

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohammed Seddik BENYAHIA- Jijel



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Automatique

Notes de cours : Dr. Boubakir Ahsene

Module : Actionneurs

e-mail : ah_boubakir@yahoo.fr

Licence 3 : Automatique

2015-2016

Avant propos

Pour transmettre les ordres du contrôleur au système à commander, nous avons besoin généralement d'un élément de transmission de puissance appelé **actionneur**. Cet organe sert à convertir de l'énergie d'une forme en une autre pour agir sur le système à commander. L'actionneur peut être du type électrique (moteur électrique), hydraulique (vérin hydraulique pour les déplacements linéaires ou moteur hydrauliques pour les mouvements de rotation) ou pneumatique (vérin pour les déplacements linéaire ou moteur pneumatique pour les déplacements de rotation). Le choix d'un actionneur dépend de plusieurs paramètres. En général, l'effort utilisé dicte un tel choix.

Ce cours a pour objectif de permettre aux apprenants d'acquérir les connaissances nécessaires au choix des actionneurs pneumatiques, hydrauliques et électriques. Il leur permettra aussi de comprendre les enjeux et les solutions disponibles dans le domaine des actionneurs en automatismes industriels.

Références bibliographiques

1. S. Bensaid, Cours capteurs et actionneurs, Université de Bouira, Algérie.
2. Les préactionneurs et les actionneurs pneumatiques, www.gecif.net.
3. http://jjmarch.fr/cours/cours_systeme/systeme_automatise.html.
4. B. Schneider et M. Etique, Motorisation et commande des machines, Institut d'Automatisation Industrielle.
5. F. Sincère, Electrotechnique, <http://fabrice.sincere.pagesperso-orange.fr/electrotechnique.htm>.
6. C. Bissieres, physique appliquée, <http://cbissprof.free.fr>.
7. M. Halbert, hydraulique, équipe du GRF maintenance véhicules/engins, Académie Maritime.
8. X. Pessoles, Analyse des systèmes pluritechniques et multiphysiques – Initiation à l'ingénierie système, Sciences Industrielles de l'Ingénieur.
9. http://www.ile-reunion.org/louispayen/cours/moteur_pas_a_pas.htm
10. Y. Morel, la machine à courant continu, notes de cours.
11. <http://www.moteurindustrie.com/moteurs-pas-a-pas.html>.

Table des matières

1. Généralités sur les actionneurs	1
1.1. Introduction	1
1.2. Actionneurs	3
1.3. Classification des actionneurs	4
1.4. Les familles des actionneurs	5
1.4.1. Actionneur pneumatique	5
1.4.2. Actionneur hydraulique	6
1.4.3. Actionneur électriques	6
1.5. Mode de fonctionnement des actionneurs	7
1.5.1. Mode tout ou rien	7
1.5.2. Mode contrôlé en vitesse	8
1.5.3. Mode réglé en vitesse	9
1.5.4. Mode servomoteur- réglé en position	9
1.5.5. Mode pas à pas	10
1.6. Préactionneurs	10
2. Actionneurs électriques.....	12
2.1. Introduction	12
2.2. Rappel sur l'électromagnétisme	12
2.3. Les actionneurs électriques les plus utilisés	17
2.4. Moteur à courant continu	17
2.4.1. Principe de fonctionnement	19
2.4.2. Lecture d'une plaque signalétique	21
2.4.3. Modèle électrique d'une machine à courant continu	21
2.4.4. Quelques considérations pour le moteur à courant continu	24
2.5. Moteur pas à pas	25
2.5.1. Le domaine d'application des moteurs pas à pas	25
2.5.2. Principe de fonctionnement	26
2.5.3. Constitution d'un moteur pas à pas	27
2.5.4. Le moteur pas à pas à aimant permanent	29

2.5.5. Moteur pas à pas à réluctance variable.....	31
2.5.6. Le moteur pas à pas hybride.....	32
2.6. Le moteur asynchrone	33
2.6.1. Généralités et utilisations	33
2.6.2. Symboles	33
2.6.3. Rappels sur le réseau triphasé	34
2.6.4. Principe de fonctionnement.....	35
2.6.5. Constitution du moteur asynchrone triphasé	36
2.6.6. Plaque signalétique.....	38
2.6.7. Caractéristiques	38
2.6.8. Bilan des puissances pour un moteur asynchrone	39
2.7. Le moteur synchrone	40
2.7.1. Définition	41
2.7.2. Domaines d'emploi	41
2.7.3. Constitution	41
2.7.4. Principe de fonctionnement.....	42
2.7.5. Symbole.....	42
2.7.6. Lecture de la plaque signalétique d'une machine synchrone.....	42
2.7.7. Bilan des puissances.....	43
3. Actionneurs pneumatiques et hydrauliques	44
3.1. Introduction	44
3.2. Pneumatique Vs. Hydraulique	44
3.3. Actionneur pneumatique.....	45
3.3.1. Forces et l'air comprimé	46
3.4. Vérin pneumatique.....	48
3.4.1. Constitution d'un vérin.....	49
3.4.2. Fonctionnement d'un vérin pneumatique	49
3.4.3. Différents types de vérins.....	50
3.4.4. Principe de réalisation	51
3.5. Distributeurs (modulateurs) d'énergie	52
3.6. Différents types de distributeurs.....	53
3.6.1. Distributeur deux voies	53
3.6.2. Distributeur quatre ou cinq voies	53

3.6.3. Principe de la symbolisation	53
3.7. Le générateur de vide ou venturi	55
3.8. Actionneur hydraulique	57
3.8.1. Vérin hydraulique	57
3.8.2. Fonctionnement du vérin double effet.....	58
Annexe	
Travaux dirigés 1	60
Travaux dirigés 2.....	62
Travaux dirigés 3.....	64

CHAPITRE 1

Généralités sur les actionneurs

1.1. Introduction

La conception d'un **système automatisé** permet la réalisation des tâches complexes ou dangereuses pour l'homme, elle aide aussi l'être humain à réaliser des tâches répétitives et de gagner en efficacité et en précision. Pour un système automatisé, l'homme n'intervient que dans la programmation du système et dans son réglage afin d'obtenir des bonnes performances.

Nous pouvons définir **l'automatique** comme la discipline scientifique permettant d'analyser les systèmes automatisés et de choisir/concevoir/réaliser la commande des systèmes en général. Cette discipline a pour fondements théoriques les mathématiques, la théorie du signal et de l'informatique. L'automatique permet à l'opérateur de contrôler un système en respectant un cahier des charges (rapidité, dépassement, stabilité...). La commande des systèmes peut se faire soit en **boucle ouverte** soit en **boucle fermée**.

Commande en boucle ouverte : la commande est élaborée sans l'aide de la connaissance des grandeurs de sortie du système à piloter (il n'y a pas de feedback).

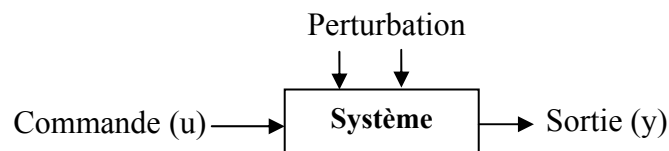


Figure 1.1. Système de commande en boucle ouverte (**BO**).

Comme le signal de commande (entrée) est indépendant du signal de sortie, la valeur obtenue en sortie peut être très différente de la valeur souhaitée lorsqu'une perturbation extérieure intervient sur le système, pour cela la commande en boucle ouverte est moins performante par rapport à la commande en boucle fermée.

Pour améliorer la stabilité et les performances de la commande que ce soit en régime transitoire (rapidité) ou en régime permanent (précision), il est indispensable d'observer les sorties du système pour les comparer à la sortie désirée. Cette structure de commande est connue sous le nom de **commande en boucle fermée**. La loi de commande est alors fonction de la consigne (la valeur désirée) et de la sortie.

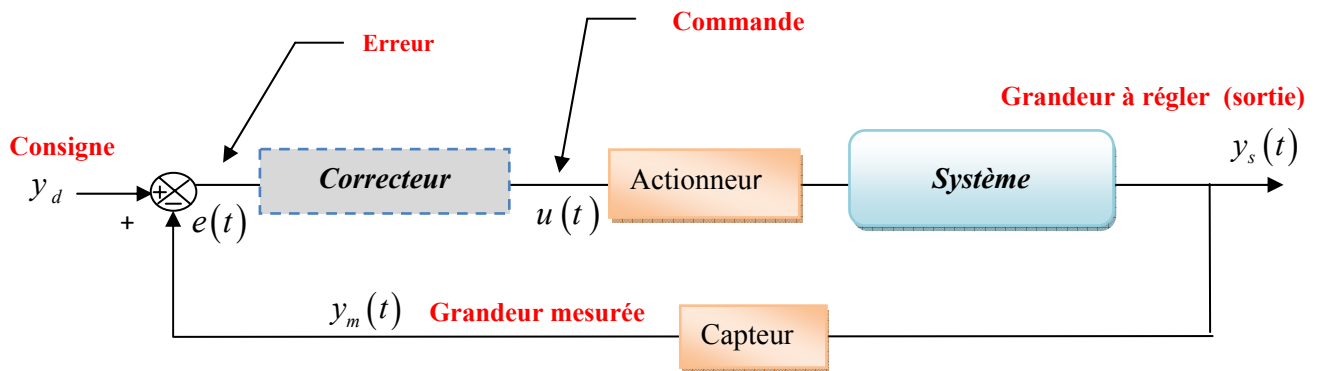


Figure 1.2. Système de commande en boucle fermée (BF).

La boucle de commande en boucle fermée est constituée de :

Correcteur : son rôle est d'élaborer à partir du signal d'erreur $e(t)$ la valeur du signal de commande $u(t)$;

Actionneur : Cet organe apporte de l'énergie au système afin de produire l'effet souhaité ;

Capteur : Son rôle est de prélever sur le système la grandeur asservie et la transforme en un signal compréhensible par le contrôleur.

Actionneur : C'est l'organe d'action qui apporte l'énergie au système pour produire l'effet Souhaité. Il transmet les ordres du correcteur au système à commander ;

Régulation et asservissement:

Régulation : Pour une structure de commande en boucle fermée, nous parlons d'une régulation lorsque l'objectif de commande est de maintenir la sortie du système constante, conformément à la consigne et indépendamment des perturbations (ex : climatiseur, régulation de température...).

Asservissement : Nous parlons de l'asservissement lorsque la consigne (la sortie désirée) est variable dans le temps (position : asservissement de position).

Exemples:

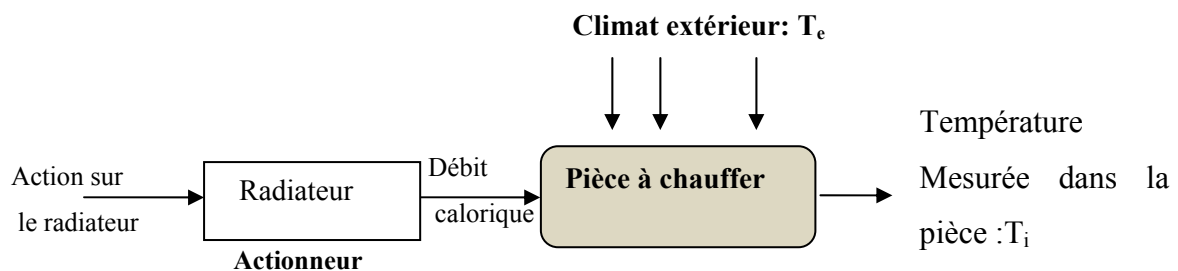


Figure 1.3. Commande de température en boucle ouverte (BO).

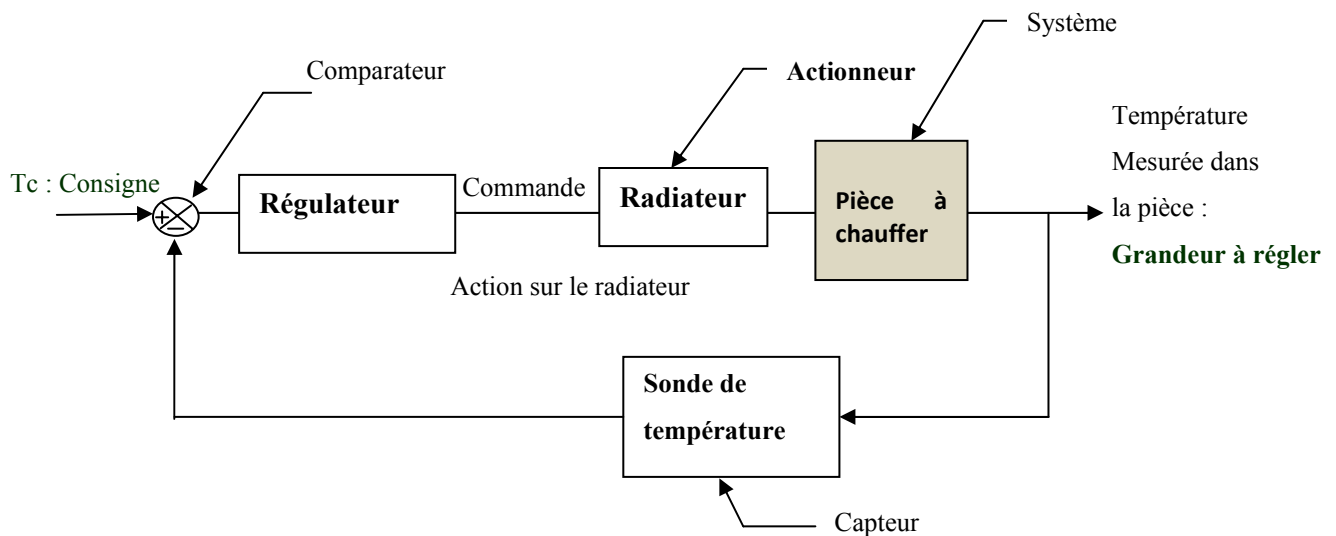


Figure 1.4. Commande de température en boucle fermée (BF).

Remarque : Notons que l'élément « **actionneur** » est nécessaire que ce soit en boucle ouverte ou en boucle fermée.

1.2. Actionneurs

Un actionneur est un objet technique utilisé pour convertir l'énergie d'entrée d'une forme en une autre forme en sortie afin d'agir sur le système à commander. Il peut être du type électrique (moteur électrique), hydraulique (vérin ou moteur hydraulique), pneumatique (vérin ou moteur hydraulique).

Dans une boucle de commande, le contrôleur compare la valeur réelle de sortie donnée par le capteur à la valeur désirée et puis ajuste le signal de commande. L'actionneur convertit le signal de commande en une quantité physique pour lancer un mouvement, réglant de ce fait la variable commandée.

Un actionneur peut convertir une énergie d'entrée disponible sous une certaine forme (électrique, hydraulique...), en une énergie utilisatrice sous une forme différente (mécanique...).

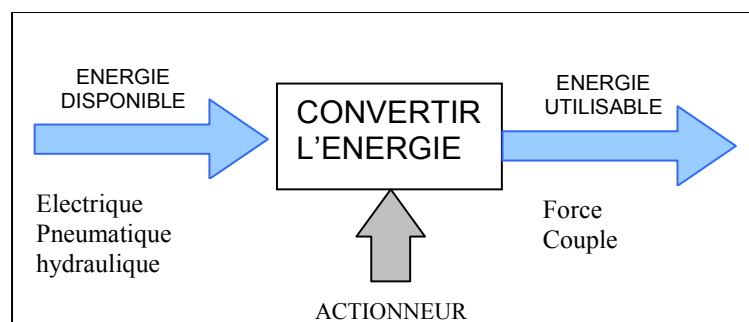


Figure 1.5. Représentation fonctionnelle d'un actionneur.

Un actionneur peut être décomposé en deux modules séparés : l'amplificateur de signal et le transducteur. L'amplificateur convertit le signal de commande (de basse puissance) en signal de puissance élevée transmise au transducteur ; ce dernier convertit l'énergie du signal de commande amplifié en travail.

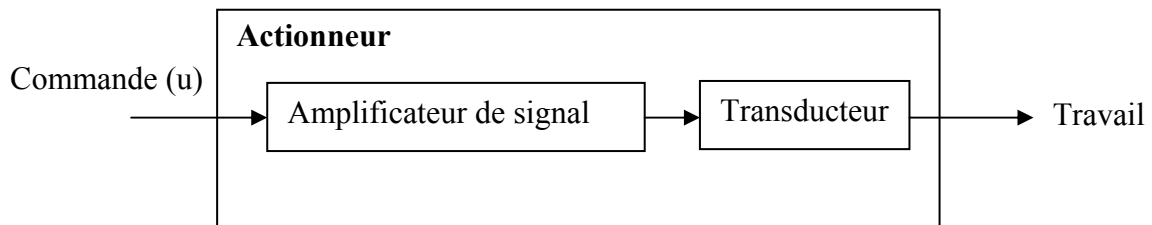


Figure 1.6. Structure interne d'un actionneur.

1.3. Classification des actionneurs

La classification des actionneurs peut se faire selon plusieurs critères, entre autre : l'énergie utilisé, phénomène physique utilisable, principe mis en oeuvre, la mobilité ou non de l'énergie convertie.

A. Énergie utilisé

Pneumatique ; hydraulique (eau ou huile); électrique ; mécanique ; combustible fossile.

B. Phénomène physique utilisable

Déplacement ou freinage, froid, chaleur, lumière, son.

C. Principe mis en oeuvre

Les effets et les propriétés physiques utilisés dans la conception des actionneurs sont nombreux :

Actionneur pneumatique : pour ce genre d'actionneurs les propriétés de compression et de délitation sont utilisées dans la conception.

Actionneur hydraulique : on utilise la propriété d'incompressibilité du fluide.

Actionneur électrique : parmi les principes et propriétés utilisés nous pouvons citer : effet joule, effet magnétique, effet piézoélectrique, électroluminescence.

D. Mobilité ou non de l'énergie convertie

Selon ce critère, nous pouvons classer les actionneurs en deux familles :

Actionneur dynamique : pour ce type d'actionneur l'énergie convertie est mécanique, ce qui permet de mobilités en translation (avec des forces) ou en rotation (avec des couples).

Actionneur statique : l'énergie convertie et sans mobilité comme une résistance ou une lampe.

	NOM	Energie d'entrée		Energie de sortie	
		Nature	Forme	Nature	Forme
Dynamique	• Vérin pneumatique	• Pneumatique	• Débit d'air + pression	• Mécanique	• Mvt de translation
	• Vérin hydraulique	• Hydraulique	• Débit d'huile + pression	• Mécanique	• Mvt de translation
	• Vérin électrique	• Electrique	• Tension	• Mécanique	• Mvt de translation
	• Electro-aimant à noyau plongeur	• Electrique	• Tension	• Mécanique	• Mvt de translation
	• Moteur électrique	• Electrique	• Tension	• Mécanique	• Mvt de rotation
	• Moteur hydraulique	• Hydraulique	• Débit d'huile + pression	• Mécanique	• Mvt de rotation
	• Moteur pneumatique	• Pneumatique	• Débit d'air + pression	• Mécanique	• Mvt de rotation
Statique	• Résistance	• Electrique	• Tension continu ou Alternative	• Thermique	• Conduction+rayonnement
	• Lampe	• Electrique	• Tension continu ou alternative	• Thermique	• Conduction+rayonnement

Tableau 1.1. Actionneurs dynamiques et statiques.

1.4. Les familles des actionneurs

Les actionneurs les plus utilisés peuvent être classés en trois catégories, à savoir : actionneur pneumatique, actionneur hydraulique et actionneur électrique.

1.4.1. Actionneur pneumatique

Ces actionneurs peuvent soulever, pousser, tirer, serrer, tourner, bloquer, percuter, abloquer. Ils sont utilisés généralement dans les applications qui nécessitent des mouvements séquentiels simples. Son principe de fonctionnement consiste à convertir une énergie d'entrée pneumatique en énergie utilisatrice mécanique. Il existe des actionneurs pneumatiques linéaires ou vérins et des actionneurs pneumatiques rotatifs. La classification des actionneurs pneumatiques tient compte du mode d'action de la tige : simple effet ou double effet.

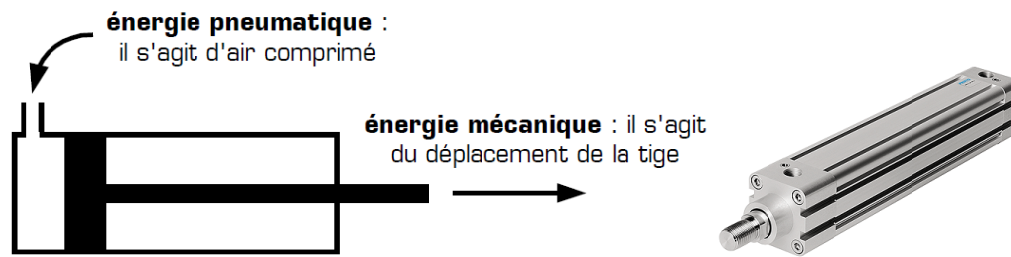


Figure 1.7. Exemple d'un actionneur pneumatique: vérin pneumatique.

1.4.2. Actionneur hydraulique

Ces actionneurs trouvent leur utilité dans les mouvements qui exigent des forces très élevées à faible vitesse. Leur principe de fonctionnement consiste à convertir une énergie d'entrée hydraulique (débit d'huile + pression) en énergie utilisatrice mécanique. Une pompe électrique fournit de l'huile à l'actionneur via des tuyaux. L'actionneur est équipé d'une canalisation de retour sert à récupérer l'huile qui s'échappe lors du fonctionnement et la ramener vers la pompe après filtrage et refroidissement éventuel. Nous pouvons trouver les actionneurs hydrauliques comme des vérins linéaires ou des moteurs rotatifs.

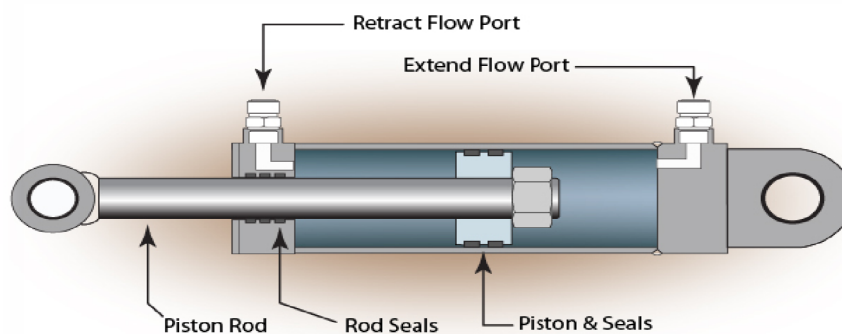


Figure 1.8. Exemple d'un actionneur hydraulique

1.4.3. Actionneur électrique

Ces actionneurs sont simples à mettre en œuvre et trop sollicités dans les applications qui exigent des mouvements rotatifs et linéaires. Leur principe de fonctionnement consiste à convertir une énergie d'entrée électrique en énergie utilisatrice mécanique. Ils sont convenables pour les applications à forte dynamique et grande précision. La diversité de technologie de ce type d'actionneurs, leur simplicité de commande leur ont permis de pénétrer facilement au monde industriel. De plus, l'énergie électrique est facile à utiliser et se prête facilement aux commandes et réglages automatiques.



