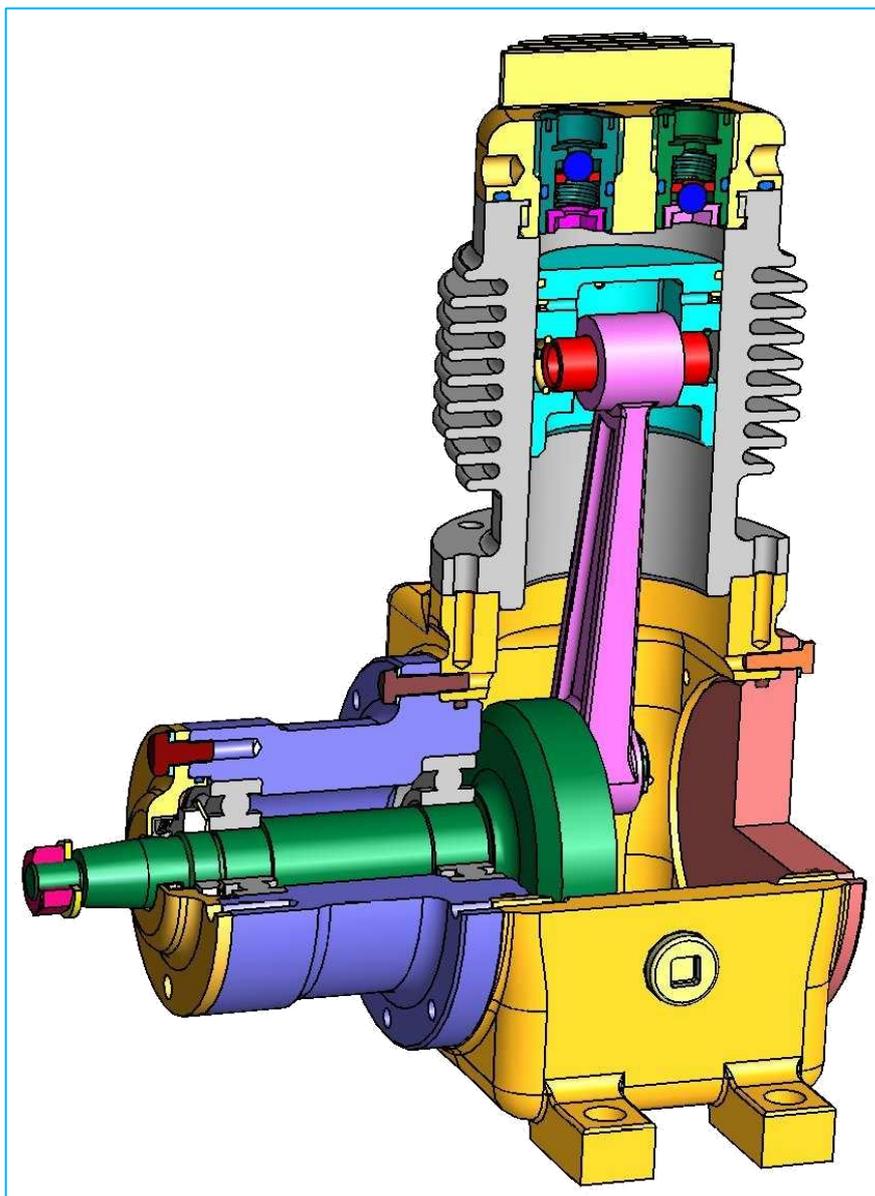
3. Compléter le schéma cinématique du système :







Rep.	Qté	Désignation
1	1	Carter
2	1	Cylindre
3	12	Rondelle
4	8	Vis tête cylindrique hexagonale creuse
5	1	Couvercle
6	16	Rondelle
7	8	Vis à tête hexagonale
8	2	Joint torique
9	1	Boîte à roulements
10	8	Vis à tête hexagonale
11	1	Roulement
12	1	Roulement
13	1	Vilebrequin
14	1	Rondelle Frein pour écrou n°5
15	1	Ecrou à Encoche n° 5
16	1	Bielle
17	1	Anneau élastique pour arbre
18	2	Cale de bielle
19	1	Piston
20	1	Axe piston
21	2	Jonc
22	1	Segment
23	1	Racleur
24	1	Culasse
25	1	Clapet aspiration
	1	Porte clapet aspiration
	1	Bille
	1	Porte bille
	1	Poussoir bille
	1	Ressort
	1	Joint torique
26	1	Clapet refoulement
	1	Porte clapet refoulement
	1	Porte bille
	1	Bille
	1	Poussoir bille
	1	Ressort
	1	Joint torique
27	1	Boîte a joints
28	1	Joint à lèvres
29	1	Joint torique
30	2	Joint circulaire
31	4	Vis à tête hexagonale
32	1	Rondelle
33	1	Ecrou hexagonal
34	2	Bouchon vidange
35	1	Joint torique



Exercice 3 : Vérin électrique

Parmi les applications les plus rencontrées du système Vis-Ecrou, on trouve le **vérin électrique**. Ainsi, la fonction principale du système est de transformer la rotation de l'arbre moteur (15) en la translation de la tige (2), par le système Vis-Ecrou (24, 23).

1. La tige (2) est assemblée avec l'écrou (23) par un ajustement serré (**H7p6**). Caractériser alors cette liaison :

Caractéristique	c	r	de	a	di
	\bar{c}	\bar{r}	\bar{de}	\bar{a}	\bar{di}
Commentaire	Pas de mouvement possible				

2. L'arbre moteur (15) est encastré avec la vis sans fin (11), qui engrène avec la roue (19). Comment est encastrée la roue (19) avec la vis d'entraînement (24) ?

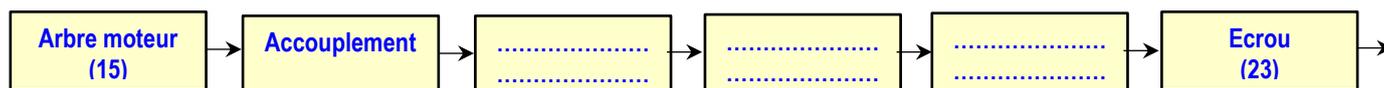
Comment est guidée en rotation la vis (24) ?

3. Comment la vis (24) est guidée en rotation ?

4. La section A-A renseigne sur le système anti-rotation de l'écrou.

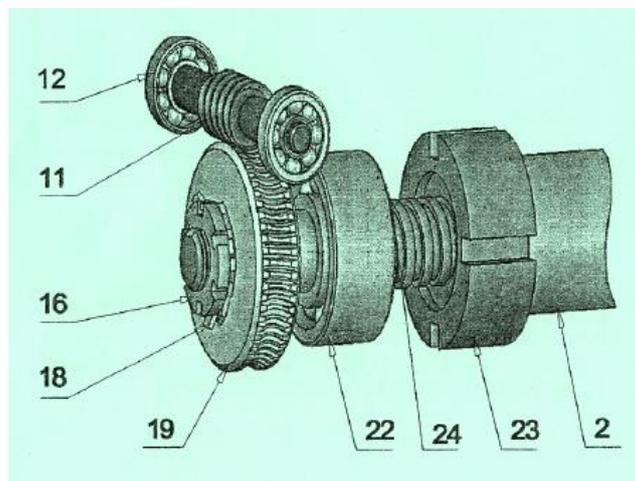
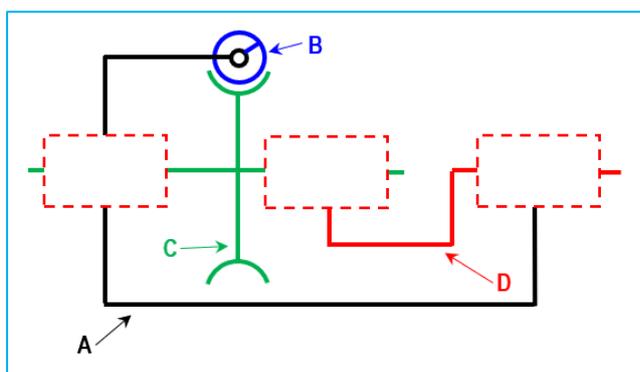
4.1. Décrire alors cette solution.

4.2. Compléter alors la chaîne cinématique de ce vérin électrique :

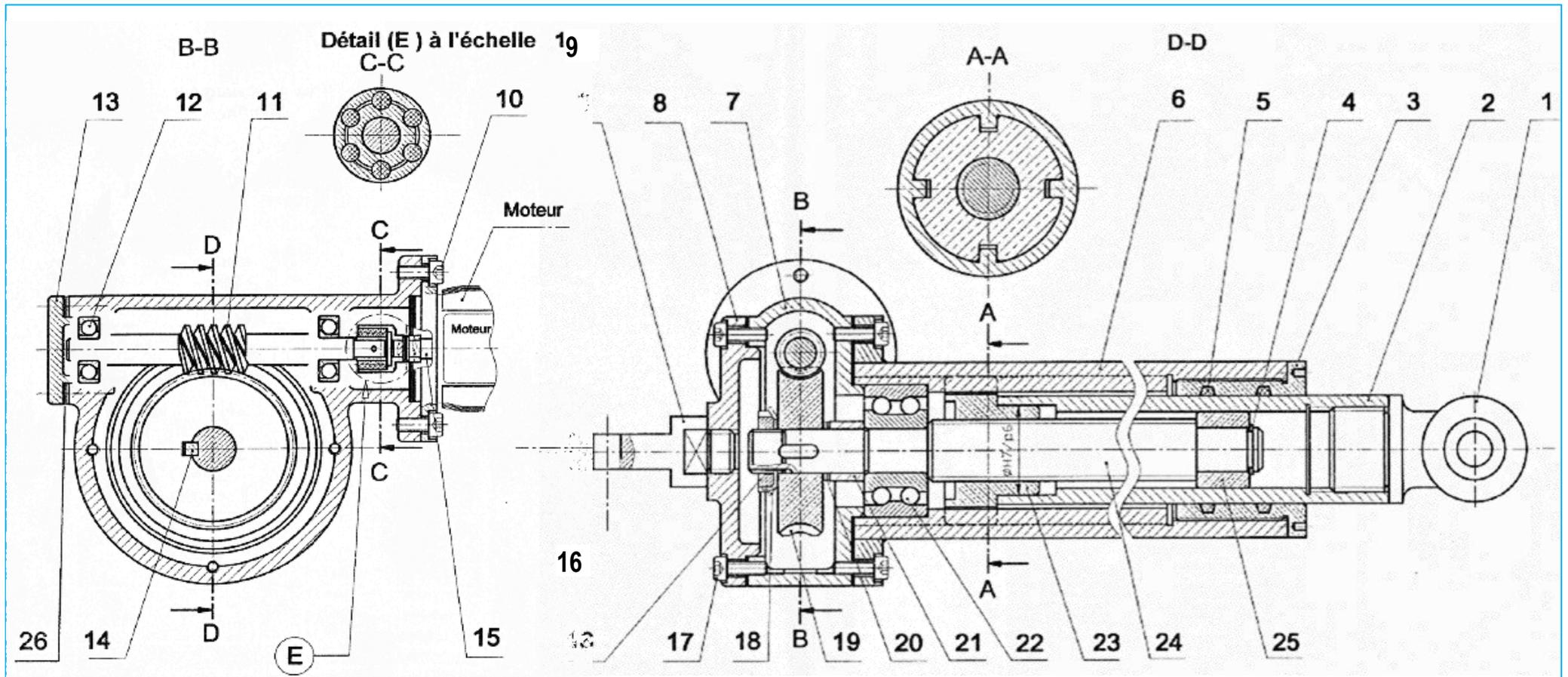


5. Compléter le schéma cinématique et les classes d'équivalence associées.

- A = {3,
- B = {11,
- C = {4,
- D = {1,



13	1	Couvercle	26	Cales de réglage
12	2	Roulement à une rangé de billes à contact oblique	25	1 Bague de frottement
11	1	Vis sans fin Z= 1 filet	24	1 Vis d'entraînement; pas p = 4 mm
10	4	Vis à tête cylindrique à 6 pans creux M6-14	23	1 Ecou spécial
9	1	Embout	22	1 Roulement à deux rangés de billes à contact oblique
B	1	Couvercle	21	1 Bague entretoise
7	1	Carter	20	1 Cales de réglage
6	1	Tube cannelé	19	1 Roue dentée Z = 60 dents
5	2	Joints toriques	18	1 Rondelle frein
4	1	Anneau élastique	17	8 Vis à tête cylindrique à 6 pans creux M6-18
3	1	Couvercle	16	1 Ecou à encoches
2	1	Tige du vérin	15	1 Arbre moteur
1	1	Embout à rotule	14	1 Clavette parallèle
RepNb.	Désignation		RepNb.	Désignation

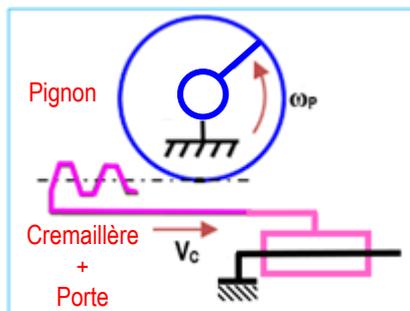




Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Porte de lecteur CD ROM

1. Schéma cinématique du pignon-crémaillère en vue de face :



2. Calcul de la fréquence de rotation N_M (tr/min) :

$$2.1. V_C = \frac{L}{t} = \frac{0,15}{2} = 0,075 \text{ m/s} = 75 \text{ mm/s}$$

$$2.2. V_C = \frac{D_P}{2} \cdot \omega_P \Rightarrow \omega_P = \frac{2 \cdot V_C}{D_P} = \frac{2 \cdot 0,075}{0,012} = 12,5 \text{ rd/s}$$

$$2.3. r_g = \frac{\omega_P}{\omega_M} = r_1 \cdot r_2 = \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{0,007}{0,02} \cdot \frac{13}{60} = 0,0578$$

$$2.4. \omega_M = \frac{\omega_P}{r_g} = \frac{12,5}{0,0578} = 216,263 \text{ rd/s}$$

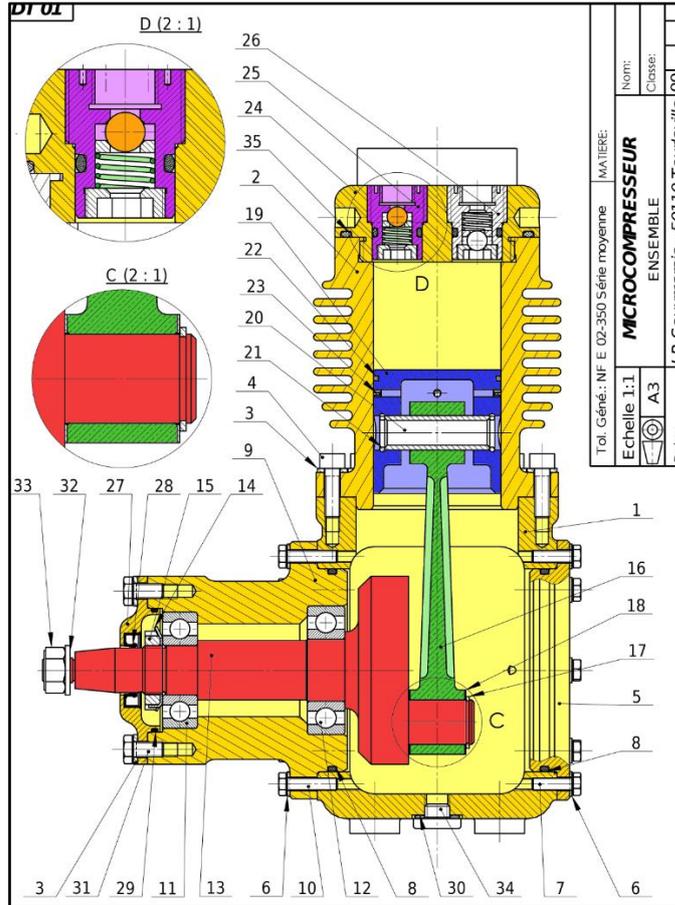
$$2.5. N_M = \frac{\omega_M \cdot 60}{2 \cdot \pi} = \frac{216,263 \cdot 30}{\pi} = 2065 \text{ tr/min}$$

Exercice 2 : Mini-Compresseur

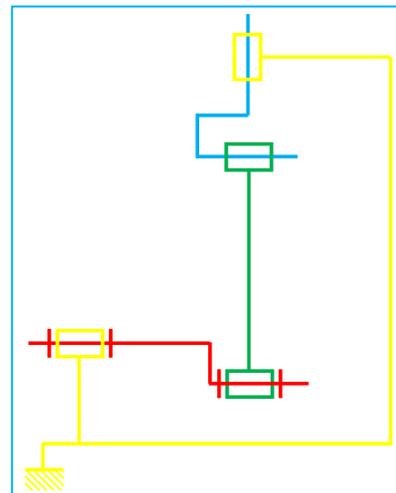
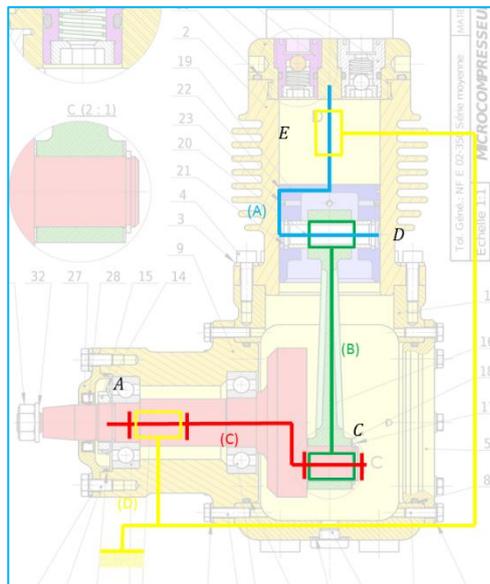
1. Classes d'équivalence :

- **Bâti :** **SE1** = { 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 24, 25, 26, 27, 31, 34 }
- **Manivelle :** **SE2** = { 13, 14, 15, 17, 32, 33 }
- **Piston :** **SE3** = { 19, 20 }
- **Bielle :** **SE4** = { 16, 18 }

2. Coloriage du dessin :



3. Schéma cinématique :



Exercice 3 : Vérin électrique

1. Caractéristiques de l'assemblage (2, 23) :

Caractéristique	c	r	de	a	di
Commentaire	Pas de mouvement possible	Pas d'élément élastique	Montage à la presse	Montage serré	Pas de pièces intermédiaires
	\bar{c}	\bar{r}	\bar{de}	\bar{a}	\bar{di}

2. Encastrement (19, 24) :

- Liaison en rotation par la clavette (13).
- Arrêt en translation d'un côté par l'écrou à encoches (16) et la rondelle frein (18) ; de l'autre côté, on a la cale de réglage (20) et la bague entretoise (21).

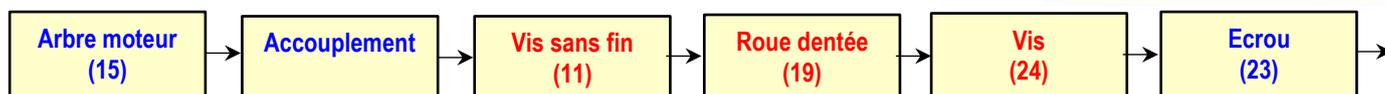
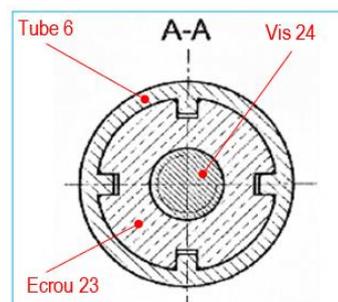
3. La vis (24) est guidée en rotation :

- D'une part par rapport au corps du vérin, le tube (6), par le roulement (22).
- D'autre part par rapport à la tige (2), par la bague de frottement (25).

4. Système anti-rotation de l'écrou :

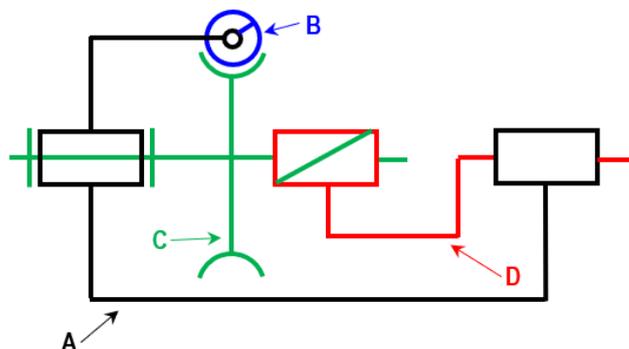
4.1. L'anti-rotation de l'écrou est basé sur la forme cannelée du tube (6), qui permet une liaison glissière entre eux. Comme le tube (6) représente le bâti, alors l'écrou (23) ne peut que translater, quand la vis (24) tourne.

4.2. Chaîne cinématique du système :



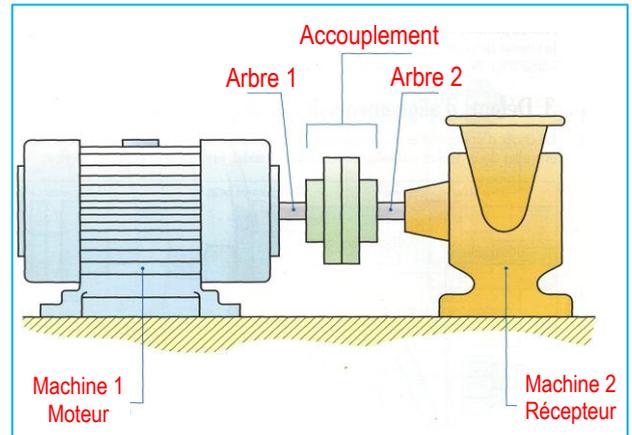
5. Schéma cinématique et classes d'équivalence :

- A = {3, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 17}
- B = {11, 15}
- C = {4, 19, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 24, 25}
- D = {1, 2, 23}



Introduction

- Les **accouplements** sont utilisés pour transmettre la puissance (**vitesse** et **couple**), entre **2 arbres**, comportant éventuellement des **défauts d'alignement**.
- Un accouplement peut être temporaire, comme dans les cas des :
 - **Embrayages**, qui sont des accouplements, qui peuvent être désaccouplés à volonté.
 - Les **freins**, qui sont des accouplement particuliers dans la mesure où ils bloquent le mouvement, aussi à volonté.



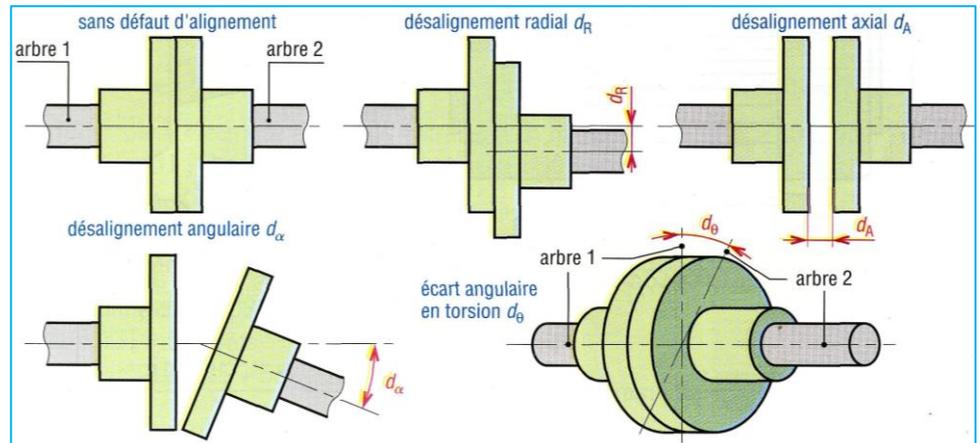
Généralités

Définitions

- **Accouplement permanent** : L'accouplement des 2 arbres est permanent dans le temps ; le désaccouplement n'est possible que par démontage du dispositif.
- **Accouplement temporaire** : L'accouplement ou le désaccouplement sont possibles à tout moment, sans démontage, suite à une commande extérieure, manuelle ou automatisée.

Défauts d'alignements des accouplements

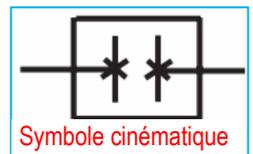
- Le choix d'un type d'accouplement dépend d'abord des défauts d'alignement pouvant exister entre les 2 arbres : désalignements radial, axial, angulaire et écart en torsion.



Accouplements permanents

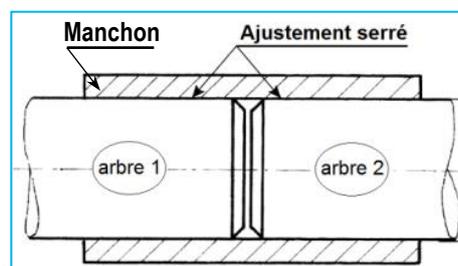
Accouplements rigides

- Ils sont utilisés lorsque les arbres doivent être **correctement alignés ou parfaitement coaxiaux**, pour éviter la destruction prématurée du système.



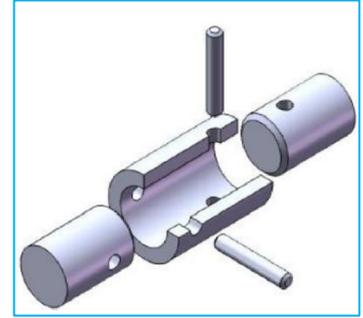
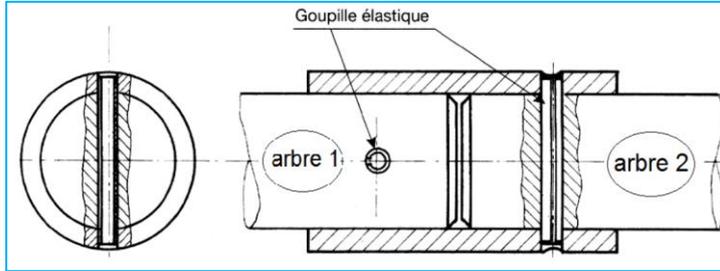
Accouplement par adhérence

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

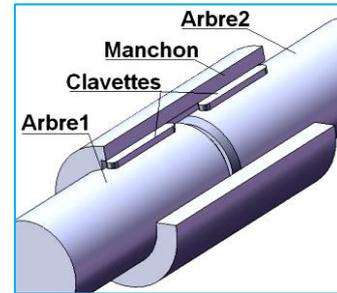
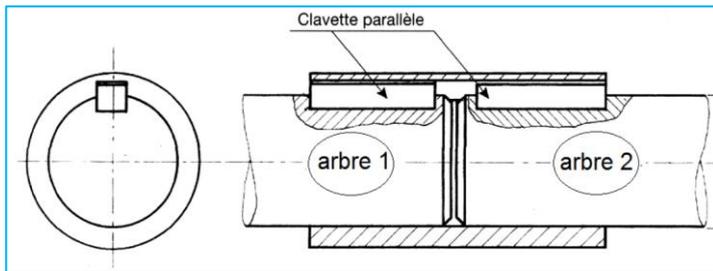


Accouplement par manchons à goupilles ou clavettes

- C'est un accouplement par **obstacle** (goupille ou clavette) ; la mise en position est effectuée par un manchon.
- Les goupilles et les clavettes travaillent au **cisaillement** et offrent une **sécurité** en cas de surcharge.
- Montage avec **goupilles** :

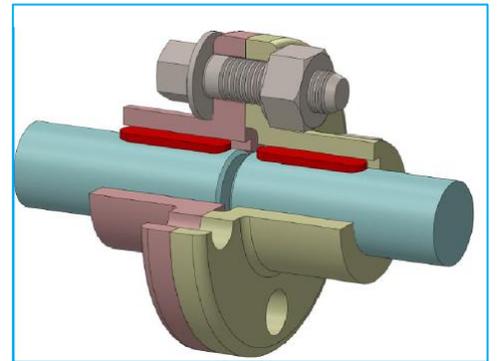
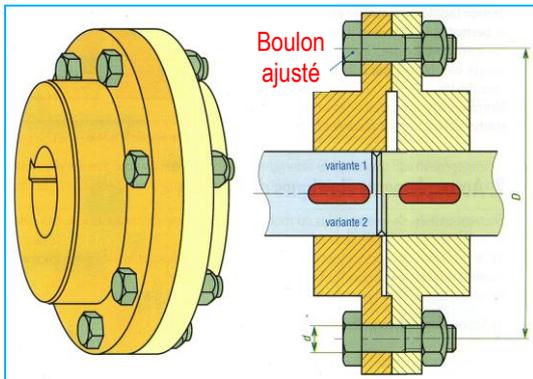


- Montage avec **clavettes** :



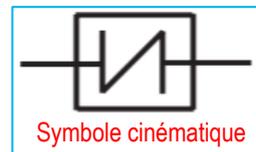
Accouplement par plateaux et boulons ajustés

- 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**.
- En cas de surcharge, le **cisaillement** des boulons offre une certaine **sécurité**.



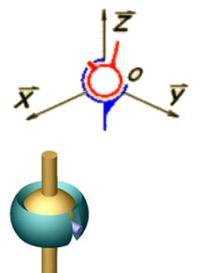
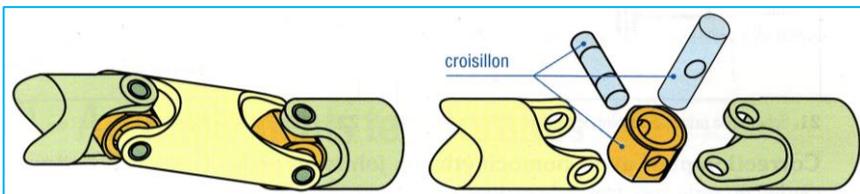
Accouplements élastiques ou flexibles

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



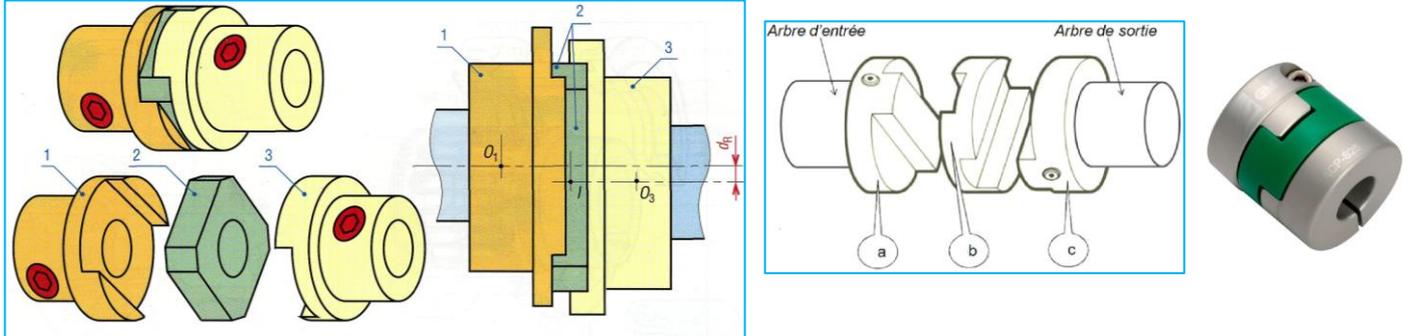
Joint de Cardan

- C'est un **joint articulé**, qui permet un accouplement pour **arbres concourants** ; le mouvement se transmet via 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.
- Le **joint de Cardan** est une **solution technologique** de la liaison **Rotule à doigt**.



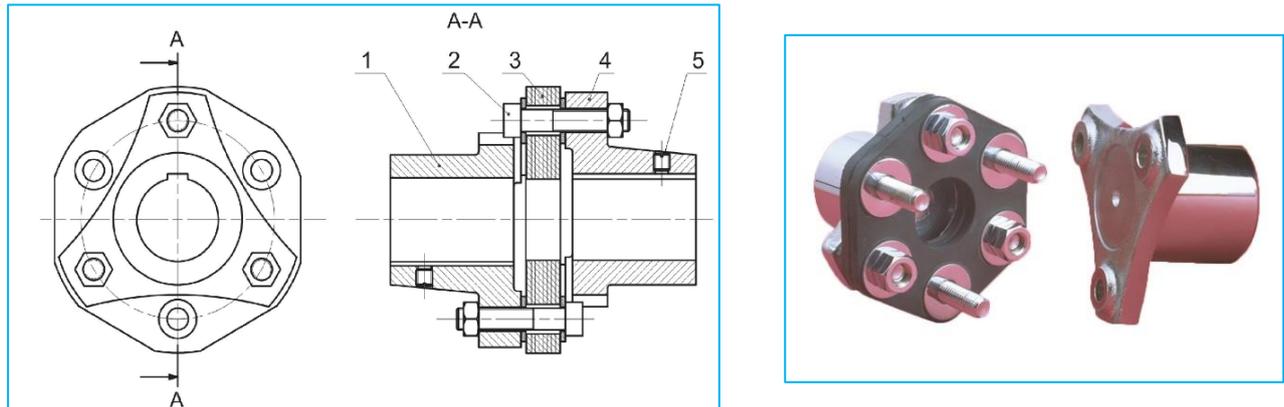
Joint d'Oldham

- Il supporte uniquement des **désalignements radiaux**.
- Le joint est construit autour de 2 glissières à 90° ; plusieurs variantes sont possibles.



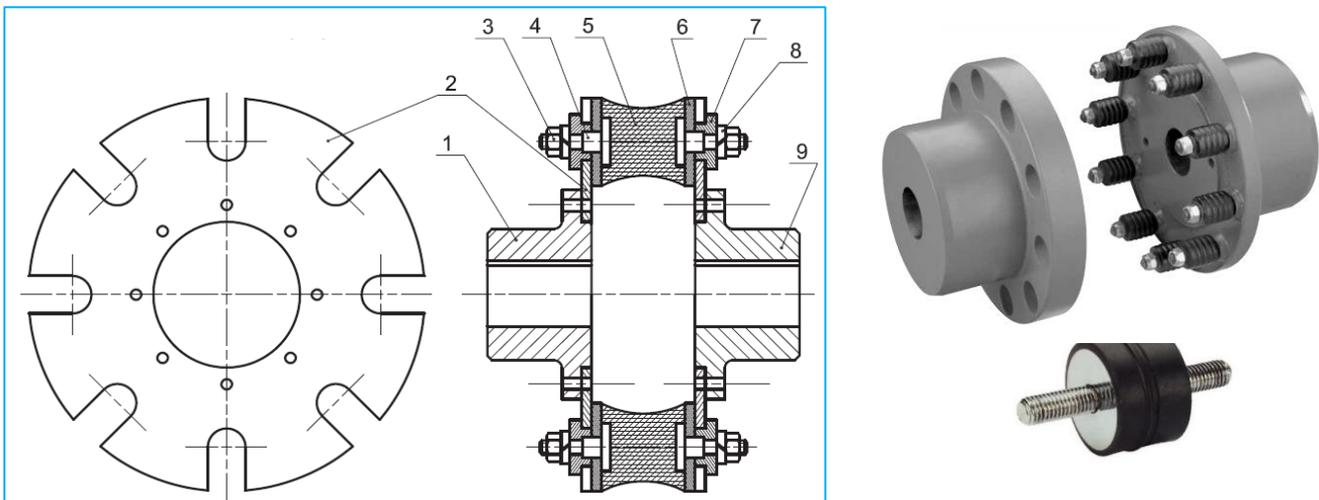
Accouplement à disque flexible (Flector)

- Les 2 manchons (1) et (4) sont reliés par l'intermédiaire d'un élément élastique (3), qui peut supporter en particulier la **compression**.
- L'élément élastique (3) est en caoutchouc synthétique, l'**élastomère**.



Accouplement à plots d'élastomère (Radiaflex)

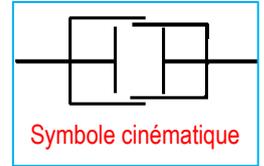
- Cet accouplement élastique permet de supporter en particulier la **flexion**, grâce aux **plots** (5) en **élastomère**.



Accouplements temporaires

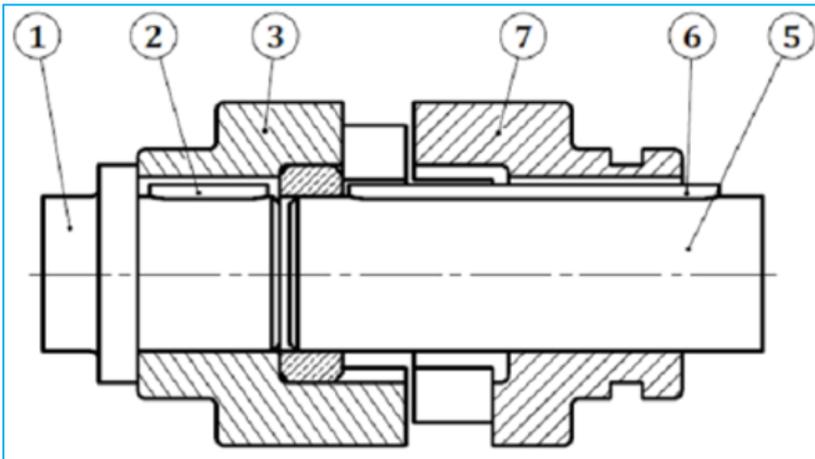
Embrayages

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

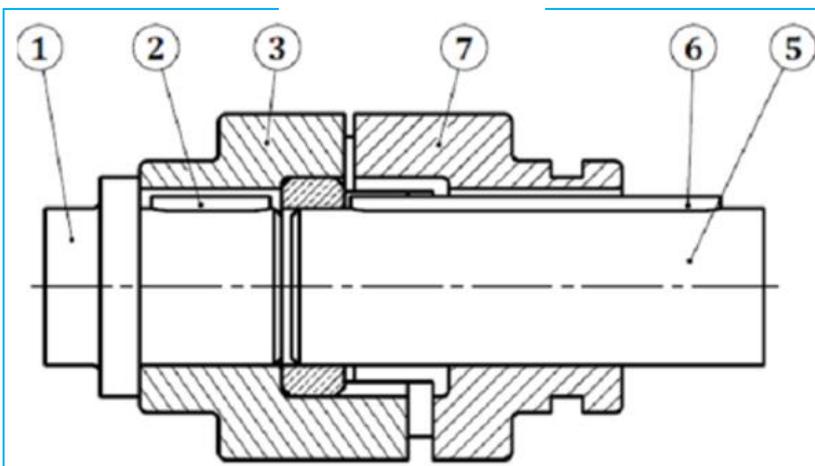
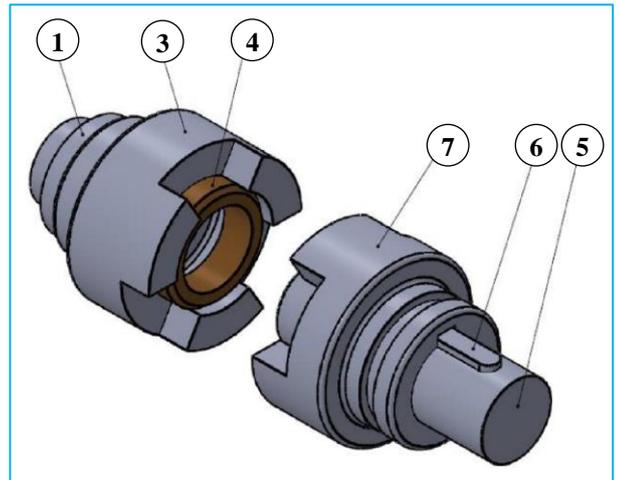


Embrayage par obstacle

- 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**.
 - 2 crabots présentent des formes **complémentaires**, qui leur permettent de s'emboîter entre eux.
 - Les 2 crabots (3) et (7) sont liés en rotation avec les arbres (1) et (5), via les clavettes (2) et (6).
 - Le montage coulissant de (7), appelé **baladeur**, 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.



Position débrayée



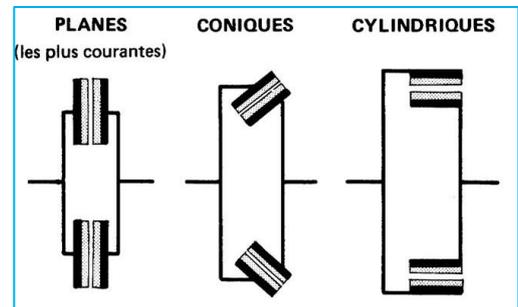
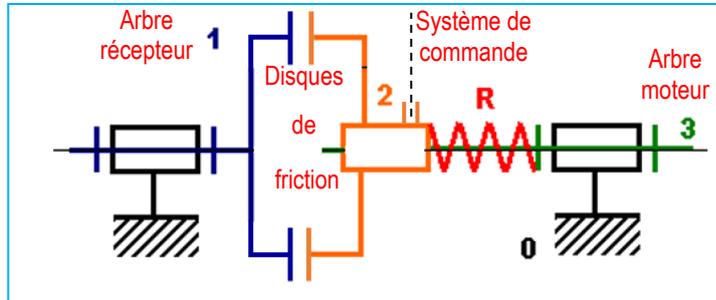
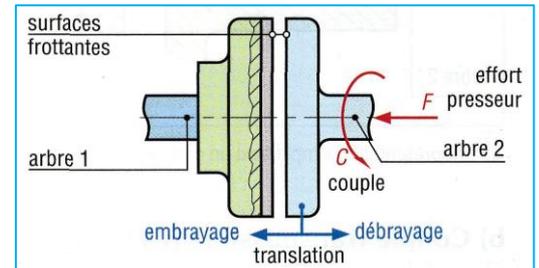
Position embrayée

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

Embrayage par adhérence

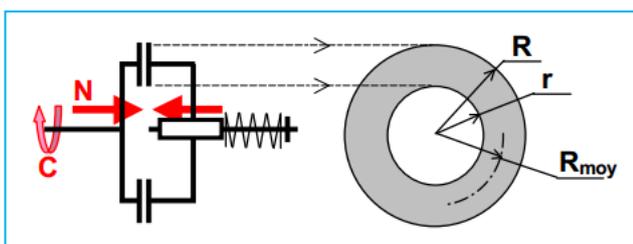
Principe

- 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



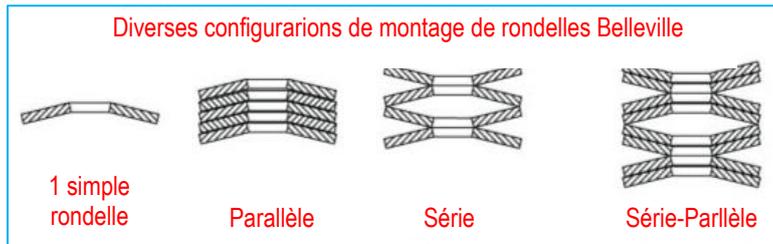
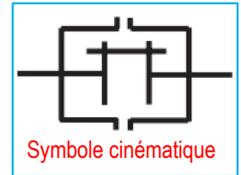
- **C** : Couple transmissible en N.m
- **F** : Effort presseur des surfaces de friction en N
- **f** : Coefficient de frottement
- **n** : Nombre de surfaces de friction
- **R** : Rayon extérieur du disque de friction en m
- **r** : Rayon intérieur du disque de friction en m

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

Limiteur de couple ou accouplement de sécurité

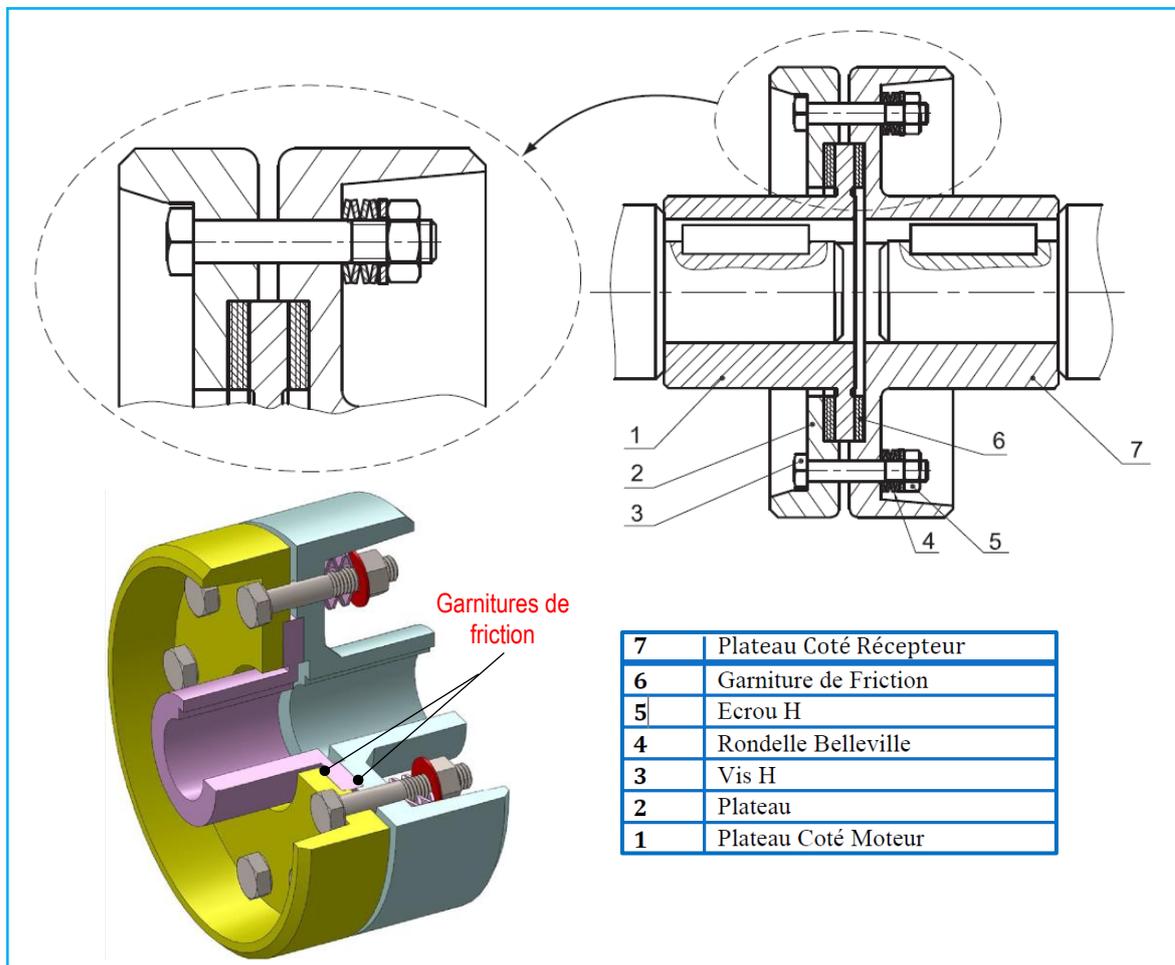
Principe

- L'accouplement est par **friction** ; lorsqu'un **seuil de couple** est atteint, il y a glissement ou **patinage** et il en résulte une rupture du couple et 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** ».



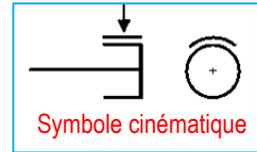
Exemple de montage

- 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).



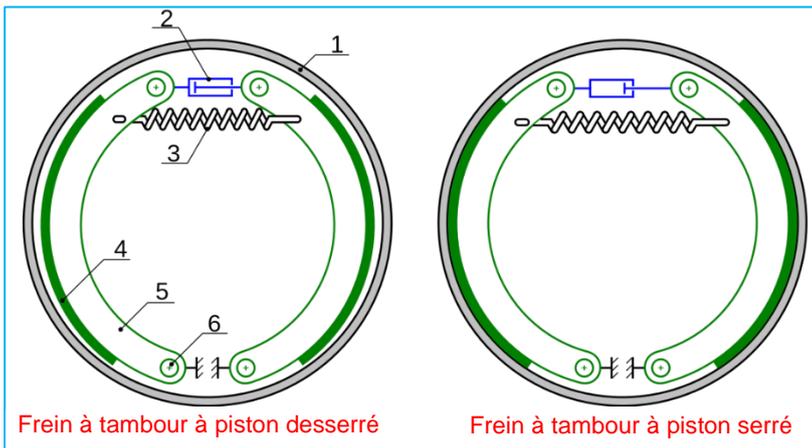
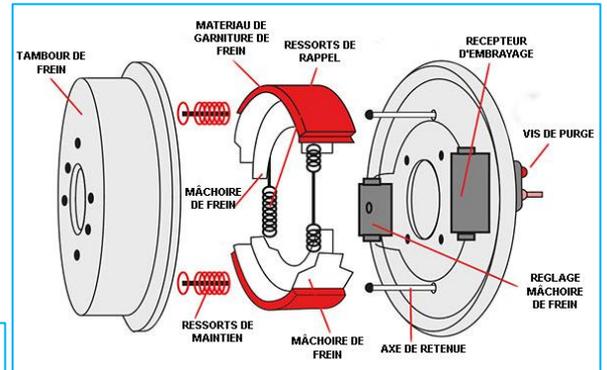
Les freins

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



Freins à tambour

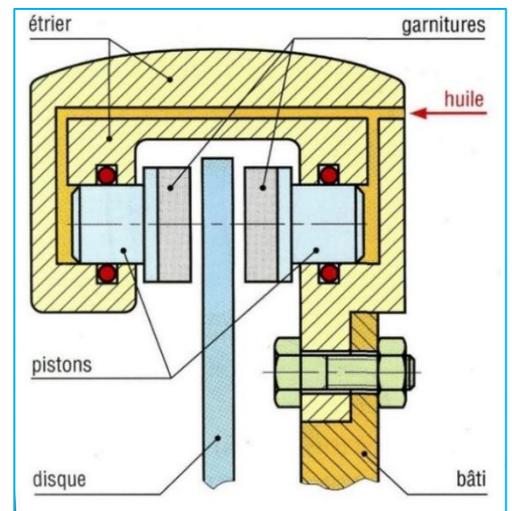
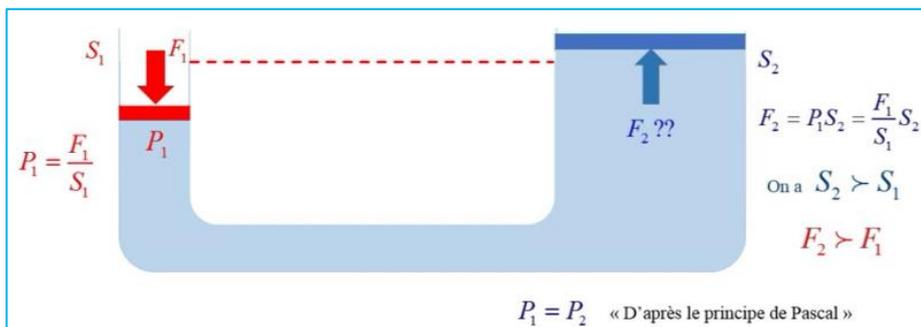
- Il comporte :
 - 2 **mâchoires** de frein frottant par l'intermédiaire de **garnitures** sur l'intérieur du tambour.
 - Des **vérins** à commande **hydraulique**, qui fournissent l'effort de freinage.
 - Des **ressorts** de rappel pour ramener les mâchoires à leur position de repos.
- Lorsque le frein 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 ainsi 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.
- Pour la commande hydraulique, 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 de l'engin en mouvement.



Exemple d'application

- Il s'agit d'un **moteur électrique** avec **électro-frein à manque de courant** :

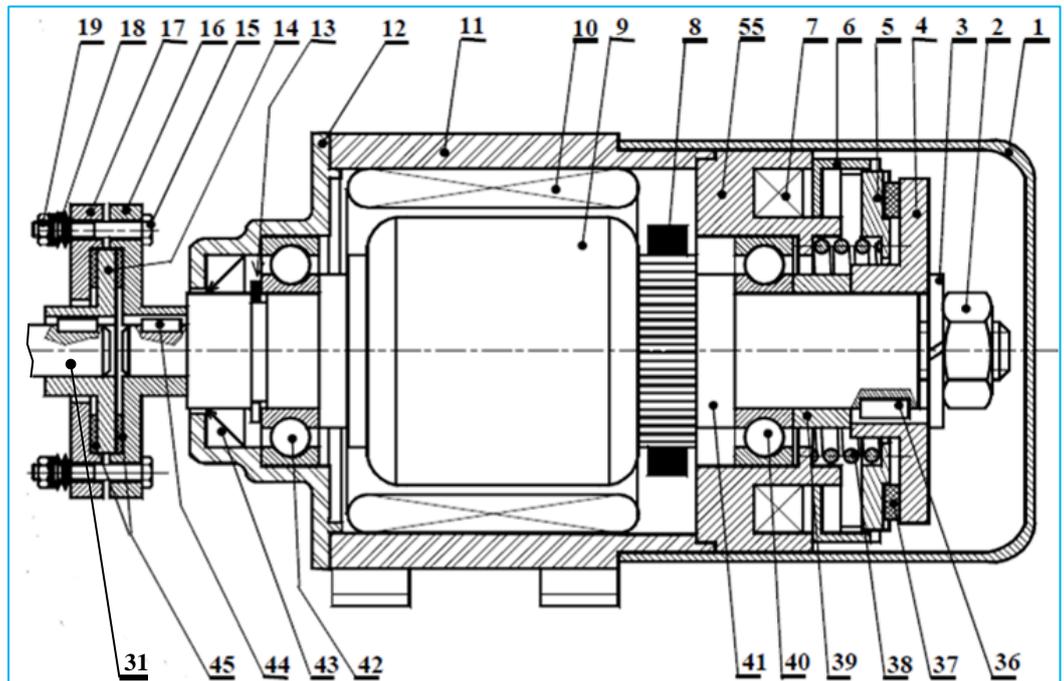
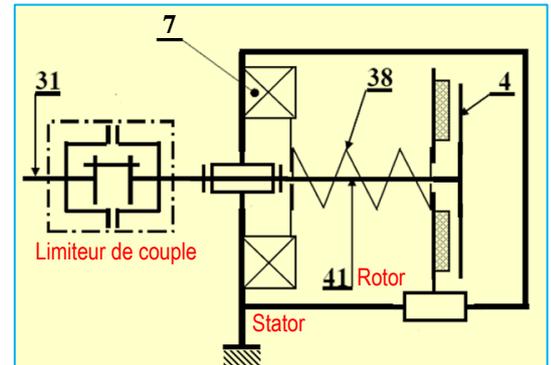
- L'ensemble des pièces {13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 44, 45} réalise **l'accouplement** avec **limitation de couple** entre les arbres (41) et (31).
- Quand le moteur est en marche, la bobine (7) est aussi alimentée et le frein est sans action ; en effet, :

- Le champ magnétique crée par la bobine attire vers la gauche la cloche mobile (5) et **comprime** le ressort (38) ; en effet, la cloche (5) est en liaison **Glissière** avec le bâti {6, 55, 11, etc.}.
- Alors, le disque (4) n'est pas en contact avec la garniture de friction (37) de (5). L'arbre (41) encastré avec le rotor (9), tourne et son mouvement est transmis à l'arbre (31) via le limiteur de couple.

- Quand le moteur est en arrêt, la bobine (7) n'est plus alimentée et le frein rentre en action ; en effet, :

 - Il n'y a plus de champ magnétique, ce qui permet au ressort de reprendre sa **position initiale** en exerçant sa force de rappel sur la cloche mobile (5).
 - Le disque (4) se met alors en **contact** avec la garniture de friction, ce qui **freine** l'arbre (41), car la cloche (5) ne peut pas tourner par rapport au bâti.

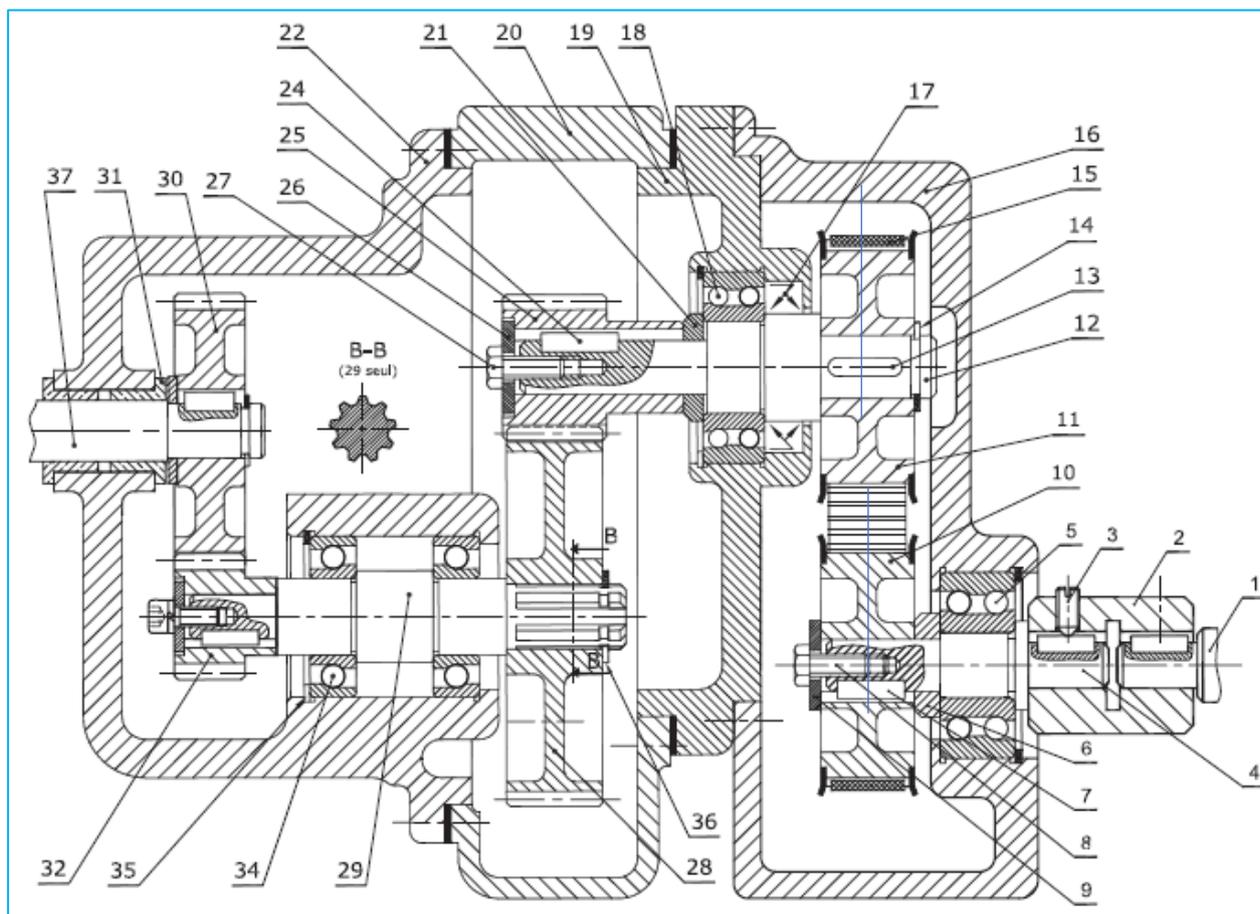
27	1	Boîtier	54	1	
26	1	Axe de Fourchette	53	1	Bâti
25	1	Fourchette	52	1	Roue dentée
24	16	Vis H, M8-28	51	1	Roue dentée
23	2	Joint plat	50	1	Roue dentée
22	1		49	1	Roulement 55 BC 03
21	1	Boîtier	48	1	Arbre de sortie
20	1	Roulement 55 BC 03	47	1	Clavette parallèle
19	4	Ecrou H, M10	46	1	Joint à lèvres
18	16	Rondelle élastique	45	2	Garniture
17	1	Plateau intermédiaire	44	2	Clavette parallèle
16	1	Plateau moteur	43	1	Joint à lèvres
15	4	Vis H, M10-70	42	1	Roulement 70 BC 03
14	1	Plateau récepteur	41	1	arbre moteur
13	1	Anneau élastique pour arbre	40	1	Roulement 70 BC 03
12	1	Couvercle	39	1	Bague entretoise
11	1	Corps	38	1	Ressort
10	1	Stator	37	1	Garniture
9	1	Rotor	36	1	Clavette parallèle
8	2	Charbon	35	1	Poulie motrice
7	1	Bobine électromagnétique	34	2	Courroie trapézoïdale
6	1	Cloche fixe	33	1	Roulement 55 BC 03
5	1	Cloche mobile	32	4	Bague
4	1	Disque	31	1	Arbre intermédiaire
3	1	Rondelle W36	30	2	Clavette parallèle
2	1	Ecrou H, M36	29	1	Roulement 55 BC 03
1	1	Capot	28	1	
Rep	Nbre	Désignation	Rep	Nbre	Désignation



Exercices (Enoncés)

Exercice 1 : Accouplement

Il s'agit d'un système de transmission de puissance, utilisant entre autres un accouplement.



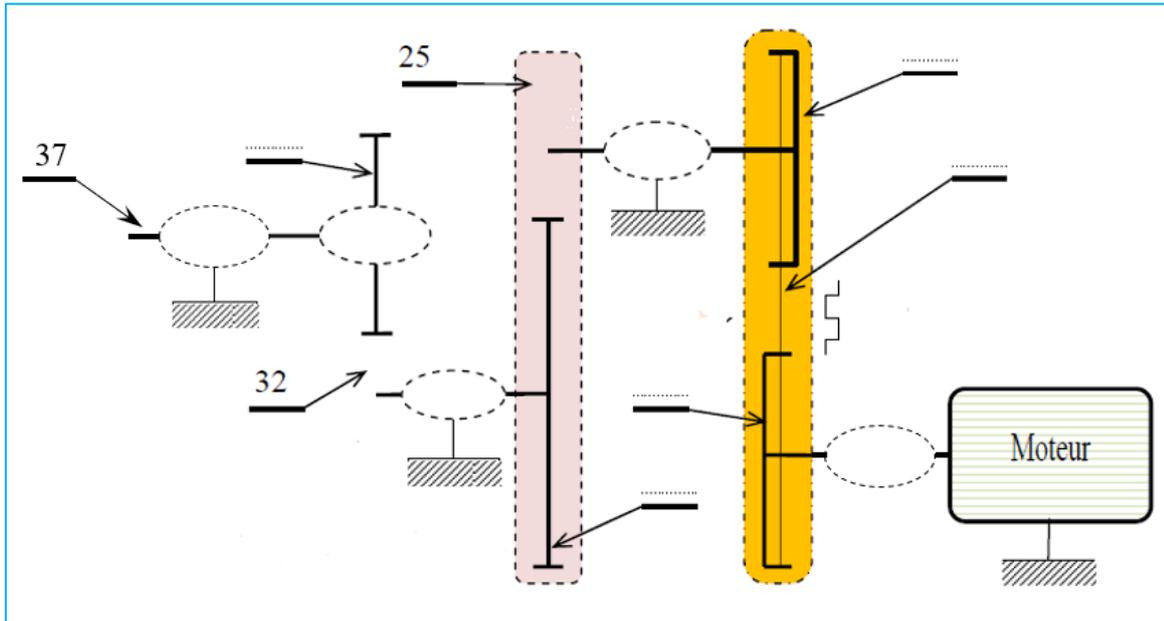
13	2	Clavette parallèle forme A	37	1	Arbre de sortie
12	1	Arbre	32	1	Pignon
11	1	Poulie réceptrice	30	1	Roue
10	5	Poulie motrice	28	1	Roue $Z_{28} = 40$ dents
09	5	Rondelle d'appui	25	1	Pignon $Z_{25} = 12$ dents
08	1	Vis H	21	1	Bague
07	1	Clavette parallèle forme A	20	1	Flasque
06	1	Bague	19	1	Bâti
05	1	Roulement BC	18	1	Roulement
04	1	Arbre d'entrée	17	1	Joint d'étanchéité
03	1	Vis de pression	16	1	Bâti
02	2	Manchon	15	1	Courroie crantée
01	1	Arbre moteur	14	1	Anneau élastique
Rp	Nb	Désignation	Rp	Nb	Désignation



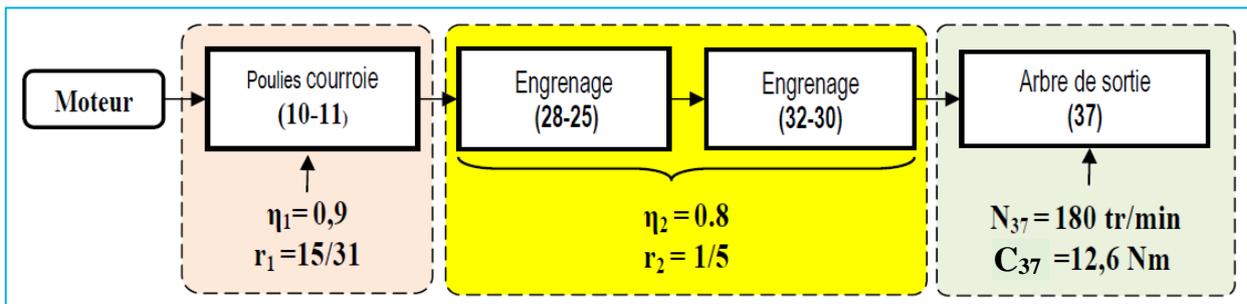
1. Sur quoi la section B-B nous renseigne-t-elle ?
2. Caractéristiques de l'accouplement utilisé.

