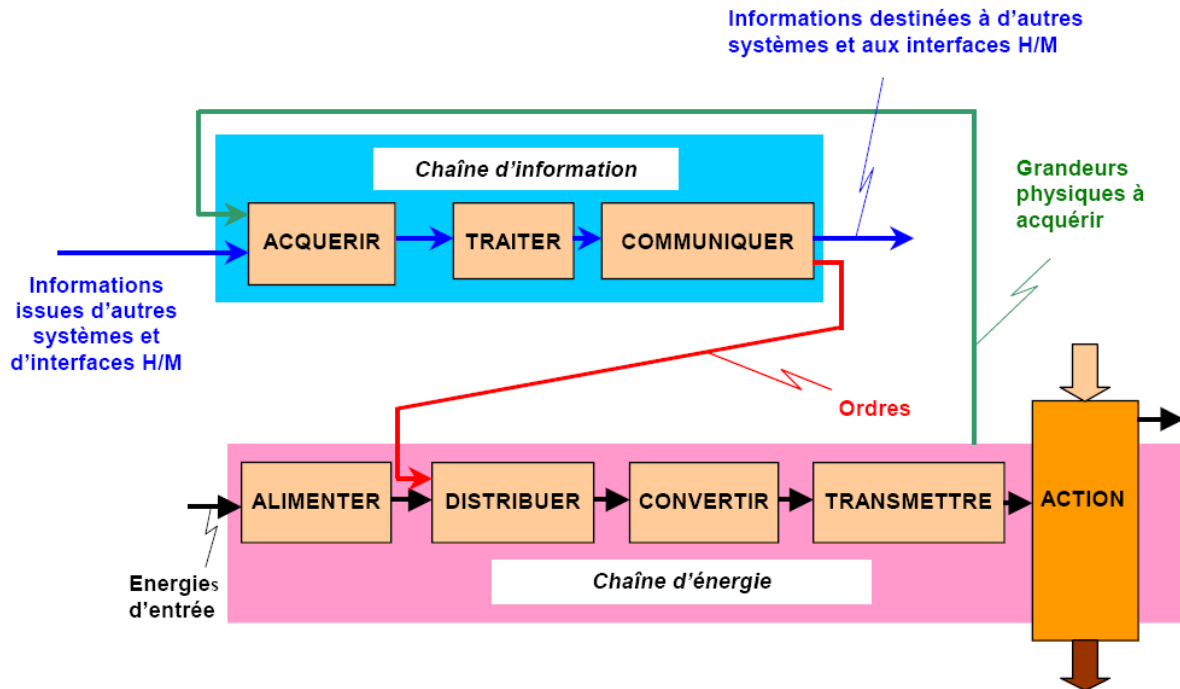


Architecture des systèmes

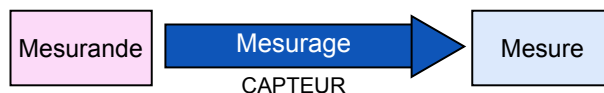
PSI - MP : Lycée Rabelais



Les principaux éléments de technologie sont à connaître afin de comprendre le vocabulaire utilisé dans les sujets.

Dans la chaîne d'information, et notamment dans le bloc "Acquérir", le capteur joue un rôle clé. Il permet de transformer une grandeur physique (température, pression, position, etc.) en un signal (souvent électrique) qui renseigne sur cette grandeur. On parlera :

- **Du mesurande** : c'est l'objet de la mesure ou plus simplement la grandeur à mesurer.
- **Du mesurage** : c'est l'ensemble des opérations pour déterminer la valeur du mesurande.
- **De la mesure** : c'est le résultat du mesurage. Autrement dit c'est la valeur du mesurande.



Il existe un très grand nombre de capteurs qui s'appuient sur des phénomènes physiques très variés. L'objectif de ce cours est simplement de vous donner le principe de fonctionnement des principaux capteurs.

Concernant la chaîne d'énergie, les éléments sont également très variés, on retrouvera par exemple :

- **Alimenter** : Prise réseau (électrique/hydraulique/pneumatique), raccord réseau, pile, batterie.
- **Distribuer** : Contacteurs, relais, variateurs, distributeur.
- **Convertir** : Machine synchrone, machine asynchrone, moteur à courant continu, vérins.
- **Transmettre** : Système vis-écrou, engrenages, poulie-courroie.

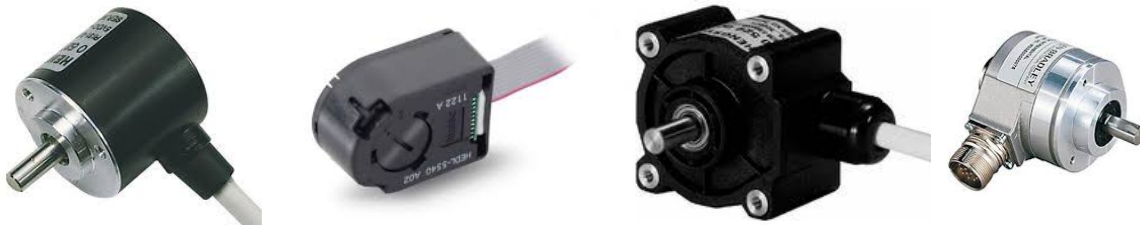
Capteurs

1 Codeurs

Un codeur est un capteur de position ou de vitesse (la plupart du temps angulaire). Les codeurs s'appuient souvent sur des technologies optiques. La méthode utilisée pour la mesure peut, bien évidemment, être étendue à d'autres technologies.

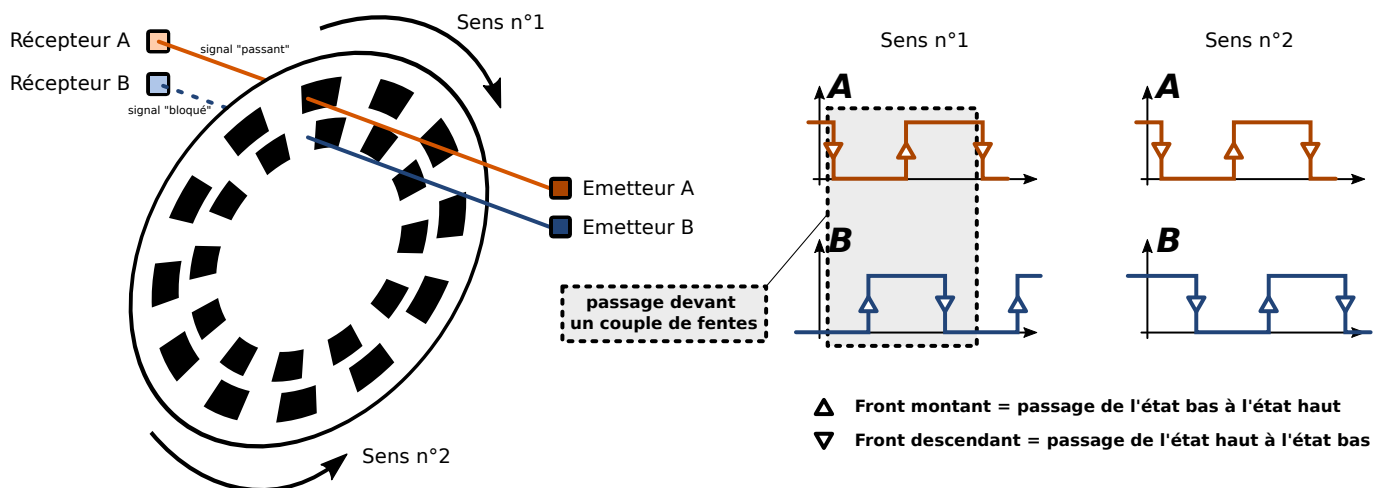
- Ce capteur est lié mécaniquement à un arbre qui l'entraîne. Son axe fait tourner un disque qui lui est solidaire. Le disque comporte une succession de parties opaques et transparentes.
- Une lumière est émise par des Diodes Electroluminescentes (DEL), la lumière traverse les fentes de ce disque créant sur les photodiodes réceptrices un signal analogique.

La technologie du capteur dépend ensuite essentiellement du disque et des fentes utilisés.



1.1 Codeur incrémental

Un codeur incrémental est constitué d'un disque possédant un certain nombre de fentes réparties équitablement sur le pourtour. Ce disque est lié à l'arbre tournant dont on souhaite connaître la position. Le passage lumineux (ou non) génère alors un signal en créneaux.



Ci-dessus, on présente un codeur, utilisé pour mesurer un angle θ , qui possède 2 pistes de 12 fentes et 2 détecteurs décalés d'une demi-fente. Il est aussi possible d'avoir une seule piste en décalant les détecteurs.

On notera A et B les variables logiques associées à ces 2 détecteurs. D'une manière générale, on peut avoir un ou deux détecteurs et n fentes.

Une mesure peut être réalisée sur chaque front montant et front descendant. Cette détection des fronts montants ou descendants dépend de la situation.

À retenir

- La **résolution du codeur** (en radians) (plus petit angle que l'on peut mesurer avec ce capteur) est :

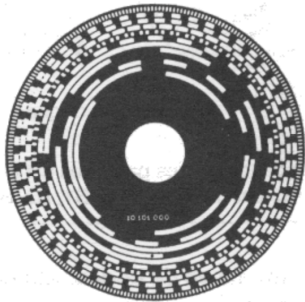
$$\Delta\theta = \frac{2 \cdot \pi}{\text{nombre d'information mesurées par tour}}$$
$$= \frac{2 \cdot \pi}{\text{nombre de fentes} \times \text{nombre de détecteurs} \times \text{nombre de fronts détectés par fente et par détecteur}}$$

- **Avantage du codeur incrémental** : il est peu onéreux et simple à utiliser. Il permet d'obtenir une bonne résolution en augmentant le nombre de fentes et cette augmentation ne change pas la complexité de la mesure parce que le nombre de détecteur reste inchangé.
- **Inconvénient du codeur incrémental** : comme toutes les fentes sont identiques, il est impossible de les distinguer à partir des mesures. Au démarrage de la machine, il faut donc chercher une position de référence - avec un autre capteur - pour connaître la position réelle et pas seulement des variations d'angle. Ce problème disparaît si l'on souhaite simplement la vitesse (calcul de la dérivée).

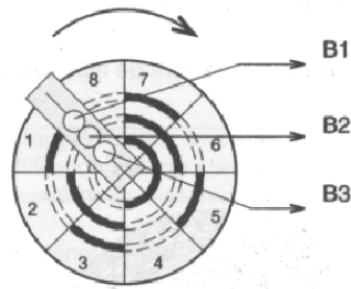
1.2 Codeur absolu

Ce concept a été développé pour pallier les contraintes associées au codeur incrémental.

Le disque des codeurs absolus comporte un nombre « n » de pistes concentriques divisées en segments égaux alternativement opaques et transparents. Chaque piste est équipée par une LED et un phototransistor.



Disque avec codage absolu 12 pistes



Disque avec codage absolu 3 pistes

On remarquera, avec l'exemple du codeur absolu à 3 pistes ci-dessus, que pour chaque position 1,2,3...8, le triplet (B1,B2,B3) est unique. Pour un triplet donné, on connaît donc la position angulaire **de manière absolue**.

À retenir

- La **résolution du codeur** (en radians) (plus petit angle que l'on peut mesurer avec ce capteur) est :

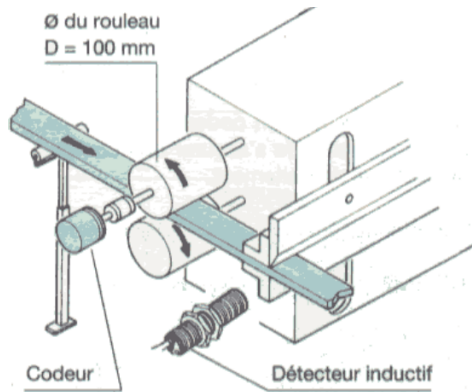
$$\Delta\theta = \frac{2 \cdot \pi}{\text{nombre d'information mesurées par tour}}$$
$$= \frac{2 \cdot \pi}{2^N} \text{ où } N \text{ est le nombre de pistes}$$

- **Avantage du codeur absolu** : permet de connaître l'angle "de manière absolue" et donc sans initialisation.
- **Inconvénient du codeur absolu** : pour améliorer la résolution, il faut augmenter le nombre de pistes et donc le nombre d'émetteurs et de détecteurs. Cela nécessite donc un système d'acquisition complexe et plus onéreux pour mesurer tous ces signaux.

1.3 Application



Résolution codeur



Une tige métallique est ici entraînée par deux galets. Un de ces galets est équipé d'un codeur dont le disque est solidaire du galet.