Figure 1.9. Exemple d'un actionneur électrique : Moteur à courant continu.

Type de l'actionneur	Avantages	Désavantage
Pneumatique	Vitesse de fonctionnement élevée ; disponibilité d'air ; n'exige aucune canalisation de retour ; propre ; peut être utilisé dans un milieu explosif ; robuste ; relativement moins cher.	La compressibilité d'air entrave la commande de vitesse ; moins précis ; l'échappement crée le bruit ; exige le séchage additionnel et le filtrage.
Hydraulique	Vitesses de fonctionnement modérées ; fonctionnement doux à de basses vitesses ; supporter les charges lourdes ; rapport élevé de puissance-à-poids ; l'incompressibilité du fluide aide à réaliser une commande précise ; robuste ; réponse rapide ; inflammable et peut être utilisé dans un milieu explosif.	Fuites par des joints ; exige la canalisation de retour et la source d'énergie à distance, difficile à miniaturiser en raison de la haute pression et débit; cher.
électrique	Réponse rapide et précise, commande simple, faciles à mettre en application dans des conceptions modulaires et nouvelles; relativement pas cher.	Il peut créer des dégâts dans des secteurs inflammables à cause de l'arc électrique; surchauffe une fois calé ; exige des freins pour se bloquer.

Tableau 1.2. Comparaison des actionneurs pneumatiques, hydrauliques et électriques.

1.5. Mode de fonctionnement des actionneurs

1.5.1. Mode tout ou rien

Pour ce mode, l'actionneur est connecté à une alimentation électrique de tension et fréquence constantes ou à une alimentation pneumatique (ou hydraulique) de pression constante. Quand il est alimenté, son fonctionnement (vitesse de déplacement ou de rotation) est dépend, plus de son alimentation, de ses caractéristiques et de la charge (frottements, couple d'usinage, etc). Sans

alimentation, l'actionneur ne produit aucune force ou couple et se laisse entraîner par la charge. Pour ce mode, la commande de l'actionneur est simple à réaliser, via un distributeur pour les actionneurs pneumatiques (ou hydrauliques) ou par un interrupteur pour les actionneurs électriques. Ce mode de fonctionnement est très utilisé pour les pompes, les ventilateurs et outils d'usinage et dans d'autres applications comme les ascenseurs et les convoyeurs. Le fonctionnement tout ou rien est généralement économique. Néanmoins, il ne permet aucune adaptation à la charge entraînée.

1.5.2. Mode contrôlé en vitesse

Avec ce mode il est possible de varier continûment la vitesse de l'actionneur (au moins dans une certaine plage, par exemple de 20% à 100% de la vitesse nominale) en ajustant la pression hydraulique ou pneumatique de son alimentation, la tension ou la fréquence pour le cas d'une alimentation électrique. Puisque la commande de vitesse se fait en boucle ouverte avec ce mode, la vitesse reste plus ou moins dépendante de la charge à manipuler.

Ces actionneurs sont similaires à ceux utilisés en mode tout ou rien. Néanmoins, leur commande (en boucle ouverte) nécessite des servovalves ou des variateurs de tension et de fréquence.

Exemple : Actionneur électrique

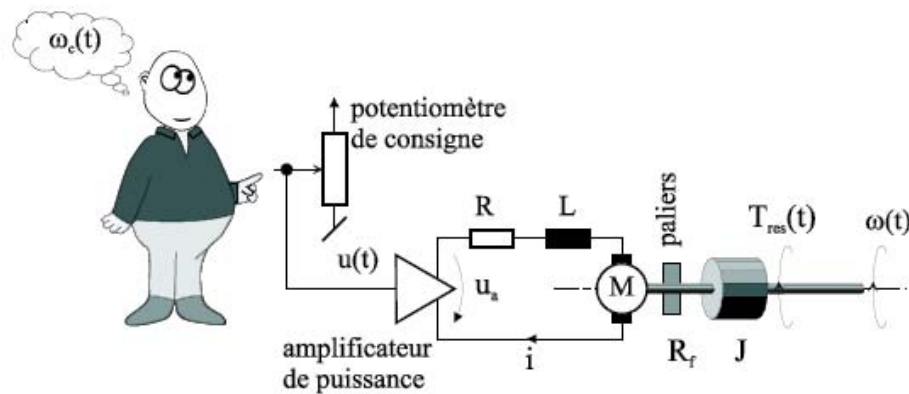


Figure 1.10. Principe de commande de vitesse en boucle ouverte.

Pour commander la vitesse $\omega(t)$, l'opérateur choisit une valeur de tension $u(t)$ en fonction de la vitesse désirée $\omega_c(t)$.

Ce mode est convenable pour les applications où on veut commander approximativement la vitesse. Néanmoins, ce mode ne permet pas de piloter la vitesse avec précision et indépendamment de la charge.

1.5.3. Mode réglé en vitesse

Pour ce mode, la vitesse est commandée en boucle fermée, ce qui permet de forcer la vitesse de l'actionneur à suivre la vitesse désirée avec une très bonne précision et ceci indépendamment de la charge manipulée.

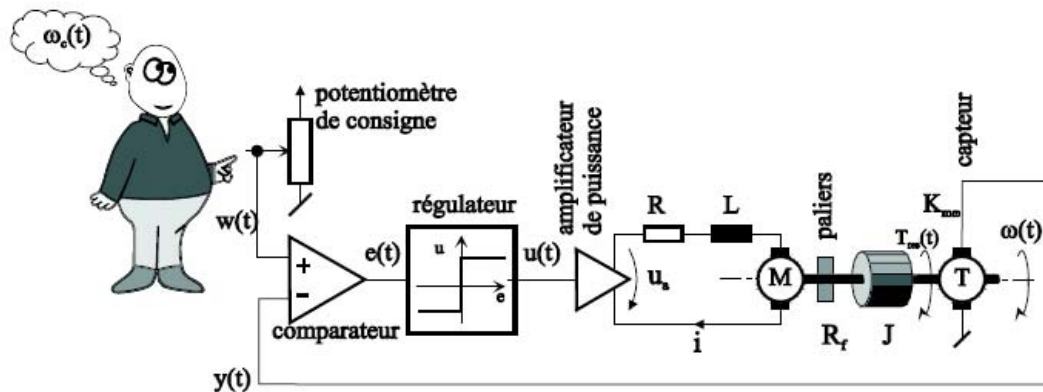


Figure 1.11. Principe de commande de vitesse en boucle fermée.

Ce mode est performant mais nécessite un personnel qualifié pour la conception et l'ajustage du régulateur et relativement coûteux à cause du capteur et de son câblage.

1.5.4. Mode servomoteur- réglé en position

En utilisant un capteur de position, il est possible de forcer l'actionneur de faire des déplacements point à point, de s'arrêter dans des positions très précises et de suivre une trajectoire préalablement choisie.

Les actionneurs ou moteurs fonctionnent avec ce mode sont appelés servomoteurs et leur commande requiert un servo amplificateur (ou servo variateur).

Un servomoteur peut être défini comme un moteur électrique amélioré, telle que la rotation de l'axe de sortie est paramétrable. C'est à dire que l'axe de sortie du servomoteur peut s'arrêter sur une position prédéterminée et de rester ensuite sur cette position.



Figure 1.12. Servomoteurs miniatures.

Ce mode permet de maîtriser bien les mouvements de l'actionneur et le rend flexible. Cependant, la conception de la commande en position n'est pas facile et l'équipement nécessaire est un peu cher.

1.5.5. Mode pas à pas

Ce mode combine en même temps le mode tout ou rien et le mode servomoteur. L'actionneur est alimenté par une succession d'impulsions. Il avance d'une petite distance appelé pas ou incrément pour chaque impulsion. Telle que, la distance parcourue est dépende directement du nombre d'impulsions reçues et la vitesse dépend de la fréquence des impulsions.

Ce type d'actionneurs permet de contrôler la position sans faire recours à un capteur et sans régulateur. Généralement les moteurs pas à pas sont utilisés pour les mouvements rotatifs, mais ils peuvent être utilisés aussi pour les mouvements linéaires.

Ces type d'actionneurs est de structure simple mais limités en puissance et en vitesse et de précision moyenne.

1.6. Préactionneurs

Les préactionneurs sont des objets techniques permettent de distribuer de l'énergie de puissance aux actionneurs sur l'ordre de la partie de commande. La majorité des préactionneurs fonctionnent en mode dits « tout ou rien », c'est-à-dire que : soit ils empêchent l'énergie d'alimentation d'aller vers l'actionneur soit ils laissent passer tout le flux d'énergie disponible vers l'actionneur. Parmi les préactionneurs (tout ou rien) : les contacteurs électromagnétiques (les relais) et les distributeurs pneumatiques.

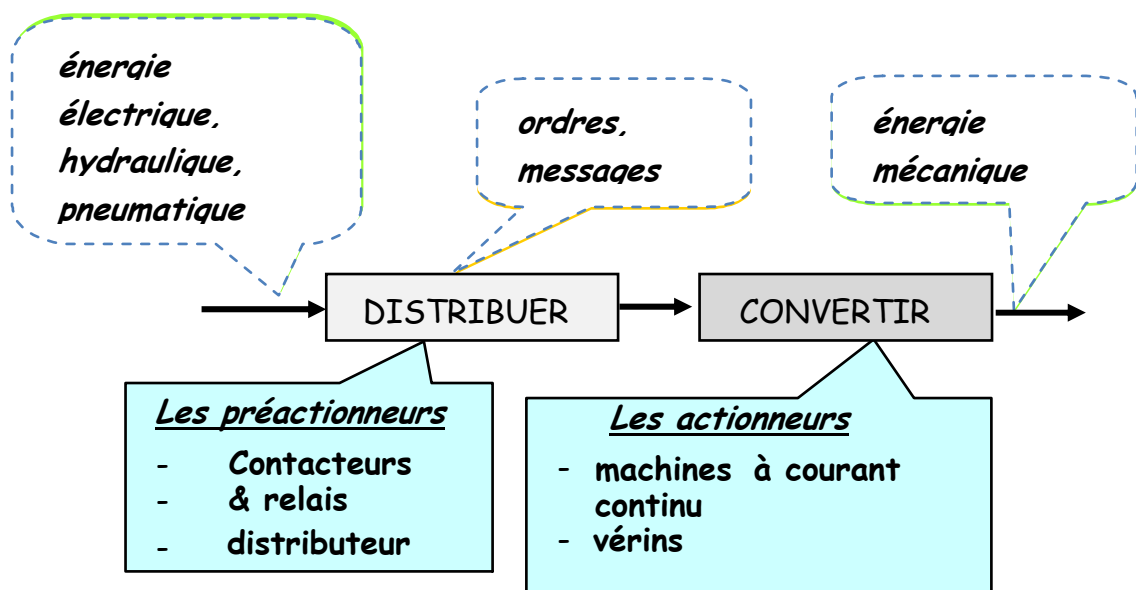


Figure 1.13. Fonction d'un pré-actionneur.

Selon le critère de stabilité, il existe deux types d'actionneurs :

Un actionneur monostable : on parle d'un actionneur monostable, s'il nécessite un ordre pour passer de sa position repos à sa position travail et il revient automatiquement à sa position repos lorsque l'ordre disparaît : donc il est stable uniquement dans sa position repos.

Exemples de préactionneurs monostables : un bouton poussoir, un relais électromagnétique

Un actionneur bistable : on parle d'un actionneur bistable s'il nécessite un ordre pour passer de sa position repos à sa position travail, il restera ensuite dans cette position à la disparition de cet ordre. Il ne peut regagner sa position repos que s'il reçoit un nouvel ordre : il est stable dans la position repos et la position travail.

Exemples de préactionneurs bistables : un interrupteur, un télérupteur

CHAPITRE 2

Actionneurs électriques

2.1. Introduction

Les actionneurs électriques sont conçus généralement à base des moteurs électriques, à courant continu ou alternatif. Ce type d'actionneurs est très sollicité dans le monde industriel à cause de leur simplicité à mettre en œuvre et la disponibilité de l'énergie électrique. Il existe deux types d'actionneurs électriques : les actionneurs linéaires et les actionneurs rotatifs. Les actionneurs linéaires utilisés pour générer des mouvements de translation ; quant aux actionneurs rotatifs, ils produisent des rotations par rapport à un axe. Le principe de fonctionnement est le même pour les deux type, cependant les actionneurs rotatifs sont les plus courants.

2.2. Rappel sur l'électromagnétisme

Le fonctionnement des actionneurs électriques, que ce soit linéaires ou rotatifs, repose sur trois principe généraux de l'électromagnétisme.

A.1^{er} principe - Induction magnétique

En 1819 le savant danois Oersted découvrit qu'un conducteur rectiligne parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique dans l'espace qui l'entoure capable de faire dévier l'aiguille d'une boussole. Le champ magnétique est d'autant plus fort que l'intensité du courant est importante et que la ligne de force est proche du conducteur. La relation entre l'induction magnétique $\vec{B}$ (en tesla T), le courant $\vec{I}$ et le rayon $\vec{r}$ est donnée par

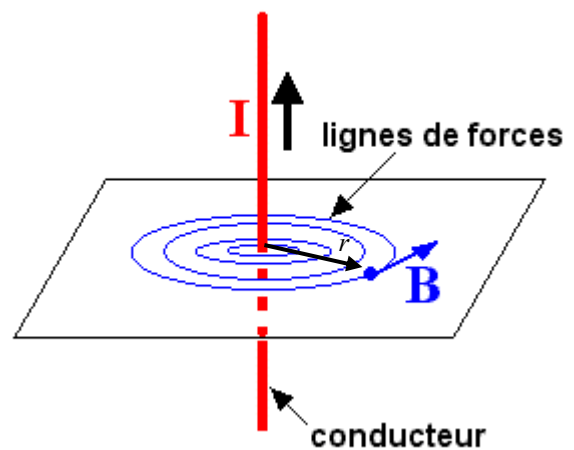


Figure 2.1. Induction magnétique.

$$\vec{I} = \frac{2\pi}{\mu} \vec{r} \wedge \vec{B} \quad (2.1)$$

Notons que l'induction est orientée selon la règle du tire-bouchon (**pouce** - sens du **vecteur champ magnétique**, index ou les **quatre doigts autre que le pouce** - sens du **courant**). Lorsque les trois vecteurs sont perpendiculaires deux à deux, nous obtenons

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (2.2)$$

I est l'intensité du courant en [A] ; la distance entre le point considéré et le conducteur en [m] ;
est μ la perméabilité magnétique du matériau considéré.

Induction magnétique dans une spire

Nous appelons un conducteur en forme de boucle une "spire". Le champ magnétique qui apparaît autour du conducteur est concentré à l'intérieur de la spire. Le sens du vecteur induction B est déterminé par la règle connue par le nom "tire-bouchon".

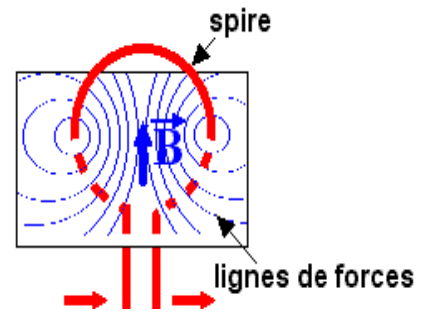


Figure 2. 2. Induction magnétique dans une spire.

L'induction dans la spire est en fonction de son diamètre D et de l'intensité I du courant qui parcourt la spire,

$$B = \frac{\mu \cdot I}{D} \quad (2.3)$$

Induction magnétique dans un solénoïde

Un solénoïde est un conducteur électrique enroulé en forme de ressort et communément appelé "bobine". Une bobine se compose de spires très proches les unes des autres. L'induction B à l'intérieur de la bobine est proportionnelle au nombre de spires qu'elle contient mais elle est inversement proportionnelle à la longueur de la bobine :

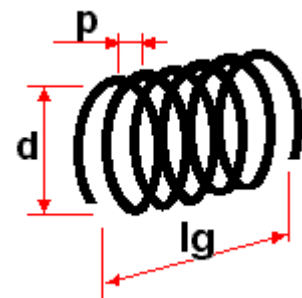


Figure 2.3. Induction magnétique dans un solénoïde.

$$B = \mu \frac{N \cdot I}{lg} \quad (2.4)$$

Où, N représente le nombre de spires ; lg : la longueur de la bobine en m ; I : l'intensité du courant électrique en A.

Un barreau ferromagnétique entouré par une bobine et parcouru par un courant pour se comporter comme un aimant. C'est le principe des électro-aimants utilisés dans les électrovannes et les relais.

B. 2^{ème} principe – force électromagnétique

Un conducteur placé dans **un champ magnétique** et parcouru par **un courant**, subit une force appelée **force de Laplace**. Cette force est perpendiculaire à la direction du courant et celle du champ magnétique. Le sens de cette force est déterminé par la règle des trois doigts de la main droite.

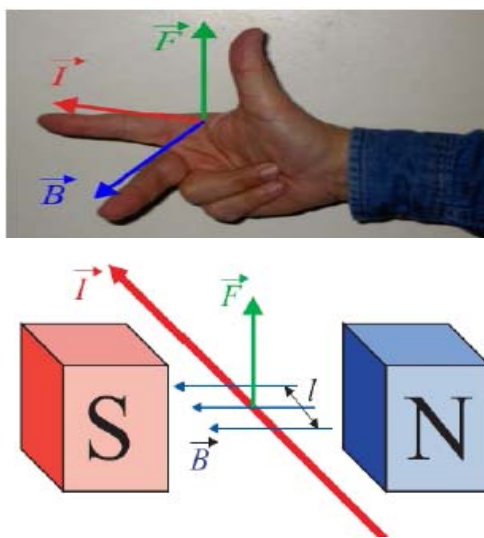


Figure 2.4. Force électromagnétique.

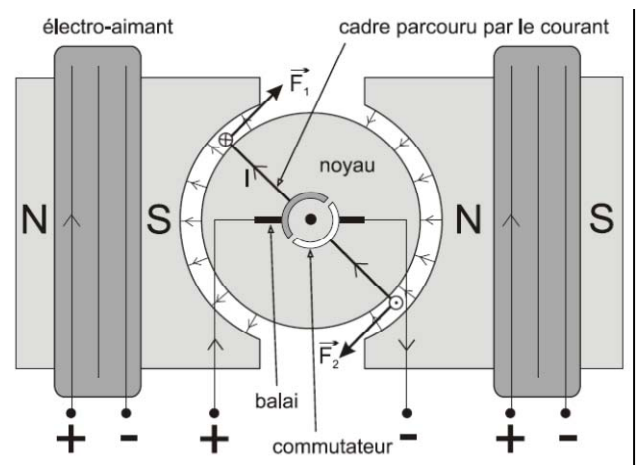


Figure 2.5. Force électromagnétique et les moteurs.

Lorsque le conducteur est rectiligne et soumis à une induction magnétique uniforme $\vec{B}$ sur une distance l , la force de Laplace, en [N], est donnée par

$$\vec{F} = (\vec{I} \wedge \vec{B}) \cdot l \quad (2.5)$$

Ainsi, sa norme est $F = I \cdot B \cdot l \cdot \sin(\alpha)$, avec α est l'angle entre $\vec{I}$ et $\vec{B}$.

C. 3^{ème} principe – Tension induite par variation du flux magnétique

Flux magnétique :

Le flux magnétique Φ représente la quantité d'induction magnétique intercepté par un circuit fermé. Sur la figure 2.6, nous présentons le cas d'un circuit électrique plan soumis à un champ magnétique homogène.

L'unité de mesure du flux magnétique est le **Weber [wb]**. Le flux magnétique pour une géométrie simple (comme dans la figure ci-contre) est calculé par la relation suivante :

$$\Phi = B \cdot S \cdot \sin(\alpha) \quad [\text{Wb}]$$

Avec B est l'induction magnétique en [T], S la surface du circuit en [M²] et α est l'angle entre l'induction magnétique et le plan du circuit

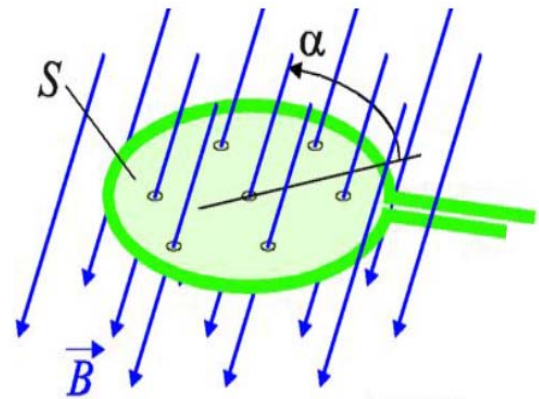


Figure 2.6. Flux magnétique intercepté par un circuit électrique.

Tension induite par variation du flux magnétique

Lorsque un circuit électrique se trouve sous l'effet d'un flux magnétique variable, il est le siège d'une **tension induite** :

$$u_i(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad [\text{V}]$$

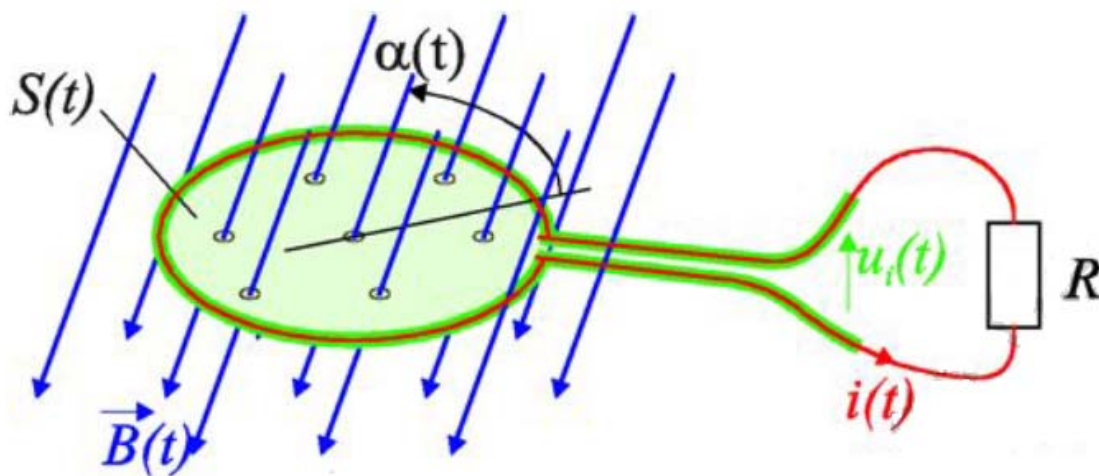


Figure 2.7. Tension induite aux bornes d'un circuit.