Pièces employées	Arbres accouplés	Type (rigide ou élastique)	Solution constructive
.....

3. Compléter le schéma cinématique suivant.



4. Le schéma synoptique de la transmission de puissance du système est donné par la figure suivante.

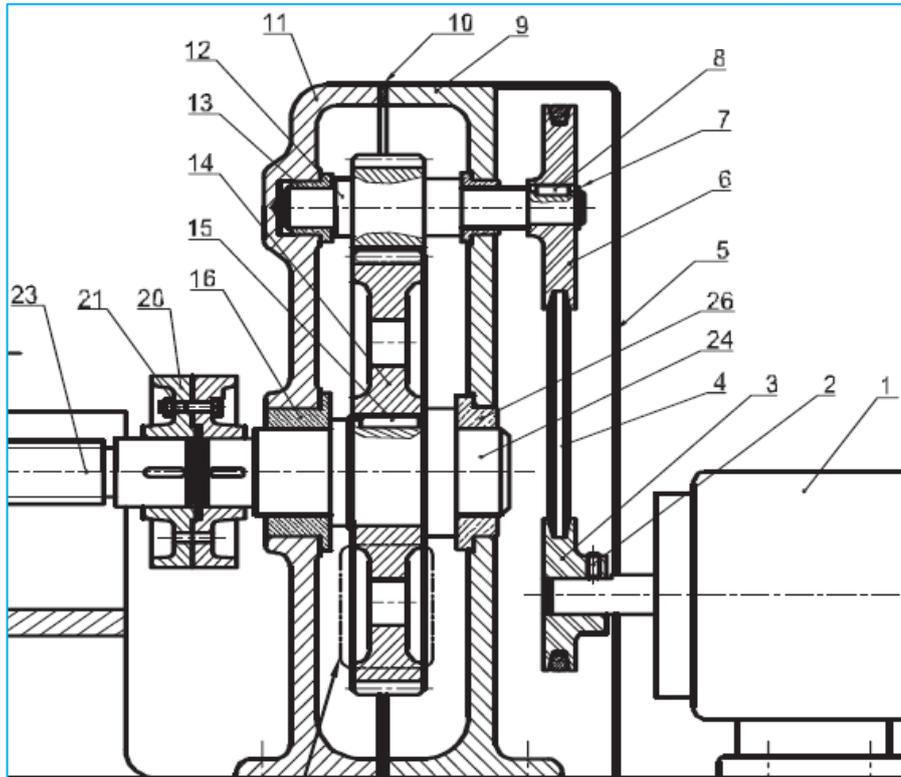


- 4.1. Calculer le rapport global r_g du réducteur.
- 4.2. En déduire la vitesse de rotation du moteur N_M .
- 4.3. Calculer la puissance de l'arbre de sortie (37) P_{37} .
- 4.4. Calculer le rendement global η_g de ce réducteur.
- 4.5. En déduire la puissance du moteur P_M .
- 4.6. Effectuer le choix du moteur le mieux adapté à partir du tableau suivant :

Moteur	Moteur1	Moteur2	Moteur3
Nm [tr/min]	1450	1800	1800
Pm [w]	300	300	600

Exercice 2 : Accouplement

Il s'agit d'un système de transmission de puissance, utilisant entre autres un accouplement.



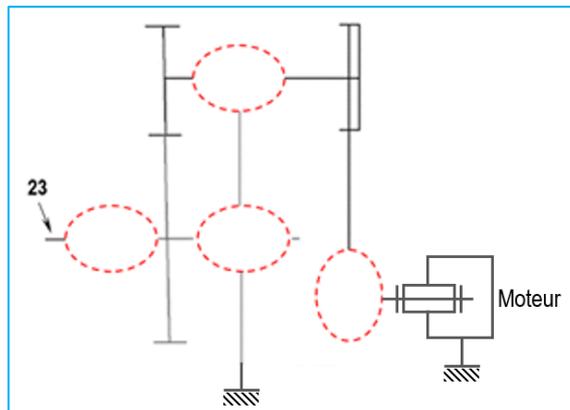
26	1	Coussinet	Cu Sn 8	
25	2	Vis à tête cylindrique à six pans creux ISO 4762		
24	1	Arbre de sortie	C 35	Trempé revenu
23	2	Vis de manoeuvre	35 Ni Cr 6	
22	10	Cale de réglage		
21	6	Boulon ajusté	C 60	Trempé
20	2	Manchon	EN-JM 1050	
19	1	Ecrou spécial	Cu Sn 8	
18	1	Table	EN-GL-200	
17	1	Bâti	EN-GL-200	
16	1	Coussinet	Cu Sn 8	
15	1	Clavette parallèle		
14	1	Roue dentée	C 60	Trempé revenu
13	2	.....	Cu Sn 8	
12	1	Pignon arbré	C 60	Trempé revenu
11	1	Carter	EN-GL-200	
10	1	Joint plat		
9	1	Carter	EN-GL-200	
8	1	.....	
7	1	Anneau élastique	C 60	traité
6	1	Poulie réceptrice	Zamack 3	
5	1	Cage de protection	S185	
4	1	.....	
3	1	.....	Zamack 3	
2	1	Vis sans tête à six pans à bout plat ISO 4726		
1	1	Moteur		
Rep	Nb	Désignation	Matière	Observation



1. Compléter le tableau suivant :

Pièces employées	Arbres accouplés	Type (rigide ou élastique)	Solution constructive
.....

2. Compléter le schéma cinématique suivant :

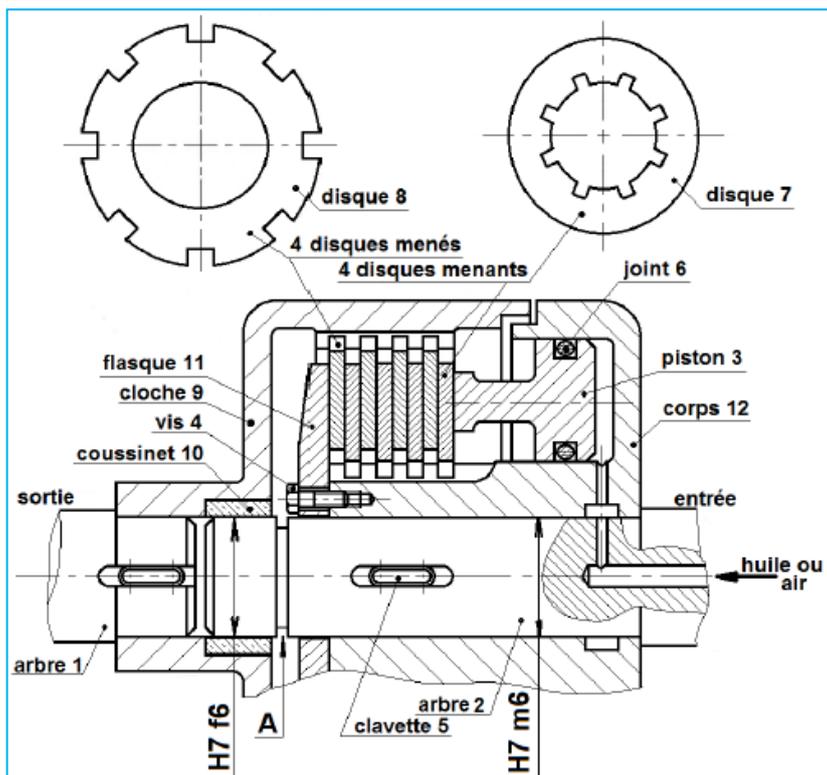


Exercice 3 : Embrayage multidisque

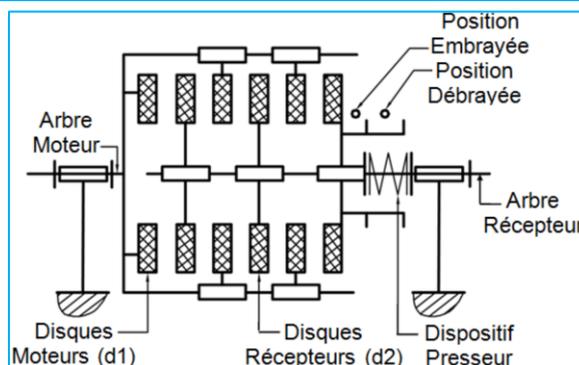
L'arbre d'entrée (2) transmet la puissance du moteur à l'arbre de sortie (1) par l'intermédiaire des 8 disques. La commande de l'embrayage est assurée par des pistons qui exercent un effort presseur sur les disques.

- Donner la fonction des pièces (5), (6) et (10).
- Préciser le type de chacun des 2 ajustements (H7f6 et H7m6).
- Donner la fonction de la gorge « A », vu les 2 ajustements prévus pour l'arbre (2).
- En considérant le système en état débrayé, colorier le dessin comme suit :

- En rouge, l'arbre d'entrée (2) et tout ce qui tourne avec lui.
- En bleu, l'arbre de sortie (1) et tout ce qui tourne avec lui.
- En jaune foncé, le circuit d'huile de pression du piston (3).
- En vert, les disques menés.
- En violet, les disques menants.
- En jaune clair, les surfaces de frottement des disques.



- En se basant sur le schéma cinématique général ci-contre, donner le schéma cinématique de ce système.
- Donner le nombre de surfaces de friction des disques permettant de transmettre la puissance. On exclut le contact du piston 3.

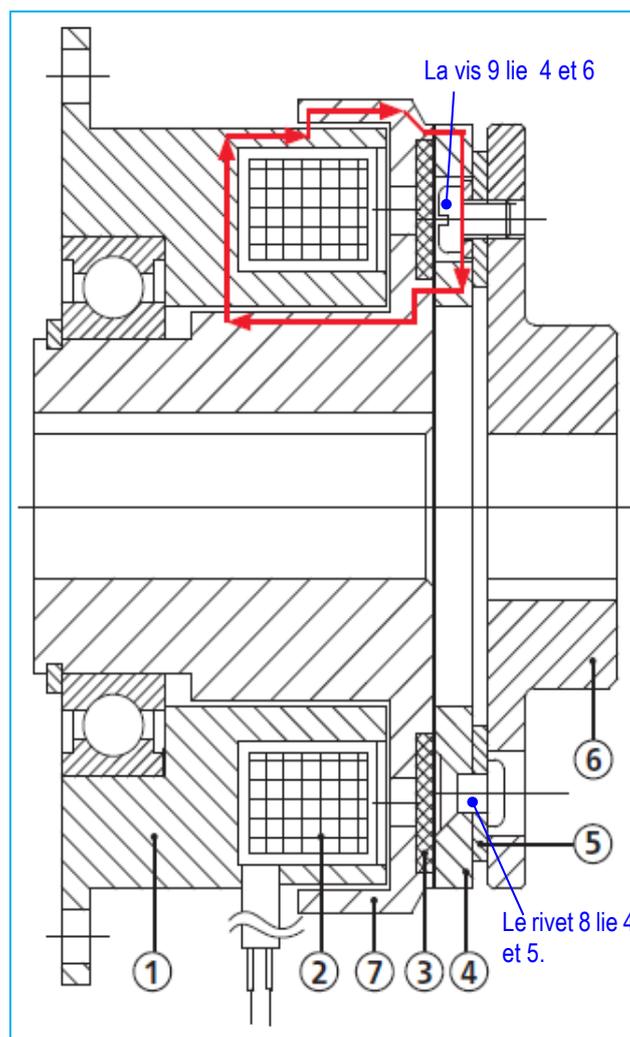
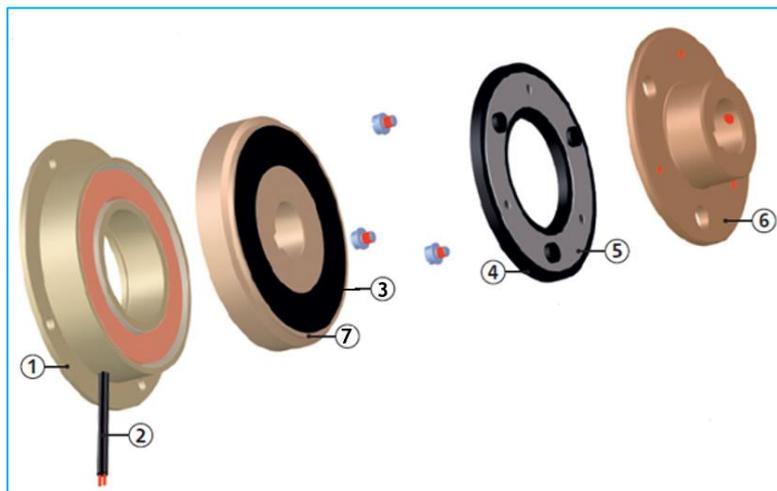


Exercice 4 : Embrayage électromagnétique

Il s'agit d'un système d'embrayage à commande électromagnétique, qu'on peut trouver dans le commerce.

1. Compléter le texte de description du fonctionnement de la figure suivante, en s'aidant de la description extraite de la documentation originale.
2. Compléter le schéma cinématique d'un tel système.

1	Stator
2	Bobine
3	Garniture de friction
4	Armature
5	Ressort ondulé
6	Plateau ou moyeu de sortie
7	Plateau ou moyeu d'entrée
8	Rivet
9	Vis



Le ressort ondulé

Il se constitue de fil plat enroulé avec des ondulations, qui lui donnent l'effet de ressort. Il est mieux que le ressort en spirale dans certaines applications, car il offre des hauteurs de travail moindres avec la même force, ainsi que des économies d'espace.



Embrayage électromagnétique

- Le corps du stator **1** contient la **2** de création du champ magnétique.
- L'embrayage est activé en appliquant à la une tension continue, par exemple une tension de 24 V.
- Cela crée un magnétique (contour fléché rouge), qui attire **4** vers le **7**, ce qui permet de transmettre le couple de l'entrée vers la sortie par le moyeu de sortie **6**, via sa garniture de **3**.
- Lorsque la bobine est désalimentée, le moyeu de sortie **6** se sépare du moyeu **7**. Le ressort de **5** assure le maintien de cette

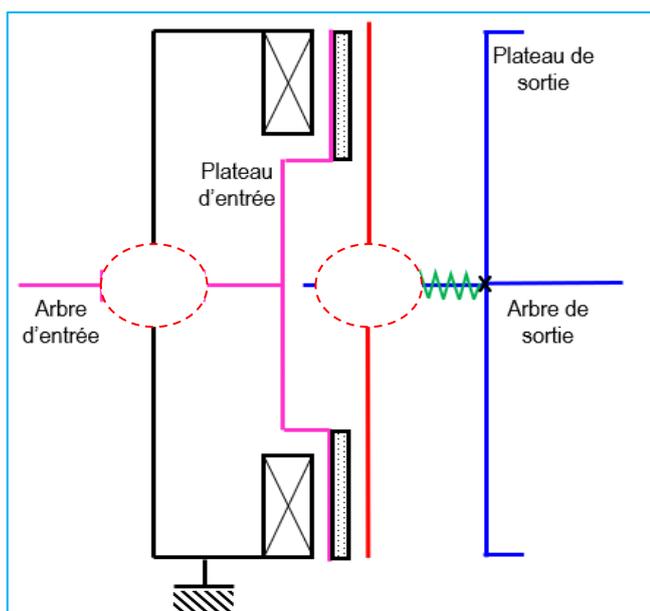
Electromagnetic clutches

The stator body **①** contains the field coil **②**, which is a copper coil cast in synthetic resin.

The clutch is activated by applying a direct current to the field coil.

This creates a magnetic field (red), which electromagnetically attracts the armature disc **④** towards the input drive hub **⑦** with its friction lining **③**, and so allows torque to be transmitted from the input side to the output.

The axially-located output drive hub **⑥** separates from the input side when the current is cut off. A return spring **⑤** ensures that the armature disc separates from the input hub.



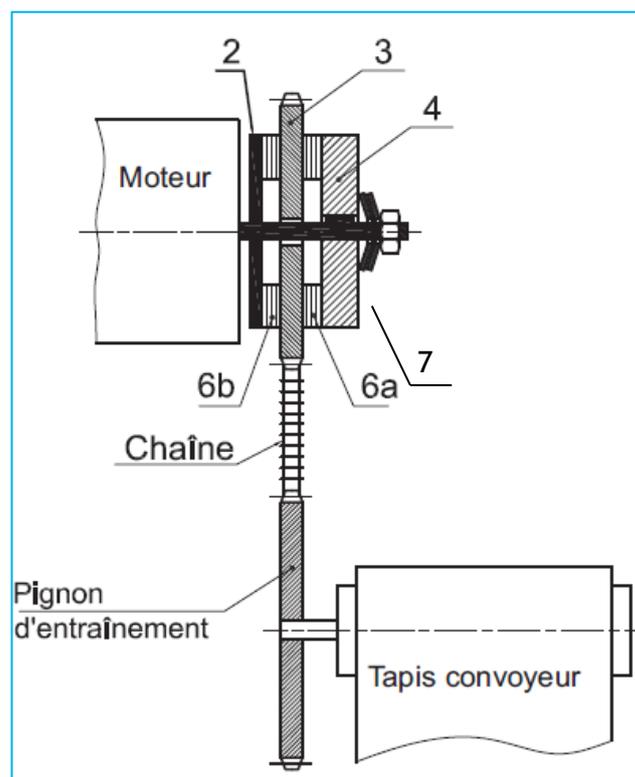
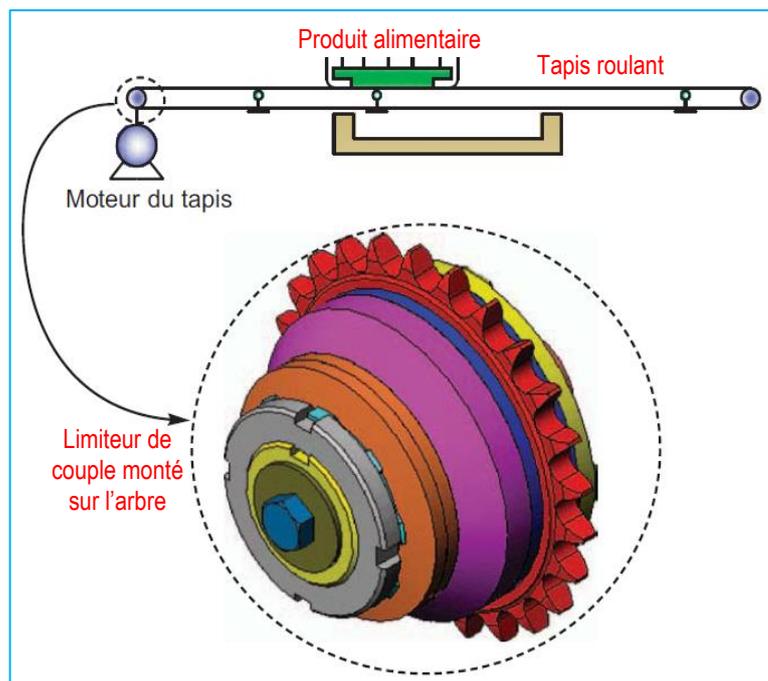
Les 2 croix aux 2 extrémités du ressort (5), en couleur verte dans le schéma cinématique, indique qu'il est encastré de part et d'autre avec le plateau de sortie (7) et l'armature mobile (4).

Exercice 5 : Limiteur de couple d'un convoyeur

Le système étudié est un limiteur de couple, monté sur l'arbre moteur d'un tapis roulant (convoyeur) d'une ligne de conditionnement de produits alimentaires, par exemple.

Le limiteur de couple, représenté sur le dessin d'ensemble (page suivante), assure la transmission du mouvement de rotation entre l'arbre moteur (1) et le pignon pour chaîne (3), avec sécurité. L'entraînement se fait par adhérence des 2 garnitures de friction (6a) et (6b) sur le pignon (3) et l'effet presseur des rondelles élastiques Belleville (7). Les garnitures (6a) et (6b) sont collées sur les pièces (2) et (4).

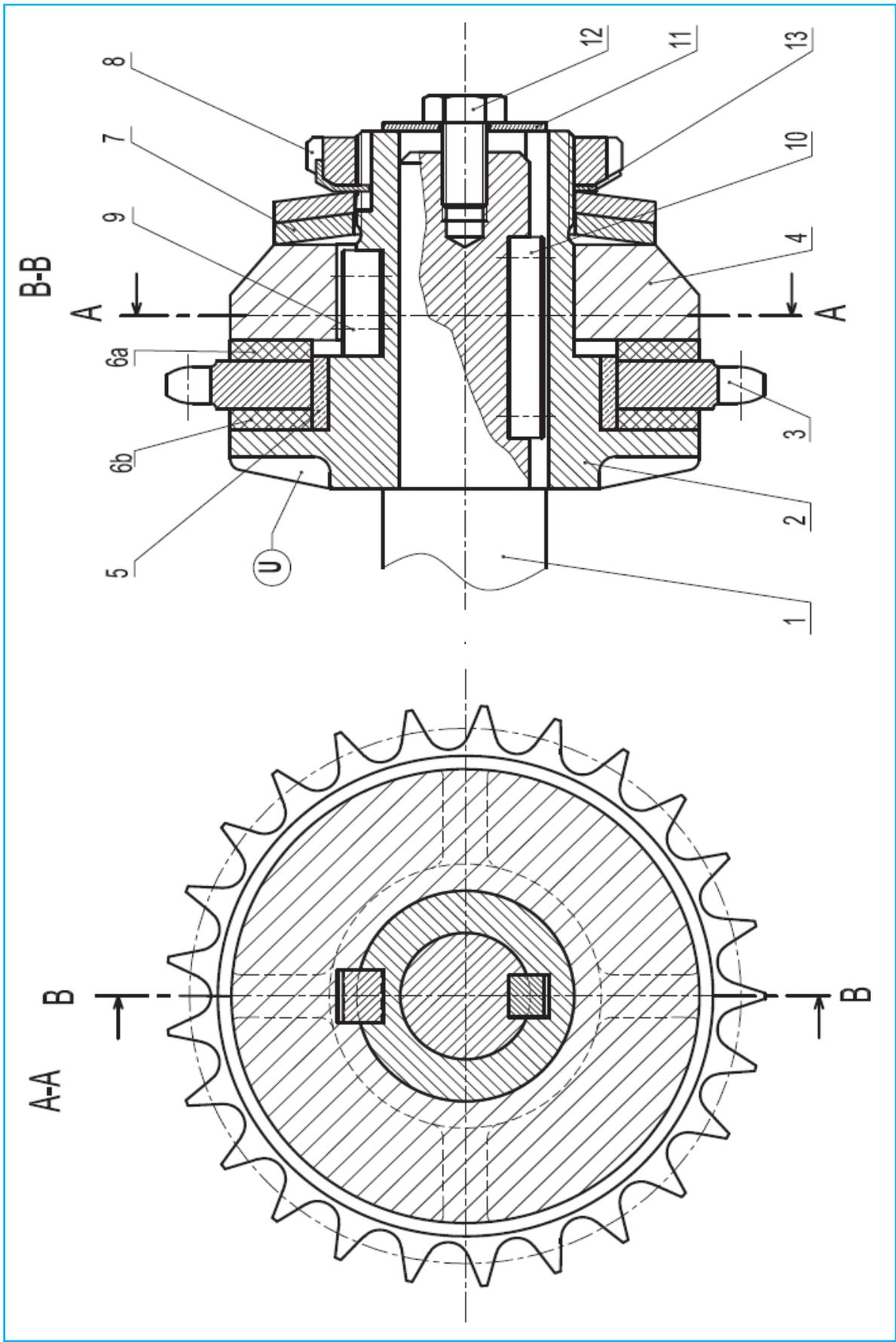
En cas de surcharge anormale ou de blocage accidentel du convoyeur, il y aura glissement entre le pignon (3) et les garnitures (6a) et (6b), alors que l'arbre moteur continue de tourner ; ceci permet d'éviter la rupture des organes les plus fragiles de la transmission.



1. Décrire la liaison mécanique entre (1) et (2) ?
2. Indiquer le repère des pièces entraînées en rotation par le moteur en cas de blocage accidentel du convoyeur :
Moteur + (1) + (5) +
3. Quelle opération doit-on effectuer si le limiteur de couple patine trop facilement ?
4. On donne :
 - La vitesse de l'arbre moteur asynchrone $N_1 = 1500$ tr/min.
 - Le nombre de dents du pignon moteur est $Z_3 = 25$ dents.
 - Le nombre de dents du pignon d'entraînement du convoyeur est $Z_C = 75$ dents.

Calculer le rapport de transmission r entre le pignon moteur et le pignon du convoyeur.

5. Calculer la vitesse de rotation du pignon N_C d'entraînement du convoyeur :



Exercice 6 : Embrayage-frein électromagnétique

L'embrayage-frein proposé par le dessin dans la page suivante est destiné à :

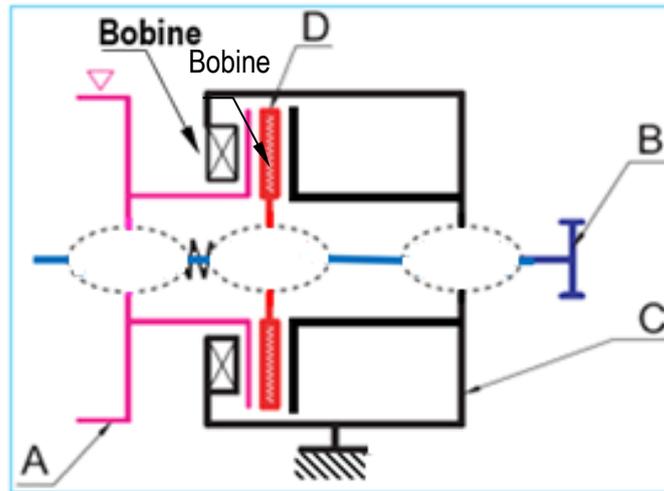
- D'une part, accoupler (**embrayage**) la poulie motrice (5) avec le pignon récepteur (17).
- D'autre part, à permettre l'arrêt en rotation immédiat (**freinage**) du pignon récepteur (17), dès que l'accouplement est désactivé.

La commande de ce système d'accouplement temporaire est électromagnétique, grâce à la bobine (6).

1. En se référant au dessin d'ensemble, compléter les classes d'équivalence suivantes :

A = { 5, }
 B = { 18, }
 C = { 6, }
 D = { 9, }

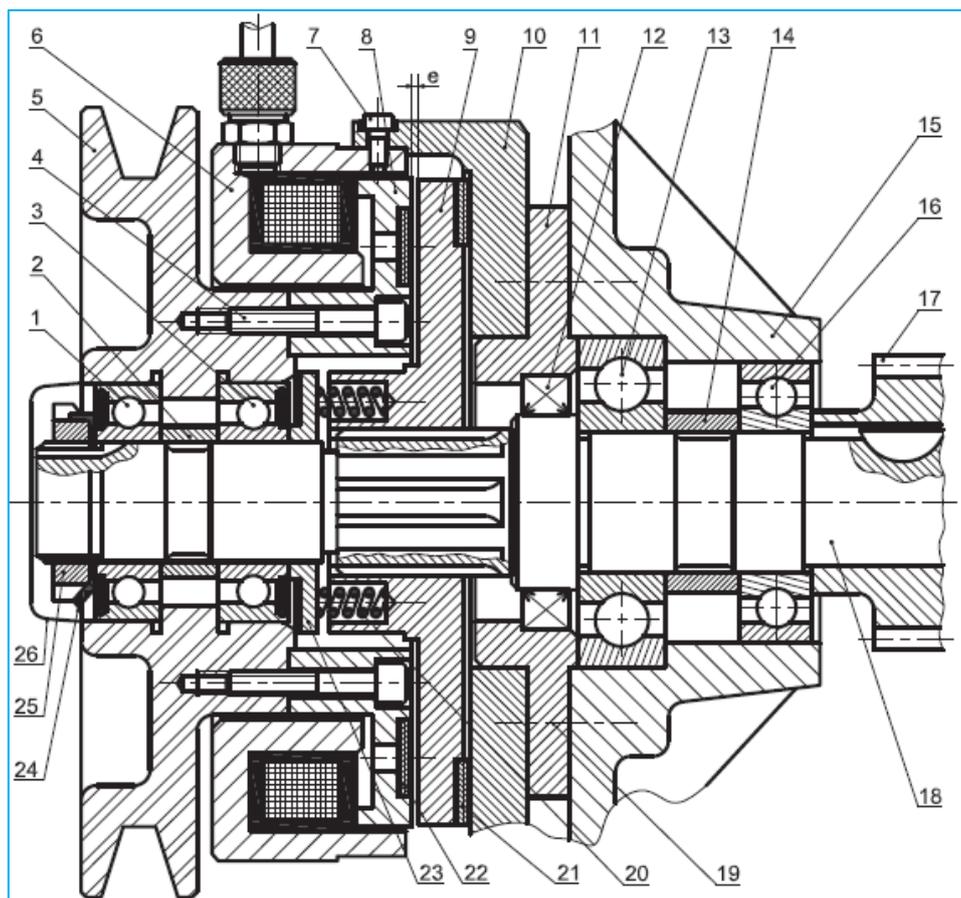
2. Compléter le schéma cinématique suivant :



3. Compléter les chaînes relatives à la position embrayée et la position débrayée :

- La position embrayée : La rotation de (5 + 8) → () → (+).
- La position débrayée : La rotation de ()

4. Quel est le rôle des ressorts (20) ?



26	1	Bouchon de protection		
25	1	Erou à encoches		
24	1	Rondelle		
23	1	Platine		
22	1	Gamiture embrayage	Férodo	
21	1	Gamiture frein	Férodo	
20	1	Ressort	60 Si Cr 7	
19	1	Vis à tête cylindrique à six pans creux ISO 4762		
18	1	Axe	C 35	
17	1	Pignon	C 60	
16	1	Roulement à une rangé de billes à contact radial		
15	1	Carter	EN-GJL-200	
14	1	Bague	S 235	
13	1	Roulement à une rangé de billes à contact radial		
12	1	Joint à lèvres, type A,		
11	1	Couvercle	EN-GJL-200	
10	1	Carter gauche	EN-GJL-200	
9	1	Plateau mobile	C 35	
8	1	Plateau fixe	C 35	
7	1	Vis à tête cylindrique à six pans creux ISO 4762		
6	1	Cage	EN-GJL-200	
5	1	Poulie		
4	1	Vis à tête cylindrique à six pans creux ISO 4762		
3	1	Roulement à une rangé de billes à contact radial		
2	1	Bague	C 35	
1	1	Roulement à une rangé de billes à contact radial		
Rep	Nb	Désignation	Matière	Observation

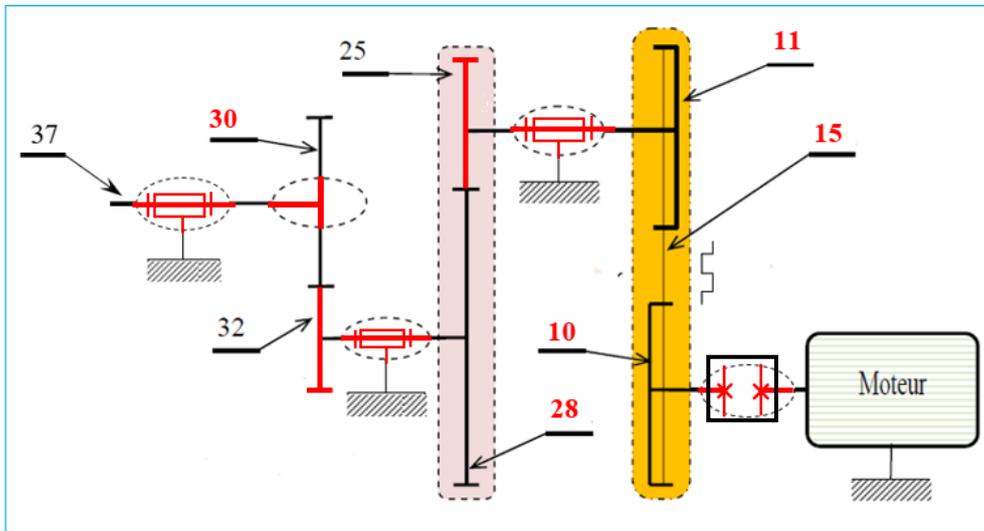
Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Accouplement

1. La section B-B nous renseigne sur la forme en cannelures du bout de l'arbre (29).
2. Caractéristiques de l'accouplement utilisé :

Pièces employées	Arbres accouplés	Type (rigide ou élastique)	Solution constructive
(2), (3) et 2 clavettes	(1) et (4)	Rigide	Manchon et 2 clavettes

3. Schéma cinématique :



4.
 - 4.1. $r_g = r_1. r_2 = (15/31).(1/5) = 3/31$.
 - 4.2. $r_g = N_{37}/N_M \rightarrow N_M = N_{37}/r_g = 180/(3/31) = 180.(31/3) = 1860 \text{ tr/mn}$.
 - 4.3. $P_{37} = C_{37}.\omega_{37} = C_{37}(2\pi.N_{37}/60) \rightarrow P_{37} = 12,6. \pi.180/30 = 237 \text{ W}$.
 - 4.4. $\eta_g = \eta_1.\eta_2 = 0,9.0,8 = 0,72$.
 - 4.5. $\eta_g = P_{37}/P_M \rightarrow P_M = P_{37}/\eta_g = 237/0,72 = 329 \text{ W}$.
 - 4.6.

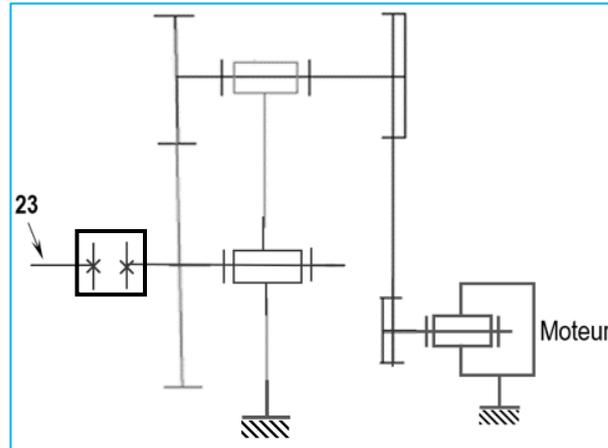
Moteur	Moteur1	Moteur2	Moteur3	✓
Nm [tr/min]	1450	1800	1800	
Pm [w]	300	300	600	

Exercice 2 : Accouplement

1.

Pièces employées	Arbres accouplés	Type (rigide ou élastique)	Solution constructive
(20) et (21)	(23) et (24)	Rigide	Plateaux et boulons ajustés

2.



Exercice 3 : Embrayage multidisque

1. Rôle des pièces :

- (5) : C'est une clavette de liaison en rotation.
- (6) : C'est un joint torique pour étanchéité dynamique.
- (10) : C'est un coussinet pour guidage en rotation.

2. Ajustements :

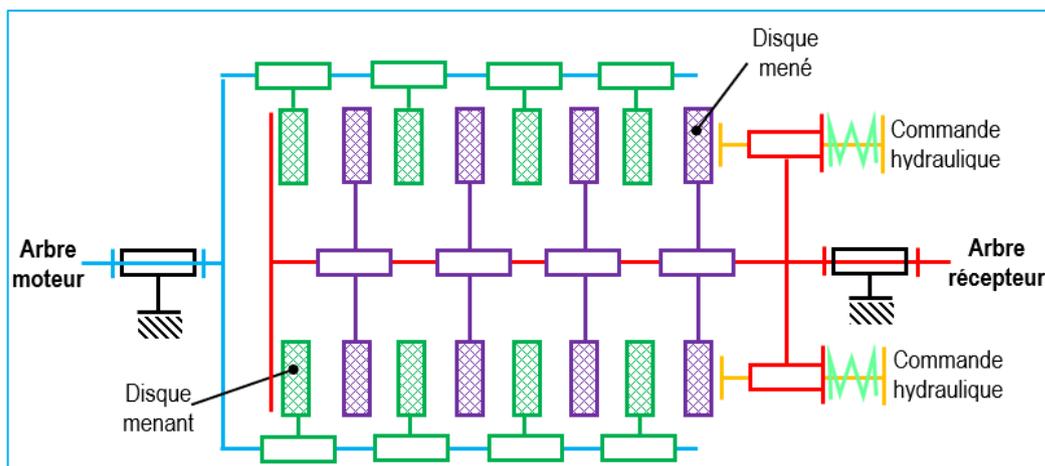
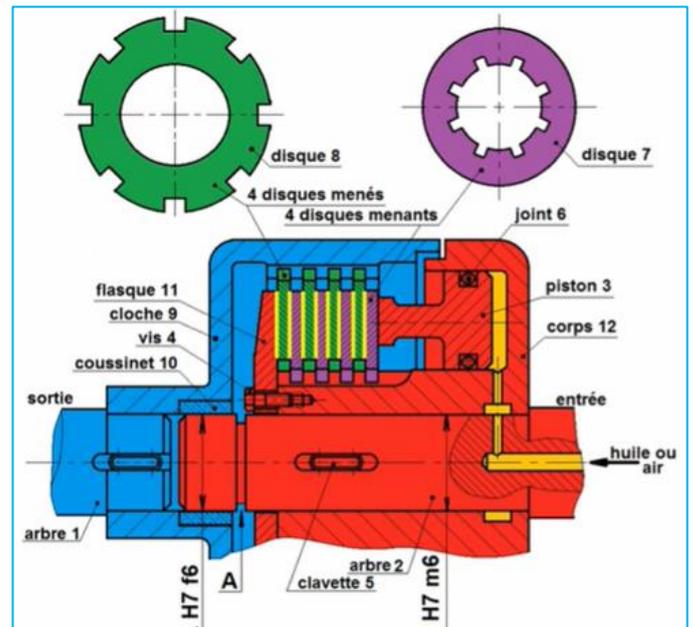
- H7f6 : Ajustement libre ou glissant.
- H7m6 : Ajustement serré.

3. La gorge « A » est une indication au fabricant de l'arbre de la différence d'usinage aux 2 parties de l'arbre, une partie avec un ajustement (H7f6) et l'autre partie avec un ajustement (H7m6).

4. Coloriage du dessin :

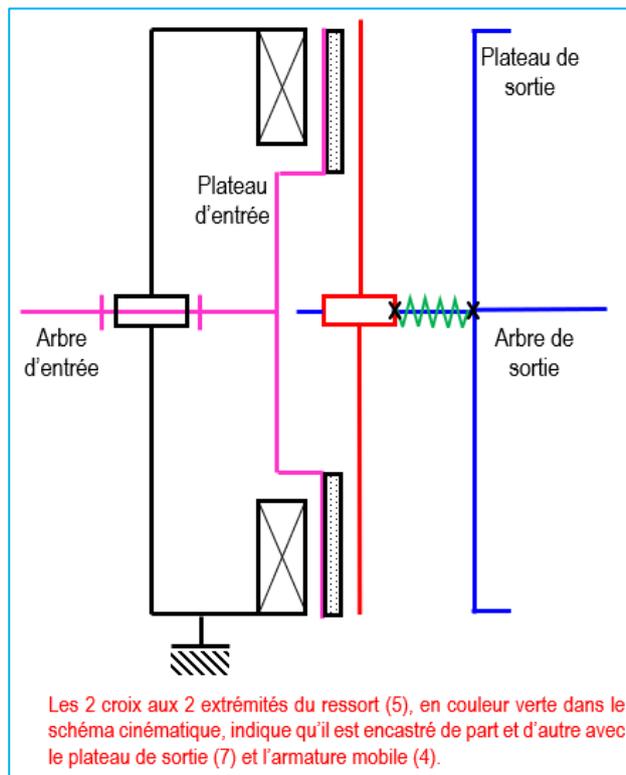
5. Schéma cinématique :

6. 8 surfaces.



Exercice 4 : Embrayage électromagnétique

- Le corps du stator **1** contient la **bobine 2** de création du champ magnétique.
- L'embrayage est activé en appliquant à la **bobine** une tension continue, par exemple une tension de 24 V.
- Cela crée un **champ** magnétique (contour fléché rouge), qui attire, l'**armature 4** vers le **moyeu d'entrée 7**, ce qui permet de transmettre le couple de l'entrée vers la sortie par le moyeu de sortie **6**, via sa garniture de **friction 3**.
- Lorsque la bobine est désalimentée, le moyeu de sortie **6** se sépare du moyeu **d'entrée 7**. Le ressort de **rappel 5** assure le maintien de cette **disjonction**.



Exercice 5 : Limiteur de couple d'un convoyeur

1. C'est une liaison Encastrement :
 - Arrêt en rotation (2)/(1) : Clavette (10).
 - Arrêt en translation (2)/(1) : Epaulement (1) + vis (12) et Rondelle (11).
2. Repère des pièces entraînées en rotation par le moteur en cas de blocage accidentel du convoyeur :
Moteur + (1) + (2) + (4) + (5) + (6) +(7) + (8) + (9) + (10) + (11) + (12) + (13).
3. Quelle opération doit-on effectuer si le limiteur de couple patine trop facilement ?
Comprimer davantage les 2 rondelles élastiques (7), en serrant l'écrou à encoches (8).
4. Rapport de réduction :
 $r = N_C/N_3 = Z_3/Z_C = 25/75$
 $r = 1/3$.
5. Vitesse de rotation du pignon d'entraînement du convoyeur :
 $N_C = N_3 . r = 1500.(1/3)$
 $N_C = 500 \text{ tr/min}$

Exercice 6 : Embrayage-frein électromagnétique

1. Les classes d'équivalence :

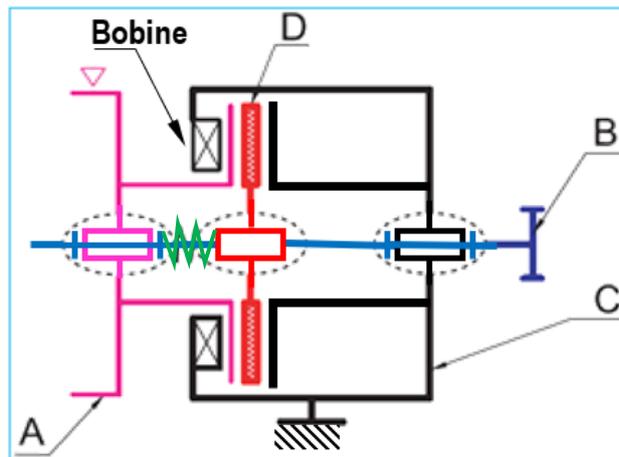
$$A = \{5, 4, 8, 22\}$$

$$B = \{18, 17, 14, 23, 2, 24, 25\}$$

$$C = \{6, 7, 10, 11, 15, 19, 26\}$$

$$D = \{9, 21\}$$

2. Schéma cinématique :

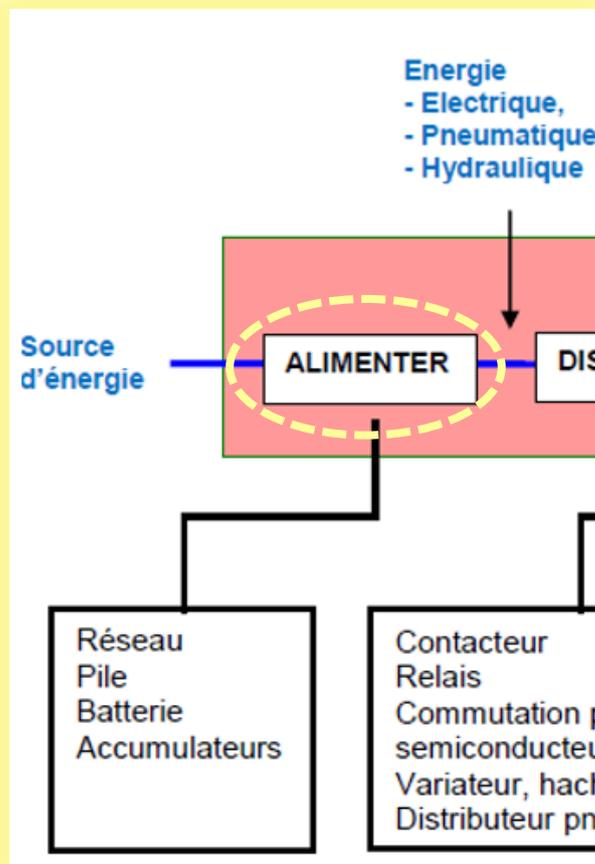


3. Chaines cinématiques pour la position embrayée et la position débrayée :

- La position embrayée : La rotation de $(5 + 8) \rightarrow (9) \rightarrow (18 + 17)$.
- La position débrayée : La rotation de $(5 + 8)$

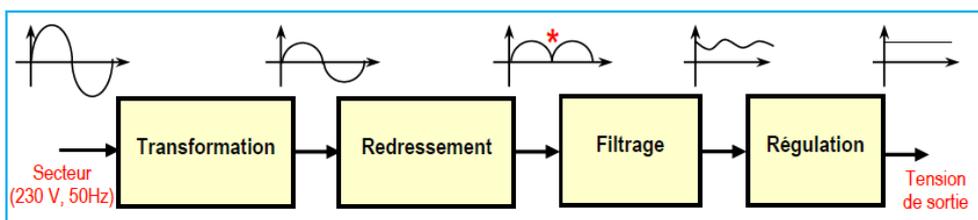
4. Rôle des ressorts (20) ?

Fournir l'effort nécessaire pour le freinage.



Fonction Alimenter

Alimentation électrique





Introduction

- L'alimentation en énergie électrique est largement adoptée aussi bien en milieu industriel qu'en milieu domestique. Cette source d'énergie peut se présenter sous forme d'une :
 - Courant continue (DC de Direct Current)**, qui sert entre autres à alimenter les systèmes électroniques de traitement des informations, ainsi que des actionneurs tel qu'un moteur à courant continu.
 - Courant alternatif (AC de Alternating Current)** qui sert principalement à alimenter les actionneurs électriques tel qu'un moteur triphasé.
- L'énergie électrique provient généralement d'une **transformation d'énergie** mécanique, magnétique, chimique ou lumineuse.



Grandeurs électriques

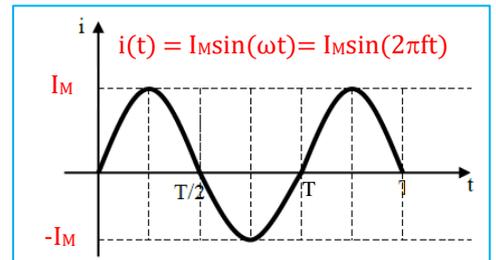
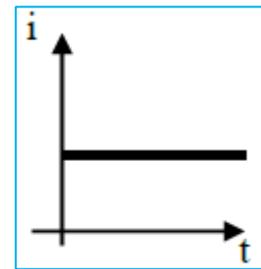
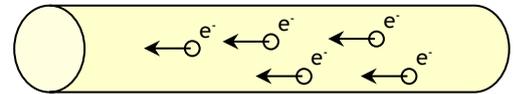
Notion de courant électrique

- Le **débit** de charges électriques (électrons libres), dans un circuit électrique fermé engendre ce qu'on appelle un **courant électrique**.

$$I = \frac{dq}{dt}$$

L'unité du courant électrique est l'**Ampère** (A).

- Un **courant continu** est un courant unidirectionnel et de valeur constante.
- Un **courant alternatif** change de sens périodiquement et sa valeur **moyenne est nulle** :
 - Les réseaux de distribution de l'énergie électrique alimentés par les alternateurs ainsi que les groupes électrogènes fournissent un courant **alternatif sinusoïdal** (figure ci-contre).
 - La fréquence **f** est le nombre de fois que le courant reprend le même sens pendant une seconde ; elle est exprimée en **Hz**. La fréquence standard des réseaux de distribution nord-américains est de 60 Hz, avec une tension de 110V, alors que celle des réseaux de distribution européens est de **50 Hz** avec une tension de 230V, ce qui est le cas aussi du **Maroc**.



Valeur instantanée

- C'est la valeur à un instant t donné. Pour un courant alternatif sinusoïdal donné, la valeur instantanée est donnée par la relation suivante :

$$i(t) = I_M \sin \omega t$$

- $\omega = 2\pi f$ (rad/s).
 - I_M est la valeur maximale du signal.
- Valeur moyenne** : C'est l'intensité moyenne d'un signal de courant périodique, qui est égale à l'intensité d'un courant continu qui transporterait la **même quantité d'électricité**, dans le **même circuit** et dans le **même temps**.
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 :

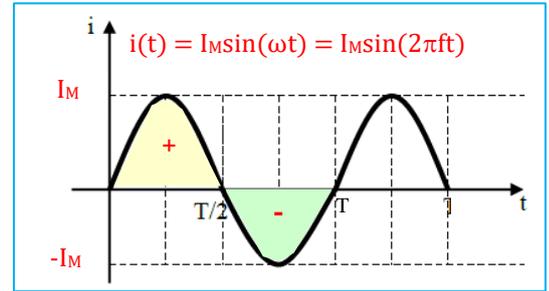
$$\bar{I} = \langle i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

Autrement dit, la valeur moyenne d'un courant périodique est la valeur arithmétique moyenne de toutes les valeurs prises par le courant pendant une période T. Cela revient à un calcul de surface comme il est illustré par les exemples suivants :

- **Exemple 1 :** Cas d'un signal sinusoïdal pur : Comme le montre 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.

Donc, pour un courant sinusoïdal pur, la valeur moyenne est **nulle**, ce qui est le cas pour tout signal alternatif. En effet :

$$\begin{aligned} \bar{I} = \langle i \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_M \sin(\omega t) dt \\ &= \frac{I_M}{T} \left[\frac{1}{\omega} \cdot \cos(\omega t) \right]_0^T = \frac{I_M}{\omega \cdot T} [\cos(T) - \cos(0)] \\ &= \frac{I_M}{\omega \cdot T} [1 - 1] = 0 \end{aligned}$$



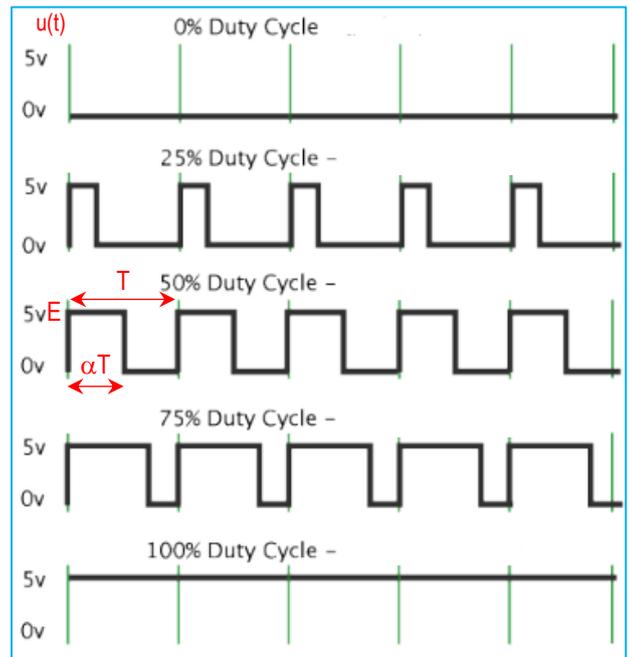
- **Exemple 2 :** Cas d'un signal rectangulaire : C'est un cas très fréquent dans la commande des moteurs à courant continu. C'est un signal dont :

- La période T est fixe.
- La durée de la présence du signal sous forme constante (E) est αT , avec α compris entre 0 et 1. α est appelé **rapport cyclique** du signal. Alors :

$$\begin{aligned} \bar{U} = \langle u \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \int_{\alpha T}^T 0 dt \\ &= \frac{1}{T} [E \cdot t]_0^{\alpha T} = \frac{1}{T} [E \cdot \alpha T - 0] \end{aligned}$$

$$\bar{U} = \alpha E$$

Donc, la valeur moyenne d'un tel signal est **proportionnelle au rapport cyclique α** , comme l'illustre la figure ci-contre pour différentes valeurs de α .



Valeur efficace

- C'est la valeur **U_{eff}** que devrait avoir une tension **U** ou un courant continu constant **I** pour produire, dans la même charge résistive et pendant le même temps T, la même énergie calorifique W par effet Joule que la tension **u(t)** ou le courant alternatif **i(t)**. Alors, on a pour :

- Un courant continu **DC** :

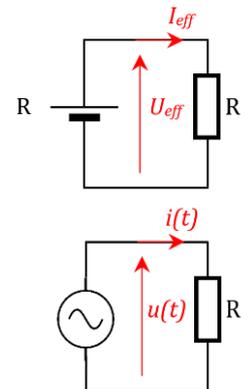
$$W_{DC} = R I_{eff}^2 T = R \left(\frac{U_{eff}}{R} \right)^2 T = \frac{U_{eff}^2}{R} T$$

- Un courant alternatif sinusoïdal **AC** :

$$W_{AC} = \int_0^T \frac{u(t)^2}{R} dt$$

- On cherche :

$$W_{DC} = W_{AC}$$





$$\frac{U_{eff}^2}{R} T = \int_0^T \frac{u(t)^2}{R} dt$$

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

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt}$$

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

$$U_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_M^2 \sin^2(\omega t) dt$$

$$U_{eff}^2 = \frac{U_M^2}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} dt = \frac{U_M^2}{2T} \int_0^T (1 - \cos(2\omega t)) dt$$

$$U_{eff}^2 = \frac{U_M^2}{2T} \left[\int_0^T 1 dt - \int_0^T \cos(2\omega t) dt \right] = \frac{U_M^2}{2T} \left[\int_0^T 1 dt \right]$$

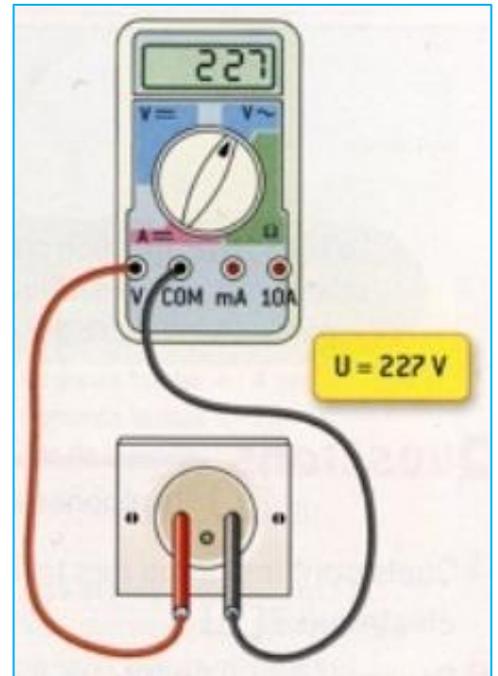
$$U_{eff}^2 = \frac{U_M^2}{2T} [t]_0^T = \frac{U_M^2}{2T} T = \frac{U_M^2}{2}$$

Soit :

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

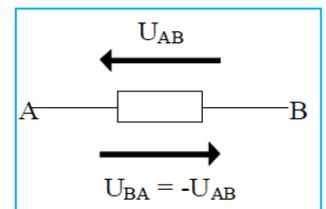
- **Notes :**

- Les valeurs des tensions et des courants alternatifs, notamment sinusoïdaux, sont données généralement en **valeurs efficaces**.
- Un **appareil de mesure** à courant alternatif, indique la **valeur efficace**.



Notion de tension électrique

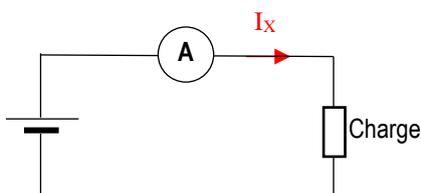
- Un courant électrique est un mouvement d'électrons produit par la force due à un champ électrique lui-même créé par une **différence de potentiels électriques ou tension électrique U**, qui s'exprime en **Volt (V)**.
- On peut mieux assimiler la notion de tension électrique par analogie avec la différence d'altitude entre 2 points A et B. Si on imagine un cours d'eau, et que les altitudes A et B sont égales, il n'y aura pas de courant d'eau. De la même façon, il n'y aura pas de courant électrique sans tension, c'est-à-dire sans différence de potentiels électriques d'un circuit électrique.



Mesure des grandeurs électriques

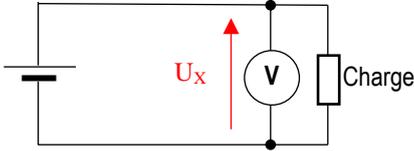
Mesure de courant

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

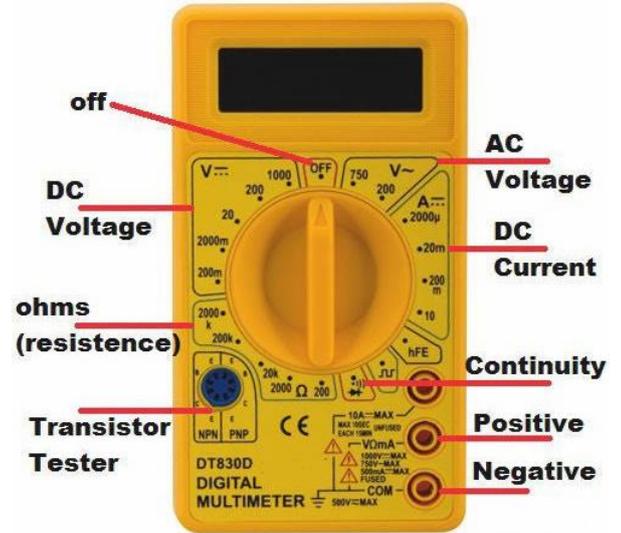


Mesure de tension

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

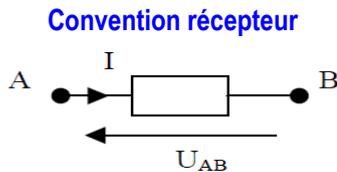


Un **Multimètre** est un instrument de mesure permettant la mesure de plusieurs grandeurs électriques : courant, tension, résistance, etc.

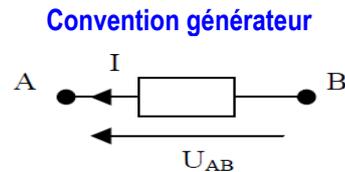


Dipôle électrique

- On appelle dipôle électrique tout système composé seulement de 2 bornes. Le comportement d'un dipôle 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 :



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



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

Notion de résistance

Principe et symbole

- Un fil conducteur présente une différence de potentiel entre ses bornes lorsqu'il est traversé par un courant électrique. Ceci est dû à sa résistance interne dont la valeur est donnée par la formule :

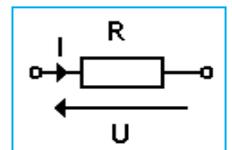
$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

- l : longueur du fil.
- S : sa section.
- ρ : la résistivité (caractéristique de la nature du conducteur).

Loi d'Ohm

- Cette loi exprime que certains matériaux ont une réponse linéaire en courant à une différence de potentiel imposée. Si on considère une résistance, noté R avec à ses bornes une tension U, elle sera traversée par un courant I, tel que, quel que soit le temps t, U et I vérifient toujours la relation de proportionnalité :

$$U = R \cdot I$$



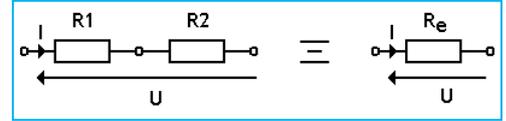
Association des résistances

- Suivant que des résistances sont associées en série ou en parallèle, il résulte de leur association une résistance équivalente R_{eq} dont la valeur dépend des valeurs des différentes résistances associées.

Association série

- La résistance équivalente de 2 résistances en série est la somme de ces 2 résistances.

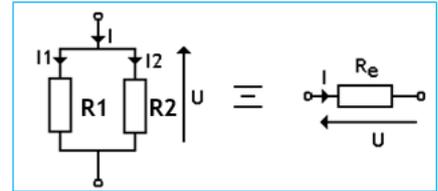
$$R_{eq} = R_1 + R_2$$



Association en parallèle

- La résistance équivalente de 2 résistances en parallèle est telle que :

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



Code de couleurs et séries des résistances

- On ne peut pas fabriquer les résistances avec toutes les valeurs possibles. Les valeurs des résistances sont donc normalisées sous forme de séries, qui couvrent largement les besoins des différents utilisateurs. Ces valeurs sont indiquées sur les résistances sous forme d'anneaux en couleur suivant le code de la figure ci-contre. La tolérance est un pourcentage qui indique la précision de la résistance.

