

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

Université M'hamed Bougara-Boumerdes



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Polycopie de Cours

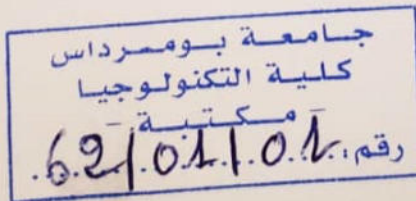
Rédigé par

Dr. AOUZELLAG Haroune

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Automatique

Intitulé : Actionneurs



Année Universitaire : 2020/2021



République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université M'hamed Bougara-Boumerdes



Faculté de Technologie
Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Polycopie de Cours

Rédigé par
Dr. AOUZELLAG Haroune
Filière : Génie Electrique
Spécialité : Automatique

Intitulé : Actionneurs

Année Universitaire : 2020/2021

©Copyright by Dr. AOUZELLAG Haroune 2021
All Rights Reserved

Table des matières

Avant-Propos.....
INTRODUCTION GENERALE	2
1 Introduction.....	3
2 Machine à courant continu	3
2.1 Principes de la machine à courant continue	3
2.2 Mise en équations de la machine à courant continu	4
2.3 Symbole.....	6
2.4 Type de moteurs à courant continu.....	6
2.4.1 Machine CC à excitation séparée	6
2.4.2 Machine CC à excitation série.....	7
2.4.3 Machin CC à aimants permanents.....	8
2.5 Caractéristiques électriques et mécaniques d'une machine CC.....	8
2.5.1 Caractéristiques de la machine CC à excitation séparée.....	8
2.5.2 Machine à courant continu à excitation série	9
2.6 Bilan de puissance	10
3 Moteurs Pas à Pas.....	12
3.1 Introduction	12
3.2 Moteur Pas à Pas à aimants permanents.....	12
3.2.1 Moteur unipolaire.....	12
3.2.2 Moteur bipolaire	13
3.2.3 Avantages du moteur à aimant permanent.....	14
3.2.4 Inconvénient du moteur à aimant permanent	14
3.3 Moteur à reluctance variable.....	14
3.3.1 Constitution	15
3.3.2 Fonctionnement.....	15
3.3.3 Caractéristiques	16

3.4	Moteur hybride.....	16
3.4.1	Fonctionnement.....	16
3.4.2	Performance.....	16
3.5	Comparaison des trois moteurs.....	17
4	Machine asynchrone monophasée.....	17
4.1	Introduction.....	17
4.2	Principe de fonctionnement.....	18
5	Le moteur asynchrone.....	20
5.1	Généralités et utilisations.....	20
5.2	Symboles.....	20
5.3	Principe de fonctionnement.....	21
5.4	Constitution du moteur asynchrone triphasé.....	22
5.5	Plaque signalétique :.....	23
5.6	Caractéristique mécanique du moteur.....	23
5.6.1	Couple de démarrage C_d	24
5.6.2	Point de fonctionnement.....	24
5.7	Bilan de puissance d'un MAS.....	25
6	Moteur Synchrone.....	25
6.1	Définition.....	25
6.2	Domaine d'emploi.....	26
6.3	Constitution.....	26
6.4	Principe de fonctionnement.....	26
6.5	Symbole.....	27
6.6	Bilan de puissance.....	27
7	Exercices d'application :.....	28
1	Introduction.....	29
2	Actionneurs pneumatiques.....	29

2.1	Force disponible.....	30
2.1.1	Force statique.....	30
2.1.2	Force dynamique.....	30
2.1.3	Taux de charge (t).....	31
3	Les vérins.....	31
3.1	Vérin simple effet (VSE).....	33
3.2	Vérin double effet (VDE).....	34
3.3	Caractéristiques d'un vérin.....	35
3.3.1	Effort théorique développé.....	35
3.3.2	Rendement.....	37
3.3.3	Contre pression d'échappement.....	37
4	Technique du vide : les ventouses.....	39
4.1	Dimensionnement d'une ventouse.....	39
4.2	Type de ventouses.....	40
1	Introduction.....	42
2	Les pompes volumétriques.....	42
2.1	Principe de fonctionnement :.....	42
2.2	Types de pompes volumétriques :.....	42
2.3	Grandeur associées aux pompes.....	46
3	Les vannes et les électrovannes.....	48
3.1	Définition et schématisation :.....	48
3.2	Éléments constituant une vanne.....	48
3.3	Capacité de débit d'une vanne.....	48
3.4	Coefficient du débit (CV).....	49
3.5	Caractéristique des vannes de régulations.....	49
3.6	Exercices d'applications.....	51
	Bibliographie.....	54

Liste des figures

Figure 1-1: Constitution d'une machine CC	3
Figure 1-2 : Principe de génération du mouvement dans une MCC	4
Figure 1-3 : Interaction entre le rotor et le stator	4
Figure 1-4: Symboles des moteurs à CC	6
Figure 1-5: Schéma équivalent d'un moteur à CC excitation séparée.....	6
Figure 1-6: Schéma équivalent d'un moteur CC à excitation série	7
Figure 1-7: Caractéristique Tension/Vitesse	8
Figure 1-8: Caractéristique Couple/Vitesse de la machine CC à excitation séparée	9
Figure 1-9: Caractéristique couple/courant de la machine CC à excitation séparée.....	9
Figure 1-10: Caractéristique couple/vitesse de la machine CC à excitation série	10
Figure 1-11: Bilan de puissance dans un moteur à courant continu	11
Figure 1-12 : Rotor a deux pôles, 5 dents par pôle	16

Avant-Propos

Ce cours intitulé Actionneurs, est conçu pour les étudiants de troisième année Licence Automatique. Ce cours fondamental sur les actionneurs s'étale sur trois chapitres et permettra aux étudiants une familiarisation avec les trois technologies d'actionneurs présentes dans les systèmes automatisés : électrique, pneumatique et hydraulique. Il permettra aussi d'acquérir la capacité de faire la différence entre les différentes technologies, faire le bon choix sur le type d'actionneur, pouvoir le dimensionner et l'intégrer dans un système automatisé.

Ce cours commence par une introduction générale présentant les actionneurs, suivie de trois chapitres. Le chapitre 1 est consacré aux actionneurs électriques qui présentent la technologie la plus utilisée soit dans l'industrie ou pour usage domestique. Ce chapitre met l'accent sur la classification des types de machines électriques qui permet de mettre en évidence les caractères communs et les différences fondamentales relatives aux diverses structures. Ceci permet de faire un choix plus aisé de la structure de machine la mieux adaptée à l'application

visée. Le chapitre est divisé en grands titres selon le type de moteur électrique et leurs utilisations en automatique, à savoir les moteurs à courant continu, les moteurs pas à pas, les moteurs asynchrones et enfin les moteurs synchrones. Dans le chapitre 2, les actionneurs pneumatiques sont définis ainsi que leurs principes de fonctionnement et étude sur les vérins ainsi que les ventouses est abordée. Le chapitre 3 est consacré aux actionneurs hydrauliques et spécialement aux pompes hydrauliques. .

Le module en question comporte une charge hebdomadaire de 15 semaines, telle que, 01 cours de 01h30 min, et un TD de 1h30 min, répartis sur un volume horaire semestriel de 45h00. L'évaluation finale sera de la manière suivante :

- Contrôle continu 40 % ;
- Examen finale 60 % ;

INTRODUCTION GENERALE

Dans une machine, un actionneur est un organe qui convertit l'énergie reçue, qui peut porter une information digitale, en un travail qui modifie le comportement ou l'état d'un système. Dans les définitions de l'automatisme, l'actionneur appartient à la partie opérative d'un système automatisé. On peut classer les actionneurs selon l'énergie utilisée, phénomène physique utilisable ou le principe mis en œuvre.

A travers l'utilisation de l'énergie électrique, on peut avoir un mouvement rotationnel grâce à un moteur électrique ou un mouvement linéaire en utilisant un électroaimant. Un vérin pneumatique ou hydraulique génère un mouvement à partir d'une énergie mécanique transmise par un fluide gazeux ou liquide. Et un moteur thermique exploite l'énergie produite par la combustion d'un fluide ou d'un gaz dans une chambre fermée. La pression induite par la combustion pousse alors le piston générant ainsi un mouvement linéaire transformé en rotation.

Il faut évoquer que le développement de l'automatisation et de l'électronique de puissance a provoqué une augmentation exponentielle de l'utilisation des actionneurs dans les différents secteurs.

En automobile, on trouve l'utilisation des moteurs électriques pour la traction électrique en plus des moteurs thermiques. Différentes pompes hydrauliques sont utilisées dans les véhicules thermiques pour le transport des combustibles et les fluides de refroidissement.

En électronique, les actionneurs sont introduits dans certaines applications parmi les plus exigeantes (ex : contrôle des mouvements, températures et fluides). Cela avec une vaste gamme de produits standard et spécifiques à l'industrie, ex. : composants à vide poussé et à nettoyage par voie humide, thermo-refroidisseurs, ioniseurs, et bien d'autres produits spécialisés.

Dans le domaine médical, des fabricants de médicaments aux fabricants d'instrumentation avec toujours plus d'intérêt pour les solutions miniaturisées et économes en énergie.

Dans le domaine alimentaire, la majorité des tâches effectuées par les opérateurs sont automatisées et reprises par des actionneurs électriques ou pneumatiques.

Chapitre 1 – Les actionneurs électriques en régime continu

1.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement des moteurs électriques. Nous verrons les notions de puissance, de pertes et de rendement ainsi que les caractéristiques de chaque type de moteurs électriques. Nous étudierons de manière simplifiée comment ces moteurs peuvent générer un couple mécanique à travers une alimentation électrique. Des notions sur le magnétisme et sur le triphasé sont nécessaires pour percevoir le fonctionnement de ses convertisseurs d'énergie. Les moteurs électriques se situent dans la partie opérative dans un système automatisé.

1.2 Machine à courant continu

1.2.1 Principes de la machine à courant continu

La machine électrique à courant continu (MCC) est un transformateur d'énergie électrique sous forme continue en énergie mécanique, dans le cas d'un fonctionnement moteur. Dans le cas d'un fonctionnement générateur, elle permet de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique sous forme continue.

La MCC est conçue de trois parties principales : le stator, le rotor et les collecteurs comme cela est montré dans la figure 1.1.

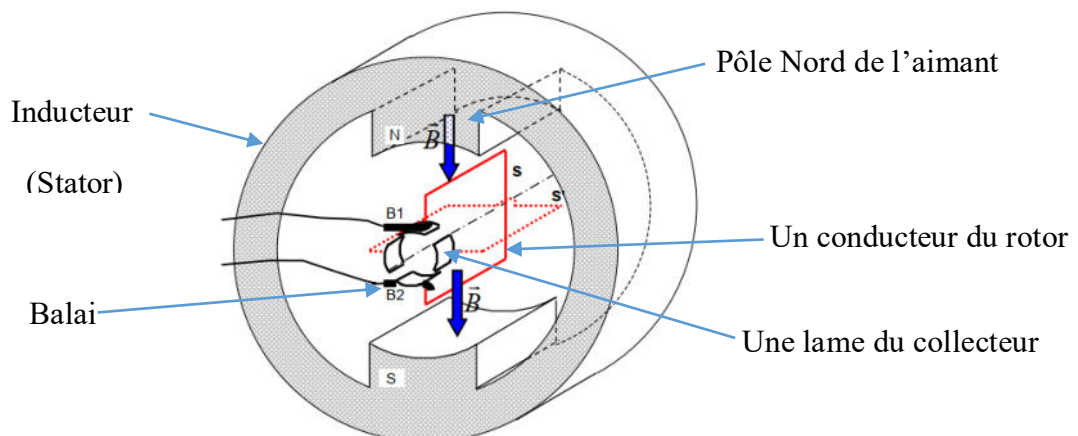


Figure 0-1: Constitution d'une machine CC

- Le stator : la partie immobile équipée d'aimants permanents ou d'électroaimants. elle présente « l'inducteur » qui engendre le champ magnétique d'induction \vec{B} .

- Le rotor : une bobine mobile qui reçoit le champ d'induction \vec{B} , appelé aussi l'induit.
- Les collecteurs : les conducteurs de l'induit (bobines) sont soudés à leurs extrémités à des lames conductrices sur lesquelles frottent des éléments fixes appelés **balais**. L'ensemble des lames forme le collecteur. Il permet de relier le rotor à la source électrique.

La MCC est une machine réversible, elle peut être utilisée en moteur pour générer un mouvement de rotation comme elle peut être aussi utilisée en génératrice.

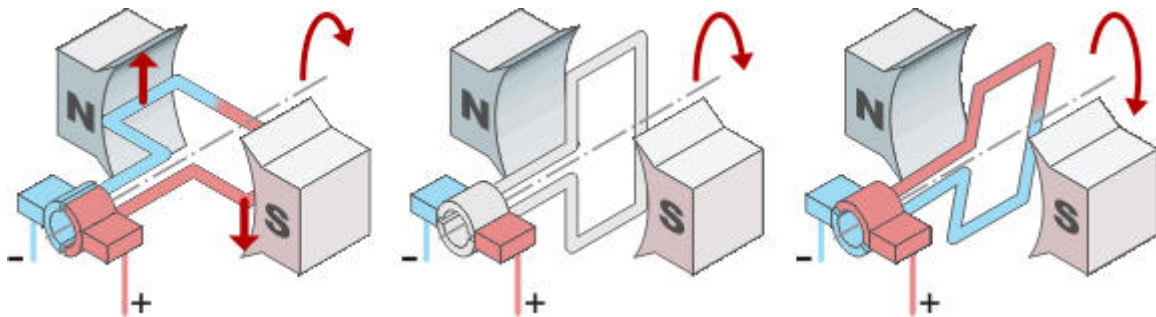


Figure 0-2 : Principe de génération du mouvement dans une MCC

Le stator et le rotor créent tout les deux, des champs magnétiques fixes et l'interaction entre ces deux champs crée un mouvement du rotor. Toutefois, les conducteurs de la partie mobile voient un courant alternatif en fonction de la rotation du rotor.

1.2.2 Mise en équations de la machine à courant continu

La figure XX montre les différentes grandeurs principales présentées dans une machine électrique à courant continu. On trouve deux courants l'un de l'induit noté I et celui de l'inducteur noté I_{ex} . Le courant I_{ex} crée le flux magnétique φ .

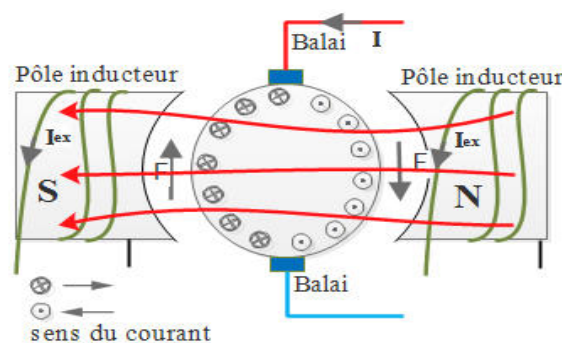


Figure 0-3 : Interaction entre le rotor et le stator

La rotation du rotor (ensemble des conducteurs) dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice notée E .

