

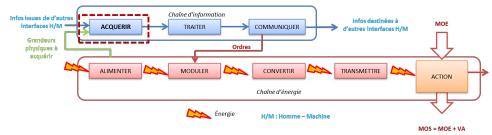
## Modéliser le comportement linéaire et non linéaire des systèmes multiphysiques

Sciences  
Industrielles de  
l'Ingénieur

### Chapitre 6 Association actionneurs – Préactionneurs

**Savoirs et compétences :**

- A3-05 caractériser un constituant de la chaîne de puissance :
  - alimentation d'énergie,
  - association de préactionneurs et d'actionneurs :
    - \* caractéristiques;
    - \* réversibilité;
    - \* domaines d'application.



1	Fonction moduler/commuter/traiter	2
1.1	Introduction . . . . .	2
1.2	Les modulateurs électriques . . . . .	2
1.3	Les modulateurs pneumatiques et hydrauliques . . . . .	4
1.4	Les distributeurs . . . . .	4
1.5	Désignation des distributeurs . . . . .	5
2	Fonction Convertir	6
2.1	Les moteurs électriques . . . . .	7
2.2	Convertisseurs d'énergie pneumatique ou hydraulique . . . . .	8
2.3	Moteurs thermiques . . . . .	9

## 1 Fonction moduler/commuter/traiter

### 1.1 Introduction

Dans la chaîne fonctionnelle, le modulateur d'énergie (ou distributeur d'énergie ou pré actionneurs) est le composant qui fait le lien entre la chaîne d'information et la chaîne d'énergie. Ainsi, à partir d'une faible puissance énergétique provenant de la fonction « Traiter » (l'API ou la carte de commande), il peut faire transiter une grande puissance (provenant de la fonction « Alimenter » ou « Stocker »).

#### Définition Définition : Tout ou rien – Variateur

Les distributeurs « tout ou rien » permettent d'envoyer toute l'énergie de l'alimentation vers le convertisseur.

Les distributeurs de type « variateur » permettent de moduler l'énergie envoyée au convertisseur.

- **Exemple** Un interrupteur de lumière peut être considéré comme un distributeur tout ou rien.

Le variateur d'une lampe halogène peut être considéré comme un ... variateur.

#### Définition Définition : Monostable – Bistable

Un pré-actionneur est dit monostable s'il a besoin d'un ordre pour le faire passer de sa position de repos à sa position de travail et que le retour à sa position de repos s'effectue automatiquement lorsque l'ordre disparaît : **il n'est stable que dans une seule position**.

Un pré-actionneur est dit bistable s'il a besoin d'un ordre pour passer de sa position repos à sa position travail et qu'il reste en position travail à la disparition de cet ordre. Il ne peut revenir à sa position repos que s'il reçoit un second ordre : **il est stable dans les deux positions**.

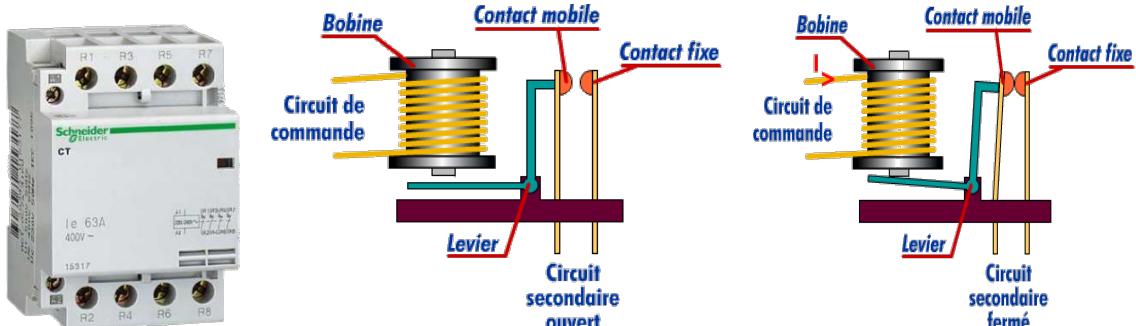
- **Exemple** Un interrupteur de lumière peut être considéré comme un distributeur bistable. Il faut appuyer dessus pour allumer une lumière et appuyer une seconde fois pour l'éteindre.

### 1.2 Les modulateurs électriques

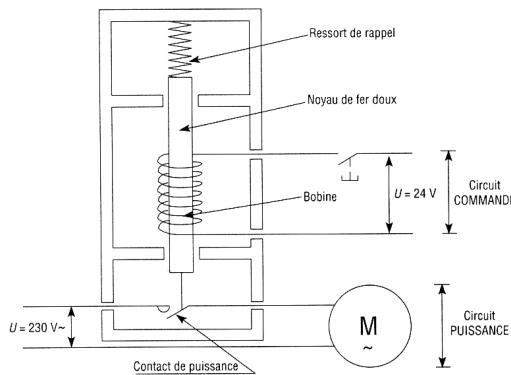
#### 1.2.1 Le relais (ou contacteur de puissance)

Le relais est un dispositif électrique permettant de commander un circuit de commande ou un circuit de puissance.

Le circuit secondaire alimente la partie que l'on veut commander. Lorsque la bobine est alimentée le levier pivote provoquant la fermeture du contact. Certains relais peuvent aussi être actionnés manuellement.



Contacteur électrique monostable



Quand la bobine reçoit un ordre de marche (appui sur le bouton poussoir) la bobine est alimentée par un courant, créant ainsi un champ magnétique. Le champ magnétique créé dans la bobine provoque le déplacement du noyau de fer doux vers le haut. Le contact de puissance est alors fermé.