Chiffre1	Chiffre2	Multiplicateur	Tolérance
noir	0	argent	x 0,01
brun	1	or	x 0,1
rouge	2	noir	x 1
orange	3	brun	x 10
jaune	4	rouge	x 100
vert	5	orange	x 1000
bleu	6	jaune	x 10K
violet	7	vert	x 100K
gris	8	bleu	x 1M
blanc	9	violet	x 10M
		argent	+/- 5%
		or	+/- 10%

- Connaissant la valeur de chaque chiffre, on peut déterminer la valeur, en Ohms (Ω), de la résistance comme suit :

$$R = [(1^{er} \text{ chiffre} \times 1) + (2e \text{ chiffre} \times 10)] \times 10^{\text{Multiplicateur}} \pm \text{Tolérance}$$

- Exemple :** Calcul de la valeur d'une résistance dont les 3 couleurs significatives sont le **rouge**.

$$R = [(2 \times 1) + (2 \times 10)] \times 10^2 = 22 \times 100 = 2,2 \text{ K}\Omega$$

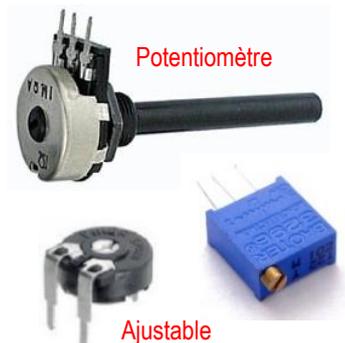
- D'un point de vue commercial, on ne peut fabriquer toutes les valeurs de résistances, d'où une **normalisation**. Les valeurs normalisées des résistances sont donc classées par des séries de valeurs notées (E6, E12, E24 ou E48), qui indiquent le nombre de valeurs dans une série. Par exemple, les valeurs de la série **E12** sont :

10 ; 12 ; 15 ; 18 ; 22 ; 27 ; 33 ; 39 ; 47 ; 56 ; 68 ; 82

- Toutes les résistances de la série E12 sont des multiples ou des sous multiples de ces 12 valeurs. Par exemple, on trouve 1,2 Ω , 12 Ω , 120 Ω , 1,2 K Ω , 12 K Ω , 120 K Ω , 1,2 M Ω et ainsi de suite.

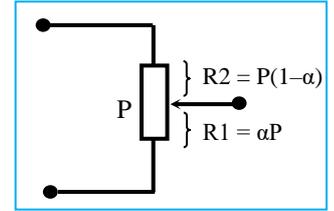
Résistance variable

- On a souvent besoin, dans les montages électroniques, de régler une résistance pour avoir la valeur exacte exigée par un montage donné ; on utilise alors :
 - Soit un **potentiomètre** pour régler la résistance régulièrement comme pour le volume d'un poste Radio par exemple.
 - Soit un **ajustable** pour ajuster la valeur nécessaire une fois pour toute.





- Dans les 2 cas, le symbole est le même : P est la valeur totale de la résistance. Le **curseur α** divise la résistance totale P en 2 parties :
 - $R_1 = \alpha P$:
 - Si le curseur est en position haute, alors $\alpha = 1$ et $R_1 = P$.
 - Si le curseur est en position basse, alors $\alpha = 0$ et $R_1 = 0$.
 - $R_2 = P - R_1 = P - \alpha P = P(1 - \alpha)$.



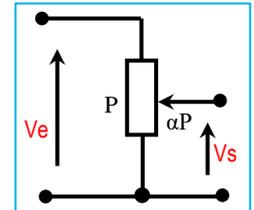
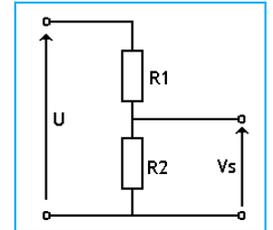
Diviseur de tension

- Pour diviser une tension, on utilise un pont diviseur de tension. Ce pont est constitué de l'association en série de 2 résistances R_1 et R_2 :

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

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

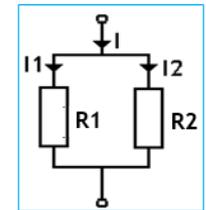
$$V_s = \frac{V_e \cdot \alpha \cdot P}{P} = \alpha \cdot V_e$$



Diviseur de courant

- On divise un courant par la mise en parallèle de 2 résistances R_1 et R_2 :

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



Energie électrique

- Par définition, l'énergie est la capacité à réaliser un **travail** ou un changement d'état.
- Elle se présente sous **diverses formes** (mécanique, cinétique, thermique, électrique, etc.) ; elle passe d'une forme à l'autre par différentes **transformations**. Son unité dans le SI est le **Joule [J]**.
- Selon le **principe de conservation de l'énergie**, l'énergie ne peut être ni créée ni détruite. Elle ne peut être que **transformée** d'une forme à une autre.
- **L'énergie électrique** peut être produite par diverses transformations (thermique/électrique, solaire/électrique, etc.), comme on le verra par la suite dans la section suivante.
- Elle a pour expression :

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

Puissance électrique

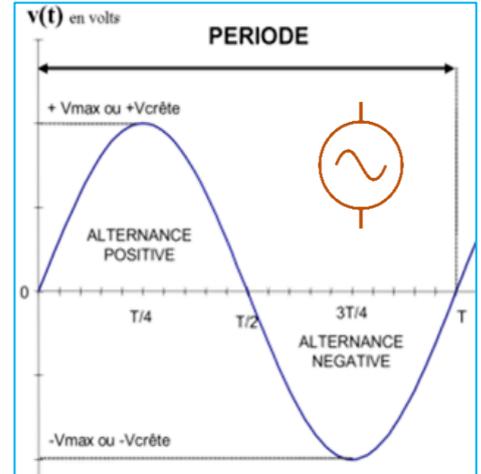
- Par définition, la puissance correspond à la vitesse avec laquelle le travail s'accomplit. L'unité internationale est le **Watt [W]** qui vaut un **Joule [J]** par seconde.
- La puissance est donc l'énergie consommée ou débitée par une charge pendant 1 seconde, ce qui revient au produit du courant **I** qui traverse la charge et de la tension à ses bornes **U** :

$$P = \frac{W}{t} = U \cdot I$$



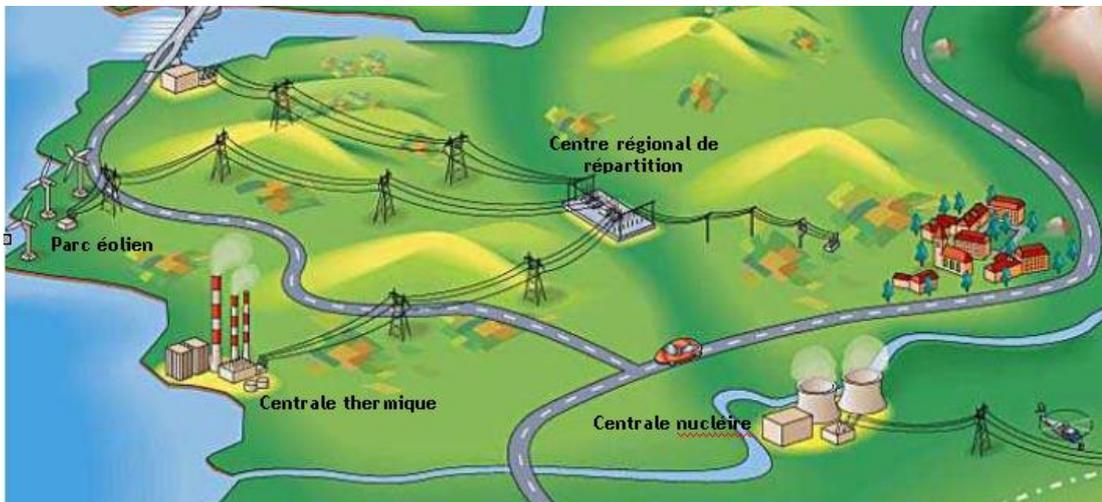
Production de l'énergie électrique en courant alternatif

- Un **courant alternatif** est un courant électrique **périodique** qui change de sens 2 fois par période et qui transporte des quantités d'électricité alternativement égales dans un sens et dans l'autre¹. Il a donc une **valeur moyenne nulle**.
- Un courant alternatif est caractérisé par sa **fréquence**, mesurée en **Hertz (Hz)**. La fréquence correspond au nombre de périodes du signal en une seconde.
- La forme la plus utilisée de courant alternatif est le **courant sinusoïdal**, essentiellement pour la distribution commerciale de l'énergie électrique. La fréquence utilisée est le plus souvent de **50 Hz** sauf, par exemple, en Amérique du Nord où elle est de **60 Hz**.



Topologie du réseau électrique

- Le système électrique comprend des sites de production (centrales nucléaire, thermique, hydraulique, éolienne, photovoltaïque, etc.) et des lieux de consommation (communes, entreprises, etc.), reliés par le **réseau électrique**. L'énergie est acheminée vers les lieux de consommation, avec des étapes d'élévation et de baisse du niveau de tension dans des postes de transformation. En effet, la tension à la sortie des grandes centrales est portée à 400 kV pour limiter les pertes d'énergie sous forme de chaleur dans les câbles : **pertes par « effet Joule »**.
- Ensuite, la tension est progressivement réduite au plus près de la consommation, pour arriver aux différents niveaux de tension auxquels sont raccordés les consommateurs (400 000 volts, 225 000 V, 90 000 V, 63 000 V, 20 000 V, 400 V ou 230 V suivant leurs besoins en puissance).
- L'**ONE** (Office National d'Electricité) assure cette fourniture par l'exploitation directe d'unités de production, dans les meilleures conditions de sécurité, de rendement, de disponibilité et de coût.



Types de centrale

Définitions générales

Turbine

- C'est un dispositif rotatif qui convertit l'énergie d'un courant d'eau ou de vapeur, en énergie mécanique de rotation au moyen d'un arbre. La figure ci-contre montre une des turbines les plus connues, la turbine **Pelton**.

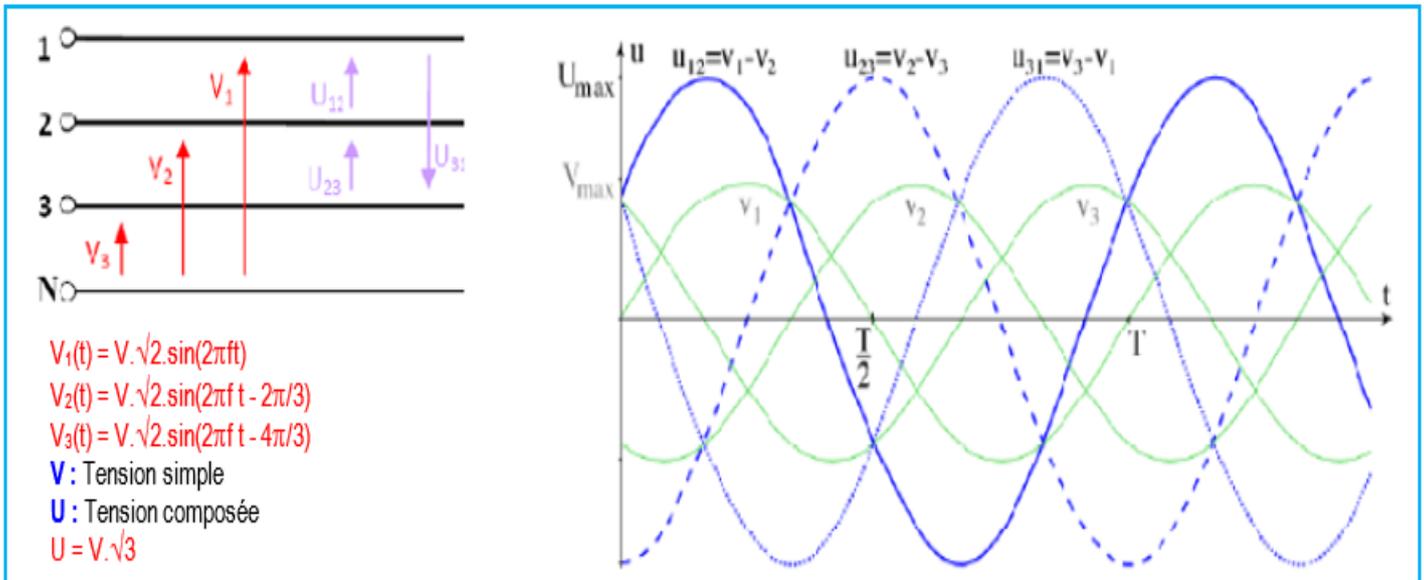


Alternateur

- C'est l'organe qui transforme l'énergie de la rotation d'un arbre en une énergie électrique. Il fournit une ligne tri-filaire formant un **système triphasé** :
 - Les 3 tensions produites sont des sinusoides déphasées de $2\pi/3$.
 - La fréquence des tensions est de **50 Hz** ; cette fréquence (f) est fixée par la vitesse de rotation de la turbine (n) et le nombre des pôles magnétiques (p) de l'alternateur selon la relation :

$$f = p \cdot n$$

- f en Hz
- n en tr/min

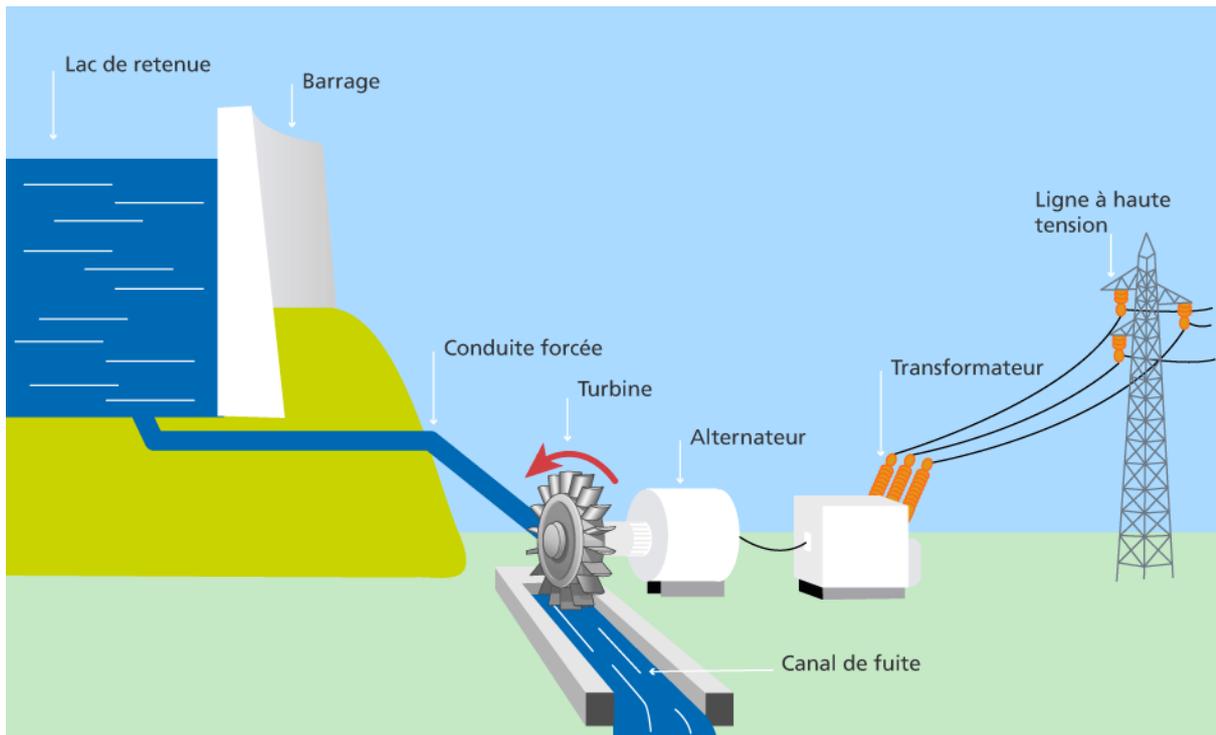


- Par rapport au système monophasé, le système triphasé présente les **principaux avantages** suivants :
 - Le système triphasé nécessite **moins de matériau conducteur** de celui requis par le système monophasé pour transmettre la même quantité de puissance sur une distance donnée à une tension donnée.
 - Les moteurs électriques les plus efficaces en Industrie, sont les **moteurs triphasés**.

Energie d'origine hydraulique

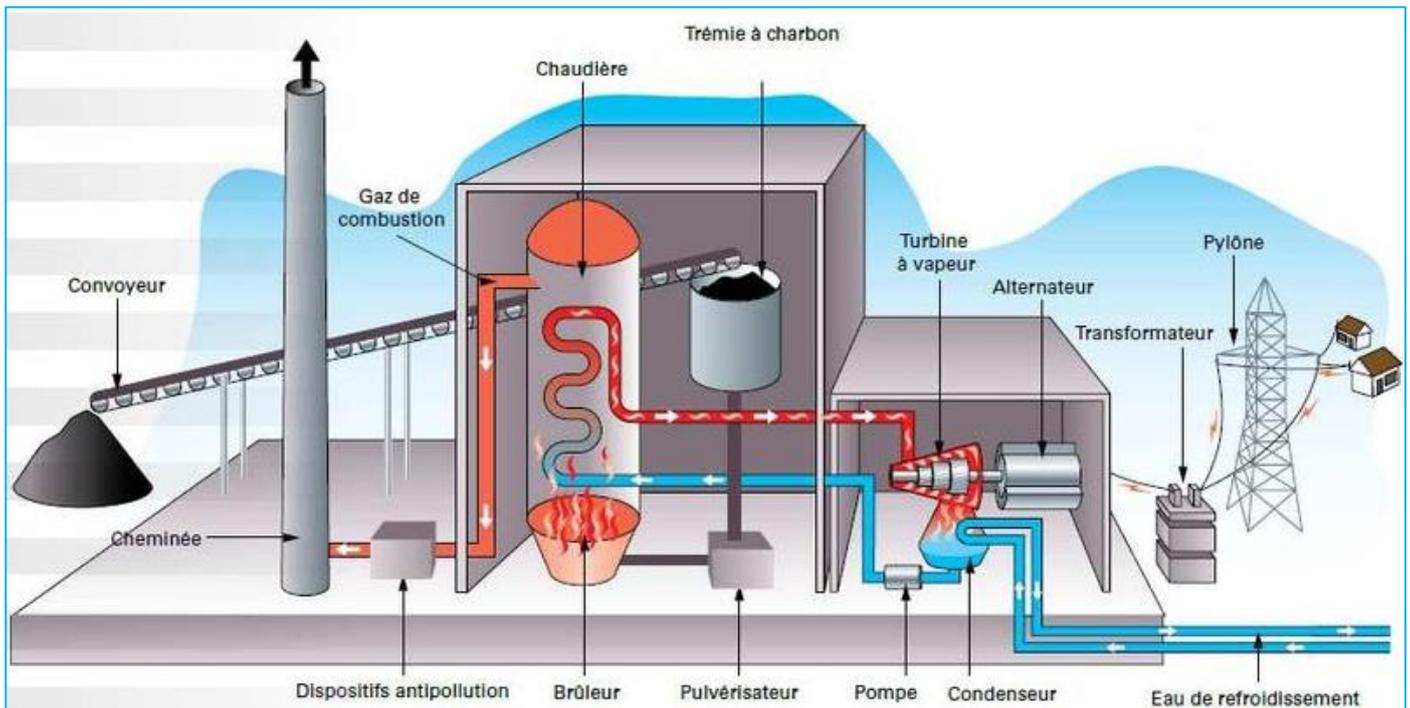
- Dans ce type de centrale, la puissance de la chute d'eau due à une **énergie potentielle**, est exploitée pour entraîner des turbines couplées à des alternateurs.





Energie d'origine thermique

- Dans ce type de centrale, la chaleur produite par la combustion d'un combustible comme le **charbon**, produit l'évaporation de l'eau. Cette vapeur sous pression permet d'entraîner des turbines à vapeur, couplées à des alternateurs.



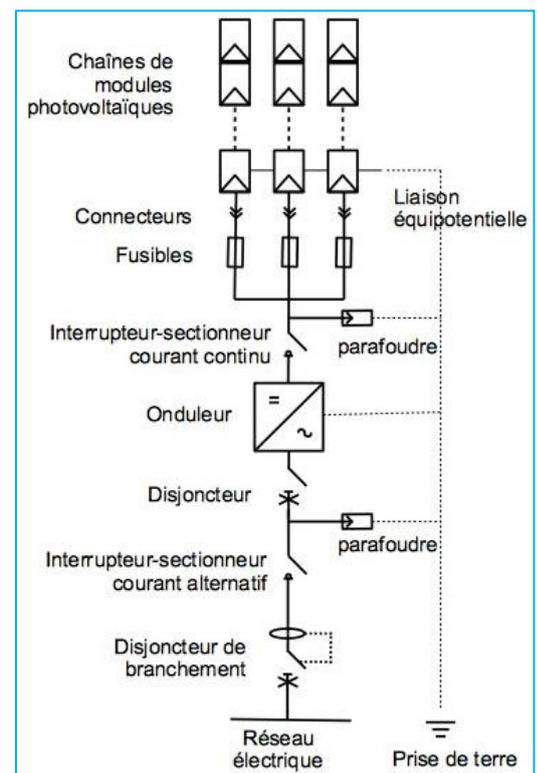
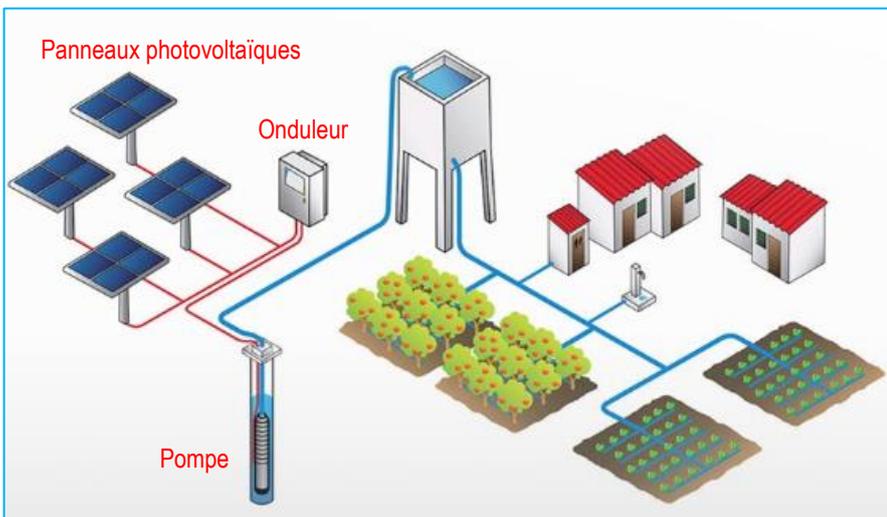
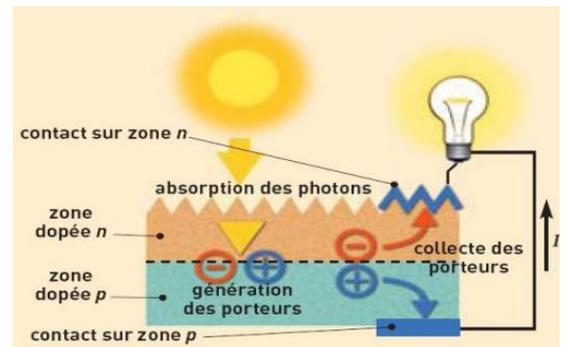
Les sources d'énergie renouvelables et autonomes

- Les **sources autonomes** de production d'énergie sont celles qui permettent d'alimenter un appareil électrique en l'**absence du réseau** de distribution d'énergie électrique. Les **énergies renouvelables** désignent un ensemble de moyens de production de l'énergie à partir de ressources **théoriquement illimitées**, disponibles sans limite de temps ; elles ont pour origine l'eau (énergie des vagues, des marées, géothermie), le vent (énergie éolienne), le soleil (énergie solaire), etc. Par exemple, des éoliennes et des capteurs solaires embarqués sur des bateaux constituent des sources autonomes d'énergies renouvelables.



Energie solaire photovoltaïque

- En principe, on distingue 2 types de centrale exploitant l'énergie du soleil, les centrales **thermodynamiques** et les centrales **photovoltaïques**. Ci-dessous, on donne le principe de ces dernières qui sont de loin les plus populaires.
- Dans ce type de centrale photovoltaïque, on exploite le principe des **cellules photovoltaïques**, qui sont des **composants électroniques** capables de débiter un courant électrique continu dans un circuit extérieur, lorsqu'ils sont éclairés par le rayonnement solaire.
- Une cellule photovoltaïque comporte 2 **semi-conducteurs**, un **dopé n** et l'autre **dopé p**, réalisant de ce fait une **jonction PN**.
- Lorsque la jonction est éclairée, les photons communiquent leur énergie aux atomes, les électrons franchissent la jonction ou bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via les connexions extérieures, donnant ainsi naissance à une différence de potentiel continue.
- Les cellules photovoltaïques sont organisées en **panneaux photovoltaïques (PV)**, appelés aussi modules photovoltaïques.
- Parmi les applications des plus intéressantes, il y a la production du courant alternatif, via un **onduleur** (convertisseur continu/alternatif) ; ainsi, ce système peut être utilisé :
 - Localement (**site isolé**) pour l'éclairage, le pompage, etc.
 - Pour la **connexion au réseau** électrique publique.

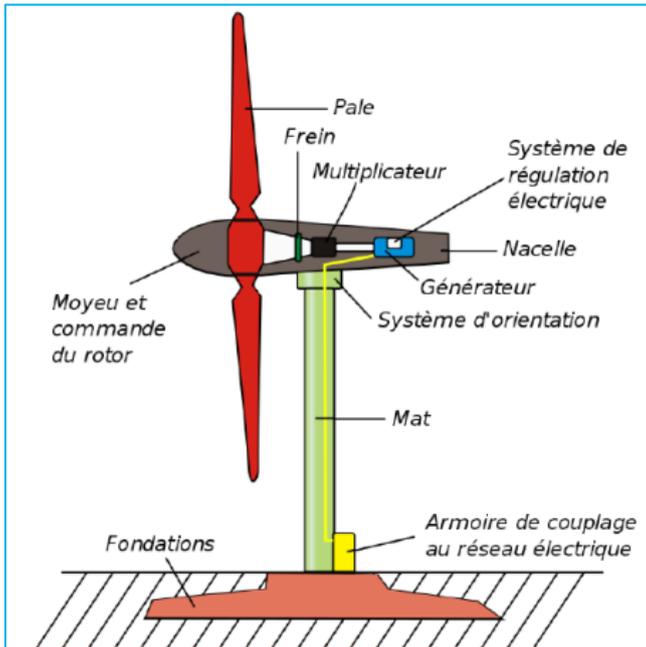


Energie éolienne

- On peut décrire une éolienne comme une sorte de **grand moulin**. Ainsi, l'**énergie cinétique** du **vent** produit la rotation des **pâles des hélices**, qui actionne un **alternateur**, par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse.
- Les ressources du vent sont considérables, mais irrégulières entre le jour et la nuit, entre l'hiver et l'été ; c'est pourquoi, cette solution reste onéreuse. On les appelle aussi des **aérogénérateurs**.



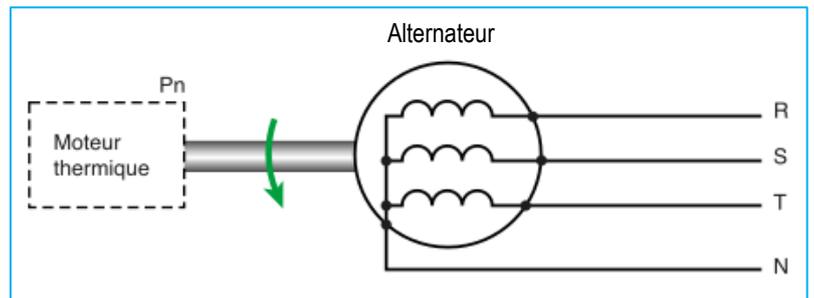
Eolienne industrielle



Eolienne domestique

Groupes électrogènes

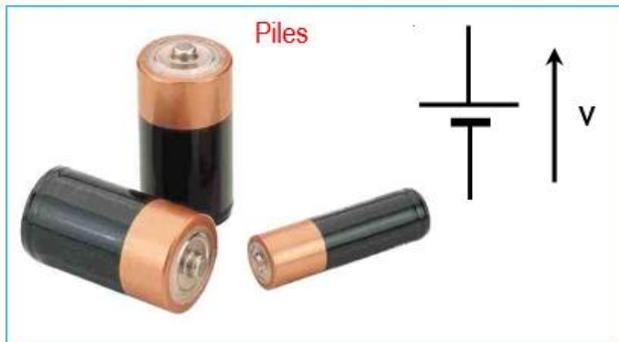
- Les groupes électrogènes sont des petits alternateurs dont l'entraînement en rotation se fait en général, par un **moteur thermique**, un moteur Diesel par exemple. La puissance est généralement limitée à quelques dizaines de kW.
- Ces groupes sont généralement utilisés comme alimentation de secours, **alimentation électrique non interrompue** dans les locaux exigeant une continuité de service tel que les hôpitaux.



Production de l'énergie électrique en courant continu

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 **A.h** (ou **Ah**) et **mA.h** (ou **mAh**). 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) :

- $1 \text{ A.h} = 1 \text{ Ah} = 3\,600 \text{ C}$
- $1 \text{ C} = 1 \text{ Ah} / 3600 = 0,278 \text{ mAh}$

- 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.
- 1 A pendant 10 h, etc.

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

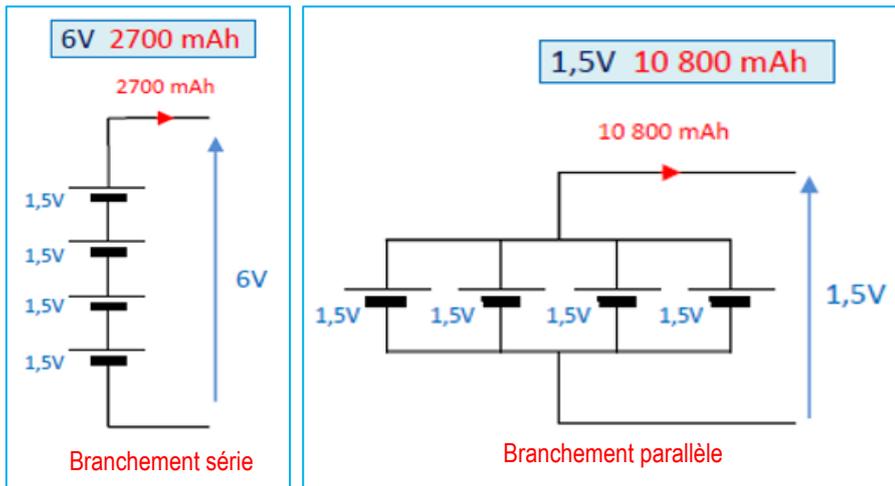
- L'énergie W stockée dans une batterie est égale à sa charge électrique Q ou sa capacité C multipliée par la tension U sous laquelle cette charge est déchargée.

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

- L'unité de l'énergie W selon le SI est le **Joule (J)**. Mais, en pratique, on utilise le **Watt·heure (W.h ou Wh)** :
 - 1 J = 1 W.s = 1 Ws
 - 1 W.h = 1 Wh = 1 W.3600 s = 3600 J
 - 1 J = 0,278 mWh

Branchement

- Une batterie d'accumulateurs, est un ensemble d'accumulateurs électriques reliés entre eux de façon à créer un générateur électrique de tension et de capacité désirée. 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**.



Pack de batteries de voiture électrique

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

Exemple d'application

- On souhaite déterminer la capacité d'une batterie d'accumulateurs de **1,2 V** chacun ; elle doit être capable de fournir une tension de **6 V** à un système qui consomme **50 mA**, dans les conditions suivantes :
 - 20 s / Utilisation.
 - 10 utilisations / Jour.
 - Autonomie souhaitée : 1 semaine

Solution :

- Capacité et nombre d'accumulateurs :**

Il faut 5 accumulateurs de **1,2 V** en série et de même capacité pour obtenir 6 V (5 x 1,2 V).

- Calcul de la capacité des accumulateurs :**

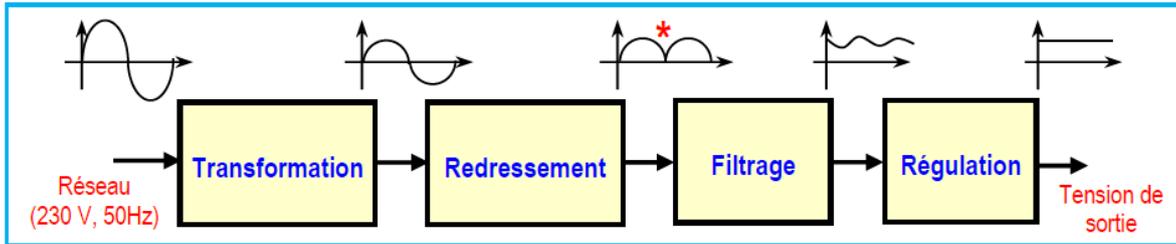
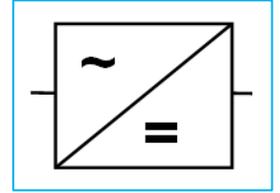
Temps d'utilisation par semaine : 20 s x 10 x 7 j = 1400 s.

Quantité d'énergie nécessaire en mAs : $C = I \times t = 1400 \text{ s} \times 50 \text{ mA} = 70\,000 \text{ mAs}$

Quantité d'énergie nécessaire en mAh : $70\,000 \text{ mAs} / 3600 \text{ s} = 19,44 \text{ mAh}$

Alimentation continue régulée

- Les systèmes électroniques ont besoin d'une **alimentation continue**, ce qui est généralement généré à partir de :
 - Piles** pour les systèmes portables et à faible consommation, tel qu'une télécommande de télévision ou autres.
 - Batterie** d'accumulateurs pour les systèmes tel qu'une voiture.
 - Réseau électrique alternatif** (secteur) pour des systèmes qui demandent de la puissance et qui ont accès au réseau. Dans ce cas, la tension alternative doit être convertie en tension continue stabilisée (**convertisseur AC/DC**), conformément au schéma synoptique suivant :

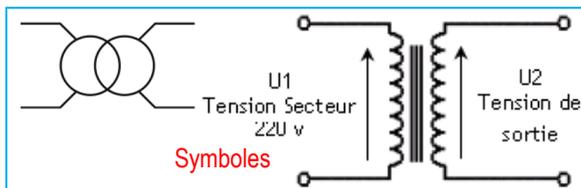


* : Pour être précis et juste, cette forme d'onde est obtenue sans le bloc fonctionnel du filtrage. Mais, pour des raisons didactiques, on se permet généralement dans la littérature, cette « **petite erreur** » !



Transformation

- Le rôle de la transformation est **d'abaisser** la tension du secteur (230 V AC) et **l'isoler** de la basse tension continue à produire. 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 abaisser la tension, i.e. avoir une tension en sortie plus petite (**U₂ < U₁**), il faut avoir (**n₂ < n₁**).

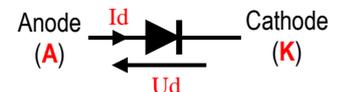
Redressement

- Cette fonction a pour rôle de rendre **unidirectionnelle** la tension délivrée par le transformateur, ce qui constitue la 1^{er} étape dans le processus pour aboutir à une tension continue. Elle est réalisée à base de **diodes**.

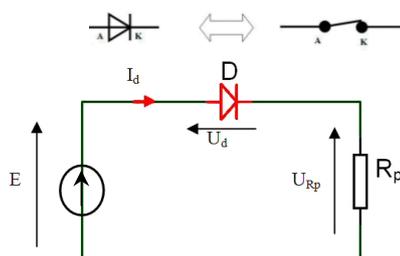
Fonctionnement et symbole d'une diode

- La diode est un composant électronique à conduction unidirectionnelle :

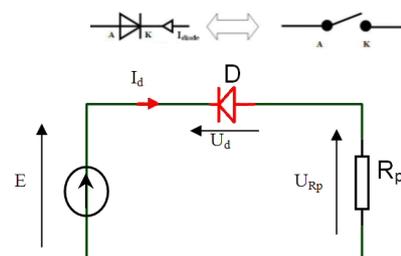
- Elle ne conduit que dans le sens de l'**anode A** vers la **cathode K**.
- Son symbole est représenté à la figure ci-contre ; il indique clairement le sens de conduction.
- $U_d = 0,7 \text{ V}$ est appelée la **tension de seuil** de la diode ; pour une diode idéale U_d est nulle.



Polarisation directe :
Une diode passante est équivalente à un circuit fermé



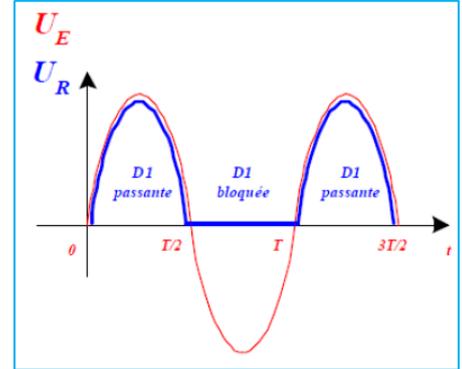
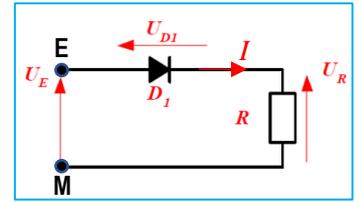
Polarisation inverse :
Une diode bloquée est équivalente à un circuit ouvert



Réalisation du redresseur

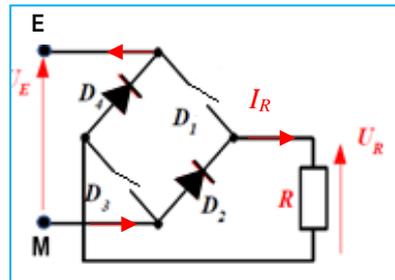
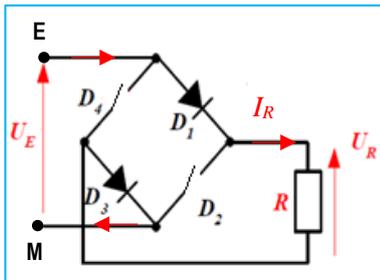
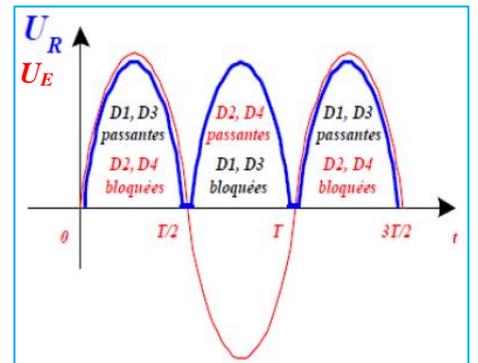
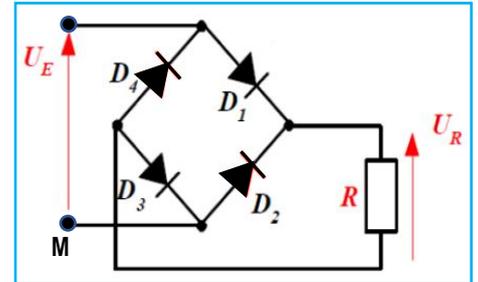
Redressement mono-alternance

- C'est un montage avec 1 seule diode. La charge du montage est résistive (résistance **R**). Le signal **U_E** issu du transformateur est sinusoïdal. Pour un bon raisonnement, on prend le point **M** comme référence (Potentiel nul) ; le point **E** sera alors soit positif, soit négatif par rapport au point de référence M. On rappelle que par convention, le courant circule du potentiel le plus haut au potentiel le plus bas.
 - Pendant l'alternance positive, le potentiel E est positif et U_E est aussi positive, alors D₁ conduit et U_R=U_E.
 - Pendant l'alternance négative, le potentiel E est négatif et U_E est aussi négative, alors D₁ est bloquée, i.e. pas de courant dans le circuit, donc U_R = R.I = 0.
 - Les chronogrammes de la figure ci-contre illustrent ce fonctionnement du montage et montre qu'il n'y a qu'une alternance.



Redressement double-alternance

- Le montage le plus populaire est le redresseur à **pont de diodes (pont de Graetz)** ; il comporte **4 diodes** dont 2 seulement, qui sont conductrices par alternance ; avec un raisonnement similaire au cas du montage simple alternance, on a :
 - Pendant l'alternance positive, le courant circule de E vers M ; alors D₁ et D₃ conduisent et D₂ et D₄ sont bloquées.
 - Pendant l'alternance négative, le courant circule de M vers E ; alors D₂ et D₄ conduisent et D₁ et D₃ sont bloquées.
 - On remarque que pour les 2 alternances de U_E, le **sens** du courant **I_R** dans la charge R est le **même**, ce qui veut dire que l'alternance négative de U_E est **redressée** dans le sens positif pour U_R.



- Comme pour le cas de la simple alternance, on remarque que le signal de sortie est unidirectionnel, i.e. il n'est plus tantôt positif, tantôt négatif. On s'approche alors, dans une certaine mesure de la forme d'une tension continue. Les fonctions suivantes le permettront plus.
- Note** : Une **LED** (Light Emitting Diode) est une diode qui a le même principe de fonctionnement qu'une diode ordinaire, mais elle est destinée à émettre une lumière (rouge, vert, jaune, orange, bleue, etc.) quand elle est passante pour des fins de signalisation. Pour une LED rouge, typiquement la tension de seuil est de 1.5 V et un courant de 10 mA donne une intensité lumineuse de signalisation satisfaisante.

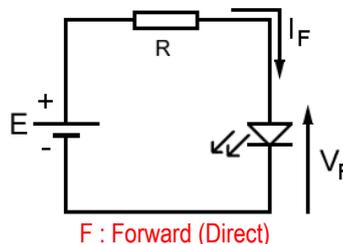
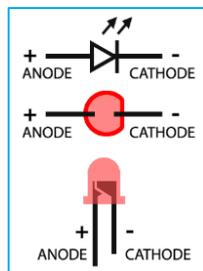
On a fréquemment ce cas de figure :
E=5 V, U_F=1.5 V et I_F=10 mA

$$E = R \cdot I_F + U_F$$

$$R = \frac{E - U_F}{I_F}$$

$$R = \frac{5 - 1.5}{0.01} = 350 \Omega$$

Valeur normalisée la plus proche en **E12** est 330 Ω. Sa puissance est :
P=R.I_F²=350.(0.01)²=0.035 W
Les puissances disponibles sont :
1/4 W, 1/2 W, 1 W, 2 W, etc.
Alors **R = 330 Ω - 1/4 W.**



Filtrage

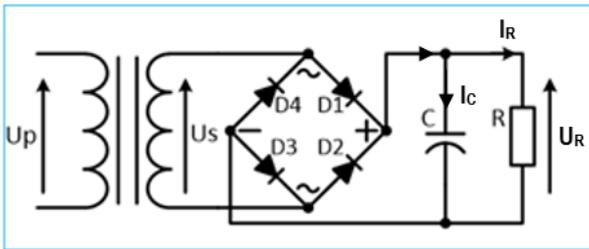
- Le filtrage consiste à rendre encore la tension de sortie plus proche d'une tension continue. Cette fonction est basée sur l'aptitude d'un **condensateur** à pouvoir se charger et se décharger. Le principe de base consiste donc à brancher un condensateur C en parallèle avec la charge R, comme le montre le montage de base ci-dessous.
- Dans la partie **Exercices**, on traite en détail de cette opération de filtrage ; dans ce qui suit, on donne les résultats à retenir à propos de cette fonction.



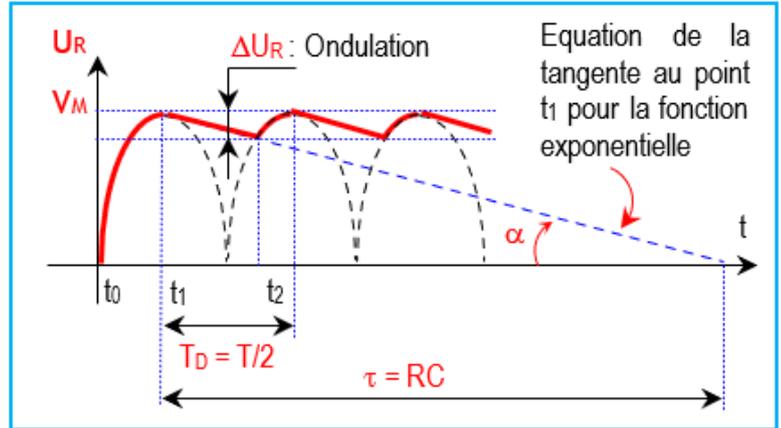
Rappel :

$$i_c = C \frac{dU_c}{dt}$$

$i_c > 0 \Rightarrow U_c \uparrow$, C se charge
 $i_c < 0 \Rightarrow U_c \downarrow$, C se décharge



- ✓ 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 secteur de valeur 20 ms ($f = 50$ Hz)



- On suppose que le condensateur C est complètement déchargé au repos, i.e. à l'instant ($t_0 = 0$), ($U_C = 0$). Ainsi, on présente le fonctionnement du montage par ses phases principales suivantes :
 - $[t_0, t_1]$: Au début de l'alternance positive, D1 et D3 conduisent et C se charge ; ainsi U_C , qui est égale à U_R suit la tension U_S .
 - $[t_1, t_2]$: D1 et D3 se bloquent et C se décharge sur R selon une loi exponentielle ; ainsi U_R suit la tension U_C .
 - A partir de t_2 , le cycle recommence, mais cette fois-ci ce sont D2 et D4 qui conduisent.
 - Alors, aux bornes de C et de R, la tension de sortie se rapproche de la forme d'une tension continue, mais avec une **ondulation** ΔU_R , qu'on diminuerait significativement avec la fonction de régulation.
 - **Evaluation de ΔU_R** : Un calcul, avec des hypothèses simplificatrices, donne une bonne idée sur l'expression de ΔU_R , qui montre aussi de quoi elle dépend. En supposant que $[t_1, t_2] \approx T_D$, on a :

$$\tan(\alpha) = \frac{V_M}{RC} = \frac{\Delta U_R}{T_D} = \frac{2\Delta U_R}{T}$$

Alors

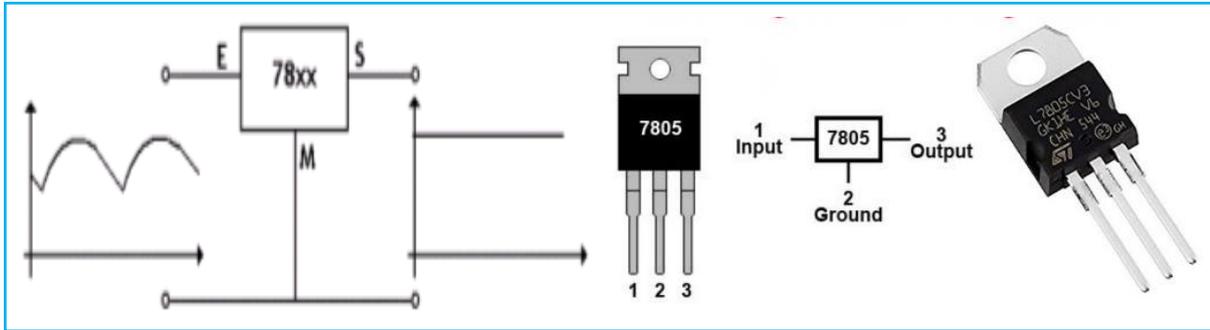
$$\Delta U_R = \frac{V_M \cdot T}{2RC} = \frac{V_M}{2RCf}$$

On remarque alors que ΔU_R dépend principalement de la **valeur de C**, car tous les autres paramètres devraient être constants ; en particulier, avec une grande valeur de C on a une petite ondulation de ΔU_R (fonction en $1/x$).

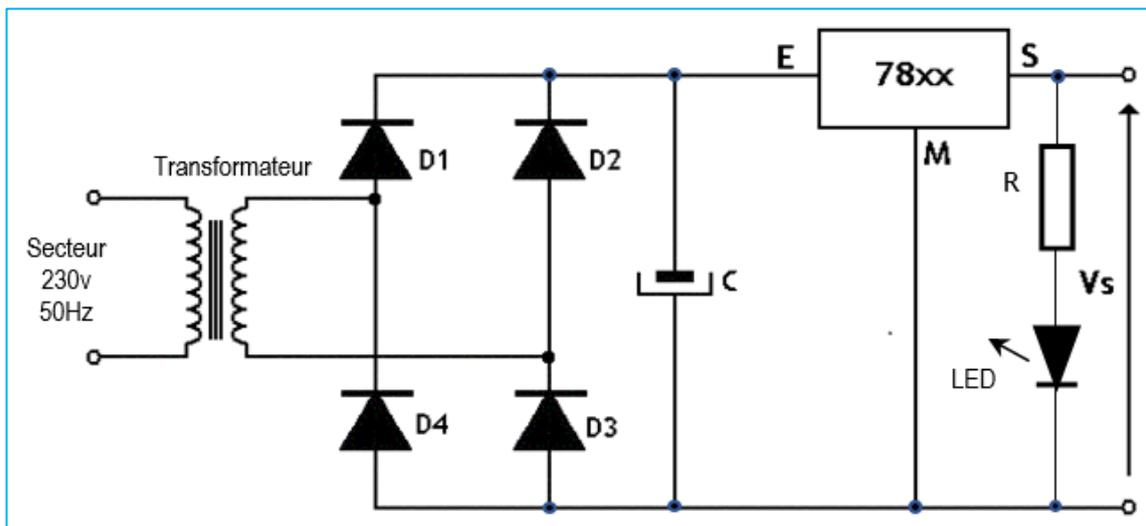


Régulation

- La régulation est la fonction qui permet d'avoir une tension **hautement continue** et **stable** à partir d'une tension ondulée comme issue du condensateur, vue ci-haut. 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 +5 V.
 - 7812 : tension à la sortie égale à +12 V.
- D'après les données des constructeurs trouvées dans leurs **Datasheets**, on a, dans le cas de 5 V (régulateur 7805), avec les pires des cas une ondulation ΔU , qui ne dépasse pas les 100 mV, soit un rapport de 0.1/5 ou **2%**.
- La figure ci-dessous montre une **application typique** pour une alimentation régulée ; on note bien la série en cascade des fonctions élémentaires vues dans les paragraphes précédents :
 - Le transformateur abaisse et isole la tension du réseau.
 - Le pont de Graetz redresse la tension sinusoïdale abaissée.
 - Le condensateur C filtre la tension redressée et fournit une tension continue, mais avec une ondulation, qui dans certaines applications n'est pas acceptable.
 - Le régulateur fournit une tension continue avec une très faible ondulation, sans effet dans la plupart des applications électroniques.
 - La LED a un rôle de signalisation de la présence ou non de la tension à la sortie de l'alimentation.

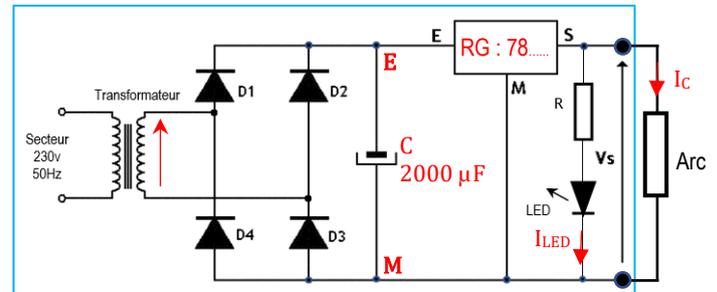


Exercices (Enoncés)

Exercice 1 : Alimentation régulée 12 V

Soit l'alimentation régulée de ($V_S = 12\text{ V}$) de la figure ci-contre. Elle servira par exemple à l'alimentation de petits relais 12 V.

1. Préciser la référence du régulateur RG.
2. $U_{LED} = 1.5\text{ V}$ et $I_{LED} = 10\text{ mA}$. Calculer R et choisir une valeur normalisée.
3. Le courant maximal pouvant être fourni par le régulateur est de 1 A. En négligeant le courant I_{LED} , déterminer la valeur de R_C correspondante.
4. On considère que, vu entre les points E et M, le dipôle en parallèle avec le condensateur C, est équivalent à une résistance de valeur ($R = 18\ \Omega$).
 - 4.1. Donner le schéma équivalent du montage.
 - 4.2. Calculer l'ondulation de ΔU_E .
 - 4.3. Représenter alors la forme chiffrée du signal $u_E(t)$ pour 1 période et $\frac{1}{2}$ du signal $u_2(t)$.
5. Nous disposons de 2 condensateurs, C_1 et C_2 , de $1000\ \mu\text{F}$ chacun. Comment les brancher alors pour obtenir les $2000\ \mu\text{F}$ nécessaires pour le condensateur C ?



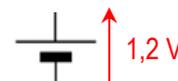
$$U_2(t) = 15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$



Exercice 2 : Dimensionnement d'une batterie

On souhaite faire fonctionner un moteur électrique M de modèle réduit sous les conditions suivantes :

- La durée de marche est **90 minutes**, soit **1,5 h**.
- Le moteur consomme une puissance P_M de **12 W**, sous une tension U_M de **7.2 V**.
- La batterie est caractérisée comme suit :
 - Elle est constituée d'accumulateurs de **1,2 V** chacun.
 - Son taux de décharge est de **80 %**.



1. Calculer le nombre N_a d'accumulateurs nécessaires et donner le schéma de montage de cette batterie d'accumulateurs avec le moteur M, en fléchant le courant I_M et la tension U_M du moteur.
2. Calculer la capacité nécessaire C.
3. Calculer la capacité effective C_B de la batterie en Ah, en tenant compte du taux de décharge.

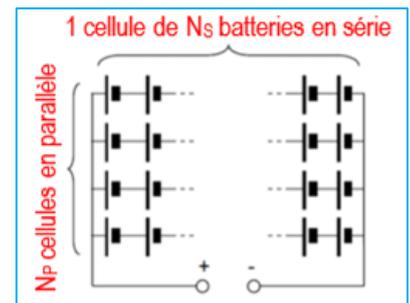
Exercice 3 : Alimentation par batteries d'un SEGWAY

Un SEGWAY ou un gyropode ou transporteur personnel est un véhicule électrique monoplace, constitué d'une plateforme munie de 2 roues parallèles sur laquelle l'utilisateur se tient debout, d'un système de stabilisation gyroscopique et souvent d'un manche de maintien et de conduite. Pour son autonomie énergétique, le système est équipé de batteries de caractéristiques :

- $U_B = 12\text{ V}$ et $C_B = 0,31\text{ Ah}$.
- Le besoin en tension est de ($U_T = 72\text{ V}$).
- L'énergie totale des batteries est de ($W_T = 220\text{ Wh}$).
- L'ensemble des batteries est en montage **mixte** (série et parallèle).



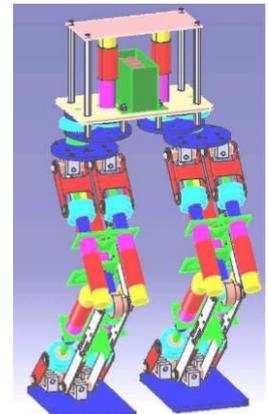
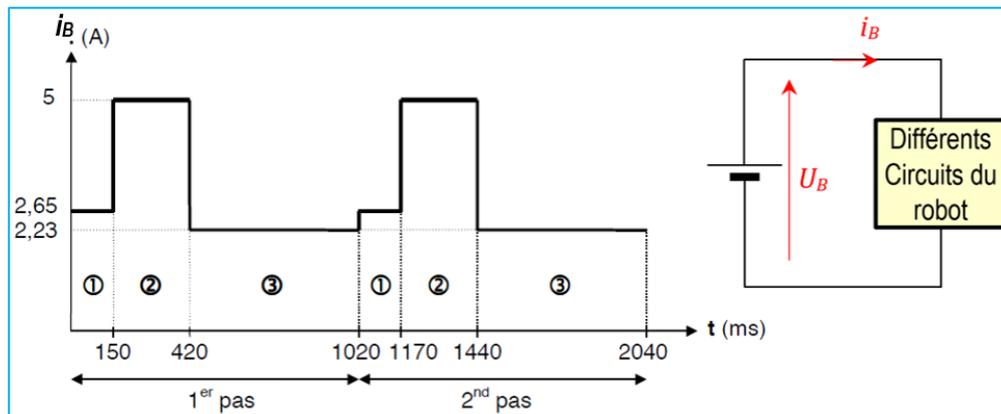
- Déterminer la capacité C_T totale nécessaire au besoin du système.
- Déterminer le nombre N_S de batteries nécessaires pour constituer une cellule fournissant $72 V$.
- Préciser la capacité C_S d'une telle cellule.
- Déterminer le nombre N_P de cellules en parallèle nécessaires pour fournir l'énergie nécessaire au système.
- Déterminer alors le nombre total N_T nécessaires de batteries nécessaires au système.



Exercice 4 : Alimentation par batteries d'un robot

Un certain robot n'est constitué que de 2 jambes et d'un début de tronc. Sa fonction globale est le test et la validation de certains algorithmes de déplacement utilisés en Robotique. Le tronc du robot sert à l'installation de la batterie d'alimentation du système et à la connexion d'une carte électronique de commande. Les composants électriques constituant le robot (moteurs, capteurs, etc.) nécessitent une batterie de ($U_B = 12 V$; $C_B = 2 Ah$).

Lorsque le robot effectue 2 pas (chaque pas se décompose en 3 étapes : 1, 2 et 3), l'évolution temporelle de l'intensité $i_B(t)$ du courant fourni par la batterie est donnée à la page suivante.

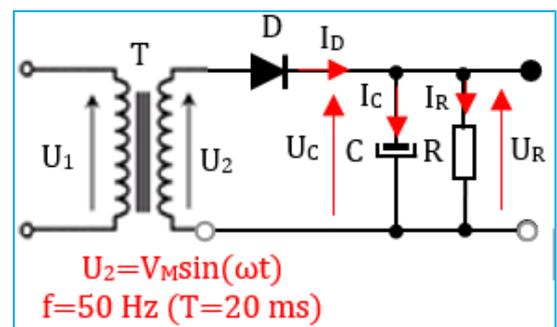


- Calculer l'énergie W_B que doit fournir la batterie pour un pas. On exprimera l'énergie W_B en J.
- En déduire l'énergie W_B pour une durée de marche de ($T = 30 \text{ min}$). L'énergie W_B est exprimée en J puis en Wh.
- En déduire la capacité nécessaire C en Ah de la batterie.
- Sachant qu'on doit recharger la batterie après une consommation de 80 % de sa charge, calculer la charge totale effective C_E de la batterie.
- La batterie est-elle bien choisie ?
- La longueur d'un pas du robot est ($d = 417 \text{ mm}$). Calculer la vitesse V du déplacement du robot.
- Déterminer la distance D maximale, correspondant à l'autonomie du robot ; autrement dit, on détermine la distance pouvant être parcourue par le robot jusqu'à la décharge à 80 % de la batterie. On considère une trajectoire est rectiligne.

Exercice 5 : Etude mathématique du filtrage

Soit le montage de base ci-contre, avec redressement simple alternance et filtrage capacitif.

- On considère l'intervalle $[0, T/4]$ et on suppose C complètement déchargé. Donner l'expression $u_R(t)$ et représenter-la avec $u_2(t)$.
- Exprimer $i_D(t)$ en fonction de $i_C(t)$ et de $i_R(t)$.
- Déterminer l'instant t_1 où $i_D(t)$ s'annule, i.e. D se bloque.
- Tout juste après l'instant t_1 ($t_1 + \varepsilon$), C se décharge exponentiellement sur R . Etablir l'équation différentielle, régissant ce fonctionnement, et donner sa solution et représenter l'allure de $u_R(t)$.



Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Alimentation régulée 12 V

1. Le régulateur RG est de type 7812.

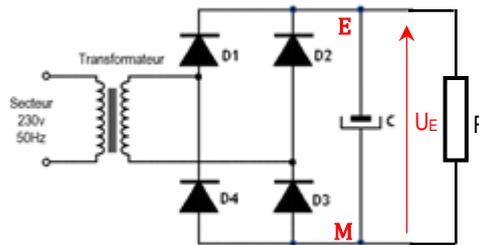
$$2. R = \frac{V_S - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{12 - 1.5}{0.01} = 1050 \Omega$$

$$P_R = R \cdot I_{LED}^2 = 1050 \cdot (0.01)^2 = 0.105 \text{ W} ; \text{ alors } R = 1 \text{ k}\Omega - \frac{1}{4} \text{ W.}$$

$$3. R_C = \frac{12}{1} = 12 \Omega$$

4.

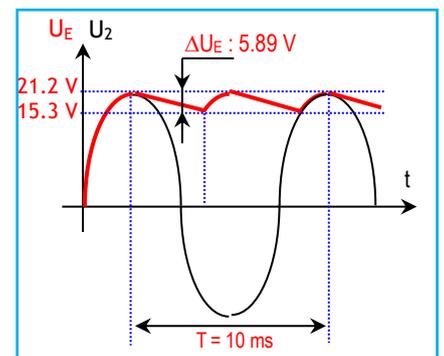
4.1. Schéma équivalent



4.2. Ondulation

$$\Delta U_E = \frac{V_M}{2RCf} = \frac{15 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot 18 \cdot 2000 \cdot 10^{-6} \cdot 50} = 5.89 \text{ V}$$

4.3. Chronogrammes chiffrés de $u_E(t)$ et de $u_2(t)$.

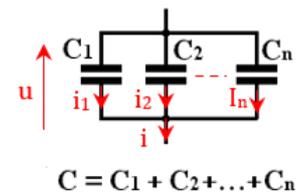


5. On les branchera en parallèle. En effet, la capacité équivalente de condensateurs branchés en parallèle est la somme des valeurs de ces condensateurs ; ainsi $C = C_1 + C_2$.

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n = \frac{C_1 du}{dt} + \frac{C_2 du}{dt} + \dots + \frac{C_n du}{dt}$$

$$i = (C_1 + C_2 + \dots + C_n) \frac{du}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

$$\text{Alors } C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$



Exercice 2 : Dimensionnement d'une batterie

1. Nombre d'accumulateurs N_a :

$$N_a = \frac{7,2}{1,2} = 6$$

2. Capacité nécessaire C de la batterie :

Le courant fourni par la batterie au moteur est :

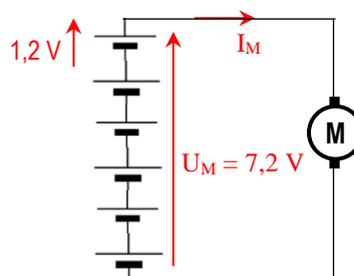
$$I_M = \frac{P_M}{U_M} = \frac{12}{7,5} = 1,6 \text{ A}$$

$$C = I \cdot t = 1,6 \cdot 1,5 = 2,4 \text{ Ah}$$

3. Capacité effective C_B de la batterie :

$$C = 0,8 \cdot C_B$$

$$C_B = \frac{C}{0,8} = \frac{2,4}{0,8} = 3 \text{ Ah}$$



Exercice 3 : Alimentation par batterie d'un SEGWAY

1. Capacité C_T totale :

$$C_T = \frac{W_T}{U_T} = \frac{220}{72} = 3,0555 \text{ Ah.}$$

2. Nombre N_S de batteries en série par cellule :

$$N_S = \frac{U_T}{U_B} = \frac{72}{12} = 6.$$

3. Capacité C_S d'une cellule :

C'est la capacité d'une batterie élémentaire C_B , soit $C_S = C_B = 0,31 \text{ Ah}$.