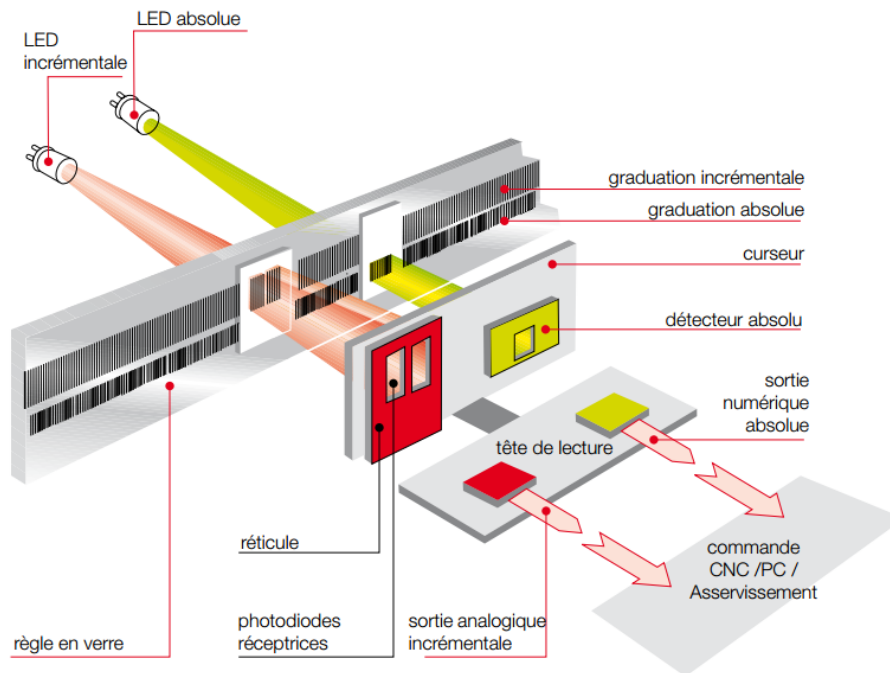
On considère que le codeur est un codeur incrémental possédant une seule voie de mesure associée à un disque de 512 fentes et qu'il y a détection des fronts montants et descendants.

Déterminer quelle est la plus petite distance d'avance de la tige détectable avec ce codeur.

Combien de pistes seraient nécessaires pour avoir la même précision avec un codeur absolu.

1.4 Codeur linéaire

Il est également possible d'utiliser le même principe pour mesurer un déplacement linéaire. Dans ce cas-là, le disque est remplacé par une règle graduée.



2 Capteurs potentiométriques

Les capteurs potentiométriques permettent également de mesurer un déplacement (angulaire ou linéaire). Ces capteurs sont basés sur la variation de résistance du composant. Ils possèdent trois fils :

- un pour la masse ;
- un pour l'alimentation ;
- le dernier pour "récupérer le signal".



Potentiomètre linéaire



Potentiomètre rotatif

3 Génératrice tachymétrique

Ce capteur fonctionne exactement comme un moteur électrique à courant continu : la tension qu'il délivre est proportionnelle à sa vitesse de rotation. La démonstration de ce résultat s'obtient en regardant les équations du moteur à courant continu, pour une résistance et une inductance négligeables.



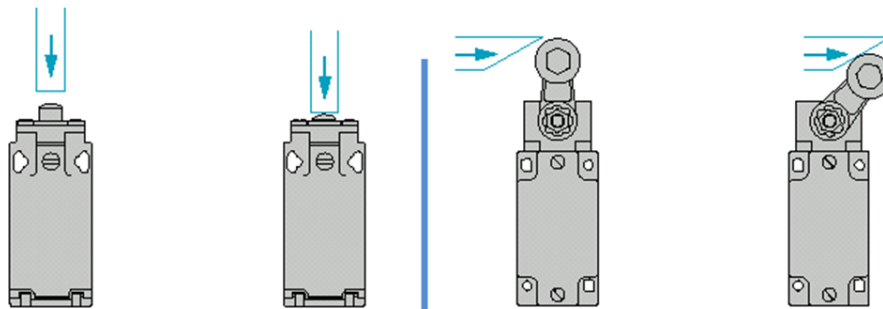
Équations "classiques" d'un moteur à courant continu et donc d'une génératrice tachymétrique

Électrique : $U(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t)$
 Mécanique : $J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f \cdot \omega(t)$ donc $U(t) = K_e \omega(t)$
 Couplage couple/intensité : $C_m(t) = K_i \cdot i(t)$
 Couplage vitesse/tension : $e(t) = K_e \cdot \omega(t)$

4 Capteurs Tout ou Rien (TOR)

4.1 Capteurs mécaniques

Ils sont en contact direct avec la pièce en mouvement qu'il faut détecter. L'action mécanique sur la partie mobile du capteur permet d'établir ou d'interrompre un contact électrique. Ce n'est rien de plus qu'un interrupteur ! Ils transmettent au système de traitement les informations de présence, d'absence, de passage, de positionnement ou de fin de course.



4.2 Capteurs de proximité

4.2.1 Capteurs inductifs

Les détecteurs de proximité **inductifs** permettent de détecter sans contact des objets **métalliques** à une distance de 0 à 60 mm. Ils se retrouvent dans des applications très variées telles que la détection de position des pièces de machines (cames, butées, ...), le comptage de présence d'objets métalliques, ...



4.2.2 Capteurs capacitifs

Cette technologie permet la détection de **tous les types de matériaux** conducteurs et isolants tels que verre, huile, bois, plastique, etc... Mais aussi les liquides. Visuellement, il est difficile de différencier capteur capacitif et inductif.



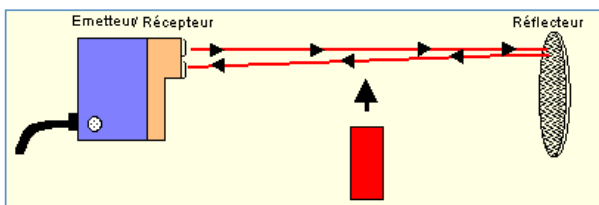
4.3 Capteurs photoélectriques

Un détecteur photoélectrique réalise la détection d'une cible, qui peut être un objet ou une personne, au moyen d'un faisceau lumineux. Les détecteurs photoélectriques se composent essentiellement d'un émetteur de lumière associé à un récepteur photosensible.

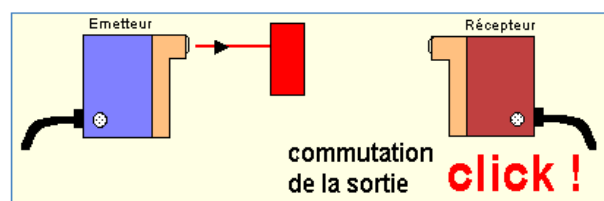
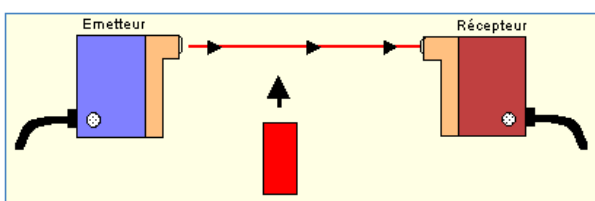
La détection est effective quand l'objet pénètre dans le faisceau lumineux et modifie suffisamment la quantité de lumière reçue par le récepteur pour provoquer un changement d'état de la sortie. C'est exactement le même principe de fonctionnement que les codeurs.

Trois types de montage sont principalement utilisés :

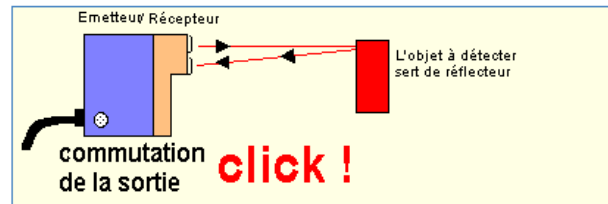
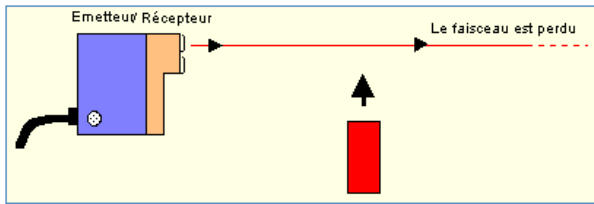
Montage en réflex :



Montage en barrage :

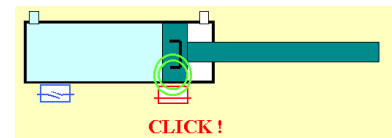
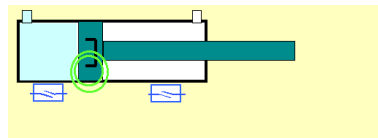
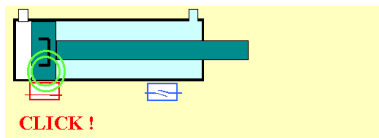


Montage de proximité :



4.4 Interrupteur à lames souples (ILS)

Il permet de détecter tout objet magnétique qui se trouve à proximité de la tête de détection. Un détecteur magnétique se compose essentiellement de 2 lames conductrices. Le passage d'un matériau aimanté entraîne la déformation de ces lames. Celles-ci entrent en contact et permettent le passage du courant. Ce type de capteurs est très souvent utilisé pour détecter la fin de course de vérins.



ILS sous verre



ILS équipant un vérin

5 Capteur à effet Hall

Un capteur à effet hall permet d'obtenir un signal lorsqu'il **détecte un champ magnétique**. Les détecteurs à effet Hall peuvent être utilisés comme capteur de position et/ou de vitesse angulaire. Il est souvent utilisé comme un codeur. Dans ce cas, on utilise un solide qui lors de sa rotation fera varier le champ magnétique à proximité du capteur.



Capteur à effet Hall seul

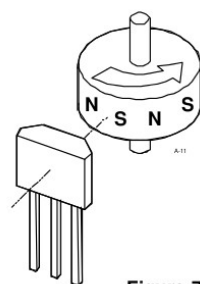


Figure 7A

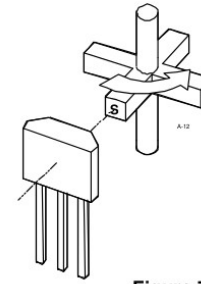


Figure 7B

Montage permettant de mesurer une position ou une vitesse angulaire

6 Capteurs d'efforts

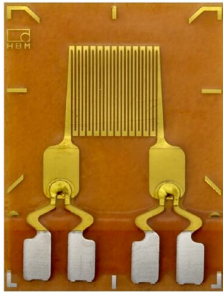
Il n'y a pas de capteur permettant de mesurer directement un effort. Ce qui est mesuré, c'est la déformation (ou le déplacement) d'un élément. Le lien entre la déformation et l'effort appliqué est donné par le constructeur. Les capteurs de force utilisent donc généralement un "**corps d'épreuve**" déformable afin de déterminer la force appliquée. La déformation du corps d'épreuve détermine la force appliquée.

Il en existe essentiellement deux types :

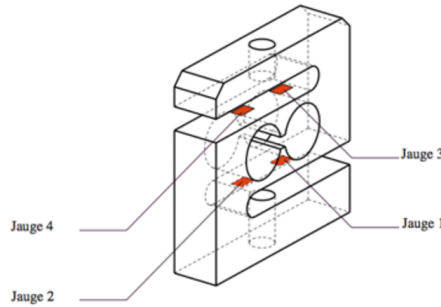
- les capteurs de force à jauges d'extensométrie ;
- les capteurs de force à effet piézoélectrique.

6.1 Capteurs à jauges d'extensométrie

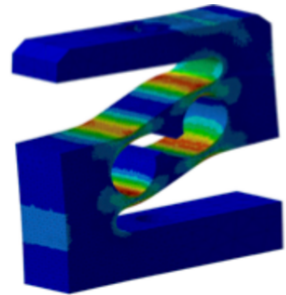
Une jauge d'extensométrie est un fil en serpentin qui est collée sur le corps d'épreuve. Lorsqu'un effort est appliqué, le fil se déforme, sa longueur varie et donc sa résistance varie également. Connaissant le lien entre tous ces phénomènes, on lie bien effort appliqué sur le corps d'épreuve et résistance du capteur.



Jauge d'extensométrie seule



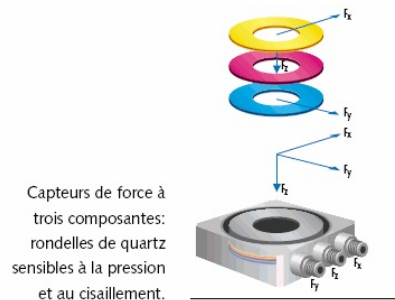
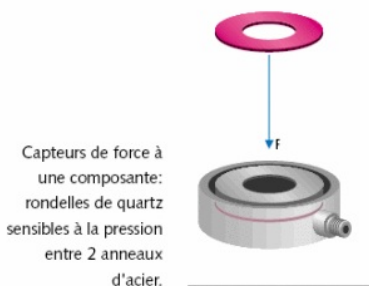
Corps d'épreuve (non déformé (gauche), déformé droite)



6.2 Capteurs piézoélectriques

De nombreux cristaux génèrent une charge électrique lorsqu'on les soumet à une charge mécanique. Ce phénomène physique est connu dans le monde entier sous le nom d'effet piézoélectrique.

C'est ce phénomène qui est utilisé pour mesurer un effort.



Diagrammes SysML

Les systèmes techniques actuels sont d'une grande complexité. Ils incluent très souvent des technologies très variées : mécanique, électronique, optique, informatique... Cette pluri-technologie nécessite, lors de la conception du produit, un panel d'experts ayant, chacun d'eux, leur spécialité. Chacun de ces acteurs doit donc pouvoir participer à la conception du produit. Cela nécessite donc d'utiliser un langage commun afin de définir le cahier des charges.

Ce langage devra être suffisamment complexe pour décrire avec finesse les attentes du produit. Il devra également être suffisamment simple pour que chacun des acteurs puisse l'utiliser. C'est dans ce cadre qu'est né le langage SysML (Systems Modeling Language). Il fut développé au début des années 2000 et est standardisé depuis 2007.