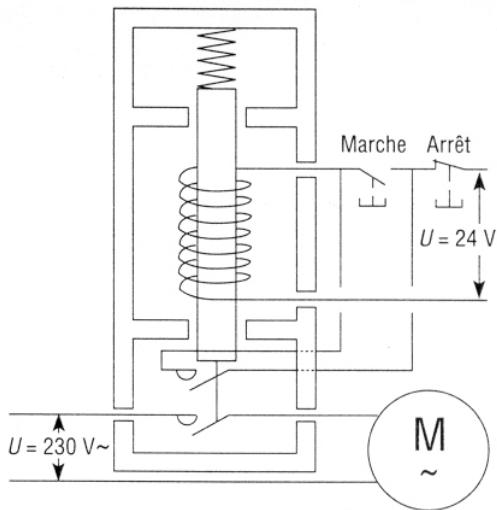
Le moteur est alimenté puis mis en rotation.

Quand l'ordre de marche est interrompu (bouton relâché), le circuit de commande est ouvert. La bobine n'est plus alimentée et le ressort de rappel fait redescendre le noyau de fer doux.

Le circuit de puissance s'ouvre et le moteur n'est plus alimenté.

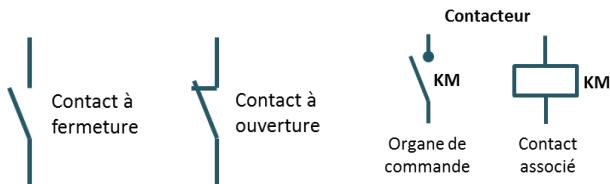
Ce contacteur est monostable car il alimente en énergie électrique le moteur tant que l'ordre est maintenu.

### Contacteur électrique bistable

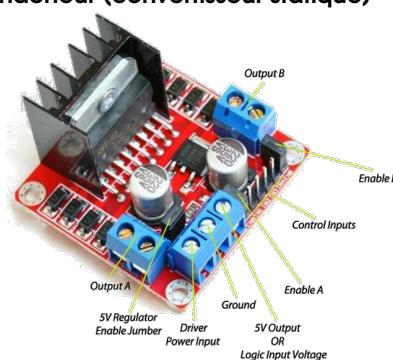


Ce contacteur est bistable : il faut un ordre (court) pour que le moteur soit alimenté. Le moteur continue à être alimenté même quand l'ordre de marche a disparu. Il faut un ordre d'arrêt (court) pour que le moteur ne soit plus alimenté.

### Symbolisation des contacts



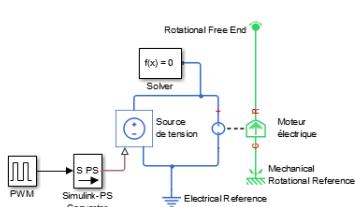
### 1.2.2 Le hacheur (convertisseur statique)



Lorsqu'on souhaite contrôler la fréquence de rotation d'un moteur à courant continu ou moduler la puissance électrique s'appliquant sur une charge, il est nécessaire de moduler sa tension d'alimentation. On pourrait pour cela utiliser un pont diviseur, mais cette technologie serait très énergivore à cause des pertes joules qui apparaîtraient dans les résistances. Historiquement des transistors linéaires étaient utilisés mais ils sont coûteux et peu fiables. On utilise désormais un hacheur.

Un hacheur est composé de transistors « tout ou rien » utilisant la technologie « MOSFET ». Cette technologie permet de commuter (laisser passer ou non) des courants importants avec une bonne fiabilité, un bon rendement et une rapidité de commutation bien supérieure au relai. Une bonne coordination de l'ouverture et de la fermeture de ces interrupteurs permet de générer une tension ayant une forme de crête où les temps à l'état bas et à l'état haut sont réglables.

Le hacheur est caractérisé par sa période de hachage (980 Hz pour une carte Arduino Leonardo), ainsi que par le rapport cyclique (variable), défini par le pourcentage de la période passé à l'état haut. Il envoie ainsi un signal appelé MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) ou PWM (Pulse Width Modulation).



Modèle simplifié du pilotage d'un moteur électrique à courant continu

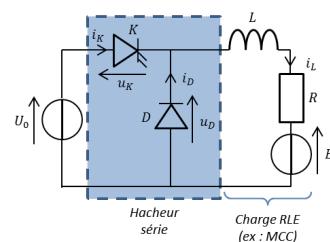
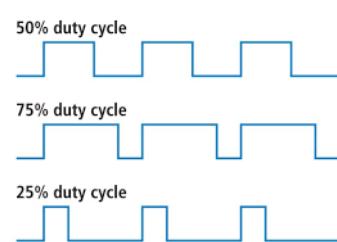


Schéma proche du câblage réel. L'interrupteur K est commandé par le signal MLI



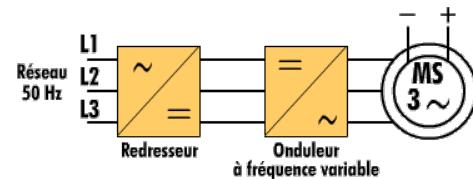
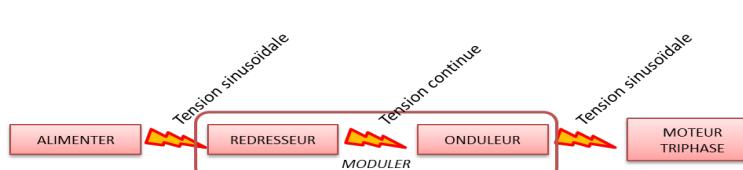
Signal MLI avec 3 rapport cycliques distincts

Dans le cas précédent, si le moteur est alimenté par un créneau valant 24 V 25% du temps. Il est donc alimenté en 6 V en moyenne.

### 1.2.3 L'onduleur (variateur)

Les moteurs triphasés sont physiquement alimentés par 3 fils. La tension est sinusoïdale et décalée dans chacun d'entre eux d'un tiers de période. Afin de générer un signal sinusoïdal de fréquence et d'amplitude voulue on a recours à un onduleur.