Cette f.e.m induite s'exprime par la relation suivante :

$$E = k \varphi \Omega \quad (1.1)$$

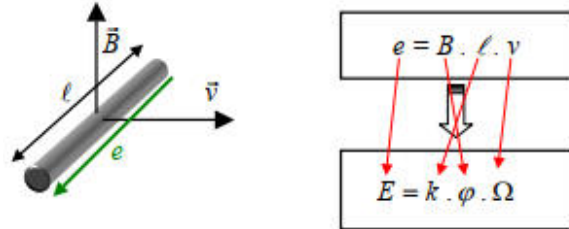
Avec :

E : f.e.m entre balais (Volt) ;

k : constante qui dépend de la constitution de la machine ;

Ω : vitesse angulaire (rad/s) ;

φ : flux magnétique crée par un pôle (Wb).



a) Puissance électromagnétique

La puissance électromagnétique, dans le cas moteur, est la puissance de passage entre la puissance électrique vers la puissance mécanique, elle est sous forme magnétique. Vice versa, dans le cas générateur.

La puissance électromagnétique est conservée pendant, d'où l'expression suivante :

$$P_{em} = E \cdot I_a = C_{em} \cdot \Omega \quad (1.2)$$

A savoir que C_{em} : couple électromagnétique (N.m).

b) Couple électromagnétique

La formule du couple électromagnétique est tirée de celle de la puissance en remplaçant l'expression de E dans cette dernière. Comme suivant :

$$E \cdot I_a = C_{em} \Omega \Rightarrow C_{em} = \frac{(k \varphi \cancel{\Omega}) I_a}{\cancel{\Omega}} \quad (1.3)$$

$$C_{em} = k \varphi I_a \quad (1.4)$$

Le couple est proportionnel au courant qui traverse l'induit et au flux crée par l'inducteur.

1.2.3 Symbole

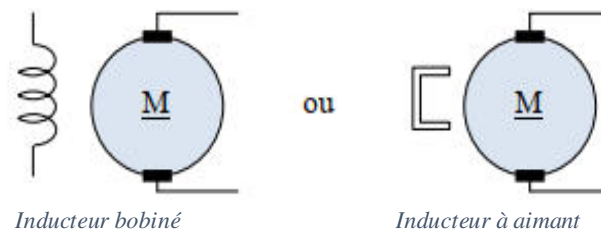


Figure 0-4: Symboles des moteurs à CC

Le symbole « M » pour désigner que c'est une « Machine » et le trait en dessous de la lettre M pour spécifier le régime continu.

1.2.4 Type de moteurs à courant continu

Selon l'alimentation de l'inducteur par rapport à l'induit, on peut trouver trois principales configurations du moteur à courant continu (CC).

1.2.5 Machine CC à excitation séparée

L'inducteur d'une machine CC à excitation séparée est constitué de plusieurs spires alimentées par une source continue différente de celle de l'induit. Dans ce cas, la résistance du bobinage est relativement grande.

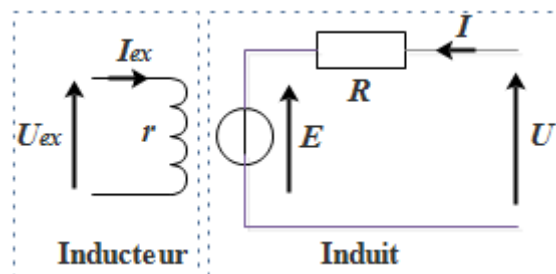


Figure 0-5: Schéma équivalent d'un moteur à CC excitation séparée

Les équations qui régissent ce type de moteur sont comme suivantes :

Equations électriques :

$$U_{ex} = r I_{ex} \quad (1.6)$$

$$\text{Et } U = R I + E \quad (1.7)$$

Equations du couplage électromécanique :

$$E = k \phi \Omega \quad (1.8)$$

$$\text{Et } C_{em} = k \phi I \quad (1.9)$$

Puisque le flux ϕ est constant, on peut écrire :

$$E = k' \Omega \quad (1.10)$$

$$\text{Et } C_{em} = k' I \quad (1.11)$$

En posant :

$$k' = k \varphi \quad (1.12)$$

1.2.6 Machine CC à excitation série

Pour un moteur à excitation série, l'inducteur est monté en série avec l'induit. Donc, il y'a un seul courant qui traverse les deux circuits.

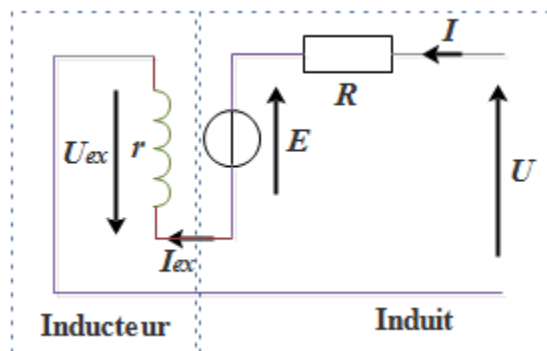


Figure 0-6: Schéma équivalent d'un moteur CC à excitation série

Les équations qui régissent ce type de moteur sont comme suivantes :

Equations électriques :

$$U = (R + r) I + E \quad (1.13)$$

puisque le courant $I_{ex} = I$.

Equations du couplage électromécanique :

$$E = k \varphi \Omega \quad (1.14)$$

$$\text{Et } C_{em} = k \varphi I \quad (1.15)$$

Puisque le flux φ dépend de I , alors :

$$\varphi = k' I \quad (1.16)$$

$$E = k'' I \Omega \quad (1.17)$$

$$\text{Et } C_{em} = k'' I^2 \quad (1.18)$$

à savoir que : $k'' = k k'$

1.2.7 Machin CC à aimants permanents

Cette machine a les mêmes équations et comportement qu'une machine à excitation séparée. Cependant, le circuit inducteur est remplacé par des aimants permanents.

1.2.8 Caractéristiques électriques et mécaniques d'une machine CC

Chaque machine se comporte selon le type d'excitation de l'inducteur.

1.2.9 Caractéristiques de la machine CC à excitation séparée

a) Caractéristique Vitesse/Tension d'alimentation

Pour réaliser cette caractéristique, il suffit de varier la tension d'alimentation et de noter la vitesse correspondante à chaque tension puis dessiner la courbe de la vitesse en fonction de la tension (U). Cette étude se réalise à vide (sans charge).

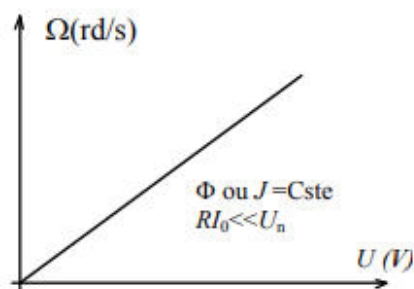


Figure 0-7: Caractéristique Tension/Vitesse

L'équation de la droite : $\Omega = \frac{U - RI_0}{k \varphi} \approx a U$ où $a = \frac{1}{k \varphi}$

La caractéristique est une droite croissante avec une pente de « a » qui passe approximativement par l'origine (si la chute de tension à vide est négligeable).

Selon la caractéristique, la vitesse varie linéairement avec la tension d'alimentation.

Remarque : il ne faut jamais supprimer le courant d'excitation lorsque l'induit est alimenté en tension. Le moteur peut s'emballer dans ce cas (vitesse augmente brusquement).

b) Caractéristique couple/vitesse

Cette caractéristique se réalise en charge pour observer l'évolution du couple en fonction de la vitesse.

On a :

$$U = E + R I = k' \Omega + R I \quad (1.19)$$

$$\text{et } C_{em} = k' I \quad (1.20)$$

Après développement, on aura :

$$C_{em} = \frac{k'}{R} U + \frac{k'^2}{R} \Omega \quad (1.21)$$

Qui peut s'écrire sous forme : $C_{em} = a \Omega + b$ où $a = \frac{k'^2}{R}$ et $b = \frac{k'}{R} U$

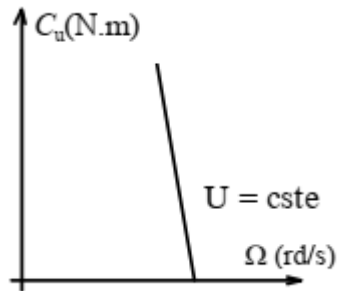


Figure 0-8: Caractéristique Couple/Vitesse de la machine CC à excitation séparée

Le résultat obtenu est une droite descendante presque parallèle à l'axe des couples.

On peut dire que le moteur à excitation séparée présente une légère stabilité en vue de sa vitesse lorsque la charge variée.

c) Caractéristique couple/courant d'induit

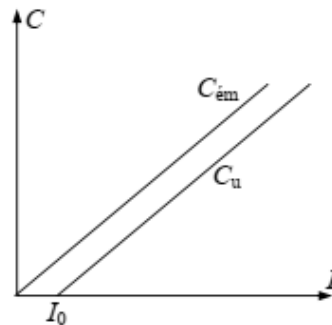


Figure 0-9: Caractéristique couple/courant de la machine CC à excitation séparée

On a : $C_{em} = k' I$

On aura une droite croissante qui passe par l'origine pour le couple électromagnétique mais décalée de I_0 pour le couple utile. Ce courant I_0 est absorbé par le circuit magnétique.

1.2.10 Machine à courant continu à excitation série

a) caractéristique couple/courant d'induit :

On a la formule du couple : $C = k'' I^2$

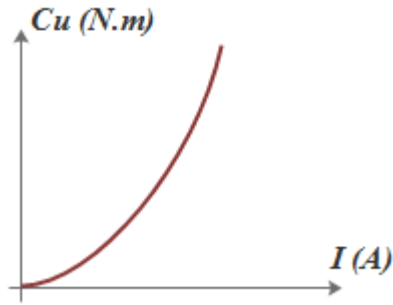


Figure 1.9 : Caractéristique couple/courant de la machine CC à excitation série

La courbe est une demi-parabole croissante.

Pratiquement, cette courbe présente une saturation en couple car à une certaine valeur du courant, le circuit magnétique d'excitation se sature.

b) caractéristique couple/vitesse

On va écrire l'expression du couple en fonction de la vitesse :

$$C = k'' I^2 = k'' \left(\frac{U}{R + k'' \Omega} \right)^2 \quad (1.22)$$

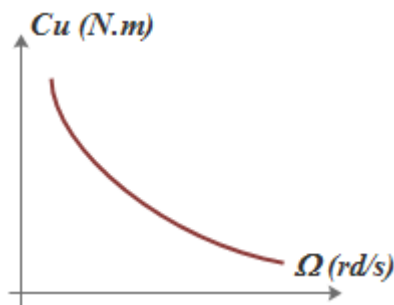


Figure 1-0-10: Caractéristique couple/vitesse de la machine CC à excitation série

Selon la courbe donnée par l'équation du couple, celui-ci diminue rapidement avec l'augmentation de la vitesse. Cependant le couple est très élevé au démarrage. Ce type de machine est très conseillé pour la traction et le levage.

1.2.11 Bilan de puissance

La puissance absorbée par l'induit s'exprime de la façon suivante :

$$P_{induit} = U I \quad (1.23)$$

La puissance absorbée par l'inducteur pour un moteur à excitation séparée :

$$P_{inducteur} = U_{ex} I_{ex} = r_{ex} I_{ex}^2 \quad (1.24)$$

Qui est nulle dans le cas où l'inducteur est remplacé par des aimants permanents, et pour le moteur série :

$$P_{\text{inducteur}} = r_{ex} \cdot I^2 \quad (1.25)$$

La puissance totale absorbée regroupe les deux puissances absorbées par l'inducteur et l'induit :

$$P_{abs} = U_{ex} I_{ex} + U I \quad (1.26)$$

Les pertes regroupent :

- les pertes par effet Joule dans l'inducteur et l'induit :

$$\begin{cases} p_{j_{\text{inducteur}}} = U_{ex} I_{ex} = r I_{ex}^2 \\ p_{j_{\text{induit}}} = R I^2 \end{cases} \quad (1.27)$$

- Les pertes fer (P_{fer}) dépendent de la tension et regroupent les pertes par Hystérésis et les pertes de Foucault :

$$P_{fer} = P_{Hys} + P_{Fouc} \quad (1.28)$$

- Les pertes mécaniques qui dépendent de la vitesse :

$$P_{meca} = A + B \times \Omega + C \times \Omega^2 + \dots \quad (1.29)$$

Remarque : Les pertes (fer + mécanique) sont déterminées par un essai à vide et regroupées dans une seule variable appelée « perte constante ».

La puissance mécanique est donc

$$P_{meca} = C_u \Omega = U \cdot I - p_{joule} - p_{fer} - p_{meca} = P_{em} - p_{fer} - p_{meca} \quad (1.30)$$

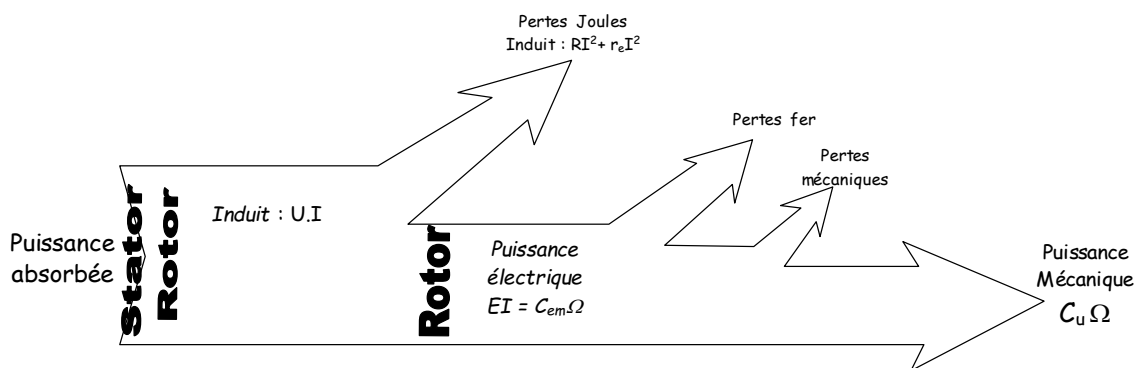


Figure 1-11: Bilan de puissance dans un moteur à courant continu

Le rendement est le rapport entre la puissance utile récupérée dans le rotor et la puissance électrique fournie pour la machine, qui peut être calculé des différentes manières suivantes :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{C_u \cdot \Omega}{U \cdot I + U_{ex} I_{ex}} = \frac{U \cdot I - p_{joule} - (p_{fer} - p_{mec})}{U \cdot I + U_{ex} I_{ex}} \quad (1.31)$$

Remarque : dans le cas d'un moteur à aimant permanent ou série, la puissance absorbée se limite au produit entre la tension d'alimentation et le courant absorbé.

Pour le couple utile, il suffit de retrancher le couple de perte du couple électromagnétique pour le calculer.

$$C_u = C_{em} - C_{perte(fer+méca)} \quad (1.32)$$

1.3 Moteurs Pas à Pas

1.3.1 Introduction

Les moteurs Pas à Pas permettent de traduire une impulsion électrique en une rotation, en particulier un positionnement précis sans la nécessité d'une régulation. Donc, la vitesse de rotation dépend de la fréquence du signal d'impulsion.

Chaque impulsion du signal provoque au rotor du moteur une rotation d'un angle bien précis appelé 'Pas' ou 'incrément mécanique'.

Selon le type de circuit magnétique utilisé, on trouve trois groupes de moteur Pas à Pas :

- Les moteurs à aimant permanent ;
 - Les moteurs à reluctance variable ;
 - Les moteurs hybrides.

On trouve ces moteurs presque dans tout le matériel informatique, à savoir : les lecteurs de disquettes, les disques durs, les scanners et les imprimantes. Ainsi que dans le domaine de la robotique.

1.3.2 Moteur Pas à Pas à aimants permanents

Le rotor est un aimant permanent dont la rotation se fait en interaction avec le champ magnétique d'une paire ou deux paires de pôles du stator.