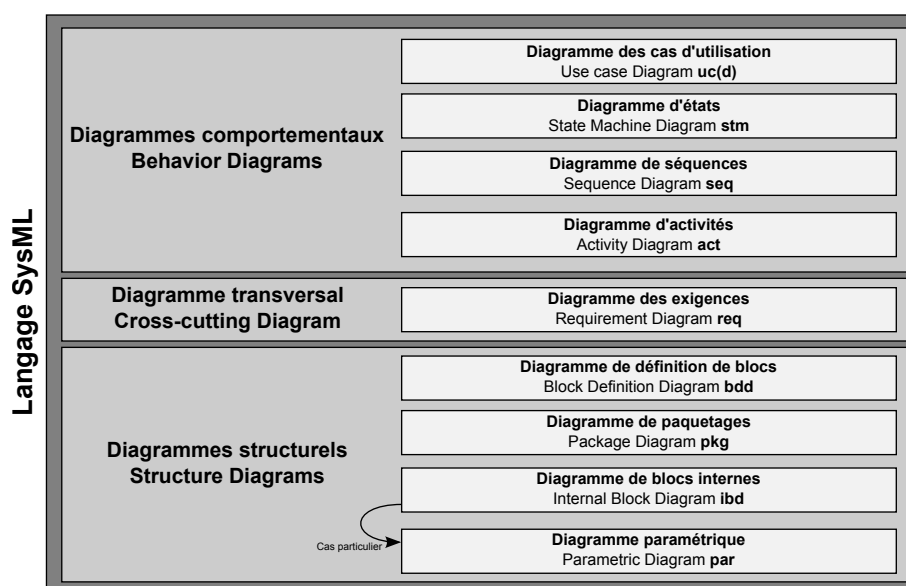
Ce langage SysML a donc pour objectif de formaliser, de manière graphique, les spécifications associées à un système technique. Il permet de spécifier, de concevoir, de définir et d'analyser la structure d'un système. Il permettra également d'identifier les performances, les limites et l'environnement du système. **Il a donc, avant tout, un objectif de documentation !**

1 Les différents diagrammes SysML

Durant une phase de conception, il est courant d'aborder le problème selon trois points de vue :

- **Point de vue fonctionnel.** À travers ce point de vue, on cherche à déterminer les différentes exigences auxquelles le système devra répondre.
- **Point de vue comportemental.** L'objectif est ici de décrire la manière dont le système évoluera au cours du temps (lors de son utilisation).
- **Point de vue structurel.** On cherche ici à savoir comment et par quels moyens (techniques) le système pourra répondre aux exigences.

Le langage SysML met à disposition, pour ces trois approches, des outils graphiques spécifiques. Le langage est donc développé autour de neuf diagrammes qui permettent donc de représenter le système sous différents points de vue.

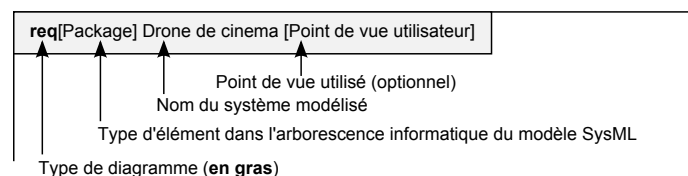


On retrouve donc les diagrammes détaillés ci-dessous.

- **Diagrammes comportementaux :**

- Le diagramme des cas d'utilisation (*Use case Diagram* : **ucd**) permet de décrire les objectifs poursuivis par l'acteur primaire (souvent l'utilisateur) avec le système. Des acteurs secondaires peuvent également être indiqué sur le diagramme.
- Le diagramme de séquence (*Sequence Diagram* : **seq**) décrit l'enchaînement des messages passés entre différents blocs en interaction.
- Le diagramme d'état (*State Machine Diagram* : **stm**) décrit les différents états du système et les transitions entre ces états.
- Le diagramme d'activité (*Activity Diagram* : **act**) décrit l'enchaînement des différentes tâches réalisées par le système. **(Il n'est pas au programme !)**
- **Diagrammes structurels :**
 - Le diagramme de définition de blocs (*Block Definition Diagram* : **bdd**) décrit l'architecture (les différents éléments) du système.
 - Le diagramme de blocs internes (*Internal Block Diagram* : **ibd**) décrit ici l'architecture à l'intérieur d'un bloc.
 - Le diagramme paramétrique (*Parametric Diagram* : **par**) est un cas particulier du diagramme de blocs internes mais cette fois-ci l'architecture n'est décrite qu'à partir des équations qui "gouvernent" le fonctionnement du bloc. **(Il n'est pas au programme !)**
 - Le diagramme de paquetages (*Package Diagram* : **pkg**) décrit l'organisation logique du modèle. **(Il n'est pas au programme !)**
- **Diagramme transversal :** C'est le diagramme des exigences (*Requirement Diagram* : **req**) qui permet de décrire ce que doit réaliser le système et les contraintes associées.

Peu importe le diagramme utilisé, des règles graphiques sont à respecter. Pour repérer le diagramme (et pour savoir de quel type de diagramme il s'agit), celui-ci dispose d'une cartouche (voir ci-dessous). Cette cartouche est renseignée de plusieurs éléments.



Les diagrammes sont ensuite complétés. Ils sont composés de rectangles, d'ellipses et de lignes. Le choix du type de lien permet d'exprimer la nature de la relation entre les éléments connectés. Le tableau ci-dessous récapitule les concepts liés à l'utilisation des différentes lignes.

Lien	Signification
	Ce lien exprime une relation de contenance ou d' inclusion . Elle permet de décomposer une exigence en plusieurs sous-exigences.
	Ce lien exprime une relation d' association . Elle permet de lier deux éléments entre-eux. Si cette relation est unidirectionnelle, il y aura une flèche en fin de ligne. Si la relation est bidirectionnelle, la ligne sera sans flèche.
	Ce lien exprime des relations de d' inclusion , d' extension , de raffinement ou de dérivation entre différents blocs dans un cas d'utilisation ou dans le diagramme des exigences. Cela permet de donner essentiellement une relation hiérarchique entre les éléments.
	Ce lien exprime une relation de composition . Cela signifie qu'un élément est structurellement indispensable à l'autre.
	Ce lien exprime une relation d' agrégation . Ce lien a la même signification que le précédent mais avec un sens moins fort. Elle indique donc qu'un élément est présent mais de manière optionnelle.
	Ce lien exprime une relation de spécialisation . Ce lien sera utilisé dans les diagrammes des cas d'utilisation pour caractériser en détail un utilisateur qui peut avoir différentes fonctions (par exemple l'utilisateur d'une voiture pourra être spécialisé comme un passager ou un conducteur).

2 Application : Drone de Cinéma



Pour réaliser des prises de vue aériennes en haute définition lors de la réalisation de films ou de documentaires, des drones sont fréquemment utilisés. Ces appareils sont souvent loués par la production à des entreprises spécialisées qui fournissent, outre le matériel, un pilote maîtrisant parfaitement le vol de l'engin. Ce mode prise de vue permet d'obtenir des prix très attractifs (en comparaison avec une solution en hélicoptère ou en avion).

Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité
Assurer la qualité des images	Temps de visée d'une cible sans bouger	5s	mini
Permettre de couvrir la zone de prise de vue	Vitesse de déplacement maximale	1 m/s	+/- 0,2 m/s
	Taille de la zone	300m x 300m	
	Altitude maxi de vol	60m	mini
	Durée de vol	8h	mini
S'adapter à la caméra	Fixation universelle		
Assurer le retour d'image au sol	Capacité de charge	1 kg	mini
	Délai	mini	
	Résolution	854x480	
Résister à l'environnement	Déplacement admissible suite à un vent de 20 km/h	0,5 cm et 1,5° dans chaque direction	maxi
Être économe	Prix pour la mission (1 jour)	4000 €	maxi

Afin de pouvoir "gagner le contrat", il est nécessaire de répondre au cahier des charges du client mais aussi d'être compétitif vis-à-vis de la concurrence. L'ingénierie système est une discipline récente qui s'inscrit dans cette démarche. Elle est née dans les années 80 en partant du constat qu'à cette époque 85% des projets industriels présentent des dépassements de budget ou de délais.

Ces échecs sont attribués à la complexité technique et organisationnelle de plus en plus grande des projets. En effet, les systèmes techniques actuels font appel à de nombreuses technologies (mécanique, électronique, informatique, télécommunications ...). Leur conception nécessite l'intervention d'acteurs issus de divers métiers.

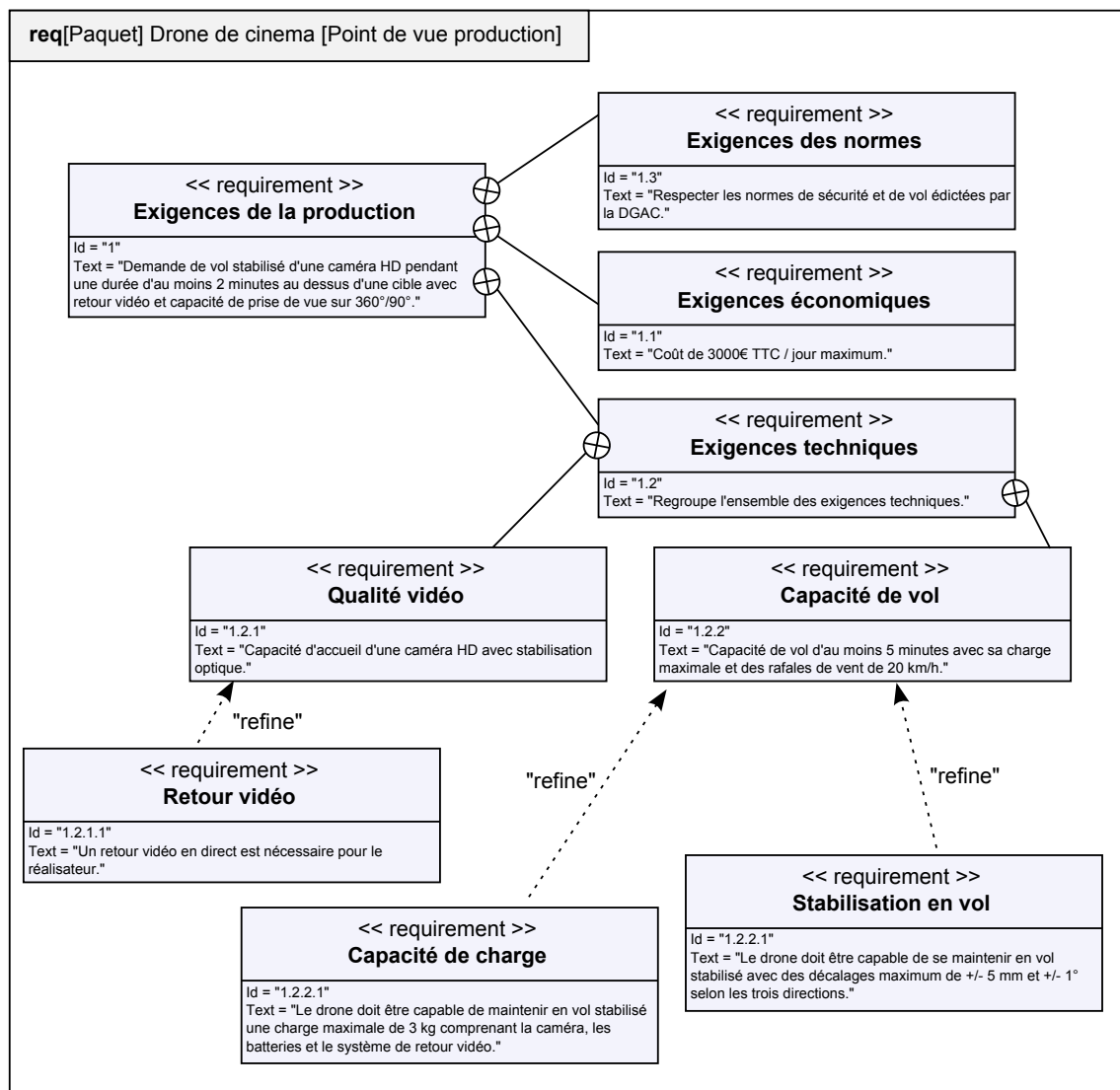
Le rôle de "l'ingénieur système" est d'utiliser des méthodes et des démarches interdisciplinaires permettant d'aborder les systèmes complexes pluri-technologiques afin de les concevoir, de les étudier, de vérifier leurs performances et de les améliorer.

C'est ce que nous allons tenter de faire ici à travers la description des différents diagrammes SysML.

2.1 Diagramme des exigences

Le diagramme des exigences (*Requirement Diagram (req)*) est le seul diagramme transversal du langage SysML. L'objectif de ce diagramme est de modéliser les attentes du client devant être vérifiées par le système. Ce diagramme traduit, par des fonctionnalités ou des contraintes, ce qui doit être satisfait par le système. Ces différentes exigences peuvent être reliées par des liens.