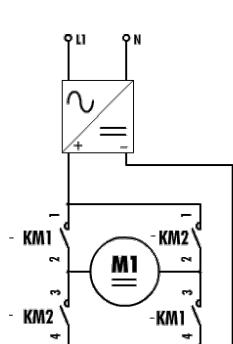
Pour cela, en règle générale, on redresse la tension issue de l'alimentation du secteur puis on régénère un signal avec l'onduleur.



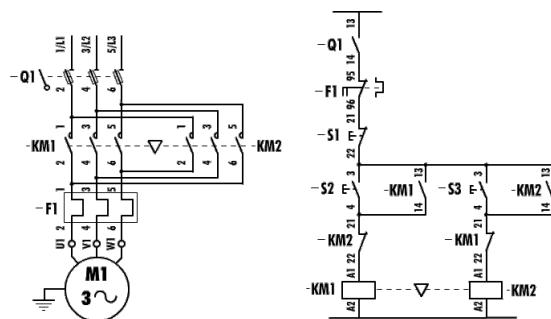
Le variateur est une forme d'onduleur qui permet de piloter avec précision la vitesse ou la position d'un moteur triphasé. Pour cela il utilise en général un capteur afin de connaître la position du rotor et alimenter la bonne phase. Certaines technologies peuvent déterminer la position du rotor sans capteur en mesurant les effets d'induction dans les phases (montée et descente de courant lorsque l'on commute la phase) *technologie sensorless*.

### 1.2.4 Notion de schéma électrique

#### Inversion de sens d'un moteur CC.



#### Inversion de sens d'un moteur triphasé asynchrone



### 1.3 Les modulateurs pneumatiques et hydrauliques

#### Définition Énergie hydraulique et pneumatique – Fluides

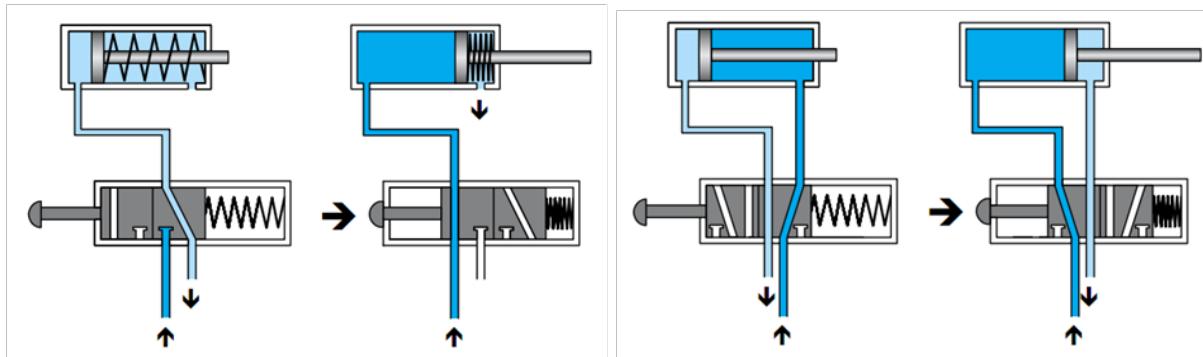
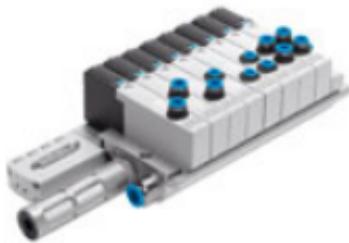
**Énergie pneumatique** : le fluide utilisé est de l'air comprimé.

**Énergie hydraulique** : le fluide utilisé est une huile hydraulique minérale ou difficilement inflammable (aqueuse ou non).

### 1.4 Les distributeurs

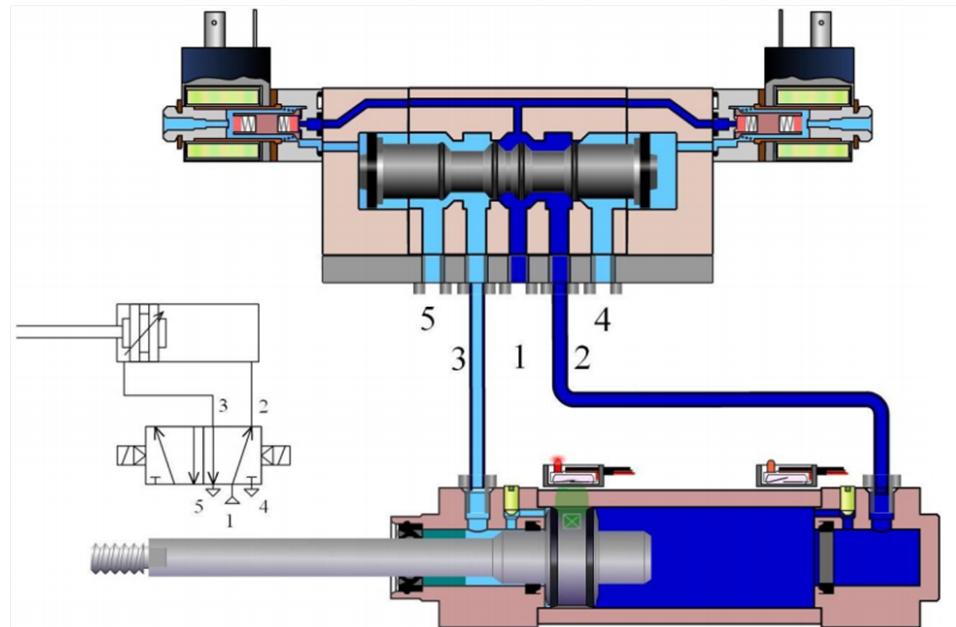
Les distributeurs sont les préactionneurs des vérins pneumatiques et hydrauliques.