1.3.3 Moteur unipolaire

Le rotor est constitué par un aimant permanent comportant une paire de pôles. Le stator, comprend deux circuits magnétiques décalés de 90°. Les enroulements à point milieu sont alimentés avec une polarité toujours de même signe, d'où le nom d'unipolaire.

Si on alimente la demi-bobine 'S' par l'entrée I22, le rotor va tourner de façon à ce que le pôle sud du rotor rejoigne le pôle nord de stator. Et si on alimente les entrées I11 jusqu'à I22 d'une façon successive, on aura une rotation de 360° avec un pas de 90°.

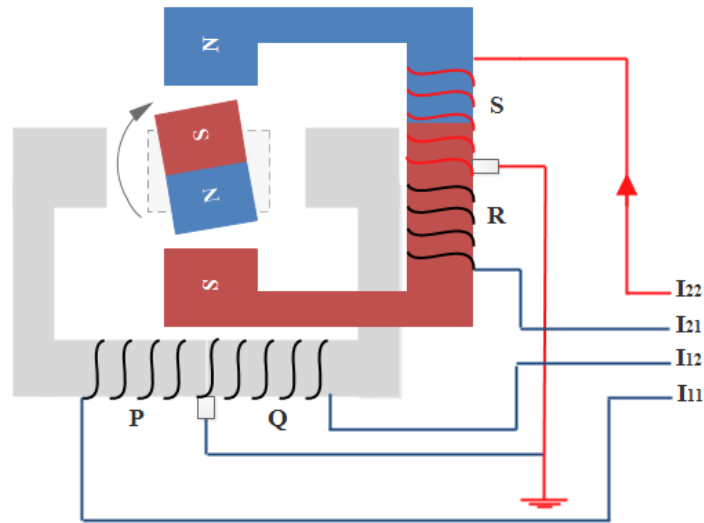


Figure 1.12 : Moteur unipolaire avec une rotation de 90 °

En alimentant deux pôles voisins au même temps, on aura une rotation en demi-Pas de 45°.

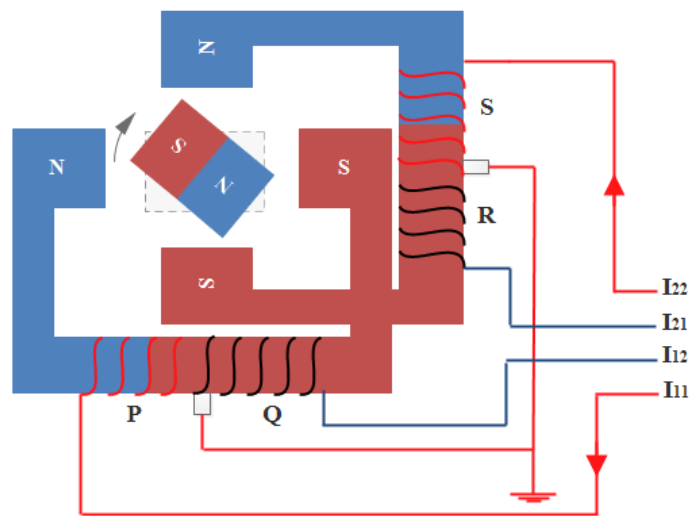


Figure 1.13 : Moteur unipolaire avec une rotation de 45 °

1.3.4 Moteur bipolaire

Les enroulements statiques n'ont pas de point milieu et chaque enroulement est alimenté successivement par une polarité positive puis négative.

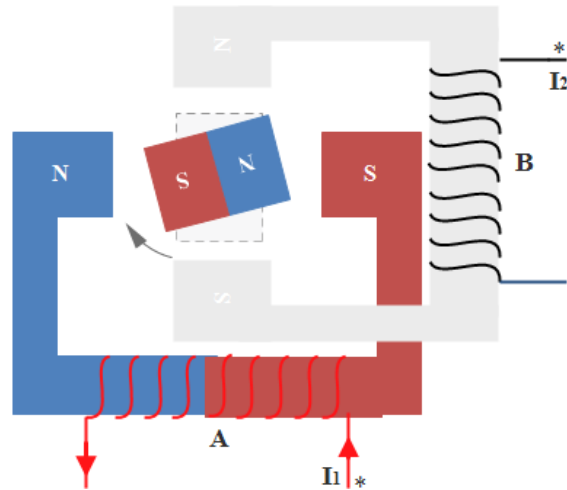


Figure 1.14 : Moteur bipolaire

Tableau 2.1 : Ordre d'impulsion sur les phases

Impulsion	Bobine A	Bobine A	Bobine B	Bobine B
T1	+	-		
T2			+	-
T3	-	+		
T4			-	+

1.3.5 Avantages du moteur à aimant permanent

- Bon marche ;
- Dimensions réduites ;
- Bon rendement ;
- Grand angle de Pas.
- Couple d'utilisation plus élevé par rapport au moteur à reluctance variable ;

1.3.6 Inconvénient du moteur à aimant permanent

- Puissance faible ;
- Couple résiduel lorsque le moteur est hors tension ;
- Vitesse faible.

1.4 Moteur à reluctance variable

Il utilise le principe physique du flux maximum. Le stator est constitué de fer doux, qui va se placer de telle sorte que le flux magnétique qui le traverse soit maximum.

1.4.1 Constitution

Le moteur à réluctance variable est constitué, comme la majorité des moteurs électriques, d'un rotor composé d'un cylindre en fer doux dans lequel sont taillées des dents (pôles du rotor), et d'un stator qui se forme après un empilement de tôles découpées. Le nombre de Pas existant dans un tour se calcul par la formule suivante :

$$n_p = \frac{n_s n_r}{n_s + n_r} \quad (1.33)$$

n_s : nombre de dents du stator ;

n_r : nombre de dents du rotor ;

n_p : nombre de pas par tours.

1.4.2 Fonctionnement

Les quatre phases A, B, C et D sont connectées à une source continue E via des interrupteurs d'électronique de puissance (ex : IGBT) qui sont représentés par S_A , S_B , S_C et S_D , respectivement. Donc, l'axe de rotor rejoint celui de la phase qui était alimentée. Le rotor garde cette position jusqu'à ce que cette phase soit déconnectée et une autre phase sera connectée à la source.

L'angle du Pas de rotation est exprimé de la façon suivante :

$$\alpha = \frac{360}{n_s n_r} \quad (1.34)$$

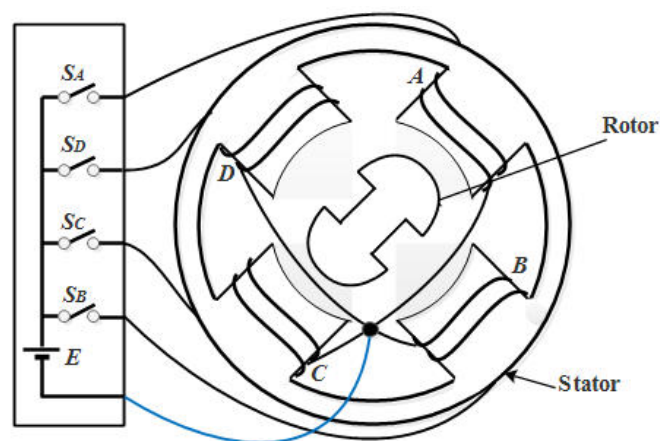


Figure 1.15 : Moteur à réluctance variable

Pour faire tourner le rotor d'un angle de 45° selon ce montage, il suffit d'alimenter deux phases au même temps. Par exemple, alimenter la phase A puis la phase A+B puis la phase B pour un déplacement d'un demi-Pas en la phase A vers la phase B.

1.4.3 Caractéristiques

- Bonne résolution ;
- construction simple mais délicate ;
- couple développé est très faible ;
- absence de couple résiduel avec le moteur hors tension.

1.5 Moteur hybride

Ce type de moteur superpose le principe de fonctionnement des moteurs à aimant permanent et à reluctance variable et combine leurs avantages.

Il y'a deux disques au rotor qui sont dentés et décalés. Entre eux, se trouve un aimant permanent.

1.5.1 Fonctionnement

Le nombre il a le même principe de fonctionnement que le moteur à reluctance variable.

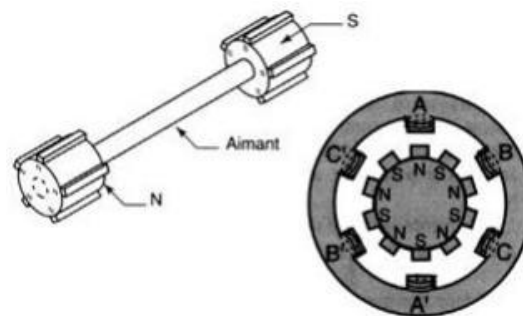


Figure 0-12.16 : Rotor a deux pôles, 5 dents par pôle

1.5.2 Performance

Il corrige le majeur inconvénient du moteur à reluctance variable au niveau du couple. Par conséquent, Le couple moteur est élevé avec une bonne résolution. On peut aller au-delà de 400 Pas par tour avec des modèles spéciaux. Mais, il devient coûteux avec les performances rajoutées.

1.5.3 Comparaison des trois moteurs

Comparaison des performances des trois types de moteurs pas à pas			
Type de moteur	A aimant permanent	A réluctance variable	Hybride
Résolution	Moyenne	Bonne	Elevée
Couple moteur	Elevé	Faible	Elevé
Sens de rotation dépend :	-du sens du courant -de l'ordre d'alimentation des bobines	de l'ordre d'alimentation des bobines	-du sens du courant -de l'ordre d'alimentation des bobines
Fréquence du travail	Faible	Grande	Grande

1.6 Machine asynchrone monophasée

1.6.1 Introduction

Les machines asynchrones triphasées sont largement connues par rapport aux machines monophasées grâce à l'industrie où l'alimentation triphasée est largement disponible. Mais, il existe plusieurs raisons qui favorisent l'utilisation des machines asynchrones monophasées, surtout pour les charges moins (1 kW), dans l'industrie ou le domestique.

Le principe de fonctionnement reste le même sauf que pour une machine monophasée, le couple de démarrage n'existe pas. Donc, il faut rajouter un dispositif pour réaliser son démarrage.

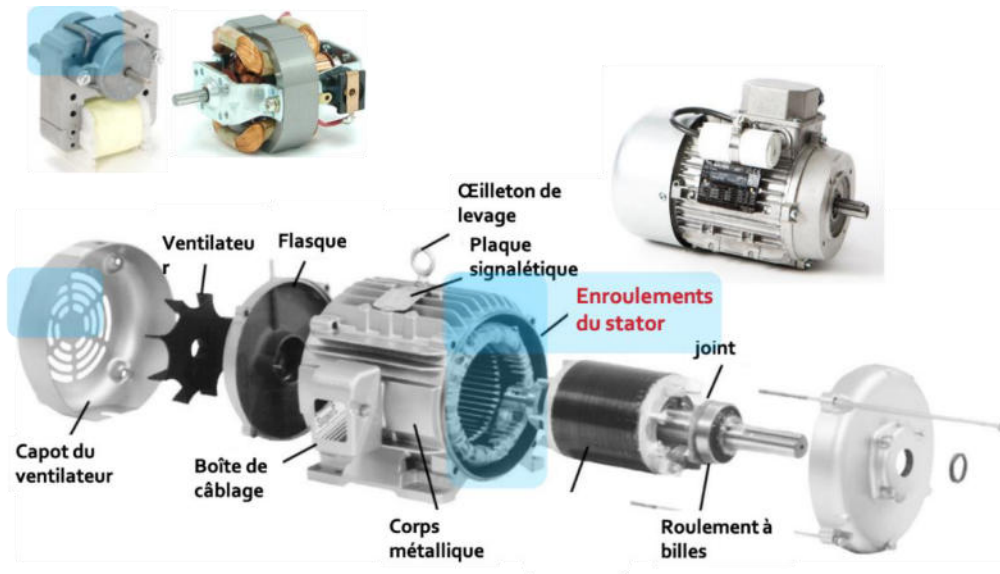


Figure 1.17 : Vue éclatée d'un moteur asynchrone

Parmi ces machines, on trouve la machine asynchrone monophasée avec condensateur à deux enroulements dans le stator, fonctionnant tous les deux. Un de ces enroulements est branché en série avec une capacité C , dont la valeur est calculée de telle manière à avoir un champ circulaire non elliptique. Les deux enroulements sont décalés d'un angle de 90° électrique.

1.6.2 Principe de fonctionnement

Supposons que le rotor soit au repos et que l'alimentation monophasée soit donnée à l'enroulement du stator. Le courant circulant dans l'enroulement du stator donne naissance à une force magnétomotrice (fmm). Les courants dans le rotor sont induits par l'action du champ créé par le stator et la direction des courants est telle que la fmm ainsi développée s'oppose à la fmm du stator. L'axe de la fmm du rotor est le même que celui de la fmm du stator. Comme le couple développé est proportionnel au sinus de l'angle entre les deux fmm et que l'angle est nul, le couple net agissant sur le rotor est nul et le rotor reste donc immobile.

À des fins d'analyse, un champ pulsé peut être décomposé en deux champs tournants de magnitude constante et tournant dans des sens opposés, comme le montre la figure 9.2, et chaque champ a une magnitude égale à la moitié de la longueur maximale du phase-pulseur d'origine.

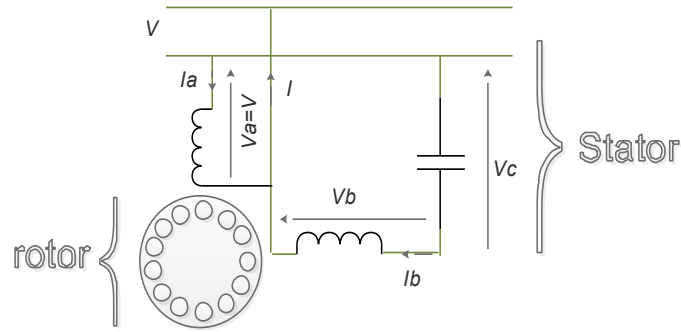


Figure 1.18 : Moteur asynchrone monophasé avec un condensateur

Le rapport de transformation k est le rapport entre le nombre de spires de l'enroulement avec condensateur et l'enroulement sans condensateur, où généralement $k > 1$.

$$k = \frac{N_b}{N_a} \quad (1.35)$$

Pour avoir un mouvement de rotation, le champ magnétique au stator doit être circulaire alors les tensions de deux phases doivent être déphasées de l'angle de 90° et que la condition suivante soit vérifiée :

$$V_b = \frac{N_b}{N_a} V_a \quad (1.36)$$

Ou

$$V_b = k V_a \quad (1.37)$$

Puisque les tensions et les courants sont déphasés de l'angle de 90° on aura les angles de déphasage entre les tensions et les courants égaux :

$$\angle(\dot{V}_b, \dot{I}_b) = \angle(\dot{V}_a, \dot{I}_a) = \varphi_{en} \quad (1.38)$$

Et les puissances actives seront les mêmes.