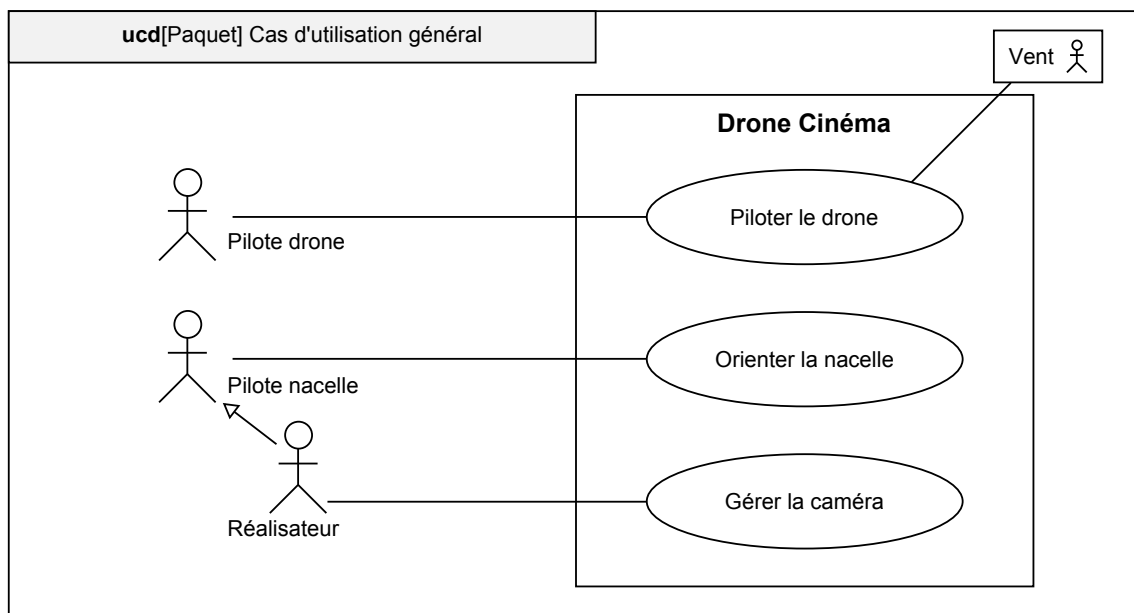
Diagramme des exigences pour le drone de cinéma



2.2 Diagramme des cas d'utilisation

Le diagramme des cas d'utilisation est un diagramme comportemental (*Use Case Diagram* (**uc** ou **ucd**)). Ce diagramme a pour objectif de montrer les fonctionnalités offertes par le système en identifiant les services. Il met donc en relation bidirectionnelle les différents acteurs et les services rendus par le système.

Diagramme des cas d'utilisation pour le drone de cinéma



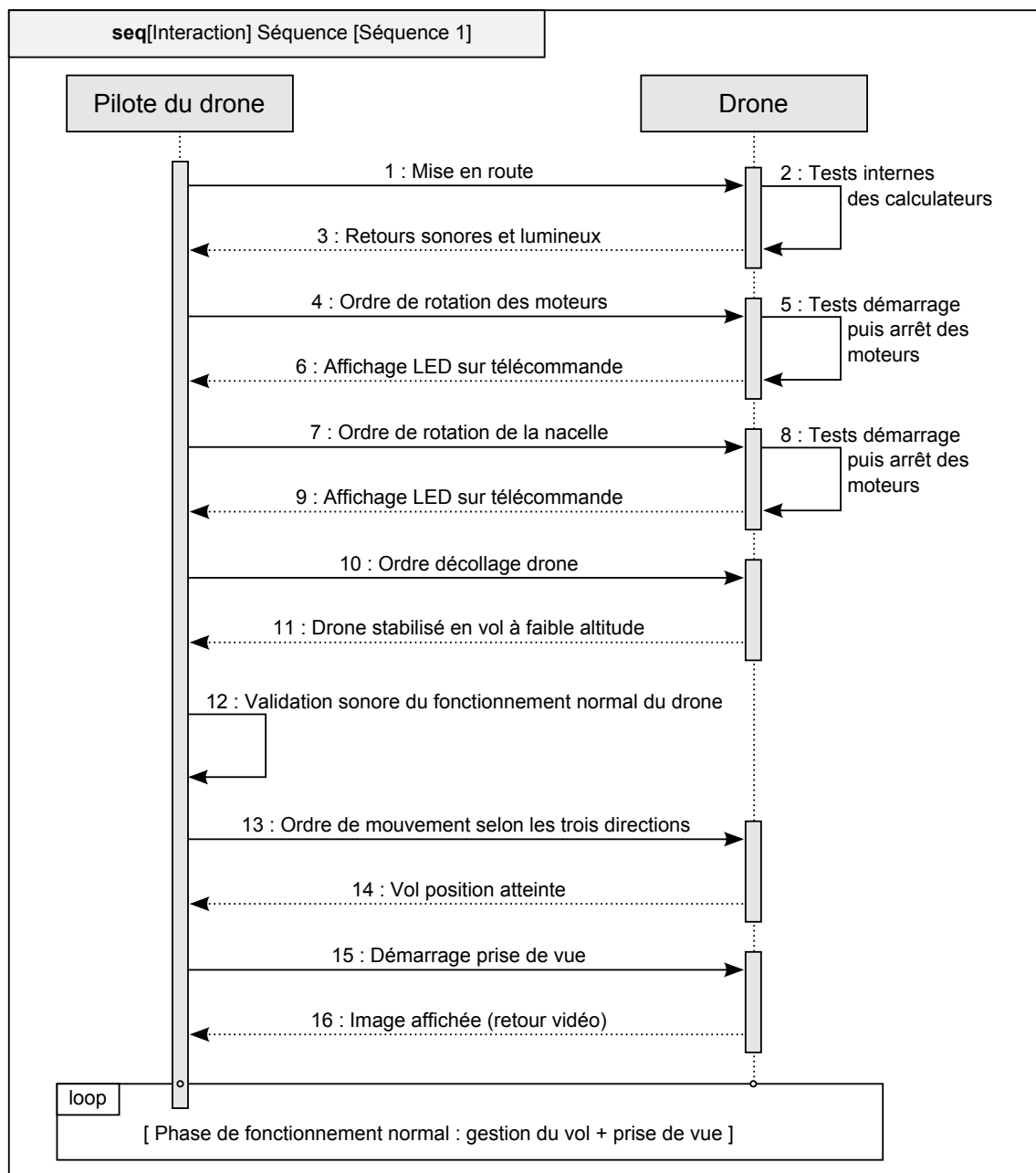
2.3 Diagramme de séquence

L'objectif du diagramme de séquence (*Sequence Diagram* (**seq**)) est de décrire les interactions entre plusieurs entités (acteurs, système ou sous-systèmes). Ce diagramme permet de représenter ces interactions avec un point de vue chronologique (même si la notion de temps n'apparaît pas).

Un diagramme de séquence est rattaché à un cas d'utilisation et décrit ce dernier en entier ou en partie. Il peut donc s'agir de la représentation de l'évolution du fonctionnement dans un cas "positif" (fonctionnement normal par exemple). Mais cela peut aussi être la représentation de l'évolution dans un cas "négatif" (cas d'une panne par exemple).

Graphiquement, ce diagramme est composé de plusieurs éléments. Des traits verticaux indiquent les différents acteurs (utilisateurs, système, sous-systèmes). Des traits horizontaux indiquent l'envoi et la réception d'information.

Diagramme de séquence pour le drone de cinéma



2.4 Diagramme de définition de blocs

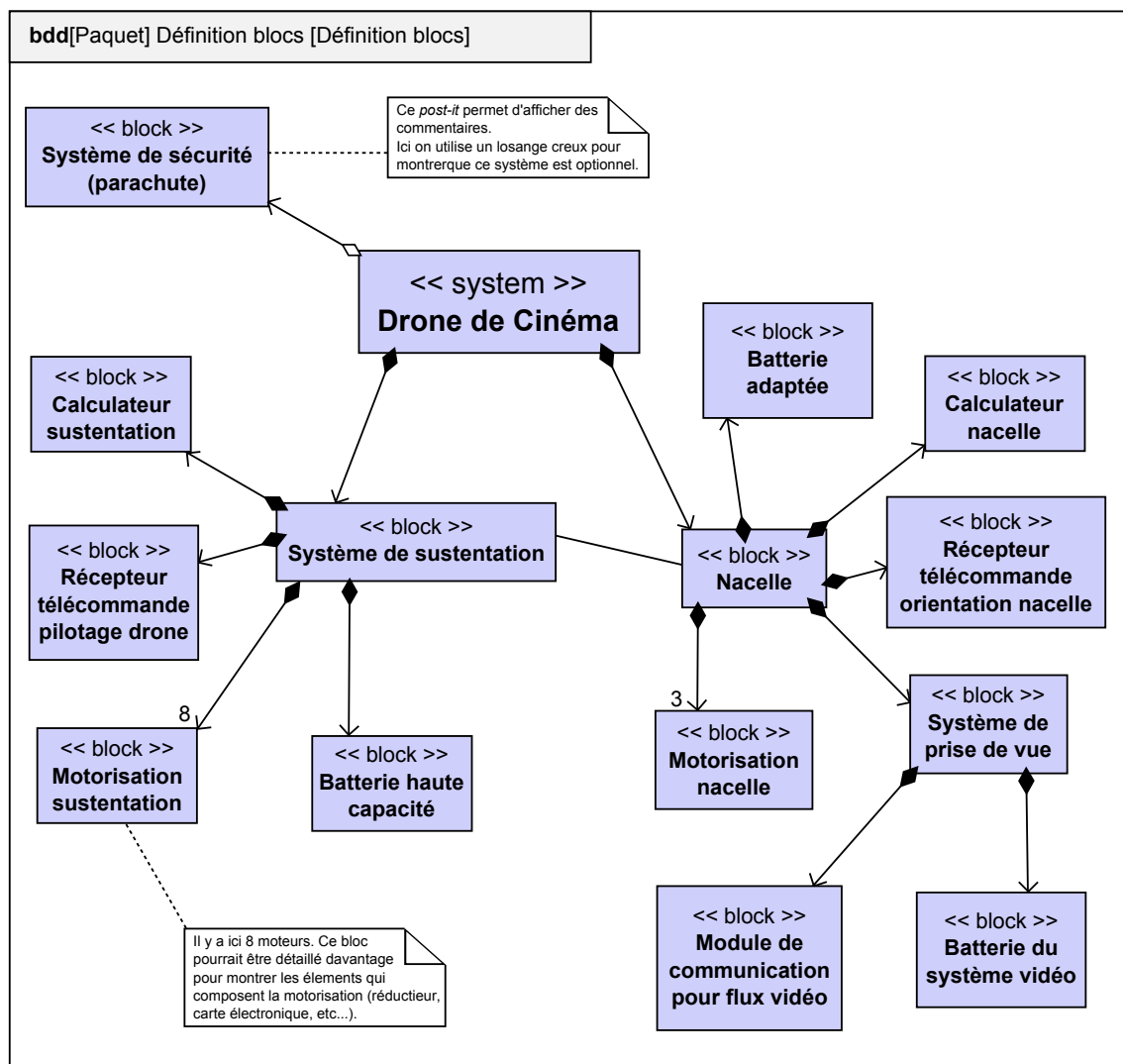
Le diagramme de définition de blocs (*Block Definition Diagram (bdd)*) est un diagramme structurel. L'objectif de ce diagramme est de décrire le système à l'aide de blocs, chaque bloc représentant un élément du système.

Ce diagramme représente (souvent) les caractéristiques principales de chaque bloc ainsi que les différents liens entre eux. Il permet donc une modélisation complète de l'architecture.

Dans chacun des blocs, il est possible d'insérer des propriétés. Les grandeurs les plus classiquement utilisées sont : *value* et *part*. *Value* permet d'exprimer les constantes numériques liées au système. *Part* permet, quant à lui, de représenter les sous-éléments qui composent le bloc (des vis, un réducteur, etc...).

Les différents blocs doivent ensuite être reliés. Le lien utilisé devra montrer la dépendance d'un bloc par rapport à son vis-à-vis. En général, on utilisera un lien d'agrégation (trait avec losange plein ou vide). Ce lien permet de décomposer un éléments en sous-éléments et ainsi de suite. Il est également possible d'ajouter un nombre en bout de lien pour exprimer la multiplicité d'un bloc (s'il y a 8 moteurs identiques, on indiquera 8 mais on ne dessinera pas 8 blocs !).

Diagramme de définition de blocs pour le drone de cinéma



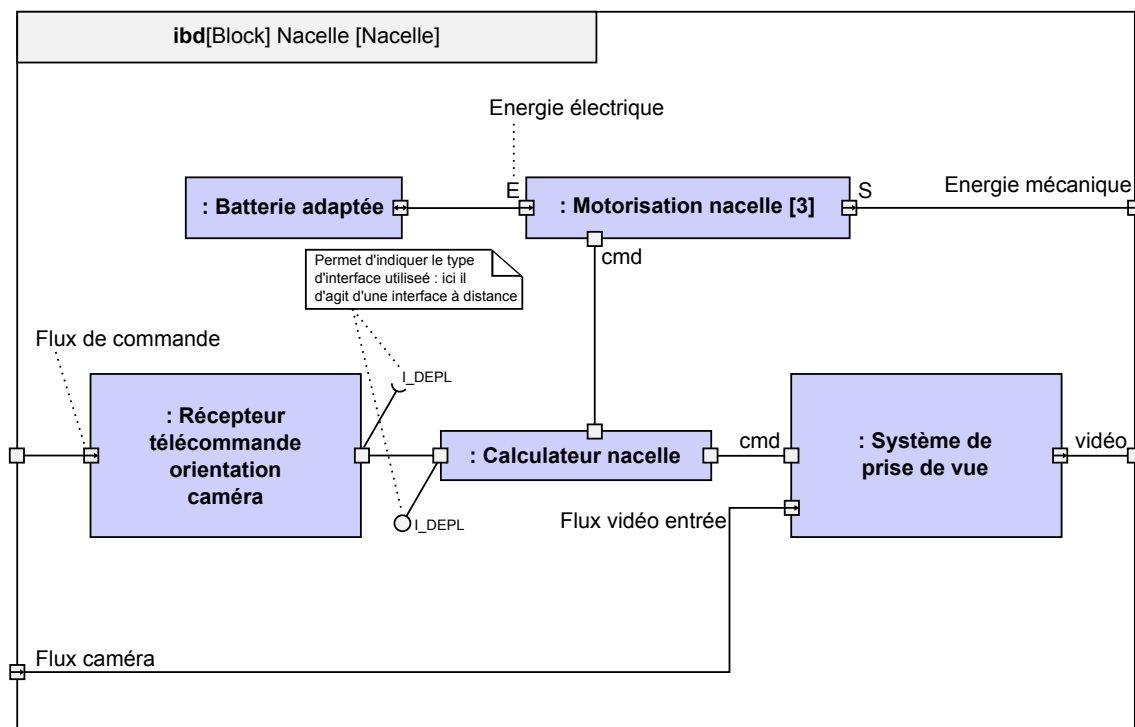
2.5 Diagramme de blocs internes

Le diagramme de blocs internes (*Internal Block Diagram (ibd)*) est également un diagramme structurel. L'objectif de ce diagramme est de décrire plus précisément le fonctionnement d'un bloc. Ce diagramme est donc rattaché à un bloc issu du diagramme de définition de blocs. Le cadre du diagramme représente ici la frontière du bloc.