Si on ferme le circuit sur une résistance R , un courant se met à circuler dans ce circuit. En utilisant les formules précédentes, la tension induite s'exprime comme suit

$$u_i(t) = \frac{d[B(t) \cdot S(t) \cdot \sin \alpha(t)]}{dt} \quad [\text{V}]$$

Donc il est possible de varier la tension induite en variant soit l'induction magnétique, soit la surface du circuit électrique, soit l'angle formé entre eux, ou toute combinaison de ces actions.

Loi de Lenz

Le **sens** d'une tension induite est tel que le courant électrique et les forces électromagnétiques qui en résultent tendent, par leurs effets, à **s'opposer à la variation de flux**.

Dans tout circuit fermé soumis à une variation de flux, il se crée des courants qui s'oppose aux phénomènes qui les ont créés.

Exemple1:

Lorsqu'on approche le pôle Nord d'un'aimant (comme il est illustrée sur la figure 2.8), ça va donner naissance à un courant dans la bobine. Le courant résultant va créer un pôle magnétique qui repousse ce pôle Nord. Donc, le courant va circuler dans le circuit de manière à créer un pôle Nord en face du pôle Nord de l'aimant.



Figure 2.8. Illustration de la loi de Lenz magnétique uniforme.

Dans le deuxième cas, la bobine "voit un pôle Nord qui s'en va", il va alors se créer un courant qui circule de manière à attirer l'aimant, (elle crée de ce fait un pôle Sud).

Exemple2:

Si l'on fait pivoter une spire dans un milieu soumis à un champ magnétique ça donne naissance à une tension induite à ses bornes (spire). En effet, on fait ainsi varier l'angle α entre le plan de la spire et l'induction magnétique. Plus la rotation est rapide, moins il faut de temps pour faire passer $\sin(\alpha)$ de 1 à -1 et réciproquement. De ce fait, l'amplitude de la tension induite est proportionnelle à l'induction magnétique et à la vitesse de rotation de la spire.

Si nous connectons cette spire sur une résistance, un courant induit apparaît dans ce circuit. A son tour, le courant crée un couple électromagnétique (selon le deuxième principe vu précédemment). Le couple résultant s'oppose à la rotation de la spire (en vertu de la loi de Lenz), cherchant ainsi à réduire la vitesse, donc l'amplitude de la tension induite.

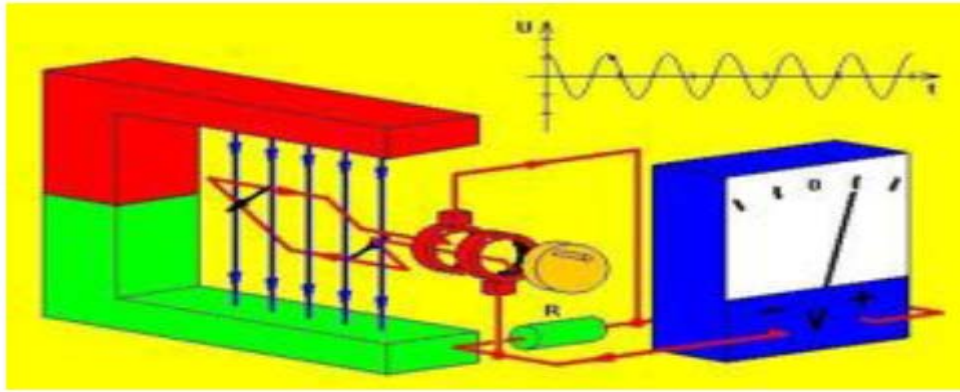


Figure 2.9. Tension induite aux bornes d'une spire tournant dans un champ magnétique uniforme.

2.3. Les actionneurs électriques les plus utilisés

Un actionneur électrique permet de convertir l'énergie électrique (courant continu ou alternatif) en rotation mécanique. Nous présentons dans le tableau 2.1 les actionneurs électriques les plus utilisés.

Principales caractéristiques d'un moteur électrique :

Parmi les caractéristiques des moteurs électriques, nous pouvons citer : 1) le type de tension : continue (Moteur à courant continu) ou alternative (moteur asynchrone, synchrone) ; 2) Tension d'alimentation en volts (12V continu, 24V continu, 230V alternatif, 400V alternatif...) ; 3) Puissance nominale (en Watts).

2.4. Moteur à courant continu

Un moteur à courant continu est un convertisseur électromécanique permettant la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. Le premier moteur à courant continu a été réalisé en 1836. La vitesse et le couple de ce type de moteurs sont facilement réglables (ne nécessitent pas beaucoup d'électronique de commande). **Un moteur à courant continu est utilisé dans les applications de faibles et moyennes puissances.**

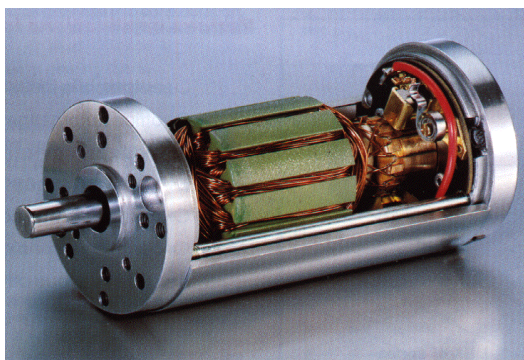


Figure 2.10. Moteur à courant continu .

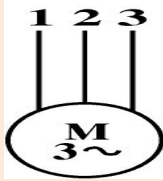
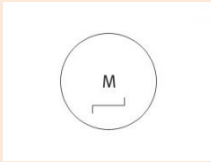
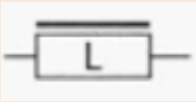
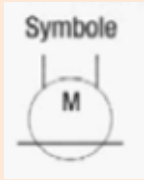
Moteur asynchrone triphasé		(Rotation continue)
		• Actionneur très utilisé dans les applications industrielles ; • Très grande fiabilité et facilité de mise en œuvre (raccordement direct au réseau triphasé) ; • Très fortes puissances (Plusieurs MW) ; • Utilisé sur les convoyeurs, les machines-outils.
Moteur à courant continu		(Rotation continue)
		• Actionneur apprécié pour sa souplesse • Variation de vitesse facile à mettre en œuvre • Utilisé sur tous les systèmes autonomes (automobile, jouets, outillage...) • Utilisé sur les véhicules électriques.
Moteur pas à pas		(Rotation discontinue)
		• Actionneur convenable aux mouvements rotatifs discontinus, précis, de faible puissance ; • Le nombre de pas par tour peut atteindre 400 ; • Utilisé sur les imprimantes, les micros mécanismes, les mini-manipulateurs, les axes de machines de faible puissance.
électro-aimant		(Translation)
		• Actionneur électrique linéaire convenable aux mouvements de faible amplitude ; • Adéquat aux applications de faible puissance ; • On l'utilise pour tirer, pousser, enclencher, déclencher, libérer, maintenir, verrouiller, indexer, motoriser.
Vérin électrique		(Translation)
		• Il peut générer des mouvements de translation (moteur et mécanisme de transformation) • faible encombrement et intégration simple

Tableau 2.1. Actionneurs électriques linéaires et rotatifs.

2.4.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des moteurs à courant continu est basé sur deux principes de l'électromagnétisme :

- ✓ Lorsqu'un conducteur parcouru par un courant $i(t)$ et soumis à un champ magnétique constant, il se crée une force proportionnelle $F(t)$ qui tend à faire bouger ce conducteur.
- ✓ Lorsqu'une spire de fil de cuivre est soumise à l'effet d'un champ magnétique qui varie au cours du temps, il apparaît à ses bornes une tension $u_i(t)$, appelée tension induite. Cette tension est proportionnelle à la variation du champ magnétique.

Le stator (des aimants ou des électro-aimants) crée un champ magnétique. Le passage du courant (**courant d'induit**) dans les spires du rotor crée un champ magnétique. La force qui apparaît dans ces conditions fait tourner chaque spire autour de son axe.

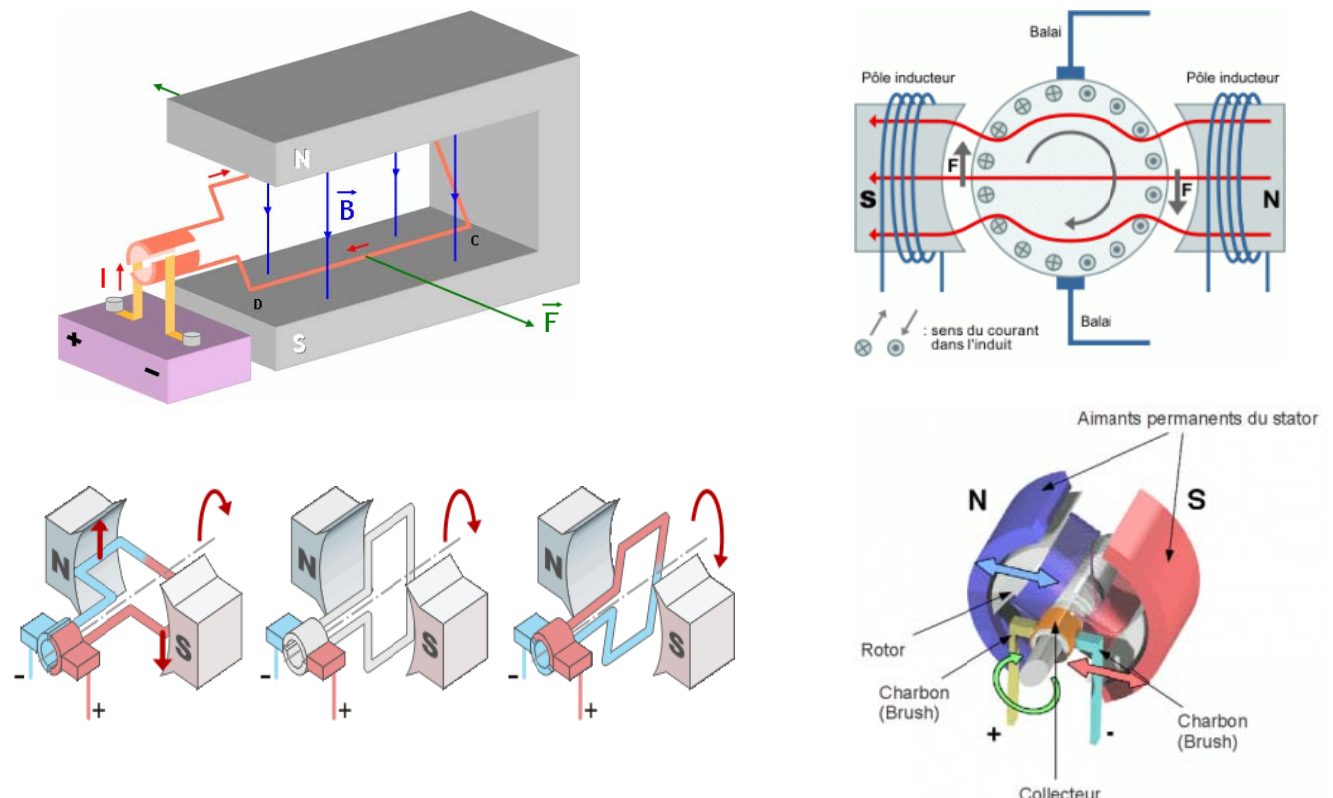


Figure 2.11. Schémas illustratifs du fonctionnement d'un moteur à courant continu .

La machine à courant continu est composée de trois parties principales :

- l'inducteur (**stator**)
- l'induit (**rotor**)
- le dispositif collecteur / balais

Le stator est la partie fixe du moteur et il constitue son enveloppe extérieure

Le **stator** d'un moteur à courant continu est constitué d'une ou plusieurs sources de champ magnétique continu. Pour les moteurs de faibles puissances, **des aimants permanents** peuvent être utilisés pour créer le champ magnétique. Pour les moteurs de fortes puissances, le champ magnétique est généré par **des électro-aimants (bobines)**, le courant qui y circule est communément appelé **courant d'excitation** du moteur.

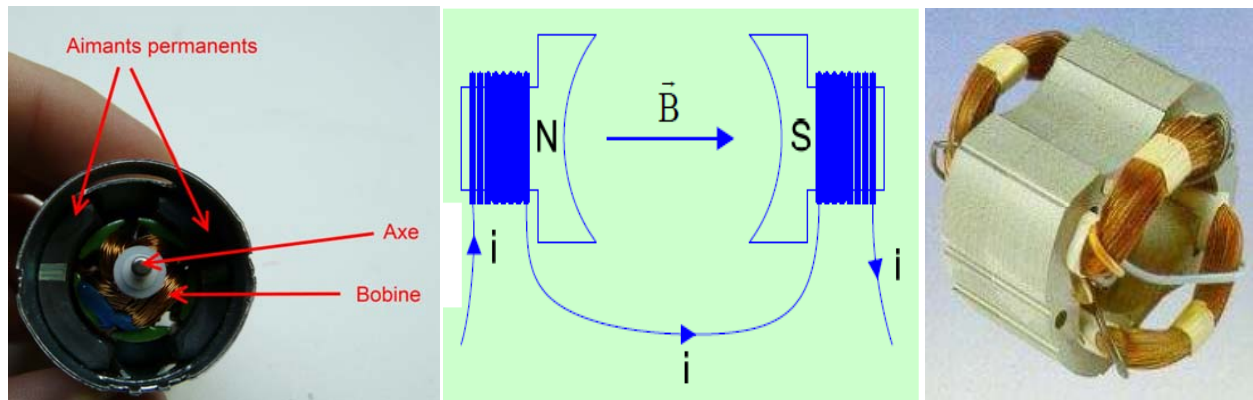


Figure 2.12. Le stator d'un moteur à courant continu.

Le rotor est la partie mobile du moteur qui génère le couple utile à la charge par l'intermédiaire de son arbre.

Le **rotor** d'un moteur à courant continu intègre **des bobines** formées par **plusieurs spires**. On appelle le courant qui y circule **le courant d'induit** du moteur.

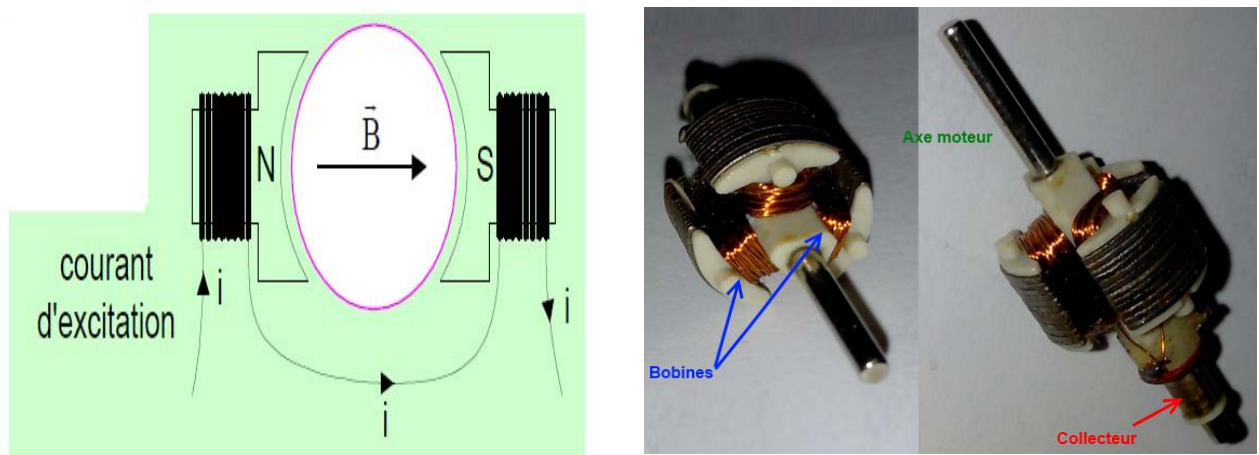


Figure 2.13. Le rotor d'un moteur à courant continu.

Le **collecteur** avec des **balais** (charbons) est utilisé pour transmettre l'énergie électrique au rotor. Il permet aussi de commuter le courant de manière à ce qu'il circule de manière optimale dans les spires du rotor.

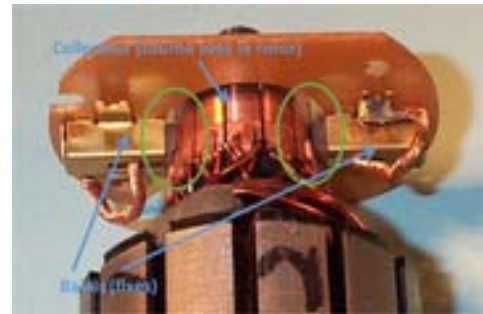
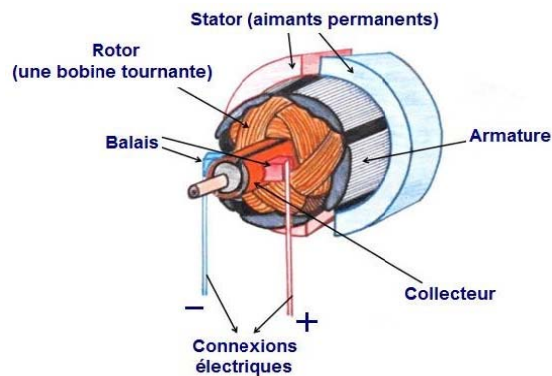


Figure 2.14. Dispositif Balais – collecteur.

2.4.2. Lecture d'une plaque signalétique

Nous pouvons lire les caractéristiques électriques et mécaniques nominales sur une plaque lisible sur le moteur (exemple ci-dessous):

En fonctionnement normal (nominal), ce moteur a les caractéristiques suivantes :

- Puissance mécanique : 36,3kW (1150tr/min et 301N.m).
- Alimentation rotor : 440V et 95,5A (soit 42kW).
- Alimentation stator : 360V et 3A (soit 1,08kW).

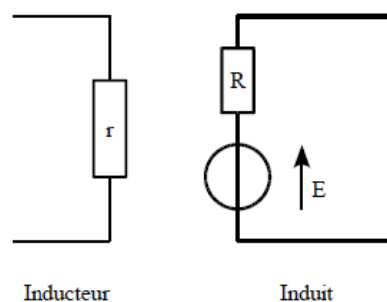
On peut en déduire le rendement :

$$\eta = \frac{P_m}{P_E} = \frac{36,3}{42 + 1,08} \approx 84\%$$

IEC 34.1.1990		 LEROY SOMER		MADE IN FRANCE			
		MOTEUR A COURANT CONTINU DIRECT CURRENT MOTOR					
TYPE: LSK 1604 S 02		N° 700000/10		9/1992		M 249 kg	
Classe / Ins class H		IM 1001		IP 23		IC 06	
M _{nom} / Rated torque		301 N.m		Altit. 1000 m		Temp. 40 °C	
	kW	min ⁻¹		V		A	
Norm./Rat.	36,3	1150		440		95,5	
	3,63	115		44		9,55	
	36,3	1720		440		95,5	
T		système peinture: I		Induit / Arm.		Excit. / Field	
○ Service / Duty S1		DE 6312 2RS C3		NDE 6312 2RS C3		○	

Figure 2.15. Exemple d'une plaque signalétique.

2.4.3. Modèle électrique d'une machine à courant continu



La force électromotrice (f.e.m.) E :

Soit Φ le flux magnétique créé par l'inducteur (en Weber [Wb].), et N le nombre de conducteurs dans le rotor et Ω sa vitesse de rotation

la f.e.m. E est donnée par : $E = \frac{N \Phi \Omega}{2\pi}$.

Si on pose $K = \frac{N}{2\pi}$ (constante sans dimension), donc $E = K \Phi \Omega$, avec Φ en [Wb], Ω en [rad/s] et E f.e.m induite en [V].

Si le flux magnétique Φ est constant, la f.e.m. induite E est proportionnelle à la vitesse de rotation Ω soit : $E = k \Omega$.

Le couple électromagnétique :

Si un courant d'intensité I circule dans l'induit, la puissance électromagnétique est $P_E = E \cdot I$.

Soit Ω la vitesse de rotation du rotor, il existe alors un couple électromagnétique tel que $P_E = T_{EM} \cdot \Omega$. De ce qui précède, l'expression du couple électromagnétique est

$$T_{EM} = K \cdot \Phi \cdot I$$

Ce qui implique que le couple électromagnétique est proportionnel à l'intensité qui circule dans l'induit.

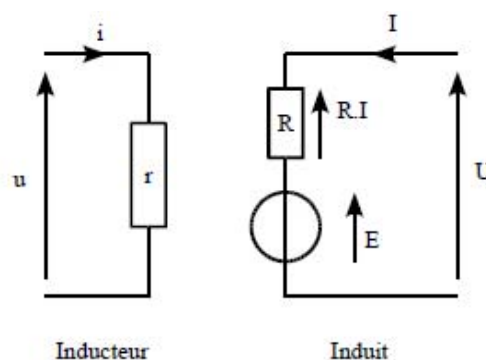
A. Le moteur à excitation indépendante

Modèle électrique :

Une tension continue u alimente l'inducteur et il est parcouru par un courant continu i (si l'inducteur n'est pas à aimants permanents).

L'induit est alimenté par une tension continue U et il est parcouru par une intensité I .

Modèle électrique du moteur à excitation indépendante :



Avec ce montage, le flux ϕ est directement proportionnel au courant d'excitation i .

Équation de fonctionnement pour l'induit $U = E + R \cdot I$

Bilan énergétique et rendement:

La puissance électrique absorbée par le moteur est $P_A = u \cdot i + U \cdot I$ (Si le moteur est à aimant permanent, $u \cdot i = 0$).