Selon la figure 1.18, on aura :

$$\dot{V}_a = \dot{V} \text{ et } \dot{V}_b + \dot{V}_c = \dot{V} \quad (1.39)$$

Et aussi :

$$V_c = \frac{V_b}{\sin(\varphi_{en})} \quad (1.40)$$

Pour avoir un champ circulaire nécessaire pour la bonne rotation du moteur, la valeur du condensateur doit se calculer de la façon suivante :

$$C = \frac{I_b \sin(\varphi_{en})}{\omega V_b} \quad (1.41)$$

La puissance de la capacité est :

$$Q_C = V_c I_b = \frac{V_b I_b}{\sin(\varphi_{en})} \quad (1.42)$$

Et la puissance apparente de la machine est égale à :

$$S = V I = V_c I \cos(\varphi_{en}) = Q_C = V_c I_b = \frac{V_b I_b}{\sin(\varphi_{en})} \quad (1.43)$$

Par conséquent, la puissance du condenseur doit être égale à la puissance apparente du moteur quand on veut avoir un champ circulaire, c'est-à-dire que la machine fonctionne avec un bon rendement égal à celui de la machine asynchrone triphasée de même puissance alimenté par une source triphasée et avec un facteur de puissance plus élevé.

Applications :

Ce type de moteur est utilisé dans : les réfrigérateurs ; conditionneurs d'air (évaporateurs, ventilateurs, etc.) ; Compresseurs ; Machine à outils ; etc.

1.7 Moteur asynchrone triphasé

1.7.1 Généralités et utilisations

Le moteur asynchrone, appelé aussi « moteur à induction », a été conçu pour la première fois par Nikola Tesla en 1890. Ce type de moteur est très connu pour sa robustesse et facilité de construction pour cela on le trouve abondamment dans l'industrie D'une puissance allant de moins d'un kilo Watt, à plusieurs dizaines de MW. Ils permettent un branchement direct au réseau électrique triphasé, ils sont appréciés pour leur rendement élevé, pour leur fiabilité, pour leur sécurité de fonctionnement (pas d'étincelles) et leur faible coût.



Figure 1.19 : Moteur asynchrone triphasé

1.7.2 Symboles

La MAS est généralement désignée par les symboles suivants :

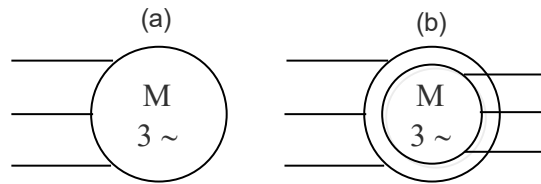


Figure 1.20 : Symboles du MAS : (a) MAS à cage d'écurueil ; (b) MAS à rotor bobiné.

1.7.3 Principe de fonctionnement

La rotation du rotor est générée par l'interaction entre deux champs magnétiques. Celui créé par les trois bobines du stator et celui créé par le rotor.

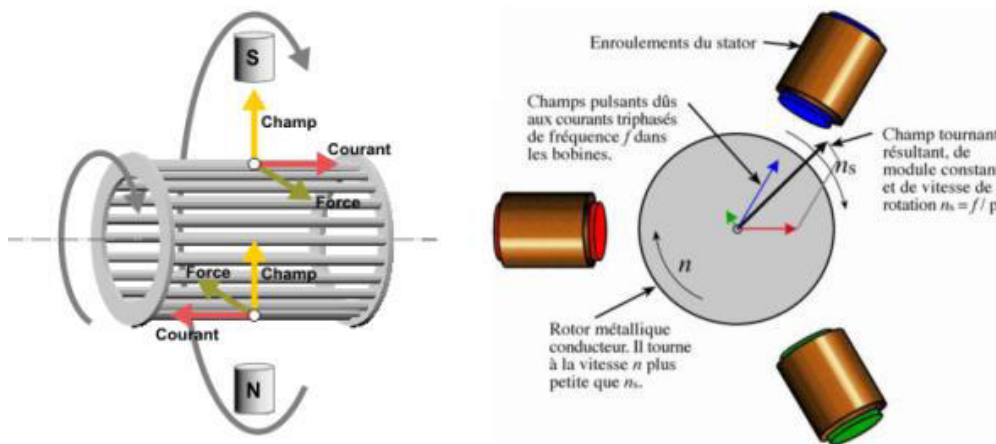


Figure 1.21 : Principe de fonctionnement du MAS

La circulation d'un courant électrique dans la bobine du stator donne naissance à un champ magnétique qui induit des courants électriques au rotor. Ces courants donnent naissance à un champ magnétique qui s'oppose à la cause qui l'a engendré (au champ du stator). Les enroulements du rotor du MAS sont en court-circuit. La vitesse du champ magnétique dans le rotor essaie de rejoindre la vitesse du champ statorique qui tourne à la vitesse du synchronisme (à la fréquence du réseau). 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. La portion du retard qui correspond à la différence de vitesse entre le rotor et le stator est représentée par le coefficient de glissement g qui s'exprime de la façon suivante :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (1.44)$$

A savoir que : $N_s = \frac{f}{p}$ [tr/s] ou $N_s = \frac{f \times 60}{p}$ [tr/min]

N_s : vitesse du synchronisme

N : vitesse du rotor

p : nombre de paires de pôles au stator.

1.7.4 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.

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



Figure 1.22 : Stator d'un MAS

b) Le rotor : Il est l'induit du moteur et il est constitué de matériaux conducteurs en court-circuit.

Parmi les types de rotors, on distingue :

- Rotor bobiné : il est constitué de trois enroulements en cuivre raccordés en étoile logés dans des encoches. Chaque enroulement est relié à une bague tournant avec l'arbre. On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais. Ces bagues sont rajoutés pour modifier la caractéristique du MAS.



Figure 1.23 : Rotor bobiné d'un MAS

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

Inconvénient : coût d'achat et de maintenance élevé.

- **Rotor à cage d'écureuil** il est constitué de barreaux de cuivre (ou d'aluminium) nues qui sont soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent.



Figure 1.24 : Rotor à cage d'écureuil

Avantage : robuste et peu coûteux.

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

c) Entrefer : c'est l'espace entre le stator et le rotor.

1.7.5 Plaque signalétique

Sur la carcasse du MAS, on trouve la plaque signalétique qui donne les informations nécessaires pour le faire fonctionner dans des conditions normales.

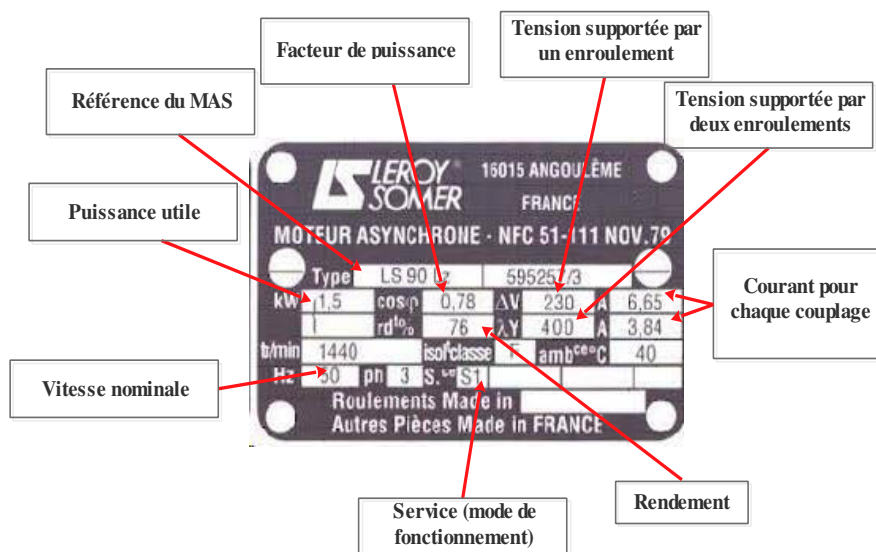


Figure 1.25 : Plaque signalétique d'un MAS

1.7.6 Caractéristique mécanique du moteur

Cette caractéristique donne la variation du couple selon la vitesse comme sur la figure suivante :

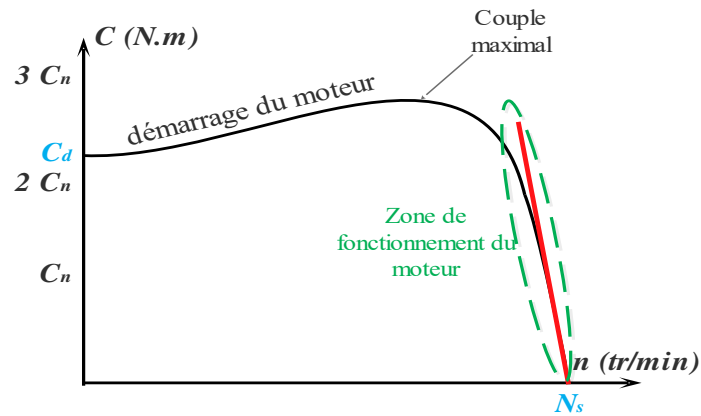


Figure 1.26 : Caractéristique mécanique du MAS

La courbe obtenue à un point max qui correspond au couple maximal fournit par le moteur. Ce point sépare la courbe en deux zones : la zone du fonctionnement du moteur (zone stable) et la zone instable qui se situe avant le couple maximal.

La zone de fonctionnement du moteur peut être modélisée par une droite décroissante comprise entre le point du synchronisme (à la vitesse du synchronisme) et le point nominal.

1.7.6.1 Couple de démarrage C_d

Le couple de démarrage C_d doit être supérieur au couple de la charge pour que le moteur puisse démarrer.

1.7.6.2 Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement (point « F ») est le point d'intersection entre la caractéristique du moteur et la caractéristique de la charge.

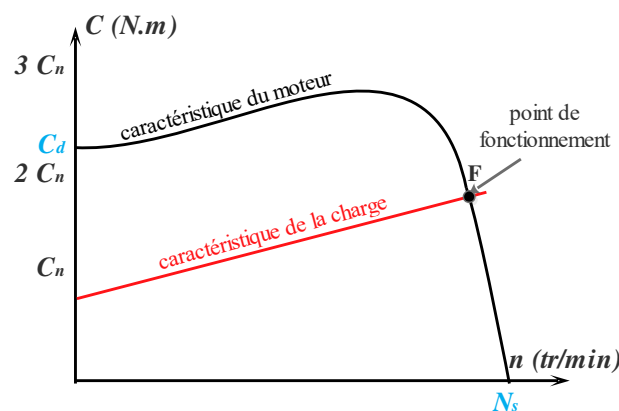


Figure 1.27 : Point de fonctionnement du groupe (moteur + charge)

1.7.7 Bilan de puissance d'un MAS

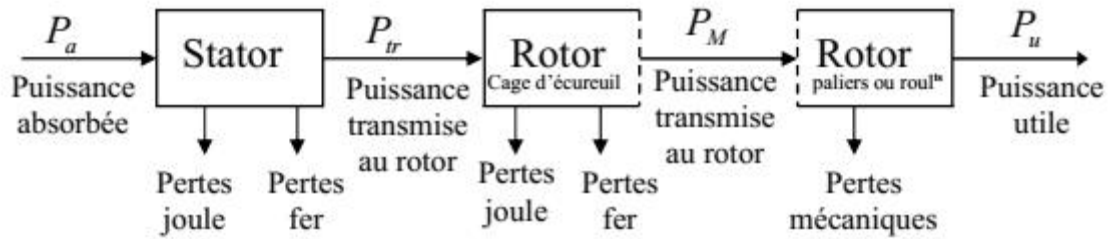


Figure 1.28 : Bilan des puissances du MAS

Puissance électrique absorbée $P_a = \sqrt{3} U I \cos\varphi$ U : tension entre phases (1.46)
 I : courant de ligne

φ : déphasage entre le courant et la tension

Pertes par effet joule au stator $p_{js} = 3 R I^2$ R : résistance d'une bobine (1.47)

Puissance transmise $P_{tr} = P_a - p_{js} - p_{fs}$ P_{tr} : puissance transmise au rotor sous forme magnétique (1.48)

Moment du couple électromagnétique $C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$ Ω_s : vitesse angulaire du champ statorique (1.49)

Puissance mécanique $P_m = C_{em} \Omega = P_{tr}(1 - g)$ (1.50)

Pertes joules au rotor $p_{jr} = g P_{tr}$ (1.51)

Pertes collectives ou constantes $p_c = p_{fs} + p_m$ p_{fs} : pertes fer au stator (1.52)

p_m : pertes mécaniques

Ces pertes sont déterminées par un essai à vide.

Puissance utile $P_u = P_m - p_m$ (1.53)

Rendement $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \sum \text{des pertes}}{P_a}$ (1.54)

1.8 Moteur Synchrone

1.8.1 Définition

Ce moteur conserve la même vitesse que la fréquence du réseau d'où l'appellation synchrone. En cas de surcharge, le moteur s'arrête et garde un mouvement oscillatoire.

Ce moteur est caractérisé par son rendement très élevé, qui peut aller jusqu'à 99 %.

1.8.2 Domaine d'emploi

Les applications peuvent s'organiser selon les gammes de puissance comme suivant :

Petites puissances (de 1 W à 100 W) : Entraînement de programmateur horaires ; ventilateurs d'un ordinateur ; instrumentation médicale ; mini drone ...

Moyenne puissance (de 100 W à 100 kW) : Machine d'usinage ; avionique ; motorisation électrique et hybride ...

Forte puissance (de 100 kW à 1,5 GW) : Motorisation ferroviaire ; entraînement d'hélice de bateaux de croisières ; compresseur ; centrifugeuse...

1.8.3 Constitution

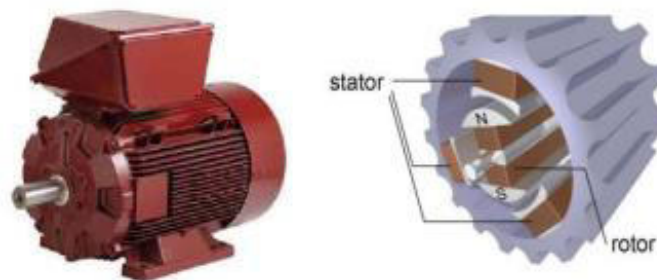


Figure 1.28 : moteur synchrone et ses principaux constituants.

Comme la majorité des moteurs électriques, on trouve le stator qui porte l'enroulement induit et le rotor qui est constitué soit d'électroaimants ou d'aimants permanents.

1.8.4 Principe de fonctionnement

Le principe est le même que pour les moteurs asynchrone sauf que pour ce type de moteur, le champ rotorique est créé par les aimants permanents. Les courants alternatifs de fréquence f dans le 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 : la vitesse de rotation en tr/s ;
 f : fréquence du réseau en Hz ;
 p : nombre de paires de pôles.