Ils servent d'« aiguillages » en dirigeant le fluide dans certaines directions. Les plus utilisés sont les distributeurs à tiroir.



Vérin simple effet et distributeur 3/2 monostable NF à commande manuelle par bouton

Vérin double effet et distributeur 5/2 monostable à commande manuelle par bouton



Vérin double effet à amortissement réglable et distributeur 5/2 bistable à commande électropneumatique

## 1.5 Désignation des distributeurs

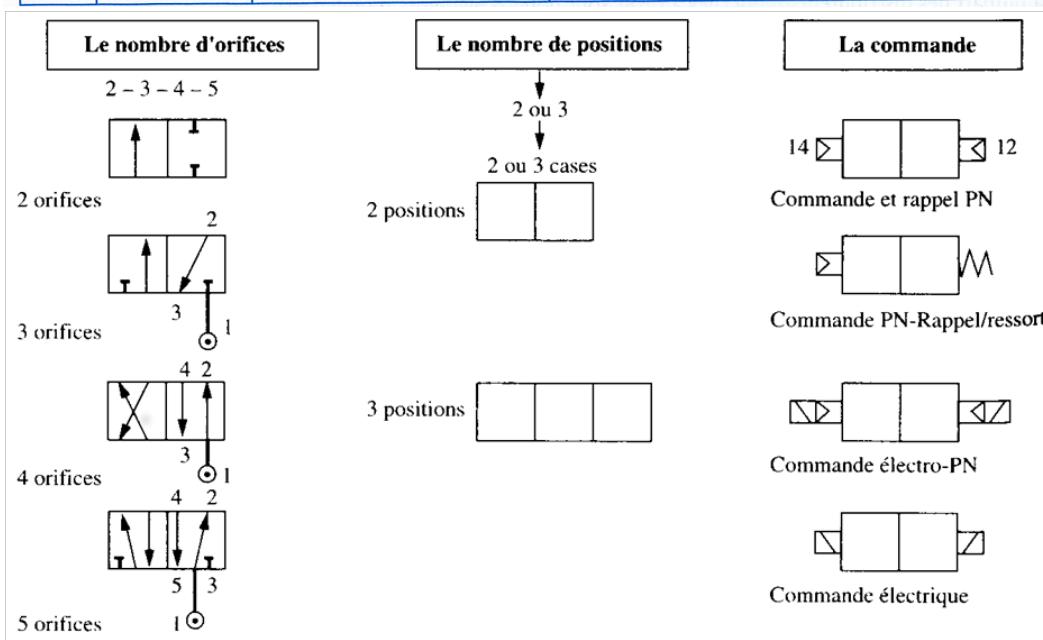
Lors de l'élaboration des schémas, il n'est pas possible de représenter le distributeur, ainsi que les autres composants, sous leurs formes commerciales. De ce fait, l'utilisation de symboles normalisés simplifie la lecture et la compréhension des systèmes. Cette représentation utilise la symbolisation par cases.

Un distributeur se représente sur les côtés droit et/ou gauche (comme dans la réalité) par des pilotages. Ils permettent au tiroir de se déplacer afin de mettre en communication les différents orifices.

### Définition Désignation

La désignation d'un distributeur permet de mettre en évidence le nombre d'orifices du distributeur, le nombre de positions, le type de commande et son état (monostable ou bistable).

TYPE	SCHÉMA	UTILISATION
2/2	Monostable	<p>Pré-actionneur pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- commander un actionneur à jet d'air (soufflette, pulvérisateur) ;</li> <li>- commander un moteur à un sens de marche ;</li> <li>- bloquer une circulation d'air en absence de signal de commande.</li> </ul>
3/2	Monostable NF	<p>Pré-actionneur pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- piloter un vérin simple effet ;</li> <li>- alimenter un venturi associé généralement à une ventouse.</li> </ul>
	Bistable	
4/2	Monostable	<p>Pré-actionneur pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- piloter un vérin double effet ;</li> <li>- piloter tout actionneur à deux sens de marche.</li> </ul>
	Bistable	
5/2	Monostable	<p>Pré-actionneur pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- piloter un vérin double effet ;</li> <li>- piloter tout actionneur à deux sens de marche.</li> </ul>
	Bistable	
5/2	Monostable Centre ouvert	<p>Ce type de distributeur permet la mise à l'atmosphère des deux chambres du vérin en l'absence de commande :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- les masses en mouvement du vérin s'arrêtent dès que toutes les inerties sont vaincues ;</li> <li>- les masses mobiles du vérin sont déplaçables à la main.</li> </ul>
	Monostable Centre fermé	<p>Ce type de distributeur permet le blocage des deux chambres du vérin en l'absence de commande :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- les masses en mouvement du vérin s'arrêtent immédiatement ;</li> <li>- les masses mobiles du vérin restent bloquées.</li> </ul>

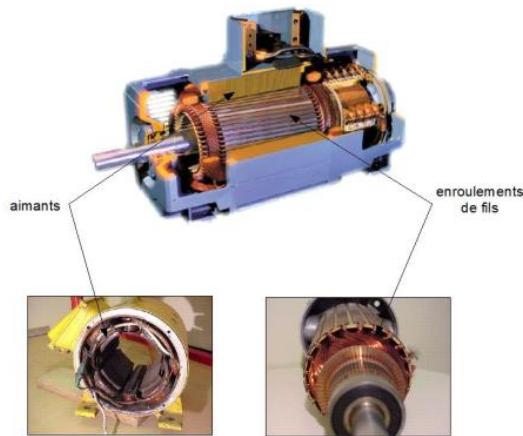


## 2 Fonction Convertir

Tous les systèmes physiques ont au moins besoin d'un actionneur pour agir sur la matière d'œuvre, cet actionneur ne crée pas d'énergie du néant, il convertit une source d'énergie primaire en énergie adaptée à l'action souhaitée. Dans

le laboratoire les actionneurs seront souvent des moteurs électriques car cette énergie est directement disponible.