Les pertes par effet Joule au niveau de l'excitation (l'inducteur) sont données par $P_{JE} = u \cdot i = r i^2$

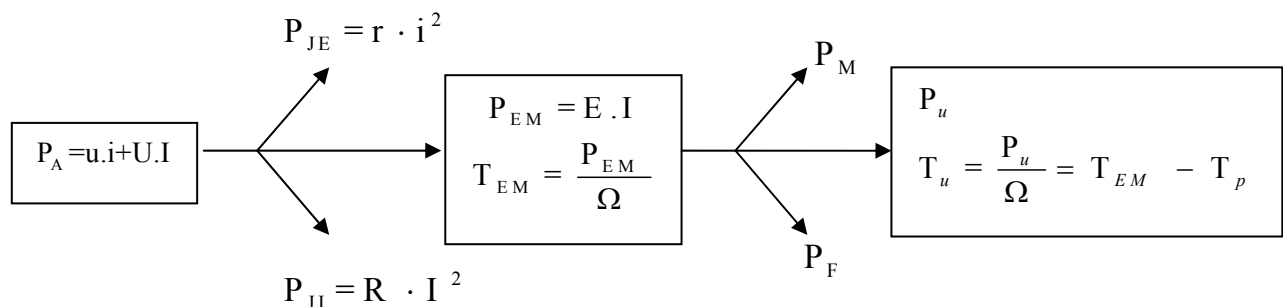
Les pertes par effet Joule au niveau de l'induit, sont $P_{JI} = R I^2$

La puissance électromagnétique $P_{EM} = P_A - P_{JE} - P_{JI} = E \cdot I$

Pour un essai à vide, nous avons $P_v = R \cdot I_v^2 + P_C$, les pertes collectives P_C qui représentent les pertes magnétiques ou pertes fer P_F ainsi que les pertes mécaniques P_M peuvent être déterminés par : $P_C = P_F + P_M$.

Le couple de pertes est défini par $T_p = T_{EM} - T_u$

La puissance utile disponible sur l'arbre du moteur est $P_u = P_A - P_{JE} - P_{JI} - P_C$

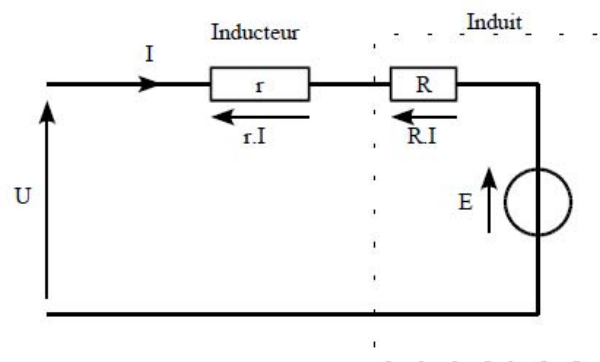


Le rendement du moteur à courant continu est $\eta = \frac{P_u}{P_A} = \frac{P_u}{P_u + u \cdot i + R \cdot I^2 + P_C}$

B. Le moteur à excitation série :**Modèle électrique :**

L'inducteur et l'induit sont parcourus par la même intensité I (L'inducteur est placé en série avec l'induit).

Modèle électrique du moteur à excitation série



Équation de fonctionnement : $U = E + (r + R) \cdot I$

Bilan des puissances et rendement :

Le moteur absorbe la puissance électrique $P_A = U \cdot I$

Les pertes par effet Joule au niveau de l'excitation (l'inducteur) sont données par $P_{JE} = r \cdot I^2$

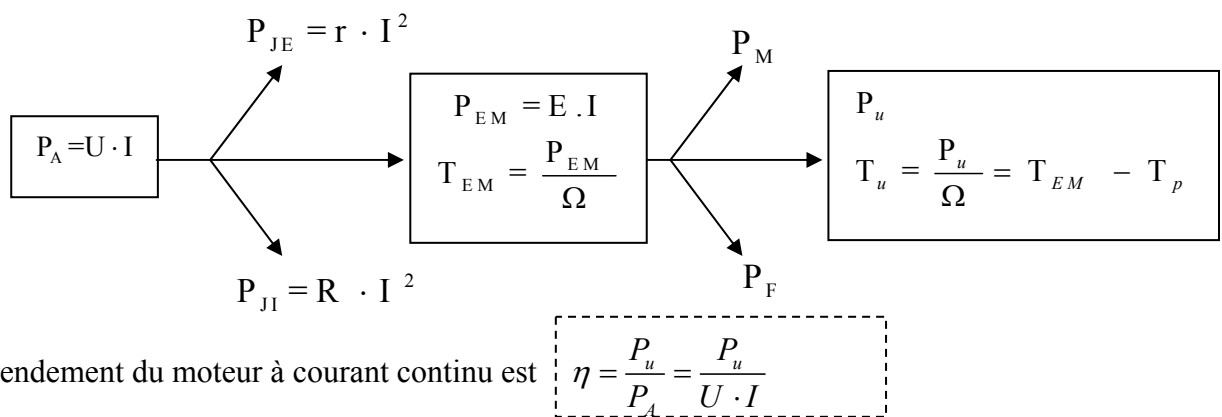
Les pertes par effet Joule pour l'induit sont $P_{JI} = R \cdot I^2$

La puissance électromagnétique est donnée par $P_{EM} = P_A - P_{JE} - P_{JI} = E \cdot I$

Lors d'un essai à vide, on peut déterminer les pertes collectives P_C qui représentent les pertes magnétiques ou pertes fer P_F ainsi que les pertes mécaniques P_M soit : $P_C = P_F + P_M$

Nous définissons le couple de pertes par $T_p = T_{EM} - T_u$

La puissance utile disponible sur l'arbre du moteur est $P_u = P_A - P_{JE} - P_{JI} - P_C$

**2.4.4. Quelques considérations pour le moteur à courant continu :****Démarrage des moteurs à courant continu :**

Nous avons vu précédemment que la f.e.m. $E = k \cdot \Omega$. Or, au démarrage, $\Omega = 0$ donc $E = 0$.

Pour un moteur à excitation séparée, $U = R \cdot I_D \Rightarrow I_D = \frac{U}{R}$. D'où, le courant de démarrage est très

important. En effet, ce courant est source de détérioration du moteur, pour cela on essaie de limiter ce courant soit par adjonction d'une résistance de démarrage qu'on diminue progressivement soit par augmentation progressive de la tension d'induit. Dès que le moteur

commence à tourner, $I_D = \frac{U - E}{R}$ et décroît rapidement jusqu'à sa valeur nominale I .

Si nous démarrons le moteur en charge avec une charge qui présente un couple résistant T_R ,

l'intensité de démarrage doit être $I_D > \frac{T_R}{K \Phi}$

2.5. Moteur pas à pas

Le moteur pas à pas est un actionneur qui transforme des impulsions (en provenance d'un circuit de commande) en une rotation de "n" pas du rotor, ce qui permet de réaliser un positionnement ou une vitesse précise et sans boucle d'asservissement (un positionnement précis en boucle ouverte). La constitution d'un moteur pas à pas est très simple, et sa rotation est obtenue en contrôlant l'alimentation des bobines et le sens du courant dans celles-ci.

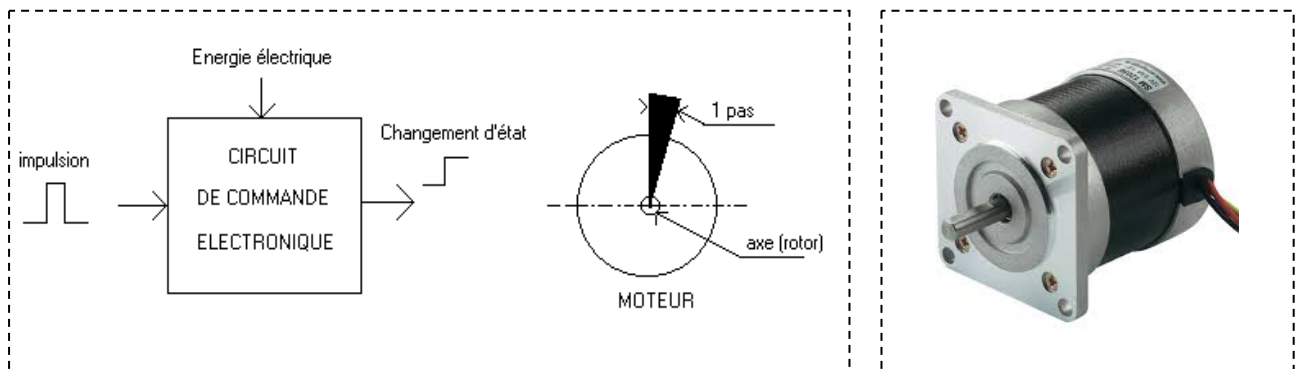


Figure 2.16. Moteur pas à pas.

Dans un fonctionnement normal, la vitesse de rotation de ces moteurs ne dépend que de la fréquence des impulsions électriques f_{pulse} et du nombre de pas par tour N_{pas}

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f_{pulse}}{N_{pas}} [rad / sec] \quad \text{ou} \quad N = \frac{60 \cdot f_{pulse}}{N_{pas}} [r / sec]$$

Le fonctionnement d'un moteur pas à pas est basé sur la commutation successive des enroulements stator (ou phase). Pour cette raison, l'impulsion électrique envoyée au moteur est traduite par un séquenceur et elle va agir ainsi sur l'électronique de commutation (drivers ou transistors de puissance) qui distribue les polarités dans les enroulements. Notons que, quelle que soit la durée de l'impulsion envoyée (supérieur à une valeur minimale), **une seule commutation** provoque **un seul pas**.

2.5.1. Le domaine d'application des moteurs pas à pas.

Les moteurs pas à pas sont utilisés pour positionner un objet précisément. L'avantage de ce type de moteur est de tourner avec la possibilité de s'arrêter dans une position désirée, avec une très grande précision (sans frein). Pour cette raison, ce type de moteur est très sollicité, par exemple dans :

La robotique : les moteurs pas à pas sont très utilisés comme des actionneurs dans le domaine de la robotique.

L'informatique. Le déplacement d'une tête de lecture d'un lecteur de disquette requiert une bonne précision, sous peine de ne pas retrouver l'information à lire sur le support. De même pour certains disques durs d'ancienne génération. Les imprimantes utilisent aussi ces moteurs, le déplacement de la tête d'impression, l'avance du papier, et même sur certains modèles, l'avance du ruban, sont pilotés par des moteurs pas à pas.

En réception. Les moteurs pas à pas utilisés pour faire le positionnement d'une parabole motorisée.

Astronomie. Certaines montures sont animées aussi par ces moteurs.

Il existe d'autres domaines d'application des moteurs pas à pas.

2.5.2. Principe de fonctionnement

Si un **aimant permanent** est placé sur un axe de rotation, entre **deux bobines** à axes perpendiculaires, nous remarquons que :

- Si on alimente **une seule bobine**, l'aimant se positionne parallèlement à son axe ;
- Si le **courant** dans la bobine **est inversé**, l'aimant fait un $1/2$ tour (90°) et reste parallèle à l'axe de la bobine ;
- Si on alimente **les deux bobines**, l'aimant se positionne suivant la bissectrice des deux axes.

On dit que l'aimant se positionne de façon qu'il soit traversé par le maximum de flux : **règle de flux maximal**.

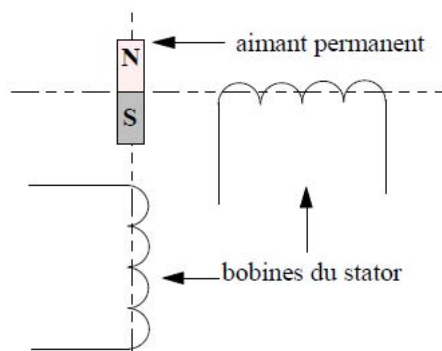


Figure 2.17. Principe de fonctionnement d'un moteur pas à pas.

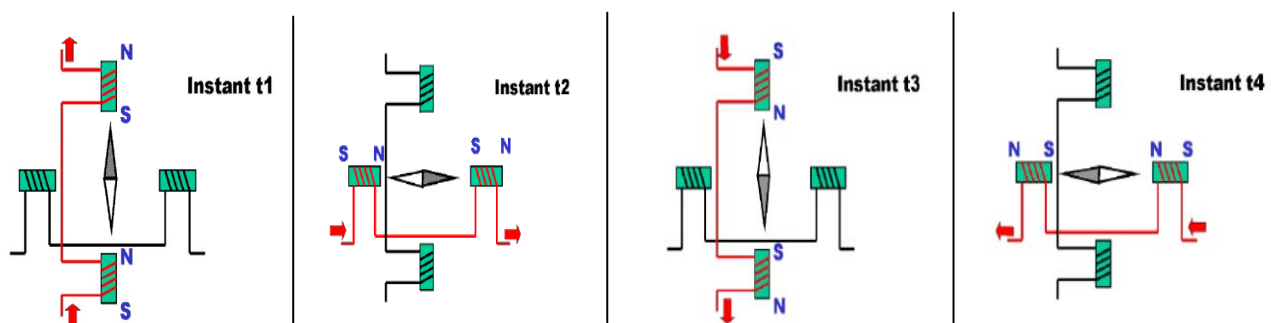


Figure 2.18. Illustration de fonctionnement d'un moteur pas à pas.

Considérons le moteur pas à pas (**théorique**) de la **Figure 2.17** composé d'un aimant permanent (boussole) et de 2 bobinages constitués chacun de 2 bobines. Le passage d'un courant, successivement dans chaque bobinage, fait tourner l'aimant. Ainsi, nous avons créé un moteur de 4 pas par tour.

Les bobines diamétralement opposées forment les phases. Elles sont connectées de façon à créer deux pôles : un pôle sud et un pôle nord. En inversant le sens du courant dans une phase, il est possible de permuter les pôles engendrés par une bobine. De ce fait, le rotor se déplace alors et prend une nouvelle position d'équilibre stable.

2.5.3. Constitution d'un moteur pas à pas

Un moteur pas à pas est constitué par (comme la majorité des moteurs) :

- Une **partie fixe** : C'est le **stator**, constitué d'un circuit magnétique et des bobines (phases) commutées en courant par une électronique de commande, ce qui génère un flux magnétique à directions multiples ;
- Une **partie mobile** : C'est le rotor, placé dans le flux du stator, il se positionne selon le flux maximum.

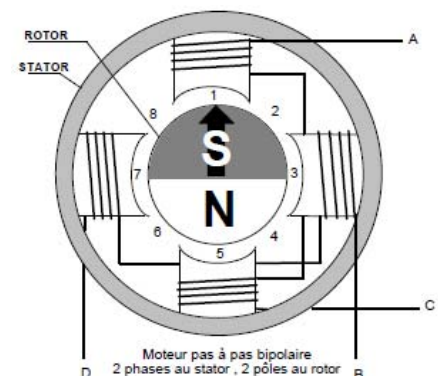
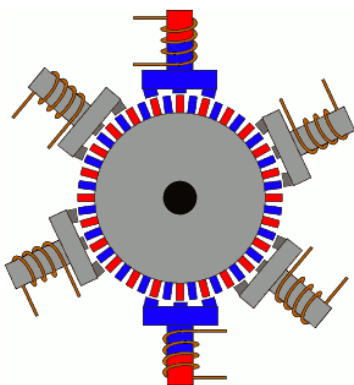


Figure 2.19. Constitution d'un moteur pas à pas.

Nous pouvons trouver trois technologies pour les rotors d'un moteur pas à pas, ce qui donne trois familles de ce type de moteurs:

1. Moteur à aimant permanent : **Il utilise le principe de l'action d'un champ magnétique sur un aimant ;**
2. Moteur à réluctance variable : **Il utilise le principe du flux maximum ;**
3. Moteur hybride : **c'est la superposition des deux principes ci-dessus.**

Pour les bobines, nous pouvons faire leur alimentation soit avec une tension unique soit avec deux tensions symétriques :

1. Moteur unipolaire (bobines à point milieu, **une seule tension**);
2. Moteur bipolaire (pas de point milieu donc **deux tensions symétriques**).

Remarque : Dans un moteur pas à pas, le nombre de pas est dépend de deux caractéristiques du moteur :

1. Le nombre de phase (partie commande) ;
2. Le nombre de paires de pôles (partie rotor).

Nombre de pas par tour = nombre de phase x nombre de paires de pôles du rotor

Le moteur bipolaire

Il n'existe pas un point de milieu dans Les enroulements du stator. La borne de chaque enroulement est alimentée par une polarité positive puis négative (d'où le terme bipolaire).

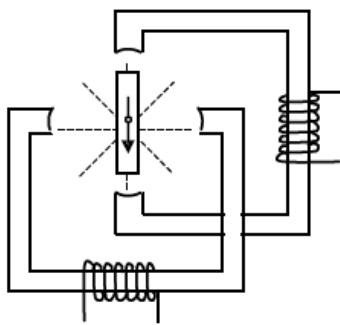


Figure 2.20. Moteur bipolaire

Le moteur unipolaire

Il existe un point milieu dans les enroulements. Les bornes sont toujours alimentées par une polarité de même signe (d'où le terme unipolaire).

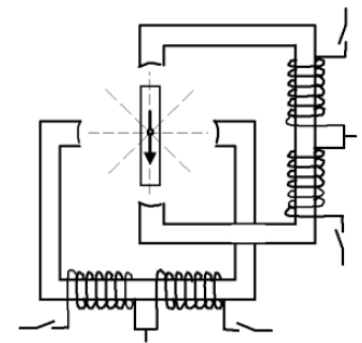
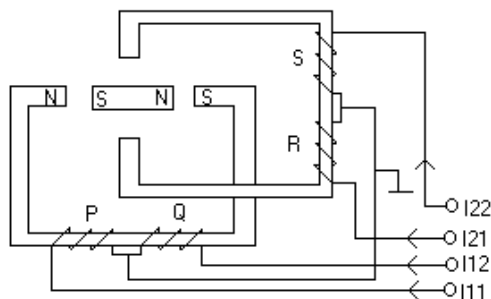


Figure 2.21. Moteur unipolaire

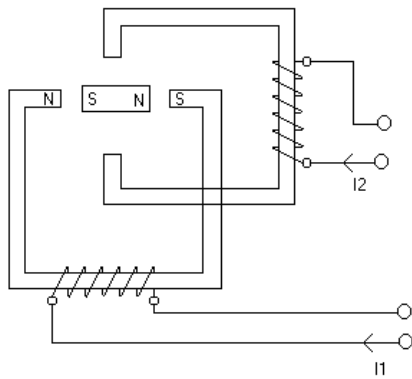
Exemple 1 : Moteur pas à pas unipolaire

Nous alimentons successivement chaque demi-enroulement.



Séquence	Phase P I11	Phase Q I12	Phase R I21	Phase S I22	Angle
1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	90°
3	0	1	0	0	180°
4	0	0	0	1	270°

Nous alimentons les enroulements à point milieu avec une polarité de même signe. Le nombre de phases est égal au nombre de demi-enroulements. Pour cet exemple, nous avons donc un moteur à 4 phases (P, Q, R, S).

Exemple 2 : Moteur pas à pas bipolaire

Nous alimentons un enroulement à la fois :

Séquence	$I1>0$	$I1<0$	$I2>0$	$I2<0$	Angle
1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	90°
3	0	1	0	0	180°
4	0	0	0	1	270°

On alimente 2 enroulements à la fois :

Séquence	$I1>0$	$I1<0$	$I2>0$	$I2<0$	Angle
1	1	0	1	0	45°
2	0	1	1	0	135°
3	0	1	0	1	225°
4	1	0	0	1	315°

Le sens de rotation d'un moteur pas à pas de type bipolaire est dépend du sens du courant et de l'ordre d'alimentation des bobinages. Le nombre de pas par tour d'un moteur bipolaire: $N_p = \text{nombre de phases} * \text{nombre de pôles au rotor}$. Dans l'exemple ci-dessus, on a 2 phases et 2 pôles au rotor, d'où $N_p = 4 \text{ pas/ tour}$.

2.5.4. Le moteur pas à pas à aimant permanent

Le rotor d'un moteur pas à pas à aimant permanent est constitué **d'un aimant permanent**, et le stator comporte **2 bobinages** (ou 2 groupes de bobinages). Le fonctionnement de ce modèle est simple. En contrôlant l'alimentation des bobines, et le sens du courant qui circule dans les bobines, on peut faire varier le champ dans le moteur.

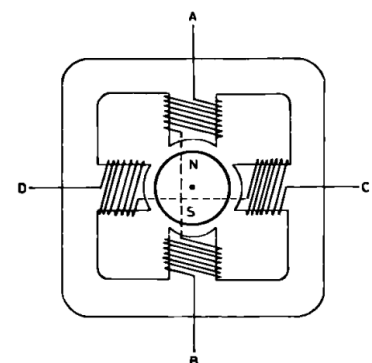


Figure 2.22. Structure d'un moteur pas à pas à aimant permanent.

A. Les modes de commande d'un moteur pas à pas à aimant permanent

- **Fonctionnement en pas entier :**

Pour ce mode de fonctionnement, les bobines sont alimentées l'une après l'autre dans un sens puis dans l'autre. L'aimant permanent suit le déplacement du champ magnétique généré par ces bobines et s'oriente selon une de ses 4 positions stables. Comme le rotor est aimanté, lorsque le moteur n'est pas alimenté le flux magnétique du à l'aimant permanent va à lui seul créer un couple résiduel ou couple de détente, en se mettant dans l'axe de l'une des bobines.

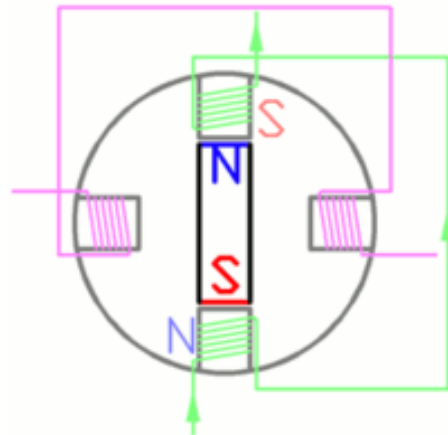


Figure 2.23. Fonctionnement en pas entier.

- **Fonctionnement en mode « High Torque » (fort couple) :**

Pour augmenter l'intensité du flux magnétique généré par le stator, et donc le couple moteur, Nous pouvons alimenter les deux bobines en même temps, en faisant varier uniquement le sens du courant qui circule dans chaque bobine.

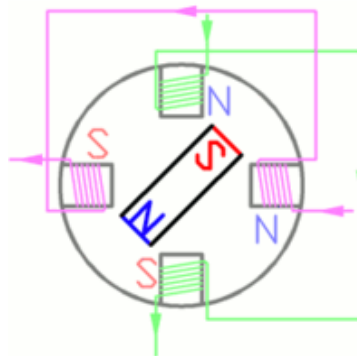


Figure 2.24. Fonctionnement en mode «fort couple».