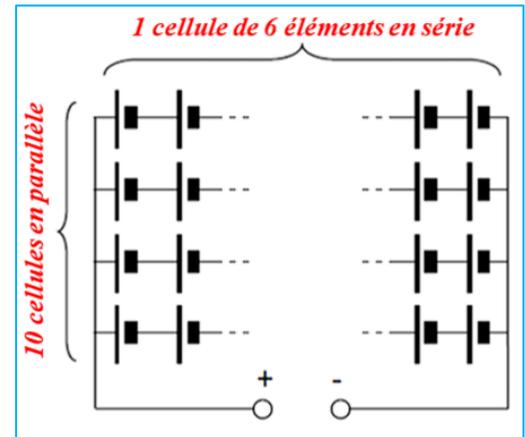
4. Nombre N_P de cellules en parallèle :

$$C_T = C_S \cdot N_P = C_B \cdot N_P \Rightarrow N_P = \frac{C_T}{C_B} = \frac{3,0555}{0,31} = 9,8566$$

Soit $N_P = 10$

6. Nombre total N_T de batteries nécessaires au système :

$$N_T = N_S \cdot N_P = 6 \cdot 10 = 60.$$



Exercice 4 : Alimentation par batterie d'un robot

1. Energie W_B pour un pas de durée 1020 ms, soit 1,02 s :

$$W_B = W_1 + W_2 + W_3 = U_B \cdot i_{B1} \cdot t_1 + U_B \cdot i_{B2} \cdot t_2 + U_B \cdot i_{B3} \cdot t_3$$

$$= 12,2 \cdot 65,0 \cdot 15 + 12,5 \cdot 0,27 + 12,2 \cdot 23 \cdot 0,6 = 37,031 \text{ J}$$

2. Energie nécessaire W_B pour une durée de 30 min, soit 1800 s :

$$1,02 \text{ s} \rightarrow 37,031 \text{ J}$$

$$1800 \text{ s} \rightarrow W_B = \frac{1800 \cdot 37,031}{1,02} = 65348,8235 \text{ J} = \frac{65348,8235}{3600} = 18,1524 \text{ Wh}$$

3. Capacité nécessaire C en Ah pour ($t = 30 \text{ min}$), soit 0,5 h :

$$C = \frac{W_B}{U_B} = \frac{18,1524}{12} = 1,5127 \text{ Ah}$$

4. Capacité totale effective C_E :

L'autonomie du robot n'est que de 80 % de la capacité effective C_E que devrait avoir la batterie ($C = 0,8 \cdot C_E$).

$$C_E = \frac{C}{0,8} = \frac{1,5127}{0,8} = 1,8908 \text{ Ah}$$

5. Choix de la batterie :

Oui, la batterie est bien choisie, puisque $C_B > C_E$ ($2 \text{ Ah} > 1,8908 \text{ Ah}$).

6. Vitesse V du déplacement du robot :

$$V = \frac{d}{t_{pas}} = \frac{0,417}{1,02} = 0,4088 \text{ m/s}$$

7. Distance D maximale du déplacement du robot :

L'autonomie du robot est de 30 min (1800 s), alors :

$$D = V \cdot T = 0,4088 \cdot 1800 = 735,84 \text{ m}$$

Exercice 5 : Etude mathématique du filtrage

1. D conduit et on a le schéma équivalent ci-contre ; alors C se charge par la tension U_2 :

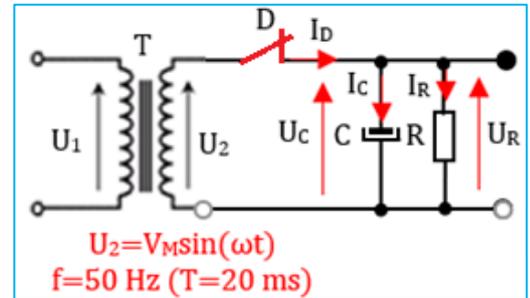
$$u_R(t) = u_2(t) = V_M \sin(\omega t).$$

2. On a :

- $u_R(t) = u_C(t) = V_M \sin(\omega t).$
- $i_D(t) = i_R(t) + i_C(t)$

$$i_D(t) = \frac{u_R(t)}{R} + \frac{C du_C(t)}{dt}$$

$$i_D(t) = \frac{V_M \sin(\omega t)}{R} + CV_M \omega \cos(\omega t)$$



D'où le graphe de $U_R(t)$ dans la figure ci-bas, dans l'intervalle $[t_0, t_1]$.

3. Au voisinage de $(t_1 = T/4)$, D se bloque ($i_D(t) = 0$), alors le condensateur C se décharge exponentiellement à travers la résistance de charge R. En effet,

$$i_D(t) = 0 \Leftrightarrow \frac{V_M \sin(\omega t_1)}{R} + CV_M \omega \cos(\omega t_1) = 0$$

$$\text{D'où : } \tan(\omega t_1) = -RC\omega, \text{ et } t_1 = \frac{1}{\omega} \arctan(-RC\omega)$$

Le signe - indique que l'angle (ωt_1) est situé dans le 2e quadrant $(\pi/2 \text{ à } \pi)$.

On a donc pour les cas limites de C (0 et ∞) :

- $C \rightarrow 0, t_1 \rightarrow \frac{T}{2\pi}, \pi = \frac{T}{2}$ (Cas sans filtrage)
- $C \rightarrow \infty, t_1 \rightarrow \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{T}{4}$ (Cas d'un filtrage idéal)

4. Donc à t_1 , on a le schéma équivalent ci-contre, qui est régi par l'équation suivante :

$$u_R(t) = R \cdot i_R(t) = -R \cdot i_C(t) = -RC \frac{du_C(t)}{dt} = -RC \frac{du_R(t)}{dt}$$

$$\text{D'où l'équation différentielle : } u_R(t) + RC \frac{du_R(t)}{dt} = 0$$

$$\text{Sa solution est de la forme : } u_R(t) = A \cdot e^{-t/RC}$$

$$\text{A } t = t_1, u_R(t_1) = V_M \sin(\omega t_1) = A \cdot e^{-t_1/RC}$$

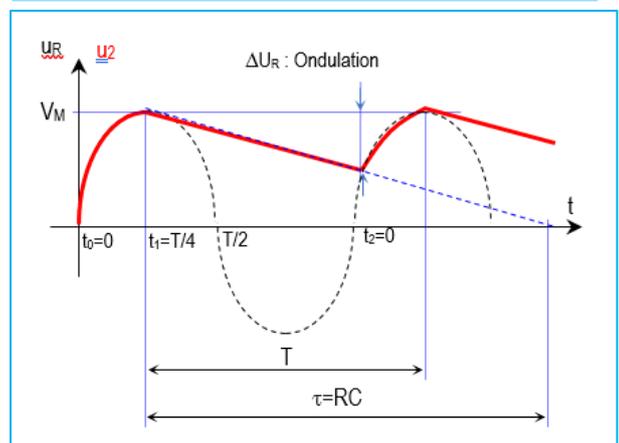
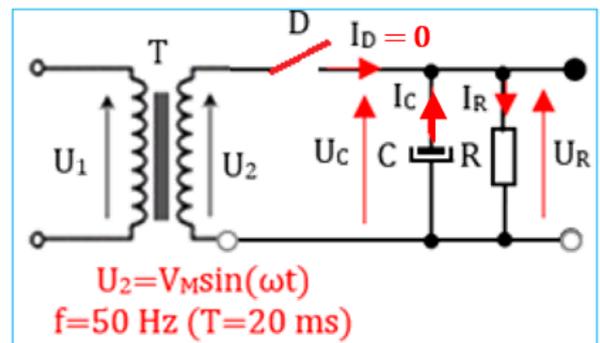
$$\Rightarrow A = V_M \sin(\omega t_1) \cdot e^{t_1/RC}$$

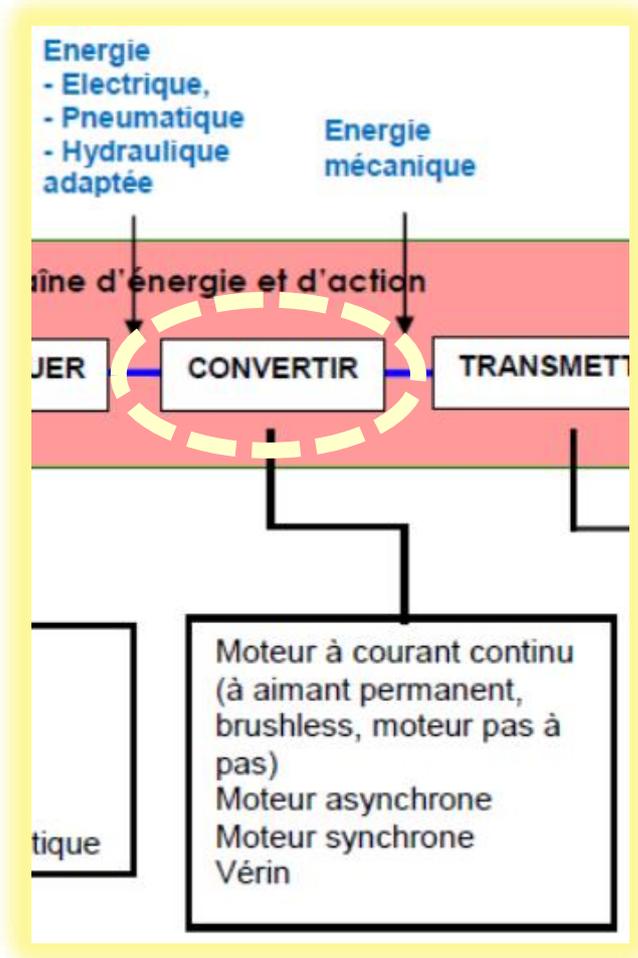
Alors,

$$U_R(t) = V_M \sin(\omega t_1) \cdot e^{t_1/RC} \cdot e^{-t/RC}$$

$$U_R(t) = V_M \sin(\omega t_1) \cdot e^{-(t-t_1)/RC}$$

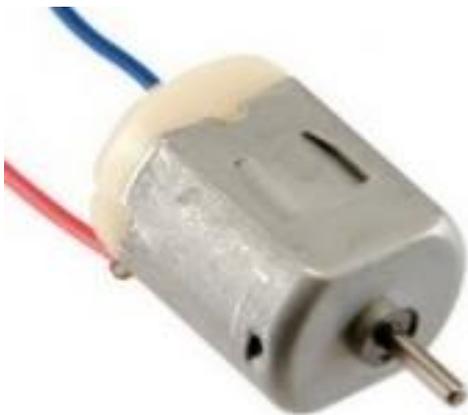
D'où le graphe complet de $U_R(t)$ dans la figure ci-contre.





Fonction Convertir

Actionneurs électriques



Présentation

Dans un système automatisé, souvent la finalité de l'action sur la matière d'œuvre est de nature mécanique. Puisque l'énergie souvent disponible est électrique, alors il faut convertir cette énergie disponible en énergie mécanique ; d'où l'utilisation des **actionneurs** qui assurent cette conversion d'énergie :

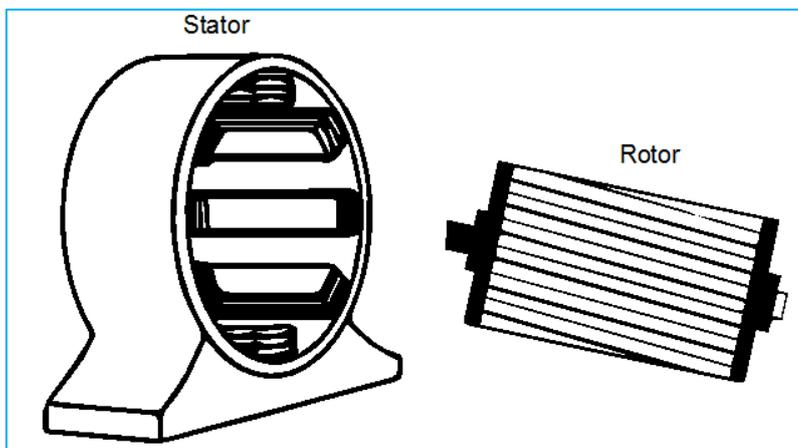
- Le moteur électrique est l'actionneur le plus utilisé pour transformer l'énergie **électrique** en énergie **mécanique**.
- On trouve principalement :
 - Le moteur à courant continu.
 - Le moteur asynchrone triphasé.
- Quel que soit le type du moteur, on distingue 2 parties :
 - La partie fixe ou statique, le **Stator**, qui crée ou induit le **champ magnétique** nécessaire pour le fonctionnement de la machine ; il est appelé **inducteur**.
 - La partie tournante ou mise en rotation, le **Rotor**, qui est à siège de la **conversion électrique/mécanique** ; il est appelé **induit**.



Moteur à courant continu



Moteur asynchrone triphasé



- L'inducteur peut être :
 - Un **aimant permanent**.
 - Un **électro-aimant**, bobinage électrique qui, une fois alimenté en courant électrique, crée un champ magnétique.



Aimant permanent



Electro-aimant



La machine à courant continu (MCC)

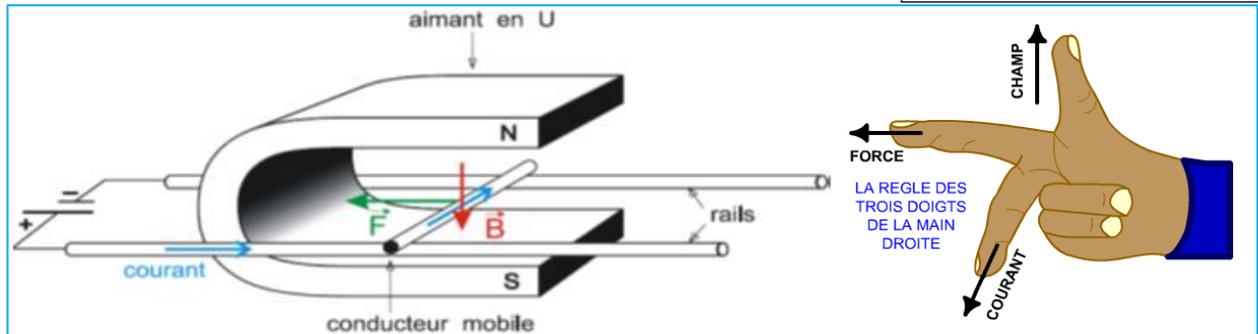
- Le moteur à courant continu n'est pratiquement plus utilisé en **forte puissance**.
- En revanche, en **faible puissance**, sa simplicité de commande en fait un composant très répandu encore aujourd'hui.

Le terme de **champ magnétique** désigne une région de l'espace soumise à l'action d'une force provenant d'un aimant.

Principe de base : Force de Laplace

- Un conducteur traversé par un courant **I** et placé dans un champ magnétique **B**, est soumis à une force **F de Laplace**.
- Le sens de F est déterminé par la règle des **3 doigts de la main droite**.
- F a pour intensité : **$F = B.I.L$**

F : Force (N)
B : Induction magnétique (T)
I : Intensité dans le conducteur (A)
L : Longueur du conducteur (m)



Fonctionnement d'une MCC

- Sur l'image ci-contre, le conducteur sous forme d'une spire, traversé par un **courant i**, est placé dans un **champ magnétique B**, créée par les 2 aimants.
- Ce conducteur est donc soumis à la **force de Laplace F**.
- La partie gauche de la spire est soumise à une force qui la fait **monter** alors que la partie droite est soumise à une force qui la fait **descendre**.
- En conclusion, la spire **tourne** (mise en rotation).
- Si on inverse le sens du courant, on inverse le sens de rotation.

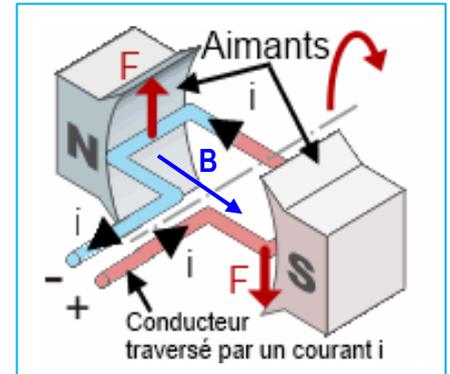
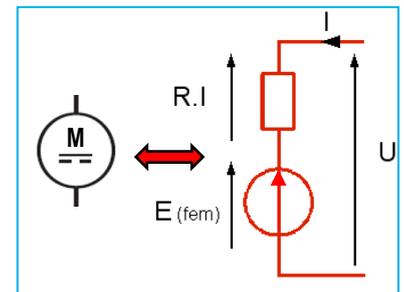
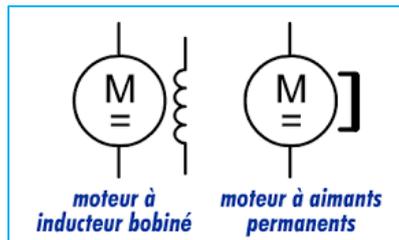


Schéma équivalent simplifié de la MCC

- Une MCC est symbolisée comme le montre la figure ci-contre ; mais généralement, seul l'induit est représenté.
- Vu de l'induit, la MCC peut être modélisée par une résistance R en série avec un générateur de tension de force contre-électromotrice (f_{cem}) E :



- I** : Courant consommé par le moteur.
- U** : Tension d'alimentation du moteur
- E** : Force contre-électromotrice (f_{cem}).
- R** : Résistance interne du bobinage de l'induit.

Les équations caractéristiques de la MCC

- L'équation suivante est **l'équation de l'induit** ; elle découle directement du schéma équivalent de l'induit ci-dessus :

$$U = E + RI$$

U alimentation (volt) Fem (volt) Résistance interne (ohm) Courant (ampère)



- L'équation suivante est **l'équation de la fcem** ; la fcem E est proportionnelle à la vitesse angulaire ; k_E est une constante qui caractérise le moteur ; elle est appelée **constante de la fcem**.

$$E = k_E \cdot \omega$$

FEM en volt Constante k du moteur Vitesse angulaire en rad/s

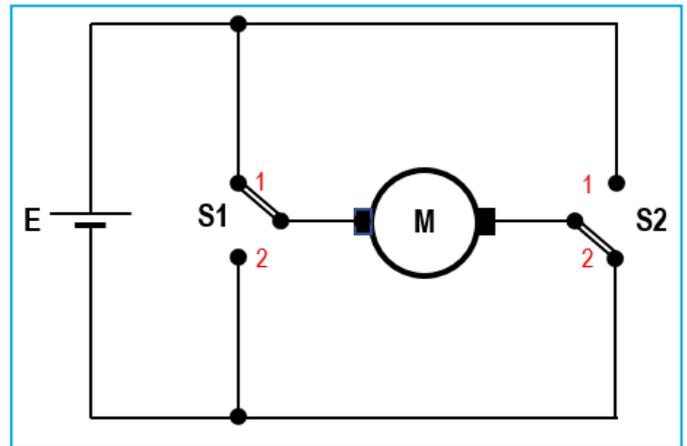
- L'équation suivante est **l'équation du couple** ; le courant consommé par le moteur est directement lié au couple résistant ; k est une constante qui caractérise le moteur ; elle est appelée **constante de couple**.

$$C = k_C \cdot I$$

Couple en m.N Constante k du moteur Courant en Ampère

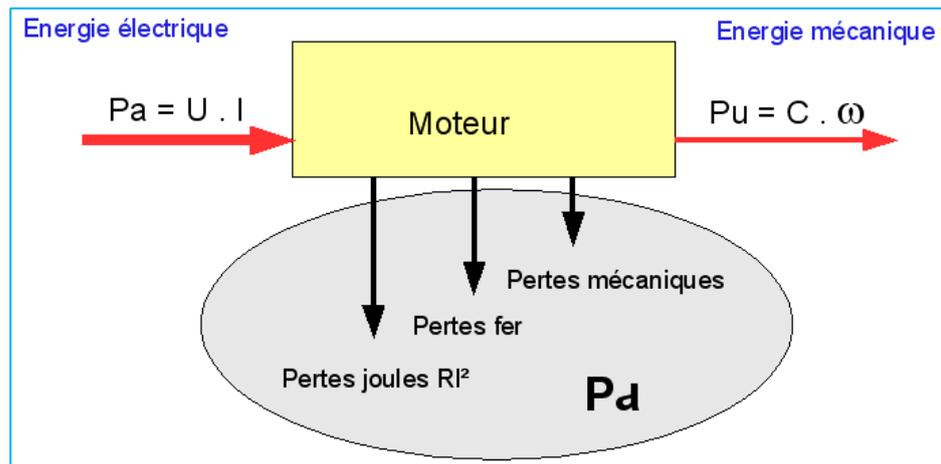
Inversion du sens de rotation de la MCC

- Une MCC peut tourner dans les 2 sens de rotation (horaire et anti horaire) ; il suffit d'inverser la polarité de l'alimentation de l'induit.
- Le schéma de connexion 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

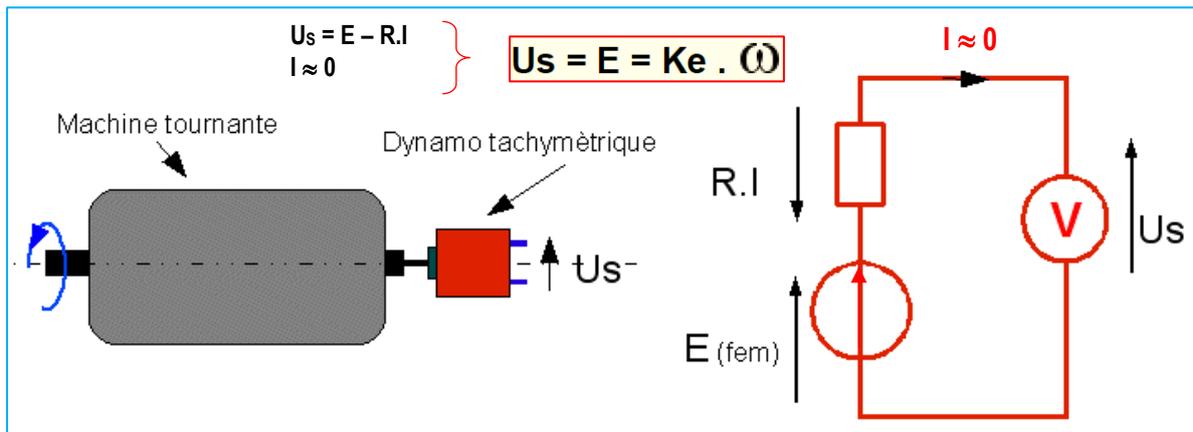
- La figure ci-dessous résume l'aspect énergétique d'une MCC :
 - Puissance absorbée (W)** : C'est la puissance électrique prélevée sur l'alimentation électrique ; $P_a = U \cdot I$.
 - Puissance utile (W)** : C'est la puissance mécanique disponible sur l'arbre ; $P_u = C \cdot \omega$.
 - Puissance perdue (W)** : Cette puissance P_d correspond aux pertes électriques par effet Joule ($R \cdot I^2$), aux pertes mécaniques et aux pertes magnétiques.
- La puissance utile est donc toujours plus faible que la puissance absorbée $P_u = P_a - P_d$.
Dans le cas où on a uniquement des pertes Joules, $P_u = P_a - P_d = U \cdot I - R \cdot I^2$
- Rendement** : C'est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée ; $\eta = P_u / P_a$.





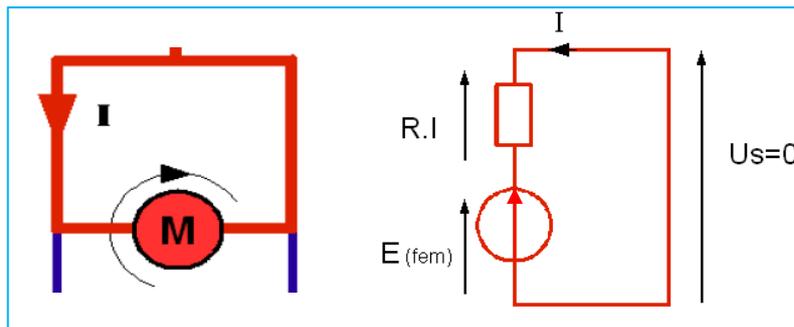
Réversibilité de la MCC

- La MCC est une machine **réversible** ; elle peut se comporter comme :
 - Un **moteur** pour la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.
 - Une **génératrice** pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.
- En mode génératrice, la MCC est aussi 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 moteur :
 - E (fem) : force électromotrice.
 - K_e : constante de fem (V/tr/min).



Freinage de la MCC

- Une des solutions pour freiner une MCC est de mettre l'induit en **court-circuit**.
- $U_S = E + R.I$; donc $I = (U_S - E)/R$; avec $U_S = 0$, donc $I = - E/R$.
- I est négatif alors qu'il était positif en phase moteur ; le couple est donc également négatif et freine la charge.



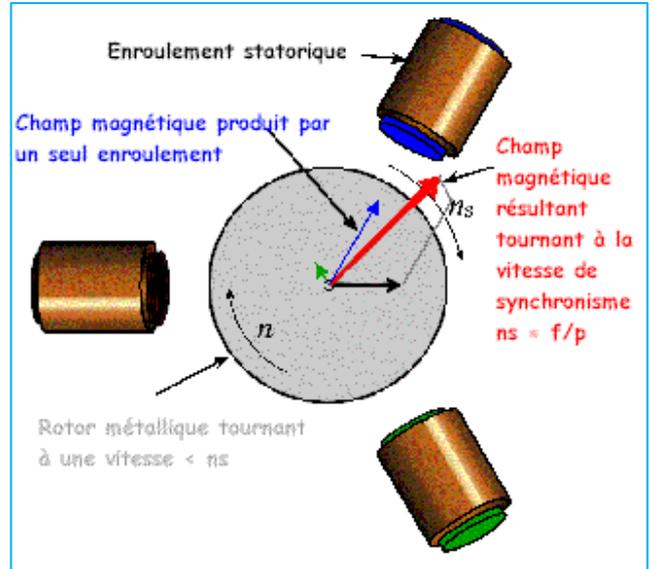
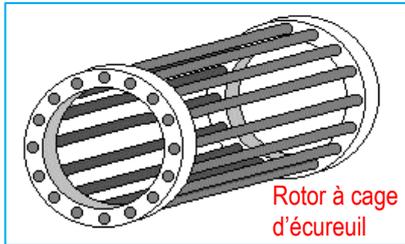


Le moteur asynchrone triphasé (MAS)

- Le MAS est pratiquement le moteur le plus utilisé en industrie pour sa simplicité et sa fiabilité.

Constitution

- Stator (inducteur) :** Il est constitué de **3 enroulements** (bobinages) déphasés mécaniquement de **120°** l'un par rapport à l'autre.
- Rotor (induit) :** Son **fonctionnement** est basé sur le champ tournant. On distingue 2 types de rotor, dont le plus connu est celui à rotor en **court-circuit ou à cage d'écurueil**, destiné pour les moteurs de faible puissance.



Principe de fonctionnement

- 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**.
- On définit la différence entre la vitesse du champ tournant N_s et la vitesse de rotation du rotor N par le terme du **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 du réseau :

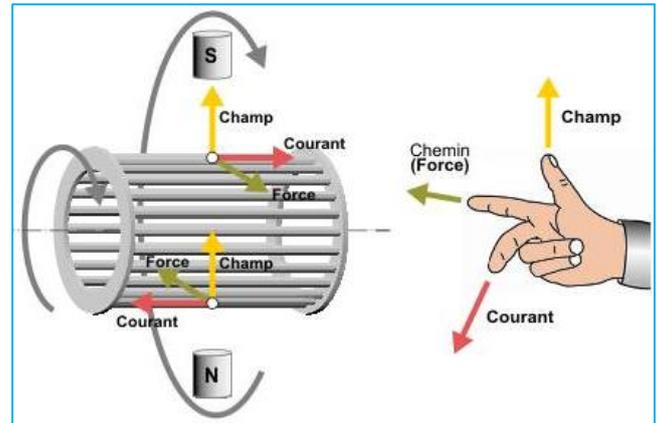
$$N_s = \frac{f}{p} \quad (2)$$

- N_s : fréquence de synchronisme
- f : fréquence du réseau
- 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** :

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

- En **permutant 2 phases**, on inverse le sens de rotation du champ tournant, ce qui change aussi le **sens de rotation** du rotor.



P = Nombre de paire de pôles

Une paire de pôles

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{1}$$

Si la fréquence d'alimentation est de 50Hz

$N_s = 3000 \text{ tr.mn}^{-1}$

2 paires de pôles

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{2}$$

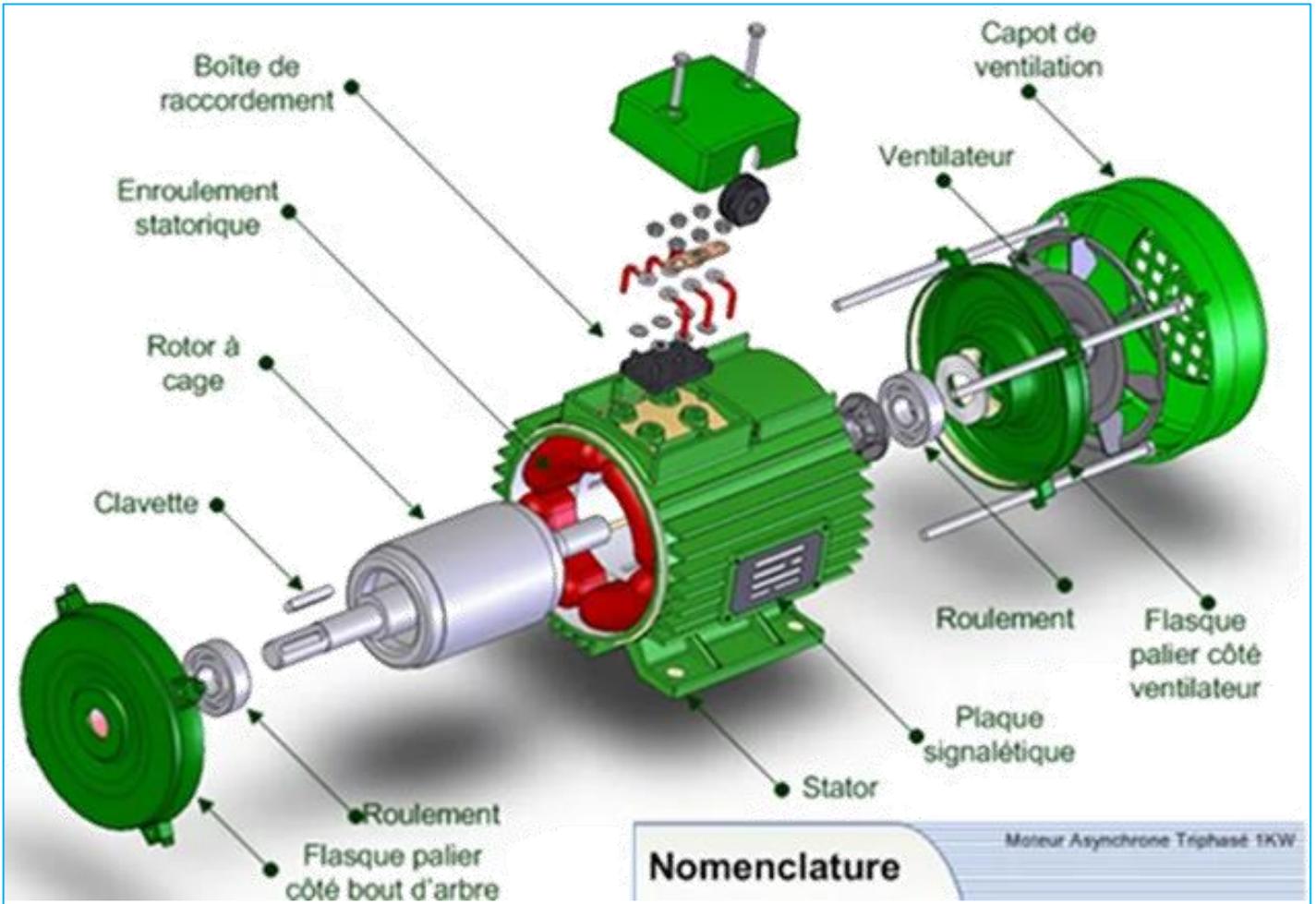
$N_s = 1500 \text{ tr.mn}^{-1}$

4 paires de pôles

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{4}$$

$N_s = 750 \text{ tr.mn}^{-1}$

Le MAS : Une vue éclatée

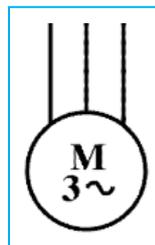


Schématisation et branchement

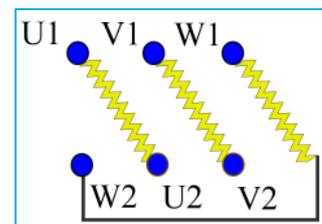
- Sur la **plaque signalétique**, les constructeurs indiquent :
 - Les 2 tensions nominales du moteur, dont la plus faible correspond à la tension d'emploi de chaque bobinage (U_b), ce qui indique les montages possibles, Etoile (Y) ou Triangle (Δ).
 - La fréquence du réseau triphasé (f).
 - Les courants nominaux en (Y) et en (Δ).
 - La puissance utile (P_u) délivrée sur l'arbre moteur.
 - La vitesse nominale du rotor (N).
 - Le rendement (η).
 - Le facteur de puissance ($\cos \phi$), qui permet de calculer la puissance absorbée.



Plaque signalétique

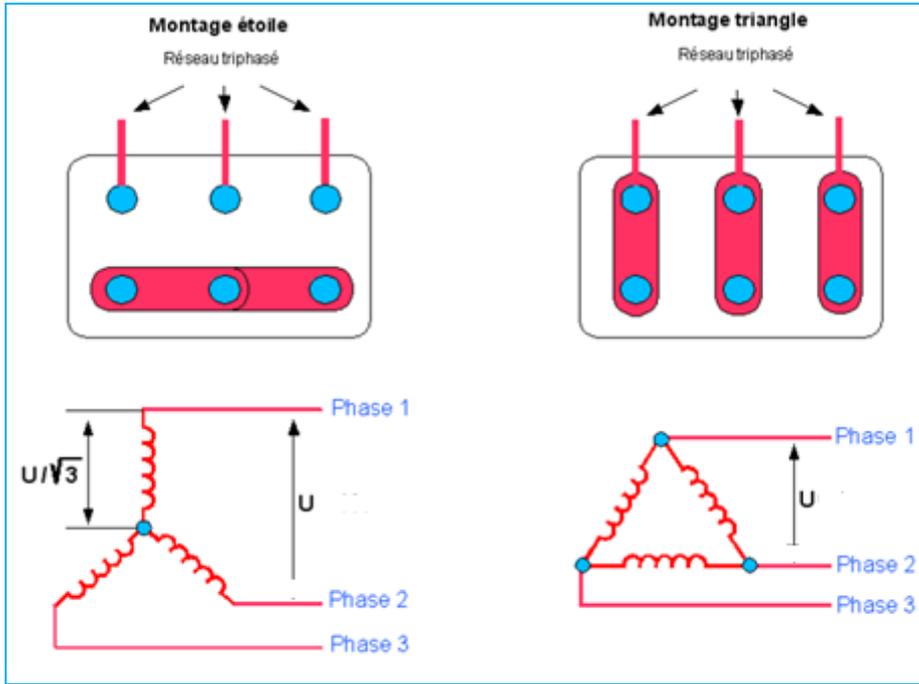


Schématisation
(Moteur à cage)



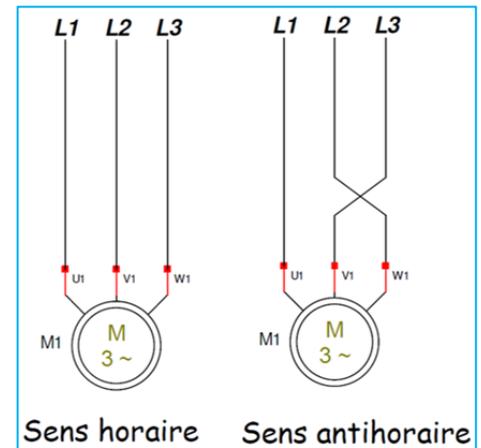
Boite à bornes

- Si le réseau d'alimentation triphasé a une tension entre phases (**tension composée U**) de même valeur que U_b , on peut directement alimenter chaque bobinage sous cette tension. Le couplage qui en résulte est le **couplage Triangle**.
- Si le réseau d'alimentation triphasé a une tension entre le neutre et phases (**tension simple V**) de même valeur que U_b , la tension composée du réseau est $U = V\sqrt{3} = U_b\sqrt{3} > U_b$; on ne peut pas alors alimenter directement chaque bobinage sous cette tension. Le couplage utilisé sera le **couplage Etoile**.

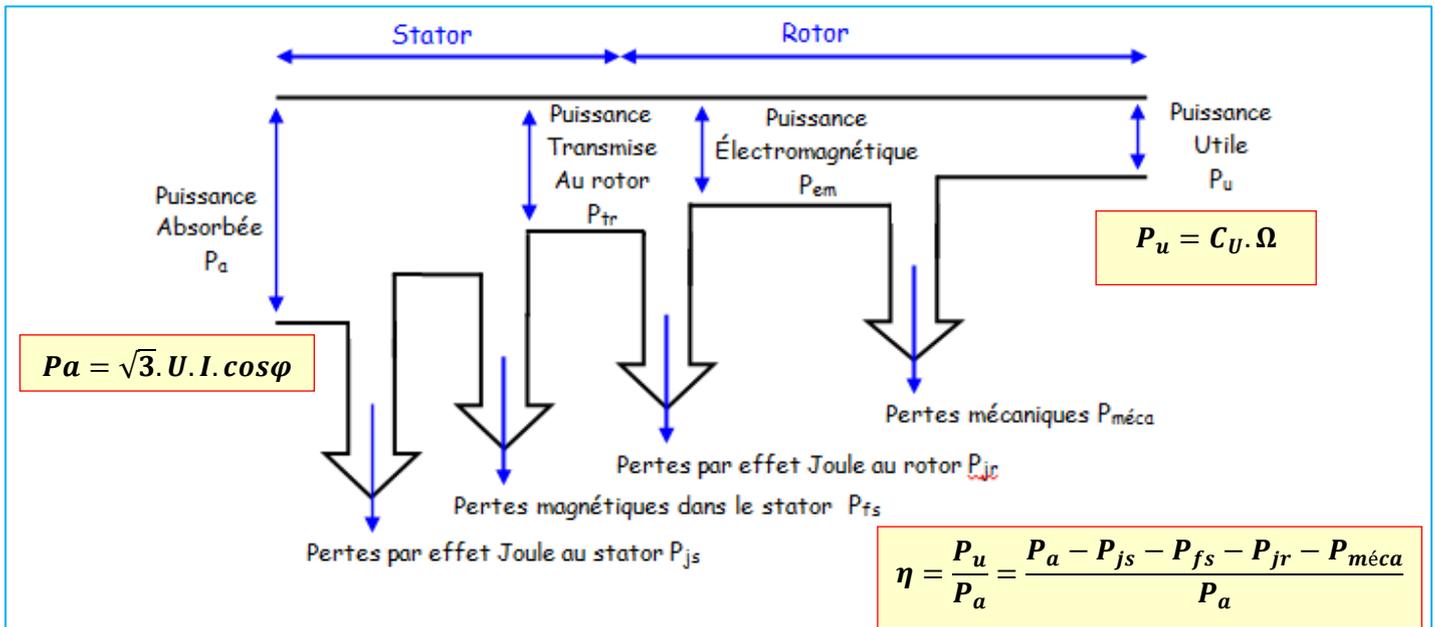


Inversion du sens de rotation

- 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 monophasé

- Il existe une grande variété de moteurs monophasés adaptés à une multitude d'applications domestiques ou industrielles. Ici, on traite particulièrement du moteur asynchrone monophasé que l'on rencontre le plus souvent ; la structure et les montages de base sont donnés ci-dessous.
- Les **2 enroulements** dits **principal** et **auxiliaire** sont disposés à **90°** l'un de l'autre. Le moteur fonctionne alors en **moteur diphasé**. Différentes techniques existent pour déphaser les champs créés par les bobines ; la plus utilisée consiste en la mise en série d'un **condensateur** avec l'une des 2 bobines.

Schéma de principe pour 1 sens de rotation

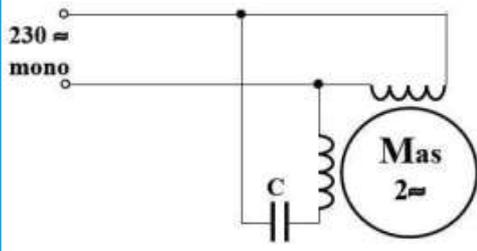
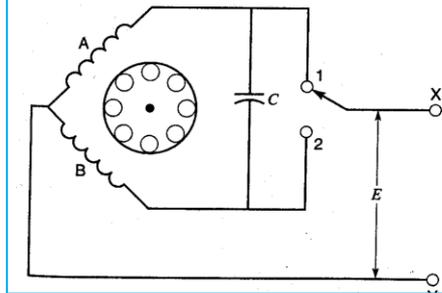
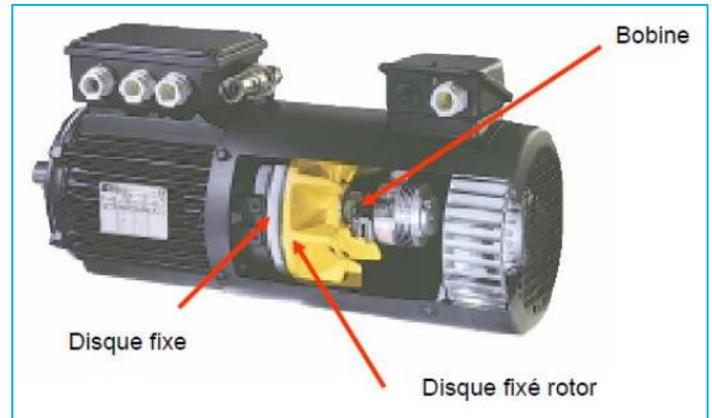
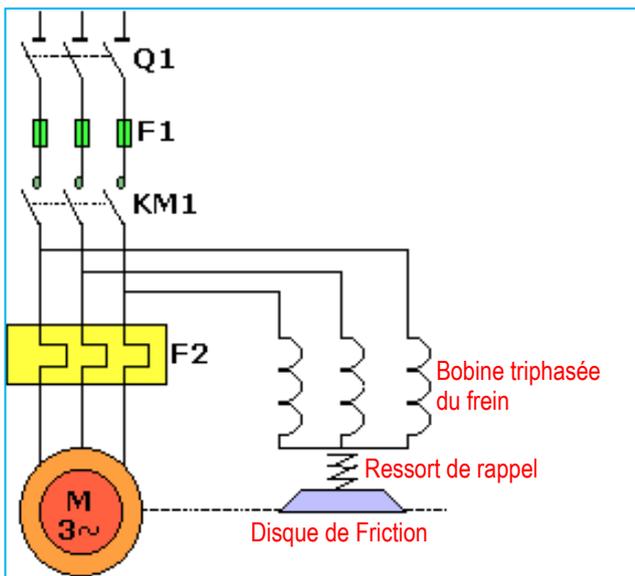


Schéma de principe pour 2 sens de rotation

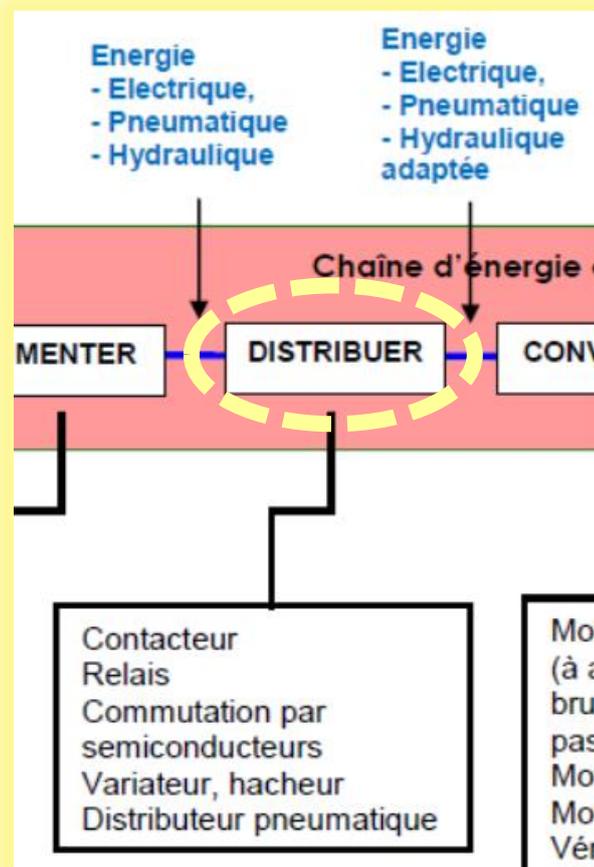


Le MAS avec freinage à manque de courant

- 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 (bâti) avec le disque du Rotor.
- Il existe des moteurs freins avec un électroaimant à courant continu, par l'intermédiaire d'un pont de diodes.



Fonction Distribuer

Pré-actionneurs électriques



Introduction

- La partie commande d'un système automatisé met en œuvre une **énergie faible**. Elle est donc incapable d'envoyer directement l'énergie nécessaire à l'actionneur ; d'où l'utilisation des **pré-actionneurs** qui assurent la **distribution** de l'énergie aux actionneurs.
- Dans les circuits électriques, un pré-actionneur est généralement soit :
 - Des composants électromécaniques comme :
 - Un **relais** électromagnétique, utilisé relativement pour les faibles puissances.
 - Un **contacteur** électromagnétique, utilisé relativement pour les grandes puissances.
 - Des composants **électroniques**, qualifiés de « **Convertisseurs statiques** » comme :
 - Un **hacheur** pour la commande d'une machine à courant continu (MCC).
 - Un **onduleur** pour la commande d'un moteur asynchrone triphasé (MAS).



Relais



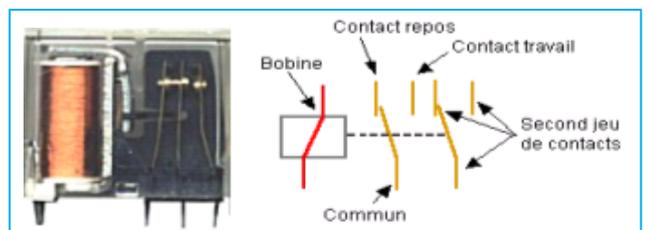
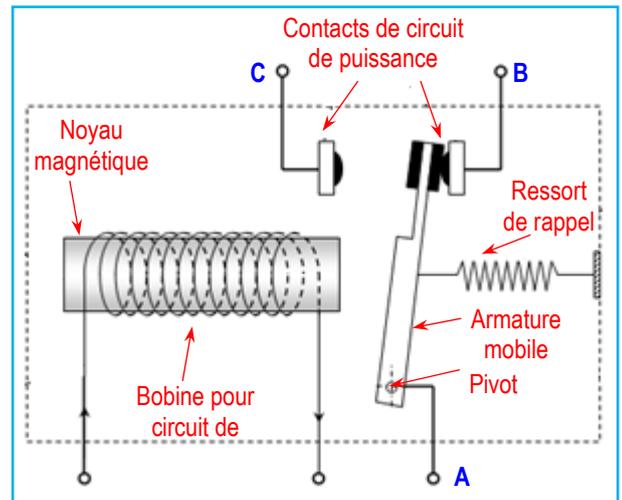
Contacteur

Le relais

- Le relais est un composant électrique réalisant la fonction **d'interfaçage** entre un circuit de commande et un circuit de puissance ; il effectue aussi une **isolation galvanique**, i.e. une séparation électrique entre les 2 circuits.

Constitution et principe de fonctionnement

- Le fonctionnement d'un relais est comme suit :
 - Lorsqu'un courant circule dans la bobine, il se crée **champ magnétique**, avec des pôles **Nord** et **Sud** aux extrémités du noyau.
 - 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 habituellement munis de 2 types de contacts :
 - Les **contacts à fermeture**, normalement ouverts (**NO**).
 - Les **contacts à ouverture**, normalement fermés (**NF**).
 - La position normale du contact est la position qu'il occupe à l'état de repos, i.e. lorsque la bobine du relais n'est pas alimentée.



Caractéristiques fondamentales

- **Tension d'alimentation** : C'est la tension nominale qui permet d'exciter la bobine.
- **La résistance de la bobine** : C'est un paramètre permettant de déterminer le courant circulant dans le circuit de commande.
- **Le courant des contacts** : C'est le courant maximal que peut commuter les contacts de relais.

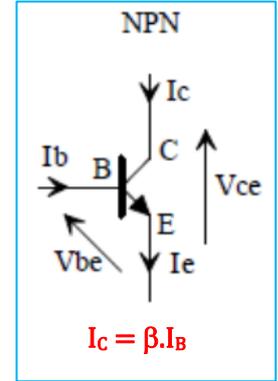


Application : Commande d'une MCC

- Généralement une MCC est commandée par une 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**.

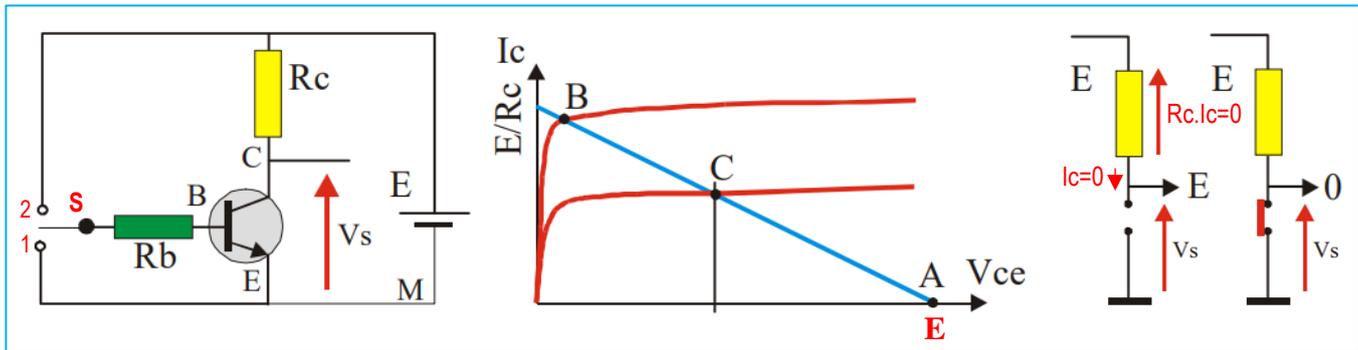
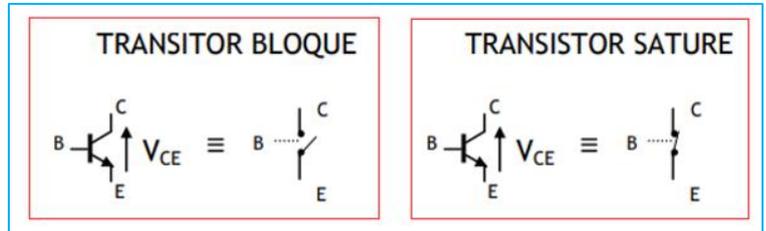
Le transistor

- Le transistor est un **semi-conducteur** qui permet 2 types de fonctionnement :
 - Fonctionnement en régime linéaire (amplificateur), non étudié ici.
 - 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, où les broches B, C et E représentent respectivement la **Base**, le **Collecteur** et l'**Emetteur**.
 - β représente le gain de courant entre I_C et I_B ; il est typiquement égal à 100.



Le transistor en commutation

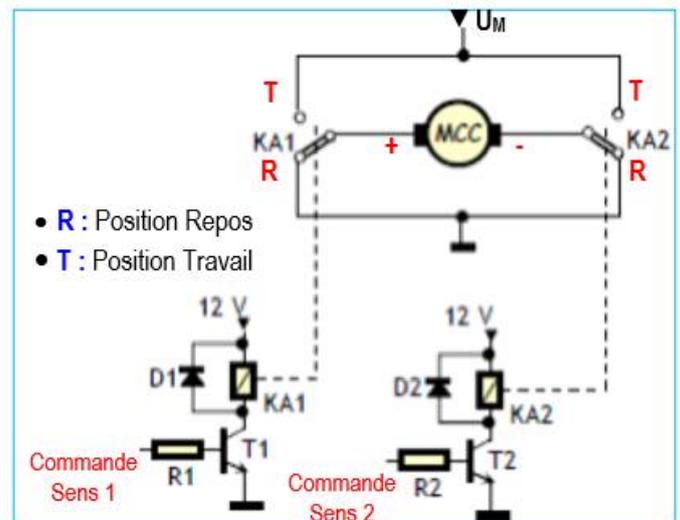
- Le transistor en **commutation** est utilisé afin d'ouvrir ou de fermer un circuit.
- Ainsi, le circuit de sortie du transistor est équivalent à un **interrupteur commandé** par une tension.



- Le commutateur S en position 1, $I_B = 0$ et $I_C = \beta \cdot I_B = 0$; le transistor est bloqué et $V_S = E - R_C \cdot I_C = E$.
- Le commutateur S en position 2, $I_B \neq 0$ et $I_C = \beta \cdot I_B \neq 0$; le transistor est saturé et $V_S = 0$.
- La condition de saturation est : $R_b < \beta \cdot R_c$.

Commande d'une MCC avec 2 sens de rotation

- La commande du sens 1 sature **T1** et **KA1** est excitée (**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 excitée (**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 ; elles sont connues sous la désignation de « **diode de roue libre** ».



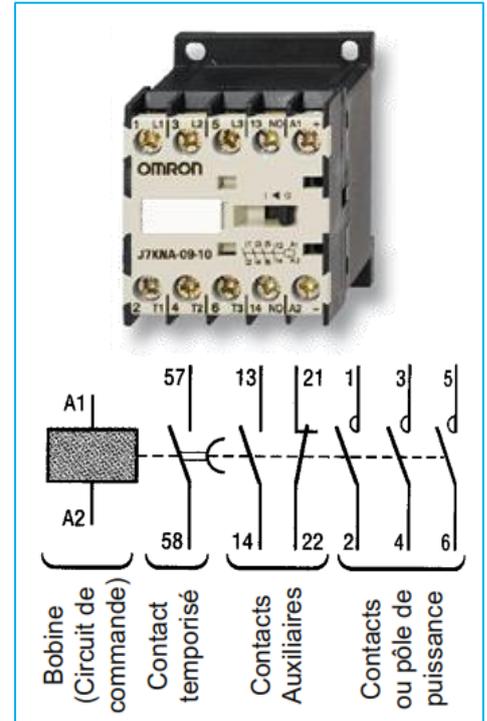
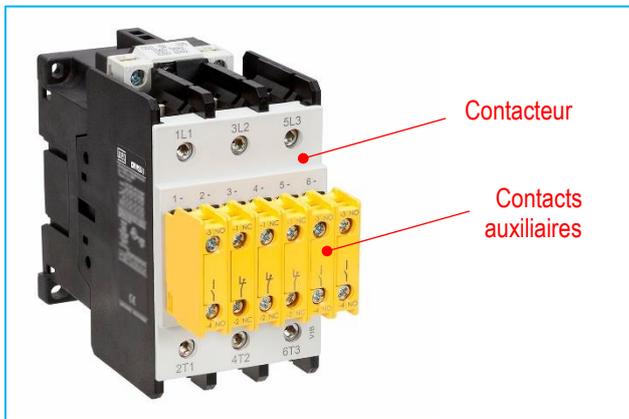


Le contacteur

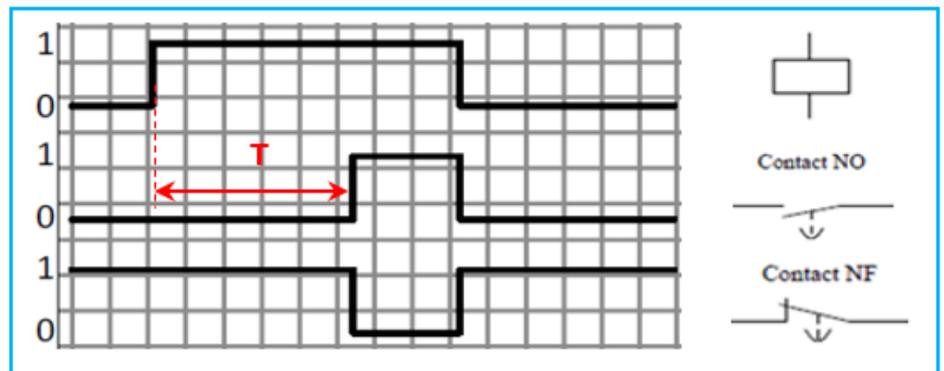
- Un contacteur est un **relais électromagnétique particulier**, pouvant commuter de **fortes puissances** grâce à un dispositif de coupure **d'arc électrique**.
- **L'arc électrique** se produit dans un interrupteur, quand on **commute un fort courant** dans une **charge inductive** tel que le stator d'un MAS, par exemple. On dit qu'un contacteur a un **pouvoir de coupure**.

Constitution et principe de fonctionnement

- Sa constitution est comme suit :
 - Une **bobine** de commande du contacteur, qui peut être en courant continu ou en courant alternatif.
 - Des **pôles principaux** de puissance.
 - Un **contact auxiliaire**, avec la possibilité d'ajouter au contacteur 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.

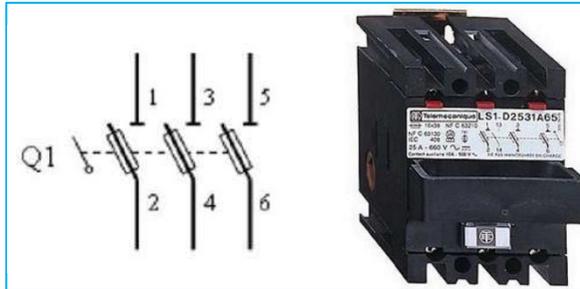


Application : Commande d'un MAS

- Dans une installation électrique typique à base d'un MAS, le contacteur est normalement accompagné par les appareillages suivants, qui permettent à l'installation à base du moteur de fonctionner dans de bonnes conditions, i.e. assurer la **protection des biens et des personnes** :
 - **Sectionneur** pour l'isolement entre l'application et le réseau, donc la protection des personnes.
 - **Relais thermique** contre les surcharges, pour protéger le moteur
 - **Disjoncteur** contre les surcharges et les courts-circuits, pour protéger l'ensemble des biens.

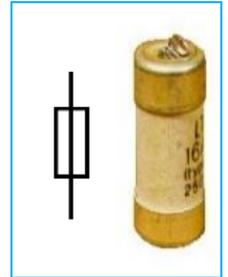
Le sectionneur

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



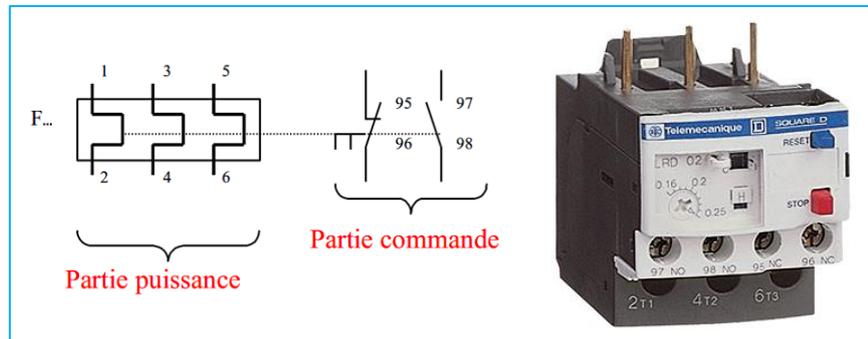
Le fusible

- 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.



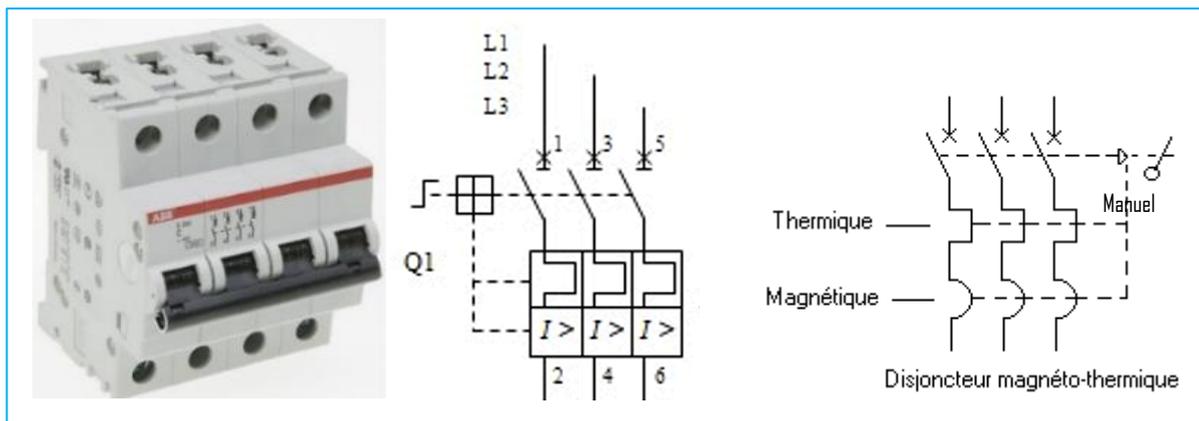
Le relais thermique

- L'apparition d'une surcharge 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.

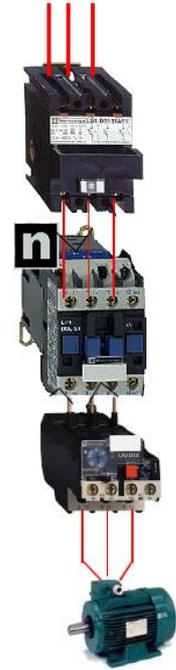
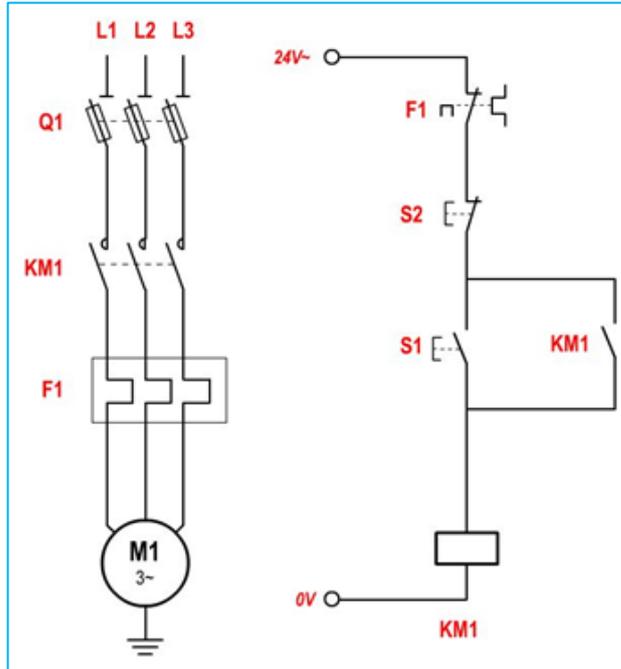


Le disjoncteur magnétothermique

- 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 **disjoncte** (coupe) le circuit, ce qui peut aussi être fait manuellement.