Une notion importante dans ce bloc est la notion de **port** qui correspond à un point d'interaction avec l'extérieur du bloc (c'est là que viendront "s'attacher" les autres blocs du diagramme de définition). Les connecteurs entre les différents ports permettent de montrer le cheminement des différents flux (flux de matière, d'énergie ou d'information).

Les ports sont schématisés par des petits carrés en périphérie des blocs. Si le sens du flux est connu, on placera dans ce port un flèche (entrante, sortante ou bidirectionnelle) pour indiquer le sens du flux. On parlera alors de **ports de flux**. S'il n'y a pas de flux particulier, on parlera de **port standard** et dans ce cas-là, on ne place pas de flèche dans le port.

Diagramme de blocs internes pour l'élément nacelle du drone de cinéma



2.6 Diagramme d'états

Le diagramme d'états (*State Machine Diagram (stm)*) est un diagramme comportemental. Le diagramme d'état est rattaché à un bloc : ce bloc peut être le système entier, un sous-système ou n'importe quel élément.

Un état est une situation (d'une durée finie) durant laquelle un système exécute une activité ou est en attente d'un évènement. Le passage d'un état à un autre se fait en franchissant une transition.

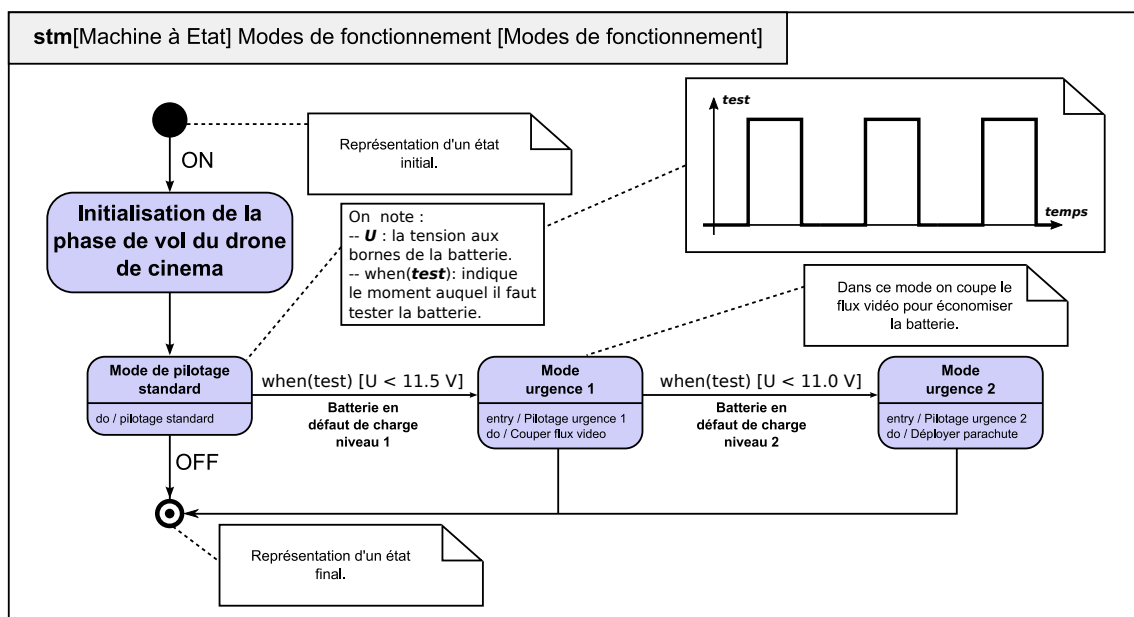
Les états sont représentés graphiquement par des rectangles aux coins arrondis. Les transitions entre ces états sont représentées par des flèches orientées ayant un état de départ et un état d'arrivée. La transition sera franchie si l'état en amont est actif et si la transition est validée.

La transition s'écrit d'une manière générale sous la forme évènement [condition de garde] / action. Chacune des closes évènement, condition de garde ou action est facultative.

- évènement aussi appelé **déclencheur** est une expression booléenne qui représente l'apparition d'un évènement et provoque le franchissement de la transition. On utilise fréquemment les deux attributs suivants pour détailler les évènements :
 - *when('condition booléenne')* s'active à l'instant précis où la condition devient vraie. L'évènement est "la condition booléenne devient vraie". Cela est équivalent à la syntaxe ↑, parfois rencontrée, devant l'expression pour spécifier que l'on regarde spécifiquement le front montant associé à la condition.
 - *after(temps)* s'active à l'instant précis où le temps spécifié s'est écoulé.
- condition de garde permet de rajouter une condition au passage de la transition. Si l'évènement apparaît, la condition de garde sera évaluée. Si la condition est respectée lorsque l'évènement apparaît alors la transition sera franchie,
- action permet d'exécuter une action à l'instant où le franchissement de la transition est effectuée.

Il est également possible de rajouter des évènements internes à chacun des états en ajoutant la ou les closes *entry*, *do* et *exit*. *Entry* indique que l'action est effectuée en entrant dans l'état (sauf indication contraire, elle n'est jamais interrompue). *Do* indique que l'action est réalisée dans l'état et s'arrête en sortant de l'état. *Exit* indique l'action qui sont effectuée en sortant de l'état (sauf indication contraire, elle n'est jamais interrompue).

Diagramme d'état du drone de cinéma



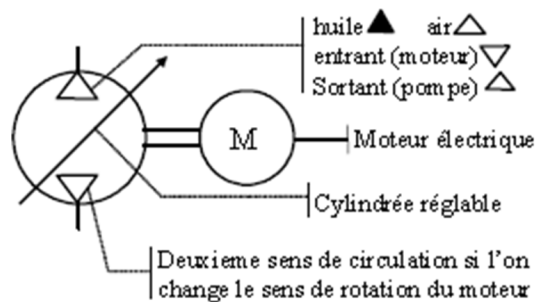
Chaîne d'énergie pneumatique et hydraulique

1 Bloc "ALIMENTER"

Énergie pneumatique : Cette énergie est, la plupart du temps, fournie par un compresseur. Une pression classique d'utilisation est 7 bars. L'énergie pneumatique est facile à mettre en œuvre. Cependant les pressions restent faibles (du fait de la compressibilité de l'air) et donc, les actions mécaniques développées par la suite de la chaîne d'énergie sont également limitées.

Énergie hydraulique : Cette énergie nécessite l'utilisation d'une pompe pour générer une pression et un débit d'huile. Cette énergie est plus complexe à mettre en œuvre que l'énergie pneumatique. Les pressions sont néanmoins beaucoup plus élevées (quelques centaines de bars) et permettent donc de générer des actions mécaniques beaucoup plus importantes !

La schématisation d'un ensemble *moteur + pompe* est donnée ci-dessous :



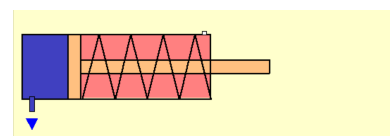
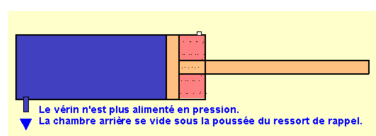
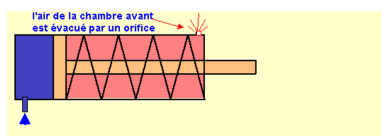
S'il n'est pas spécifié l'origine de l'énergie hydraulique ou pneumatique, on utilisera la schématisation ci-dessous :

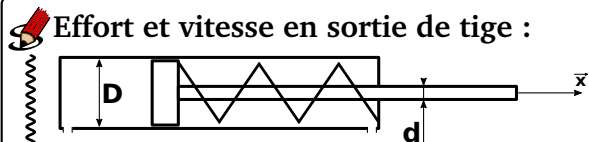


2 Bloc "CONVERTIR" : Le vérin hydraulique ou pneumatique

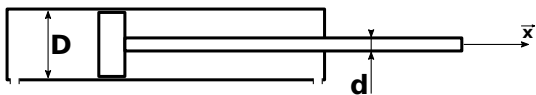
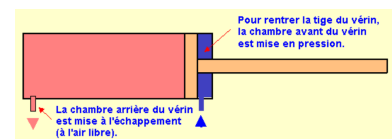
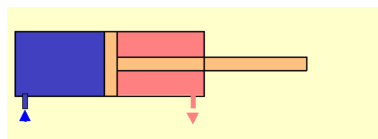
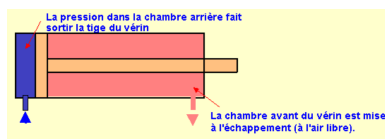
Un vérin pneumatique ou hydraulique sert à créer un mouvement mécanique, et consiste en un tube cylindrique (le **corps**) dans lequel une pièce mobile (le **piston**) sépare le volume du cylindre en deux chambres isolées l'une de l'autre. Un ou plusieurs orifices permettent d'introduire ou d'évacuer un fluide dans l'une ou l'autre des chambres et ainsi déplacer le piston. Une **tige** rigide est attachée au piston ce qui permet de transmettre effort et déplacement.

Vérin simple effet : Un vérin simple effet ne peut produire un effort que dans un seul sens. Le retour en position repos s'effectue sous l'action d'un ressort.

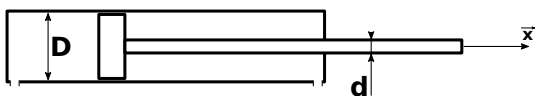




Vérin double effet : Un vérin double effet doit être rappelé en position initiale par inversion d'alimentation des deux chambres.



Rentrée de tige :



3 Bloc "TRANSMETTRE"

La transmission en pneumatique et en hydraulique est très simple puisqu'elle s'effectue uniquement par circulation de fluide dans des canalisations. Dans la schématisation, on distinguera tout de même la transmission de la puissance et

la transmission des informations de commande (ou de pilotage). La schématisation retenue est la suivante :

Conduite de puissance : trait plein _____

Conduite de pilotage : trait pointillé

4 Bloc "DISTRIBUER"

Ce bloc a pour objectif de distribuer l'énergie en fonction des signaux issus de la chaîne d'informations. Il faut bien comprendre que dans la chaîne d'information, les puissances développées sont quasi-nulles. Par contre dans la chaîne d'énergie, les puissances peuvent être très importantes. Ce bloc est donc essentiellement constitué de **pré-actionneurs**. Ces pré-actionneurs peuvent fonctionner en Tout Ou Rien (c'est-à-dire comme un interrupteur) ou en action proportionnelle.

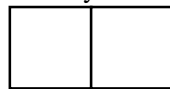
Un pré-actionneur TOR pour l'hydraulique ou le pneumatique est appelé **distributeur**. Il a pour but de diriger l'huile dans les bonnes canalisations en fonction de la commande. Le pré-actionneur proportionnel est appelé **servovalve** et a pour but de laisser passer un débit proportionnel à la commande.

Les distributeurs possèdent un certain nombre de **voies** (ou orifices), de **positions** (en général 2 ou 3) et une certain type de **commande**. Les distributeurs peuvent être **monostables** (une seule position stable) ou **bistables** (deux positions stables).

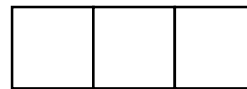
Ils sont constitués d'un corps dans lequel sont percés des orifices, et d'un « tiroir » se déplaçant dans ce corps. La position du tiroir définit la communication entre les orifices. La manière dont est commandé le déplacement du tiroir est indiquée sur le côté du schéma.

La schématisation hydraulique est normalisée et doit respecter les règles suivantes :

- Chaque position du distributeur est symbolisée par un carré.



Distributeur à 2 positions



Distributeur à 3 positions

- Une possibilité de passage du fluide est symbolisée par une flèche indiquant le sens de circulation. Un blocage du fluide est symbolisé par un "T".

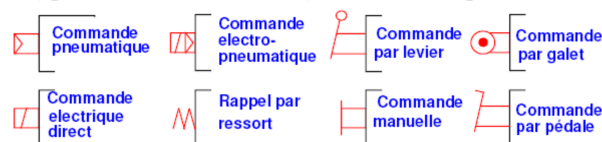


Circulation
du fluide



Blocage
du fluide

- La représentation des différents types de commande s'ajoute de chaque côté du symbole de base.



- Il ne faut représenter les connexions que sur UNE SEULE CASE. Cette case correspondra à la position "au repos" du système.