- **Fonctionnement en mode demi-pas :**

Pour augmenter le nombre de positions stables, autrement le nombre de pas du moteur à aimant permanent, il est possible de combiner les 2 modes précédents dans un mode de commande appelé « **demi-pas** ».

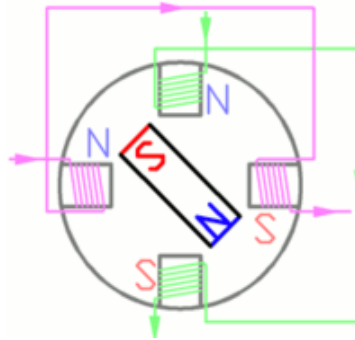


Figure 2.25. Fonctionnement en mode demi-pas.

Remarque. Un moteur pas à pas a un couple moteur important, mais une résolution (nombre de pas par tour) faible, et une fréquence de rotation faible. La commande de ces moteurs pas à pas nécessite de contrôler le sens du courant qui circule dans chaque bobine.

2.5.5. Moteur pas à pas à réluctance variable

Le rotor est conçu en forme d'un cylindre **en fer doux (non aimanté)** dans lequel sont taillées des dents (pôles du rotor). Le stator est un empilage de tôles découpées, encochées où sont logés des enroulements diamétralement opposés. Pour ce type de moteur, le nombre de dents au rotor (N_r) est obligatoirement différent de celui de stator (N_s).

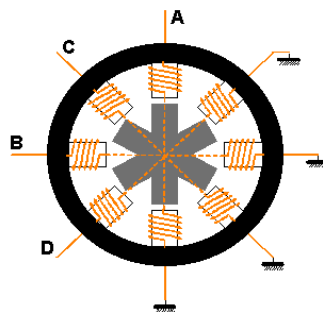


Figure 2.26. Moteur pas à pas à réluctance variable.

Le fait d'alimenter une paire de bobines, le rotor se place de façon à ce que le flux qui le traverse soit maximal (ou réluctance minimale). Comme il est illustré sur la Figure 2.27, le rotor avance d'un pas à chaque impulsion de courant sur une nouvelle paire de bobine (A-A' puis B-B' puis C-C' puis A-A').

Nombre de pas par tour : $N_p = N_s \times N_r / (N_s - N_r)$

Notons que le sens de rotation ne dépend pas du sens du courant qui circule dans les bobines mais de l'ordre d'alimentation de celles ci.

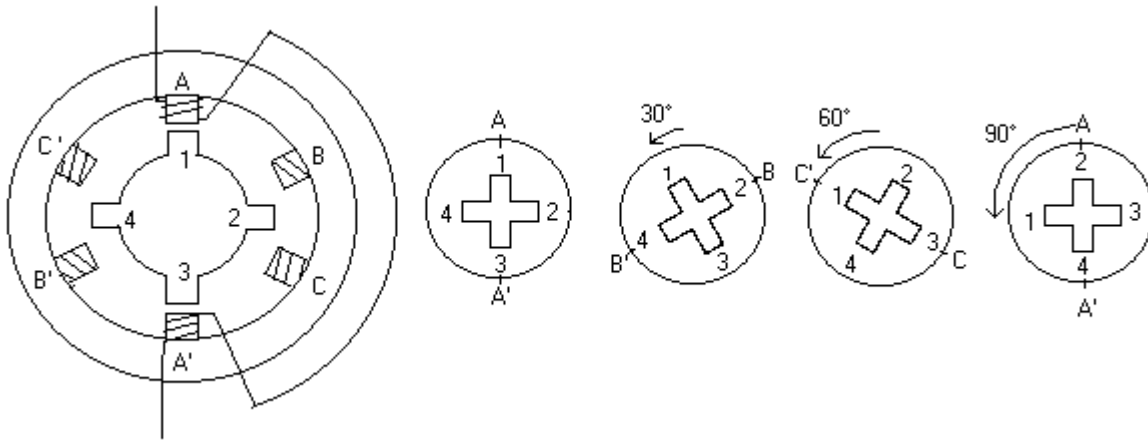


Figure 2.27. Moteur pas à pas à réluctance variable ($N_s = 6$ dents, $N_r = 4$ dents).

Si par exemple $N_s = 6$ et $N_r = 4$, nous n'avons $N_p = (6 \times 4) / (6 - 4) = 12$ pas par tour. Le Déplacement angulaire correspondant à 1 pas $= 360^\circ / 12 = 30^\circ$. Donc, le rotor devra donc faire 12 pas (de 30°) pour faire 1 tour.

Remarque : Le moteur à réluctance variable est caractérisé par un nombre de pas élevé et sa construction est simplifiée (pas d'aimant au rotor). Néanmoins, il a deux défauts : un couple de travail faible et un couple nul lorsqu'il n'est plus alimenté.

2.5.6. Le moteur pas à pas hybride

Le moteur hybride est une combinaison des deux types de moteurs vus précédents (à aimant permanent et à réluctance variable). Dans ce type, le rotor est constitué d'aimants dentés ce qui donne un fort couple et un nombre de pas par tour élevé.

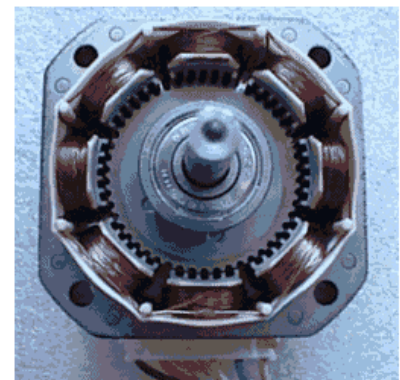
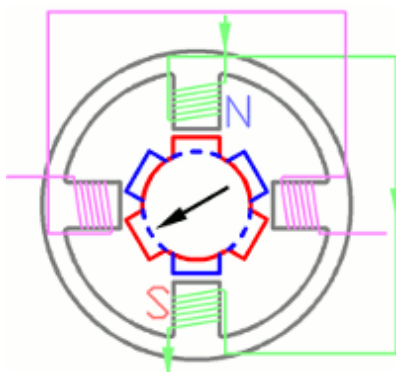


Figure 2.28. Moteur pas à pas hybride.

Type de moteur	Moteur à aimant permanent	Moteur à réluctance variable	Moteur hybride
Résolution (Nb de pas/tour)	Moyenne	Bonne	Elevée
Couple moteur	Elevé	Faible	Elevé
Sens de rotation	Il dépend : - du sens du courant pour le moteur bipolaire - L'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend uniquement de l'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend : - du sens du courant pour le moteur bipolaire - L'ordre d'alimentation des bobines
Fréquence de travail	Faible	Grande	Grande

Tableau 2.2. Comparaison des 3 catégories de moteurs pas à pas.

2.6. Le moteur asynchrone

2.6.1. Généralités et utilisations

Le moteur asynchrone, appelé aussi « moteur à induction », a été inventé par Nikola Tesla vers 1890, aux USA. Le Moteur asynchrone (MAS) est un actionneur électrique très utilisé dans l'industrie. D'une puissance allant de moins d'un kilo Watt, à plusieurs dizaines de MW, les MAS équipent plusieurs mécanismes entre autres : **machines-outils, monte-charges, tapis-roulants, compresseurs de réfrigérateurs et congélateurs, machines à laver**. Branchés directement sur le réseau électrique triphasé, ils sont appréciés pour leur rendement élevé, pour leur fiabilité (pas de contact glissant), pour leur sécurité de fonctionnement (pas d'étincelles) et leur faible coût.

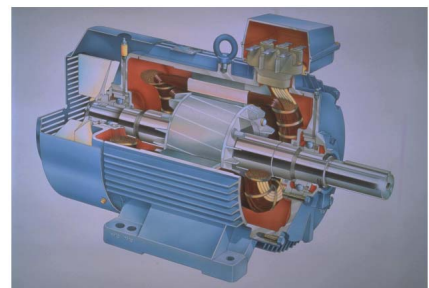


Figure 2.29. Symboles du moteur asynchrone.

2.6.2. Symboles

La machine asynchrone est généralement représentée par les symboles suivants

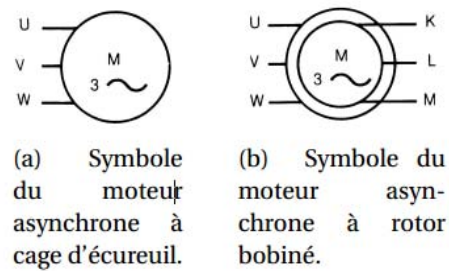


Figure 2.30. Symboles du moteur asynchrone.

2.6.3. Rappels sur le réseau triphasé

Le réseau triphasé est formé par 3 phases, d'un neutre et d'une terre. La tension entre une des phases et le neutre est appelée tension simple alors que la tension entre deux phases est appelée tension composée. Les 3 tensions sinusoïdales de fréquence 60 Hz sont déphasées de 120° $2\pi/3$ les unes par rapport aux autres.

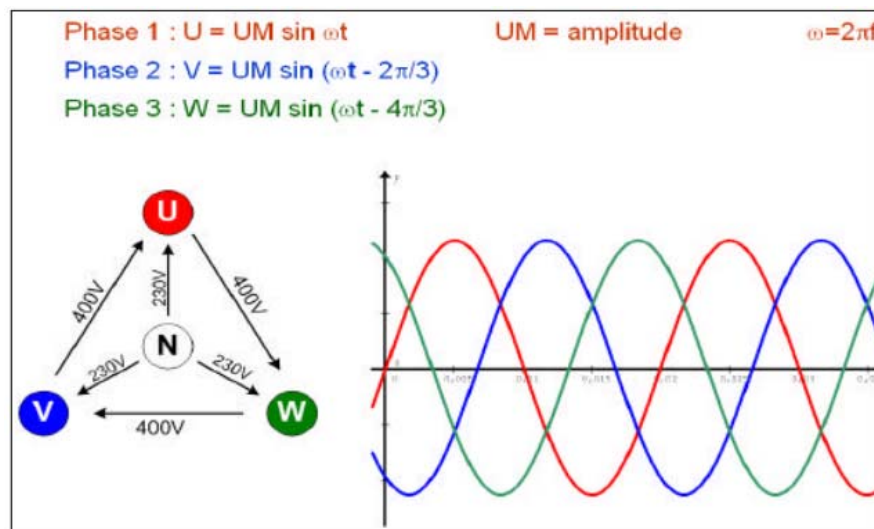


Figure 2.31. Réseau triphasé.

La relation entre valeur maximale U_m (amplitude) et la valeur efficace U_{eff} est

$$U_m = U_{eff} \times \sqrt{2}$$

La relation entre la tension simple $U_{comp} = U_{sim} \times \sqrt{3}$

Les courants de foucault

Si un disque fixé sur un axe et se trouve sous l'effet d'un champ magnétique B variable, un courant induit appelé courant de Foucault apparaît dans le disque.

Le courant induit provoque la mise en rotation du disque (principe du moteur). Si le disque est entraîné, ce courant freine la rotation du disque (principe des freins des véhicules lourds).

Le fonctionnement du moteur asynchrone repose sur l'utilisation du courant de Foucault.

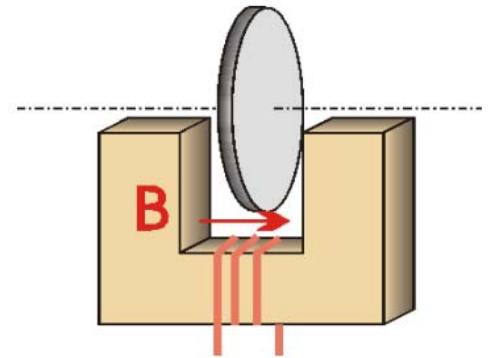
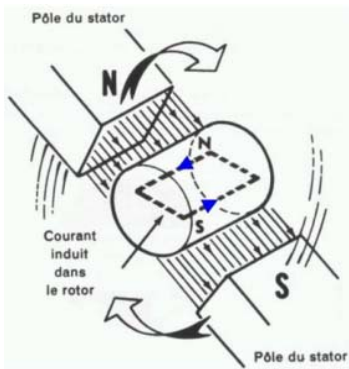


Figure 2.32. Illustration des courants de Foucault.

Champ magnétique

Le principe de fonctionnement des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant généré par des tensions alternatives.

Le courant qui parcourt une bobine crée un champ magnétique B . Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité dépendent du courant I qui circule dans la bobine. C'est une grandeur vectorielle.

Pour le cas **d'un courant alternatif**, le champ magnétique varie **en sens** et **en direction** à la **même fréquence** que le courant.

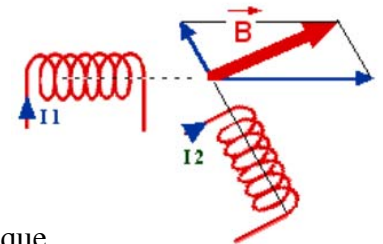
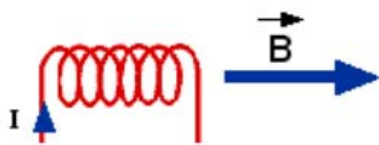


Figure 2.33. Création d'un champ magnétique.

Si nous plaçons deux bobines l'une à proximité de l'autre, le champ magnétique résultant est la somme vectorielle des deux autres. Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à 120° les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés et le champ magnétique résultant est la somme des trois champs magnétiques.

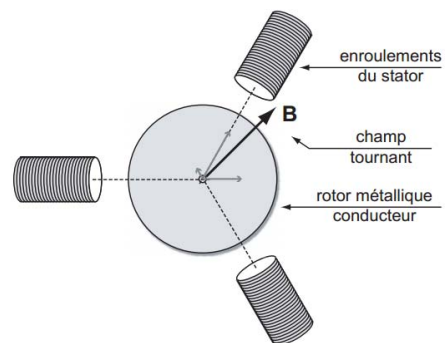
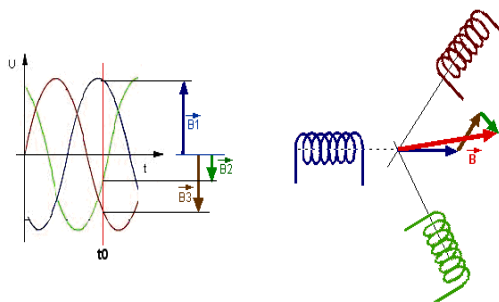


Figure 2.34. Création d'un champ magnétique tournant par trois bobines .

2.6.4. Principe de fonctionnement :

Les 3 bobines du stator alimentés en triphasé produisent chacune un champ magnétique variable et sinusoïdale. L'ensemble des 3 champs crée un champ magnétique tournant. Ce champ induit dans le rotor des courants de Foucault qui s'opposent à la cause qui les a engendrés c'est à dire la variation du champ magnétique tournant et résultant des 3 bobines.

Les enroulements du rotor du moteur asynchrone **sont court circuités** (en étoile ou triangle) et ils sont le siège de courants induits. Ces courants donnent naissance à un champ magnétique dans le rotor qui tend à s'aligner avec celui du stator (tournant à la vitesse dite de synchronisme).

Notons que si le rotor tournait à la même vitesse que le champ tournant généré par le stator, le rotor ne verrait pas de variation de champ magnétique et les courants induits disparaîtraient. C'est la raison pour laquelle le rotor tourne forcément à **une vitesse différente du champ tournant** d'où le nom de moteur asynchrone (asynchrone : **différence de vitesse**).

Le coefficient de glissement g représente cette différence de vitesse.

g = glissement

n_s = vitesse de synchronisme

n = vitesse réelle

f = fréquence du courant

p = nombre de paire de pôle du stator

$$E_n \% \quad g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad t / s \quad n_s = \frac{f}{p} \quad \text{Hz}$$

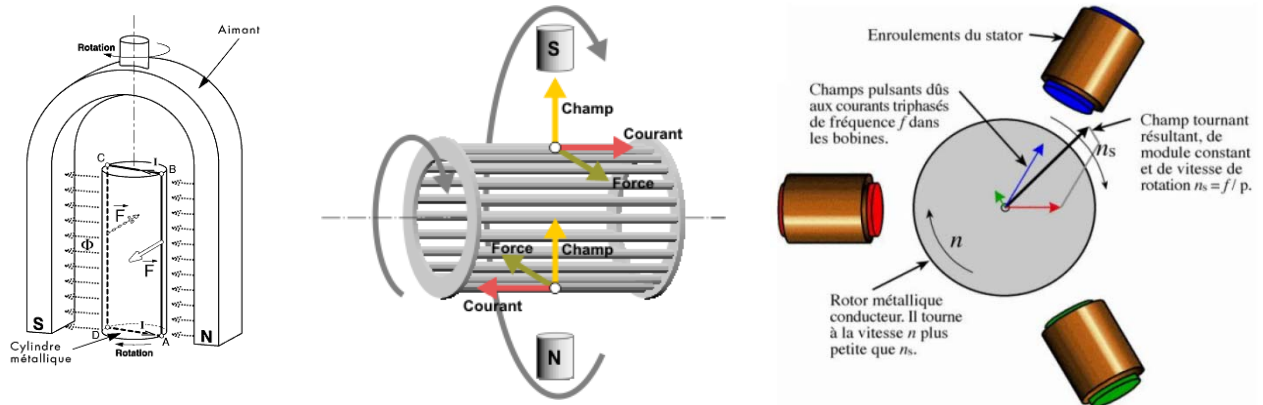


Figure 2.35. Principe du fonctionnement du moteur asynchrone.

2.6.5. Constitution du moteur asynchrone triphasé

A. Stator

Il est constitué de trois enroulements alimentés par un réseau triphasé de fréquence f . C'est l'inducteur de la machine et son rôle est de générer un champ tournant dans le rotor.

Chaque enroulement contient p bobines en série pour faire apparaître $2p$ pôles.

Le champ magnétique tourne à $n_s = f/p$.

n_s : vitesse de synchronisme (en tr/s), elle est la vitesse de rotation du champ tournant ;

f : fréquence du réseau (courants inducteurs) ;

p : nombre de paires de pôles.

Pour limiter et diminuer les pertes magnétiques le circuit magnétique du stator est feuilleté.

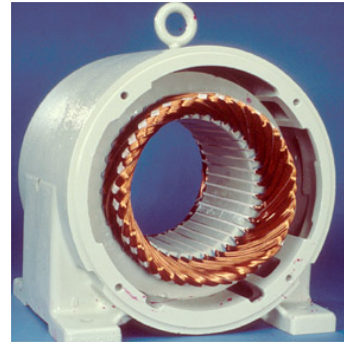


Figure 2.36. Stator d'un moteur asynchrone.

B. Le rotor

Il est l'induit de la machine et il n'est relié à **aucune source de tension extérieure** (en fonctionnement normal, il est court-circuité).

Comme il doit être parcouru par des courants de Foucault: il doit donc être en matériau conducteur.

Parmi les types les plus usités on distingue:

- Rotor bobiné

Le rotor bobiné contient un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, logé dans les encoches. Il est constitué de trois enroulements raccordés en étoile ; l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre. On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais. Ce dispositif permet de changer les propriétés électromécaniques du moteur. En fonctionnement normal, les trois balais sont court-circuités.

Avantage: Possibilité de changer la résistance des enroulements rotoriques, donc la caractéristique mécanique.

Inconvénient: fragilité des contacts glissants (balais frottant sur des bagues); coût élevé.

- Rotor à cage d'écureuil

Le rotor est constitué de barreaux de cuivre (ou d'aluminium) nues introduites dans les encoches; ces barres sont soudées ou rivées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à **une cage d'écureuil** d'où le nom de rotor à cage d'écureuil. Sa résistance électrique est très faible.

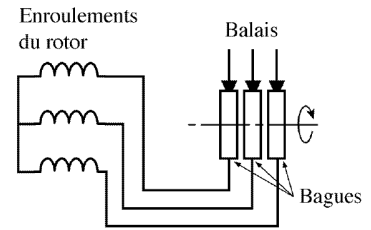


Figure 2.37. Rotor bobiné d'un moteur asynchrone.

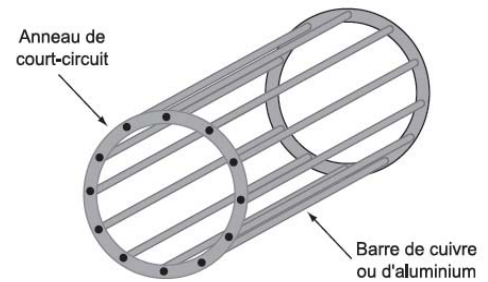


Figure 2.38. Rotor à cage d'écureuil d'un moteur asynchrone.

Avantage : robuste et peu coûteux

Inconvénient : pas de possibilité d'agir sur la caractéristique mécanique.

C. Entrefer

L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.

2.6.6. Plaque signalétique

Les moteurs asynchrones disposent d'une plaque signalétique qui constitue une sorte de carte d'identité du moteur

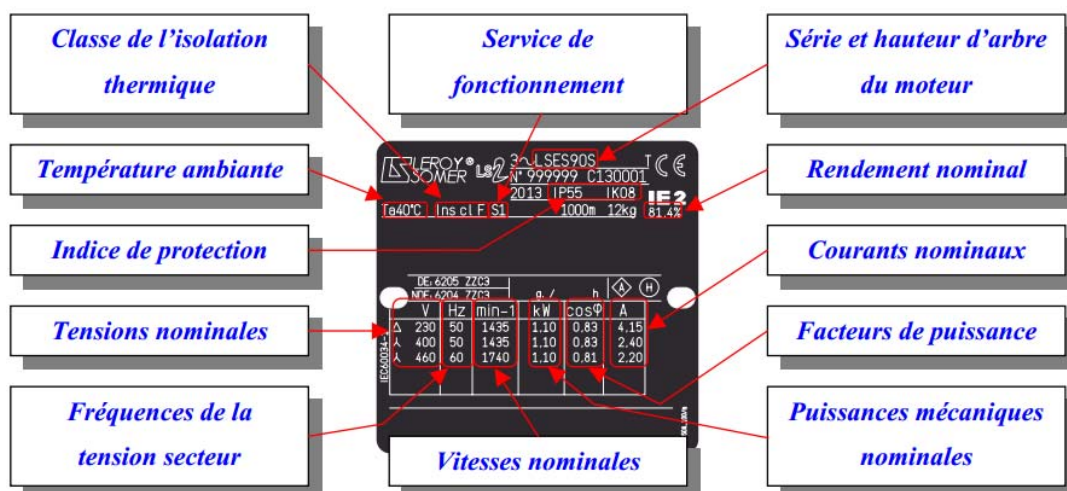


Figure 2.39. Plaque signalétique.