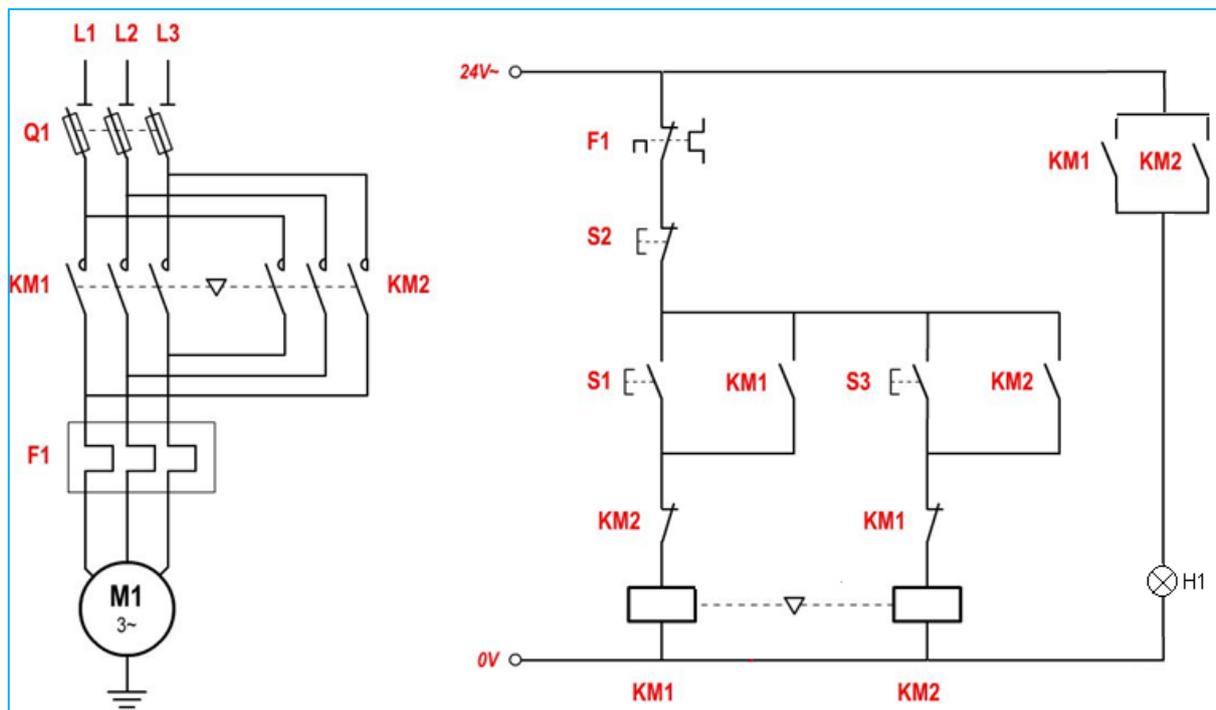


Montage avec un seul sens de rotation



- Si le bouton poussoir **S1** du circuit de commande est actionné, la bobine du contacteur **KM1** est alimentée ; le contact KM1 du circuit de commande se ferme ainsi que les contacts KM1 du circuit de puissance, ce qui entraîne la rotation du moteur **M1**.
- Si S1 est relâché le contact KM1 du circuit de commande maintient l'alimentation de la bobine du contacteur (mémoire). On parle alors **d'auto-maintien** ou **d'auto-alimentation**.
- Pour arrêter le moteur M1, on appuie sur le bouton poussoir **S2**, ce qui ouvre le circuit de commande ; la bobine KM1 n'est plus alimentée et les contacts KM1 (commande et puissance) sont ouverts.
- Si en fonctionnement (KM1 fermé), il y a une surcharge, le relais thermique **F1** détecte cette surcharge, ouvrant de cet fait le contact F1 qui lui est associé, ce qui ouvre le circuit de commande, désalimente M1 et le protège.

Montage avec 2 sens de rotation



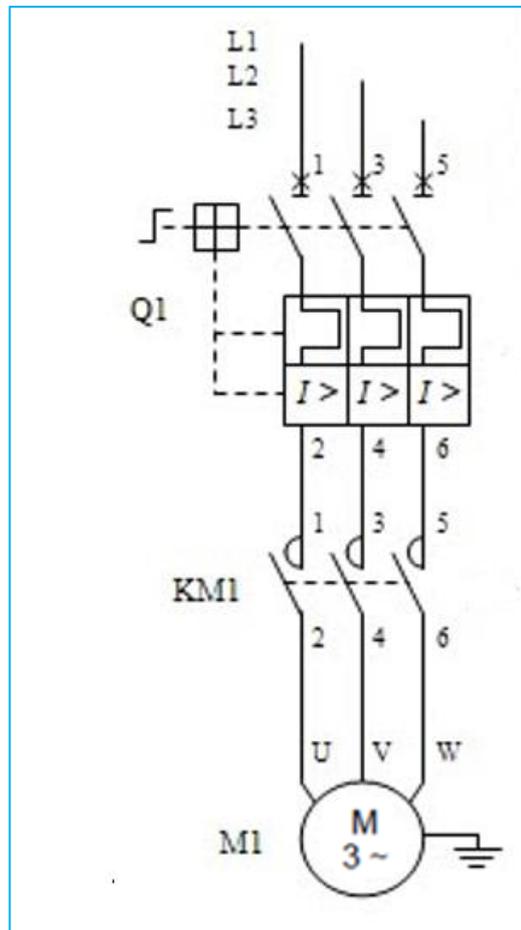


- **S1** permet le fonctionnement dans le 1e sens.
- **S3** permet le fonctionnement dans le 2e sens.
- Il y a **verouillage électrique** entre **KM1** et **KM2**, i.e. leur fonctionnement est exclusif :
 - Si KM1 est actionné, son contact fermé au repos en série avec la bobine KM2 empêche celle-ci d'être 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.



Montage avec 2 appareillages

- Dans cet exemple simple, le disjoncteur magnétothermique joue le rôle du relais thermique et du sectionneur porte-fusibles.



Les convertisseurs statiques

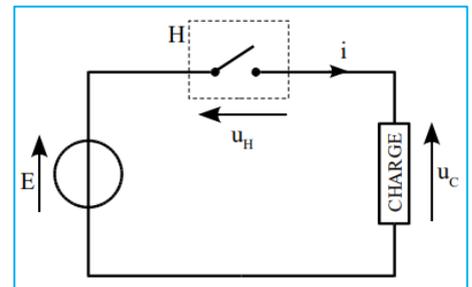
- Un convertisseur statique est désigné ainsi car la conversion ne contient pas de éléments mobiles comme dans les moteurs et les vérins.
- Un convertisseur statique transforme de **l'énergie électrique** disponible en une **forme adaptée** à l'alimentation d'une charge.
- On note en particulier le Redresseur étudié au chapitre 1 de la fonction « **Alimenter** », le Hacheur et l'Onduleur qui seront étudiés dans ce qui suit.
- Le tableau suivant résume la fonction de ces 3 convertisseurs.

Convertisseur	Tension d'entrée	Tension de sortie	Symbole
Redresseur (Convertisseur Alternatif/Continu)			 Tension alternative → Tension continue valeur moyenne fixe
Hacheur (Convertisseur Continu /Continu)		 $V_s \text{ moyen} = \alpha \cdot E$	 Tension continue fixe → Tension continue valeur moyenne réglable
Onduleur (Convertisseur Continu/Alternatif)			 Tension continue fixe → Tension alternative fréquence réglable

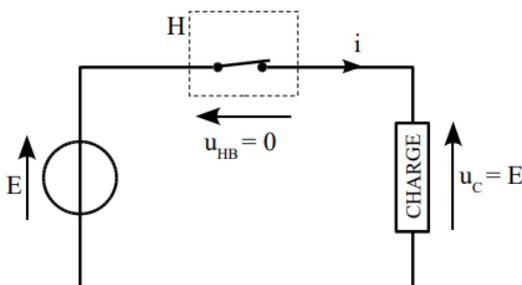
Le hacheur

Principe de fonctionnement

- Le montage est composé d'une source de tension continue fixe E, d'un interrupteur unidirectionnel H et d'une charge.
- L'interrupteur H est un **transistor**, qui fonctionne en régime de **commutation** (bloqué/saturé).
- L'interrupteur H s'ouvre et se ferme périodiquement ; on appelle T cette période et $f = 1/T$ la **fréquence de hachage**.
- La durée pendant laquelle l'interrupteur H est fermé s'appelle t_F .
- On définit le **rapport cyclique** par : $\alpha = \frac{t_F}{T}$ avec $0 \leq \alpha \leq 1$. On a alors :

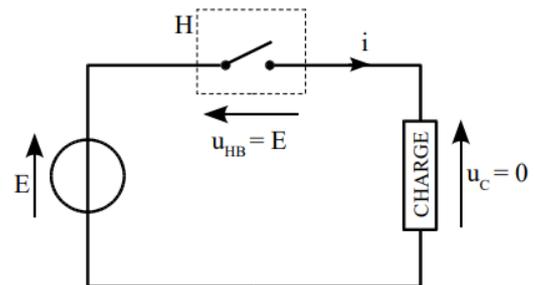


Pour $0 \leq t < t_F$, l'interrupteur H est fermé.



$t_F = \alpha \cdot T$

Pour $t_F \leq t < T$ l'interrupteur H est ouvert.

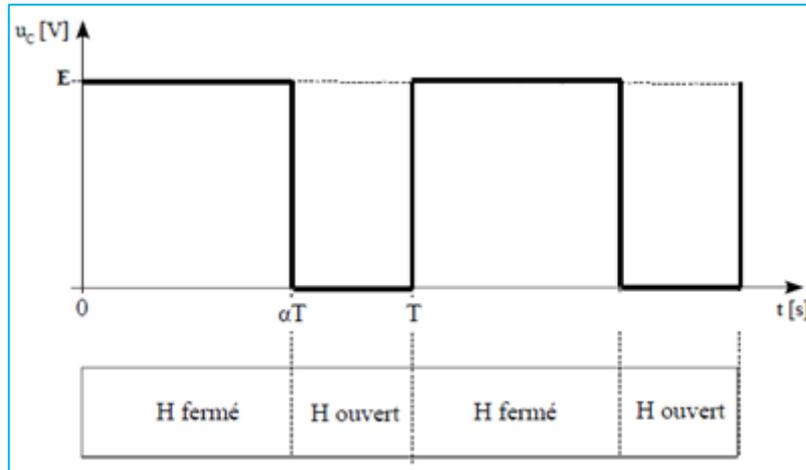


- La valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge est :

$$\langle U_C \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u_C(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt$$

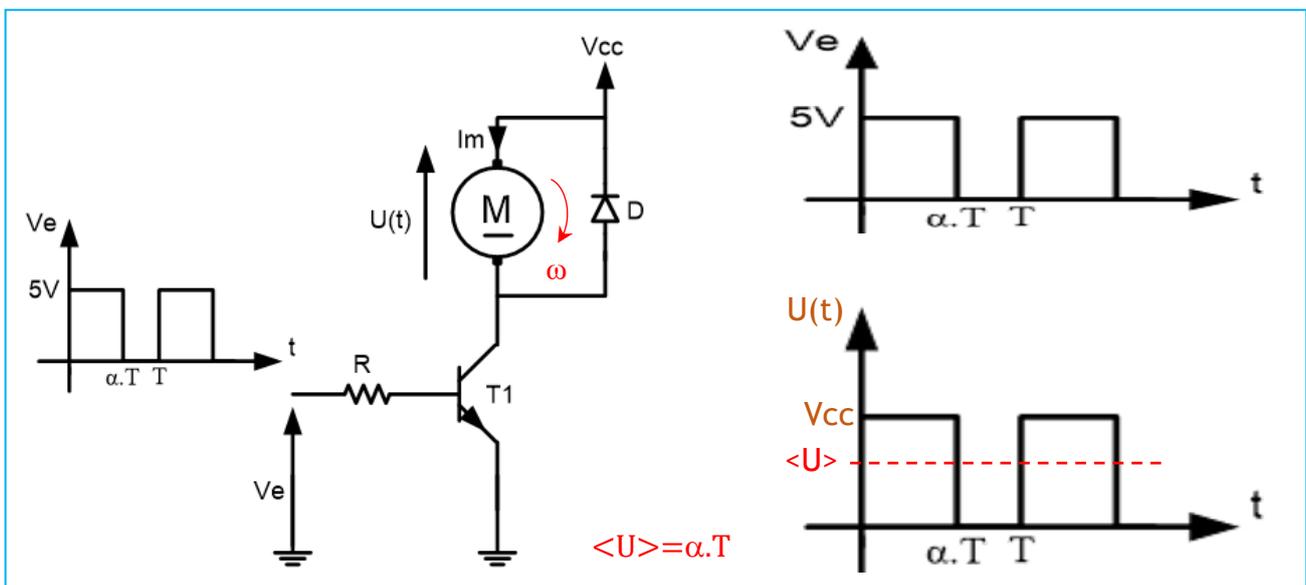
$$\langle U_C \rangle = \frac{1}{T} [E \cdot t]_0^{\alpha T} = \frac{1}{T} [E\alpha T - 0] = \frac{E\alpha T}{T}$$

$$\langle U_C \rangle = \alpha E$$



Application 1 : Variation de la vitesse d'une MCC avec 1 seul sens de rotation

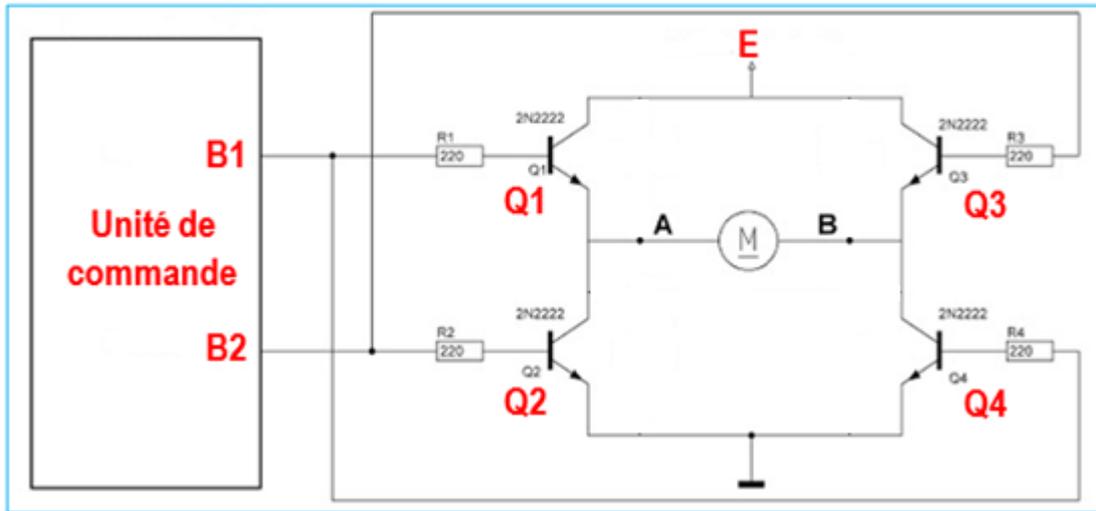
- Pour le principe du cas étudié, on utilise un transistor en commutation.
- $V_e = 5\text{ V}$, le transistor est saturé (équivalent à un interrupteur fermé), le moteur est alimenté par V_{cc} .
- $V_e = 0\text{ V}$, le transistor est bloqué (équivalent à un interrupteur ouvert), le moteur n'est plus alimenté.
- On a alors la forme des signaux $V_e(t)$ et $U(t)$ de la figure ci-dessous.
- La MCC est sensible à la valeur moyenne ($\langle U \rangle = \alpha \cdot T$) et la fréquence est suffisamment élevée pour avoir une rotation continue et sans bruit du moteur.
 - Alors, en faisant varier α , on fait varier $\langle U \rangle$, ce qui fait varier ω , puisque $\langle U \rangle = k \cdot \omega$.
 - La diode D est une diode de roue libre, qui protège le transistor $T1$ contre l'effet inductif du moteur M .





Application 2 : Variation de la vitesse d'une MCC avec 2 sens de rotation

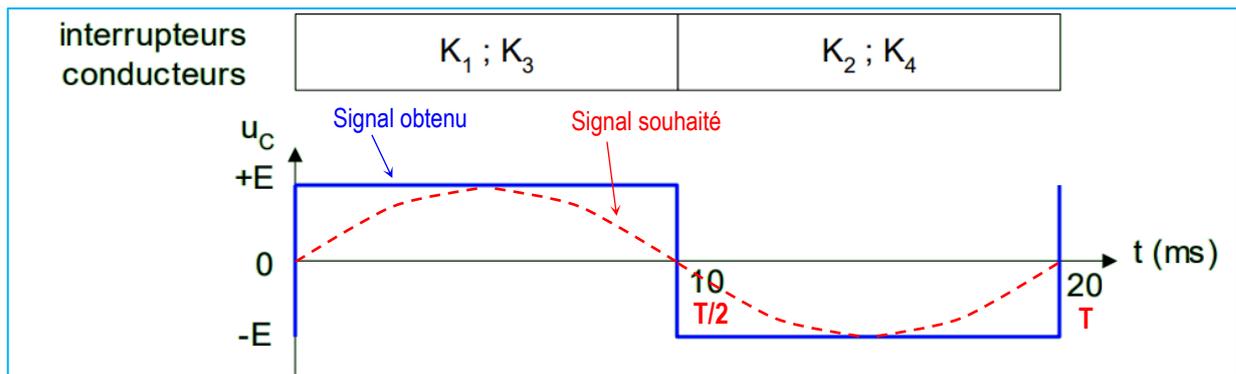
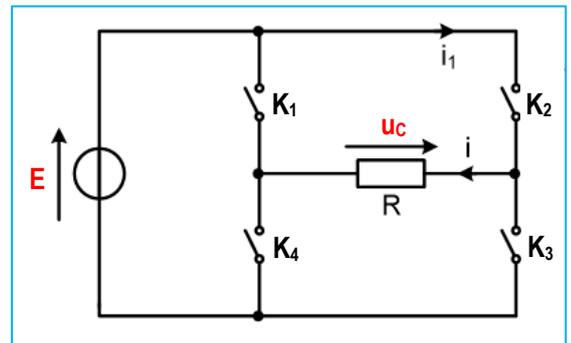
- Pour le principe du cas étudié, on utilise 4 transistors en commutation, formant un montage dit « **pont en H** ».
- **$VB_2 = 5\text{ V}$ et $VB_1 = 0$** : Q2 et Q3 sont passants et le courant circule dans le moteur **M** dans le sens (**B vers A**).
- **$VB_1 = 5\text{ V}$ et $VB_2 = 0$** : Q1 et Q4 sont passants et le courant circule dans le moteur **M** dans le sens (**A vers B**).
- **$VB_1 = 0$ et $VB_2 = 0$** : Q1, Q2, Q3 et Q4 sont bloqués et le courant dans le moteur **M** est nul.
- **$VB_1 = 5\text{ V}$ et $VB_2 = 5\text{ V}$** : Dans une telle situation, un **court-circuit** de l'alimentation E 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.



L'onduleur

Principe de fonctionnement de base pour une phase

- Le montage est composé d'une source de tension continue fixe E, des interrupteurs électroniques K_1, K_2, K_3 et K_4 et d'une charge R.
- Les interrupteurs K_j s'ouvrent et se ferment périodiquement ; T est alors la période du signal alternatif de sortie de l'onduleur.
 - **$0 < t < T/2$** : K_1 et K_3 sont fermés : $u_c = +E$.
 - **$T/2 < t < T$** : K_2 et K_4 sont fermés : $u_c = -E$.
- Ainsi, la forme se rapproche, dans une certaine mesure, d'une forme sinusoïdale. En effet, un système de commutation et de **filtrage** approprié permet ce rapprochement de la **sinusoïde pure**.



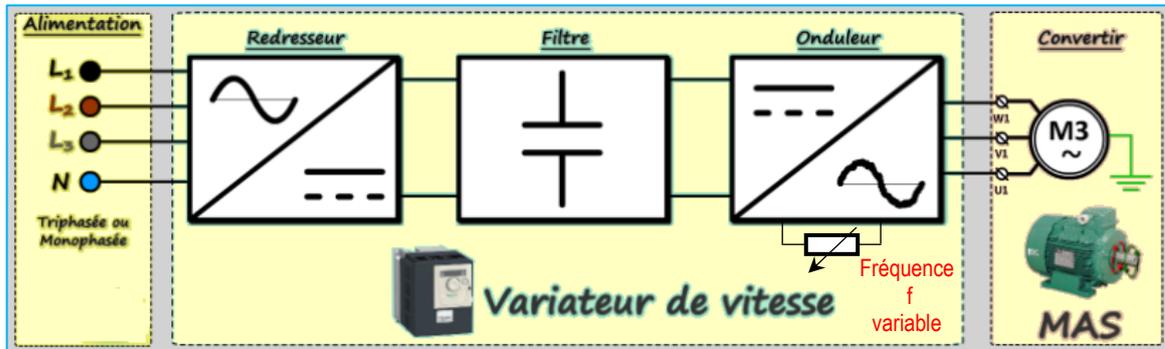
Application : Variation de vitesse d'un MAS avec l'équipement Variateur de vitesse

- On sait que :

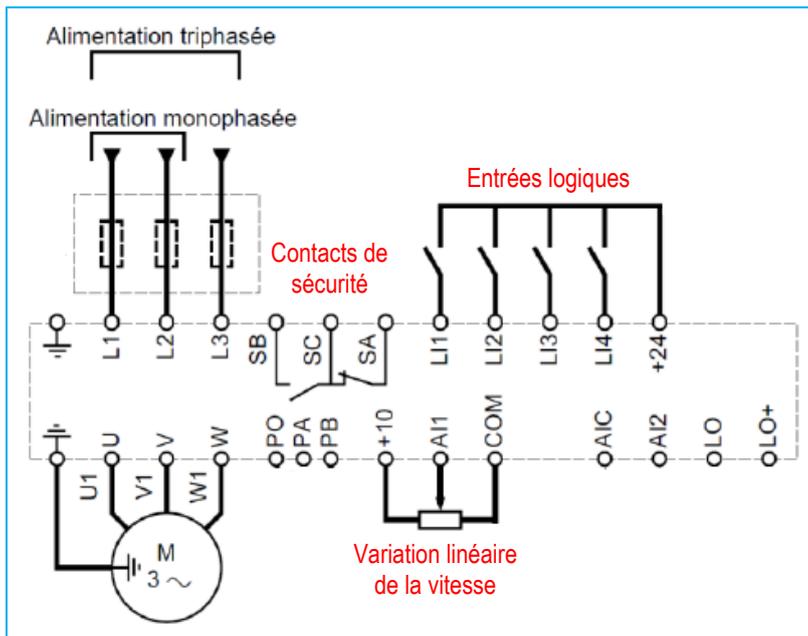
$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \text{ et } N_s = \frac{f}{p} \Rightarrow N = \frac{f}{p}(1 - g) \Rightarrow N \text{ dépend de } f.$$

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

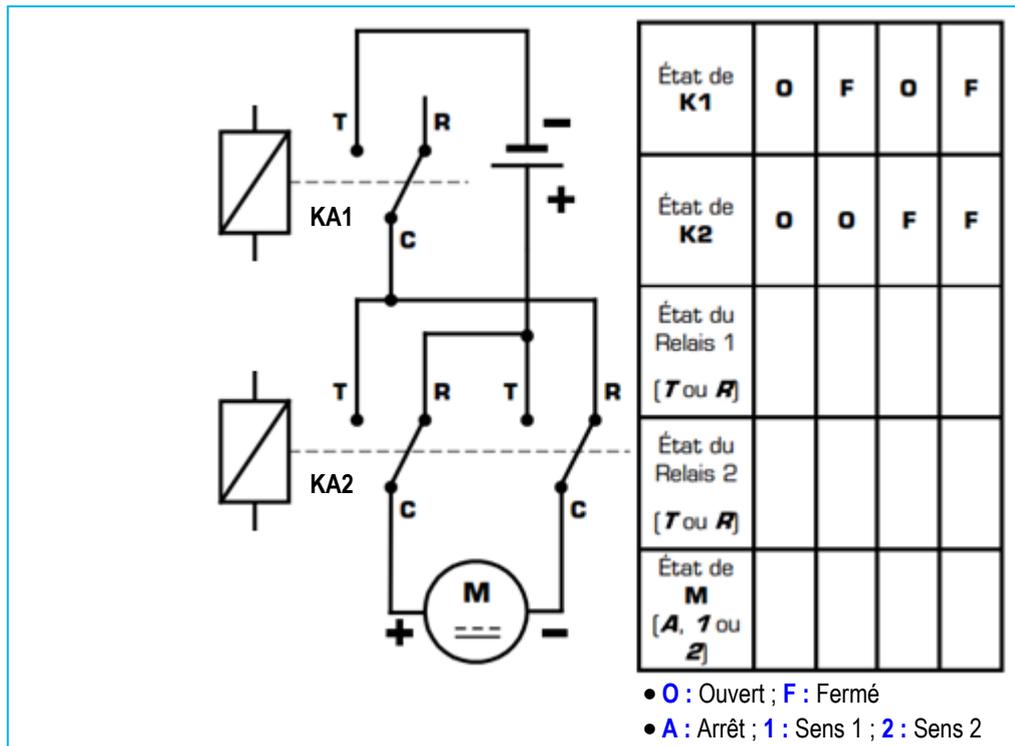
- SA, SB et SC** : Contact de sécurité ; SB et SC reliés en cas de bon fonctionnement du variateur.

Exercices (Enoncés)

Exercice 1 : Montage de MCC avec 2 sens de rotation

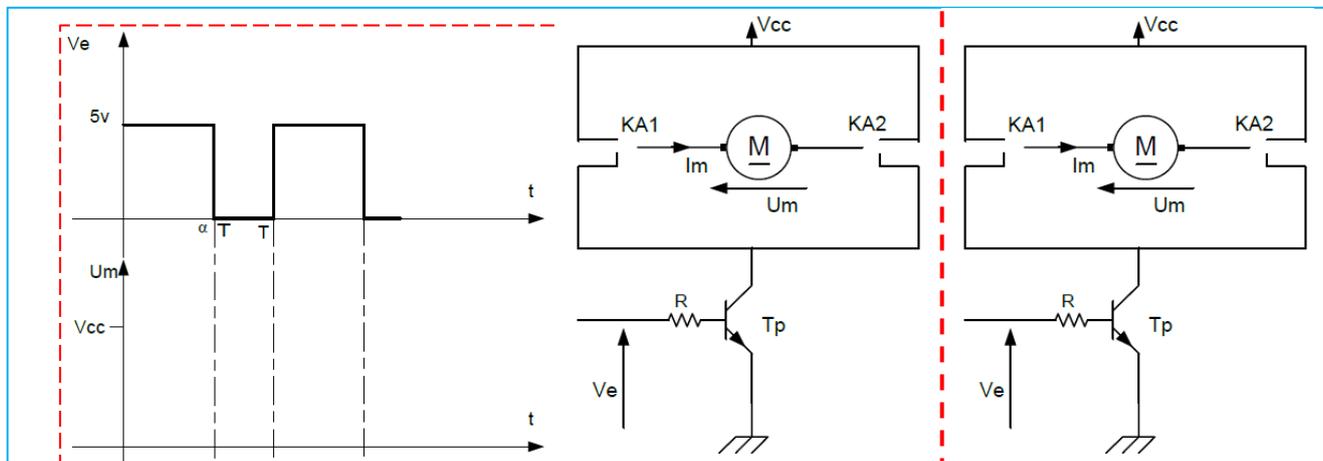
Soit le montage basique pour la commande d'une MCC avec 2 sens de rotation.

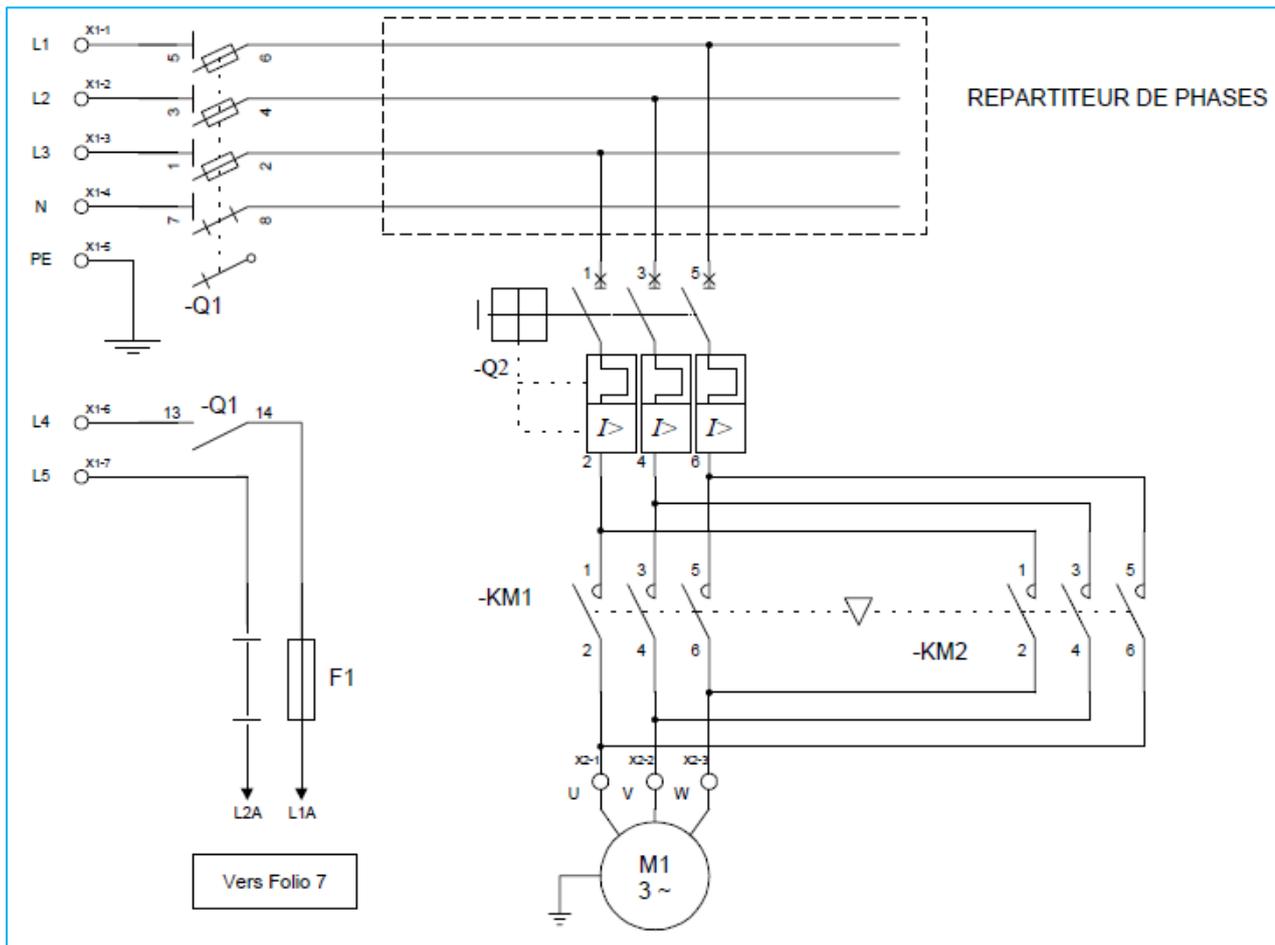
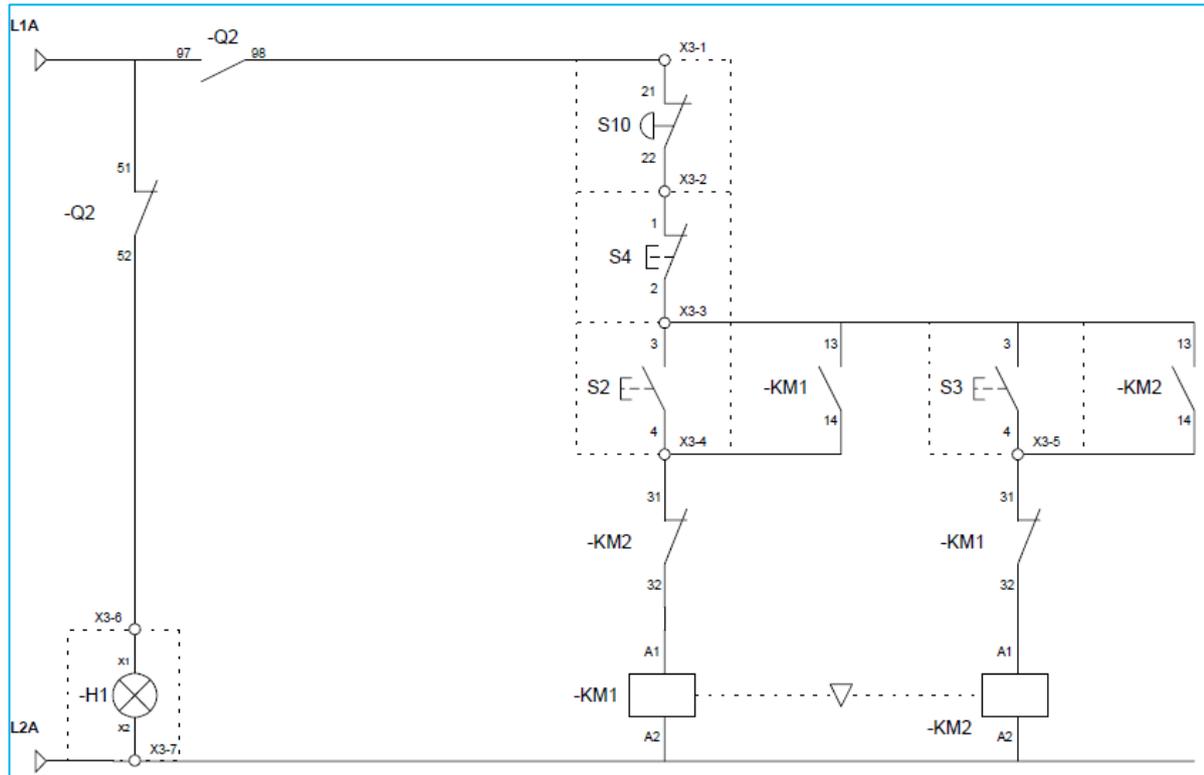
1. Compléter le montage des relais KA1 et KA2, via 2 transistors T1 et T2 et 2 interrupteurs de commande K1 et K2.
2. Compléter le tableau de fonctionnement du montage et préciser le rôle dans le montage de K1 et de K2.



Exercice 2 : Variation de la vitesse d'une MCC avec 2 sens de rotation

1. Indiquer les positions des contacts des relais KA1 et KA2 pour les 2 sens de rotation du moteur M.
2. Compléter la forme du signal $U_m(t)$, pour KA1 actionné.
3. Donner l'expression de $\langle U_m \rangle$.



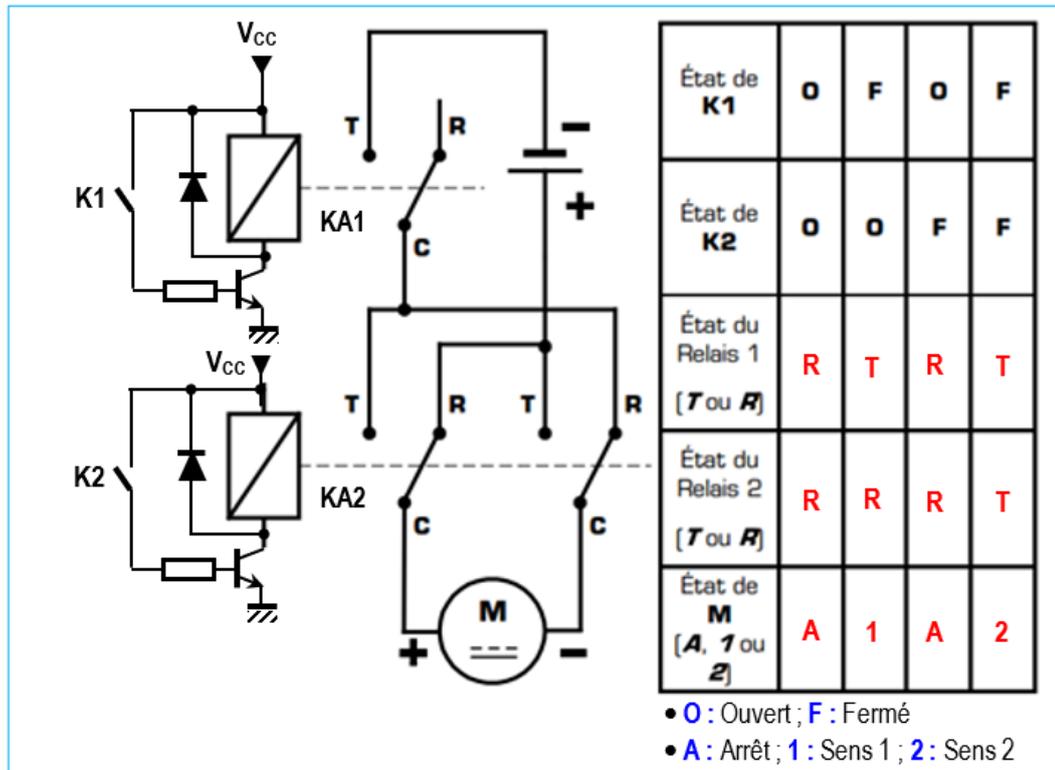




Exercices (Corrigés)

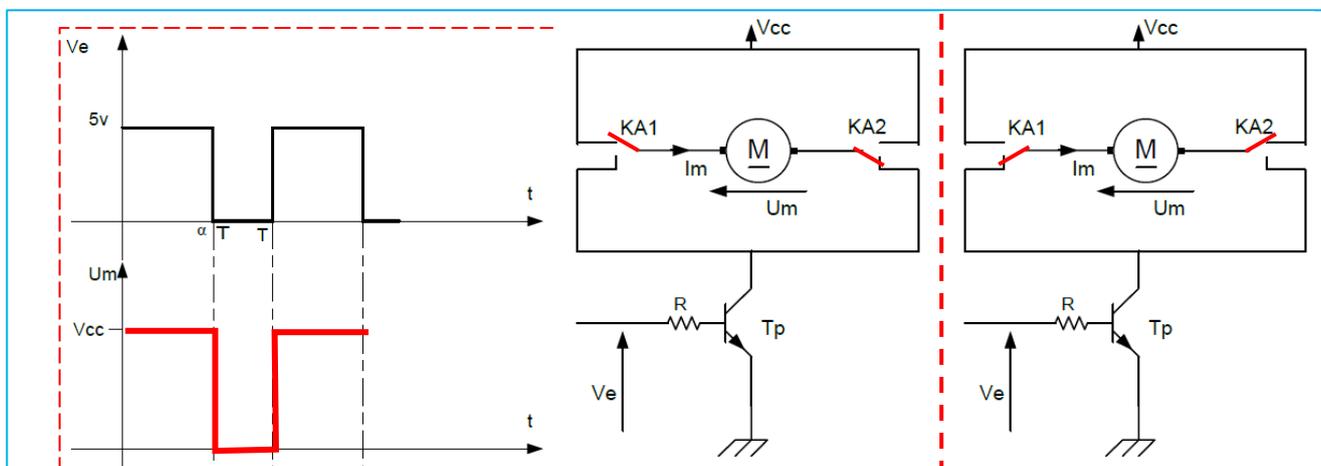
Exercice 1 : Montage de MCC avec 2 sens de rotation

1. Montage des relais KA1 et KA2
2. Tableau de fonctionnement : KA1 sert Marche/Arrêt et KA2 sert pour le sens de rotation.



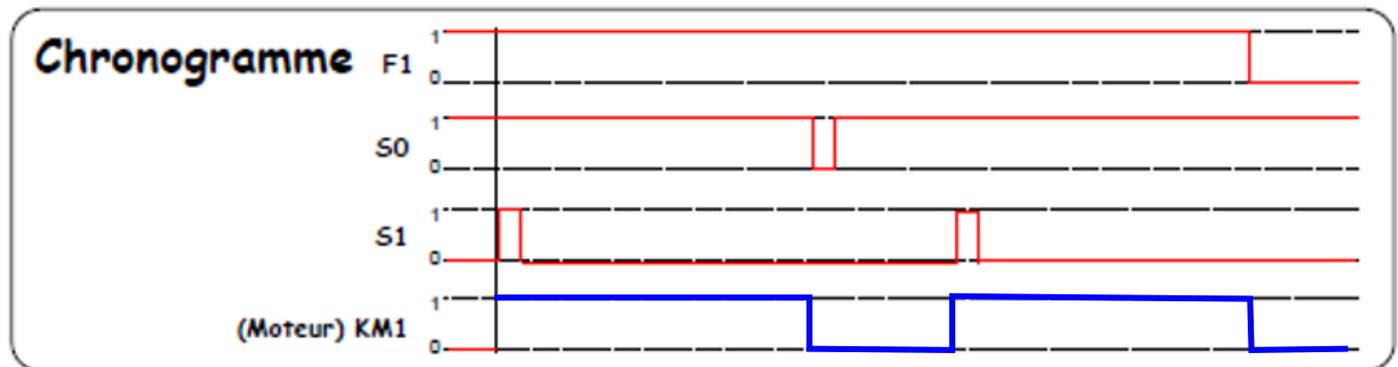
Exercice 2 : Variation de la vitesse d'une MCC avec 2 sens de rotation

1. Indiquer les positions des contacts des relais KA1 et KA2 pour les 2 sens de rotation du moteur M.
2. Compléter la forme du signal $U_m(t)$.
3. $\langle U_m \rangle = \alpha \cdot V_{cc}$.





Exercice 3 : Commande de moteur asynchrone

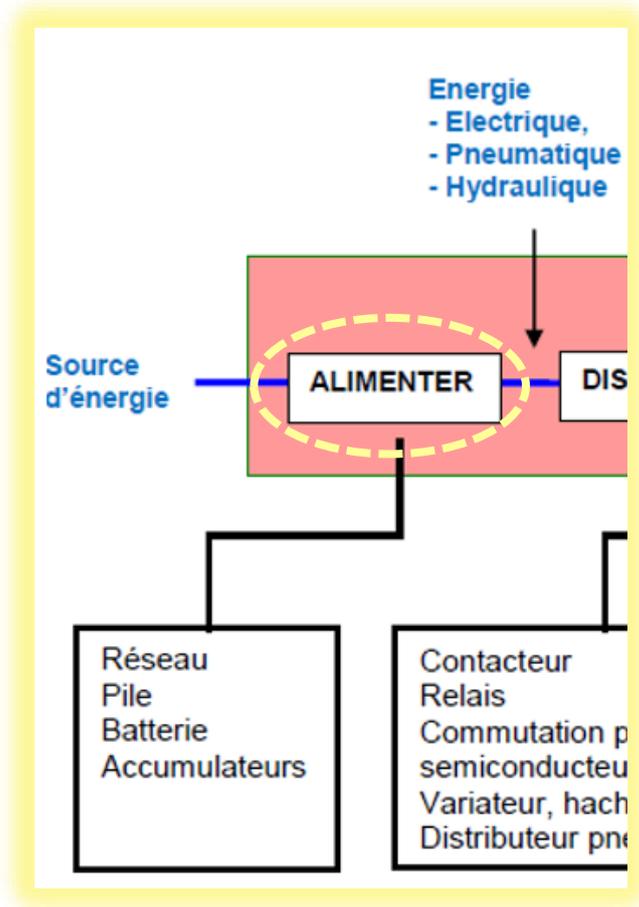


Exercice 4 : Machine de tournage (tour conventionnel)

1. Montage Etoile, car d'après la plaque signalétique on a 230 V pour Δ et 400 V pour Y.
2. Rôle des boutons poussoirs :

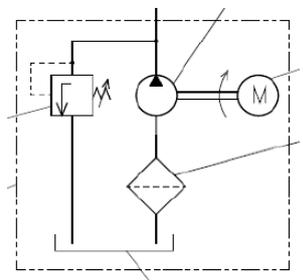
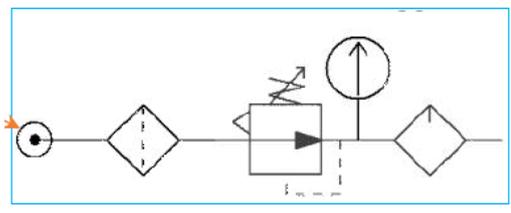
S2	Marche sens 1
S3	Marche sens 2
S4	Arrêt
S10	Arrêt d'urgence

3. Le voyant H1 signale que le système est sous tension.
4. Les types de verrouillage utilisé : mécanique et électrique.



Fonction **Alimenter**

Alimentations pneumatique et hydraulique





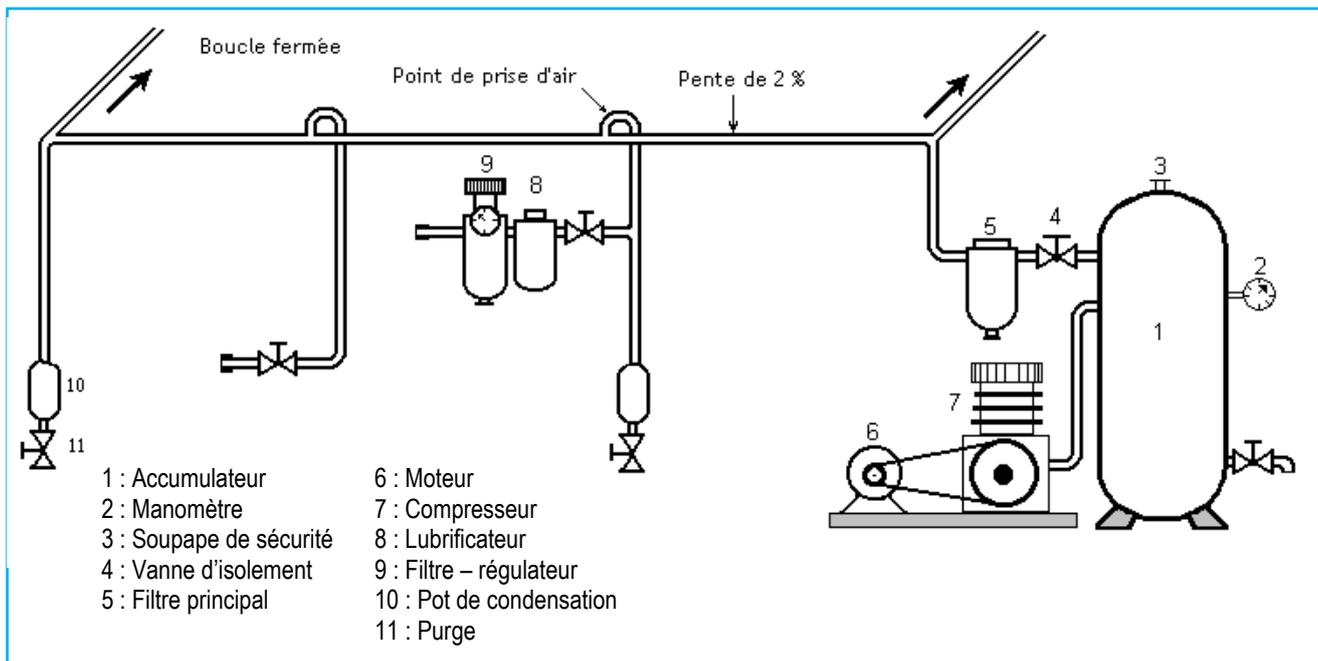
Introduction

- Un actionneur pneumatique est un dispositif qui transforme l'énergie de l'air comprimé en travail mécanique. Parmi les actionneurs pneumatiques les plus utilisés dans les systèmes automatisés, on trouve :
 - Le vérin pneumatique.
 - Le générateur de vide Venturi.
- Ces derniers tirent leur puissance de l'énergie pneumatique, dont la source est l'air comprimé.



Constitution d'une installation pneumatique

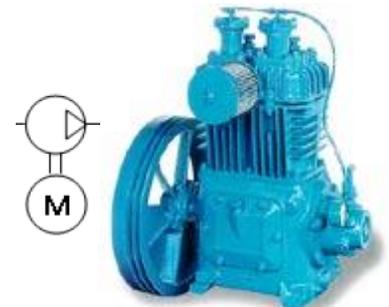
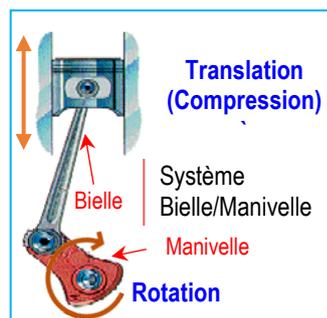
- Une installation pneumatique est composée de :
 - Un générateur d'air comprimé (compresseur).
 - Un réservoir.
 - Un réseau de canalisations.
 - Des appareils auxiliaires assurant diverses fonctions :
 - Réglage des caractéristiques de l'air comprimé avec notamment un régulateur de pression.
 - Conditionnement de l'air : filtre, lubrificateur, etc.
 - Contrôle et sécurité : manomètre, soupape de sécurité, etc.



Production de l'énergie pneumatique

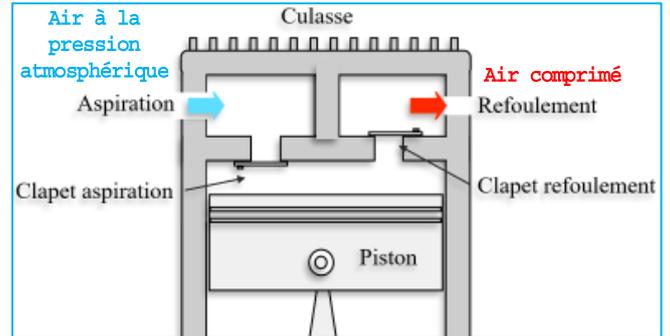
Compression de l'air

- Un compresseur (7), entraîné par un moteur (6), aspire et comprime l'air ambiant et l'accumule dans un réservoir, l'accumulateur (1).



- Lorsque l'arbre du moteur tourne, le piston est animé d'un mouvement alternatif de translation rectiligne, grâce au **système Bielle/Manivelle**. Alors, :

- Lorsque le piston descend, la pression dans le cylindre diminue. Dès qu'elle est inférieure à celle en amont du **clapet d'aspiration**, celui-ci s'ouvre, laissant l'air entrer à l'intérieur (**aspiration** ou **admission**).
- Lorsque le piston monte, la pression dans le cylindre augmente. Dès qu'elle dépasse la pression au-dessus du **clapet de refoulement** celui-ci s'ouvre et laisse s'échapper l'air vers la sortie (**échappement** ou **refoulement**).



Stockage

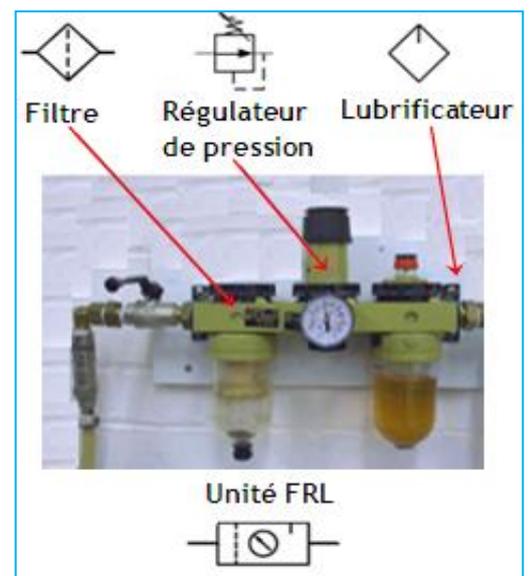
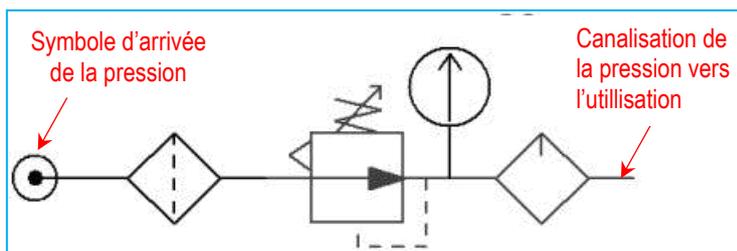
- L'accumulateur (1) stocke l'air comprimé issu du compresseur et évite ainsi de faire fonctionner le moteur tout le temps. Pour des raisons de sécurité, l'accumulateur comporte :
 - Une vanne d'isolement (4) pour permettre manuellement de distribuer ou non l'air comprimé.
 - Un robinet de purge, qui permet d'évacuer l'eau condensée.
 - Un manomètre (2), qui mesure la pression.
 - Une soupape de sécurité (3) pour sécuriser le système en cas de surpression.



Distribution

- La distribution de l'air comprimé s'effectue par un réseau de canalisations et différents piquages servant de point d'accès à ce réseau pneumatique. Un groupe de conditionnement y est installé afin de filtrer et de lubrifier l'air comprimé ; il comprend un :

- 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.



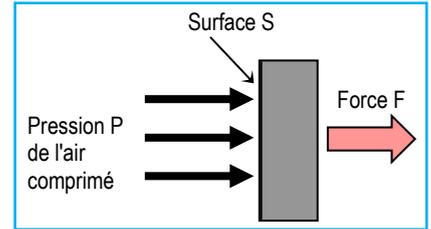


Principe physique

- La force mécanique produite par l'énergie pneumatique est liée à la pression par la relation :

$$F = P \cdot S$$

- F est la force résultante en N.
- P est la pression en Pascal (Pa).
- S est la surface en m².

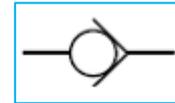


- Le **pascal** étant trop petit pour les pressions utilisées dans l'industrie, on utilise souvent le **bar** :
 - 1 bar = 10⁵ Pa.
 - 1 bar = 10⁵ N/m².
- Dans une installation pneumatique, on se limite à une pression de **6 à 10 bar**. Pour des pressions beaucoup plus grandes, on recourt à l'**Hydraulique** qui permet des pressions jusqu'à **350 bar**.

Composants annexes d'alimentation

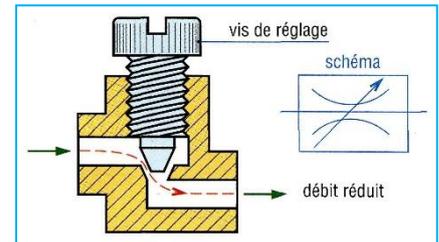
Les clapets anti-retour

- Ils assurent le passage du fluide dans un sens et le bloquent dans l'autre sens. Une bille peut se déplacer dans une cavité ; lorsque le fluide se déplace dans le sens contraire au sens de passage, la bille obstrue le passage et empêche le fluide de s'échapper.



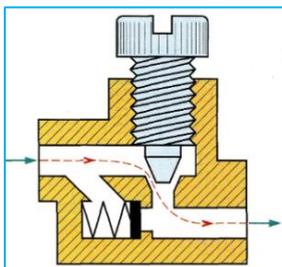
Les étrangleurs ou réducteurs de débit bidirectionnel

- Les étrangleurs ont 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. Ils sont composés d'un orifice de passage d'air dont la section est contrôlée par une vis de réglage.

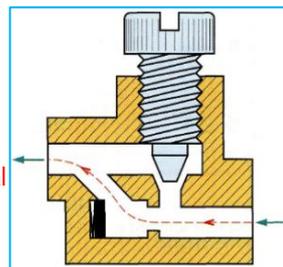


Les réducteurs de débit unidirectionnel

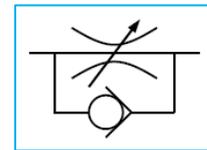
- Ils sont destinés à régler le débit du fluide. Ils doivent assurer le freinage du débit de fluide dans un sens et le plein passage dans l'autre sens. Le clapet anti-retour obstrue le passage du fluide dans un sens et l'oblige à passer par l'étrangleur dans l'autre sens.



Débit réduit



Débit normal



Les silencieux

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



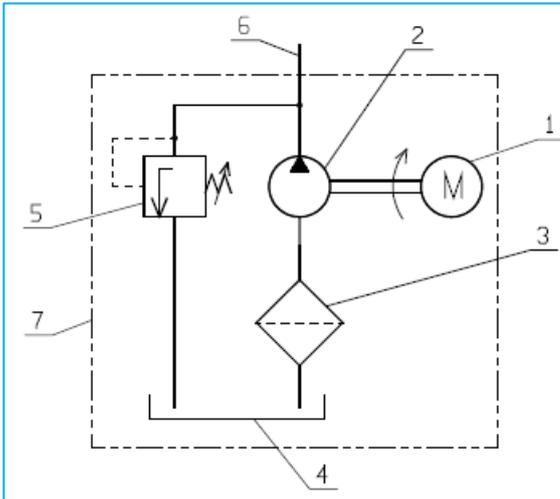
Introduction

- Dans les systèmes hydrauliques, on utilise de l'huile sous pression. Comme en Pneumatique, en Hydraulique les actionneurs sont principalement des vérins.
- L'énergie hydraulique est pratiquement comparable à l'énergie pneumatique ; mais les systèmes hydrauliques offrent de nombreux avantages et permettent en particulier :
 - La transmission de forces et de couples élevés (pression **350 bar**).
 - Une grande durée de vie des composants, du fait de la présence de l'huile.
- Les systèmes hydrauliques ont aussi des inconvénients, comme les risques d'accident dus aux pressions élevées et d'incendie du fait de l'inflammabilité de l'huile.



Constitution d'une installation hydraulique

- Une installation hydraulique transforme de l'énergie mécanique en énergie hydraulique, pour faciliter son transport, puis la retransforme en énergie mécanique. Comme l'indique la figure ci-dessous, elle se compose 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.
 - Des filtres (3) pour réduire la concentration des particules polluantes et éviter une usure rapide des composants.



Légende :

- 1- Moteur
- 2- Pompe
- 3- Filtre
- 4- Réservoir
- 5- Limiteur de pression variable
- 6- Circuit de puissance
- 7- Centrale hydraulique



Production de l'énergie hydraulique

Réservoir d'huile

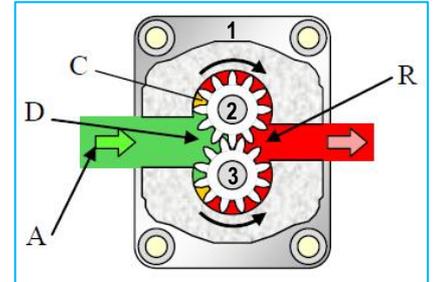
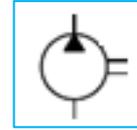
- Le **réservoir** contient l'huile et permet aussi son refroidissement, ainsi que l'élimination de l'eau de condensation. Quant à l'**huile**, elle transmet la puissance hydraulique de la pompe au récepteur tout en graissant et protégeant contre la corrosion les pièces en mouvement dans les équipements hydrauliques.

Filtre

- Il permet de réduire et contrôler à un niveau acceptable, la taille et la concentration des particules polluantes pour prévenir une usure prématurée des composants.

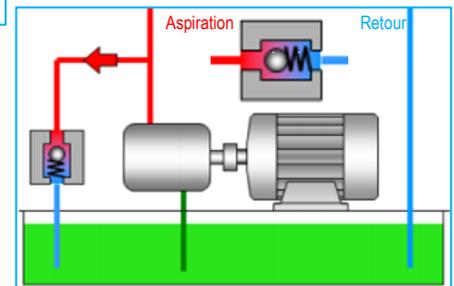
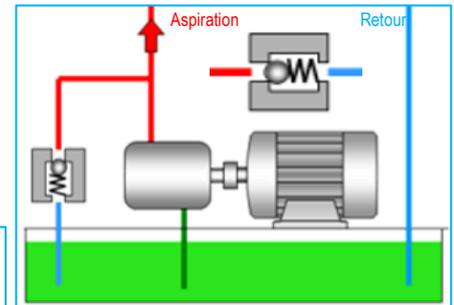
Pompe hydraulique

- Elle est destinée à transformer une énergie mécanique en énergie hydraulique, en aspirant l'huile contenue dans le réservoir et le refoulant sous pression dans les tuyauteries du système. Elle est caractérisée principalement par son **débit Q** exprimé en **l/min**. Il y a plusieurs types de pompes qui mettent en œuvre plusieurs principes mécaniques ; à titre d'exemple, on donne le principe d'une **pompe à engrenages**.
- Ces pompes constituées d'un corps (1) et de 2 pignons à denture droite centrés et guidés par rapport au corps. L'un des pignons est appelé pignon menant (2) ; il entraîne en rotation l'autre pignon appelé pignon mené (3). L'aspiration dans ces pompes est provoquée par le vide créé au niveau du désaccouplement des dents en **D**.
- L'huile en provenance du réservoir arrive en **A** (côté aspiration) remplit les creux de dents des pignons au niveau de la partie supérieure en **C**. Ainsi emprisonnée, l'huile est transportée par les pignons vers la droite et vers la gauche en suivant le contour intérieur du carter. A la fin du cycle de transport, l'huile est refoulée en **R**.



Limiteur de pression

- Montés en série dans les circuits hydrauliques, ils ouvrent le circuit dès que la pression est trop élevée. En contrôlant ainsi la pression maximale qui circule dans un circuit, on peut protéger les actionneurs contre des surcharges destructrices, ainsi que le personnel.
- Le limiteur possède un ressort avec une bille obturant le retour vers le réservoir. Alors :
 - Tant que la pression à la sortie est inférieure à la force de targe du ressort, la bille restera sur son siège.
 - Tandis que si la pression est supérieure à la force de targe du ressort, la bille laissera un passage calibré permettant au fluide de retourner dans le réservoir.



Les grandeurs associées aux pompes hydrauliques

- Les grandeurs hydrauliques décrites ici supposent l'absence de fuites ; on se place donc dans le cas parfait.

La cylindrée

- Par définition, la cylindrée est le volume de fluide refoulé ou aspiré par une pompe pendant une révolution (1 tour) de l'arbre principal de la pompe. C'est une donnée d'une pompe hydraulique ; elle a pour unité, le (m³/tr), le (l/min) ou le (l/tr), avec **1 m³ = 1000 l**.