Raccordement
général

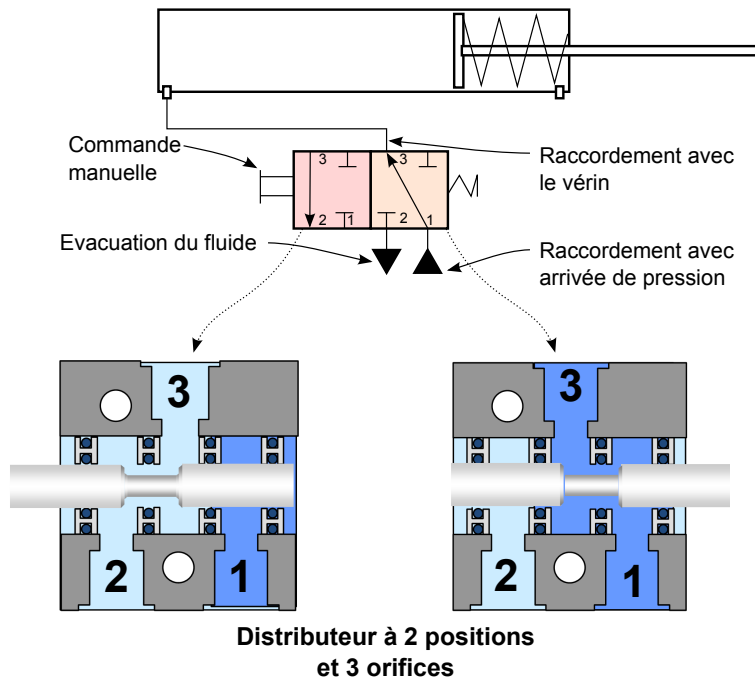


Evacuation

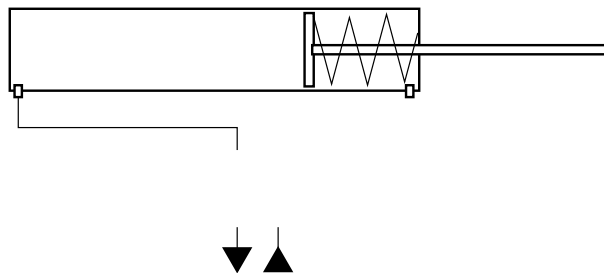


Arrivée de fluide

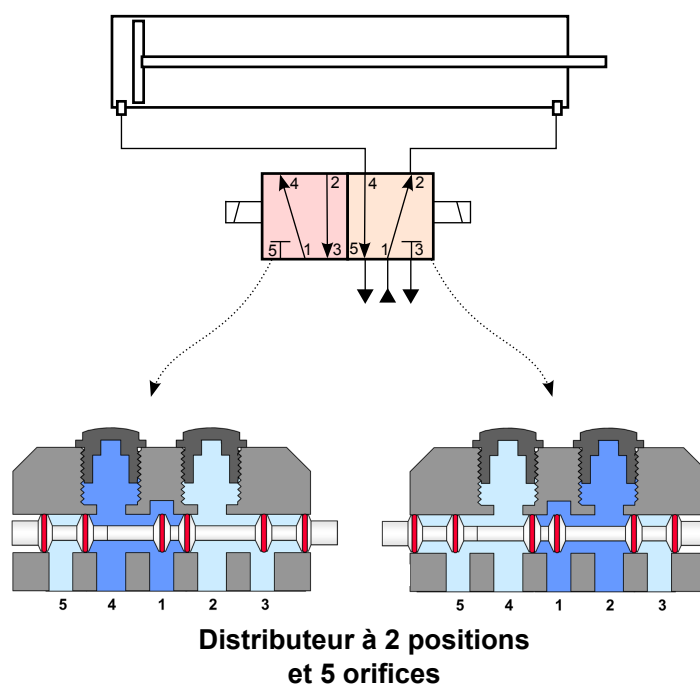
Distributeur à 3 voies et 2 positions : ce distributeur sera dit 3/2. Le déplacement du tiroir permet de gérer la circulation du fluide. Ici le distributeur sera dit monostable puisqu'il n'y a qu'une seule position stable (une des positions est obtenue par l'action du ressort).



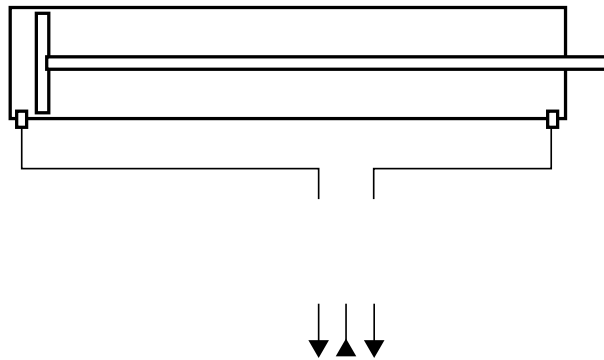
Que se passe-t-il si l'opérateur actionne la commande ?



Distributeur à 5 voies et 2 positions : ce distributeur sera dit 5/2. Ici le distributeur sera dit bistable puisqu'il y a deux positions stables.



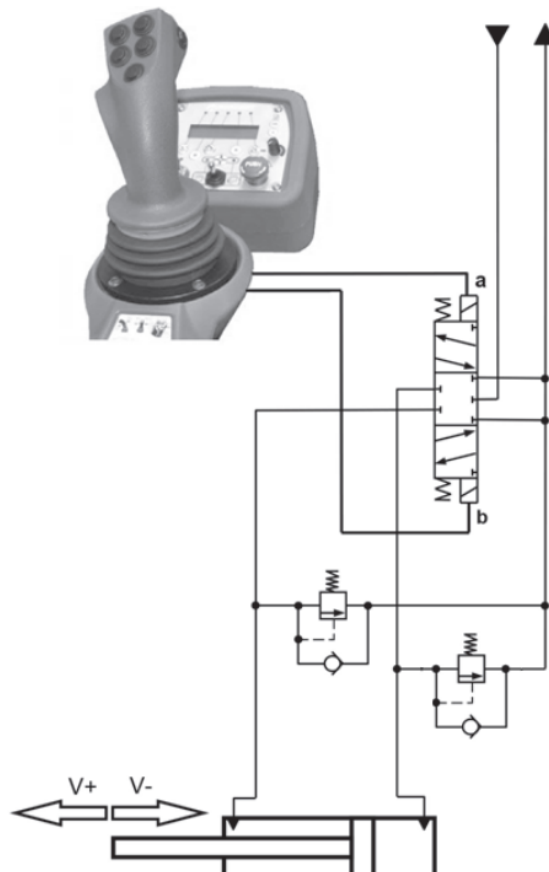
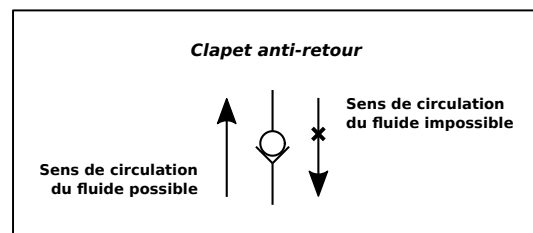
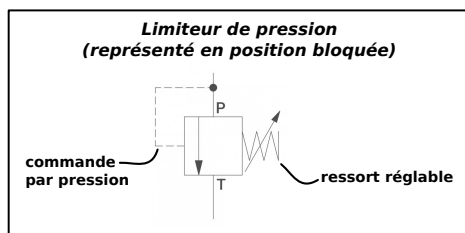
 Que se passe-t-il si l'on active la commande ?



5 Application n°1

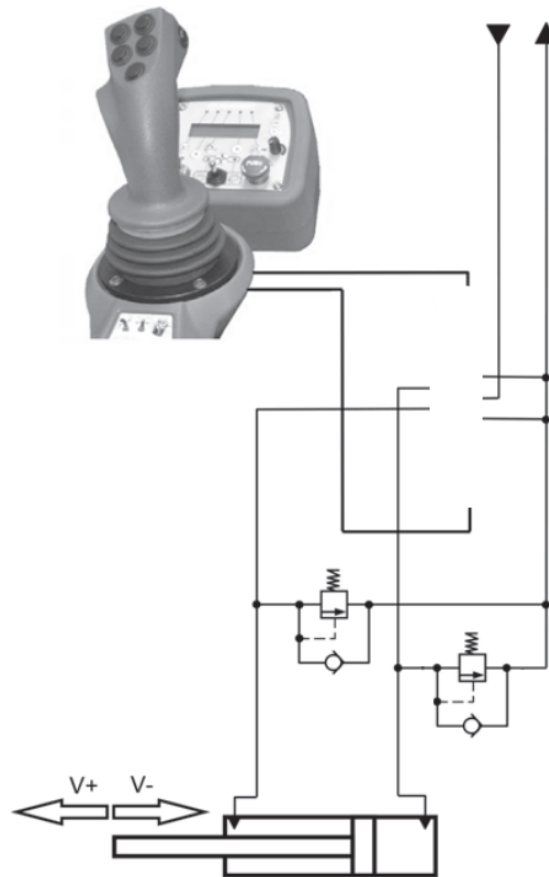
 **Commande d'un vérin présent sur une machine de travaux publics**

Dans les engins de travaux publics, les différents outils sont mis en mouvement par des vérins. Leur commande s'effectue avec un joystick. On donne ci-dessous le schéma correspondant ainsi que certains éléments de documentation.



Question 1. On suppose que le joystick actionne la commande $\mathbf{a}$ et que les limiteurs de pression restent en position bloquée. Faire apparaître sur le schéma ci-dessous :

- en rouge : les conduites hydrauliques raccordées à de la haute pression ;
- en bleu : les conduites hydrauliques raccordées à de la basse pression ;
- le mouvement **V+** ou **V-** du vérin.

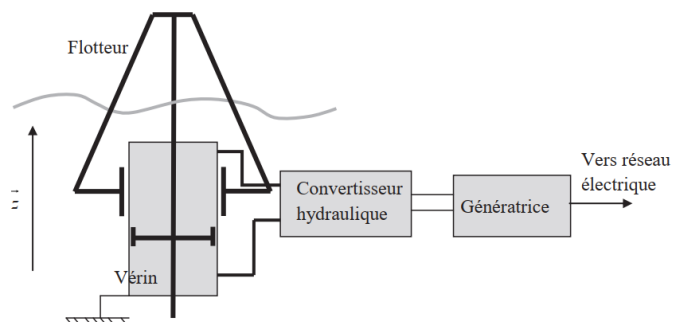
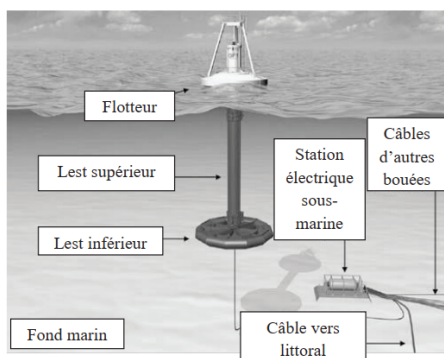


Question 2. Expliquer le fonctionnement du limiteur de pression.

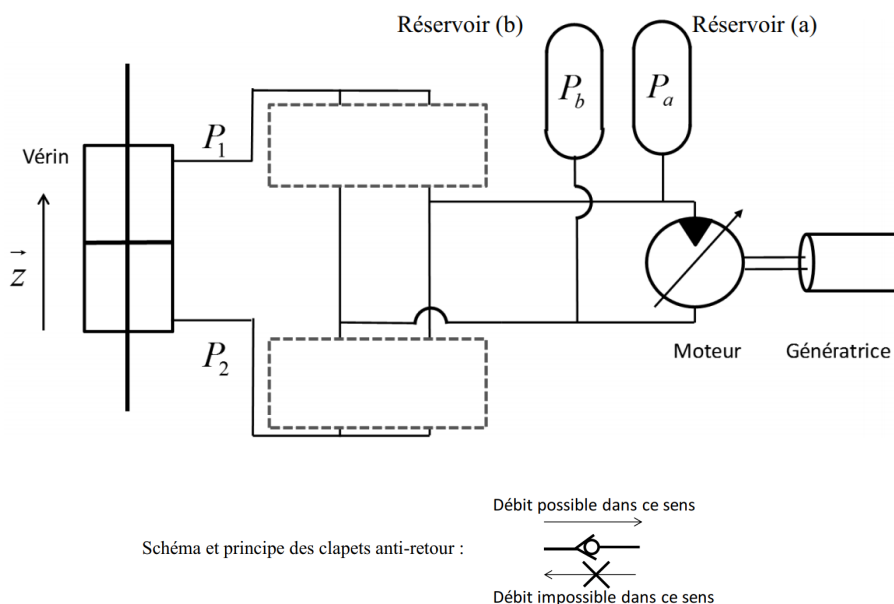
6 Application n°2

Bouée houlomotrice

On s'intéresse à une bouée houlomotrice qui permet de récupérer l'énergie des vagues. Un vérin à "double-sens" est utilisé. Le schéma hydraulique doit permettre d'obtenir, que la tige du vérin monte ou descende, un même sens de rotation du moteur.



Question. Mettre en place le schéma hydraulique permettant de répondre à la problématique énoncée.