2.6.7. Caractéristiques

A. Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

Conséquence : le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

A vide : $g = 0$ et par conséquent $n_0 = n_s$

B. Fonctionnement en charge

Le moteur fournit maintenant de la puissance active, le stator appelle un **courant actif**.

Remarque : le moteur asynchrone peut démarrer en charge.

C. Caractéristique mécanique $T_u = f(n)$

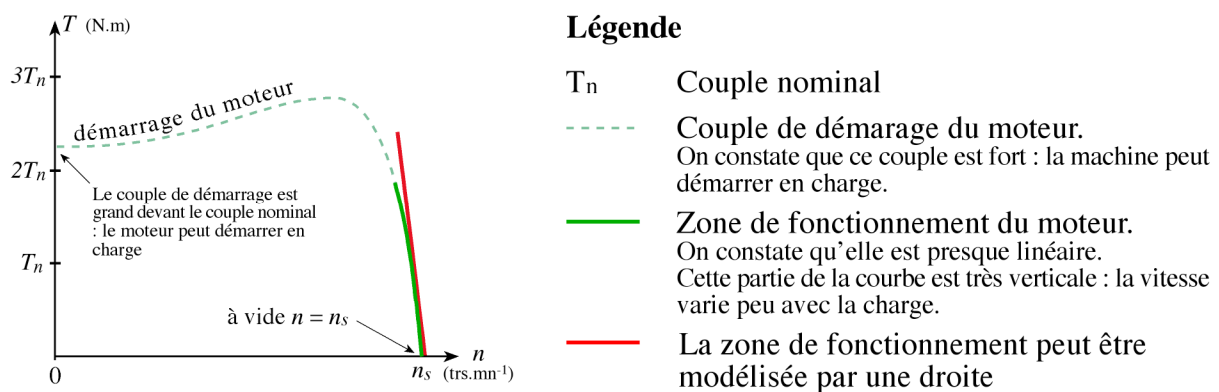


Figure 2.40. Caractéristique mécanique $T_u = f(n)$.

2.6.8. Bilan des puissances pour un moteur asynchrone

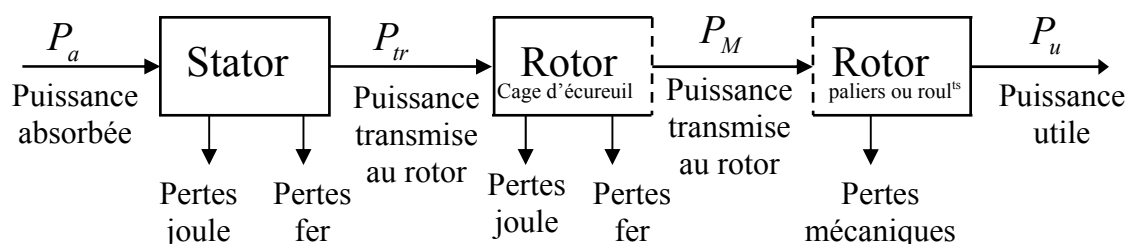


Figure 2.40. Bilan des puissances.

Puissance électrique absorbée

$$P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

U : tension entre deux bornes du moteur

I : courant en ligne

φ : déphasage entre courant et tension

Pertes par effet joule au stator

$$p_{js} = \frac{3}{2} R I^2$$

R : résistance entre deux bornes du stator

Puissance transmise : P_{tr}

$$P_{tr} = P_a - p_{js} - p_{fs}$$

Elle représente la puissance que reçoit le rotor.

Moment du couple électromagnétique : T_{em}

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ω_s : elles glissent sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse Ω . L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant de moment T_{em} .

$$T_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$$

T_{em} (N.m) ; P_{tr} (W) ; Ω_s (rad.s⁻¹)

Puissance mécanique totale : P_M

Le couple électromagnétique de moment T_{em} entraîne le rotor à la vitesse Ω . Il lui transmet donc la puissance mécanique totale P_M .

$$P_M = T_{em} \Omega \quad \text{soit} \quad P_M = T_{em} \Omega = P_{tr} \frac{\Omega}{\Omega_s} = P_{tr} (1 - g)$$

$$P_M = P_{tr} (1 - g)$$

La puissance mécanique comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.

**Pertes fer au rotor : p_{fr}
Pertes joules au rotor**

Ce type de pertes est négligeable

$$p_{jr} + p_{fr} = P_{tr} - P_M = P_{tr} - P_{tr} (1 - g) = g P_{tr}$$

$$p_{jr} \approx g P_{tr}$$

Les pertes fer du rotor sont négligeables.

Pertes collectives : p_c

$$p_c = p_{fs} + p_m$$

Les pertes collectives ne dépendent que de U, f et n. Comme ces grandeurs sont souvent constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi.

Couple de perte :

$$T_p = \frac{p_c}{\Omega_s}$$

Le couple de perte est constant quelle que soit la vitesse et la charge de la machine

Autres :

$$P_u = P_M - p_m \quad ; \quad T_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad ; \quad \eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Bilan complet :

$$P_a = P_u + p_{js} + p_{jr} + p_c$$

Bilan des puissances à vide

$$\text{A vide : } T_u = 0 \Rightarrow P_u = 0 \quad \text{et} \quad g = 0 \Rightarrow p_{jr} = 0$$

$$P_{a0} = \sqrt{3} U I_0 \cos \varphi_0 \quad \text{et} \quad p_{js0} = \frac{3}{2} R I_0^2 \approx 0 \quad (\text{puisque } I_0 \text{ est faible})$$

$$p_c \text{ à vide} \approx p_c \text{ en charge}$$

Bilan à vide :

$$P_{a0} \approx p_c$$

Il est possible de déterminer les pertes collectives par un essai à vide.

2.7. Le moteur synchrone

2.7.1. Définition

Ce moteur est caractérisé par **une vitesse de rotation constante** et indépendante de la charge entraînée, mais liée à la fréquence du réseau d'alimentation.

Ce type de moteur conserve sa vitesse de rotation jusqu'à ce qu'il soit en surcharge. Quand 'il est surchargé, le moteur décroche ; c'est-à-dire, qu'il s'arrête et se retrouve dans un mouvement oscillatoire (vibration).

Le moteur synchrone est robuste et facile à réaliser par rapport au moteur à courant continu. Son rendement est proche de 99%.

2.7.2. Domaines d'emploi

Parmi les applications des moteurs synchrones nous pouvons citer

Petites puissances, (de 1 W à 100 W environ)

- Entraînement de programmeurs horaires, ventilateurs sur micro-ordinateurs, enregistrement et reproduction audio-vidéo, modélisme (auto, trains et engins volants).
- Instrumentation médicale, micro mécanismes automobile, modélisme, mini drone...

Moyennes puissances, (de 100 W à 100 kW environ)

- Machines d'usinage numérique (UGV), commande de mécanismes (aéronautique et espace...).
- Motorisation de véhicules électriques ou hybrides (vélo à assistance électrique, scooter, Prius Toyota...).

Fortes puissances, (de 100 kW à 1,5 GW environ)

- Motorisation ferroviaire, entraînement d'hélices de bateaux de croisières
- Industrie : compresseur, centrifugeuse, mélangeuse.

2.7.3. Constitution

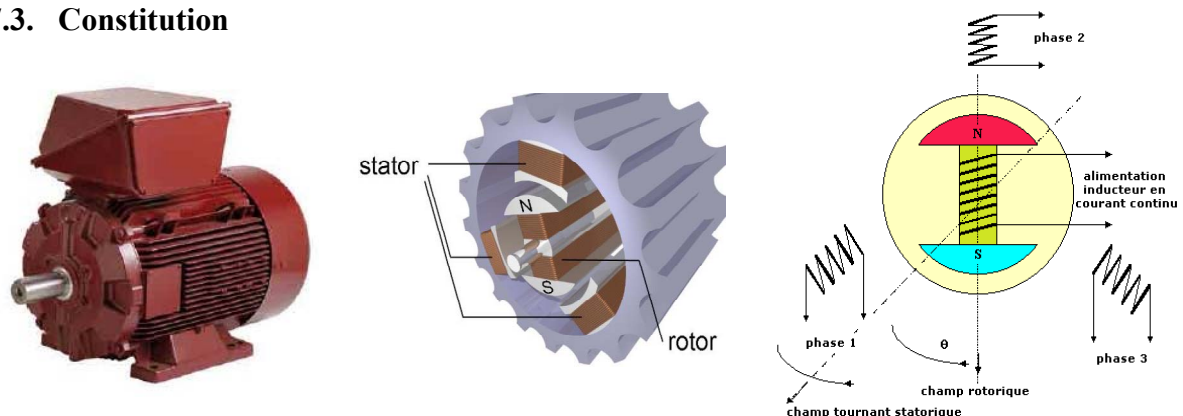


Figure 2.41. Structure d'un moteur synchrone.

A. Stator = induit

Le stator porte l'enroulement induit. Il est formé d'un, deux ou trois enroulements (machine monophasée, biphasée ou triphasée) parcourus par des courants alternatifs.

B. Rotor = inducteur

L'inducteur est porté par le rotor. On le désigne aussi « roue polaire ». Il est constitué soit, d'électroaimants parcourus par un courant continu ou d'aimants permanents.

Le rotor produit un champ magnétique **fixe** par rapport à lui-même.

2.7.4. Principe de fonctionnement

Les courants alternatifs de fréquence f dans l'induit (stator) créent dans l'entrefer du moteur synchrone, un champ magnétique tournant à la vitesse n_s .

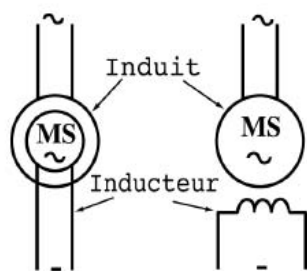
Le rotor, siège d'un champ magnétique constant, **suit le champ tournant à la même vitesse n_s** .

La vitesse de synchronisme n_s est donnée par la relation suivante

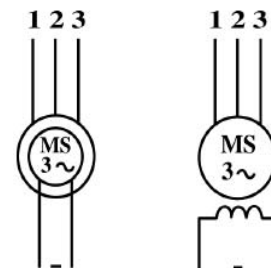
$$n_s = \frac{f}{p}$$

n_s : représente la vitesse de rotation du champ tournant en trs.s^{-1} ;
 f : fréquence des courants alternatifs en Hz ;
 p : nombre de paires de pôles.

2.7.5. Symbole



Machine monophasée



Machine triphasée

Figure 2.42. Symbole d'une machine synchrone.

2.7.6. Lecture de la plaque signalétique d'une machine synchrone



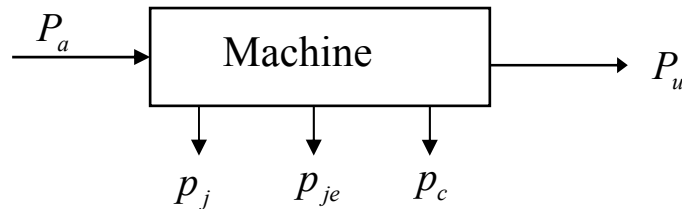
Figure 2.43. Exemple d'une plaque signalétique d'un moteur synchrone .

À partir de la plaque signalétique nous pouvons tirer les informations suivantes :

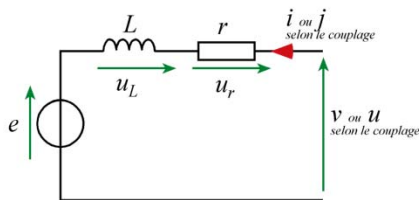
- Alimentation rotor : 60V continu (0,3A).

- Nombre de paires de pôles : $p = \frac{f}{n} = \frac{50}{1500/60} = 2$
- Rendement en moteur : $\eta = \frac{P_M}{P_E} = \frac{420}{\sqrt{3} \times 400 \times 0.75 \times 0.86 + 60 \times 0.3} \approx 90\%$
- Consommation en courant (réseau 230/400V) : 1,3A en étoile et 0,75A en triangle.

2.7.7. Bilan des puissances



Modèle d'un enroulement de l'induit (stator) e : f.é.m. à vide (V)



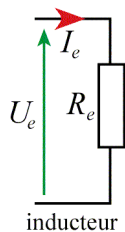
v : tension aux bornes d'un enroulement du moteur (V)

r : résistance de l'enroulement (Ω)

$X = L.\omega$: réactance synchrone (Ω)

φ : déphasage entre courant et tension

Modèle de l'enroulement de l'inducteur (rotor)



I_e : courant d'excitation (A)

U_e : tension d'excitation (V)

R_e : résistance de l'enroulement (Ω)

L'inducteur est équivalent à une résistance. Toute l'énergie absorbée à l'inducteur est perdue par effet joule :

	Monophasé	Triphasé
Moteur		
Puissance absorbée	$P_a=V I \cos \varphi+U_e I_e$	$P_a=\sqrt{3} U I \cos \varphi+U_e I_e$
Puissance utile	$P_u=\Omega_s T_u$	
Pertes pour le moteur		
Pertes joules	$p_j=r I^2+R_e I_e^2$	$p_j=\frac{3}{2} R P+R_e I_e^2$
Pertes collectives	$P_c=P_{fer}+P_{méca}$	
	Les pertes collectives peuvent s’estimer par un essai à vide	

CHAPITRE 3

Actionneurs pneumatiques et hydrauliques

3.1. Introduction

Les actionneurs pneumatiques et hydrauliques sont des actionneurs fluidiques utilisent l'énergie véhiculée par un gaz (air comprimé: actionneur pneumatique) et liquide (huile : actionneur hydraulique). Ce type d'actionneurs sont aussi bien utilisés en translation (vérins) qu'en rotation et transmettent des efforts et des couples très élevés. Néanmoins, ils nécessitent pour chaque machine une génération locale de mise en pression du fluide : des compresseurs pour les actionneurs pneumatiques et des pompes pour les actionneurs hydrauliques. En outre, La distribution est contraignante et les organes/accessoires sont généralement coûteux.

Les avantages des actionneurs pneumatiques et hydrauliques peuvent être résumés comme suit :

- Une puissance massique qui peut être 5 à 10 fois supérieure à celle des systèmes électriques similaires ;
- Un entraînement plus direct ;
- Des actions mieux réparties, chaque actionneur agissant directement sur l'un des axes du mécanisme ;
- Peuvent être utilisés dans des milieux explosifs et hostiles.

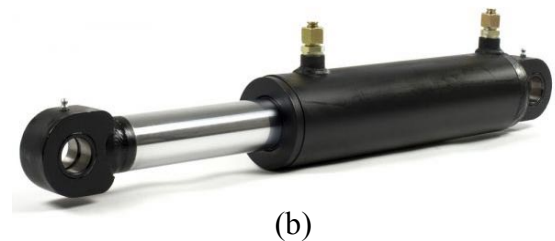
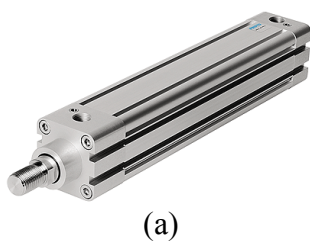


Figure 3.1. Actionneur pneumatique (a) et hydraulique (b).

3.2. Pneumatique Vs. Hydraulique

Les deux technologies pneumatique et hydraulique utilisées pour la réalisation des actionneurs se trouvent parfois en concurrence mais le plus souvent se complètent et ils sont utilisés de façon rationnelle. Le tableau ci-dessous nous présente une comparaison entre les deux technologies

Critères	Pneumatique	Hydraulique
Transmetteur d'énergie	Air	Huile
Transport de l'énergie	Conduites : Tubes, flexibles	
Transformation de l'énergie mécanique	Compresseurs, vérins, moteurs pneumatiques	Pompes, vérins, moteurs hydrauliques
Caractéristiques fondamentales	Pression : p (env. 6 bars) Q	Pression : p (30...400 bars) Q
Puissance massique	Elevée	Très élevée
Pression de position	Moins bonne	Très bonne
Facilité de réglage	Très bonne	
Transformation en mouvement linéaire	Très simple, par vérins	

Tableau. 3.1. Pneumatique vs. Hydraulique.

3.3. Actionneur pneumatique

Un actionneur pneumatique est un dispositif qui transforme l'énergie de l'air comprimé en énergie mécanique de translation, de rotation ou d'aspiration. Parmi les actionneurs pneumatiques les plus utilisés dans les systèmes automatisés on trouve :

- Le vérin pneumatique ;
- Le générateur de vide Venturi.

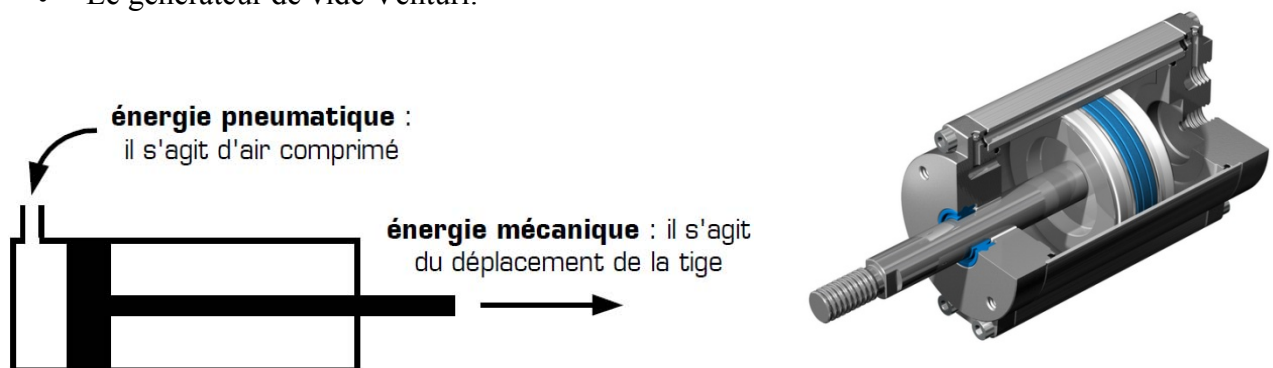


Figure 3.2. Principe de fonctionnement d'un actionneur pneumatique.

L'air comprimé est généré par un compresseur d'air entraîné par un moteur électrique. L'air aspiré dans l'atmosphère est comprimé dans un réservoir sous pression d'où partent des canalisations.

La pression de l'air s'exprime en bar. C'est la pression exercée par une force de 1 daN (déca newton) sur une surface de 1 cm².

$$1 \text{ bar} = 1 \text{ daN} / \text{cm}^2 \quad (3.1)$$

3.3.1. Forces et l'air comprimé

Il est possible de transformer une énergie potentielle créée par l'air comprimé en énergie cinétique (sous forme statique ou dynamique).

A. Force statique

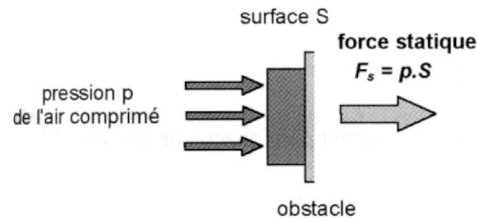


Figure 3.3. Définition de la force statique.

En faisant agir l'air comprimé sur une face immobile, une force statique F_s apparaît. Cette dernière est proportionnelle à la pression p et à sa surface d'action S :

$$\text{Force statique : } F_s = p \times S \quad (3.2)$$

avec la force F_s exprimée en daN, la pression p de l'air comprimé en bars et la surface S en cm^2 .

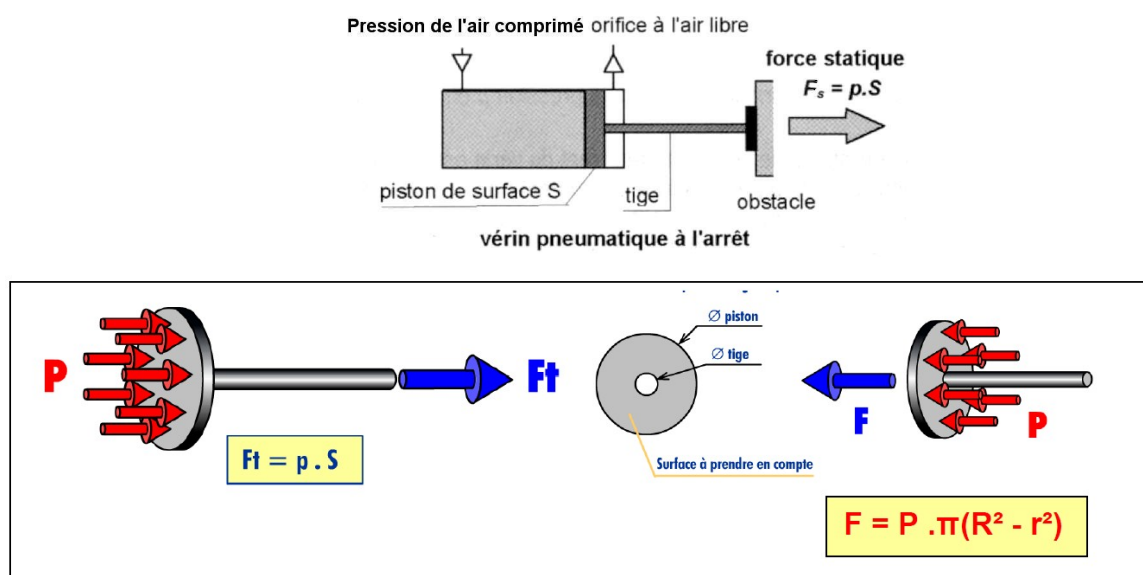


Figure 3.4. Définition de la force statique pour un vérin.

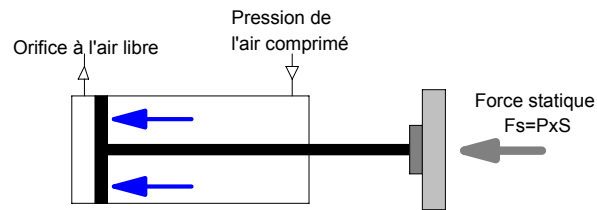
Effort en poussant $F_s = p \times S$; Effort en rentrant $F_s = p \times (S - S_{\text{tige}})$

Exemple :

Soit un vérin double effet de diamètre intérieur 50 mm et de diamètre de tige 20 mm, avec une pression de 6 bars.