1.8.5 Symbole

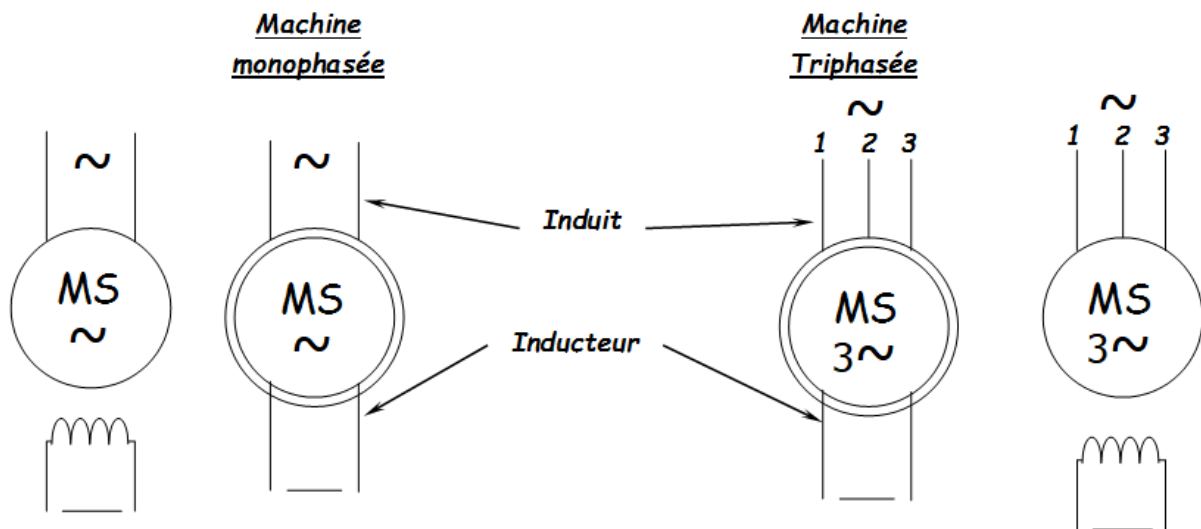


Figure 1.29 : Symbole d'un moteur synchrone

1.8.6 Bilan de puissance

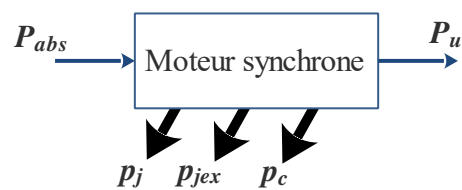


Figure 1.30 : Bilan de puissance

	Monophasé	Triphasé
Puissance absorbée	$P_{abs} = V I \cos\varphi$	$P_{abs} = \sqrt{3} V I \cos\varphi$
Puissance utile	$P_u = C_u \Omega_s$	$P_u = C_u \Omega_s$
Pertes Joules	$p_j = r I^2 + R_{ex} I_{ex}$	$p_j = 3 r I^2 + R_{ex} I_{ex}$
Pertes collectives	$p_c = p_{fer} + p_{mec}$	$p_c = p_{fer} + p_{mec}$

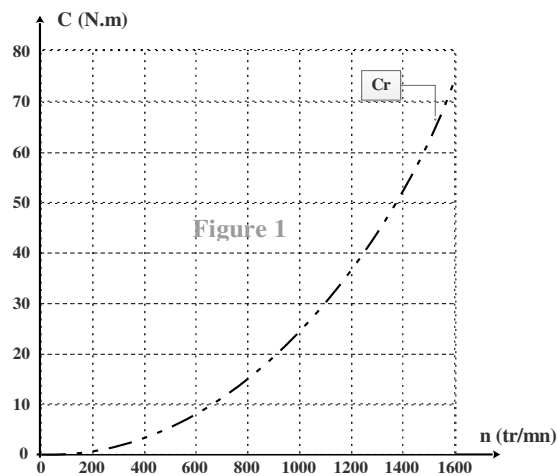
Remarque : pour un moteur synchrone à aimant permanent, on supprime les pertes joules dues à l'excitation.

1.9 Exercices d'application :

Exercice 1.1 : Un refroidisseur est équipé par un moteur à courant continu à excitation séparée entraînant un ventilateur. On donne les caractéristiques nominales du moteur :

Inducteur	$U_{ex} = 120 \text{ V} ; I_{ex} = 0.8 \text{ A}$
Induit	$U = 120 \text{ V} ; R = 0.25 \Omega$

Sa caractéristique mécanique s'écrit : $C_u(n) = 250 - 0,2 n$ lorsque C_u est en N.m et n en tr/mn. Par ailleurs $C_r(n)$ représente la caractéristique mécanique du couple résistant du ventilateur sur la figure 1.



- 1) Donner le schéma équivalent du moteur à excitation séparée.
- 2) Tracer $C_u(n)$ sur la figure 1.
- 3) En déduire graphiquement le moment du couple utile, C_u , ainsi que la vitesse de rotation n (en tr/min) du groupe moteur + ventilateur.
- 4) Sachant que la f.é.m E du moteur, vérifie la relation $E = 0,10 \cdot n$ (tr/mn), en déduire la valeur du courant I traversant le moteur.
- 5) Calculer le rendement du groupe et commenter le résultat obtenu vis-à-vis le régime nominal du moteur.

2 Chapitre 2 – Les actionneurs pneumatiques

3

1 Introduction

Le développement des systèmes automatisés de production (SAP) le doit beaucoup à la technologie hydraulique et pneumatique.

On trouve les actionneurs pneumatiques dans diverses activités comme le transport, l'industrie, le bâtiment ...etc. Mais rarement dans les systèmes robotiques vu la complexité de leurs modélisations. Néanmoins, ils nécessitent une station locale de génération d'air comprimé.

Ils sont généralement utilisés pour générer un mouvement linéaire qu'un mouvement rotatif.

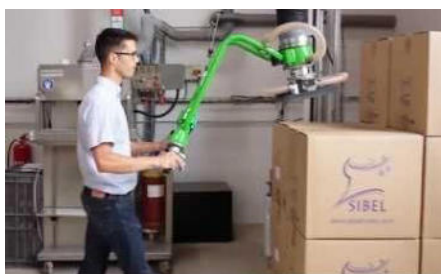
Avantage :

- L'emploi de l'énergie pneumatique permet de réaliser des automatismes avec des composants simples et robustes, notamment dans les milieux hostiles : hautes températures, milieux déflagrants, milieux humides ...
- Ils sont légers et moins encombrants par rapport aux actionneurs électriques.
- Les risques dus à ces actionneurs sont minimes.

2 Actionneurs pneumatiques

L'actionneur pneumatique permet de convertir une énergie pneumatique en une énergie mécanique de translation, de rotation ou d'aspiration. Elaboré dans la partie commande, le signal de sortie est ensuite dirigé vers des pré-actionneurs qui, à leur tour pilotent les actionneurs.

Leurs principales caractéristiques sont : la **course**, la **force** et la **vitesse**.



(a)



(b)



(c)

Figure 2.1 actionneurs pneumatiques : (a) ventouse ; (b) perceuse intégrant un moteur rotatif ; (c) vérin

Parmi les actionneurs pneumatiques, on retrouve principalement les vérins, les moteurs et les ventouses (générateur de vide) comme sur la figure 2.1.

2.1 Force disponible

Avec la pression de l'air injecté, on dispose d'une énergie potentielle exploitable sous forme statique ou sous forme dynamique qui génère un mouvement cinétique linéaire.

La pression de l'air exprimée en bar est la pression exercée par une force de 1 daN (déca-Newton) sur une surface de 1 cm².

$$1 \text{ bar} = 1 \text{ daN} / \text{cm}^2 \quad (2.1)$$

2.1.1 Force statique

En faisant agir l'air comprimé sur une surface immobile, on obtient une force statique F_s proportionnelle à la pression p et à sa surface d'action S :

$$F_s = p \times S \quad (2.2)$$

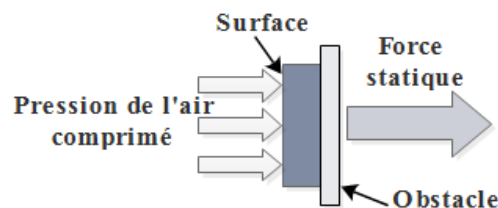


Figure 2.2 : Force statique

2.1.2 Force dynamique

Si la face est mobile en translation, la force dynamique F_d obtenue pendant le mouvement est plus faible car 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.

$$F_d = p \cdot S - \sum F_r \quad (2.3)$$

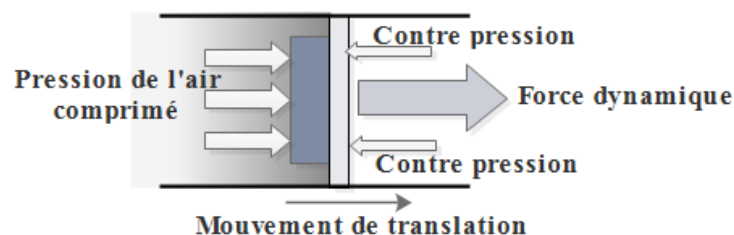


Figure 2.3 : Force dynamique

Remarque : la force statique est facilement calculable contrairement à la force dynamique ou certains paramètres comme les forces de frottements sont inconnues. Dans ce cas, on définit le rendement du vérin qui est le rapport entre la force dynamique et la force statique. Les essais pratiques montrent que le rendement d'un vérin varie entre 0.8 et 0.95 suivant le type de vérin, les dimensions, le type de lubrifiant, etc. Pour cela, la valeur du rendement minimum de 0.8 est prise comme valeur usuelle. Donc :

$$F_d = F_s \times 0.8 \quad (2.4)$$

Dans le cas du vérin toujours, pour que celui-ci ait le comportement prévu : F_d doit être supérieure à la charge dynamique opposée.

2.1.3 Taux de charge (t)

Pour être certain d'utiliser le vérin dans de bonnes conditions, on définit le taux de charge t . 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. Le taux de charge s'exprime de la façon suivante :

$$t = \frac{F_{charge}}{F_s} \quad (2.5)$$

Avec F_{charge} : effort à vaincre pour déplacer la charge ;

En pratique : $0.5 \leq t \leq 0.75$. Le taux de 0.5 est usuel.

3 Les vérins

Un vérin pneumatique est soumis à des pressions d'air comprimé qui permettent d'obtenir des mouvements linéaires dans les deux sens. Ces mouvements peuvent être transformés en mouvements rotatifs en rajoutant des équipements mécaniques en plus. Il peut être employé pour pousser, tirer, soulever ...

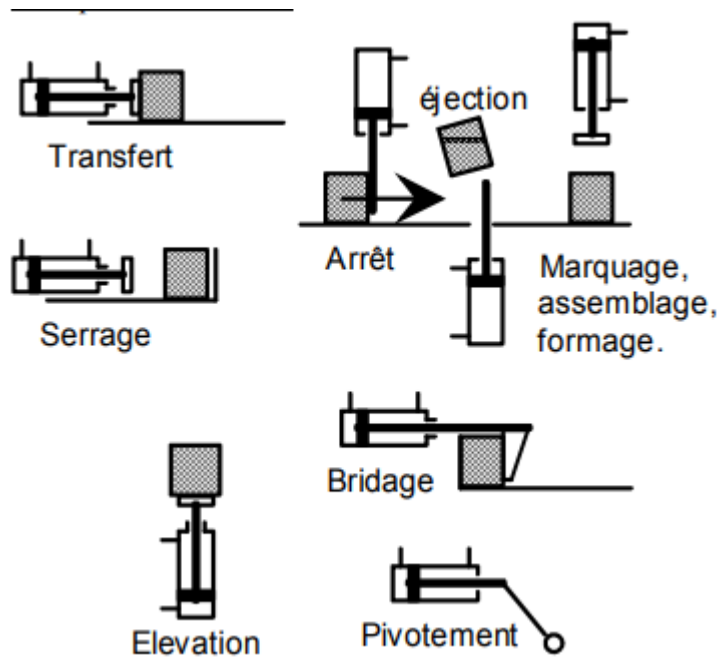


Figure 2.4 : Applications d'un vérin pneumatique

Les vérins pneumatiques utilisent l'air comprimé, de 2 à 10 bars en usage courant. Du fait de la simplicité de mise en œuvre, ils sont très nombreux dans les systèmes automatisés industriels.

Les vérins sont constitués d'un cylindre, fermé aux deux extrémités, à l'intérieur duquel coulisse un ensemble tige piston. Le piston divise le cylindre en deux chambres qui peuvent être en basse ou haute pression selon le mouvement désiré.

On distingue donc deux chambres :

- la chambre arrière est la partie du cylindre ne contenant pas la tige du vérin.
- la chambre avant est la partie du cylindre contenant la tige du vérin.

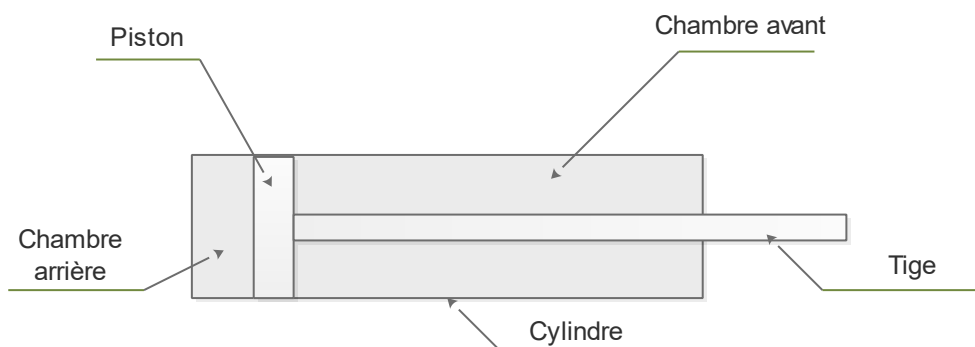


Figure 2.5 : Constitution d'un vérin

Un vérin est caractérisé par sa course et par son diamètre à savoir que la longueur du déplacement à réaliser est liée à sa course et l'effort développé dépend de son diamètre ainsi que la pression de l'air comprimé.

3.1 Vérin simple effet (VSE)

Ce sont des vérins qui font un effort sur un seul sens. On les trouve dans les applications dont on a besoin de pousser ou de tirer une charge. Il n'a qu'une seule entrée d'air sous pression, le retour à sa position initiale se fait avec un ressort de rappel qu'on trouve dans la chambre avant si le vérin est utile pour pousser ou dans la chambre arrière en cas où le vérin est utilisé pour tirer.



Figure 2.6 : Principe de fonctionnement d'un VSE

Exemple d'utilisation des VSEs:

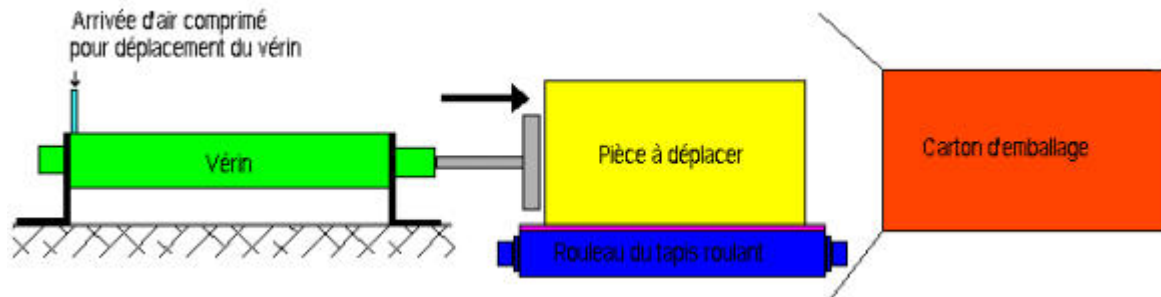


Figure 2.7 : Exemple d'application d'un VSE

Avantage : ils sont économiques, la consommation d'air est réduite.

Inconvénients : à course égale, ils sont plus longs que les vérins double effet, la vitesse de la tige est difficile à régler à cause de la résistance du ressort et les courses proposées sont limitées (jusqu'à 100 mm seulement).

Utilisation : serrage, éjection, levage, emmanchement, etc.

Force statique : le ressort représente une force de résistance R_c à la force statique, d'où :

$$F_s = p \times S - R_c \quad (2.6)$$

3.2 Vérin double effet (VDE)

Il a deux alimentations possibles : soit par la chambre arrière, soit par la chambre avant selon le mouvement désiré. Dans ce cas, le ressort de rappel n'est pas utile.