## 2.1 Les moteurs électriques



Le moteur électrique est constitué d'aimants et de fils enroulés. Il se base sur la force de Laplace : tout conducteur parcouru par un courant et plongé dans un champ magnétique reçoit une force, la force de Laplace, proportionnelle à l'intensité du courant et du champ magnétique.

Un système particulier permet de faire varier tourner le champ magnétique afin de générer une force de Laplace motrice pour le mouvement de rotation.

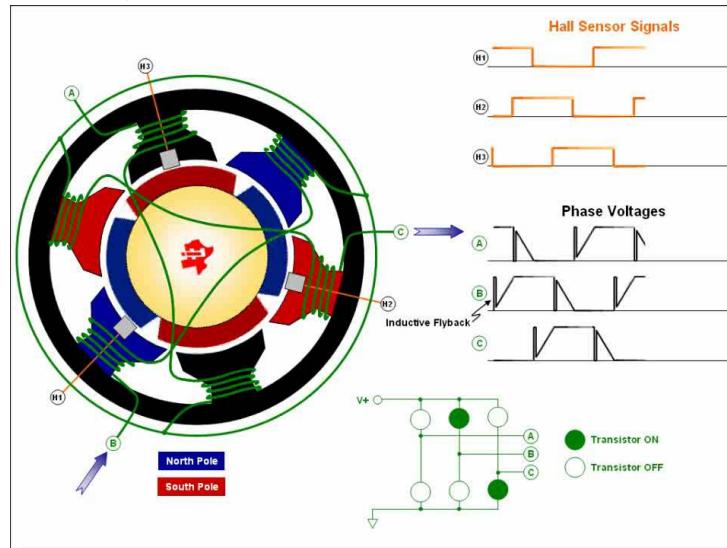
Les moteurs électriques sont des machines réversibles, il est possible de les faire tourner avec un dispositif mécanique pour récupérer une énergie électrique. On parle de fonctionnement en génératrice.

### 2.1.1 Le moteur à courant continu

Les aimants sont liés au stator (partie fixe) et les bobines qui génère le champ tournant sont liées au rotor. Un dispositif mécanique, les balais, permettent de faire tourner le champ électrique pour qu'il soit toujours moteur. Une source de tension continue est suffisante et ce moteur dispose donc de 2 fil pour l'apport en énergie. Des capteurs optionnels peuvent augmenter le nombre de connexions.

La modélisation de cet actionneur est détaillée dans un cours. On observe une proportionnalité du courant avec le couple délivré (constante de couple  $K_t$ ) et une proportionnalité de la tension de force contre électro motrice à la vitesse de rotation (constante  $K_e$ ). Lorsqu'elles sont exprimées dans un même système d'unité ces constantes sont proches ou égales.

### 2.1.2 Le moteur brushless (sans broches)



Ce moteur ne dispose pas de dispositif mécanique permettant de faire tourner le champ. Les aimants sont liés au rotor et 3 connexions permettent d'alimenter 3 paires de poles (bobines) distinctes. En alimentant la bonne paire de pole par rapport à la position du rotor (aimant) le moteur génère un couple positif (il fonctionne).

Afin de choisir la bonne paire de pole il est nécessaire de connaître la position du rotor. Un capteur ou des techniques mesurant les courants d'induction dans les phases permettent de connaître cette position afin de piloter le moteur.

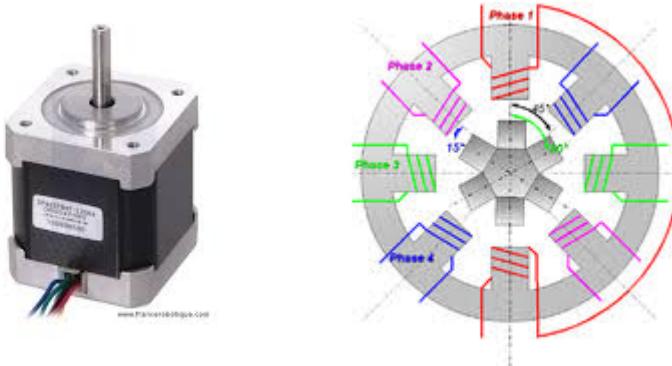
Voir variateur, section « moduler »

### 2.1.3 Le moteur asynchrone

Ce type de moteur utilise un champ magnétique dont la vitesse de rotation n'est pas synchronisée avec la vitesse de rotation. On parle de glissement. Cette machine est souvent privilégiée notamment pour les fortes puissances (ferroviaire).

Comme le moteur brushless une électronique de puissance sophistiquée est nécessaire pour un pilotage performant. Une connexion à un courant alternatif permettra cependant de la faire tourner sans pilotage.

### 2.1.4 Le moteur pas à pas



Ce moteur est proche dans son architecture du moteur brushless. Il y a en plus de poles. Les performances (puissance massique, puissance totale, efficacité énergétique) sont plus faibles mais le couple est important ce qui permet de ne pas utiliser de réducteur pour de nombreuses applications. Aussi chaque pas représente un petit incrément angulaire ce qui est intéressant pour des activités de précision (pilotage d'un télescope de hobbsite, imprimante 3D).

### 2.1.5 Actionneurs linéaires

Il est possible de faire translater un aimant en le soumettant à un champ magnétique afin de créer un actionneur linéaire. Ces actionneurs sont rapides mais l'amplitude possible et la force générées sont en général limitée. Exemple : prototype d'actionneur de soupapes pour moteurs sans distribution, prototype de suspensions intelligentes.