Le débit

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

$$Q = C_v \cdot N$$

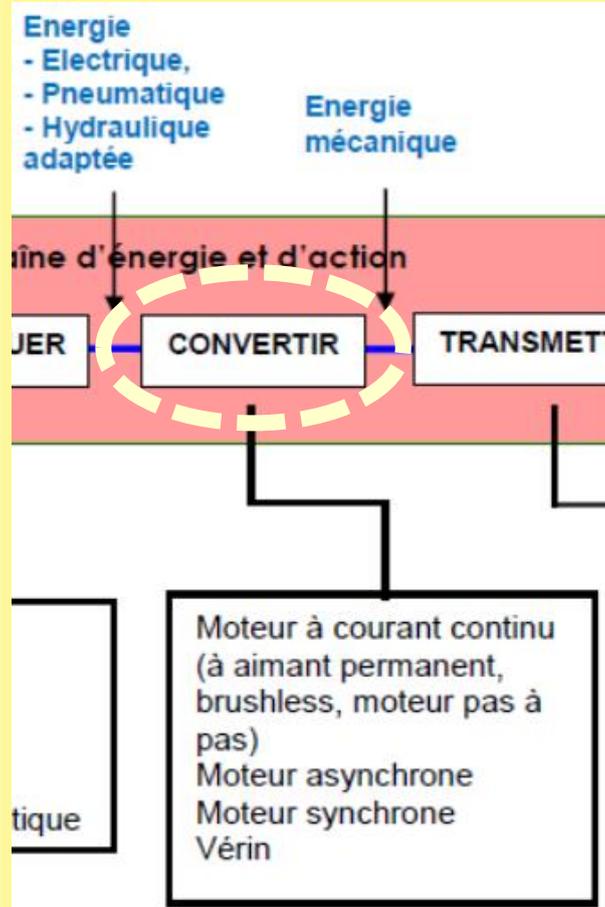
- **Q** : Débit (m³/s)
- **N** : Fréquence de rotation (tr/s)
- **C_v** : Cylindrée (m³/tr)

La puissance

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

$$Pu = Q \cdot P$$

- **Pu** : Puissance (W)
- **Q** : Débit (m³/s)
- **P** : Pression (Pa)



Fonction Convertir

Actionneurs pneumatiques et hydrauliques



Présentation

- Un actionneur pneumatique ou hydraulique est un dispositif qui transforme l'énergie sous forme de **pression, en travail mécanique**.
- Ils permettent donc de soulever, pousser, tirer, serrer, tourner, bloquer, etc.
- Parmi les actionneurs les plus utilisés dans les systèmes automatisés, on trouve :
 - Les **vérins pneumatiques**, qui utilisent de l'air sous pression.
 - Les **vérins hydrauliques**, qui utilisent de l'huile sous pression.
 - Les pompes à vide.



Vérin pneumatique



Vérin hydraulique



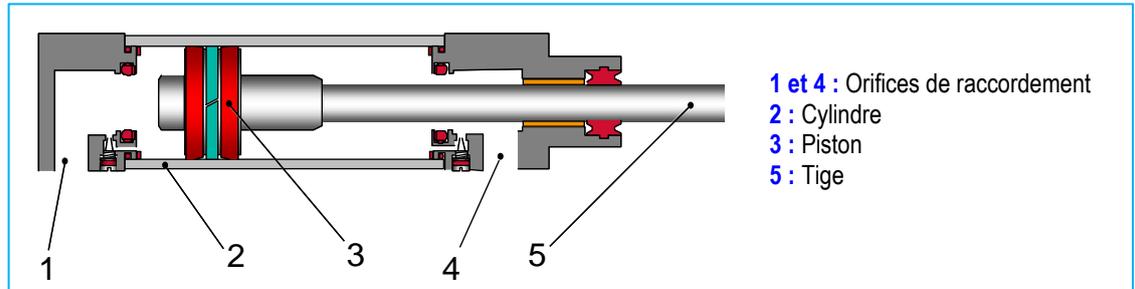
Pompe à vide

- Dans ce chapitre, on étudie principalement les actionneurs pneumatiques, qui sont **pratiquement semblables** aux actionneurs hydrauliques ; la **différence principale** réside dans la pression qui peut aller typiquement jusqu'à :
 - **10 bar** pour les vérins pneumatiques.
 - **350 bar** pour les vérins hydrauliques.

Vérin pneumatique

Constitution et principe de fonctionnement

- Il est constitué d'un **cylindre** (corps du vérin), fermé aux 2 extrémités, à l'intérieur duquel se déplace librement un **piston** muni d'une **tige**, sous l'effet des forces dues à la pression de l'air comprimé.
- Pour faire sortir la **tige**, on applique la pression sur la face arrière du piston et pour la faire rentrer, on applique la pression sur la face avant :

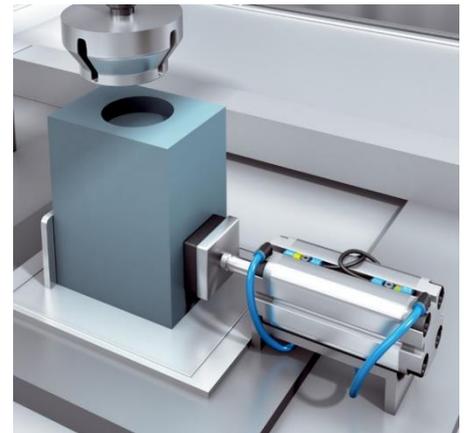
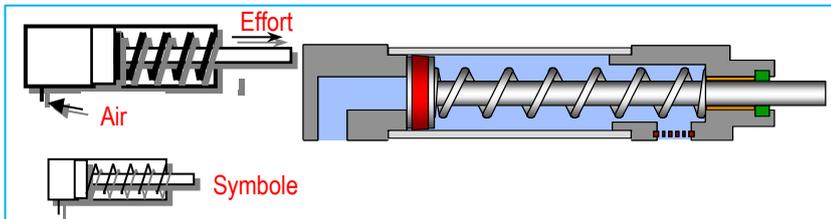


- On peut trouver d'autres fonctions complémentaires tel que : le **réglage de vitesse**, l'**amortissement de fin de course**, la détection de position avec **capteurs ILS**, etc.

Vérins usuels

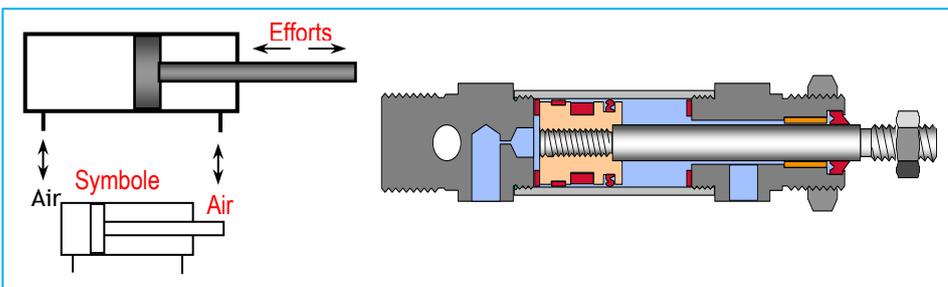
Vérin simple effet

- 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 théorique transmissible

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

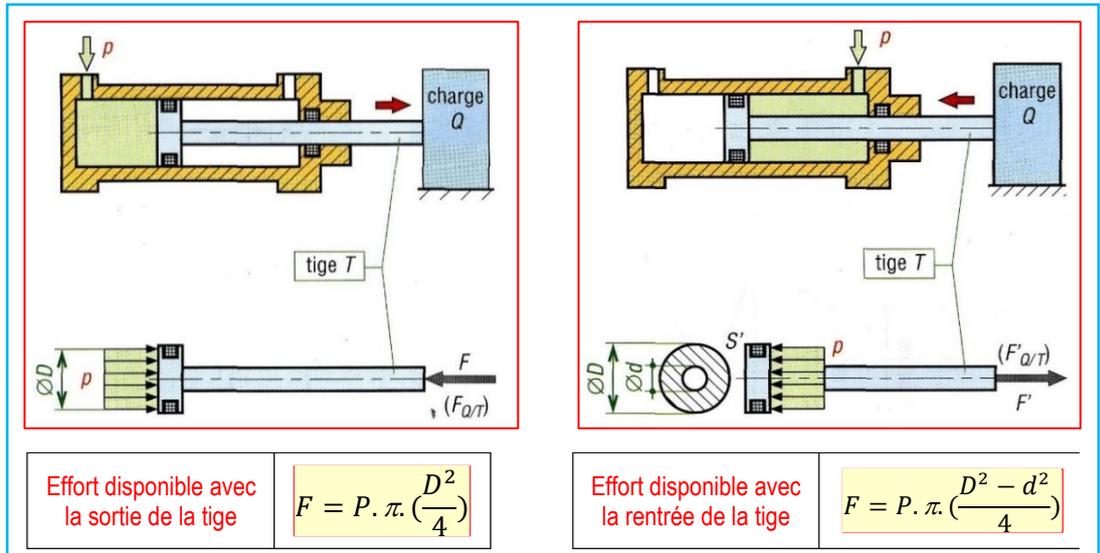
$$F_{th} = P \cdot S$$

F_{th}	: Force théorique de déplacement (N)
P	: Pression (Pa)
S	: Surface (m ²)

Taux de charge

- Pour être certain d'utiliser un vérin dans de bonnes conditions, on définit le **taux de charge** τ , qui tient compte, entre autres, des frottements internes (joints d'étanchéité et bagues de guidage) :

$$\tau = \frac{F_{ch}}{F_{th}}$$



F_{ch} est la force pour déplacer la charge réelle.

$$0,5 \leq \tau \leq 0,8$$

Vitesse d'un vérin

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

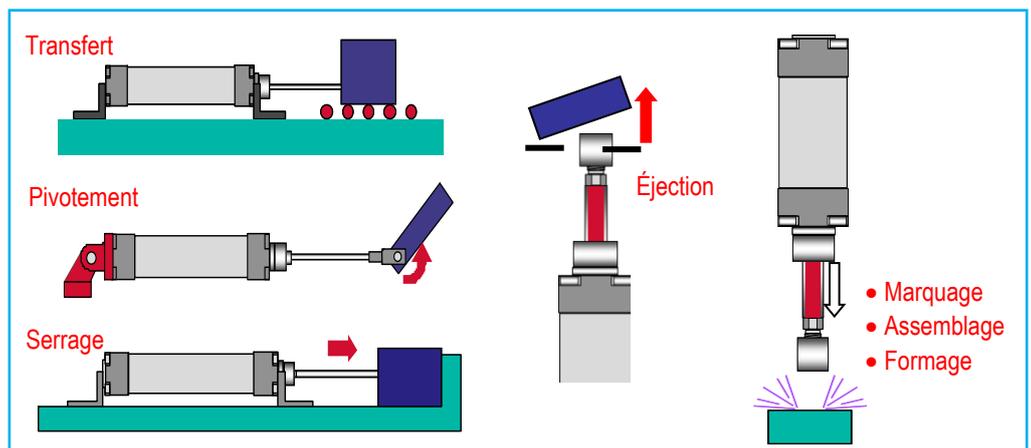
V	: Vitesse (m/s)
Q	: Débit volumique (m ³ /s)
S	: Surface (m ²)

Puissances

Puissance utile	$P_u = F \cdot V$	P_u : Puissance utile (w) F : Force de déplacement (N) V : Vitesse de déplacement (m/s)
Puissance absorbée	$P_a = Q \cdot P$	P_a : Puissance absorbée (W) Q : Débit volumique (m ³ /s) P : Pression (Pa)

Exemples d'utilisation des vérins pneumatiques

- Les vérins pneumatiques sont souvent utilisés dans tous les systèmes qui nécessitent des mouvements linéaires rapides pour transférer, serrer, pivoter, éjecter, former, assembler, marquer, etc. :

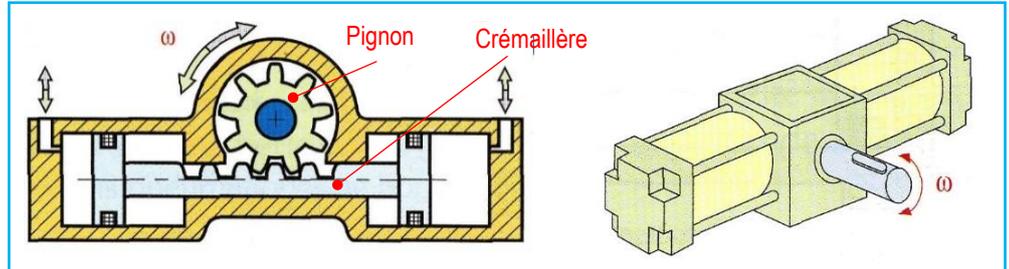


Autres actionneurs pneumatiques

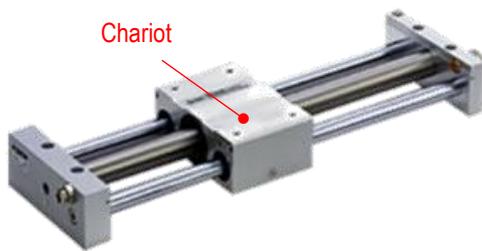
- On peut trouver d'autres actionneurs pneumatiques ; on cite en particulier le vérin rotatif et la pompe à vide.

Le vérin rotatif

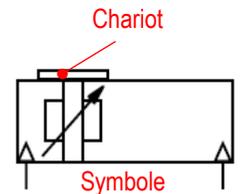
- Il est basé sur un système **pignon-crémaillère** ; la translation de la crémaillère par l'effet de la pression est transformée en rotation du pignon.



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,



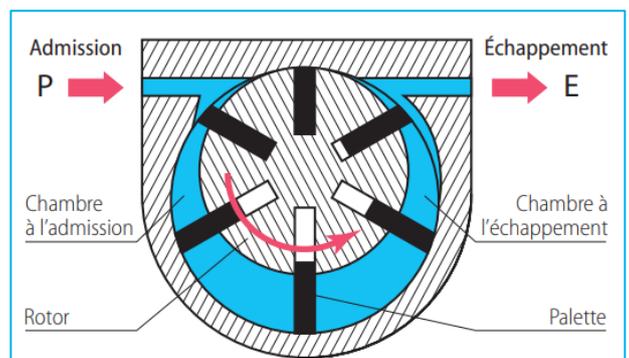
La pompe à vide

- 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 d'appréhender et de soulever des charges.



Le moteur pneumatique

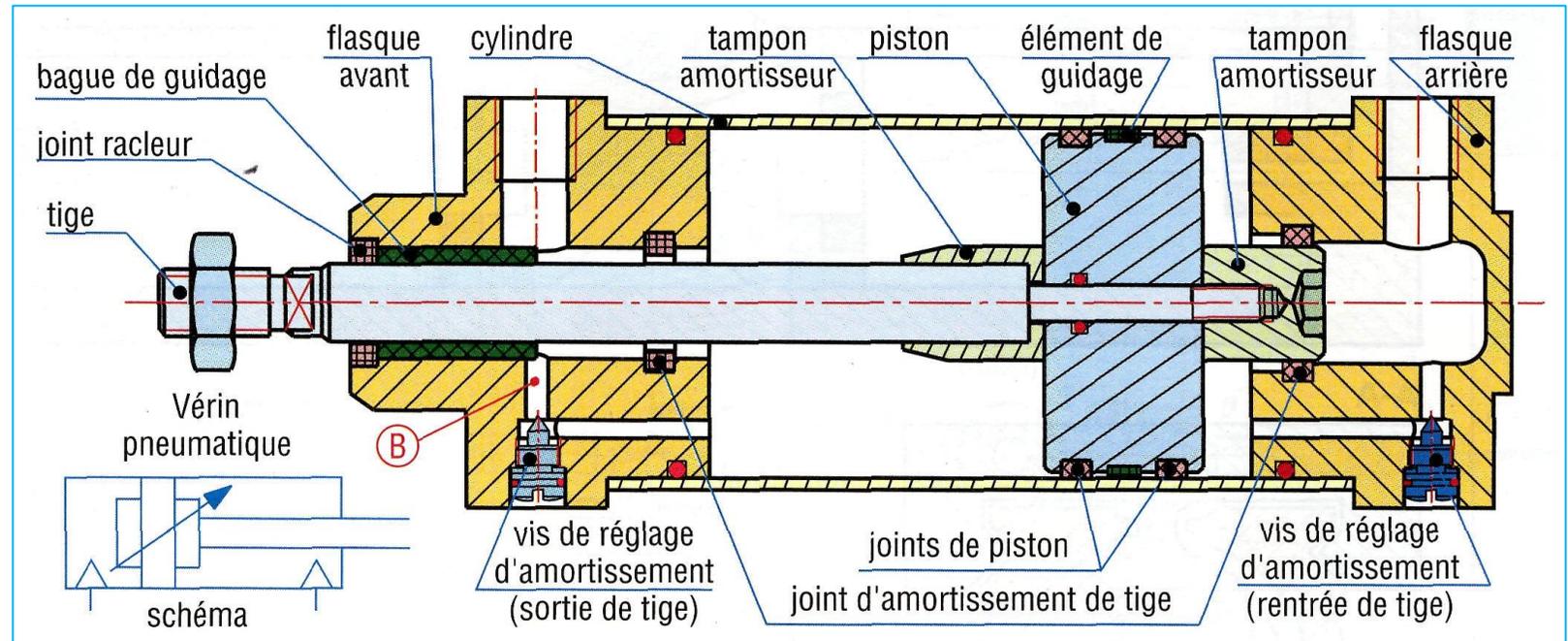
- Il existe plusieurs types de moteurs pneumatiques. On présente ici celui à **palettes** du fait de sa simplicité, la sécurité de fonctionnement qu'il procure en atmosphère explosive et son faible encombrement.
- Il est principalement utilisé dans l'outillage portatif (visseuse, perceuses, etc.).
- Son principe de fonctionnement est le suivant : l'air comprimé pénètre dans le moteur par l'**orifice P** et arrive dans la **chambre d'admission**, où il exerce une force motrice sur la **palette** la plus proéminente. Ainsi, le **rotor** tourne. Dans le 2e secteur du moteur, l'air de la **chambre d'échappement** se vide par l'**orifice E**.
- Le même principe s'applique à un **moteur hydraulique**.



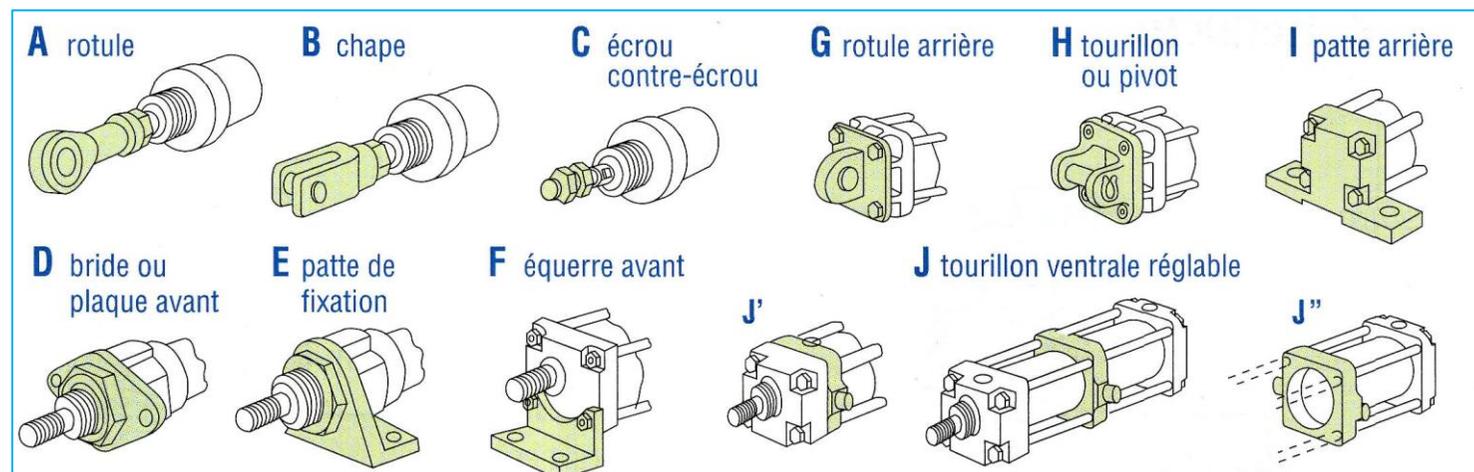


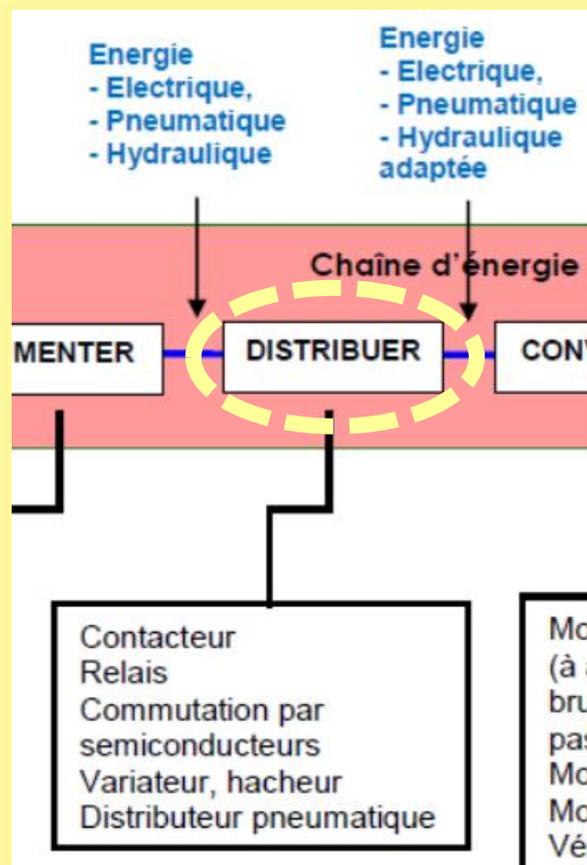
Quelques aspects mécaniques à propos des vérins

Principaux constituants



Fixation et montage





Fonction Distribuer

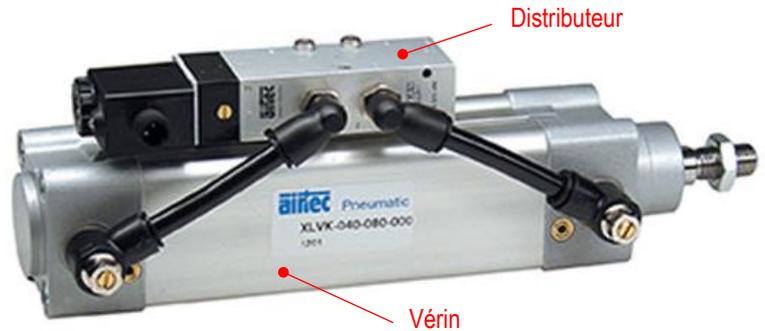
Pré-actionneurs pneumatiques





Introduction

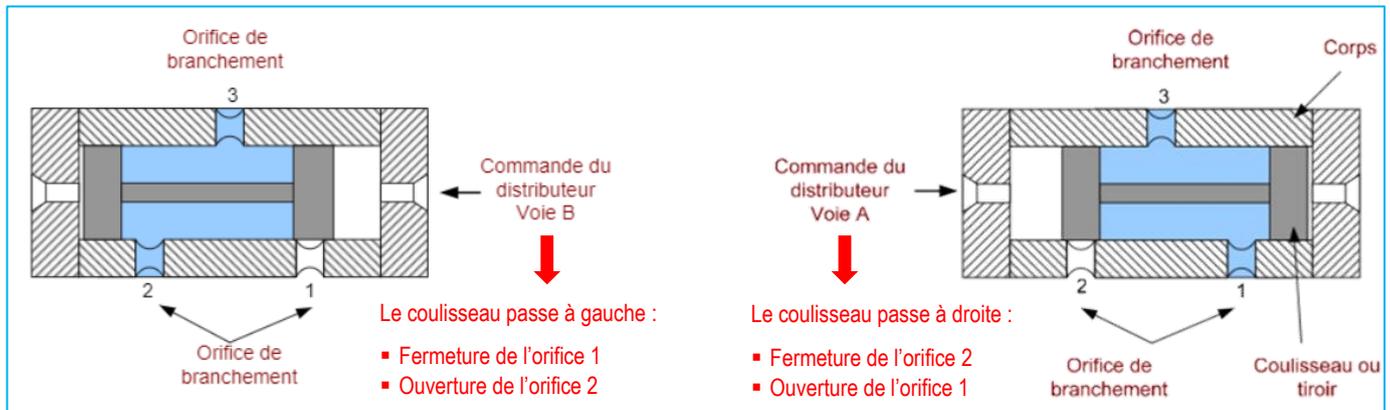
- Dans une installation pneumatique ou hydraulique, un pré-actionneur est appelé « **Distributeur** ».
- Dans ce chapitre, on étudie principalement les **distributeurs pneumatiques**, qui sont pratiquement semblables aux distributeurs hydrauliques.
- Les chambres d'un vérin doivent être **alternativement** mises à la pression et à l'échappement.
- Il n'est pas question de modifier **manuellement** les branchements des différents tuyaux pour faire cette **commutation**.
- Il faut alors un dispositif qui réalise cette commutation ; c'est le **distributeur** pneumatique.
- Un distributeur pour un actionneur pneumatique, est ce qu'est un contacteur pour un moteur électrique.



Principe de fonctionnement

Constitution et principe de fonctionnement

- Un distributeur est constitué d'une partie fixe (le **corps**) et d'une partie mobile (le **tiroir** ou **coulisseau**), qui peut se déplacer à l'intérieur de la partie fixe selon un ordre **manuel** ou **automatique**.
- Le coulisseau permet alors de **fermer ou d'ouvrir des orifices** d'air et ainsi de piloter différents états d'un actionneur pneumatique ; le principe de base d'un tel dispositif est expliqué dans la figure suivante :



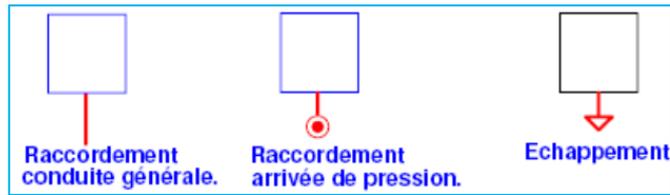
Caractéristiques d'un distributeur

- Un distributeur est caractérisé par son **nombre** :
 - D'**orifices** dédiés à l'arrivée et l'échappement de la pression et les sorties vers les actionneurs.
 - De **positions** que peut occuper le tiroir.
- Le nom et la représentation d'un distributeur découlent de ces 2 caractéristiques ; ainsi :
 - Chaque position est symbolisée par un carré dans lequel figurent les voies de passage de l'air comprimé :

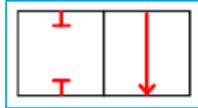


A un instant donné, seule une des cases est utilisée. On ne câble donc les tuyaux que d'un côté.

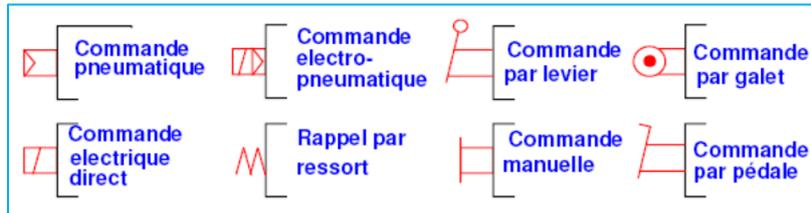
- La symbolisation du raccordement des orifices s'effectue comme suit :



- Le passage de l'air comprimé est symbolisé par une **flèche** indiquant le sens de circulation ; le blocage de l'air est symbolisé par un « **T** ».



- La commande d'un distributeur peut être électromagnétique, pneumatique ou manuelle :

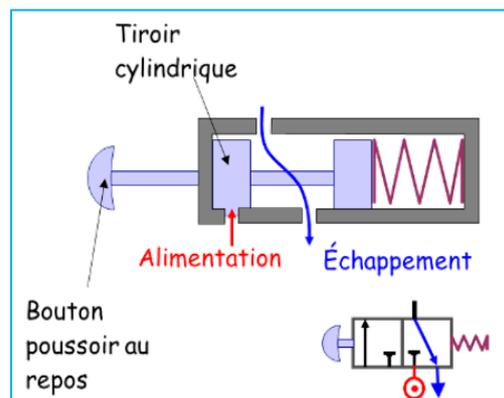
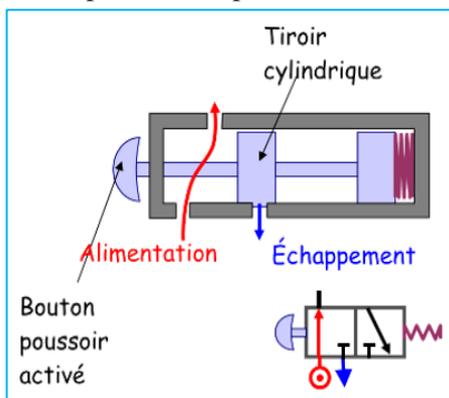


- Un distributeur peut être :
 - Monostable** si le retour du tiroir à sa position initiale est assuré par un **ressort de rappel** dès la disparition du signal de pilotage.
 - Bistable** si le tiroir reste dans l'état que lui a imposé le dernier ordre, même en l'absence de ce dernier (fonction **mémoire**).
- Le repérage des différents orifices d'un distributeur est **normalisé** :
 - L'alimentation en pression est repérée par le chiffre **1**.
 - Les orifices d'échappement sont repérés par des chiffres impairs (**3** et **5**).
 - Les orifices d'alimentation du vérin sont repérés par des chiffres pairs (**2** et **4**).
 - Les pilotages sont repérés :
 - 12** : La pression en **1** passe à l'utilisation **2**.
 - 14** : La pression en **1** passe à l'utilisation **4**.

Les distributeurs usuels

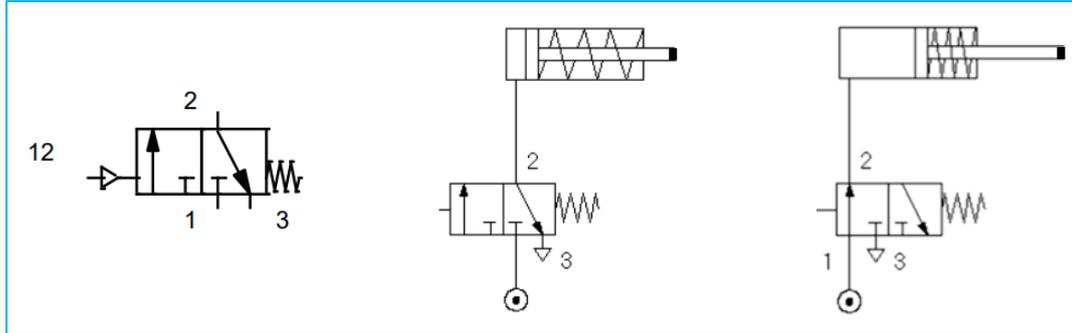
Distributeur 3/2

- Un **vérin simple effet** ne comporte qu'un seul orifice à alimenter ; le distributeur qui lui est associé ne comporte alors qu'un seul orifice de sortie. D'où l'utilisation d'un distributeur 3/2 avec donc 3 orifices (pression, échappement et 1 sortie) et 2 positions (repos et travail) :





- Application à la commande d'un vérin simple effet :

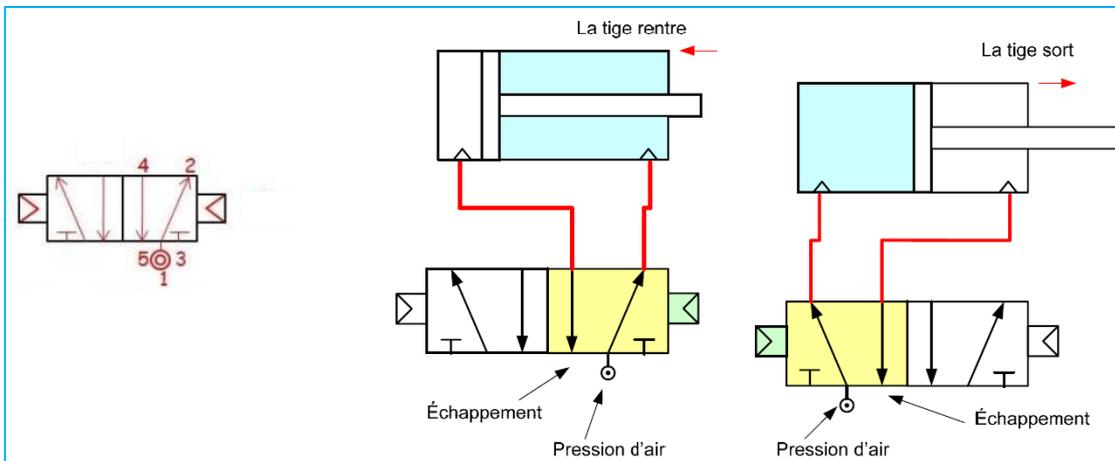


- En position repos, l'orifice de sortie 2 (sortie vers le vérin) est aiguillé vers l'orifice d'échappement 3 et l'alimentation 1 est bloquée ; la tige du vérin rentre.
- En position travail, l'orifice sortie 2 est mis en liaison avec la source d'air comprimé 1 ; l'orifice d'échappement 3 est bloqué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

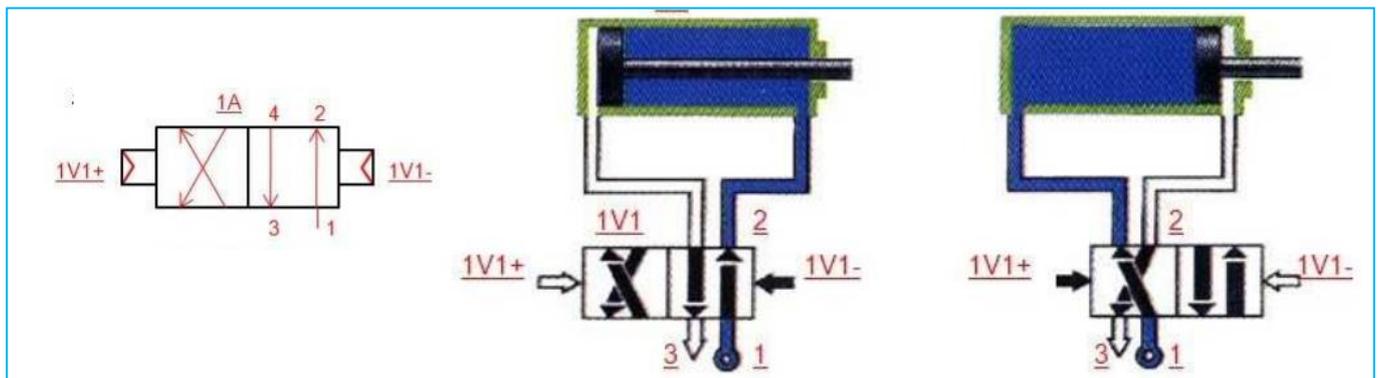
Distributeurs 5/2 et 4/2

- Un vérin double effet comporte 2 orifices sur lesquels il faut alterner les états de pression et d'échappement ; le distributeur qui lui est associé doit alors comporter 2 orifices de sortie. On trouve 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, grâce aux réducteurs de débit unidirectionnels.

Note : Un réducteur de débit unidirectionnel est généralement branché du côté de l'échappement.



- 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), en cas d'aucune commande ; on trouve :
 - Le distributeur 5/3 à **centre fermé** : les chambres du vérin sont isolées et maintiennent leurs **pressions**.

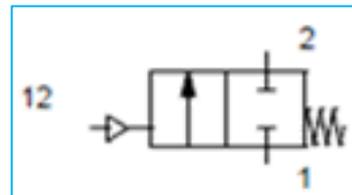


- Le distributeur 5/3 à **centre ouvert** : les chambres du vérin sont placées à **l'échappement**.



Distributeur 2/2

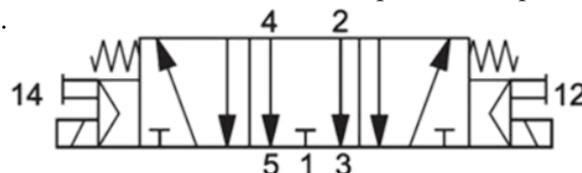
- C'est le distributeur le plus simple ; il se comporte comme un **robinet d'arrêt** de pression :
 - Dans une position, il laisse passer la pression.
 - Dans l'autre position, il bloque la pression ; ainsi, on le désigne aussi de **bloqueur 2/2**.
- Il possède :
 - 2 orifices : l'arrivée et la sortie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



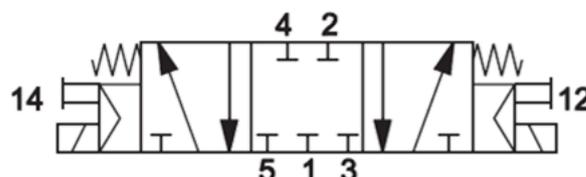
Applications

Montage pneumatique : Distributeurs 5/3

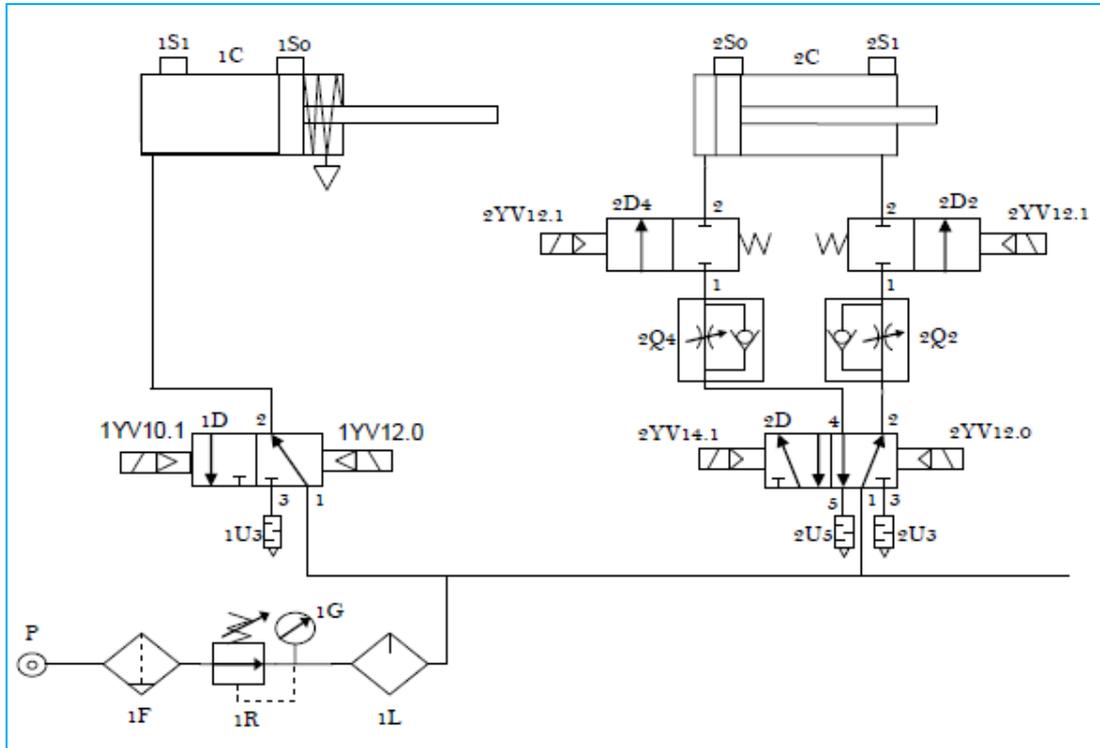
- La position centrale d'un 5/3 avec centre à l'échappement bloque l'arrivée d'air comprimée. Les 2 chambres sont mises à l'échappement. En cas d'aucune activation de bobine, ou de coupure électrique, les 2 chambres du vérin se vident. le vérin n'a plus aucune pression.



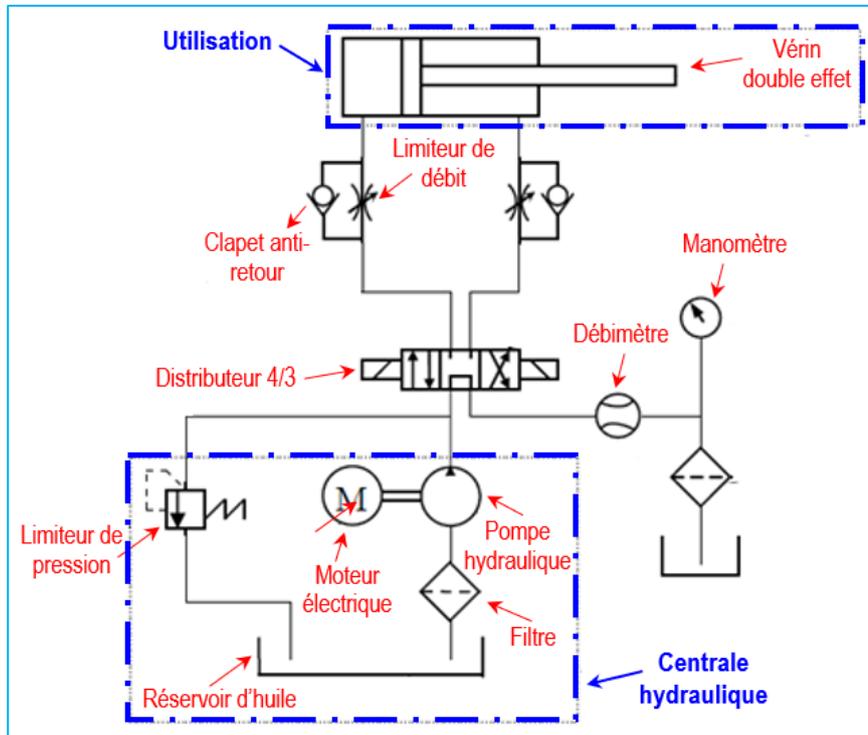
- Sur la position centrale d'un 5/3 avec centre fermé, tous les ports sont bloqués. En cas d'aucune activation de bobine, ou de coupure électrique, les 2 chambres du vérin restent avec la même pression qu'à l'état précédent. Le vérin s'immobilise à sa dernière position.



Montage pneumatique



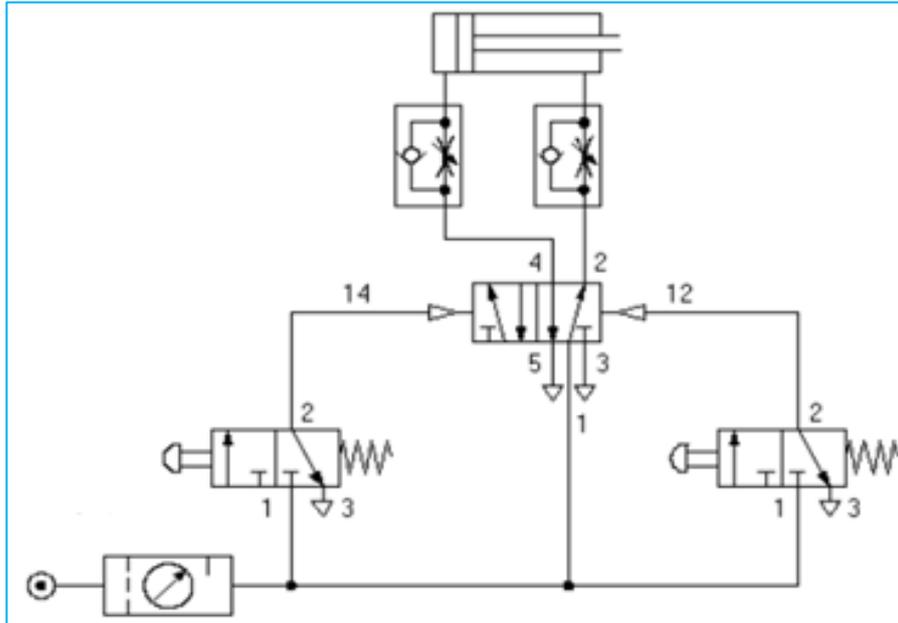
Montage hydraulique



Exercices (Enoncés)

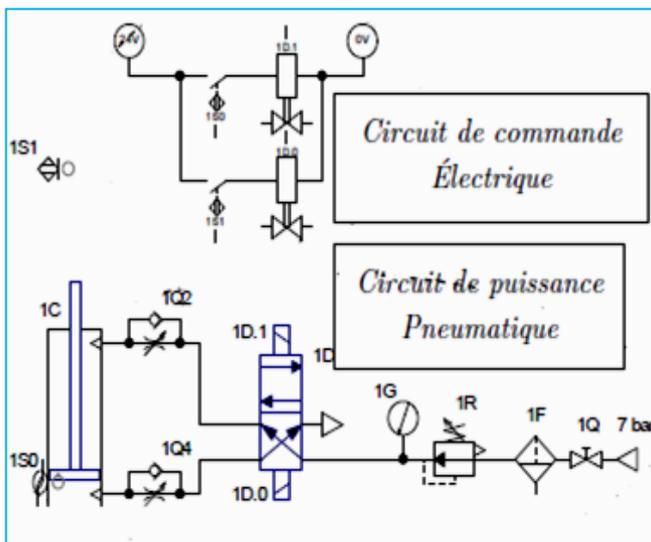
Exercice 1 : Un exemple de montage pour vérin double effet

Décrire le fonctionnement du montage pneumatique suivant.



Exercice 2 : Un exemple de montage pour vérin double effet avec fins de course

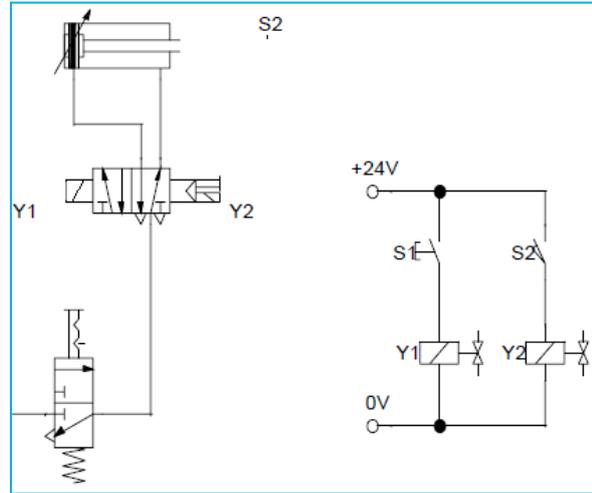
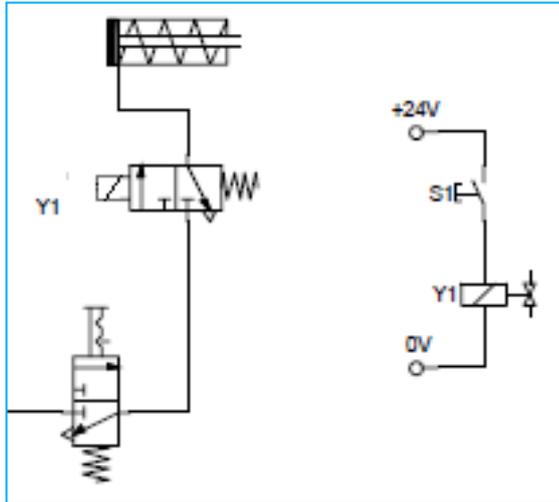
Décrire le fonctionnement du montage pneumatique suivant.



Rep	Désignation	Fonction
1Q	Vanne	Isole ou non le circuit en air comprimé
1F	Filtre	Conditionne l'air comprimé
1R	Régulateur de pression	
1G	Manomètre	
1D	Distributeur 4/2 bistable à commande électrique	Alimente le vérin
1Q2	Réducteurs de débit réglable avec clapet (RDU)	Ralentit la sortie du piston
1Q4		Ralentit la rentrée du piston
1C	Vérin double effet	Déplace la pièce
1S0	Détecteur de proximité à commande magnétique (ILS)	Commande le déplacement de la tige du vérin
1S1	Détecteur de proximité Inductif	

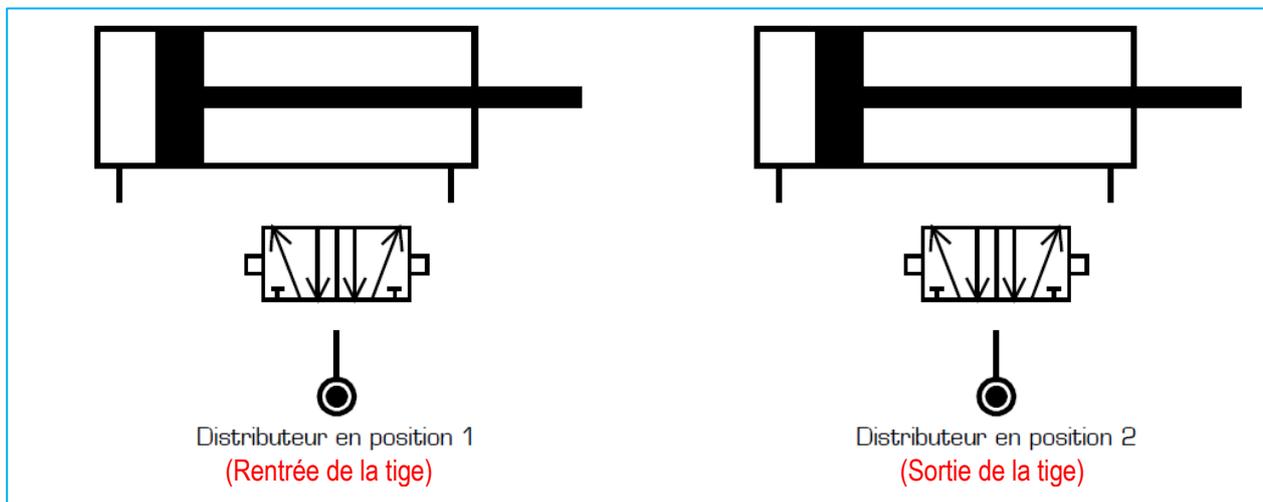
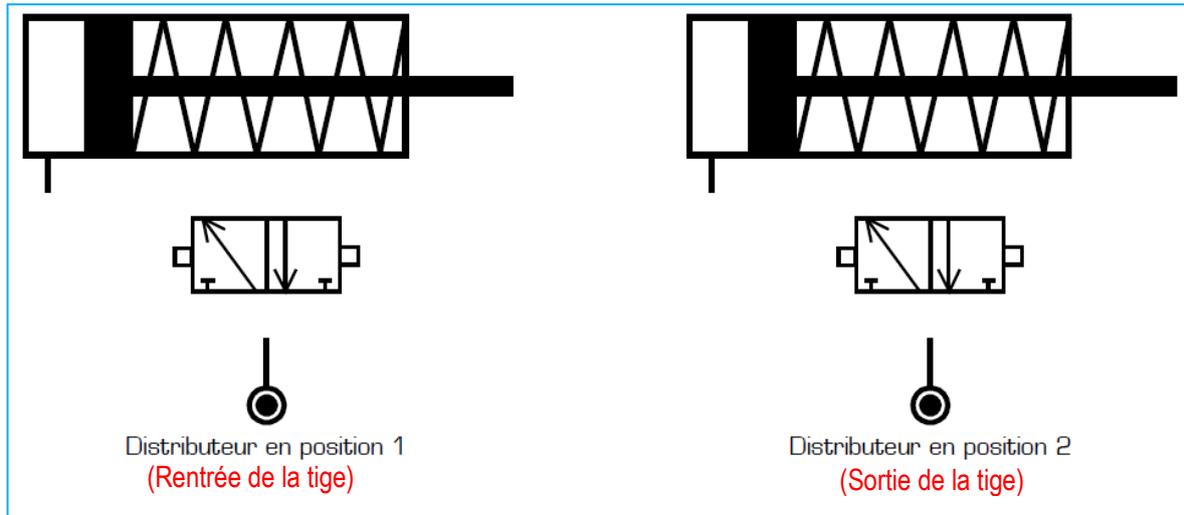
Exercice 3 : La commande électrique des distributeurs pneumatiques

Décrire le fonctionnement des 2 montages pneumatiques suivants.



Exercice 4 : Câblage de circuits pneumatiques

Compléter le câblage des 2 circuits pneumatiques suivants.



Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Un exemple de montage pour vérin double effet

- Il s'agit de la commande d'un vérin double effet.
- La source de pression est conditionnée par un ensemble (Filtre, Régulateur de pression et Lubrificateur).
- Un distributeur 5/2 à commande pneumatique commande le vérin.
- Chaque position est obtenue en commandant un distributeur 3/2 à commande manuelle ; ici un tel type de distributeur sert comme une vanne.
- 2 régulateurs de débit unidirectionnels servent à contrôler les vitesses de sortie et de rentrée de la tige du vérin.

Exercice 2 : Un exemple de montage pour vérin double effet avec fins de course

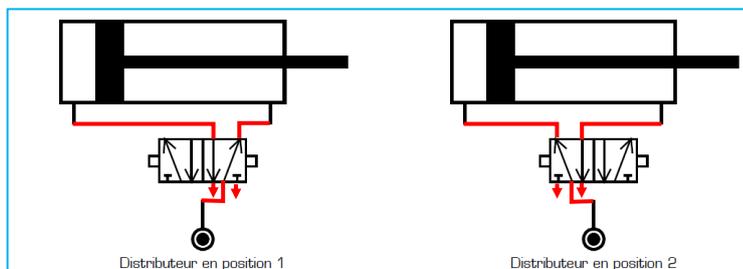
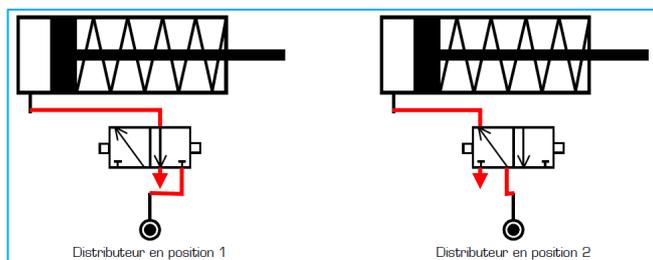
- Au repos, la tige du vérin est rentrée, 1S0 fermé et 1S1 ouvert ; la bobine 1D1 est donc alimentée et 1D0 non alimentée.
- Alors, on commande le distributeur 1D dans la position de travail, i.e. la tige du vérin sort et 1S0 s'ouvre.
- Une fois 1S1 actionné, la bobine 1D0 est alimentée et 1D1 non alimentée, ce qui commande le distributeur pour revenir à la position de repos.
- Le système permet alors un mouvement de va et vient de la tige du vérin aux vitesses réglées par 1Q2 et 1Q4.
- L'air comprimé est conditionné par les éléments 1F et 1R ; la vanne 1Q sert de robinet.

Exercice 3 : La commande électrique des distributeurs pneumatiques

- **1e montage :**
 - Il s'agit de la commande d'un vérin simple effet, via un distributeur 3/2 monostable à commande électrique ; ainsi, si S1 est actionné, Y1 est alimentée et le distributeur est mis en position de travail, permettant la sortie de la tige du vérin. Si le bouton S1 est relâché, le distributeur revient à sa position initiale par le ressort de rappel.
 - Le 1^e distributeur 3/2 à commande manuelle, sert de vanne générale du montage.
- **2e montage :**
 - Il s'agit de la commande d'un vérin double effet, via un distributeur 5/2 à commande électrique ; ainsi, si S1 est actionné, Y1 est alimentée et le distributeur est mis en position de travail, permettant la sortie de la tige du vérin. Si le bouton S1 est relâché, le distributeur reste dans cette position (bistable). Si S2 est actionné, Y2 est alimentée et le distributeur est mis en position de repos, permettant la rentrée de la tige du vérin.
 - Le distributeur 3/2 sert de vanne générale du montage.

Exercice 4 : Câblage de circuits pneumatiques

Compléter le câblage des 2 circuits pneumatiques suivants.



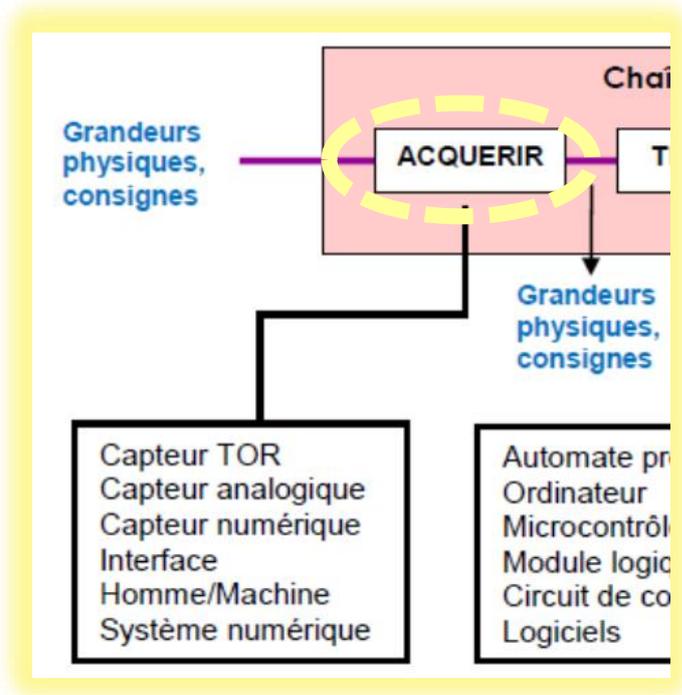
Module 3

Chaîne d'information

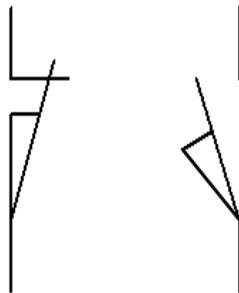
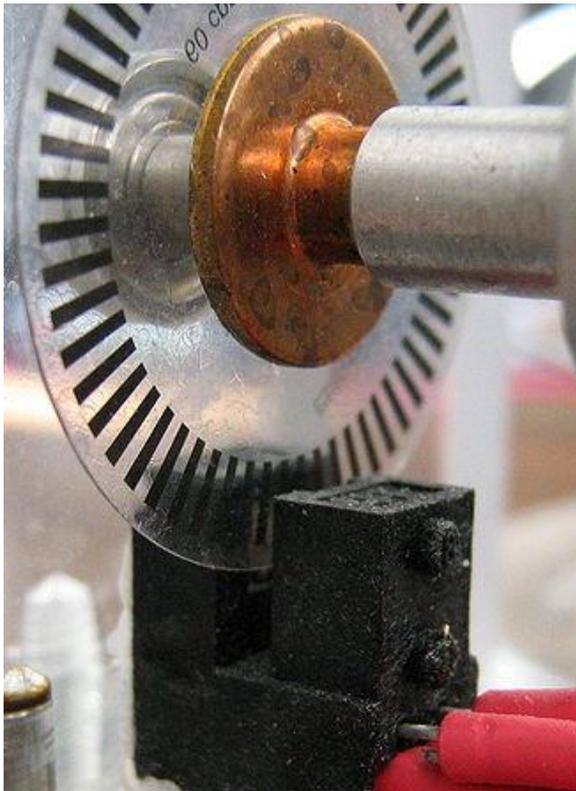
En présence d'énergie, pour agir correctement sur la matière d'œuvre, un système automatisé a besoin de **recueillir** les **informations** sur de la partie opérative pour **gérer** les actions.

Le **module 3** traite donc de ces aspects qui peuvent être modélisés par les fonctions génériques, i.e. elles s'appliquent sur la plupart des systèmes ; il s'agit des fonctions :

- **Acquérir** les informations :
- **Traiter** ces informations suivant des règles et de lois physiques ;
- **Communiquer** les résultats de traitement sous forme :



Fonction Acquérir





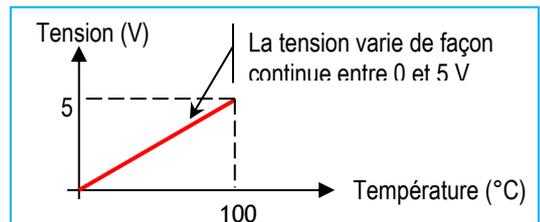
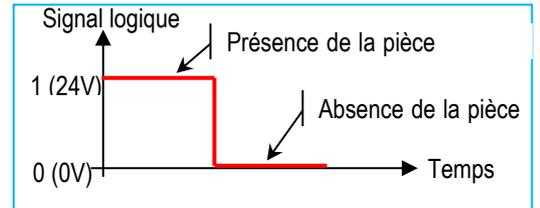
Introduction

- Un capteur est un composant technique qui **détecte un événement physique** et traduit cet événement en un signal exploitable, généralement électrique.
- Il y a une grande **variété de capteurs** ; on cite parmi les plus fréquents, les capteurs de position, de présence, de vitesse, de température, de niveau, etc.

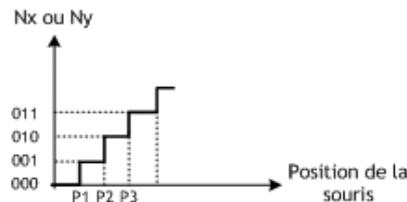
Nature de l'information fournie par un capteur

- Suivant son type, l'information qu'un capteur fournit à l'unité de traitement peut être :

- **Logique** : L'information ne prend que les valeurs 1 ou 0 ; on parle alors d'un capteur Tout ou Rien (**TOR**). La figure ci-contre montre la caractéristique d'un capteur de présence, par exemple.
- **Analogique** : L'information peut prendre toutes les valeurs possibles entre 2 valeurs limites ; la figure ci-contre montre la caractéristique d'un capteur de température, par exemple.
- **Numérique** : L'information fournie par le capteur permet l'unité de traitement d'en déduire un nombre binaire ; la figure ci-dessous illustre le principe de fonctionnement de la souris :



La souris fournit à un ordinateur un signal logique, sous forme d'impulsions, qui lui permettent de compter ces impulsions pour en déduire les coordonnées de la souris sous forme de nombres N_x et N_y .

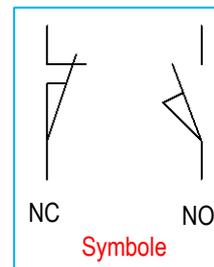


Capteurs logiques (Tout Ou Rien : TOR)

- 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.

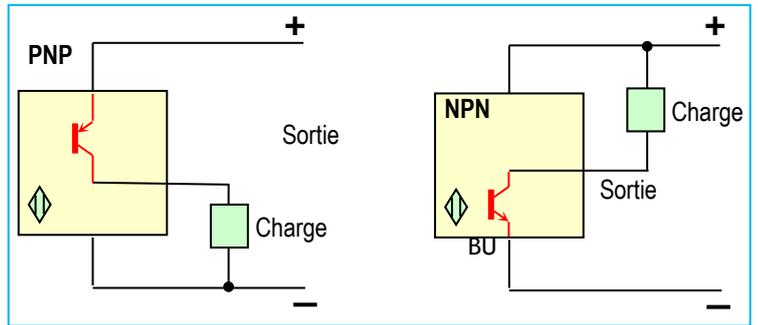


Capteurs sans contact

- 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**.
- Ces types de capteur sont munis de circuits **électroniques spécifiques** aux différents types de matériaux à détecter ; d'où leur besoin d'une alimentation continue.

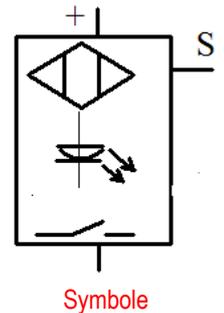
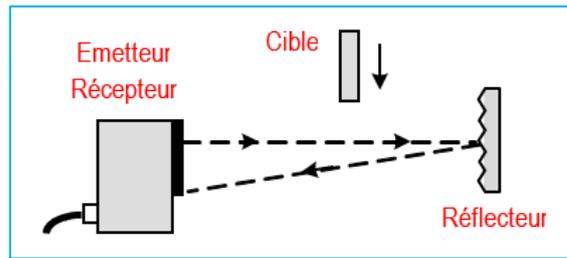


- Ils sont donc généralement à 3 fils : 2 fils pour l'alimentation (+ et -) de l'Electronique interne au capteur et un 3^e fil pour la sortie d'information ; on trouve les 2 montages suivants, qui tirent leurs noms du **type du transistor de sortie** du capteur :
 - Montage PNP** : La charge (API, bobine de relais, etc.) est branchée entre la sortie du capteur et la masse (- de l'alimentation).
 - Montage NPN** : La charge (API, bobine de relais, etc.) est branchée entre la sortie du capteur et la source (+ de l'alimentation).