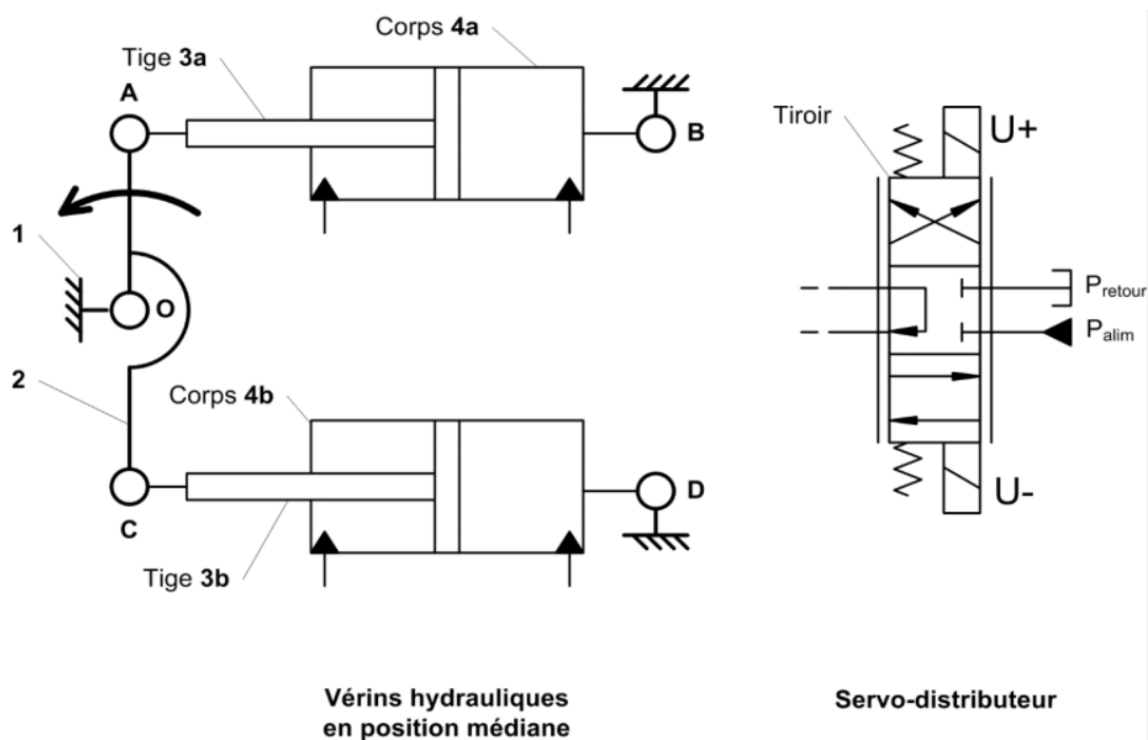


7 Application n°2

Mécanisme d'inclinaison

On s'intéresse à un mécanisme permettant d'incliner une pièce référencée 2 sur le schéma ci-dessous.

On considère qu'une commande **U-** entraîne un déplacement du tiroir du servo-distributeur vers le haut (sur le schéma) et a pour effet de générer une rotation de la pièce 2 dans le sens indiqué sur le schéma.



Question. Relier correctement les deux sorties du servo-distributeur aux orifices des vérins afin de faire tourner la pièce 2 dans le sens adéquat. Utiliser deux couleurs différentes afin d'identifier les circuits hydrauliques à la pression P_{alim} et ceux à P_{retour} .

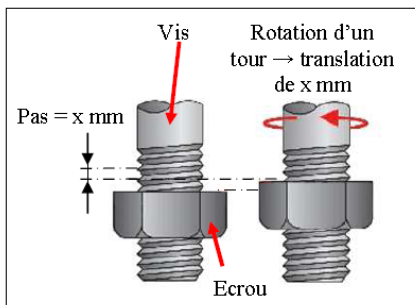
Éléments de transmission de puissance

Lorsqu'un moteur à courant continu (ou un moteur rotatif en général) est utilisé, il est nécessaire de transmettre l'énergie mécanique de rotation. Il existe une infinité de systèmes permettant de transmettre une énergie mécanique. Nous détaillerons simplement les mécanismes les plus classiques. Bien entendu, pour d'autres technologies (vérin par exemple), il peut aussi être nécessaire d'utiliser les dispositifs détaillés dans ce cours.

Système vis-écrou : Le système vis-écrou est un mécanisme qui permet de transformer une énergie mécanique de rotation en une énergie mécanique de translation. L'inverse est parfois possible également mais le système n'est pas forcément réversible (cela dépend notamment des frottements). Il se compose :

- d'une tige filetée entraînée en rotation autour d'un axe fixe par rapport au bâti de la machine, la vis ;
- d'une pièce comportant un filetage guidée en translation par rapport au bâti.

Lorsque la vis tourne, l'écrou est entraîné en translation si sa rotation est bloquée.



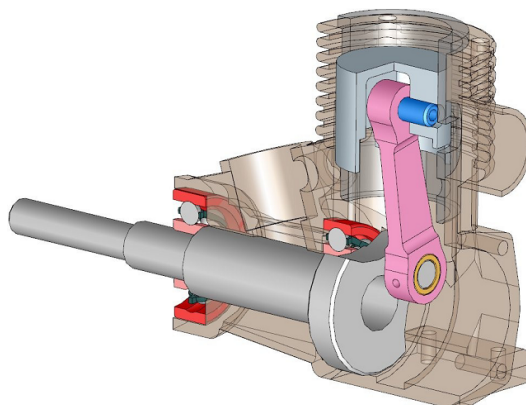
À retenir

$$V = \pm \frac{p}{2\pi} \cdot \omega$$

Avec V , la vitesse linéaire (en $m.s^{-1}$) ; p , le pas de la vis (en m) ; ω , la vitesse de rotation (en $rad.s^{-1}$).

Il faut faire très attention au signe qui sera défini par rapport au paramétrage !

Système bielle-manivelle : Ce système est utilisé pour transformer un mouvement de rotation en un mouvement de translation alternée. Il est très souvent utilisé dans les moteurs ou les compresseurs.



Joint de transmission : Ces joints servent à transmettre un mouvement de rotation entre deux axes qui ne sont pas parfaitement alignés. Les principaux joints utilisés sont l'accouplement élastique ou le joint de cardan.



Joint de cardan

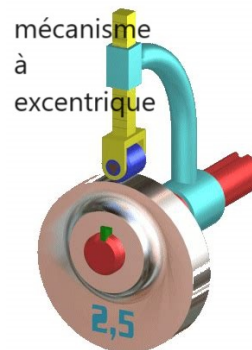
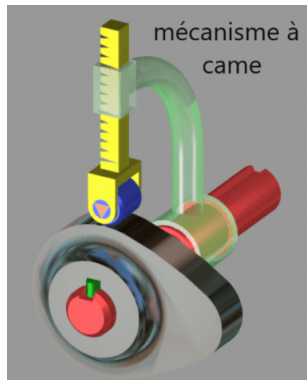
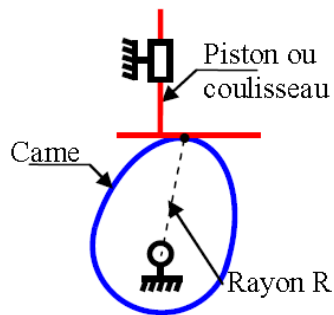


Accouplement élastique

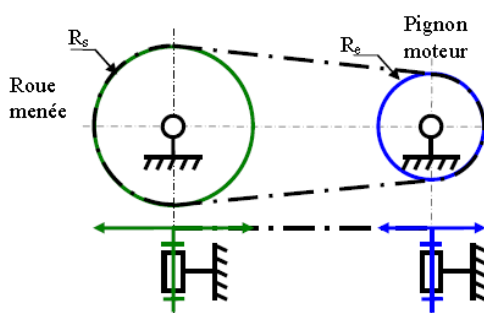


Accouplement rigide

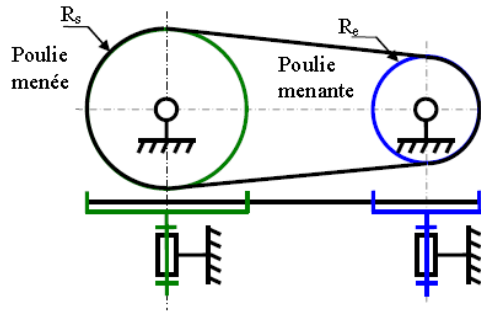
Mécanisme à came : Ce mécanisme permet de transformer une rotation continue en translation alternative. La came est une pièce entraînée en rotation et qui a un rayon variable. Une came particulière, appelée excentrique, est caractérisée par un rayon constant et une excentration. Ils s'utilisent essentiellement dans les pompes hydrauliques et les moteurs thermiques (arbre à cames).



Transmission par liens flexibles : Les transmissions par liens flexibles servent à transmettre des mouvements de rotation (en général pour réduire la vitesse). Elles sont intéressantes lorsque les arbres à relier sont éloignés l'un de l'autre. Les deux principaux liens flexibles utilisés sont la **chaîne** et la **courroie**.



Transmission par chaîne



Transmission par courroie

À retenir

Aspect CINÉMATIQUE → L'écriture des conditions de roulement sans glissement mène à :

$$\frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{R_e}{R_s}$$

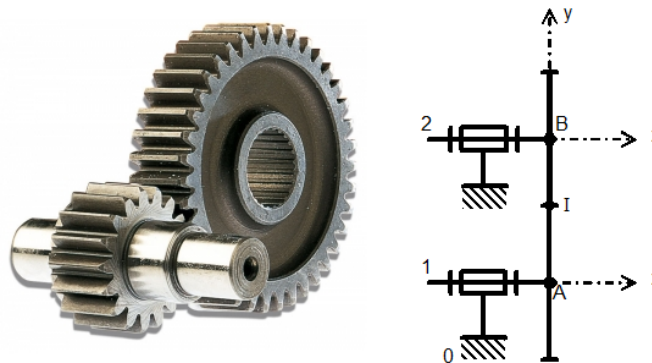
Avec ω_i , les vitesses de rotation (en rad.s^{-1}), et R_i les rayons de roues/pignons.

Aspect DYNAMIQUE → Pour un mécanisme parfait, l'écriture du théorème de l'énergie cinétique mène à :

$$C_e \omega_e + C_s \omega_s = 0 \Leftrightarrow \frac{C_s}{C_e} = -\frac{R_s}{R_e}$$

Avec C_i , les couples exercés de l'extérieur sur le pignon e et le pignon s .

Mécanisme à engrenages : Un engrenage est constitué d'une roue dentée, d'un pignon denté et d'un bâti. **Un engrenage se comporte comme un couple de roues en roulement sans glissement.** L'entraînement se fait par obstacle, mais le comportement est celui de deux cylindres roulant sans glisser l'un sur l'autre.



Chacun de ces cylindres aurait un diamètre proportionnel au nombre de dents de la roue ou du pignon correspondant. Le coefficient de proportionnalité (le même pour le pignon et la roue) est appelé module de l'engrenage et est noté m . On a donc : $D_i = m.Z_i$ avec Z_i le nombre de dents du pignon ou de la roue. D_i est appelé le diamètre primitif du pignon ou de la roue.

À retenir

Aspect CINÉMATIQUE → L'écriture des conditions de roulement sans glissement de la roue 1 sur la roue 2 permet de montrer que :

$$\frac{\omega_{20}}{\omega_{10}} = -\frac{Z_1}{Z_2} = -\frac{D_1}{D_2} = -\frac{R_1}{R_2}$$

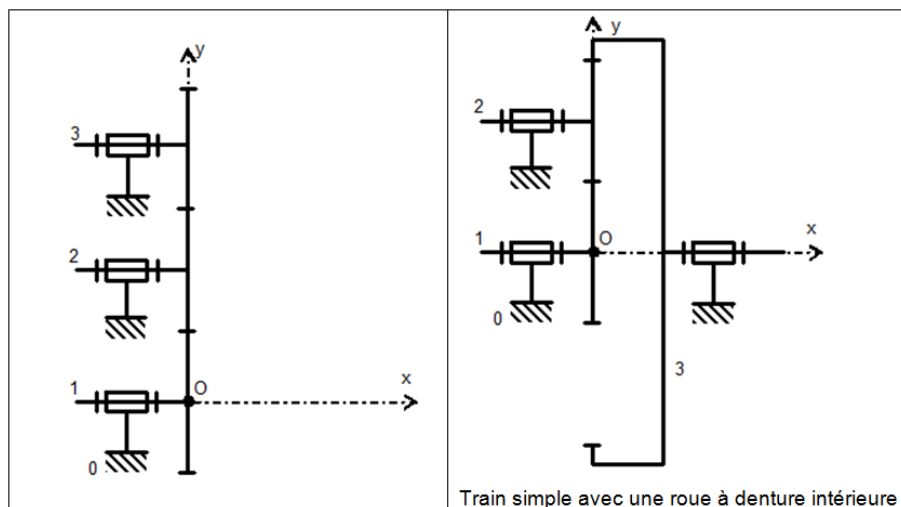
Avec ω_{ij} , les vitesses de rotation (en $rad.s^{-1}$). **Attention : le signe – n'apparaît que pour un contact extérieur !**

Aspect DYNAMIQUE → Pour un mécanisme parfait, l'écriture du théorème de l'énergie cinétique mène à :

$$C_1 \omega_{10} + C_2 \omega_{20} = 0$$

Avec C_i , les couples exercés de l'extérieur sur les roues 1 et 2.

Mécanisme à train d'engrenages cylindriques : On appelle un train d'engrenage l'assemblage de plusieurs roues et pignons associés en série. Pour résoudre ce problème, il est possible de réutiliser les formules énoncées précédemment pour chaque couple de roues.



À retenir

Aspect CINÉMATIQUE → Il suffit d'écrire pour chaque couple la relation qui lie la vitesse de rotation en entrée et la vitesse de rotation en sortie, on aura donc :

$$\frac{\omega_{30}}{\omega_{10}} = \frac{\omega_{30}}{\omega_{20}} \cdot \frac{\omega_{20}}{\omega_{10}}$$

Attention : Pour un contact intérieur, on aura un rapport de vitesse positif, les roues tournent dans le même sens !