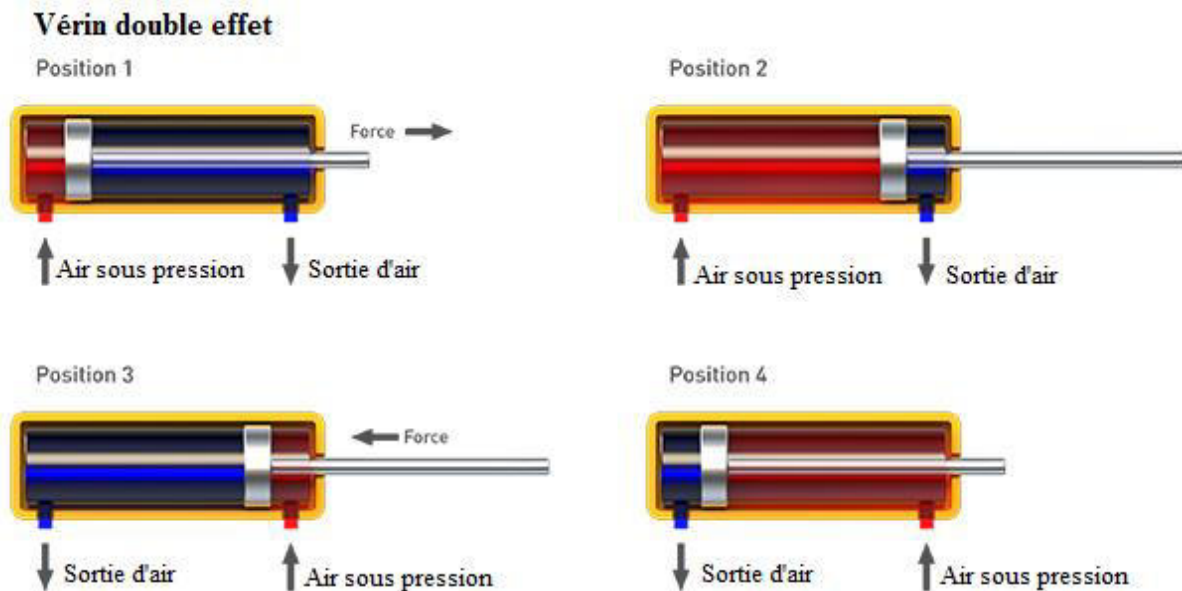


Figure 2.8 : principe de fonctionnement d'un VDE

Les vérins à double effet sont généralement utilisés dans toutes les applications où les poussées et les longueurs de course requises sont supérieures à celles disponibles pour les vérins à simple effet. Aussi, dans les applications dont l'application nécessite l'action de pousser et de tirer comme dans le cas d'ouverture et de fermeture d'une porte.

Les vérins à double effet, tels que la série P1F de Parker, sont les plus largement utilisés de tous les modèles d'actionneurs linéaires. Ils représentent environ 95% de tous les vérins utilisés dans les circuits pneumatiques.

Avantages : plus grande souplesse d'utilisation ; réglage 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 plus coûteux.

3.3 Caractéristiques d'un vérin

3.3.1 Effort théorique développé

A partir de la pression d'utilisation et de la surface du piston, on calcule les efforts théoriques développés par le vérin.

La figure suivante met en claire les forces qui s'appliquent sur le vérin en poussant ainsi que la surface sur laquelle la pression est appliquée.

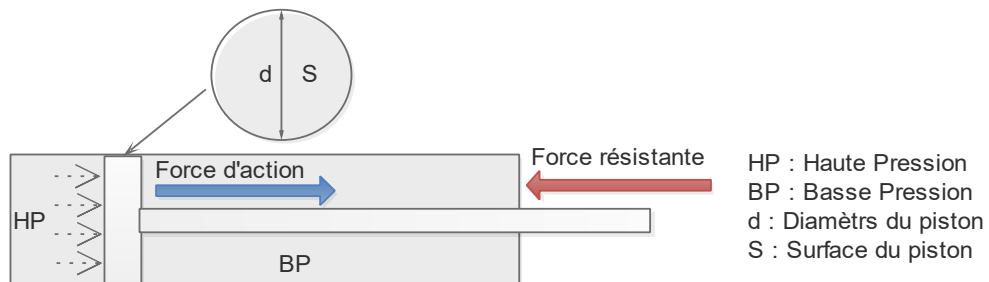


Figure 2.9 : Force statique développée par un VDE en sortie

La force exercée par un vérin en sortie peut être exprimée comme suit :

$$F = pS = p\pi d^2 / 4 \quad (2.7)$$

F : force exercée (daN) ;

P : pression d'action (bar) ;

S : surface du piston (cm²) ;

d : diamètre du piston (cm).

Dans le cas où le vérin est en entrée, il développe une force moins importante que celle en sortie pour une même pression d'utilisation.

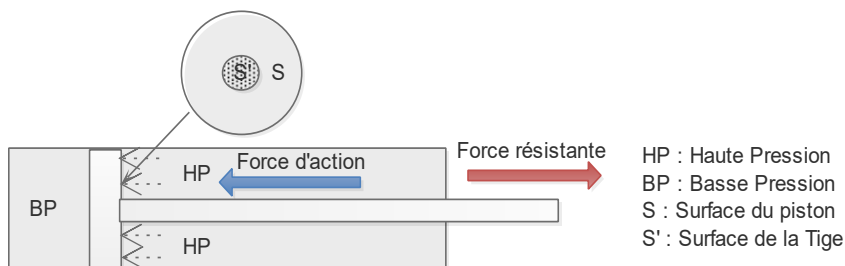


Figure 2.10 : Force développée par un VDE en entrée

Dans ce cas :

$$F = p(S - S') = p\pi \frac{(d^2 - d'^2)}{4} \quad (2.8)$$

Exemple 2.1 : Calculer la force exercée par le vérin si la pression est de 500 kPa et le diamètre de 90 mm (1 bar = 100 kPa).

$$F = pS = p\pi d^2 / 4$$

A.N : $F = 500 \times 10^3 \times \pi \times \frac{90^2 \times 10^{-6}}{4} \cong 3180 \text{ N}$

$F = 3180 \text{ N}$

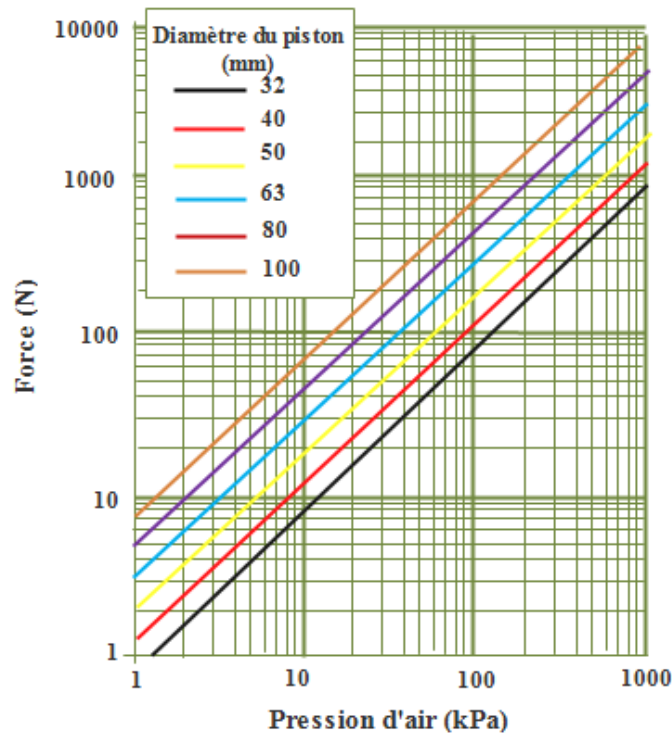


Figure 2.11 : Diagramme force/pression des vérins pneumatiques.

Le diagramme en échelle logarithmique dans la figure 2.11 donne les différentes valeurs de la force développée par le vérin selon la pression dans la chambre arrière et le diamètre du piston en mm.

On peut vérifier le résultat de calcul de la force de l'exemple précédent selon le diamètre et la pression sur le diagramme de la force/pression.

3.3.2 Rendement

Les frottements internes au vérin (joints d'étanchéité et bagues de guidage) conduisent à une perte d'énergie d'où une baisse du rendement η (perte de 5 à 12 % pour les vérins pneumatiques de bonne construction).

Exemple 2.2 : Reprenons les données de l'exemple 2.1. Si le rendement est de 88 % (perte de 12 %), l'effort réellement disponible en poussant est :

$$\eta F_{théorique} = \eta \cdot p \cdot S$$

$$\text{A.N : } F_{réelle} = 0.88 \times 550 = 484 \text{ daN}$$

3.3.3 Contre pression d'échappement

Cette contre pression est rajoutée pour régler et réguler (maintenir constante) la vitesse de la tige ; le réglage est obtenu par des régleurs placés à la sortie du vérin. Cette contre-pression, de 30 à 40 % de la valeur de la pression de démarrage en pneumatique, amène un effort opposant supplémentaire.

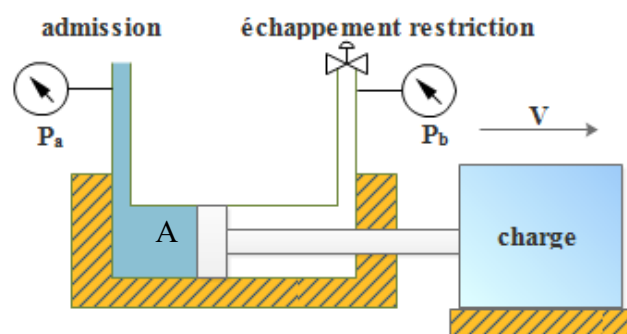


Figure 2.12 : Réglage de la vitesse de sortie du vérin

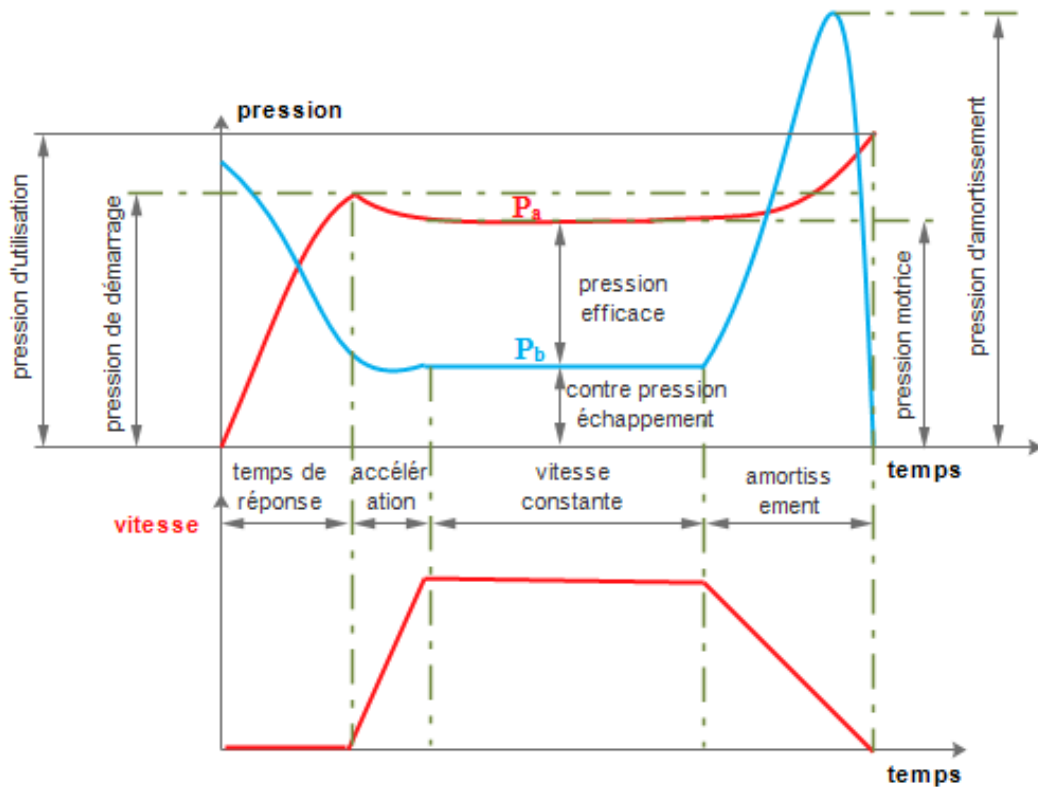


Figure 2.13 : accélération du vérin selon la pression d'entrée et de sortie

Les différentes pressions mises en jeu dans un vérin

- La courbe P_a présente l'évolution de la pression dans la chambre d'admission du côté opposé à la tige. La pression monte progressivement puis atteint le seuil maximal inférieur ou égal à la pression p . La pression du démarrage dépend de la charge. Puis la sortie de tige a lieu. La pression chute alors dans la chambre A et sa valeur va dépendre de la vitesse du vérin. En fin de course, la pression remonte à la valeur p .
- La courbe P_b figure l'évolution de la contrepression dans la chambre à l'échappement du côté de la tige. La pression chute à la valeur de la contre-pression pour permettre l'avancement de la tige, se maintient à cette valeur pendant toute la course puis augmente pour freiner la tige et devient nulle très peu de temps après l'arrêt du vérin.

4 Technique du vide : les ventouses

Dans le milieu industriel, les dispositifs de préhension sont aussi appelés ventouses ou tout simplement venturis. Ces ventouses sont utilisées pour le maintien une pièce. Le principe de fonctionnement est basé sur l'effet Venturi, un vide est créé par circulation d'air comprimé dans un tuyau dont le diamètre n'est pas constant, il possède un rétrécissement dans lequel il se forme une dépression. Cette circulation d'air comprimé est fournie soit par une pompe se trouvant sur la machine elle-même soit par une alimentation générale située dans l'usine. Les pompes à vide fonctionnent aussi au moyen d'air comprimé.



Figure 2.14 : utilisation des ventouses pour le soulèvement de

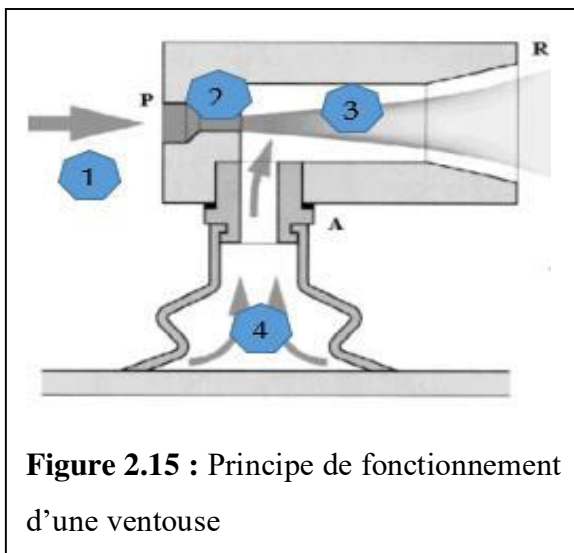


Figure 2.15 : Principe de fonctionnement d'une ventouse

Lorsque l'air (1) passe au travers de buses (2), une "aspiration" a lieu à l'orifice d'aspiration de chaque étage (3), ce qui crée une dépression (effet Venturi), d'où le vide (4). Dans la documentation technique et les manuels d'entretien des machines on trouve la normalisation des dispositifs à venturi, représentés comme sur le schéma ci-contre.

4.1 Dimensionnement d'une ventouse

Une ventouse développe un effort :

$$F = P_r \times S \quad (2.9)$$

S : surface de contact avec la pièce saisie et soumise à la dépression ;

P_r : pression relative ($P_r = P_{atm} - P_i$) et P_i est la pression interne (dépression créée).