La force statique tige sortie est calculée comme suit

$$F_s = p \times S = p \times \pi \times \frac{d^2}{4} \approx 6 \times \pi \times \frac{5^2}{4} \approx 117,8 \text{ daN}$$



En rentrée de tige (figure ci-dessus), la section est égale à $S_{\text{vérin}} - S_{\text{tige}}$:

$$S = \frac{\pi}{4} \times (d_{\text{vérin}}^2 - d_{\text{tige}}^2) = \frac{\pi}{4} \times (5^2 - 2^2) \approx 16,5 \text{ cm}^2$$

d'où la force statique tige rentrée :

$$F_s = p \times S \approx 6 \times 16,5 \approx 99 \text{ daN}$$

B. Force dynamique

Dans le cas où la face est mobile en translation, la force dynamique F_d obtenue durant le mouvement est plus faible puisque elle dépend des forces qui s'opposent à son déplacement : force liée à la pression opposée (dite contre-pression), force de frottement, force d'inertie.

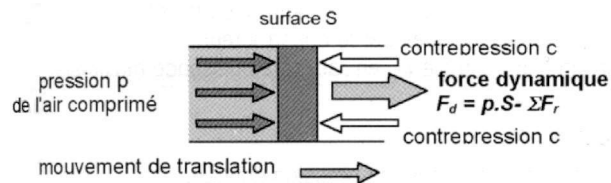


Figure. 3.5. Définition de la force dynamique.

L'expression de cette force est donnée comme suit :

$$\text{Force dynamique : } F_d = p \times S - \sum F_r \quad (3.3)$$

Avec la force dynamique F_d et la somme des forces résistantes $\sum F_r$ exprimées en daN, la pression p de l'air comprimé en bars et la surface S en cm^2 .

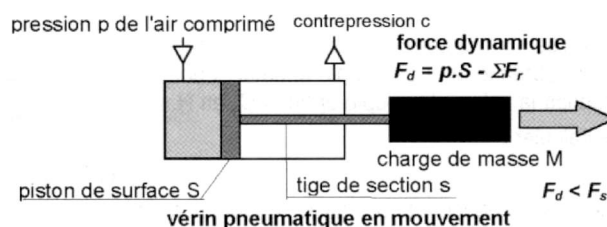


Figure. 3.6. Force dynamique d'un vérin.

Le fonctionnement des vérins pneumatiques est basé sur ces deux relations.

C. Utilisation en statique et dynamique

Comme toutes les variables de la relation de la force statique F_s sont généralement connues, le calcul de F_s ne pose pas de problème. L'exploitation du vérin exige que sa force statique F_s soit supérieure à la charge statique C_s opposée (force de blocage ou de serrage) :

$$\text{Force statique } F_s > \text{Charge statique } C_s$$

Il n'en est pas de même de la force dynamique. A défaut de connaître les forces de frottement et d'inertie propres au vérin, on définit son **rendement η** comme le rapport de la force dynamique sur la force statique. Les mesures montrent que η est compris entre 0,8 et 0,95 suivant le type et les caractéristiques du vérin. On peut donc, faute de connaître le rendement exact du vérin, estimer la force dynamique en choisissant pour η la valeur minimum de 0,8.

$$\text{D'où : Force dynamique } F_d = \text{Force statique } F_s \times 0,8$$

Pour que le comportement du vérin soit acceptable, il faut que sa force dynamique F_d soit supérieure à la charge dynamique C_d opposée (force dynamique résistante) :

$$\text{Force dynamique } F_d > \text{Charge dynamique } C_d$$

D. Taux de charge t

Pour utiliser le vérin dans de bonnes conditions, on définit le **taux de charge t** . Il est le rapport entre la charge réelle à déplacer et l'effort dynamique disponible sur la tige du vérin. C'est un paramètre qui tient compte à la fois des effets de la contre-pression et des frottements internes ; son emploi élimine les risques de broutements.

$$\text{Taux de charge } t = \frac{F_{charge}}{F_s} \quad (3.4)$$

Avec F_{charge} : effort à vaincre pour déplacer la charge ; et F_s : poussée théorique ($p.S$).

En pratique : $0,5 \leq \text{taux de charge } t \leq 0,75$. Le taux de **0,5** est usuel.

3.4. Vérin pneumatique

Un vérin pneumatique est un actionneur capable de transformer l'énergie de l'air comprimé en une énergie mécanique pour réaliser un déplacement linéaire ou rotatif limité à sa course. Il peut soulever, pousser, tirer, tourner, percuter, abloquer...

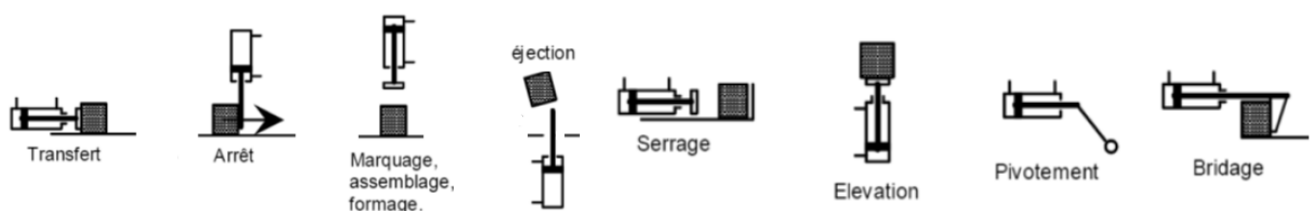


Figure 3.7. Fonctions d'un vérin pneumatique.

3.4.1. Constitution d'un vérin

Il est constitué d'un cylindre, fermé aux deux 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. Un ou deux orifices permettent l'admission d'air ou son échappement.

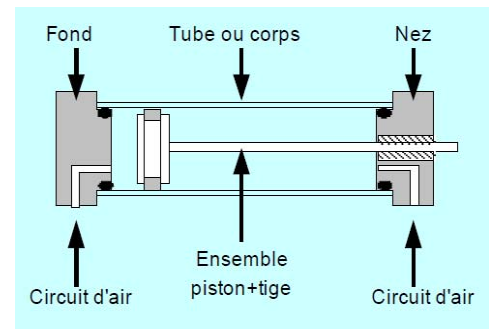
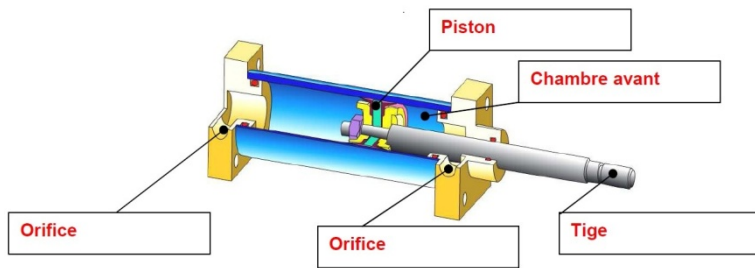


Figure 3.8. Constitution interne d'un vérin.

Un vérin est défini par sa course et par son diamètre :

- La longueur du déplacement à assurer est liée à sa course
- L'effort à développer dépend de son diamètre et de la pression du fluide.

3.4.2. Fonctionnement d'un vérin pneumatique

Considérons le vérin représenté dans la figure 3.9 avec un distributeur à deux positions. Soit P_a , la pression dans la chambre gauche (coté admission), P_e , la pression dans la chambre droite (coté échappement et appelée aussi "contre pression d'échappement") et P_u , la pression d'utilisation fournie par le secteur pneumatique. Lorsque le distributeur vient de commuter sous l'action de la commande $v+$, la chambre gauche est brusquement reliée à la pression d'utilisation et simultanément la chambre droite est mise à la pression atmosphérique.

Le déplacement de l'ensemble tige et piston s'effectue en trois phases.

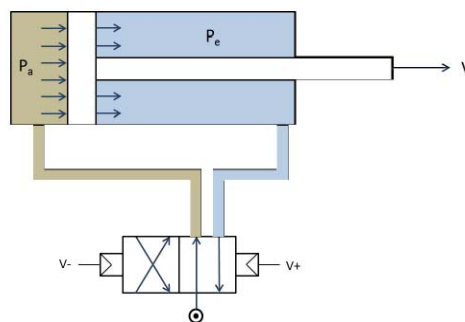


Figure 3.9. Fonctionnement d'un vérin pneumatique.

Phase 1 : démarrage, de $t = 0$ à t_1 :

La pression P_a augmente progressivement pendant que la pression P_e diminue. Le piston reste immobile durant cette phase, de courte durée.

Phase 2 : déplacement, de t_1 à t_2

Quand la différence des pressions P_a est suffisante pour vaincre les efforts résistants, le piston se déplace. Durant cette phase, la pression diminue dans la chambre gauche, puisque le débit d'air ne peut pas compenser l'augmentation du volume de la chambre, et dans la chambre d'échappement (droite) pour les raisons inverses. La vitesse du vérin augmente.

Phase 3 : arrêt, de t_2 à après

Lorsque le piston arrive en butée avant du vérin il se produit un arrêt brutal, la vitesse chute quasi instantanément. Les pressions s'équilibrent assez rapidement pour atteindre la pression d'utilisation dans la chambre gauche et la pression atmosphérique dans la chambre droite.

3.4.3. Différents types de vérins**A. Vérins simple effet (VSE)**

L'ensemble tige-piston se déplace dans un seul sens sous l'action de l'air comprimé. Le retour est effectué par un autre moyen: ressort, charge, L'orifice d'admission de l'air comprimé est mis à l'échappement pendant le retour.

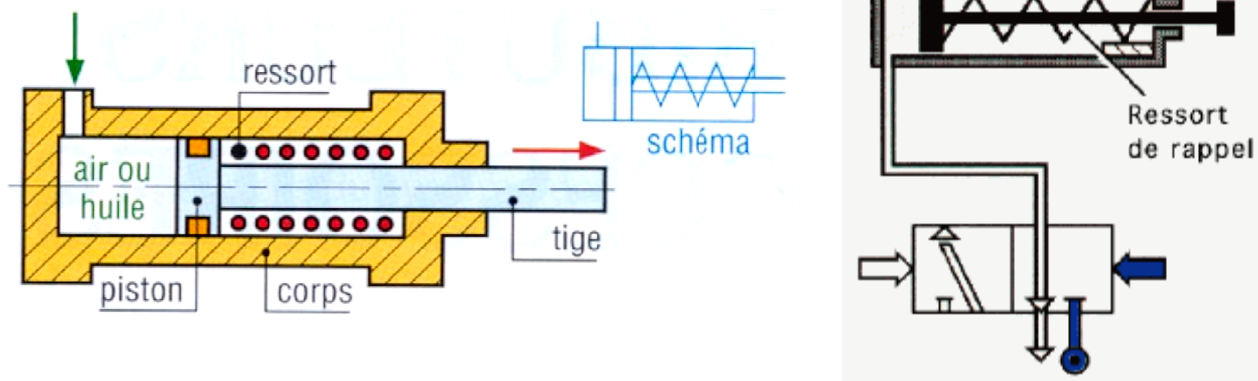


Figure 3.10. Vérin simple effet classique, rappel par ressort.

Inconvénients : à course égale, ils sont plus longs que les vérins double effet ; la vitesse de la tige est difficile à piloter en pneumatique et les courses proposées sont limitées (jusqu'à 100 mm).

Utilisation : Travaux simples (serrage, éjection, levage, emmanchements, ...).

Force statique développée : il faut tenir compte de la force R_c du ressort comprimé, d'où :

$$F_s = p \times S - R_c \quad (3.5)$$

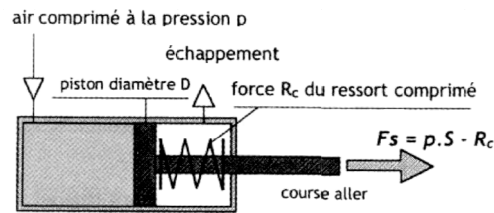
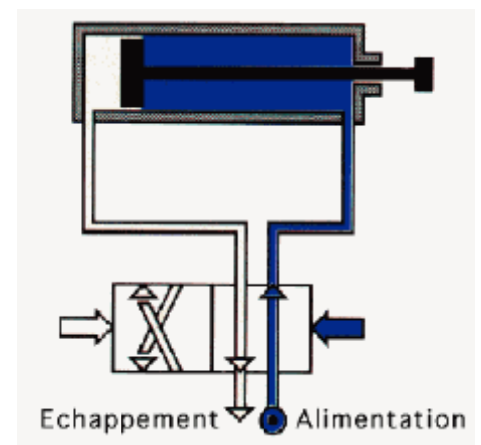
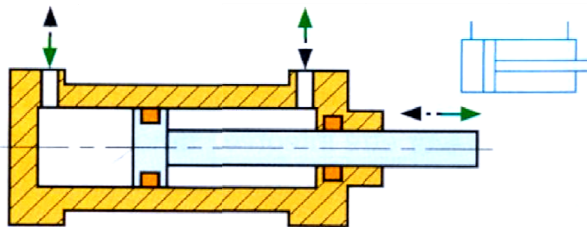


Figure 3.11. Force statique développée par un VSE en fin de sortie de tige.

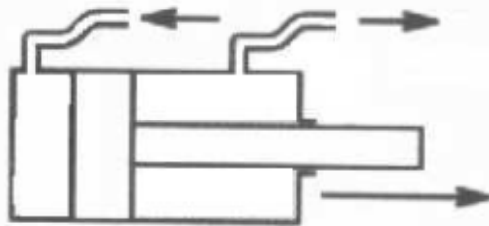
B. Vérins double effet (VDE)

L'ensemble tige-piston peut se déplacer dans les deux sens sous l'action de l'air comprimé. L'effort en poussant (sortie de la tige) est légèrement plus grand que l'effort en tirant (entrée de la tige) du moment que la pression n'agit pas sur la partie de surface occupée par la tige.

3.4.4. Principe de réalisation



Pour faire **sortir** la tige, on applique une pression dans l'orifice n°1 : l'orifice n°2 est utilisé alors pour l'échappement et la tige sort :



Pour faire rentrer la tige, on applique une pression dans l'orifice n°2 : l'orifice n°1 est utilisé alors pour l'échappement et la tige rentre :

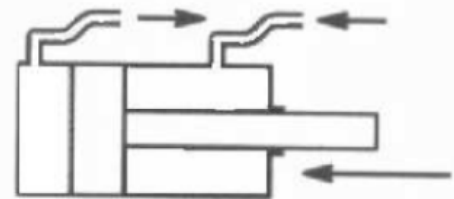


Figure 3.12. Vérin double effet .

Avantages : plus grande souplesse d'utilisation ; pilotage plus facile de la vitesse, par contrôle du débit à l'échappement ; amortissements de fin de course, réglables ou non, possibles dans un ou dans les deux sens. Ils offrent de nombreuses réalisations et options.

Inconvénients : ils sont relativement plus chers.

Utilisation : Ce type de vérins est le plus utilisé industriellement, ils présentent un grand nombre d'applications.

3.5. Distributeurs (modulateurs) d'énergie

On utilise les distributeurs pour commuter et contrôler le débit du fluide sous pression, air comprimé ou l'huile, comme des sortes d'aiguillage, à la réception d'un signal de commande qui peut être mécanique, électrique ou pneumatique. Leur rôle est:

- contrôler le mouvement de la tige d'un vérin ou la rotation d'un moteur hydraulique ou pneumatique (distributeurs de puissance) ;
- choisir le sens de circulation d'un fluide (air comprimé ou l'huile) (aiguiller, dériver, etc.) ;
- exécuter, à partir d'un fluide, des fonctions logiques (fonctions ET, OU, mémoire, etc.) ;
- démarrer ou arrêter la circulation d'un fluide (robinet d'arrêt, bloqueur, ...) ;
- Fonctionnés comme des capteurs de position (course d'un vérin).

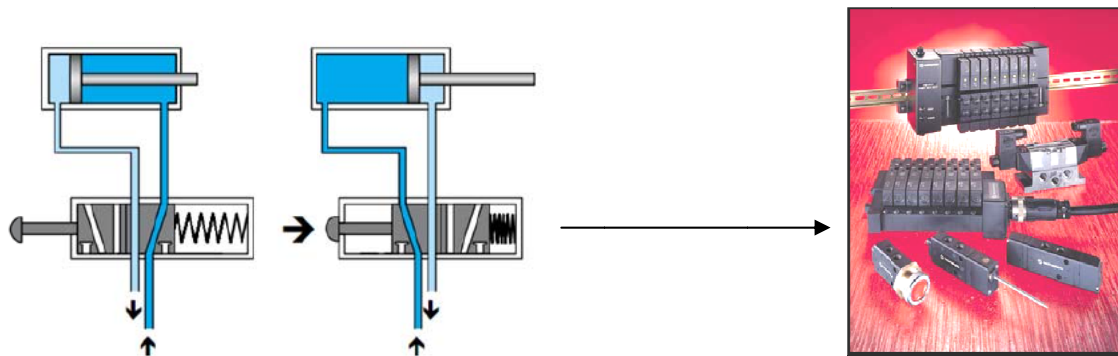


Figure 3.13. Distributeurs (modulateurs) d'énergie.

A. Symbolisation

Les distributeurs sont caractérisés par :

- par le nombre des orifices : 2, 3, 4 ou 5 ;
- par le nombre des modes de distribution ou positions : 2 ou 3 ;
- par le type de commande du pilotage qui fait changer la position : simple pilotage avec rappel par ressort ou double pilotage, avec éventuellement rappel au centre par ressort dans le cas des distributeurs à 3 positions ;
- par leur technologie de pilotage : mécanique, pneumatique ou électropneumatique ;
- par leur technologie de commutation : clapets, tiroirs cylindriques, tiroirs plans.

3.6. Différents types de distributeurs

3.6.1. Distributeur deux voies

Ce type de distributeur permet de faire l'alimentation d'une canalisation et d'en assurer la mise à l'échappement.

Il est utilisé pour alimenter un vérin simple effet.

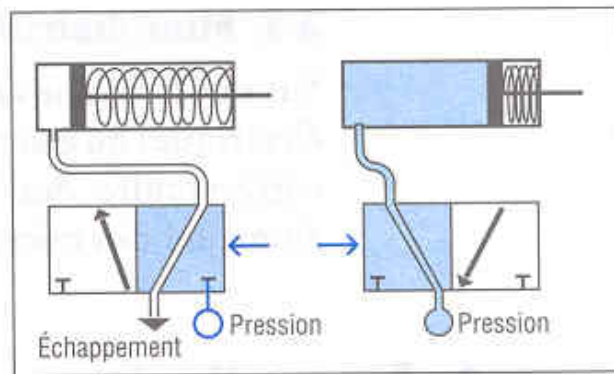


Figure 3.14. Commande d'un vérin simple effet par un distributeur 3 / 2.

3.6.2. Distributeur quatre ou cinq voies.

Ce distributeur permet d'alimenter deux canalisations et d'en assurer la mise à l'échappement. Il est utilisé pour commander les vérins doubles effet.

Il a deux positions mais peut avoir 4 orifices ou 5 orifices. (2 sorties, 1 mise en pression et 1 ou 2 orifices d'échappement).

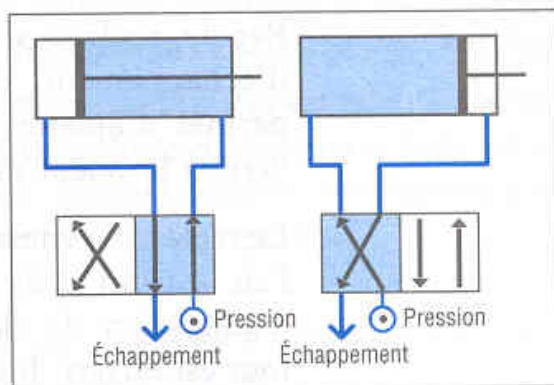


Figure 3.15. Vérin double effet commandé par un distributeur 4 / 2 (4 orifices – 2 positions).

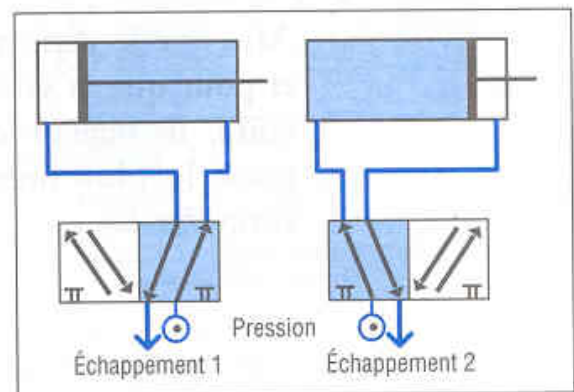


Figure 3.16. Vérin double effet commandé par un distributeur 5 / 2 (5 orifices – 2 positions).

3.6.3. Principe de la symbolisation

Nombre de cases : il indique le nombre de positions de commutation possibles, une case par position. S'il existe une position intermédiaire, la case est délimitée dans ce cas par des traits pointillés.

Flèches : dans chaque case ou position, les voies sont figurées par des flèches et ceci pour spécifier le sens de circulation du fluide entre les orifices.

T : les orifices non utilisés dans une position sont symboliquement obturés par un T droit ou inversé. Le nombre des orifices est déterminé pour une position et est égal pour toutes les positions.

Source de pression : elle est représentée par un cercle noirci en hydraulique, clair en pneumatique.

Echappement : Il est représenté par un triangle noirci en hydraulique, clair en pneumatique.

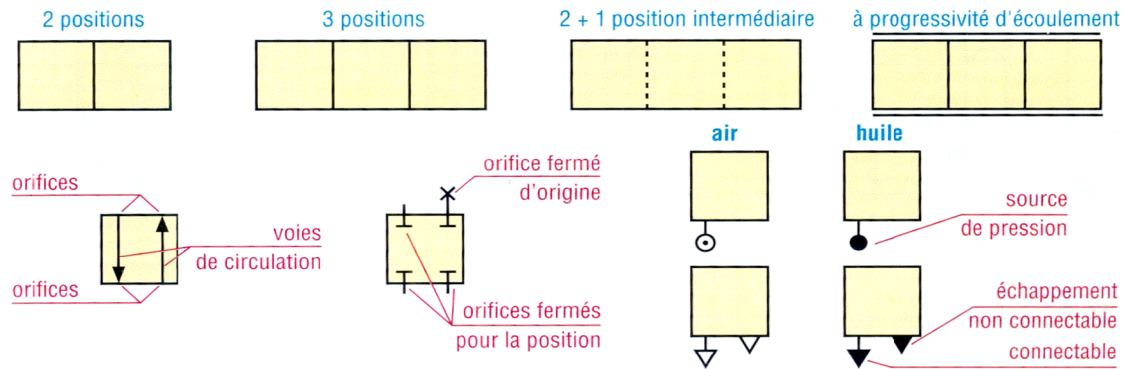


Figure 3.17. Principe de symbolisation des distributeurs.