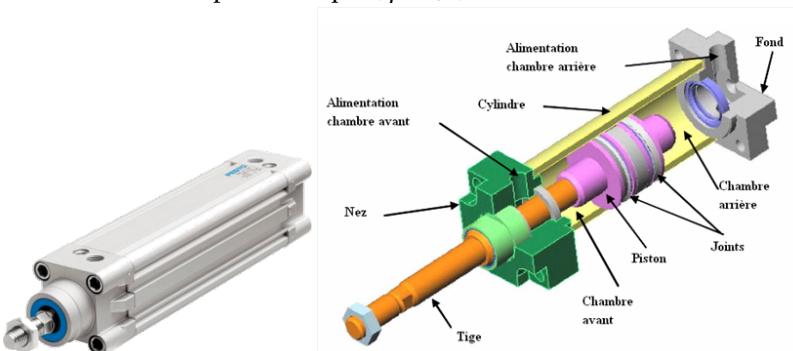
La plupart des vérins électriques utilisent en revanche un moteur électrique tournant associé à un ensemble vis-écrou

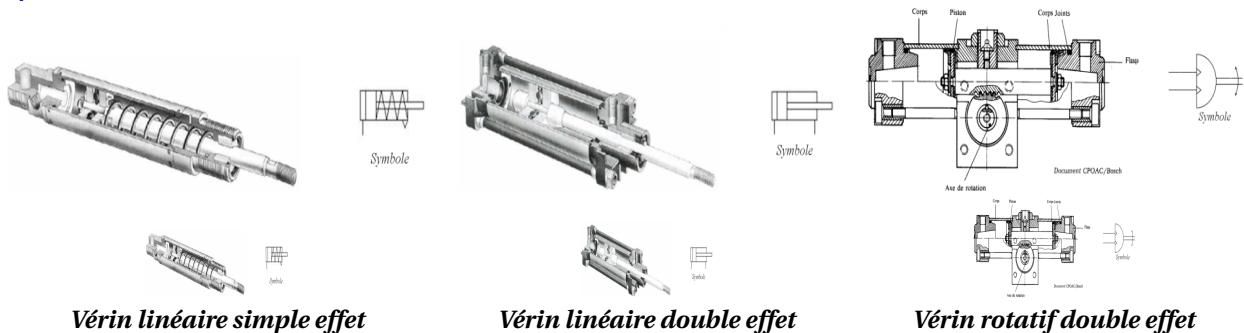
## 2.2 Convertisseurs d'énergie pneumatique ou hydraulique

Un vérin est un actionneur utilisant de l'énergie pneumatique ou hydraulique pour produire une énergie mécanique lors d'un déplacement linéaire ou rotatif limité à sa course. Le vérin permet de convertir de l'énergie pneumatique (ou hydraulique) en énergie mécanique.



Dans les deux cas le produit des deux valeurs donne une puissance, la puissance  $P \cdot Q$  pneumatique étant convertie en puissance  $F \cdot V$  mécanique. Il est à noter que le rendement de ces actionneurs est mauvais ( $\eta = 0,5$  environ) : une grande partie de l'énergie est perdue sous forme d'énergie calorifique et lors de la mise à l'échappement de l'air comprimé. En prenant en compte le rendement du compresseur ( $\eta = 0,4$ ), on obtient un rendement global très faible pour la chaîne d'action pneumatique ( $\eta = 0,2$ ).

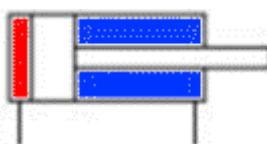




**La force** délivrée par un vérin est donnée par  $F = PS$  avec  $F$  la force en newtons,  $S$  la section du vérin en  $\text{m}^2$  et  $P$  la pression en Pascals.

**Le débit volumique** est donné par  $Q = VS$  avec  $Q$  en  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  et  $V$  la vitesse de déplacement du vérin en  $\text{m.s}^{-1}$ .

**La cylindrée** est donnée par  $C = S c$  avec  $S$  en  $\text{m}^2$  et  $c$ , la course en m.

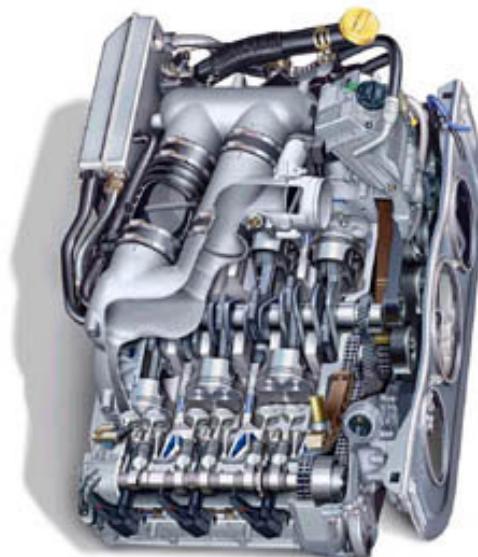


On note  $D$  le diamètre du vérin et  $d$  le diamètre de la tige.

Dans la chambre de gauche l'effort est donné par  $F_g = p_g \frac{\pi D^2}{4}$ .

Dans la chambre de droite l'effort est donné par  $F_d = p_g \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$ .

### 2.3 Moteurs thermiques



Les moteurs thermiques permettent de récupérer une énergie mécanique, en général en rotation, à partir d'une source d'énergie chimique. La combustion peut être externe comme dans une machine à vapeur. Dans un moteur traditionnel (auto bateau...) ou dans une turbine, un réacteur, la combustion est interne. Un dispositif mécanique (système bielle manivelle, ailettes) permet la récupération de l'énergie mécanique emmagasiné sous forme de pression lors de la combustion. Les combustions internes sont généralement préférées car elles diminuent les pertes par échange thermique. Pour aller plus loin : moteur 4 temps/ moteur 2 temps, cycle Diesel, cycle Beau de Rochas/Otto, moteur rotatif, distribution.