Une autre méthode est de connaître la formule :

$$\frac{\omega_{30}}{\omega_{10}} = \frac{\text{sortie}}{\text{entree}} = (-1)^n \cdot \frac{\prod Z_{\text{Roues menantes}}}{\prod Z_{\text{Roues menees}}}$$

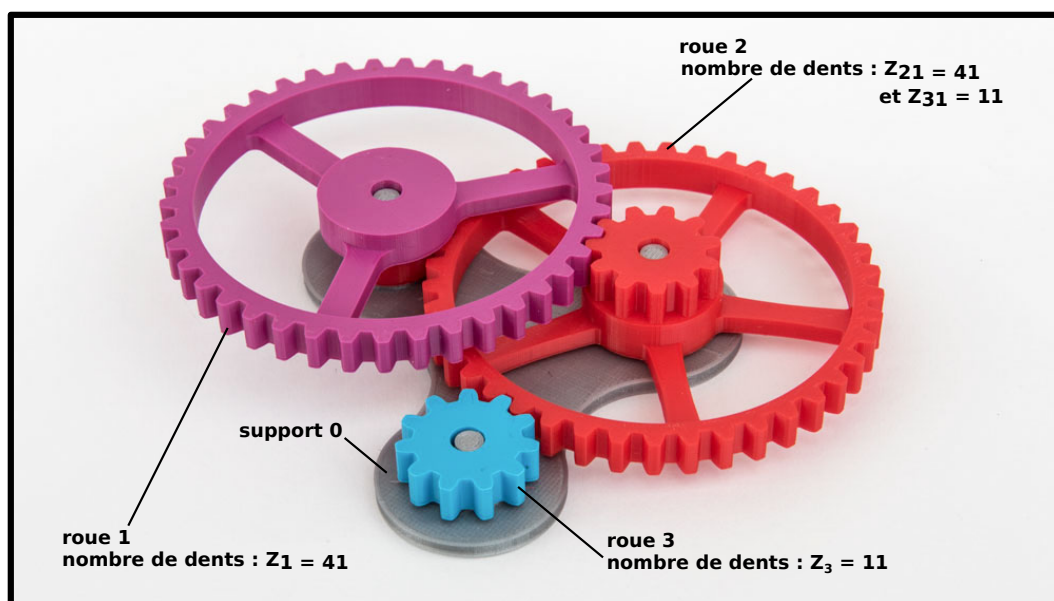
avec n le nombre de contact extérieurs !

Aspect DYNAMIQUE → Pour un mécanisme parfait, l'écriture du théorème de l'énergie cinétique mènera toujours à :

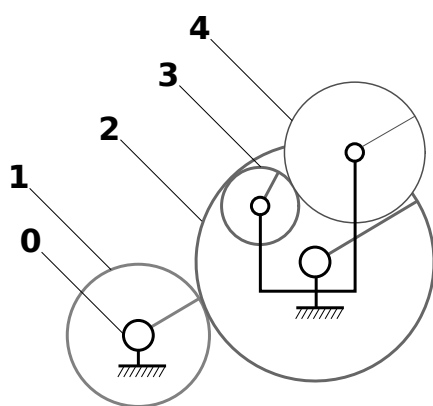
$$C_1 \omega_{10} + C_3 \omega_{30} = 0$$

Avec C_i , les couples exercés de l'extérieur sur les roues 1 et 3.

Calculer le rapport $\frac{\omega_{10}}{\omega_{30}}$.

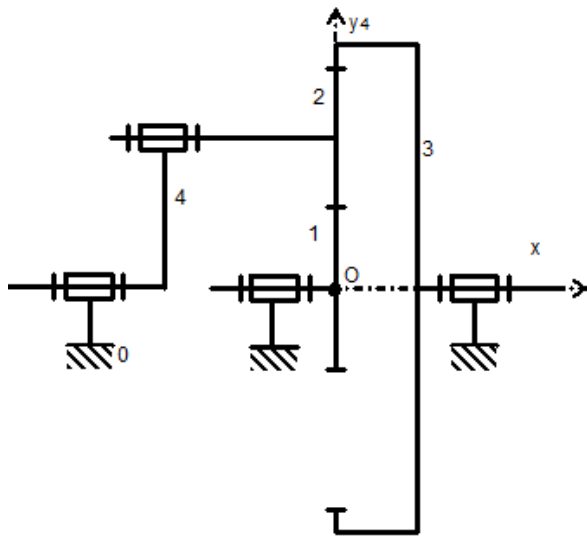


Calculer le rapport $\frac{\omega_{4/0}}{\omega_{1/0}}$.



Chaque solide $i = 1, 2, \dots, 4$ a un rayon R_i .

Mécanisme à train épicycloïdal : Les relations déterminées précédemment ne sont valables que si les axes de rotation sont fixes. Dans le cas d'un train épicycloïdal, cela n'est plus le cas ! Une astuce est de se placer dans le repère du porte-satellite (4) qui est mobile. Tous les axes seront donc fixes en se plaçant dans ce repère. On pourra donc utiliser les formules précédentes.



Le train épicycloïdal est constitué de deux pignons et d'une roue, numérotés respectivement 1, 2, 3, et d'une pièce numérotée 4 en mouvement de rotation d'axe mobile avec le bâti. Cette pièce est appelée porte-satellite. Le pignon intermédiaire 2 est appelé satellite. 1 et 3 sont appelés planétaires. On note $\vec{\Omega}_{1/0} = \omega_{10} \vec{x}$, $\vec{\Omega}_{3/0} = \omega_{30} \vec{x}$ et $\vec{\Omega}_{4/0} = \omega_{40} \vec{x}$ les vecteurs rotations des solides 1, 3 et 4 par rapport au bâti 0. Z_1 , Z_2 et Z_3 sont respectivement les nombres de dents des pignons 1, 2 et 3.

On peut donc écrire :

$$\frac{\omega_{34}}{\omega_{14}} = \frac{\omega_{34}}{\omega_{24}} \cdot \frac{\omega_{24}}{\omega_{14}} = -\frac{Z_2}{Z_3} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}$$

Mais aussi :

$$\frac{\omega_{34}}{\omega_{14}} = \frac{\omega_{30} - \omega_{40}}{\omega_{10} - \omega_{40}}$$

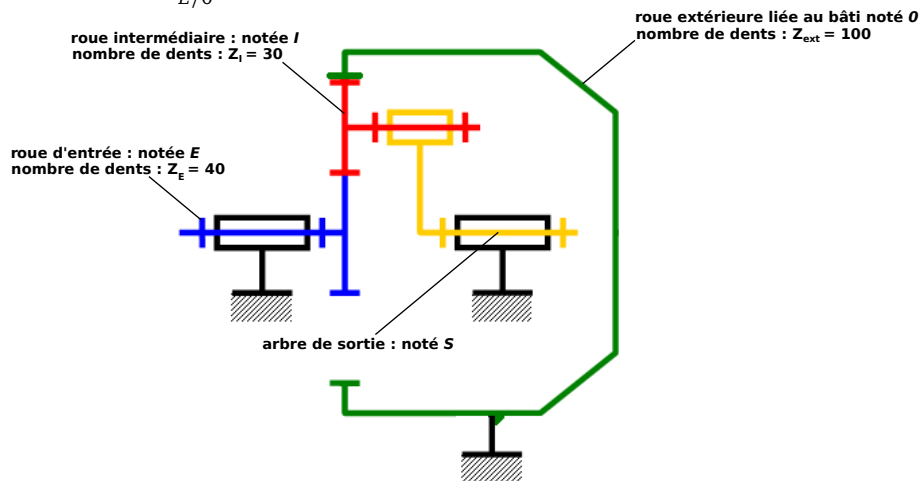
D'un point de vue dynamique, on a simplement :

$$C_1 \omega_{10} + C_2 \omega_{20} + C_3 \omega_{30} = 0$$

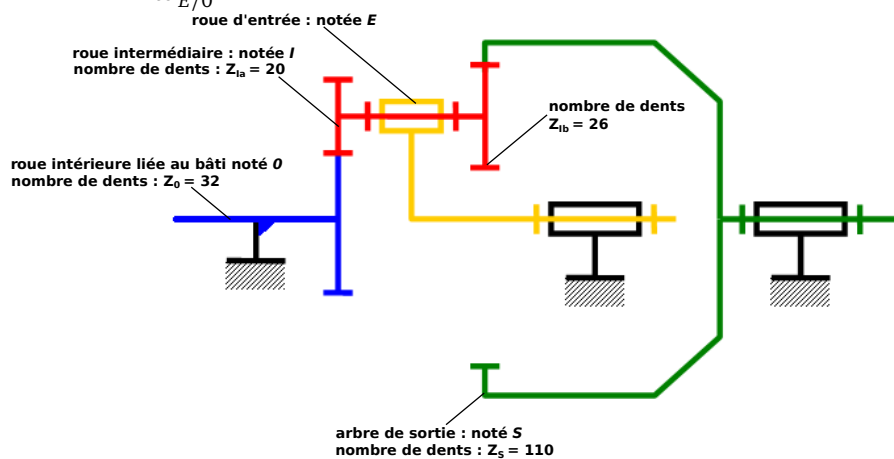
Avec C_i , les couples exercés de l'extérieur sur les roues 1, 2 et 3.

Les relations ont ici été données dans le cas général. Aucune des roues n'a été fixée. Pour que le mécanisme fonctionne correctement, une des roues doit être bloquée.

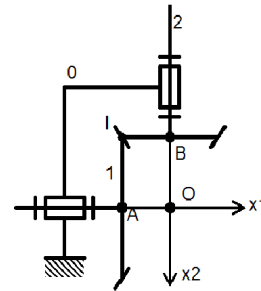
 Application : Déterminer $\frac{\omega_{S/0}}{\omega_{E/0}}$.



 Application : Déterminer $\frac{\omega_{S/0}}{\omega_{E/0}}$.



Engrenages coniques : Les engrenages coniques permettent de modifier l'axe d'une rotation. Les relations sont ici exactement les mêmes que pour un engrenage classique. Le signe est tout de même complexe à évaluer de manière générale. Il est donc nécessaire d'analyser précisément le mécanisme pour en déduire si la rotation en sortie est dans le même sens (positif ou non) que l'entrée.



À retenir

Aspect CINÉMATIQUE → L'écriture des conditions de roulement sans glissement de la roue 1 sur la roue 2 permet de montrer que :

$$\frac{\omega_{20}}{\omega_{10}} = \pm \frac{Z_1}{Z_2} = \pm \frac{D_1}{D_2} = \pm \frac{R_1}{R_2}$$

Avec ω_{ij} , les vitesses de rotation (en $rad.s^{-1}$).

Attention au signe, qui est à déterminer en analysant les sens de rotation !

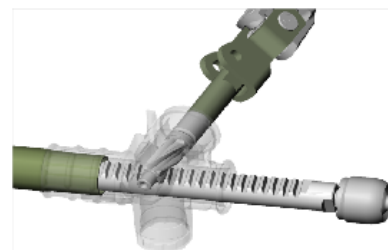
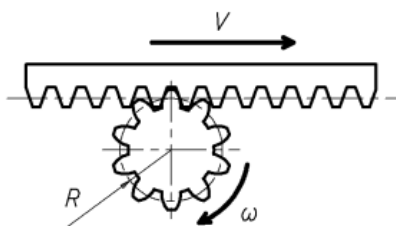
Aspect DYNAMIQUE → Pour un mécanisme parfait, l'écriture du théorème de l'énergie cinétique mène à :

$$C_1 \omega_{10} + C_2 \omega_{20} = 0$$

Avec C_i , les couples exercés de l'extérieur sur les roues 1 et 2.

Système poulie-crémaillère : Ce système est utilisé pour transformer un mouvement de rotation en mouvement de translation. C'est exactement le même mode de fonctionnement qu'un système poulie/courroie.

Pour ce système, le pignon est toujours en rotation. Par contre la translation peut être recherchée soit sur le pignon soit sur la crémaillère. Il faudra donc analyser le montage.



À retenir

Aspect CINÉMATIQUE → L'écriture des conditions de roulement permet de montrer que :

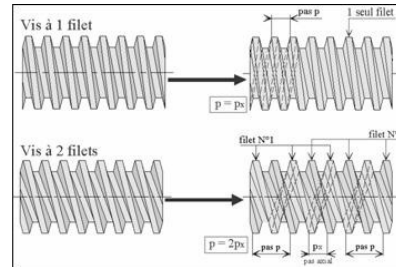
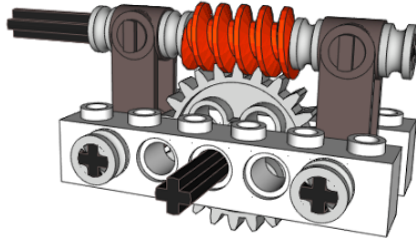
$$V = \pm R \cdot \omega$$

Avec ω , la vitesse de rotation du pignon (en $rad.s^{-1}$) ; V , la vitesse linéaire de la crémaillère et R , le rayon primitif du pignon.

Attention au signe, qui est à déterminer en analysant les sens de rotation ou en écrivant proprement les

, conditions de roulement sans glissement !

Système roue-vis sans fin : Ce système permet d'obtenir des rapports de réduction très importants. Pour ce type de système il y a quasi-toujours **roulement avec glissement**. Ce type de système n'est donc pas toujours réversible. Une rotation de la vis entraîne bien une rotation de la roue mais l'inverse n'est pas toujours valable !



À retenir

Aspect CINÉMATIQUE → L'écriture de la cinématique permet de montrer que :

$$\frac{\omega_{roue}}{\omega_{vis}} = \pm \frac{Z_{vis}}{Z_{roue}}$$

Le grand rapport de réduction est obtenu parce que Z_{vis} (qu'on appelle le nombre de filets de la vis) est souvent très petit ! On peut avoir des vis à un seul filet !!!

Attention au signe, qui est à déterminer en analysant les sens de rotation ! Cette relation n'est valable qu'avec les nombres de dents/de filets, pas avec les diamètres !