Position initiale : les lignes de raccordement entre réseau et distributeur aboutissent toujours à la case indiquant et symbolisant la position initiale ou repos ; cette case est placée à droite pour les distributeurs à deux positions, au centre pour ceux à trois positions. Le symbole de la pression (cercle) est mis à droite de la case de repos s'il n'y a qu'un échappement (triangle), au milieu s'il y a deux échappements. Comme il est illustré par la figure suivante, les orifices sont repérés par des lettres en hydraulique et par des chiffres en pneumatique.

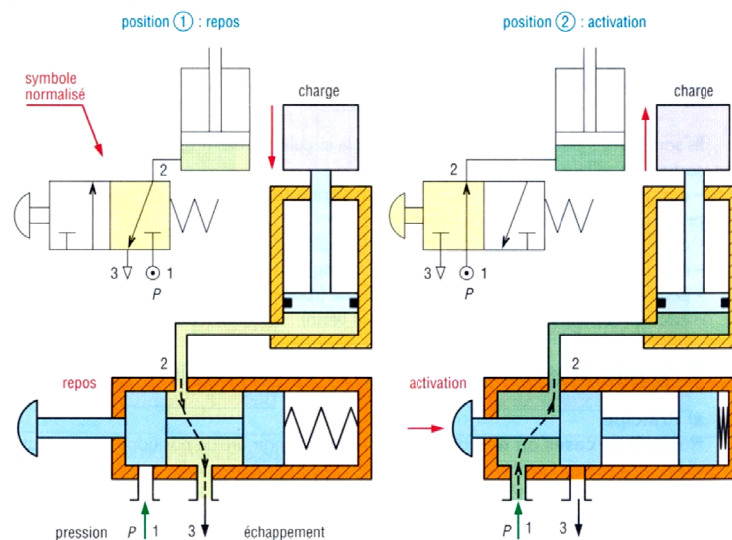


Figure 3.18. Exemple de représentation et symbolisation des positions repos et activation (distributeur 3/2).

Principaux distributeurs et principaux dispositifs de pilotage		
symboles en pneumatique	symboles en hydraulique	symboles de pilotages
2/2 N.F. 	2/2 N.F. 	général bouton poussoir levier pédale
2/2 N.O. 	2/2 N.O. 	
3/2 N.F. 	3/2 N.F. 	
3/2 N.O. 	3/2 N.O. 	
4/2 	4/3 centre fermé	poussoir ressort galet
5/2 	centre ouvert en H	
5/3 centre ouvert	centre tandem	hydraulique pneumatique
5/3 centre partiellement ouvert	centre partiellement ouvert	
N.F. : normalement fermé N.O. : normalement ouvert	1 (air) P (huile)	1 enroulement 2 enroulements inversés par détente électro-aimant + distributeur pilote électro-aimant ou distributeur pilote

Tableau.3.2. Normalisation des principaux distributeurs et des dispositifs de pilotages correspondants.

3.7. Le générateur de vide ou venturi

La technique de préhension par le vide se généralise de plus en plus dans le domaine de la manutention de pièces. Son principe repose sur le phénomène d'aspiration, elle met en œuvre une des deux techniques au-dessous pour générer une dépression :

- Pompe à vide
- L'éjecteur pneumatique appelé fréquemment Venturi

Pour des raisons de facilité de mise en oeuvre, la technique de vide basée sur le principe de l'effet venturi est la plus couramment utilisée. Nous pouvons résumer son principe comme suit : le passage de l'air comprimé dans l'éjecteur augmente la vitesse de l'air et diminue sa pression. Il se crée alors une dépression qui permet d'aspirer l'air de la ventouse ce qui donne naissance à un effort qui permet de soulever des charges.

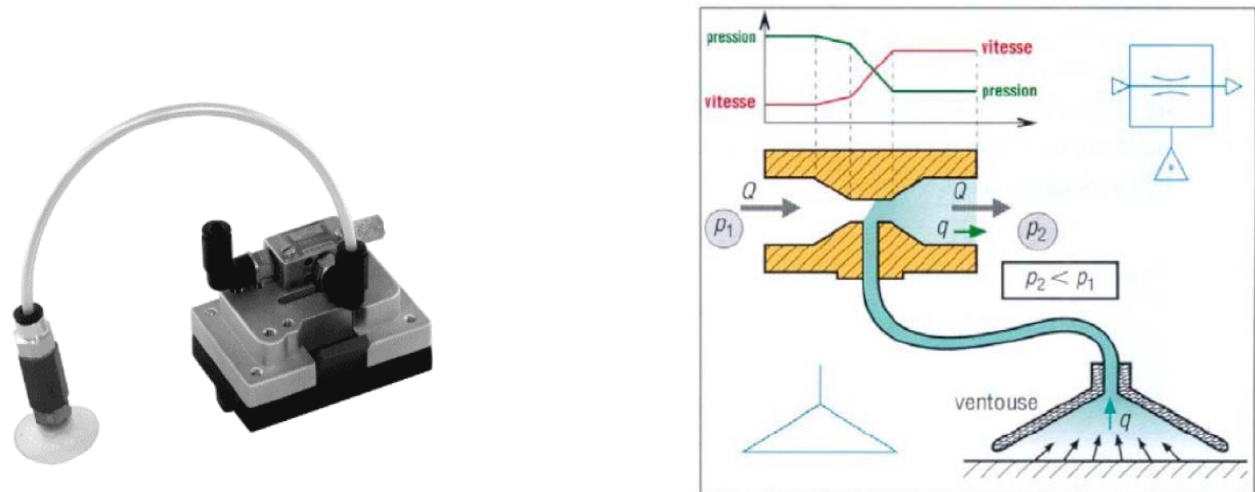


Figure 3.19. Principe du venturi.

La capacité maximale de levage d'une ventouse est calculé par :

$$C_{\max} = 1.03 \times \Delta P \times S / cs \quad (3.6)$$

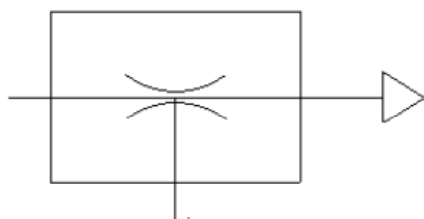
Où : $C_{\max}$: la charge maximale que peut soulever la ventouse (Kg) ;

ΔP : La dépression (bar) ;

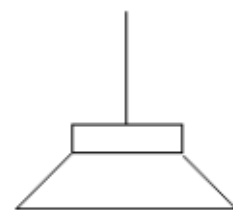
S : La surface utile de la ventouse (cm^2) ;

cs : coefficient de sécurité (= 2 si charge horizontale || = 6 si charge vertical).

Symbole



Ejecteur à effet VENTURI



Ventouse

3.8. Actionneur hydraulique

Le principe de fonctionnement d'un actionneur hydraulique repose sur la transformation de l'énergie hydraulique en une énergie mécanique.

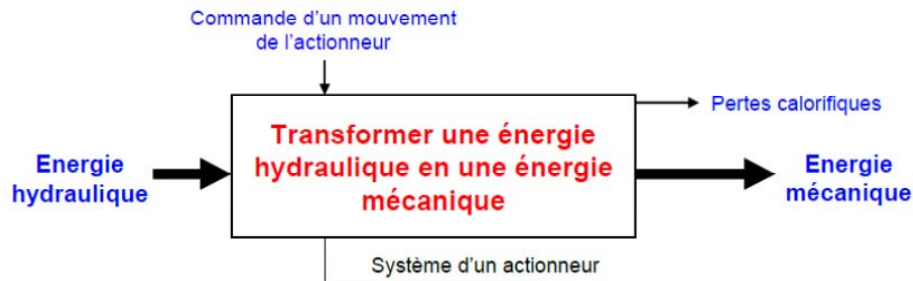


Figure 3.20. Principe de fonctionnement d'un actionneur hydraulique.

Remarque : Vue la très grande similarité entre les actionneurs hydrauliques et pneumatiques, on limitera l'étude dans cette partie aux notions les plus importantes pour les actionneurs hydrauliques.

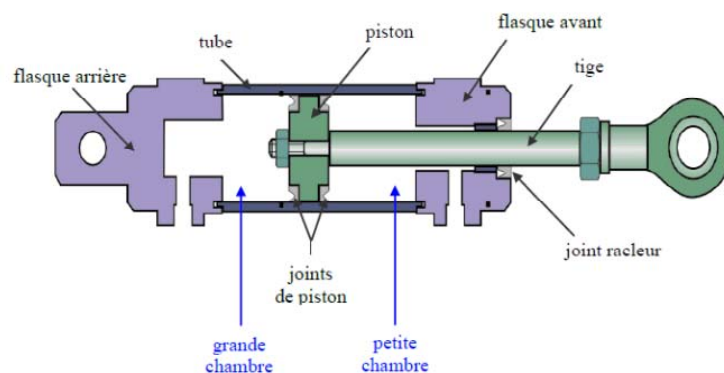


Figure 3.21. Constitution d'un actionneur hydraulique

3.8.1. Vérin hydraulique

Un vérin hydraulique est formé d'un cylindre dans lequel un fluide peut mettre en mouvement un piston solidaire d'une tige. Le piston sépare le cylindre en deux chambres : arrière et avant.

Dans le cas d'un vérin double effet, la force exercée est utilisée en sortie et en entrée de tige (pour faire sortir et rentrer la tige).

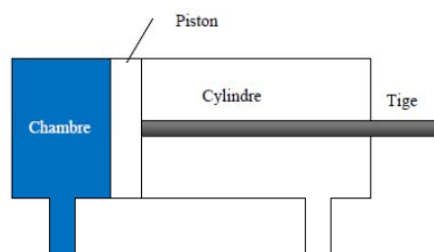
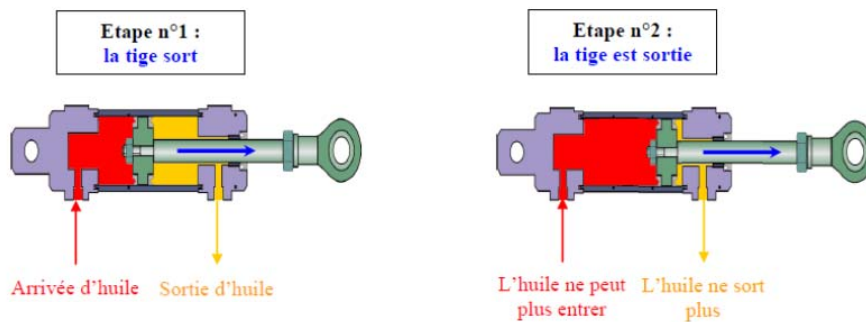


Figure 3.22. Vérin hydraulique.

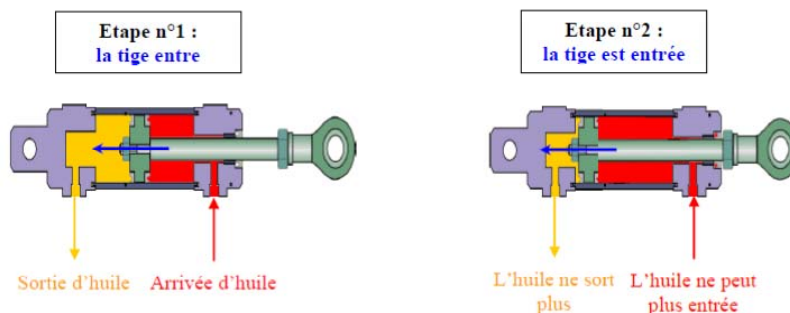
3.8.2. Fonctionnement du vérin double effet.

Pour ce type, le vérin est capable de pousser (la tige sort), de tirer (la tige entre) ou de garder sa position (bloquée).

Pour commander la sortie de la tige, de l'huile est envoyée dans la grande chambre du vérin (chambre arrière) afin de pousser sur le piston.



Pour commander l'entrée de la tige, de l'huile est envoyée dans la petite chambre du vérin afin de pousser sur le piston.



Expression de la vitesse de déplacement de la tige :

$$v = \frac{Q}{S} \quad (3.7)$$

S : surface du piston (en m^2) ;

v : vitesse de l'ensemble tige-piston (en m/s) ;

Q : débit reçu par le vérin (en m^3/s) ;

Dans le cas d'un vérin double effet, la vitesse $\hat{v}$ de rentrée de tige est :

$$\hat{v} = \frac{Q}{S - \hat{s}} \quad (3.8)$$

où $\hat{s}$ désigne la section de la tige.

Remarque : La vitesse est liée au débit, la force est liée à la pression ($F = pS$).

A. Puissance utile

Soit d la distance de déplacement de la tige parcourue pendant un temps t , alors le travail W effectué par la force au cours du déplacement est donné par : $W = F \times d$.

La puissance utile P_u du vérin est obtenue en faisant :

$$P_u = \frac{W}{t} = \frac{F \times d}{t} = F \frac{d}{t} = F \times v \quad (3.9)$$

B. Puissance absorbée

En négligeant les pertes : $P_a = P_u$

avec $F = pS$, on obtient $P_a = p \times S \times v$ et comme $v = \frac{Q}{S}$, alors $P_a = p \times S \times \frac{Q}{S}$, ce qui donne

$$P_a = p \times Q.$$

Par conséquent, un fluide hydraulique de débit Q et de pression p transporte une puissance hydraulique : $P_a = p \times Q$.

C. Rendement

Les différentes pertes dans un vérin hydraulique sont dues aux frottements ou aux fuites.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{F \times v}{p \times Q} \quad (3.10)$$

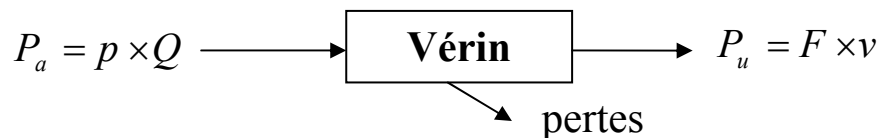


Figure 3.23. Rendement d'un vérin hydraulique .

Série de TD № 1

Exercice # 01 :

La force électromotrice d'une machine à excitation indépendante est de 210 V à 1500 tr/min. Supposant que le flux est constant, déterminer la f.e.m pour une fréquence de rotation de 1000 tr/min.

Exercice # 02 :

La plaque signalétique d'un moteur à courant continu à excitation indépendante contient les informations suivantes :

1,12 kW	1200 tr/min
induit 220 V	5,7 A
excitation 220 V	0,30 A
57 kg	

1. Calculer le couple utile nominal (en Nm).
 2. Déterminer le rendement nominal.
-

Exercice # 03 :

Un moteur à excitation indépendante a les caractéristiques suivantes :

Résistance de l'inducteur $r = 150 \, \Omega$; tension d'alimentation $u = 120 \, \text{V}$.

Résistance de l'induit $R = 0,5 \, \Omega$; tension alimentation $U = 220 \, \text{V}$.

Avec un essai à vide, on mesure la puissance absorbée par l'induit $P_V = 320 \, \text{W}$, $I_V = 1,2 \, \text{A}$.

Pour essai en charge à la vitesse $n = 1450 \, \text{tr/min}$, l'intensité $I = 18 \, \text{A}$.

Pour l'essai en charge, déterminer :

1. La puissance électromagnétique.
2. Les pertes par effet Joule au stator et au rotor.
3. Les pertes collectives.
4. La puissance utile P_U .
5. Le moment du couple utile T_U .
6. Le rendement η du moteur.

Pour l'essai à vide, trouver :

7. La f.e.m. E_V
 8. La fréquence de rotation n_V .
-

Exercice # 04 :

1. Donner le schéma électrique équivalent d'un moteur à courant continu à excitation série.
2. On donne :
 - tension d'alimentation du moteur : $U = 200 \text{ V}$
 - résistance de l'inducteur : $r = 0,5 \Omega$
 - résistance de l'induit : $R = 0,2 \Omega$
 - courant consommé : $I = 20 \text{ A}$
 - vitesse de rotation : $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$

Calculer :

- 2.1. La f.e.m. du moteur.
- 2.2. La puissance absorbée, la puissance dissipée par effet Joule et la puissance utile si les pertes collectives sont de 100 W .
 - En déduire le moment du couple utile et le rendement.
- 2.3. Au démarrage, le courant doit être limité à $I_d = 40 \text{ A}$.
 - Trouver la valeur de la résistance du rhéostat à placer en série avec le moteur.

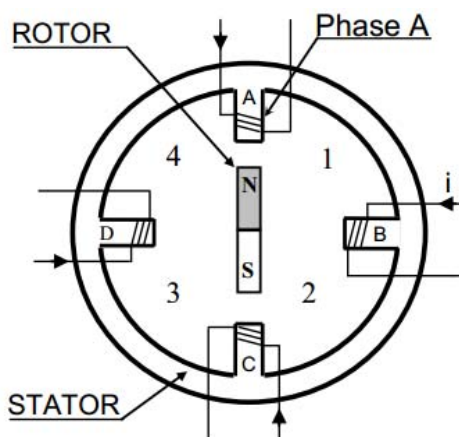
Exercice # 05 :

Un moteur pas à pas à aimant permanent possède les caractéristiques suivantes : 4 phases au stator, deux pôles au rotor, sa commutation est bidirectionnelle symétrique. Calculer

1. Le nombre de pas par tour $N_{p/t}$.
2. Déterminer l'angle d'un pas en degré puis en radian.

Exercice # 06 :

Un moteur pas à pas à aimant permanent fait 4 pas dans le sens horaire. Compléter le tableau suivant relatif à un tour du rotor dans le sens horaire pour une commutation unidirectionnelle ?



Phases excitées	Position du rotor
A-B	1
	2
	3
	4

1. Quel est le type de commutation du moteur : symétrique ou asymétrique.
2. Trouver le nombre de phases m , le nombre de paire de pole du rotor, le nombre de pas par tour ?

Série de TD № 2

Exercice # 01 :

Un moteur asynchrone contient 10 pôles par phase est alimenté par une source triphasée à une fréquence de 50 Hz. Calculer la vitesse synchrone de ce moteur.

Exercice # 02 :

Un moteur asynchrone possède 6 pôles est alimenté par une source triphasée à 60 Hz. En charge, il tourne à une vitesse de 1130 *tr* / min . Trouver sa vitesse de glissement et son glissement.

Exercice # 03 :

Un moteur asynchrone triphasé tetrapolaire est alimenté par un réseau 380V-50hz. La résistance du stator mesurée entre deux fils de phase est de 0.9. En fonctionnement à vide, le moteur absorbe un courant de 9.1A et une puissance de 420W

1. déterminer les pertes fer du stator et les pertes mécaniques en les supposant égales.
2. En charge nominale, la puissance utile sur l'arbre du rotor est de 4KW, le facteur de puissance est 0.85 et le rendement est égal à 0.87. Calculer :
 - a) L'intensité de courant absorbé
 - b) Les pertes joule au stator
 - c) Les pertes joule au rotor
 - d) Le glissement et la vitesse de rotation
 - e) Le couple utile

Exercice # 04 :

Un moteur asynchrone triphasé, dont le stator est monté en étoile, est alimenté par un réseau 380 V entre phase 50 Hz. La résistance de chaque enroulement du stator est $R = 0,4 \text{ W}$. Avec un essai à vide, le moteur tournant pratiquement à 1500 *tr*/min, la puissance absorbée est de $P_V = 1150 \text{ W}$, le courant par fil de ligne est $I_V = 11,2 \text{ A}$.

Pour un essai avec la charge nominale sous la même tension de 380 V, 50 Hz, nous avons obtenu les résultats suivants:

- glissement: 4%,
- puissance absorbée: 18,1 kW,
- courant en ligne: 32 A.

1. Essai à vide:

- a) Calculer les pertes par effet Joule dans le stator lors de l'essai à vide. Que peut-on dire des pertes par effet Joule dans le rotor lors de cet essai?
 - b) En déduire les pertes dans le fer sachant que les pertes mécaniques valent 510 W.
2. Essai en charge:
- a) Quelle est la valeur du facteur de puissance nominal et la fréquence nominale de rotation.
 - b) Trouver la fréquence des courants rotoriques si le glissement est 4%. Que peut-on en déduire pour les pertes dans le fer du rotor?
3. Déterminer les pertes par effet Joule dans le stator et dans le rotor en charge nominale.
4. Déterminer la puissance utile et le rendement du moteur en charge nominale.
5. Déterminer le moment du couple utile nominale.

Exercice # 05 :

Un moteur synchrone est alimenté par un réseau triphasé de 400 V (entre phase) à 50 Hz et sa puissance nominale est 22 kW, et il contient 2 paires de pôles ($p = 2$). Il fonctionne à son régime nominal, avec un rendement de 92% et un facteur de puissance ($\cos(\varphi)$) de 0,87. Calculer sa vitesse de rotation, son couple à l'arbre, sa puissance active et son courant de phase.

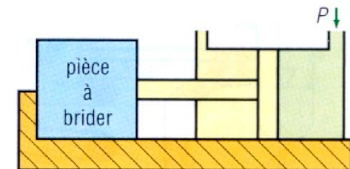
Série de TD № 3**Exercice # 01 :**

On veut déplacer une charge de 500 daN avec un vérin double effet, la pression disponible étant de 6 bar avec un taux de charge estimé à 60 %.

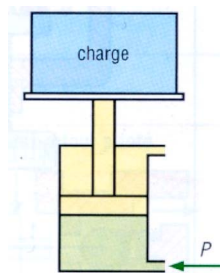
- Quel est le diamètre du piston du vérin nécessaire?
- Déterminer l'effort exercé en rentrée de tige du vérin choisi si les diamètres respectifs du vérin et de sa tige sont 16 cm et 4 cm ?

Exercice # 02 :

L'effort de serrage que doit exercer le vérin de bridage est de 6500 N. Quelle est la pression théorique nécessaire si le diamètre d'alésage D est de 125 mm. Que devient cette pression s'il existe des frottements engendrant des pertes de 5 % ?

**Exercice # 03 :**

La masse de la charge à soulever est de 700 kg (avec l'accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Les pertes par frottements internes sont estimées à 12%, la pression d'alimentation en air est de 600 kPa (6 bars). Supposons que les forces d'inertie et la contre-pression sont négligées, déterminer dans ce cas le diamètre du piston.

**Exercice # 04 :**

Nous voulons lever horizontalement une charge de 100 kg avec une ventouse ronde et pour un niveau de vide de 80 %. Quel est le diamètre de ventouse à prévoir ?

Exercice # 05 :

Le piston d'un vérin a une section de 40 cm². Ce vérin reçoit un débit de 24 l/min. Déterminer :

- La vitesse V de déplacement en sortie de tige.
- La durée de la course si celle-ci fait 20 cm.