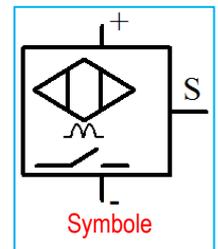
Capteur photoélectrique

- 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 :



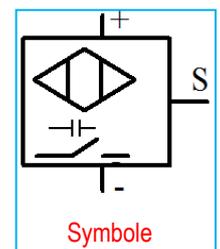
Capteur inductif

- La technologie des détecteurs de proximité inductifs est basée sur la variation d'un **champ magnétique** à l'approche d'un objet conducteur du courant électrique.
- Leur usage est uniquement réservé à la détection d'éléments **métalliques**.



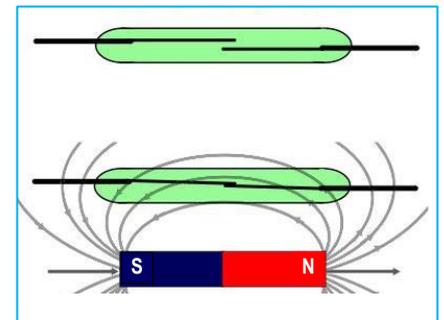
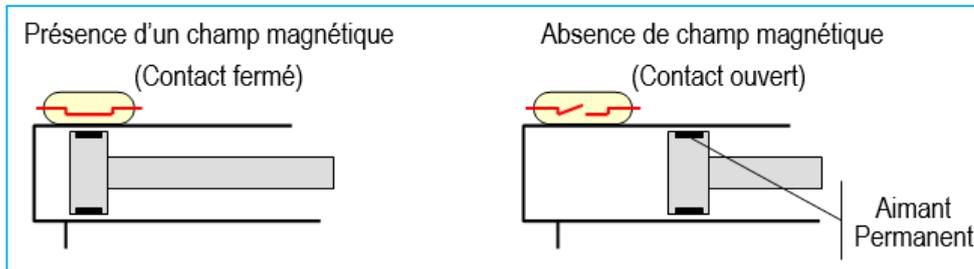
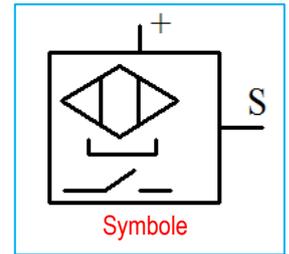
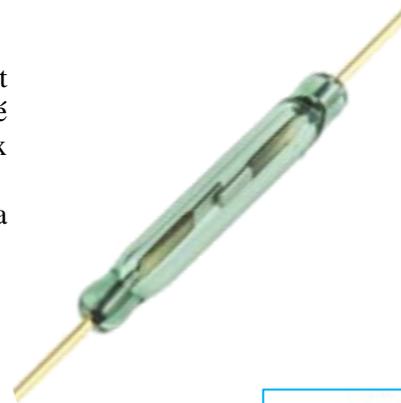
Capteur capacitif

- La technologie des détecteurs de proximité capacitifs est basée sur la variation d'un **champ électrique** à l'approche d'un objet quelconque.
- Leur usage s'étend à des **objets plus divers**.



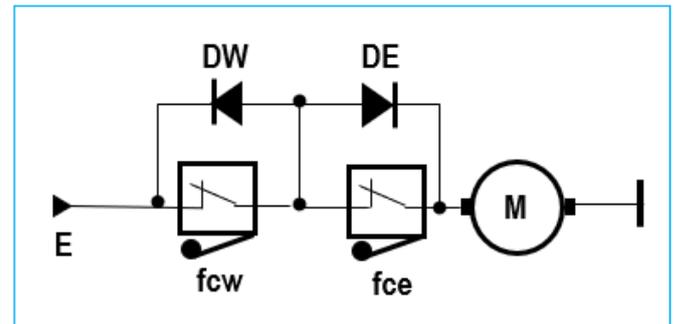
Capteur magnétique

- 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).

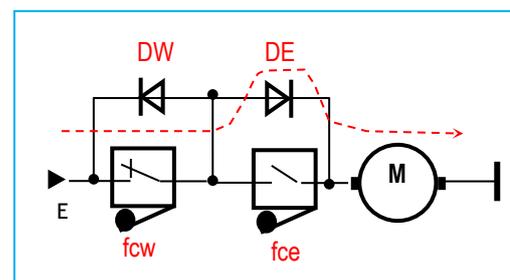
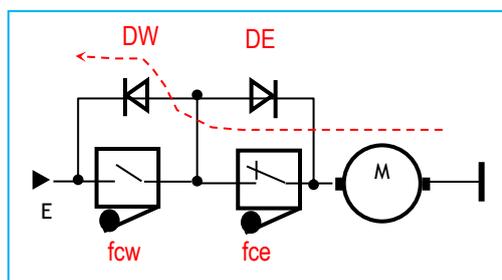


Exemple d'application

- Le montage ci-contre permet de protéger un moteur à courant continu, fonctionnant avec 2 sens. La protection est contre les positions limites où le moteur peut être **calé** ; dans ce cas le couple augmente, ainsi que le courant dans le moteur, ce qui peut endommager le moteur. C'est le cas, par exemple, du moteur du positionnement d'antenne parabolique.
- La tension E est soit positive, soit négative, suivant la commande qui n'est pas représentée ici, ainsi que le système à came qui permet d'actionner les contacts de **fin de course** (**fcw** et **fce**).
- L'analyse du fonctionnement d'un tel montage est comme suit :

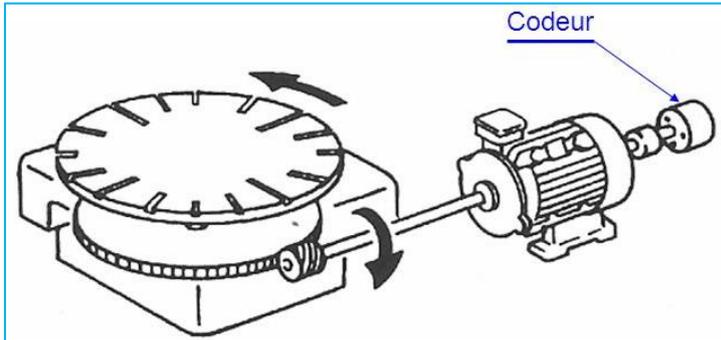


- Les capteurs de fin de course sont fermés au repos ; on suppose alors que le moteur est dans une position où ni **fcw** ni **fce** n'est actionné.
- Quand le moteur tourne vers l'ouest et arrive à la position limite "**West**", **fcw** s'ouvre et le moteur s'arrête. Pour tourner vers l'est, il faut alors inverser le sens de l'alimentation E par une commande convenable.
- En inversant le sens, la diode **DW** joue le rôle **fcw** pour un court instant, après quoi **fcw** se ferme (voir figure ci-dessous à gauche).
- En tournant vers l'est et arrivant à la position limite "**East**", **fce** s'ouvre et le moteur s'arrête. Pour tourner vers "**West**", il faut alors inverser le sens E.
- Et ainsi de suite (voir figure ci-dessous à droite).



Capteurs numériques

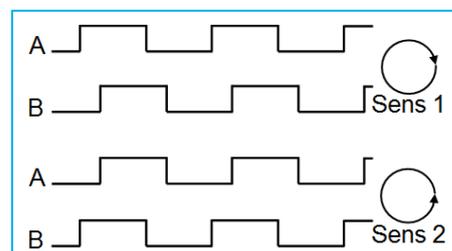
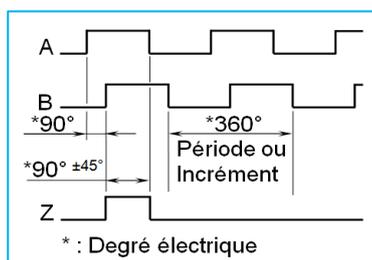
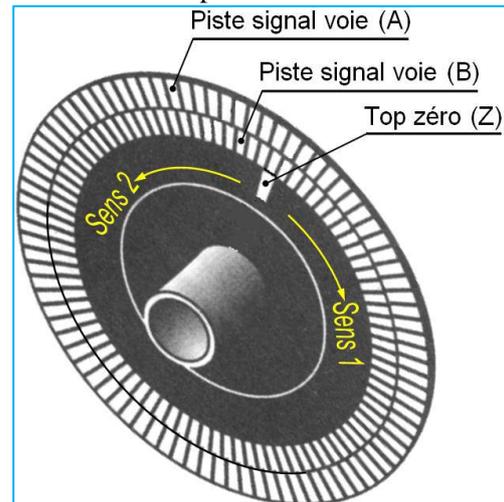
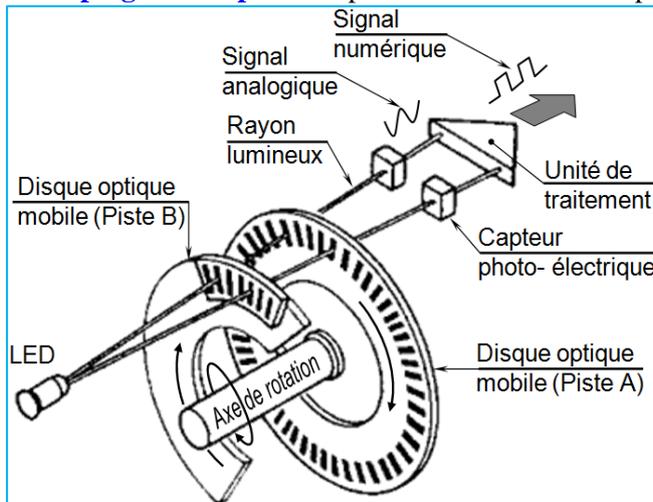
- Ils fournissent **une information numérique**, i.e. un nombre binaire image de la grandeur physique à mesurer ; le capteur le plus connu est le **codeur optique**, plus particulièrement le codeur incrémental.
- Les codeurs optiques sont utilisés pour la **mesure de déplacement** d'un mobile.



Codeur incrémental

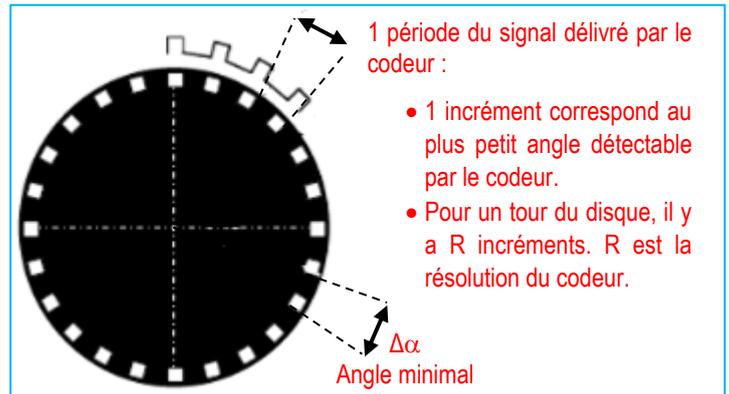
Principe

- 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 du codeur, le faisceau lumineux est interrompu **n** fois et délivre **n impulsions** (A et B).
 - 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 des 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**.



Cas d'un déplacement angulaire

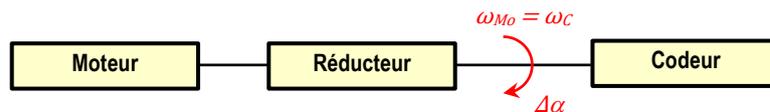
- Dans le cas d'un déplacement angulaire, la **précision** correspond donc à l'angle décrit entre 2 impulsions du disque ; cet angle est souvent exprimé en degré :

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

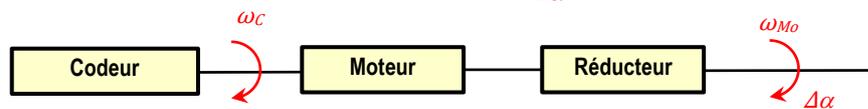
- Dans le cas où il y a un rapport de réduction **K** entre le dernier engrenage entraînant le mobile et le codeur, la relation devient :

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

Cas avec K = 1 ($K = \frac{\omega_{Mo}}{\omega_m}$)



Cas avec K ≠ 1 ($K = \frac{\omega_{Mo}}{\omega_c}$)



Cas d'un déplacement linéaire

- Dans le cas d'un déplacement linéaire, on considère les 2 cas suivants parmi les très courants, i.e. le système vis/Ecrou et le système Poulies/Courroie.

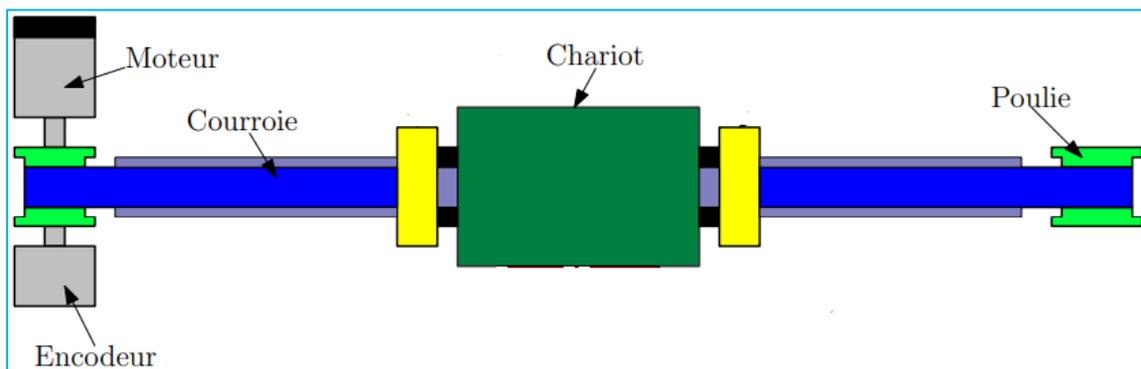
Système Poulies-Courroie

- La poulie ayant un **rayon r**, l'angle $\Delta\alpha$ correspond à l'arc, vérifiant la relation ($x = r \cdot \theta$), avec θ en rd ; alors :

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

(θ en radian et α en degré)

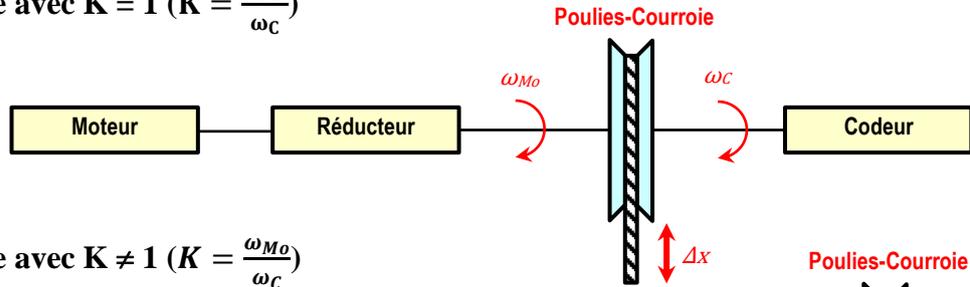
$$\Delta x = \frac{2\pi \cdot r}{R}$$



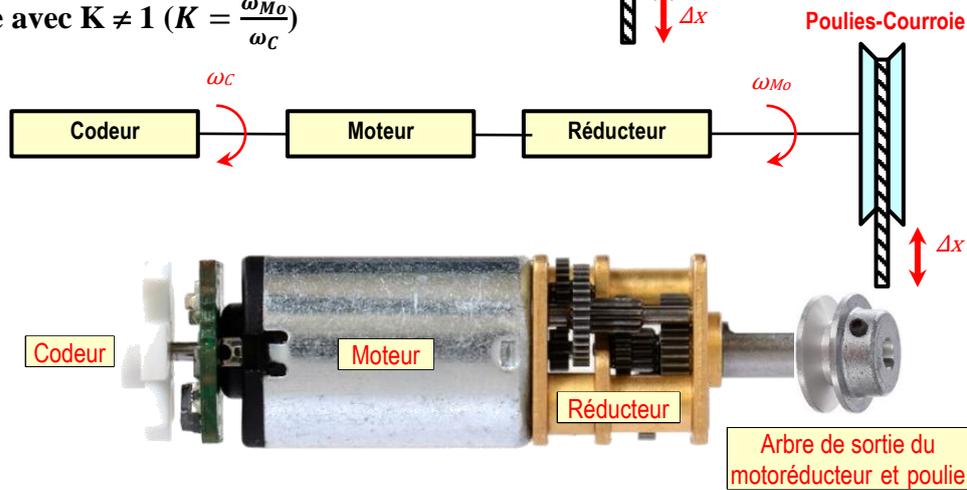
Dans le cas où il y a un rapport de réduction **K** entre le dernier engrenage entraînant le mobile, **ici la poulie**, et le codeur, la relation devient :

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

Système Poulies-Courroie avec K = 1 ($K = \frac{\omega_{Mo}}{\omega_c}$)



Système Poulies-Courroie avec K ≠ 1 ($K = \frac{\omega_{Mo}}{\omega_c}$)



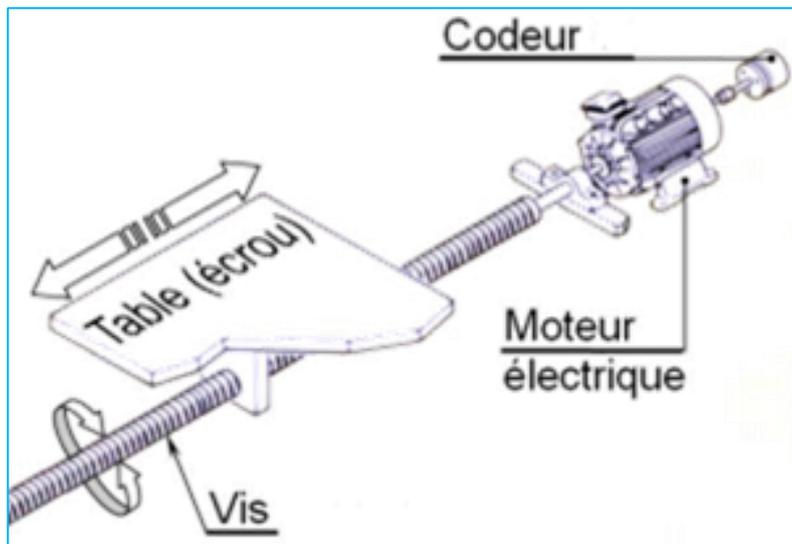
Système Vis-Ecrou

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

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

θ en radian et α en degré

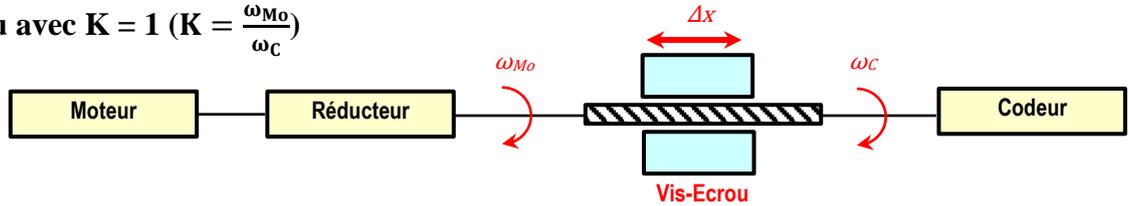
$$\Delta x = \frac{p}{R}$$



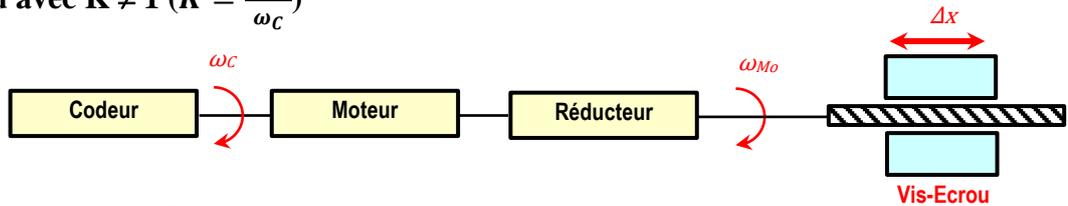
Dans le cas où il y a un rapport de réduction **K** entre le dernier engrenage entraînant le mobile, **ici la vis**, et le codeur, la relation devient :

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

Système Vis-Ecrou avec $K = 1$ ($K = \frac{\omega_{Mo}}{\omega_C}$)



Système Vis-Ecrou avec $K \neq 1$ ($K = \frac{\omega_{Mo}}{\omega_C}$)



Fréquence des signaux A et B

- 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 :

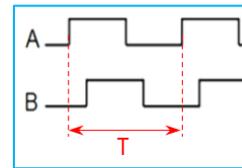
1 tour → R.T (R est la résolution et T et la période de A et B)

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

D'où la formule suivante :

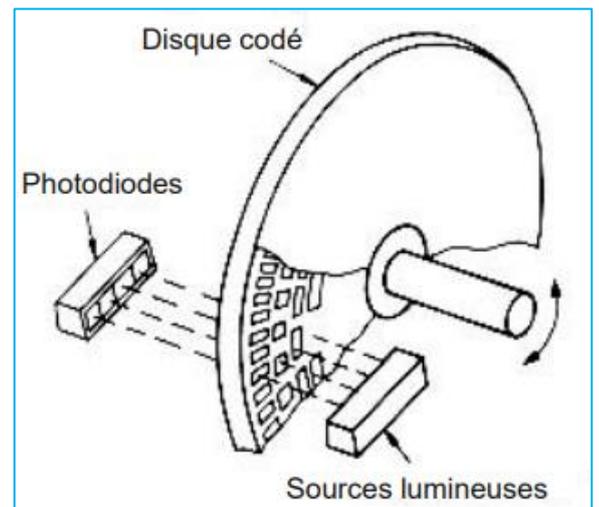
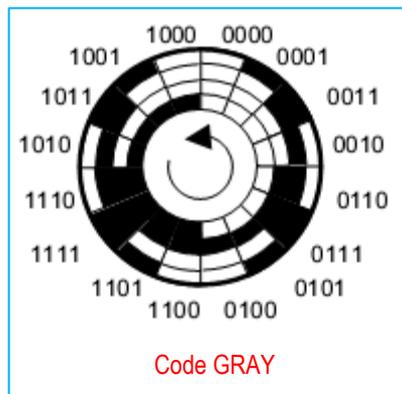
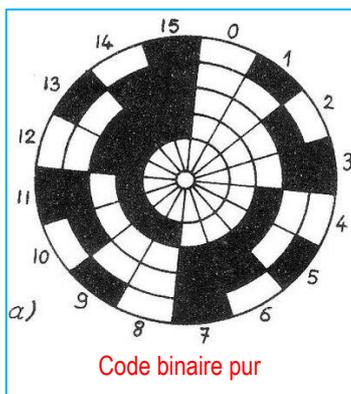
$$f = \frac{N \cdot R}{60}$$

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



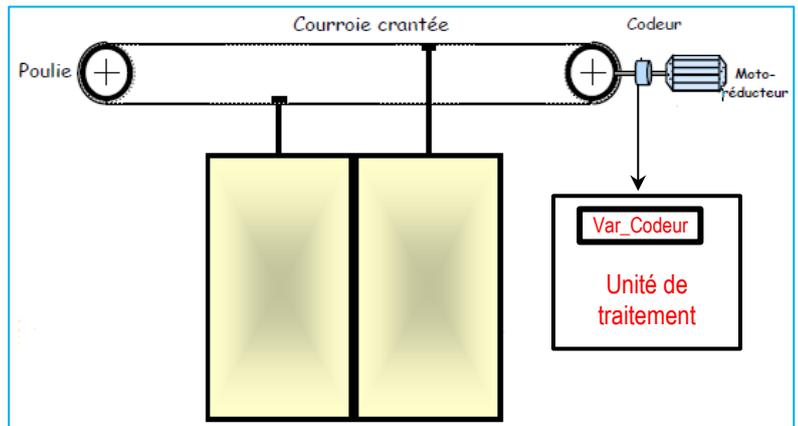
Codeur absolu

- 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**.
- Les 2 figures suivantes illustrent le principe pour un codeur absolu de 4 bits, pour les 2 codes binaire pur et binaire réfléchi (code Gray) :



Exemple d'application

- Le système de la figure ci-contre permet l'ouverture ou la fermeture automatique d'une porte à 2 volets coulissants. La transformation de la rotation du moteur en la translation des volets est assuré par un système poulies-courroie.
- Afin de piloter correctement le système, la connaissance de la position de la porte est nécessaire. Pour cela, un **codeur incrémental** de résolution ($R = 1024$), directement monté sur l'axe moteur, a été choisi pour cette application.
- L'unité de traitement reçoit le signal du codeur, compte ses impulsions et stocke le nombre correspondant dans une variable **Var_Codeur**.
- On a les données suivantes :



- Diamètre des poulies ($d = 40 \text{ mm}$) ; le rayon de la poulie est noté r .
- Course totale des volets ($L = 1\text{m}$).

• Alors :

- $K = \frac{\omega_{mo}}{\omega_c} = 1$ (le codeur est couple à la poulie motrice)

- La précision angulaire du codeur est :

$$\Delta\alpha = \frac{360}{R} K = \frac{360}{1024} = 0,352^\circ$$

- La précision de translation de la courroie est, avec ($K = 1$) :

$$\Delta x = \frac{2\pi \cdot r}{R} = \frac{2\pi \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{1024} = 0,123 \text{ mm}$$

- Le nombre d'impulsions N_{Imp} produit par le codeur pour l'ouverture complète de la porte est :

$$N_{Imp} = \frac{L}{\Delta x} = \frac{1}{0,123 \cdot 10^{-3}} = \frac{1000}{0,123} = 8130$$

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, débit, niveau, vitesse, etc.
- On traite à titre d'exemple la **dynamo tachymétrique**, qui permet de mesurer la **vitesse** d'un mobile en **rotation**, ainsi que le **capteur potentiométrique** pour mesurer la mesure de **position**.

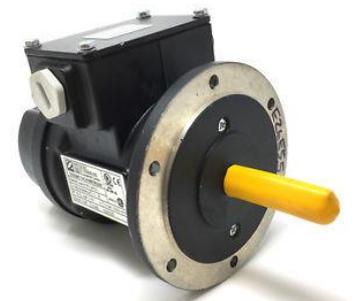
Dynamo tachymétrique

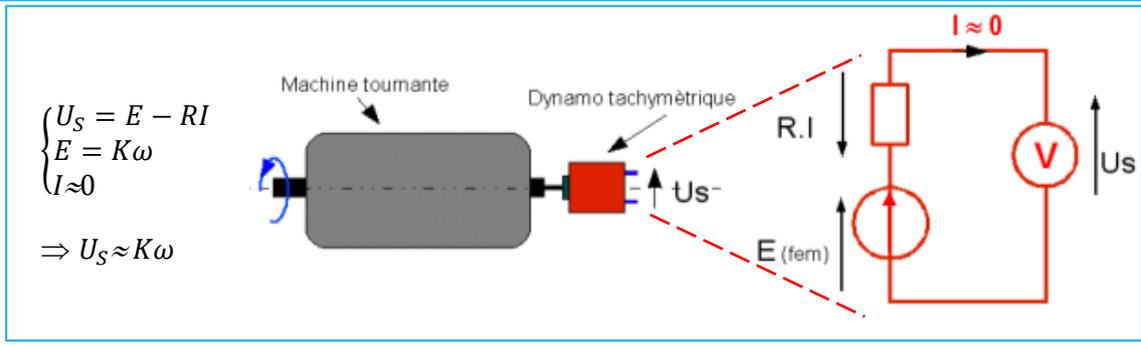
Principe

- 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 :

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

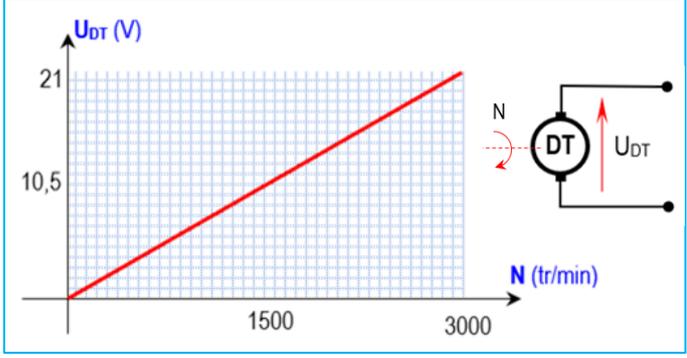
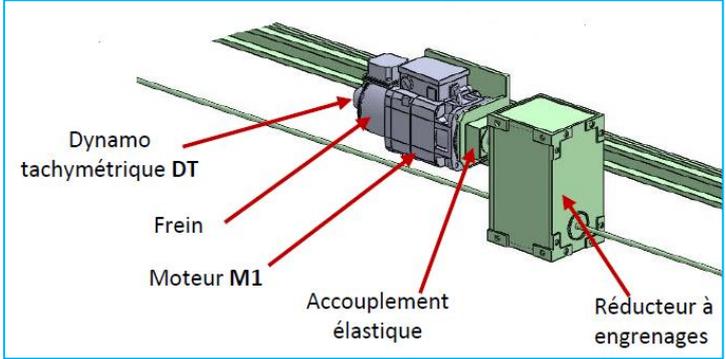
- **E (fem)** : Force électromotrice.
- **K_e** : Constante de fem (V/tr/min).





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 $N \in [0, 3000]$ est comme suit :



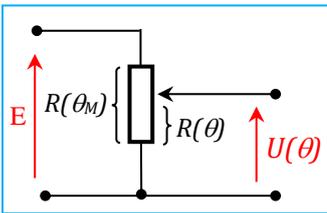
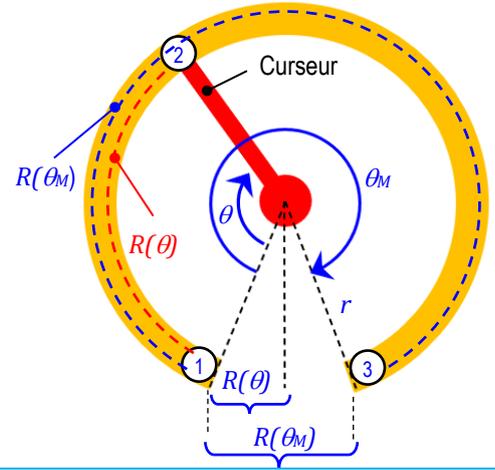
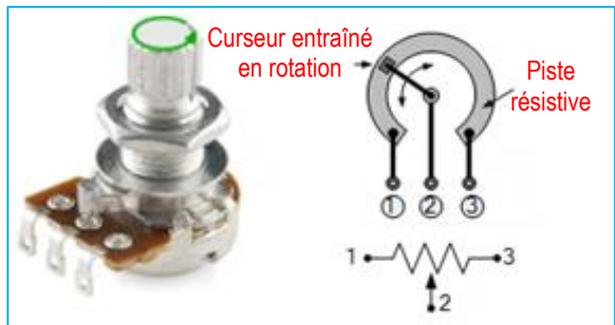
Capteur potentiométrique

Principe

- Les capteurs potentiométriques servent à détecter une position (déplacement) rectiligne ou angulaire.
- Dans le cas par exemple d'un déplacement angulaire, on utilise un potentiomètre comme celui de la figure ci-contre.
- L'axe du curseur **2** est accouplé au mobile dont on veut mesurer la position angulaire. Ainsi :

- A chaque position θ , correspond une valeur de résistance $R(\theta)$.
- $R(\theta) = \frac{\rho l}{S}$ avec $l = r \cdot \theta \Rightarrow R(\theta) = \frac{\rho r \cdot \theta}{S}$
- A θ_M , correspond la valeur maximale $R(\theta_M) = \frac{\rho r \cdot \theta_M}{S}$.

- Le montage électrique de ce type de capteur est comme suit :



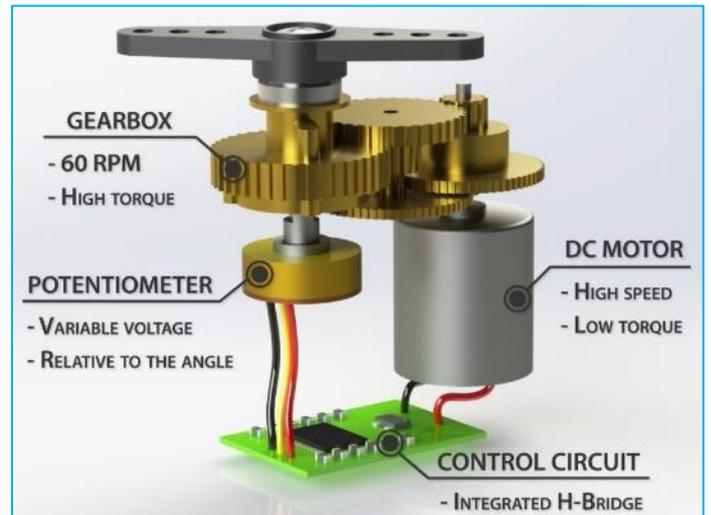
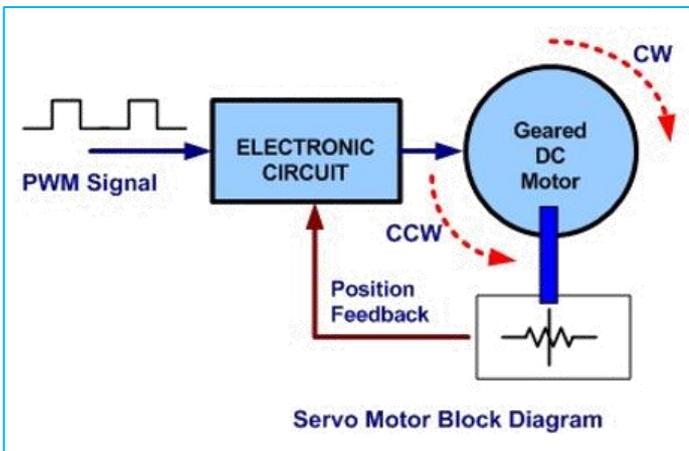
$$U(\theta) = \frac{E \cdot R(\theta)}{R_M} = \frac{E \cdot \frac{\rho \cdot r \cdot \theta}{S}}{\frac{\rho \cdot r \cdot \theta_M}{S}}$$

$$U(\theta) = \frac{E \cdot \theta}{\theta_M}$$

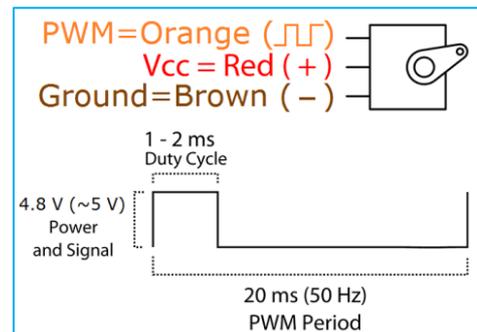
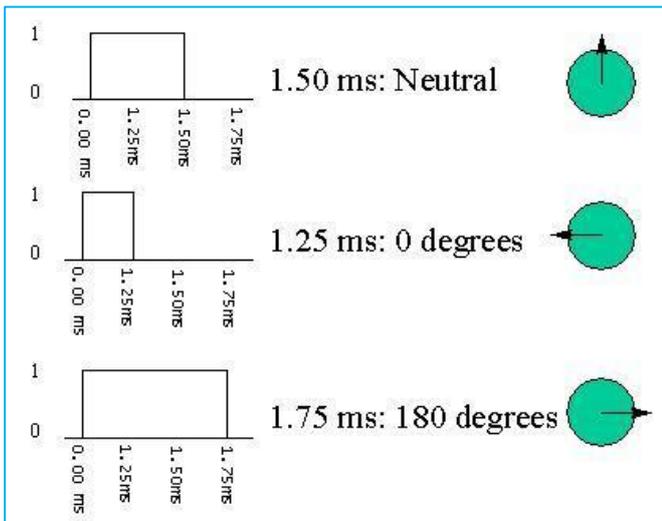
$U(\theta)$ est proportionnelle à θ , E et θ_M étant des constantes.

Exemple d'application

- Un servomoteur est un motoréducteur DC, qui est asservi en position ; il contient donc dans le même boîtier :
 - Un moteur DC.
 - Un réducteur à engrenages.
 - Un circuit électronique permettant la commande asservie en position angulaire de l'arbre de sortie du réducteur.
 - Un potentiomètre servant de capteur de position angulaire.
 - 3 fils de connexion : 2 pour l'alimentation 5 V et un pour la commande.



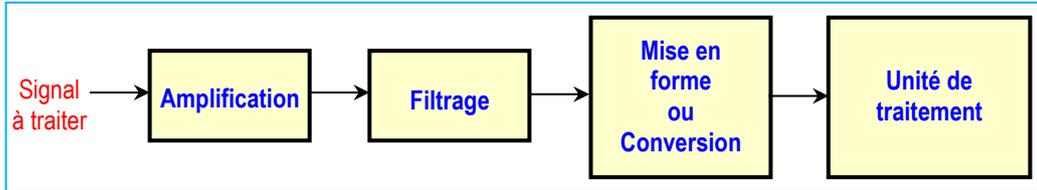
- Un servomoteur est commandé par un signal logique PWM (Pulse Width Modulation), i.e. la durée du niveau 1 de ce signal de commande, précise l'angle de rotation de l'arbre de sortie, comme l'illustre la figure ci-dessous.





Conditionnement de signal

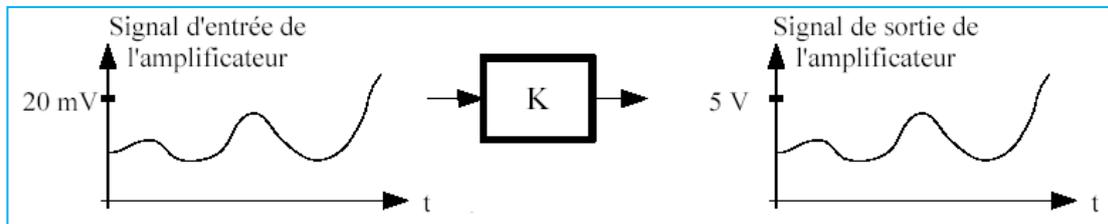
- Généralement, un capteur fournit un signal électrique qui peut se mettre sous différentes formes (tension, courant, etc.) et qui n'est **pas directement exploitable**.
- Le conditionnement du signal consiste à transformer et **adapter le signal** de départ afin de lui donner la forme la plus appropriée 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**.

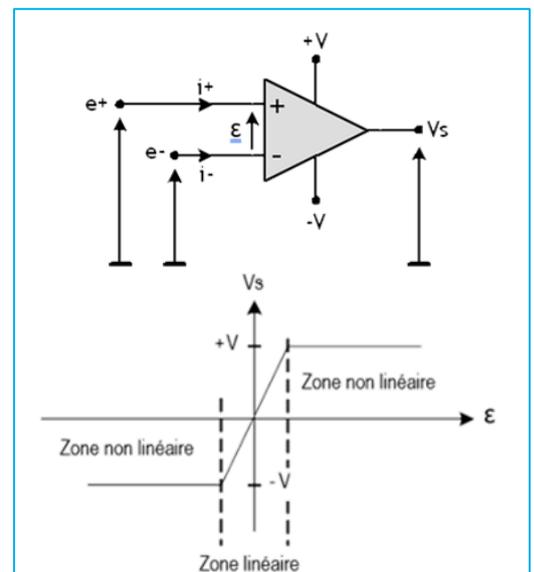
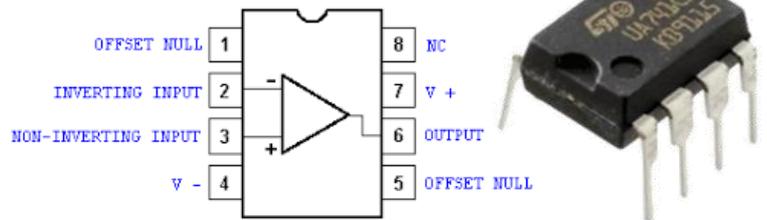
L'amplification à base d'un amplificateur opérationnel

- L'amplification se justifie dans les cas où le **signal est très faible**. Par exemple, un capteur fournit quelques microvolts (μV), 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_- , produisant une tension différentielle ϵ de ses entrées : $\epsilon = (e_+ - e_-)$.
 - Une sortie V_s .
- L'AOP est caractérisé par une amplification différentielle ($A_D = V_s/\epsilon$), 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 $V_s = A_D \cdot \epsilon$.
 - Régime non linéaire ou de **commutation**, où V_s peut prendre 2 valeurs :
 - $V_s = +V_{CC}$ si $\epsilon > 0$, i.e. $e_+ > e_-$.
 - $V_s = -V_{CC}$ si $\epsilon < 0$, 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

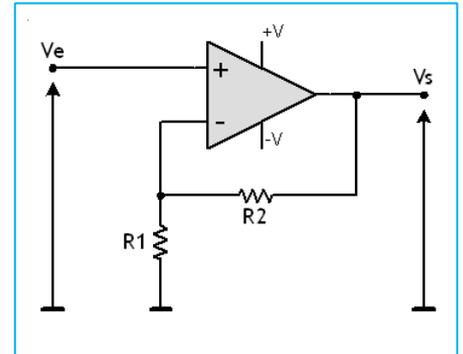
- Dans ce type de montages, il y a toujours une **réaction de la sortie vers l'entrée e₋** ; on parle dans ce cas de **réaction négative**, qui a pour conséquence de considérer que (**e₊ = e₋**).

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 · $\frac{R1}{R1+R2}$ et e₊ = V_e

$$Av = \frac{Vs}{Ve} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

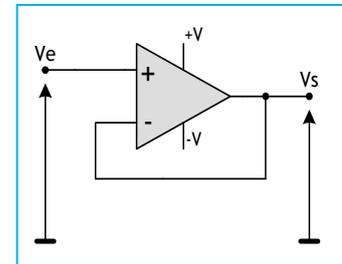


Suiveur

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

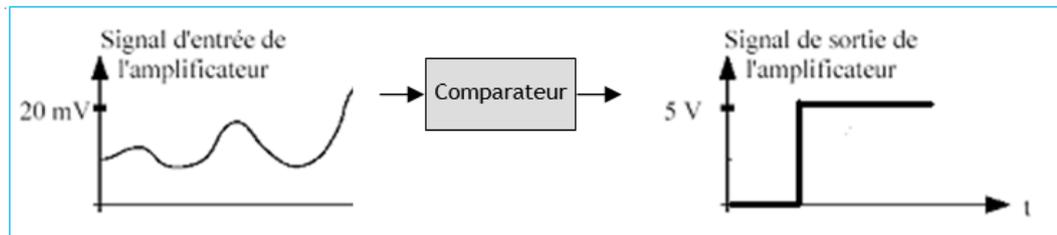
$$\begin{aligned} e_- &= e_+ \\ e_- &= Vs \\ e_+ &= Ve \end{aligned}$$

$$Vs = Ve \Rightarrow Av = \frac{Vs}{Ve} = 1$$



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.

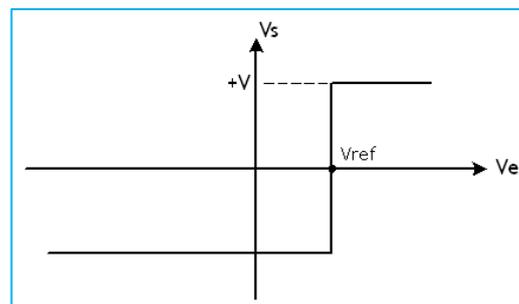
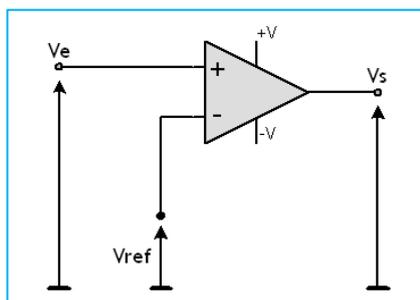


- En effet, le comparateur à un seuil consiste à comparer le signal analogique d'entrée par rapport à un seuil de référence :
 - Si ce seuil n'est pas atteint, alors la sortie du comparateur est au niveau logique **0**.
 - Si ce seuil est atteint, alors la sortie du comparateur **bascule** à l'autre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

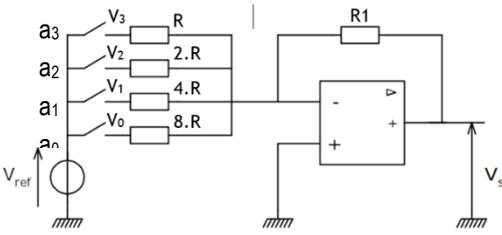
$$e_+ = Ve \quad \text{et} \quad e_- = Vref$$

Il y a 2 cas à envisager :

- Si $Ve > Vref$ alors : $Vs = +V$, ce qui est considéré comme niveau logique 1.
- Si $Ve < Vref$ alors : $Vs = -V$, ce qui est considéré comme niveau logique 0.



Mise en forme par conversion

Convertisseur Numérique/Analogique (CNA)	
Principe	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>Un CNA transforme un nombre N de n bits en une tension analogique Vs, qui lui est proportionnelle :</p> $V_s = q \cdot N$ <ul style="list-style-type: none"> N : Valeur du mot binaire de n bits $N = a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0$ q : Résolution (pas ou quantum). </div> </div>
Exemple : CNA à résistances pondérées	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>On note $V_i = a_i \cdot V_{ref}$; $i = 0 \dots 3$</p> $V_s = -\frac{R_1 \cdot V_{ref}}{R} \cdot (8 \cdot a_3 + 4 \cdot a_2 + 2 \cdot a_1 + a_0)$ $= -\frac{R_1 \cdot V_{ref}}{R \cdot 2^3} \cdot (a_3 \cdot 2^3 + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0)$ $V_s = q \cdot N \quad \text{avec } q = -\frac{R_1 \cdot V_{ref}}{R \cdot 2^3}$ $N = a_3 \cdot 2^3 + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0$ </div> </div>
Convertisseur Analogique/Numérique (CAN)	
Principe	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>Un CAN est un circuit qui transforme une grandeur analogique Vin en un nombre N 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 Pleine Echelle (PE) ; cette tension est notée VPE.</p> </div> </div>

Exemple d'application : Variation de vitesse d'une MCC

- Le **moteur M** commande une porte automatique. Etant fermée, la porte commence l'ouverture avec une vitesse Ω_1 de M pendant 75% de la course, puis ralentit à une vitesse Ω_2 ($\Omega_2 < \Omega_1$) pour terminer sa course en douceur.
- Les vitesses Ω_1 et Ω_2 correspondent respectivement à $V_s = 7,5$ V et $V_s = 3$ V.
- La carte électronique de traitement numérique commande :

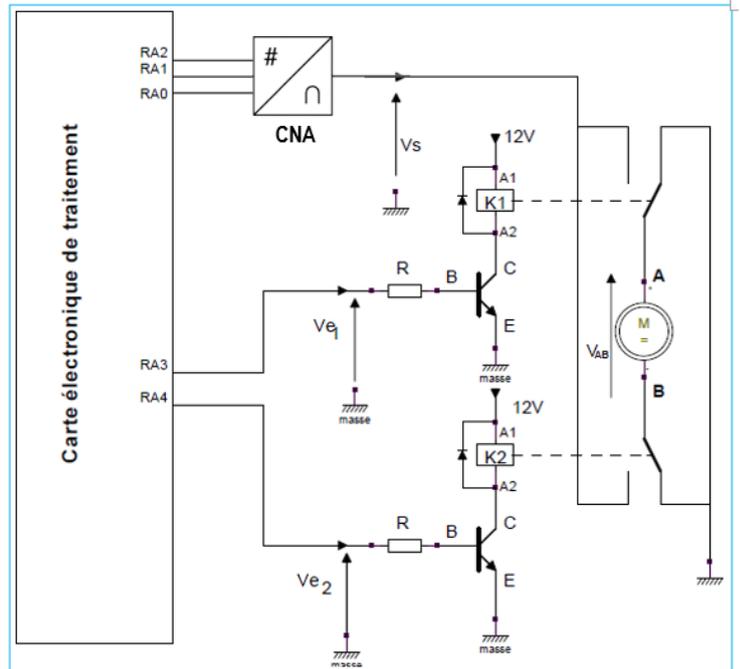
- L'ouverture ou la fermeture de la porte, via les signaux **RA4** et **RA3**.
- Le **CNA**, via les 3 bits **RA2 RA1 RA0**, qui délivre une tension **Vs** correspondant à la vitesse Ω_1 ou Ω_2 :

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

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 Ω_1 .
- 010 pour Ω_2 .



Exercices (Enoncés)

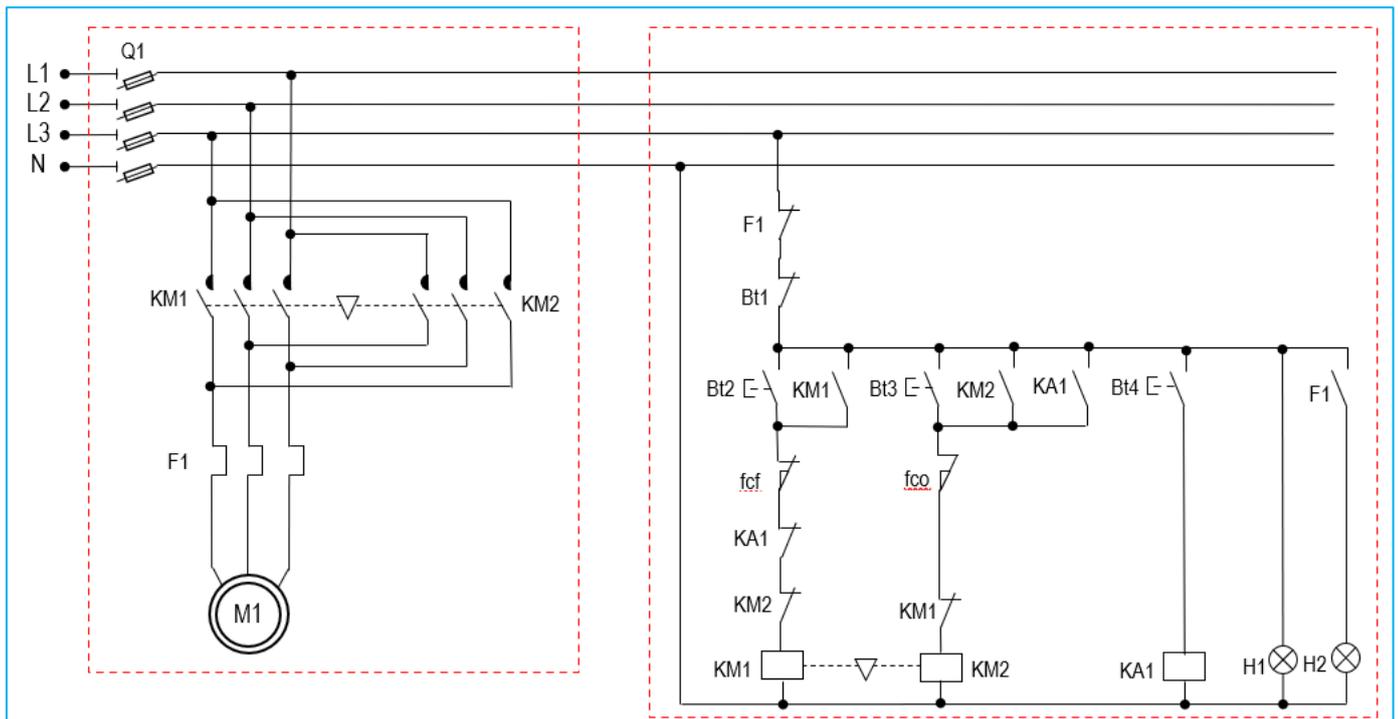
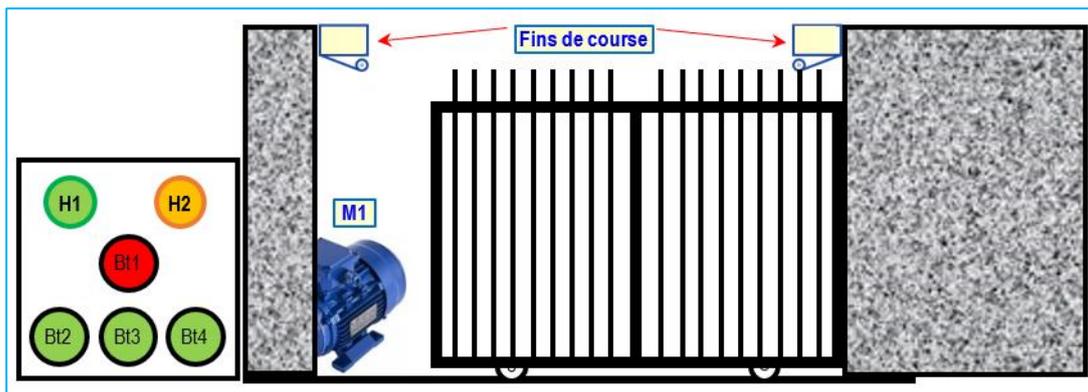
Exercice 1 : Commande électrique d'un portail

Le portail est commandé par un moteur triphasé à 2 sens de rotation.

1. A partir du schéma de commande ci-dessous, donner le nom de repère des **2 fins de course**.
2. On considère le **portail ouvert**. Compléter le texte suivant, qui décrit le fonctionnement du système :



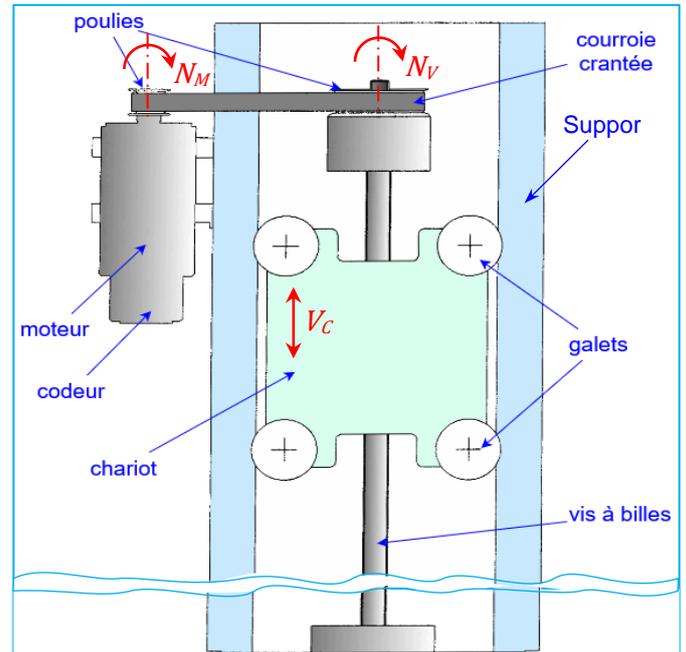
- L'action sur le bouton poussoir entraînera la fermeture du portail par l'intermédiaire du contacteur Lorsque le portail arrivera sur le contact de fin de course, le portail s'arrête.
- Une impulsion sur le boutonentraînera l'ouverture du portail par l'intermédiaire du contacteur Le portail s'arrête, quand il arrive enfin de course sur
- Toute impulsion sur le bouton poussoir, entraînera l'arrêt immédiat en position du portail.
- Si le portail est en phase de fermeture, l'action sur le bouton poussoirentraînera la réouverture de celui-ci.
- Les contacts auxiliaires normalement fermés et ont pour rôle le



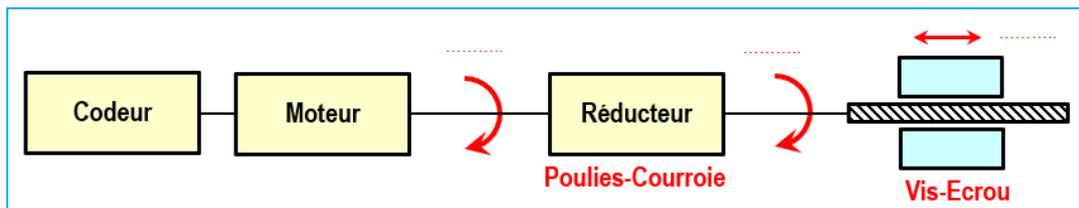
Exercice 2 : Commande en translation d'un chariot

Comme le montre la figure ci-contre, le chariot peut se déplacer le long du sens vertical sur une course de 450 mm grâce à un mécanisme Vis-Ecrou. Le système est caractérisé par ce qui suit :

- Système Poulies/Courroie :
 - Courroie crantée.
 - Nombre de dents des poulies $Z_m = 17$ et $Z_v = 45$.
- Système Vis/Écrou :
 - Vitesse maximale du déplacement : $V_C = 75 \text{ mm/s}$.
 - Précision du déplacement désirée : $\Delta X = 2 \mu\text{m}$.
 - Pas de la vis $p = 5 \text{ mm}$.



1. En notant que le codeur est couplé au moteur, i.e. ($\omega_C = \omega_M$), indiquer dans le diagramme suivant, les vitesses ω_v de la vis, ω_c du codeur et le déplacement linéaire X du chariot.

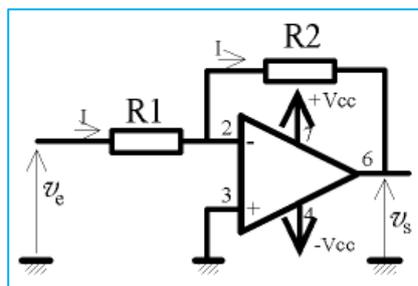


2. Donner l'expression de K .
3. Calculer la **Résolution R** du codeur pour obtenir la précision souhaitée ($\Delta x = 2 \mu\text{m}$).
4. Choisir un codeur dont la résolution est parmi les valeurs suivantes : **200, 500, 1000, 2000, 2500 points**.
5. En déduire la précision effectivement obtenue à l'aide du codeur choisi dans la question 4.
6. Exprimer et calculer la fréquence f du signal délivré par le codeur, à l'unité de traitement.
7. L'unité de commande stocke la valeur de position X dans une variable **Var_P**. Déterminer alors la valeur maximale **Var_P_max** que peut contenir cette variable **Var_P**.
8. Convertir ce nombre **Var_P_max** en binaire, en utilisant la calculatrice ou la division euclidienne à la main.
9. Déterminer le nombre de bits nécessaire de la variable **Var_P**, pour coder la position du chariot.

Exercice 3 : Amplificateur inverseur

En supposant que l'AOP est parfait, donner l'expression de l'amplification en tension :

$$A_v = \frac{v_s}{v_e}$$

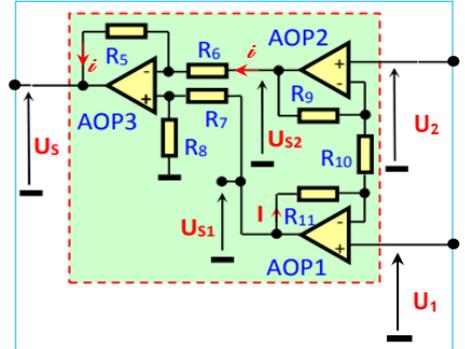


Exercice 4 : Amplificateur d'instrumentation

Le montage ci-contre représente un amplificateur différentiel utilisé dans les instruments de mesure, pour les faibles tensions issues d'un capteur (amplificateur d'instrumentation). On suppose que les AOPs sont parfaits et on donne :

$$R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = R_9 = R_{11} = R.$$

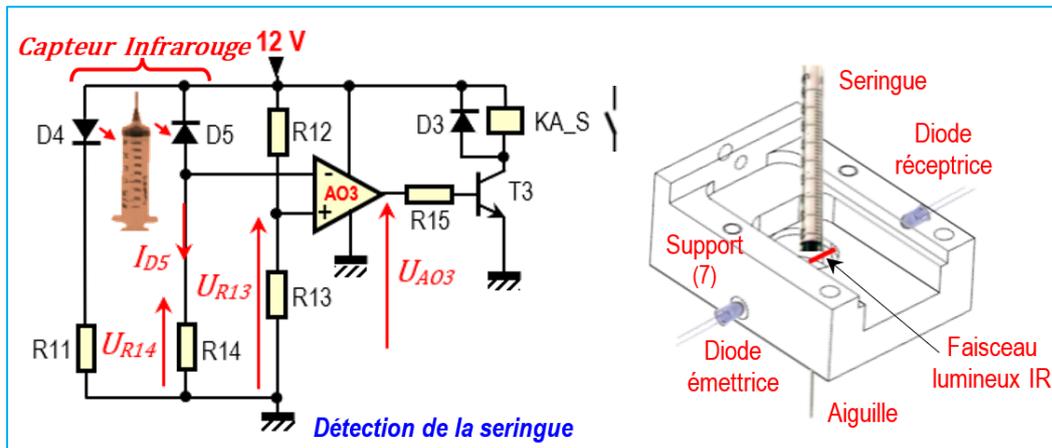
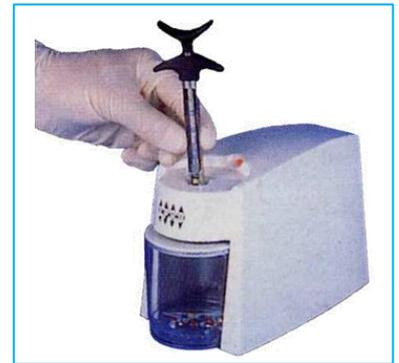
Exprimer alors $U_S = f(U_1, U_2)$



Exercice 5 : Comparateur à un seul seuil

Le destructeur d'aiguille permet aux chirurgiens-dentistes, par exemple, de détruire les aiguilles usagées sans risque de contamination. Dès que la seringue est introduite par l'utilisateur, le système la détecte par un capteur à infrarouge et démarre la découpe de l'aiguille. Le système de détection de la seringue repose sur un comparateur à amplificateur opérationnel (AO). La détection est effective par la fermeture du contact associé au relais **KA_S**.

Le montage ci-dessous utilise alors un capteur infrarouge constitué d'une diode émettrice d'**IR D4** et d'une **photodiode D5**. Cette dernière est une diode dont le courant inverse augmente en fonction de l'éclairement. Le **support (7)** contient 2 trous débouchant de part et d'autre, où se placent la diode émettrice et la diode réceptrice. Une fois l'appareil sous tension, la diode envoie le faisceau **IR** en permanence.



1. En prenant ($R_{14} = 160 \text{ k}\Omega$), calculer la tension U_{R14} dans les 2 cas suivants :

- 1.1. En l'absence de seringue, **D5** reçoit le rayonnement **IR**, ce qui produit un courant ($I_{D5} = 50 \mu\text{A}$).
- 1.2. Si la seringue est introduite, **D5** ne reçoit plus de rayonnement **IR**, ce qui produit un courant nul ($I_{D5} = 0$).

2. En prenant ($R_{12} = R_{13}$), calculer la tension U_{R13} .

3. On note que :

- Le circuit **AO3** est parfait et fonctionne en commutation, i.e. U_{AO3} ne peut prendre que **0** ou **12 V**.
- Le transistor **T3** fonctionne en commutation, i.e. il est bloqué ou saturé et il est équivalent à un **contact ouvert** ou un **contact fermé** dans le circuit Collecteur-Emetteur.