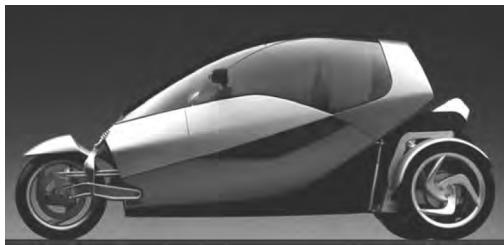
## TD 1

## Exemples de chaînes hydrauliques et pneumatiques

## Véhicule à trois roues Clever

Banque PT 2013 – SIA.

On s'intéresse au véhicule à 3 roues Clever.



Le groupe motopropulseur est placé à l'arrière du véhicule. À l'avant, l'habitacle repose sur une roue de moto et pivote par rapport au bloc arrière autour d'une liaison pilotée angulairement par le biais de deux vérins hydrauliques. L'inclinaison est contrôlée par un ordinateur de bord en fonction de l'angle au volant et de la vitesse.



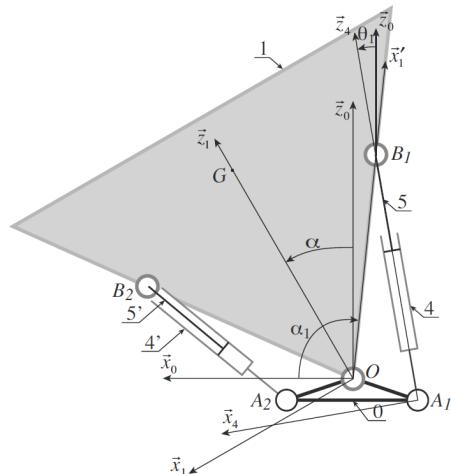
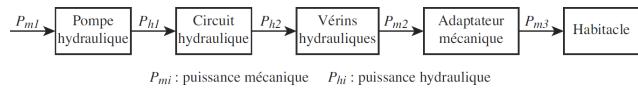
Le système d'inclinaison de l'habitacle est assuré par un système constitué :

- d'un calculateur qui détermine le mouvement et la position à donner à l'habitacle en fonction des conditions d'utilisation;
- d'un système hydro-mécanique de transmission de puissance et d'adaptation de mouvement;
- d'un système de contrôle de l'inclinaison de l'habitacle.

La chaîne de transmission de puissance et d'adaptation de mouvement est composée :

- d'une pompe à engrenages actionnée par le moteur à gaz via un système de poulies/courroie;

- d'un circuit hydraulique;
- de 2 vérins hydrauliques simple effet;
- d'un système mécanique d'adaptation de mouvement afin de transformer le mouvement de translation des tiges des vérins en rotation de l'habitacle.



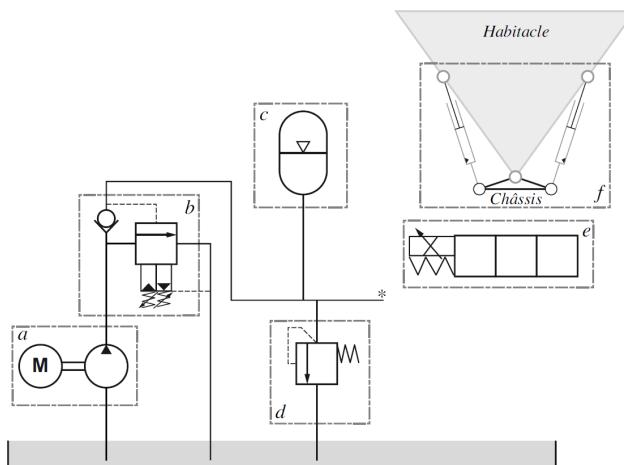
Les deux vérins hydrauliques transforment la puissance hydraulique venant du servo-distributeur afin d'incliner l'habitacle. Ceux-ci sont disposées entre l'habitacle et le châssis du module arrière de propulsion. Le calculateur autorise ou non, l'alimentation en huile de l'un des vérins provoquant la sortie de tige, pendant que l'huile s'évacue de l'autre vérin. Ainsi l'habitacle s'incline du côté opposé au vérin alimenté. Lorsque l'habitacle est en position centrale, les tiges de vérins ont en position médiane.

Le circuit hydraulique est composé de 6 modules :

- une pompe à engrenages entraînée par le moteur à gaz;
- un clapet anti-retour et une valve de décharge tarée pour s'enclencher à 160 bar et se remettre en position fermée à 100 bar;
- un accumulateur oléopneumatique de volume nominal 1,4 L;
- un limiteur de pression;
- un servo-distributeur à effet proportionnel 4/3 à centre fermé;

- deux vérins simple effet, de diamètre 32 mm pour chaque piston et de 200 mm de course.

**Question 1** Compléter le câblage du circuit hydraulique à partir du signe « \* », ainsi que le schéma du servo-distributeur.



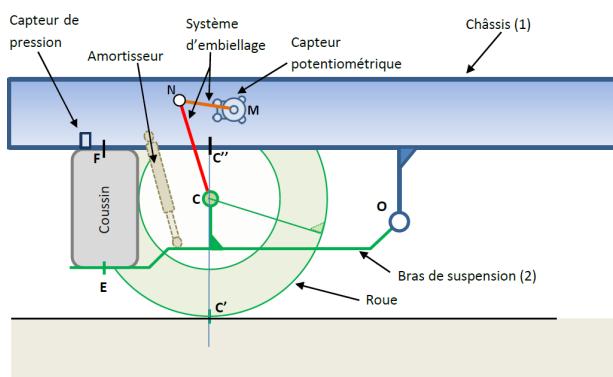
Au démarrage du véhicule, la valve de décharge du module (b) est fermée. Le distributeur à effet proportionnel(e) est en position médiane, les vérins sont donc immobiles. La commande des vérins est initialement bloquée par une temporisation.