On définit aussi la capacité de levage d'une ventouse qui est calculée par :

$$C_{\max} = 1.03 \times \Delta P \times S / k_s \quad (2.10)$$

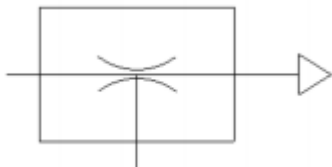
C_{max} : charge maximale que la ventouse peut soulever en kg ;

ΔP : dépression en bar ;

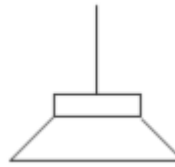
S : surface utile de la ventouse en cm² ;

k_s : coefficient de sécurité ($k_s = 2$ si la charge est horizontale et $k_s = 6$ si la charge est verticale).

Symbole









Ejecteur à effet venturi






Ventouse

4.2 Type de ventouses

Les ventouses sont disponibles plates, plates nervurées, profondes, avec soufflet, etc. sa forme est réalisée en fonction de la pièce et du milieu d'utilisation.

Forme de la ventouse	Application	Forme de la ventouse	Application
Plat 	Quand la surface de préhension d'une pièce est plate et non déformée.	Rotule 	Quand la surface d'adsorption d'une pièce n'est pas horizontale.
Plat nervuré 	Pour une pièce qui peut se déformer ou pour relâcher une pièce	Conducteur 	L'une des mesures antistatiques est l'utilisation de caoutchouc à faible résistance. Pour les mesures antistatiques
Profond 	S'utilise lorsque la pièce est de forme incurvée.	Grand 	S'utilise lorsque la pièce est de masse élevée

Soufflet 	Pour une pièce n'ayant pas assez d'espace pour installer un support télescopique ou quand la surface d'adsorption de la pièce est oblique	Longue course de support 	Pour une pièce à hauteur inégale ou nécessitant un amortisseur.
Ovale 	Pour une pièce ayant une surface d'adsorption limitée ou une longueur importante et pour une pièce qui doit être positionnée avec précision		

Exemple 2.3 : Calculer la force développée par une ventouse d'une surface de contact de 0.5 cm², qui crée une dépression de 50 % de la pression atmosphérique.

$$F = P_r \cdot S \text{ à savoir que } P_r = p_{atm} - p_i = p_{atm} - 0.5 p_{atm}$$

$$P_r = 101\,325 - 101\,325/2 = 50\,662$$

$$F = 50\,662 \cdot 0.5 \cdot 10^{-4} = 2.53 \text{ N}$$

Remarque : cette force est purement théorique, d'autres facteurs doivent rentrer dans le calcul comme le facteur de sécurité, le diamètre de la ventouse, sa vitesse de déplacement, etc.

Chapitre 3 – Les actionneurs hydrauliques

1 Introduction

Ce chapitre, on va le consacrer à l'étude de deux actionneurs très utilisés dans les systèmes mécaniques et hydrauliques qui sont les pompes et les vannes hydrauliques. Les vérins hydrauliques sont exclus car ils sont régis par le même principe que pour les vérins pneumatiques vus dans le chapitre précédent.

2 Les pompes volumétriques

2.1 Principe de fonctionnement :

Une pompe volumétrique est un dispositif qui absorbe un volume de liquide par l'orifice d'aspiration vers une chambre parfaitement close. Dans lequel, un élément mobile (piston, palette, etc.) se déplace d'une façon cyclique et pousse le liquide vers l'orifice de refoulement.

On trouve deux types de pompes volumétriques :

- les pompes volumétriques alternatives (à piston)
- les pompes volumétriques rotatives (Ex : à engrenages, à palettes, à lobes,..)

Une pompe est constituée :

- D'un corps fixe ;
- D'un ou plusieurs éléments mobiles qui participent au déplacement ou à la compression du fluide.

2.2 Types de pompes volumétriques :

Actuellement, plusieurs principes ont été mis en place pour répondre au besoin industriel, dans ce qui suit quelques principes seront étudiés.

a) Pompes à engrenages :

- Pompes à engrenages extérieur : la rotation d'un pignon entraîne la rotation en sens inverse de l'autre, ainsi une chambre se trouve à l'aspiration, l'autre au refoulement. Le fluide se déplace dans les chambres formées par les dents du pignon et la surface intérieur de la pompe.

Ce genre de pompes est utilisé dans de multiples applications : Transfert de solvants, produits chimiques divers. Transfert d'huiles ou de fluides caloporteurs ou pour le transfert de mélasse ou protéïnal.

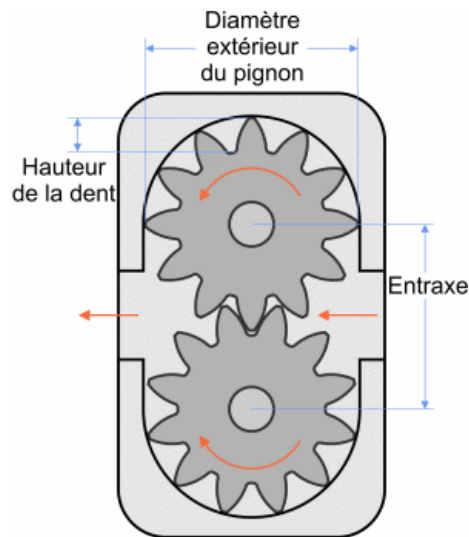


Figure 3.1 : pompe volumétrique à engrenages extérieurs

- Pompes à engrenages intérieurs : il existe deux rotors à l'intérieur de la pompe, un rotor à dents intérieurs qui entraîne le rotor à dent extérieur. La rotation des deux rotors crée ainsi un vide qui aspire le produit à pompé. Le produit est entraîné l'espace entre les dents des deux rotors jusqu'à ce qu'il soit refouler à la sortie.

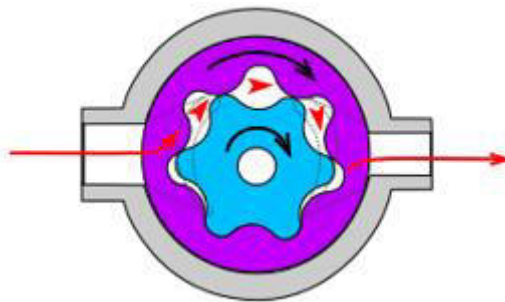


Figure 3.2 : pompe volumétrique à engrenages intérieurs

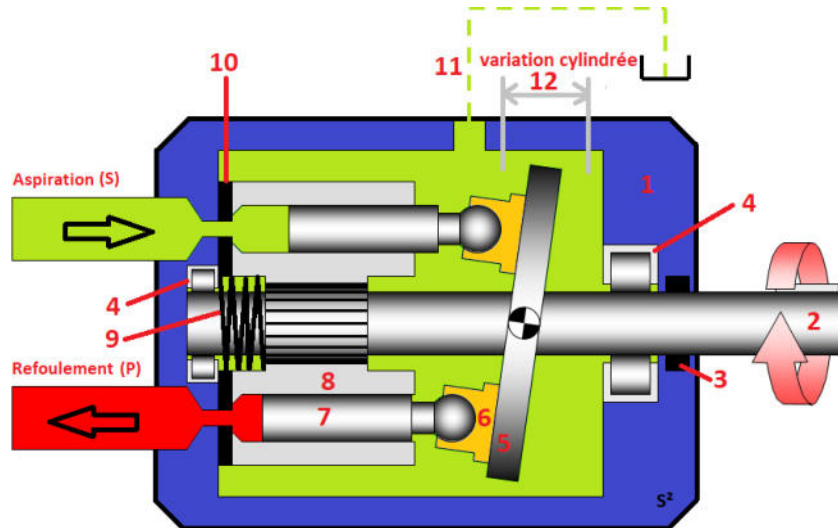
Exemples de liquides pompés : Hydrocarbures, huiles, graisses, additifs, colles, résines, polymères, mélasses, solvants, etc.

- b) Les pompes à pistons** : ce type de pompe repose sur le principe de mouvement linéaire d'un piston dans un cylindre équipé de deux orifices destinées à l'aspiration et au refoulement du fluide. L'ouverture et la fermeture des orifices sont synchronisées par rapport au mouvement du piston. Plusieurs configurations de pompes à piston existent :

- Pompes à pistons axiaux :

Les axes des pistons sont parallèles entre eux et l'axe principal de la pompe. Le cœur de la pompe est constitué d'un barillet, de glaces de distribution et de pistons.

Elle pénètre tous les secteurs : agriculture, industrie, sidérurgie, aéronautique, travaux publics, etc.



- 1 : Corps de pompe.
- 2 : Arbre de pompe.
- 3 : Joint d'arbre.
- 4 : Roulements.
- 5 : Plateau.
- 6 : Patins.
- 7 : Pistons.
- 8 : Barillet.
- 9 : Ressort.
- 10 : Glace de distribution.

Figure 3.3 : Pompe à pistons axiaux

- Pompes à pistons radiaux :

Les pompes à pistons radiaux sont constituées d'ensembles cylindre-piston disposés en étoile et commandés par clapets. La possibilité d'associer jusqu'à 6 étoiles en parallèle permet d'obtenir des débits plus élevés. Généralement, l'entraînement est assuré par un moteur électrique relié à la pompe par l'intermédiaire d'une lanterne et d'un accouplement.

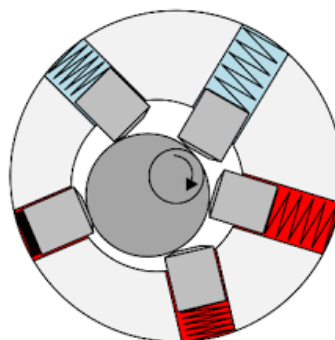


Figure 3.4 : Pompe à pistons radiaux

- Pompes à palettes :

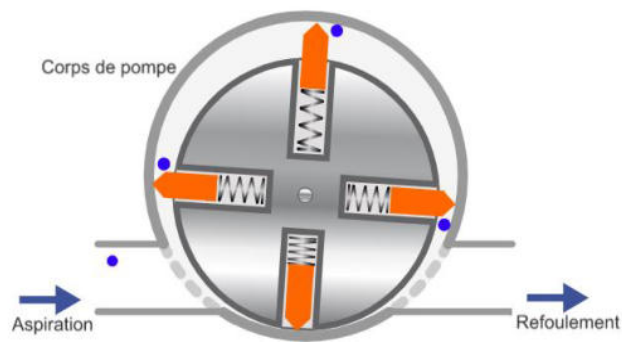


Figure 3.5 : Pompe à palettes

- Pompes à vis :

Deux vis dont l'une est motrice, tournent en sens inverse, créant ainsi d'un côté une zone d'aspiration et de l'autre une zone de refoulement.

Ces pompes débitent un liquide avec un taux de viscosité assez élevé, dont la pompe régule le débit à contrôler si nécessaire. Les dosages ainsi effectués grâce à ces pompes sont précis et maîtrisés. Ces pompes sont donc des outils indispensables dans les laboratoires pour effectuer des transferts de certains liquides de façon très précise et contrôlée

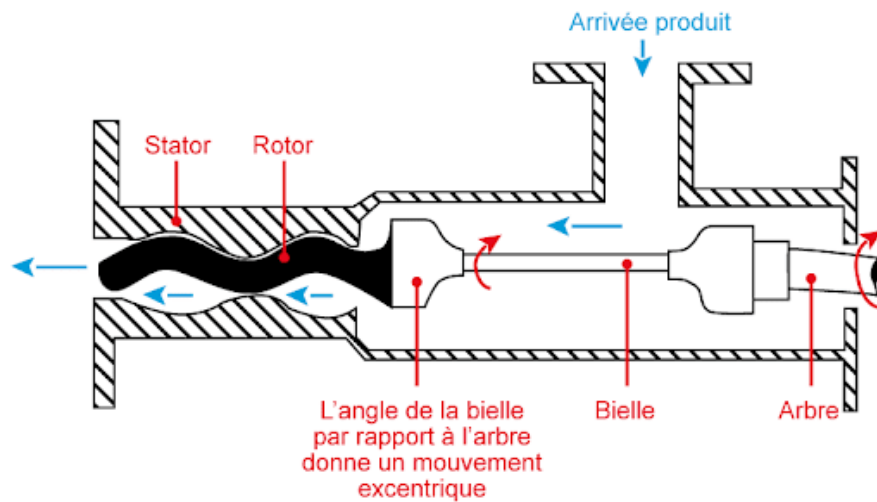


Figure 3.6 : Pompe à vis

- Pompes péristaltiques : La rotation du rotor entraîne le roulement sans glissement des rouleaux sur le tuyau déformable solidaire du stator. Cette pompe existe aussi avec trois rouleaux à 120°

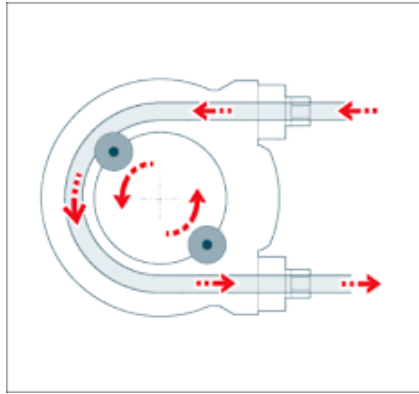


Figure 3.7 : Pompe péristaltique

2.3 Grandeur associées aux pompes

- La cylindrée (Cy)

Le volume de fluide balayé par une surface ou aspiré en l'absence des fuites, pendant une révolution de l'arbre principal. Son unité est en $[m^3/tr]$; $[l/min]$ ou $[l/tour]$.

- Les débits

- a) Débit moyen théorique (q_{vmoy}) :

Le volume moyen refoulé par unité de temps et il est déterminé par :

$$q_{vmoy} = Cy \cdot N \quad (3.1)$$

Avec N : Fréquence de rotation en $[tr/s]$;

Cy : Cylindrée en $[m^3/tr]$.

- b) Débit moyen réel (q_{vmoyr}) :

Le volume refoulé par la pompe réellement, cette grandeur est mesurée pratiquement.

- Les puissances

- a) Puissance mécanique (P_m) :

Puissance reçue à l'arbre d'entraînement de la pompe par le moteur qui peut être calculée par les deux expressions suivantes :

$$P_m = C \cdot \omega \quad \text{ou} \quad P_m = q_{vmoy} \cdot (p_{sth} - p_e) \quad (3.2)$$

Avec : C : couple d'entraînement de pompe en $[N.m]$;

ω : vitesse angulaire en $[rad/s]$;

p_{sth} : Pression de sortie théorique en $[Pa]$;

p_e : Pression d'entrée en [Pa].

b) Puissance hydraulique (P_h) :

La puissance portée par le fluide à la sortie de la pompe exprimée comme suivant :

$$P_h = q_{vmoyr} \cdot (p_s - p_e) \quad (3.3)$$

Avec : p_s est la pression mesurée réellement à la sortie de la pompe en [Pa].