Compléter alors le tableau suivant, qui résume le fonctionnement du montage :

Seringue	I_{D5}	U_{R14}	U_{R13}	U_{AO3}	Etat de T3	Etat de la bobine de KA_S
Absente	$50 \mu\text{A}$					
Présente	0 A					



Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Commande électrique d'un portail

1. Repères des fins de course :

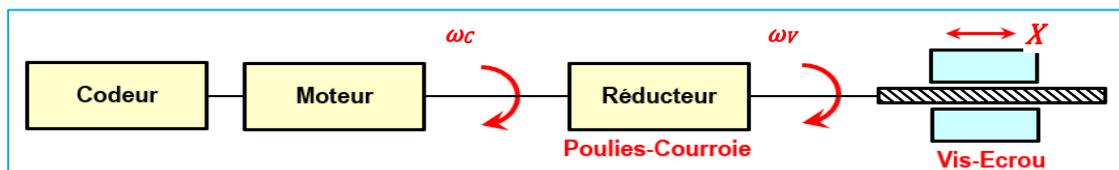
fcf et fco.

2. Compléter le texte décrivant le fonctionnement du système :

- L'action sur le bouton poussoir **bt2** entraînera la fermeture du portail par l'intermédiaire du contacteur **KM1**. Lorsque le portail arrivera sur le contact de fin de course **fcf**, le portail s'arrête.
- Une impulsion sur le bouton **bt3** entraînera l'ouverture du portail par l'intermédiaire du contacteur **KM2**. Le portail s'arrête, quand il arrive enfin de course sur **fco**.
- Toute impulsion sur le bouton poussoir **bt1**, entraînera l'arrêt immédiat en position du portail.
- Si le portail est en phase de fermeture, l'action sur le bouton poussoir **bt4** entraînera la réouverture de celui-ci.
- Les contacts auxiliaires normalement fermés **KM1** et **KM2**, ont pour rôle le **verrouillage électrique**.

Exercice 2 : Commande en translation d'un chariot

1. En notant que le codeur est couplé au moteur, i.e. ($\omega_C = \omega_M$), indiquer dans le diagramme suivant, les vitesses ω_V de la vis, ω_C du codeur et le déplacement linéaire X du chariot.



2. Donner l'expression de K .

$$K = \frac{\omega_V}{\omega_C} = \frac{N_V}{N_M} = \frac{Z_M}{Z_V}$$

3. Calculer la **Résolution** R du codeur pour obtenir la précision souhaitée ($\Delta x = 2 \mu\text{m}$).

$$\Delta X = \frac{p}{R} \cdot K = \frac{p}{R} \cdot \frac{Z_M}{Z_V}$$

$$R = \frac{p}{\Delta X} \cdot \frac{Z_M}{Z_V} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{17}{45} = 944,444$$

$$R = 945$$

4. Choisir un codeur dont la résolution est parmi les valeurs suivantes : **200, 500, 1000, 2000, 2500 points**.

On choisit le premier codeur possédant plus de 945 points, soit le modèle à **1000 points**.

5. En déduire la précision effectivement obtenue à l'aide du codeur choisi en (**Q34**). (**0,25 pt**)

$$\Delta X = \frac{p}{R} \cdot \frac{Z_M}{Z_V} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1000} \cdot \frac{17}{45} = 1,888 \cdot 10^{-6} \text{ m} \Rightarrow \Delta X = 1,888 \mu\text{m}$$

6. Exprimer et calculer la fréquence f du signal délivré par le codeur, à l'unité de traitement.

$$f = \frac{N_C \cdot R}{60}, \text{ avec } N_C = N_M$$

$$\frac{N_V}{N_M} = \frac{Z_M}{Z_V} = \frac{17}{45} \Rightarrow N_M = N_V \frac{45}{17}$$

$$V = \frac{p \cdot N_V}{60} \Rightarrow N_V = \frac{V \cdot 60}{p}$$

$$N_M = \frac{V \cdot 60}{p} \cdot \frac{45}{17}$$

$$f = \frac{V \cdot 60 \cdot 45 \cdot R}{p \cdot 17 \cdot 60} = \frac{75 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 1000}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 17} = \frac{75 \cdot 45 \cdot 1000}{5 \cdot 17} = 39705,882 \text{ Hz}$$

$$f = 39,705 \text{ kHz}$$

7. L'unité de commande stocke la valeur de position X dans une variable Var_P . Déterminer alors la valeur maximale Var_P_{max} que peut contenir la variable Var_P .

$$Var_P_{max} = \frac{\text{Course maximale}}{\text{Precision}} = \frac{450}{0,002} = 225000$$

8. Convertir ce nombre Var_P_{max} en binaire, en utilisant la calculatrice ou la division euclidienne à la main.

$$(225000)_{10} = (11\ 0110\ 1110\ 1110\ 1000)_2$$

9. Déterminer le nombre de bits nécessaire de la variable Var_P , pour coder la position X de l'ascenseur.

18 bits

Exercice 3 : Amplificateur inverseur

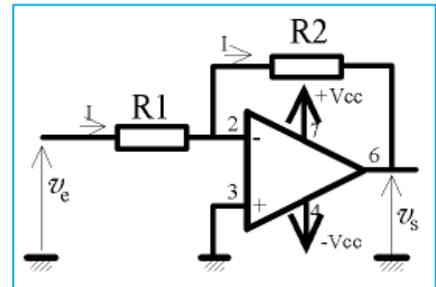
On a :

$$e_- = e_+ = 0$$

$$i = \frac{v_e - v_s}{R_1 + R_2} = \frac{v_e}{R_1}$$

On en déduit :

$$\frac{v_s}{v_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$



Exercice 4 : Amplificateur d'instrumentation

On veut exprimer alors $U_S = f(U_1, U_2)$

On a :

Pour les 3 AOPs, $e_- = e_+ = 0$

$$I = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{R_9 + R_{10} + R_{11}} = \frac{U_1 - U_2}{R_{10}}$$

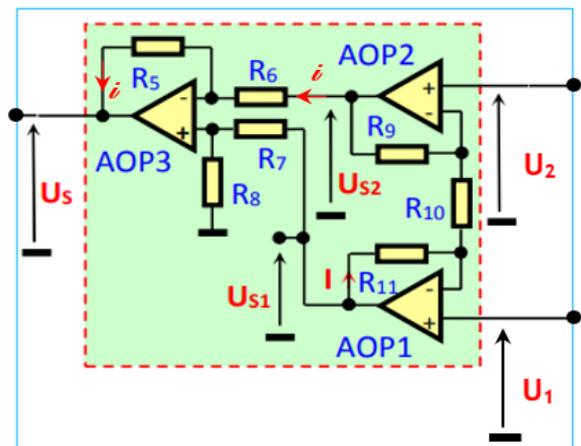
On en déduit :

$$U_{S1} - U_{S2} = (U_1 - U_2) \left(1 + \frac{2R}{R_{10}}\right)$$

On a pour AOP3 :

$$i = \frac{U_{S2} - e_-}{R_6} = \frac{e_- - U_S}{R_5} \Rightarrow e_- = \frac{U_S + U_{S2}}{2}$$

$$e_+ = \frac{U_{S1} \cdot R_8}{R_8 + R_7} = \frac{U_{S1}}{2}$$





On en déduit :

$$U_S = U_{S1} - U_{S2}$$

Finalement, on a :

$$U_S = U_{S1} - U_{S2} = (U_1 - U_2) \left(1 + \frac{2R}{R_{10}}\right)$$

On remarque alors que ce type d'amplificateur amplifie par $\left(1 + \frac{2R}{R_{10}}\right)$ la tension différentielle $(U_1 - U_2)$.

Exercice 5 : Comparateur à un seul seuil

1. En prenant ($R_{14} = 160 \text{ k}\Omega$), calculer la tension U_{R14} dans les 2 cas suivants :

1.1. En l'absence de seringue, $D5$ reçoit le rayonnement IR , ce qui produit un courant ($I_{D5} = 50 \mu\text{A}$).

$$U_{R14} = R_{14} \cdot I_{D5} = 160 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 8 \text{ V}$$

1.2. Si la seringue est introduite, $D5$ ne reçoit plus de rayonnement IR , ce qui produit un courant nul ($I_{D5} = 0$).

$$U_{R14} = R_{14} \cdot I_{D5} = 160 \cdot 10^3 \cdot 0 = 0 \text{ V} \quad U_{R14} = R_{14} \cdot I_{D5} = 160 \cdot 10^3 \cdot 0 = 0 \text{ V}$$

1.3. En prenant ($R_{12} = R_{13}$), calculer la tension U_{R13} .

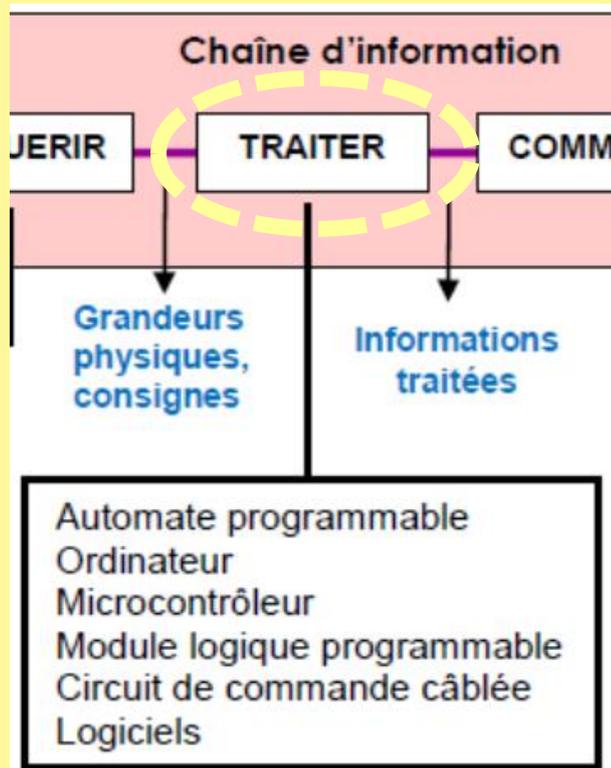
$$U_{R14} = 12 \cdot \frac{R_{13}}{R_{13} + R_{13}} = 12 \cdot 0,5 = 6 \text{ V}$$

2. On note que :

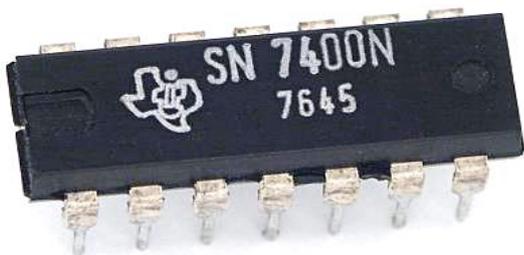
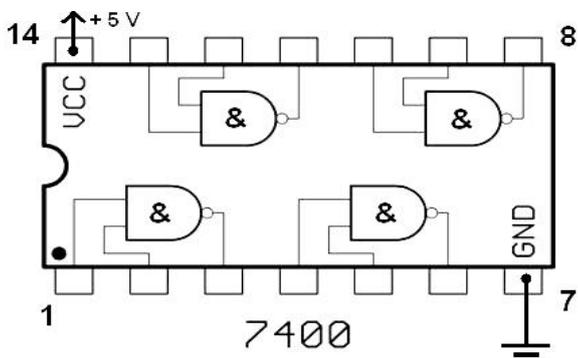
- Le circuit $AO3$ est parfait et fonctionne en commutation, i.e. U_{AO3} ne peut prendre que 0 ou 12 V .
- Le transistor $T3$ fonctionne en commutation, i.e. il est bloqué ou saturé et il est équivalent à un *contact ouvert* ou un *contact fermé* dans le circuit Collecteur-Emetteur.

Compléter alors le tableau suivant, qui résume le fonctionnement du montage :

Seringue	I_{D5}	U_{R14}	U_{R13}	U_{AO3}	Etat de T3	Etat de la bobine de KA_S
Absente	$50 \mu\text{A}$	8 V	6 V	0 V	Bloqué	Non alimentée
Présente	0 A	0 V	6 V	12 V	Saturé	Alimentée



Fonction Traiter





Les systèmes de numération de base 2

Introduction

- Le système de numération décimal est dit à **base 10** ; comme on le sait, dans cette base familière :
 - On utilise les 10 symboles, appelés **chiffres**, de l'ensemble : {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}.
 - Un nombre quelconque peut s'écrire en utilisant les **puissances de 10**.
Exemple : $571 = 5 \cdot 10^2 + 7 \cdot 10^1 + 1 \cdot 10^0$.
- Mais la représentation des nombres avec le système (base 10) n'est pas la seule utilisée.
- On note en particulier le système **binaire (base 2)** ; elle est utilisée dans les calculs avec les **circuits logiques**, qui ne connaissent que les valeurs 0 et 1.

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 $N = A_{n-1}2^{n-1} + \dots + A_j 2^j + \dots + A_1 2^1 + A_0 2^0$.
Exemple : $N = 110101$; il a pour valeur $N = 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 53$.
 - 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 : $(1011)_2 = 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 8 + 0 + 2 + 1 = (11)_{10}$.

Conversion de la base 10 vers une base b :

Principe général

- Dans une **base b**, un nombre s'écrit, selon la forme polynomiale :

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} a_i b^i$$

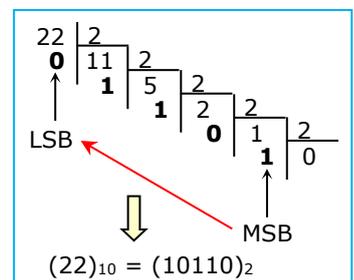
- Le problème revient alors à déterminer la suite des symboles **a_i** . La méthode de base la plus utilisée consiste en l'algorithme suivant :
 - On effectue des divisions euclidiennes successives par **b**, jusqu'à obtenir un quotient nul :

$$\begin{aligned} N &= q_0 b + r_0, \text{ avec } q_0 = q_1 b + r_1 \\ &= (q_1 b + r_1) b + r_0 \\ &= q_1 b^2 + r_1 b + r_0, \text{ avec } q_1 = q_2 b + r_2 \\ &= (q_2 b + r_2) b^2 + r_1 b + r_0 = q_2 b^3 + r_2 b^2 + r_1 b + r_0 \\ &= \dots \\ &= r_{n-1} b^{n-1} + \dots + r_2 b^2 + r_1 b + r_0 \end{aligned}$$
 - Ainsi, les restes de ces divisions successives, écrits dans l'ordre inverse, constituent le nombre N dans la base b (le 1^{er} reste r_0 est le LSB et le dernier reste r_{n-1} est le MSB).

Exemple : Conversion de la base 10 vers la base 2

- On effectue alors 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 $(N)_2$, comme le montre la figure ci-contre.

Exemple : $(22)_{10} = (10110)_2$.



Codage de l'information 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**.

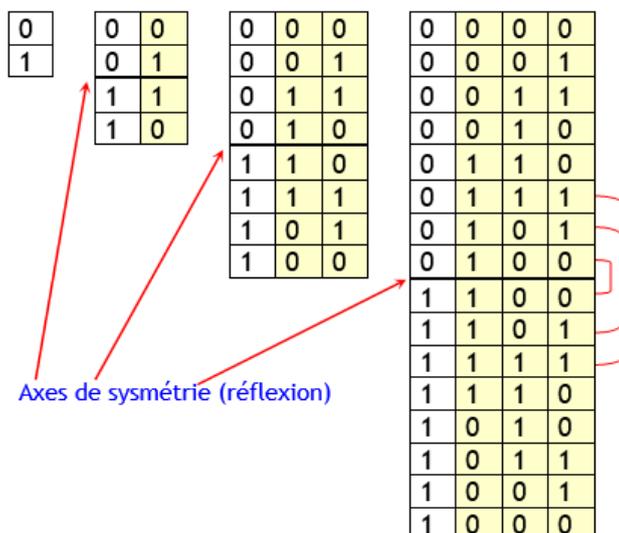
Le code binaire pur et le code GRAY

- Le code binaire pur découle directement du **principe général de la numération** (voir tableau 1 ci-dessous).
- Avec le code GRAY, dans le passage d'une combinaison à une autre, **il n'y a qu'une variable qui change** (voir tableau 2 ci-dessous) ; comme l'indique ce tableau pour 4 bits :
 - On a, bien évidemment, 16 combinaisons différentes (2^4).
 - Dans le passage d'une combinaison à une autre, il n'y a qu'un seul bit qui change.

Tableau 1				
Valeur décimale	Code binaire			
	A ₃	A ₂	A ₁	A ₀
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

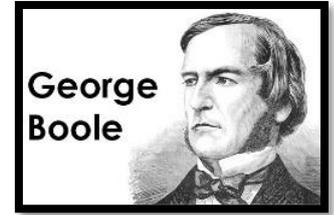
Tableau 2								
Valeur décimale	Code binaire				Code GRAY			
	B ₃	B ₂	B ₁	B ₀	G ₃	G ₂	G ₁	G ₀
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	1	0
5	0	1	0	1	0	1	1	1
6	0	1	1	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	0	1	0	0
8	1	0	0	0	1	1	0	0
9	1	0	0	1	1	1	0	1
10	1	0	1	0	1	1	1	1
11	1	0	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

- On l'appelle aussi « **code binaire réfléchi** », parce que pour le construire, on procède par réflexion :



Introduction

- De nombreux dispositifs ont **2 états stables** de fonctionnement. Par exemple, un interrupteur peut être ouvert ou fermé ; un transistor, sous certaines conditions, peut être bloqué ou saturé, etc.
- Par **convention** On convient d'affecter, à un des 2 états la valeur « 0 » et « 1 » à l'autre état.
- L'**algèbre de Boole**, lancée par le mathématicien anglais **George Boole**, est l'**outil mathématique** pour étudier ces dispositifs et les **circuits logiques** représentent l'**outil technologique** pour réaliser pratiquement les opérations de cette algèbre.
- Les circuits qu'on va étudier dans ce chapitre sont dits **combinatoires**, car l'état de leurs sorties dépend uniquement de l'état des entrées.



Opérations booléennes élémentaires

Opération Inversion

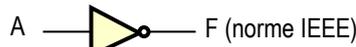
- C'est une opération définie sur une seule variable. La sortie prend la valeur que n'a pas l'entrée. On dit que la sortie est l'inverse ou le **complément** de l'entrée.

Table de vérité

A	F
0	1
1	0

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

Symbole

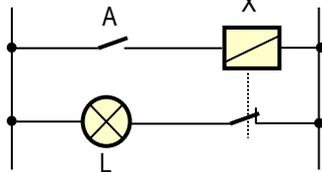


IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers.



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 ⇒ 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 ⇒ L=0.
- Alors, L = Not A ou $L = \overline{A}$

- Propriété** : $\overline{\overline{F}} = F$

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

$F = A . B = AB$ (se lit A ET B)

Symbole

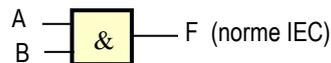
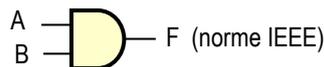
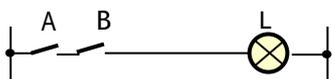


Illustration électrique



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



Propriétés :

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

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

$F = A + B$ (se lit A OU B)

Symbole

F (norme IEEE)

F (norme IEC)

Illustration électrique



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

- Le signe « \geq » indique que la sortie est égale à 1 si le nombre des entrées à « 1 » est supérieur ou égal à 1 ; autrement dit, une entrée au moins égale à « 1 ».

Propriétés :

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

Quelques règles remarquables

- Factorisation : $AB + \bar{A}B = B(A + \bar{A}) = B.1 = B$
- Loi d'absorption : $A + AB = A(1 + B) = A.1 = A$
- Distributivité du produit par rapport à la somme : $A.(B + C) = AB + AC$
- Distributivité de la somme par rapport au produit : $A + (B.C) = (A + B).(A + C)$

Théorème de De Morgan

- Ce théorème permet de calculer le **complément** d'une expression logique quelconque (somme de produits ou produit de sommes) :

- $\overline{X + Y} = \bar{X} . \bar{Y}$
- $\overline{X . Y} = \bar{X} + \bar{Y}$

- D'une façon générale, le complément d'une expression quelconque s'obtient en **complémentant** les variables et en **permutant** les opérateurs « + » et « . ».

Exemple : $F = \bar{A}BD + A\bar{D} \Rightarrow \bar{F} = \overline{\bar{A}BD + A\bar{D}} = (A + \bar{B} + \bar{D}).(\bar{A} + D)$

Autres opérations

Opération NAND

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

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

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

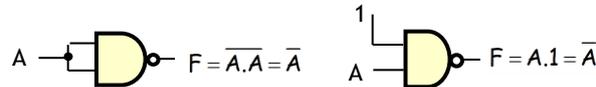
Symbole

A B — F (norme IEEE)

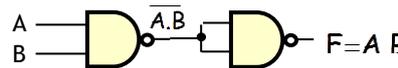
A B — F (norme IEC)

- L'opérateur NAND est dit « **système logique complet** », car il permet de réaliser toutes les opérations de base : Not, AND et OR ; et par conséquent, toute fonction logique :

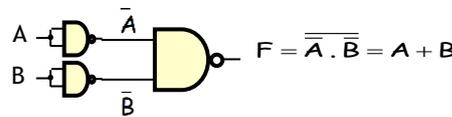
- Réalisation d'un inverseur :



- Réalisation d'une AND ($F = A \cdot B$) : En appliquant le théorème de De Morgan, $F = \overline{\overline{A \cdot B}} = \overline{\overline{A} \cdot \overline{B}}$



- Réalisation d'une OR ($F = A + B$) : De même, $F = \overline{\overline{A + B}} = \overline{\overline{A} \cdot \overline{B}}$ (Morgan)



Opération NOR

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

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

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

Symbole

A B — F (norme IEEE)

A B — F (norme IEC)

- L'opérateur NOR est un système logique complet, comme le NAND.

Opération XOR

- Cette opération diffère du OR classique dit aussi **OR 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 :

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

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)

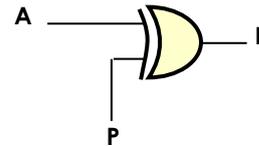
Symbole

A B — F (norme IEEE)

A B — F (norme IEC)

- 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.
- L'opérateur XOR est considéré comme **l'opérateur programmable le plus élémentaire**. Considérons pour cela sa table de vérité dans la figure suivante, on remarque que suivant l'état de P, l'opérateur réalise la fonction **OUI** ou la fonction **NON**. Alors P est l'entrée de programmation de cet opérateur :

P	A	F	Fonction réalisée par l'opérateur
0	0	0	SI $P = 0 \Rightarrow F = A \Rightarrow$ Fonction Identité
0	1	1	
1	0	1	SI $P = 1 \Rightarrow F = \text{Not } A \Rightarrow$ Fonction Inversion
1	1	0	

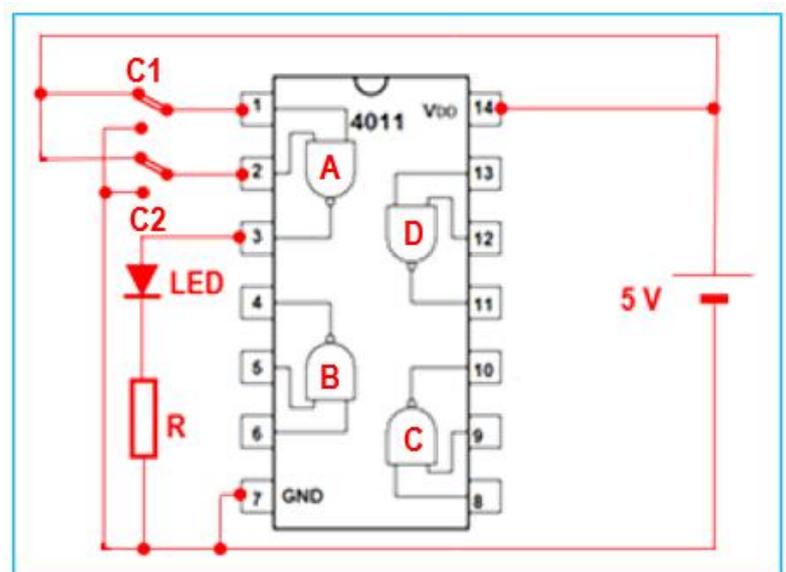


Circuits logiques électroniques

- 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 :** Montage de test du circuit logique **4011**, circuit à **4 portes NAND à 2 entrées** :
 - Le circuit est alimenté avec du 5 V.
 - 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 :

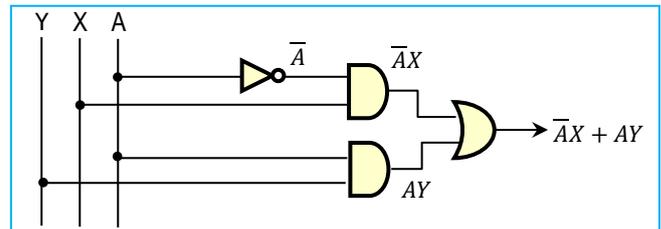
A	X	Y	F
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

- 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.

La fonction F est ainsi **Vraie** si on a $\bar{A}X\bar{Y}$ **OU** $\bar{A}XY$ **OU** $A\bar{X}Y$ **OU** AXY , ce qui donne :

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

- 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).

Simplification des fonctions logiques : 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.



Simplification des fonctions logiques : 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

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

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 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 $B\bar{C}$.

- 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

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

Automate Programmable Industriel (API)

Principe

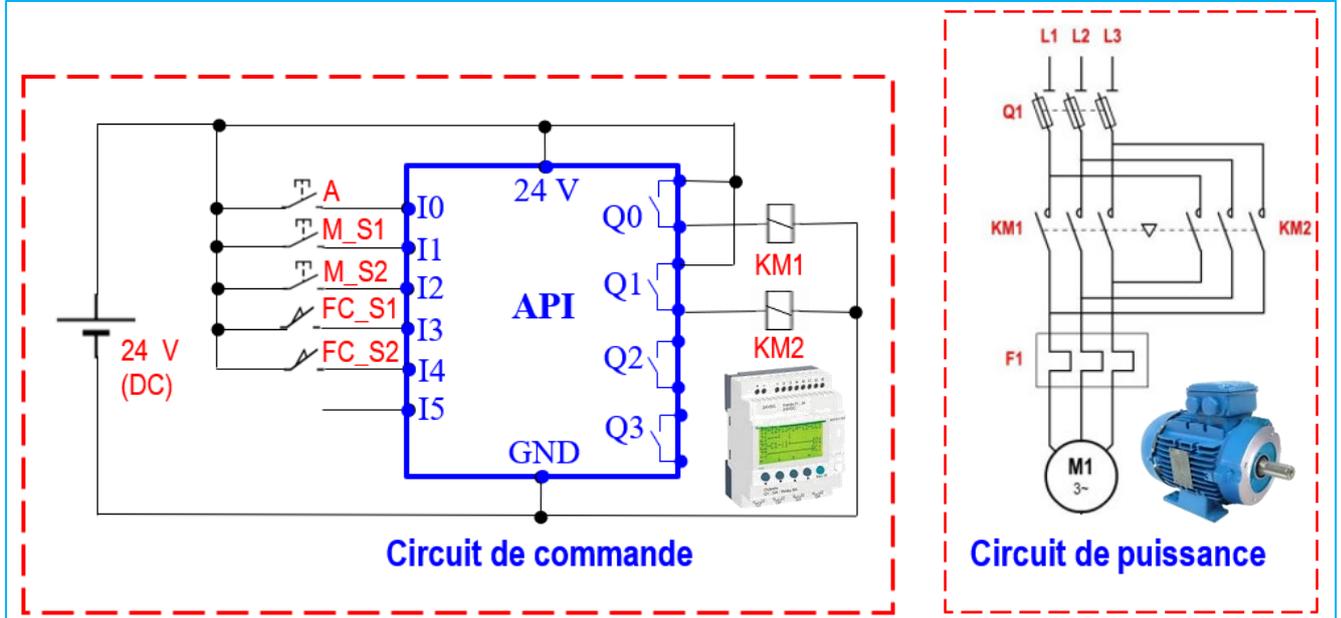
- Un **API** est une unité de traitement à base de **microprocesseur** ou microcontrôleur, qui est un composant électronique numérique pouvant réaliser des **fonctions arithmétiques et logiques** relativement complexes, selon un **programme** qu'on implémente dans sa **mémoire**. Il a :
 - Des **entrées logiques** pour acquérir l'état des **capteurs** ou composants interface Homme/Machine (**IHM**).
 - Des **sorties logiques**, souvent des **contacts de relais** pour commander les **actionneurs**.



Exemple d'application

Présentation

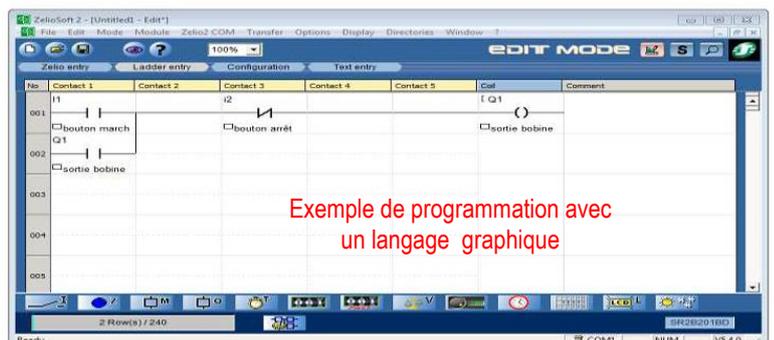
- C'est la commande d'un MAS pour l'ouverture d'un portail, avec un API de 6 entrées et 4 sorties à relais ; alors :
 - L'API est **alimenté** avec du **24 V DC** et les **bobines** des contacteurs sont aussi à commande **24 V DC**.
 - L'entrée **I0** reçoit l'état du bouton poussoir **A** pour l'arrêt 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 du portail.
 - La sortie **Q1** commande la bobine de **KM2**, pour la fermeture du portail.



Programme, algorithme et organigramme du système

Programme

- Un **programme** est une suite d'instructions d'un **langage donné**, textuel ou graphique, qu'on écrit dans un environnement de programmation sur **PC** et qu'on télécharge sur l'API.
- Avant d'écrire un **programme** dans un API, dans un **langage donné**, on établit d'abord un **algorithme** ou/et un **organigramme**.

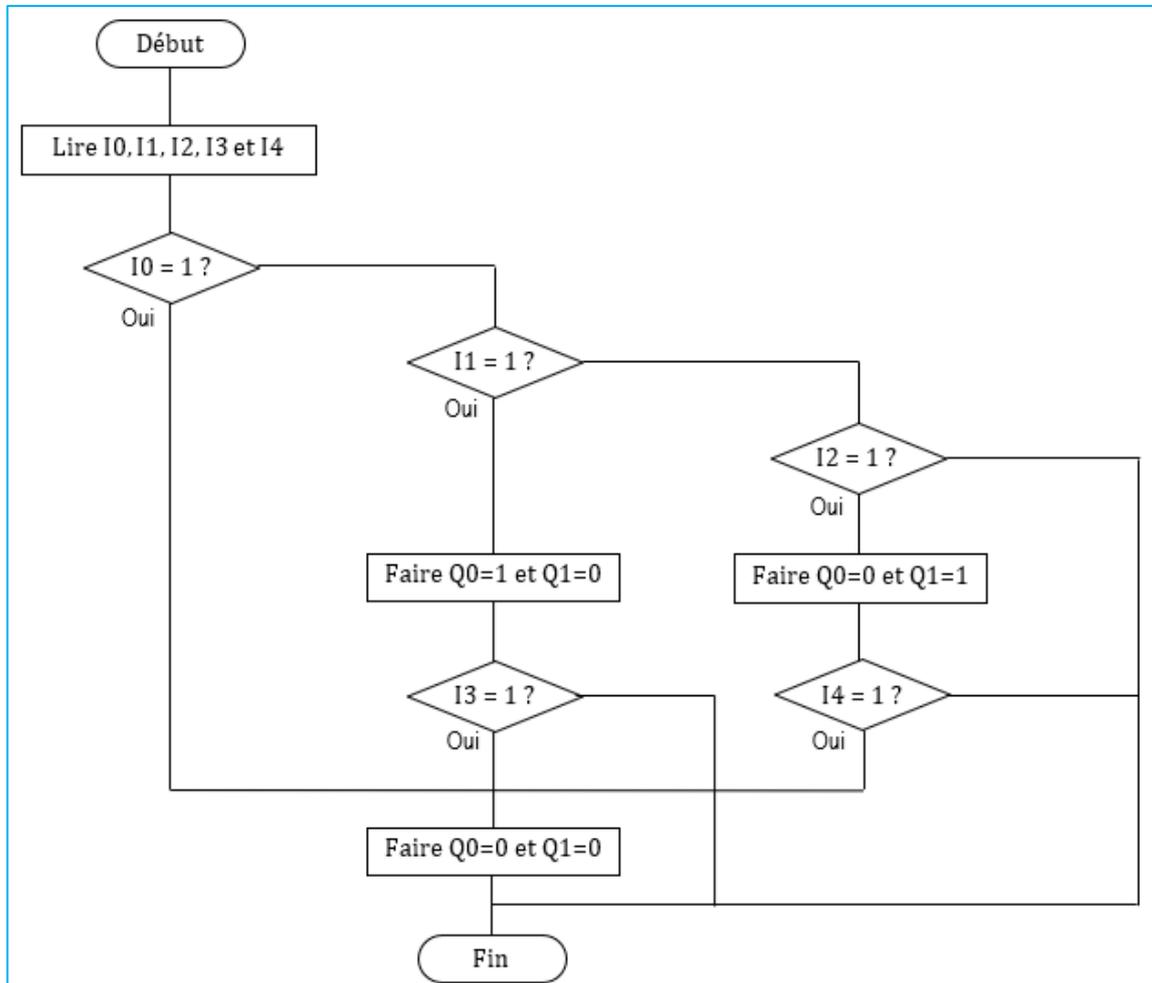
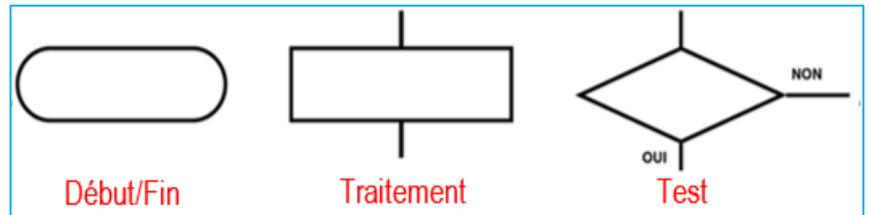


Algorithme

- Un **algorithme** est la description d'une **suite d'étapes** permettant d'obtenir un **résultat** de la résolution d'un problème, à partir d'éléments fournis en entrée.
- Dans l'exemple de cette section, 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, **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, **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**.

Organigramme

- **L'organigramme** est un **diagramme fonctionnel** qui décrit le fonctionnement d'un système. C'est alors une **représentation graphique** ordonnée des instructions de traitement d'un problème. On trouve principalement les symboles ci-contre.
- Dans notre exemple, le **programme** implémenté dans la mémoire de l'API correspond à **l'organigramme** suivant :



Exercices (Enoncés)

Exercice 1 : Gestion simple d'un Store automatisé

Le système de commande du store étudié dans cet exemple est simplifié par rapport à la réalité pour des raisons didactiques ; en effet le fonctionnement correct du système nécessite des temporisations et des fonctions de mémoire qui ne sont pas étudiées ici :

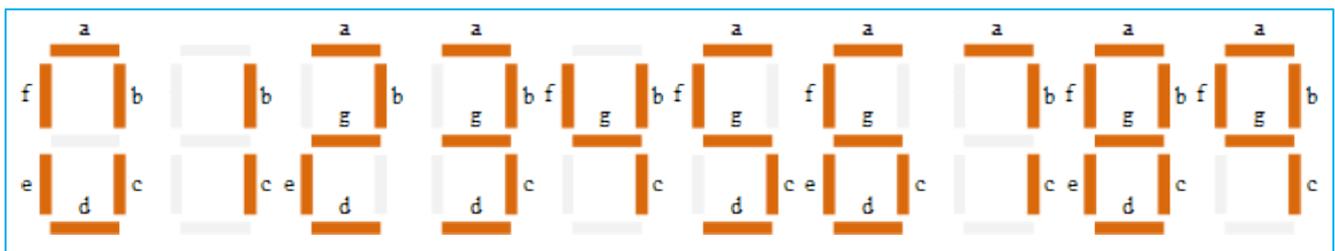
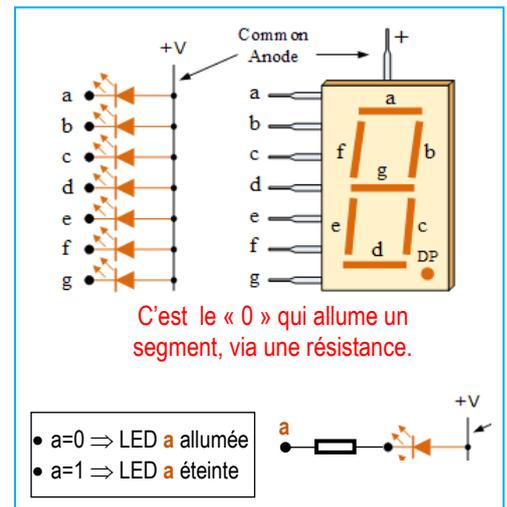
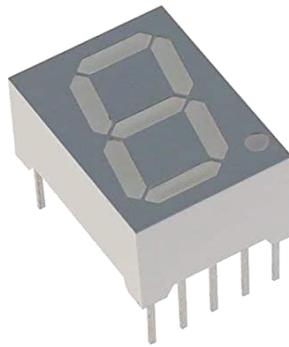
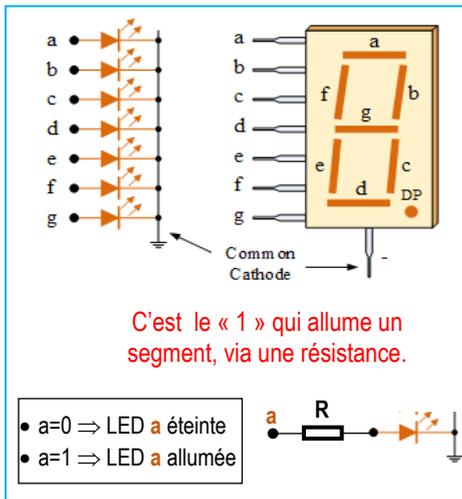


- Si la luminosité du soleil (**s**), captée par une cellule solaire, dépasse un seuil prédéfini, on descend le store (**Sortie D**).
- 2 boutons poussoirs permettent la descente (**d**) ou la montée (**m**) du store.
- Un appui simultané sur les 2 boutons entraîne la descente du store.
- L'information **s** est prioritaire sur les boutons m et d.
- Si la vitesse du vent (**v**), captée par un anémomètre, dépasse un seuil prédéfini, on remonte le store (**Sortie M**) ; ce fonctionnement de sécurité est prioritaire sur tous les autres.

1. Dresser la table de vérité du système.
2. Dresser les tableaux de Karnaugh pour la montée du Store **M** et pour la descente du Store **D** et donner leurs équations.
3. Donner les logigrammes de M et de D.

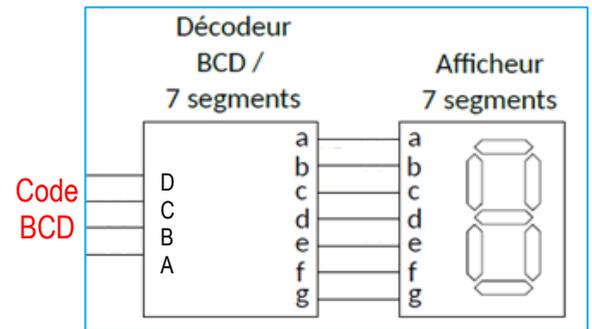
Exercice 2 : Affichage 7 segments

Un afficheur 7 segments est un circuit permettant d'afficher des informations en code décimal au moyen d'une matrice de 7 segments constitués de 7 LEDs. Chaque segment est désigné par une lettre **a, b, c, d, e, f et g**. La figure suivante montre la disposition de ces segments. Dans la figure, on remarque aussi la présence d'une 8^e LED, i.e. le **DP** (Decimal Point), qui joue le rôle de virgule ; DP ne va pas nous intéresser dans ce travail.



On souhaite réaliser le système, qui permet de convertir le code **BCD (Binary Coded Decimal)** en code 7 segments :

- Le code BCD est un code binaire pur sur 4 bits pour représenter les 10 chiffres décimaux (0 à 9).
- Ainsi, pour chaque valeur du code BCD, on associe une valeur du code 7 segments, qui visualise la valeur décimale correspondante.
- Un tel décodeur existe dans le commerce en circuit intégré, par exemple la référence 74LS47 ; mais ici, l'étude a un objectif pédagogique. Dans cet exercice, on considère un afficheur à **cathode commune**. On note que :
 - On s'intéresse uniquement aux chiffres de **0 à 9**, qui sont codés sur **4 bits** (0000 à 1001). Mais, avec 4 bits on a aussi les combinaisons de **10 à 15**, qui ne sont pas utiles dans ce décodage ; alors les sorties « a » à « g » prendront « x » pour ces combinaisons.
 - Dans le tableau de Karnaugh, on peut utiliser ces cases x pour apporter plus de simplification.

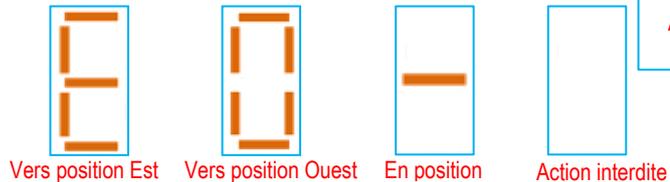


1. Dresser la table de vérité de ce décodeur pour les 7 sorties a, b, c, d, e, f et g.
2. Dresser le tableau de Karnaugh uniquement pour le segment a et en déduire son équation simplifiée.
3. Donner le logigramme correspondant.

Exercice 3 : Affichage d'orientation d'une antenne parabolique

L'orientation de la parabole est assurée par un positionneur à commande manuelle qui comporte 2 boutons poussoirs (**P_O** et **P_E**) saisissant le sens du mouvement. L'utilisateur est informé de la position de la parabole, via un afficheur à 7 segments à cathode commune. Ainsi, :

- Lors de l'orientation vers l'**Ouest**, on doit actionner le bouton (**P_O**), ce qui allume les segments **a, b, c, d, e** et **f**, pour afficher « **O** ».
- Lors de l'orientation vers l'**Est**, on doit **actionner** le bouton (**P_E**) ce qui allume les segments **a, d, e, f** et **g**, pour afficher « **E** ».
- En position fixe de la parabole, les boutons (**P_O** et **P_E**) ne sont plus actionnés ; le segment **g** s'allume pour afficher un tiret au milieu.
- Si les 2 boutons (**P_O** et **P_E**) sont actionnés en même temps, tous les segments sont éteints.



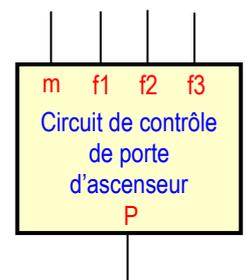
1. Dresser la table de vérité de ce circuit logique et en déduire les équations de tous les segments de l'afficheur.
2. Donner leurs logigrammes.

Exercice 4 : 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.

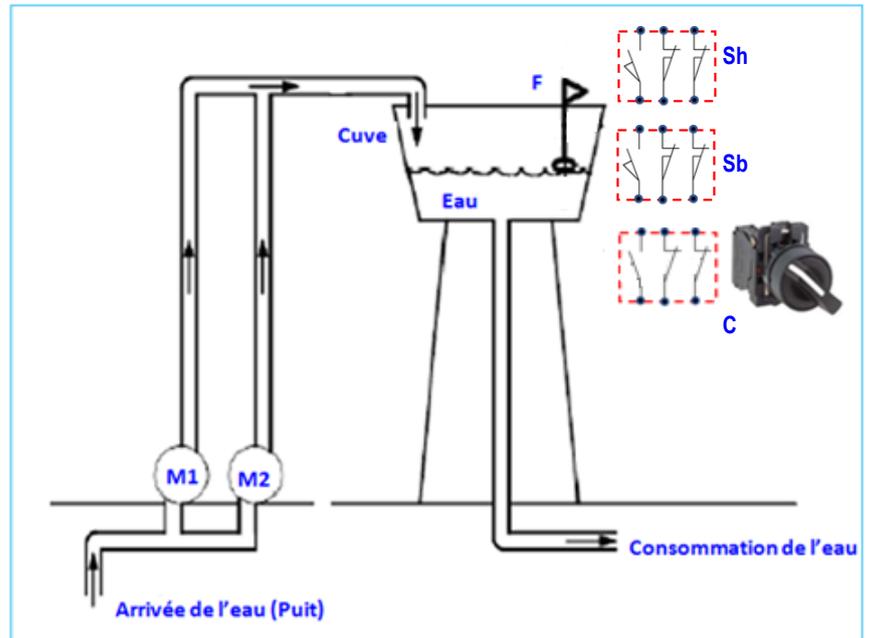
1. Dresser la table de vérité de ce circuit logique.
2. Dresser le tableau de Karnaugh correspondant et en déduire l'équation de P.
3. Donner son logigramme.



Exercice 5 : Gestion d'une station de pompage

La station de pompage en question 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 pour 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 en action :
 - 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 (S3).
 - A l'arrêt par :
 - Un bouton d'arrêt AR (S2).
 - Un bouton d'arrêt d'urgence ARU (S1), pour la sécurité.
 - Les contacts associés aux relais thermiques pour la sécurité (F1 et F2).
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 282** :

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			



Exercices (Corrigés)

Exercice 1 : Gestion d'un Store automatisé

1. Table de vérité

v	s	m	d	M	D
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0
0	0	1	1	0	1
0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1
0	1	1	1	0	1
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	1	0
1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	1	0

2. Tableaux de Karnaugh et équations

M

vs \ md	00	01	11	10
00	0	0	0	1
01	0	0	1	0
11	1	1	1	1
10	1	1	1	1

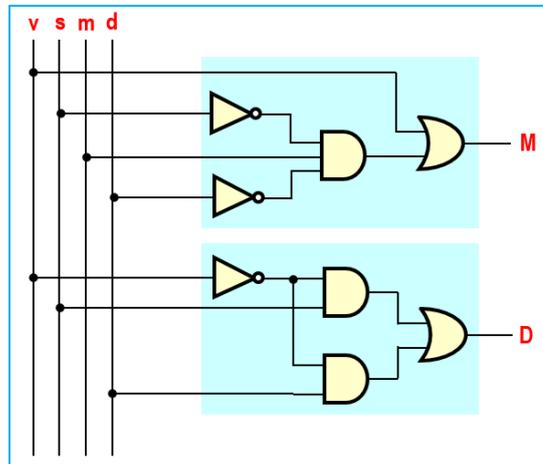
D

vs \ md	00	01	11	10
00	0	1	1	0
01	1	1	1	1
11	0	0	0	0
10	0	0	0	0

$$M = \bar{s}m\bar{d} + v$$

$$D = \bar{v}s + \bar{v}d$$

3. Logigrammes



Exercice 2 : Affichage 7 segments

Par simplicité, on traite uniquement le cas de la sortie du segment « a » ; le principe est le même pour le reste des sorties.

1. Table de vérité

Valeur décimale	D	C	B	A	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
10	1	0	1	0	X	X	X	X	X	X	X
11	1	0	1	1	X	X	X	X	X	X	X
12	1	1	0	0	X	X	X	X	X	X	X
13	1	1	0	1	X	X	X	X	X	X	X
14	1	1	1	0	X	X	X	X	X	X	X
15	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X

2. Tableaux de Karnaugh et équation simplifiée du sagement a :

On exploite les **x**, en les mettant à **1**, ce qui rapporte des simplifications.

a

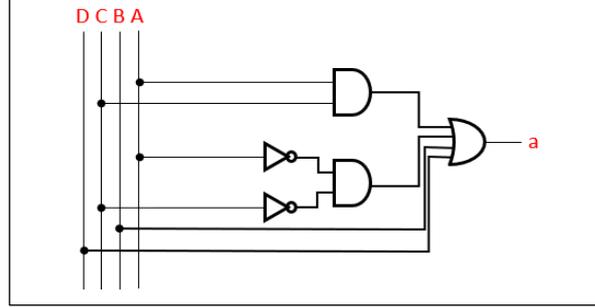
DC \ BA	00	01	11	10
00	1	0	1	1
01	0	1	1	1
11	1	1	1	1
10	1	1	1	1

$$a = B + D + AC + \bar{A}\bar{C}$$

X : Il 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. Logigramme de a :



Exercice 3 : Affichage d'orientation d'une antenne parabolique

1. Table de vérité et équations.

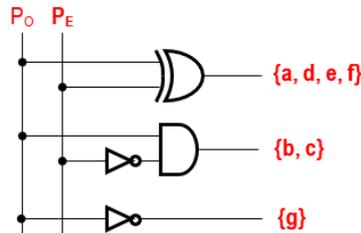
P _O	P _E	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	1	0	0	1	1	1	1
1	0	1	1	1	1	1	1	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0

$$a = d = e = f = \overline{P_O} \cdot P_E + P_O \cdot \overline{P_E} = P_O \oplus P_E$$

$$b = c = P_O \cdot \overline{P_E}$$

$$g = \overline{P_O} \cdot \overline{P_E} + \overline{P_O} \cdot P_E = \overline{P_O} (P_E + \overline{P_E}) = \overline{P_O}$$

2. Logigrammes.

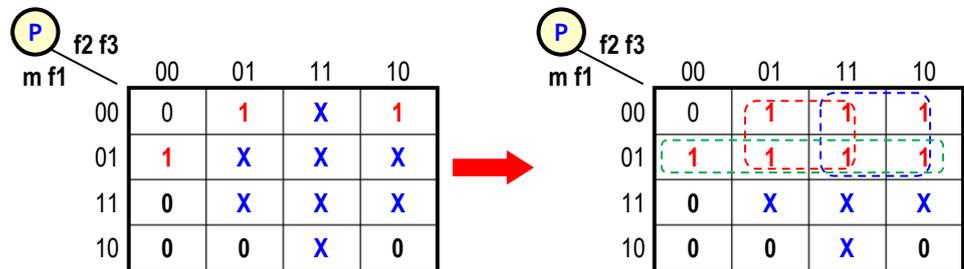


Exercice 4 : Contrôle d'une porte d'ascenseur

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



3. Logigramme



$$P = \overline{m} \cdot f_3 + \overline{m} \cdot f_1 + \overline{m} \cdot f_2$$

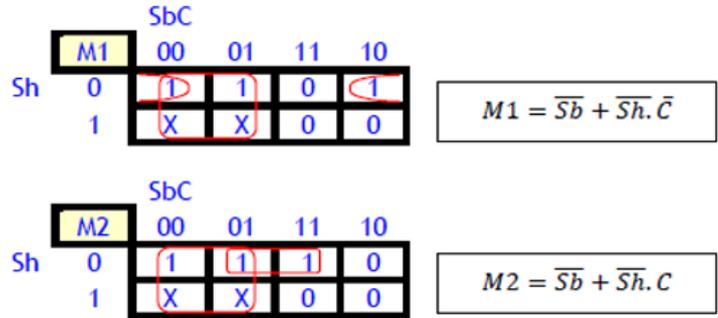
$$P = \overline{m} \cdot (f_1 + f_2 + f_3)$$

Exercice 5 : Gestion d'une station de pompage

1. Table de vérité

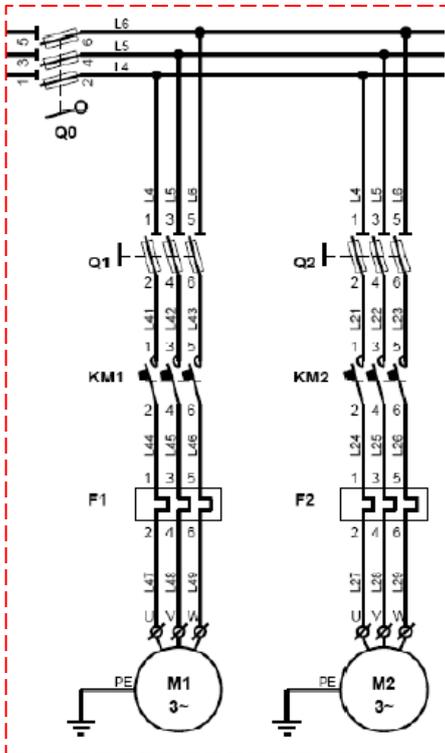
Sh	Sb	C	M1	M2
0	0	0	1	1
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	X	X
1	0	1	X	X
1	1	0	0	0
1	1	1	0	0

2. Tableau de Karnaugh et équations

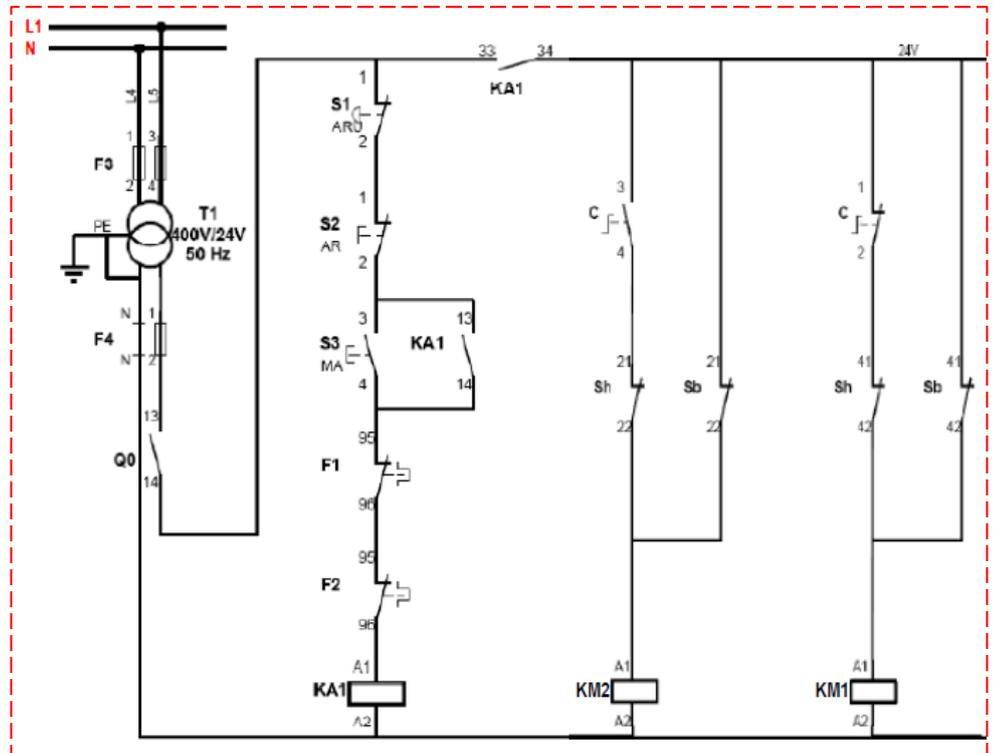


3. Circuit de puissance et circuit commande

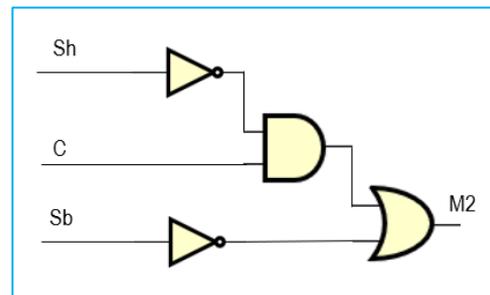
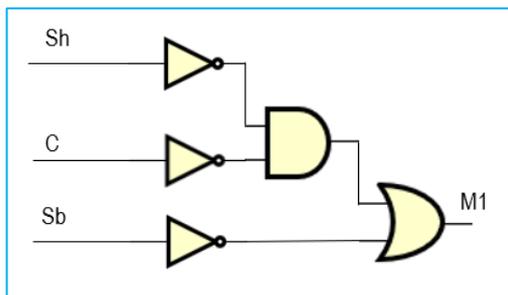
Circuit de puissance



Circuit de commande



4. Logigramme avec portes variées





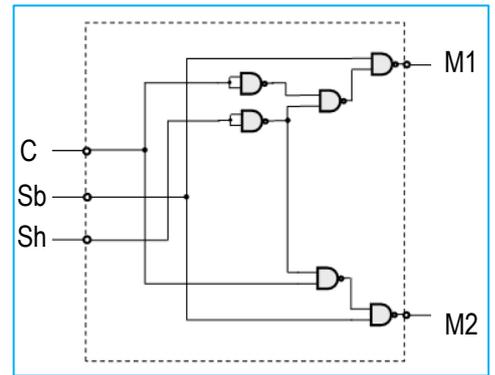
5. Logigramme avec NAND 2

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

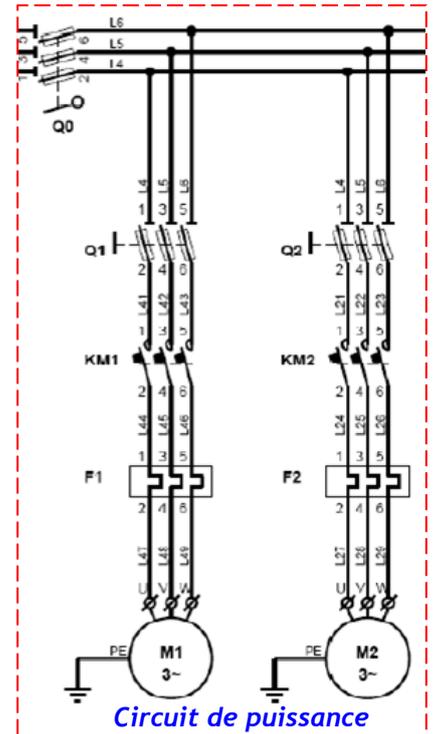
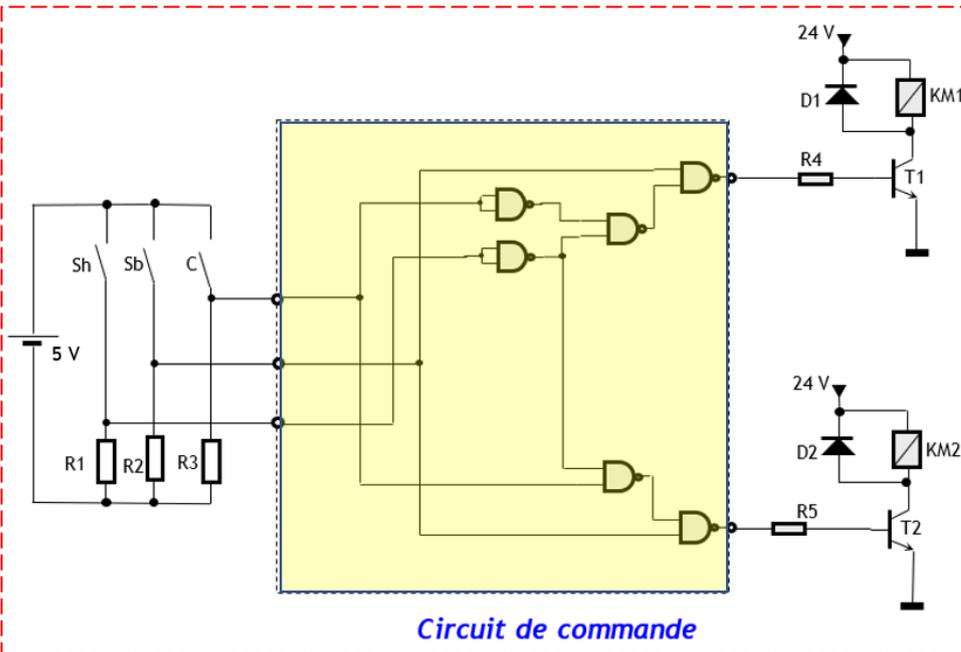
$$M1 = Sb.\overline{Sh}.C$$

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

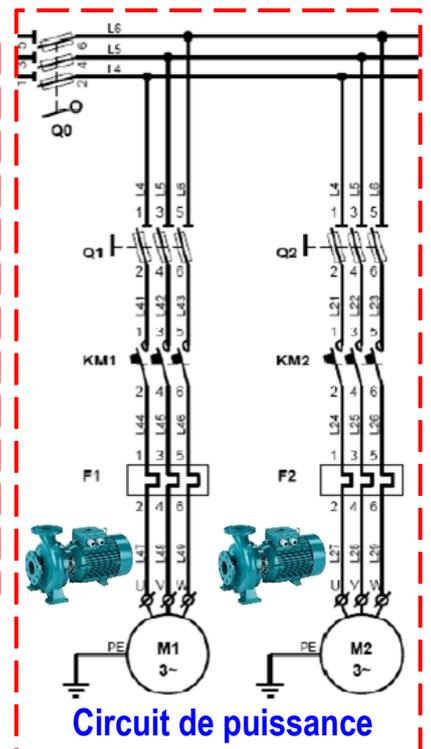
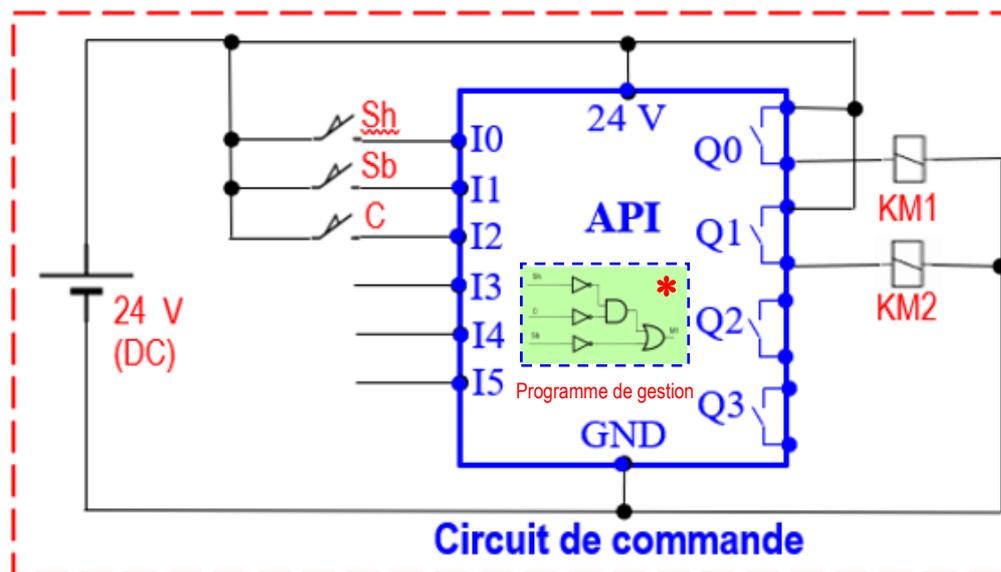
$$M2 = Sb.\overline{Sh}.C$$



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'API.

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/>