**Question 2** En considérant les conditions initiales évoquées, expliquer, en commençant à l'instant de démarrage de la pompe, le comportement du circuit hydraulique en précisant clairement les différentes phases de fonctionnement. Quel est l'utilité de la temporisation ? On souhaite remplacer cette temporisation par un capteur. Préciser la grandeur qu'il devra mesurer. Donner un avantage et un inconvénient du remplacement de la temporisation par ce capteur.

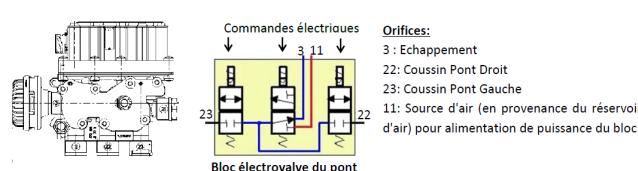
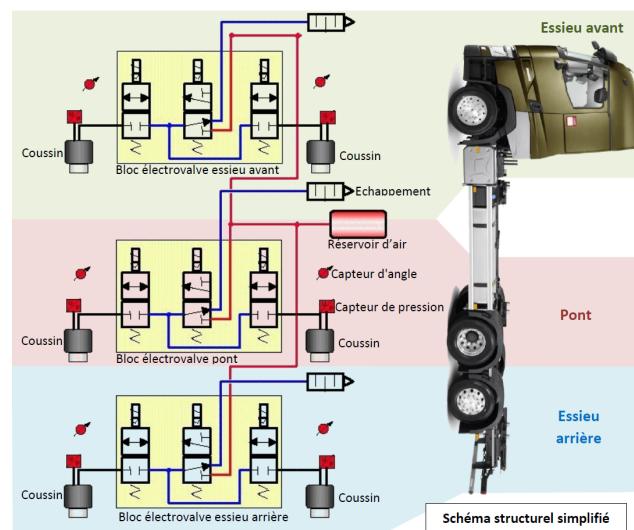
### Suspension pneumatique de véhicule de transport routier

X-ENS PSI 2016

La suspension assure la liaison élastique entre le châssis et les essieux. Elle permet principalement d'atténuer les accélérations verticales dues aux variations de profil de la chaussée, contribuant ainsi à l'amélioration du confort et à une meilleure tenue de route.



Chaque roue possède une suspension pneumatique sur coussin pilotée par des électrovanne, en fonction de données mesurées par des capteurs de pression et des capteurs de position. Un calculateur envoie des commandes électriques aux électrovanne en fonction des besoins.



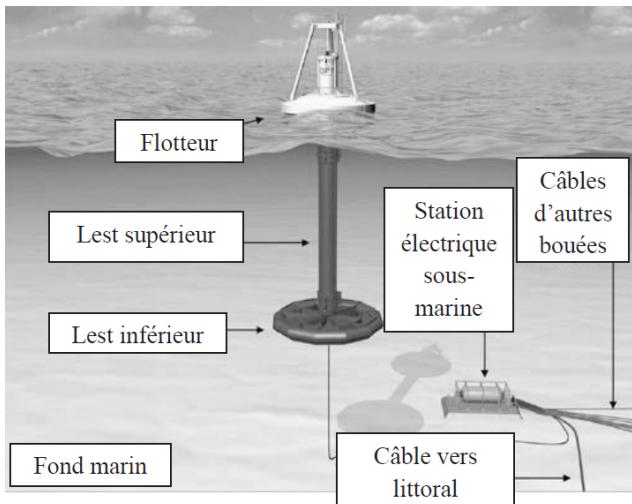
Lorsque le niveau mesuré est inférieur à la valeur de consigne (niveau du châssis par rapport au sol), l'électrovalve est commandée de manière à provoquer le gonflage des coussins. Lorsque le niveau a dépassé la consigne, on commande la vidange des coussins.

**Question 3** Représenter les trois distributeurs dans la situation de gonflage, puis dans la situation de vidange des coussins.

### Bouée houlomotrice

CCP PSI 2016.

L'énergie produite à partir de la houle est appelée houlomotrice (ou énergie des vagues). Cette énergie est le plus souvent transformée en énergie électrique.



Le système de conversion d'énergie est schématisé sur la figure suivante.

Le vérin hydraulique est entraîné par le mouvement relatif de translation entre le flotteur et le lest. La translation du piston par rapport au cylindre du vérin est donc également paramétrée par le déplacement  $z(t)$  par rapport à la position d'équilibre. La section utile du piston est notée  $S_p$ . Les pressions dans les chambres supérieure et inférieure du vérin sont notées respectivement  $P_1$  et  $P_2$ .

Un réservoir accumulateur haute pression (a) et un réservoir accumulateur basse pression (b) permettent de maintenir les pressions  $P_a$  (pression d'admission du

moteur hydraulique) et  $P_b$  (pression de refoulement du moteur hydraulique) quasi-constantes en régime établi.

Un ensemble de clapets anti-retour permet de générer un débit volumique unidirectionnel  $Q_m(t)$  vers le moteur hydraulique, quel que soit le sens de déplacement du piston. Les pertes induites par ce circuit redresseur seront négligées. On pourra alors considérer en régime établi, et en première approximation, les relations suivantes entre les pressions dans les réservoirs et dans les chambres du vérin :  $P_a = \max(P_1, P_2)$  et  $P_b = \min(P_1, P_2)$ .

**Question 4** Compléter les zones en pointillés du schéma hydraulique en dessinant les clapets anti-retour conformément à la description précédente.