▪ Les rendements

a) Le rendement volumétrique :

Compte tenu des fuites et de la compressibilité du fluide, le débit réel est toujours inférieur au débit théorique, on définit ainsi un rapport entre les deux débits :

$$\eta_v = \frac{q_{vmoyr}}{q_{vmoy}} \quad (3.4)$$

b) Rendement mécanique

Le fluide à la pression d'entrée refoulé à la pression de sortie $p_s = p_e$. Une chute de pression due à des effets mécaniques et hydrauliques fait passer p_{sth} à p_s , ainsi on détermine :

$$\eta_m = \frac{p_s - p_e}{p_{sth} - p_e} \quad (3.5)$$

c) Rendement hydromécanique

Il existe des pertes de couples à cause des frottements mécaniques entre les différentes pièces et du frottement de liquide contre les parois. Donc, le couple arrivé à la pompe sera inférieur à celui qui est fourni par le moteur :

$$\eta_{hm} = C_y \cdot \frac{(p_s - p_e)}{2 \cdot \pi \cdot C} \quad (3.6)$$

d) Rendement global

C'est le rapport de la puissance fournie et celle consommée :

$$\eta_{total} = \frac{P_{hyd}}{P_m} = \eta_v \cdot \eta_{hm} \quad (3.7)$$

▪ Le couple d'entraînement



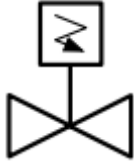
Le couple à appliquer à l'arbre d'entraînement de la pompe, son unité est en [N.m].

$$C = C_y \frac{p_s - p_e}{2 \cdot \pi \cdot \eta_m} \quad (3.8)$$

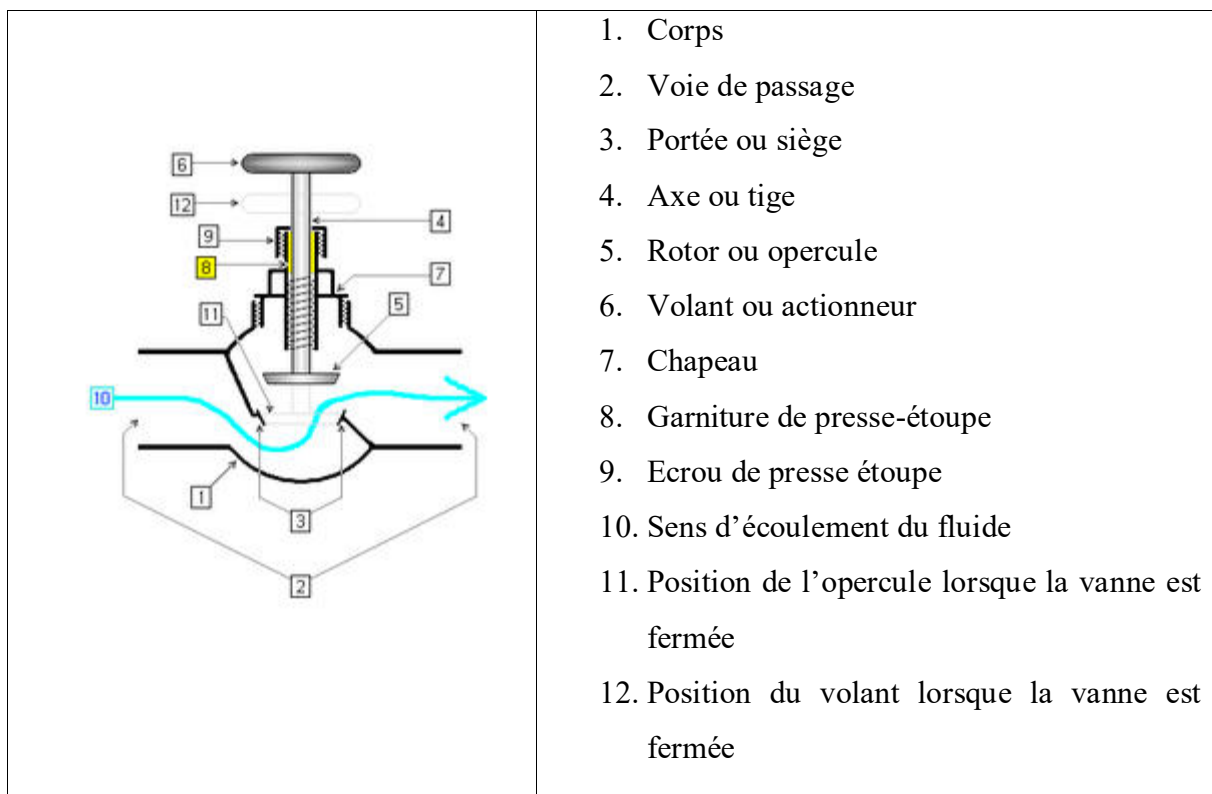
3 Les vannes et les électrovannes

3.1 Définition et schématisation :

La vanne permet de contrôler le débit du fluide dans la canalisation en modifiant les pertes de charges de celle-ci. Il existe une schématisation spécifique pour chaque type de vannes.

		
Vanne simple	Vanne manuelle	Electrovanne

3.2 Éléments constituant une vanne



3.3 Capacité de débit d'une vanne

Chaque vanne est caractérisée par sa capacité de débit qu'elle peut transmettre à la sortie. Ce débit s'exprime de la façon suivante :

$$Q_v = K S \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (3.9)$$

Avec :

Q_v : débit volumétrique ;

ΔP : pertes de charge du fluide dans la vanne ;

S : section de passe entre le siège et l'actionneur ;

K : coefficient dépendant du profil interne de la vanne ;

ρ : masse volumique du fluide.

3.4 Coefficient du débit (CV)

Ce coefficient est utilisé pour le dimensionnement des vannes ou à la détermination du débit qui les traversent.

Par définition, le coefficient CV est le nombre de gallons US d'eau à 15°C, traversant en une minute une restriction lorsque la chute de pression au passage de cette restriction est de 1 PSI.

Pour un liquide, ce coefficient est exprimé de la façon suivante :

$$CV = Q_v \sqrt{\frac{d}{\Delta P'}} \quad (3.10)$$

Avec Q_v le débit en gallons US par min ; d la densité du liquide et $\Delta P'$ la différence de pression.

Le CV est un repère de grandeur au moyen duquel le technicien peut déterminer rapidement et avec précision la dimension d'une restriction connaissant les conditions de débit, de pression éventuellement d'autres paramètres annexes et ceci pour n'importe quel fluide.

3.5 Caractéristique des vannes de régulations

C'est la relation liant la grandeur à réguler qui est le débit et le signal de commande « u », tout en maintenant la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la vanne constante. On distingue trois caractéristiques de débit :

a) Débit linéaire :

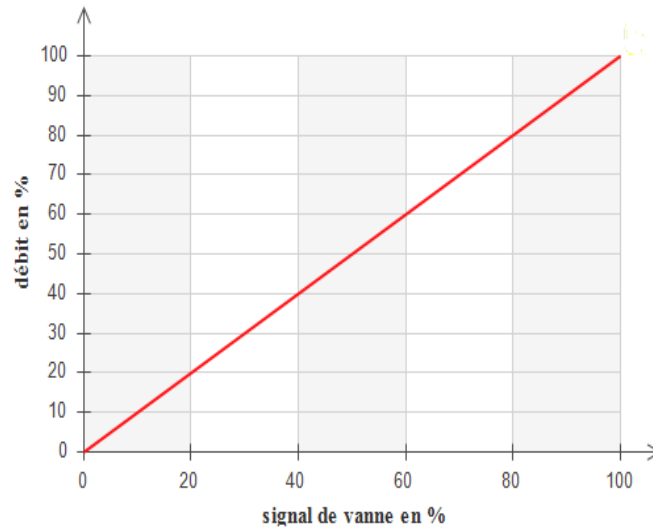


Figure 3.9 : Caractéristique linéaire de débit

Le débit évolue linéairement en fonction du signal de commande « u ». La caractéristique est une droite ce qui permet une grande maîtrise de débit de sortie.

b) Débit égal en pourcentage EQP

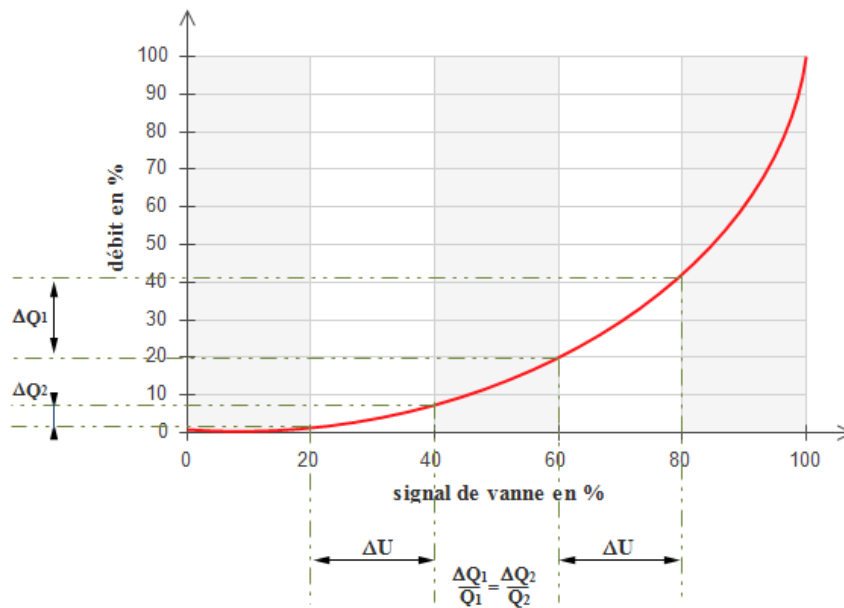


Figure 3.10 : Caractéristique exponentielle de débit

La caractéristique est une exponentielle. Des accroissements égaux du signal vanne provoquent des accroissements égaux de débit relatif. Par exemple pour 40% du débit maximal à pleine ouverture, il faudra alors ouvrir la vanne à 80% de sa course totale.

c) Débit tout ou rien

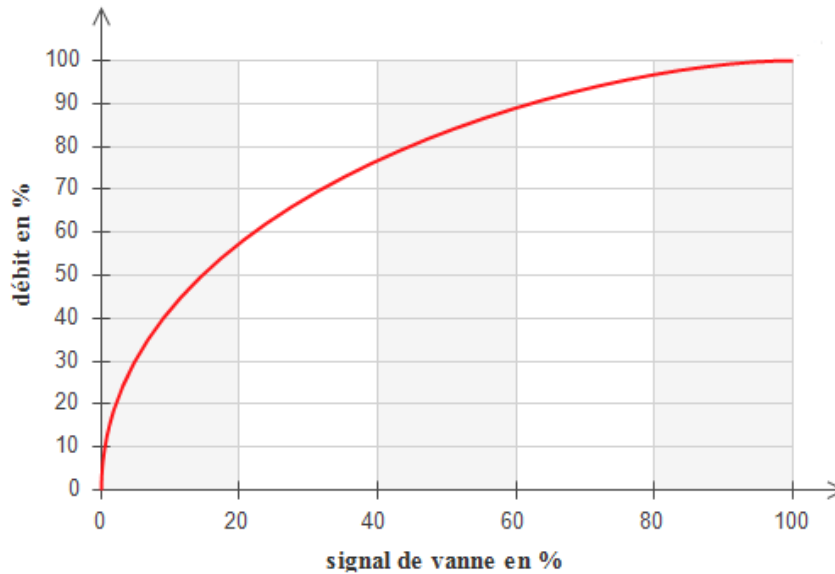


Figure 3.11 : caractéristique tout ou rien de débit

Cette caractéristique présente une augmentation rapide du débit en début de course pour atteindre alors environ 80% du débit maximum.

3.6 Exercices d'applications

Exercice 3.1 : Une pompe à palettes débite 100 l/min pour une expression de sortie de 141 bars et celle d'entrée de -0,9 bar.

Cette pompe est entraînée par un moteur électrique tournant à la fréquence de 2500 tr/min donnant un moment de couple à l'arbre d'entraînement de 105 Nm.

Les caractéristiques de la pompe sont :

- Diamètre du stator, $D = 120$ mm.
- Nombre de palettes, $n = 5$.
- Largeur d'une palette, $b = 20$ mm.
- Excentricité, $e = 3$ mm.

Sachant que la cylindrée d'une pompe à palettes est donnée par la relation :

$$C_y = 2 b n e D \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)$$

Déterminer :

- 1- Le débit moyen théorique,
- 2- Le débit des fuites, en déduire le rendement volumétrique,

- 3- La puissance hydraulique,
- 4- La puissance mécanique,
- 5- Le rendement mécanique, en déduire la puissance de sortie théorique et la chute de pression due aux pertes de charges,
- 6- Le rendement global en utilisant deux méthodes.

Solution 3.1 :

1- Calcul de débit moyen théorique : on a : $q_{vmoy} = Cy \cdot N$

$$\text{et : } Cy = 2 b n e D \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) = 2 \times 20 \times 5 \times 3 \times 120 \times \sin\left(\frac{\pi}{5}\right)$$

$$\text{on aura : } Cy = 4.232 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$\text{d'où : } q_{vmoy} = 4.232 \cdot 10^4 \times 2500$$

$$q_{vmoy} = 1.058 \cdot 10^8 \text{ mm}^3/\text{min}$$

$$\text{en l/min, on aura : } q_{vmoy} = 105.8 \text{ l/min}$$

2- Calcul de débit de fuites et en déduire le rendement volumique :

$$\text{On a : } q_{vf} = q_{vmoy} - q_{vmoyr} = 105.8 - 100$$

$$\text{d'où : } q_{vf} = 5.8 \text{ l/min}$$

$$\text{le rendement : } \eta_v = \frac{q_{vmoyr}}{q_{vmoy}} = \frac{100}{105.8}$$

$$\text{en pourcentage : } \eta_v = 94.5 \%$$

3- La puissance hydraulique :

$$P_h = q_{vmoyr} \cdot (p_s - p_e)$$

$$q_{vmoyr} = 100 \text{ l/min} = 0.0017 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_h = 0.0017 \times (141 - (-0.9)) \times 10^5$$

$$\text{d'où : } P_h = 23650 \text{ W}$$

4- La puissance mécanique :

$$\text{On peut utiliser l'expression en prenant la vitesse angulaire : } P_m = C \cdot \omega = 150 \times 2500 \times \frac{2\pi}{60}$$

$$\text{d'où : } P_m = 27489 \text{ W}$$

5- Le rendement mécanique et en déduire la pression de sortie théorique et la chute de pression :

$$\text{On a : } \eta_m = \frac{p_s - p_e}{p_{sth} - p_e} \text{ et } P_m = q_{vmoy} \cdot (p_{sth} - p_e) \text{ donc : } \eta_m = q_{vmoy} \frac{p_s - p_e}{P_m}$$

$$\eta_m = \frac{141.9 \times 10^5}{27489} 105.8 \times \frac{1000}{60} ; \eta_m = 91\%$$

$$\text{Calcule de la pression de sortie théorique : } p_{sth} = \frac{p_s - p_e}{\eta_m} + p_e = \frac{141.9}{0.91} - 0.9$$

Alors : $p_{sth} = 154 \text{ bar}$ d'où la pression de fuite égale à : $p_f = 13 \text{ bar}$

6- Calcule du rendement global :

$$\eta_{total} = \frac{P_{hyd}}{P_m} = \frac{23650}{27489} ; \eta_{total} = 86 \%$$

Bibliographie

- [1] Guy Clerc, Guy Grellet, « Actionneurs électriques, Principe, Modèles, Commande », Eyrolles, 2008.
- [2] Gérard Lacroux, « Les actionneurs électriques pour la robotique et les asservissements », 1994.
- [3] Yves Granjon, « Automatique - Systèmes linéaires, non linéaires, temps continu, temps discret, représentation d'état », Dunod, 2010.
- [4] J. Faisandier, « Mécanismes hydrauliques et pneumatiques », Dunod, 1999.
- [5] R. LABONVILLE, « Conception des circuits hydrauliques, une approche énergétique », Editions de l'Ecole Poly technique de Montréal 1991.
- [6] P. MAYE, « Moteurs électriques pour la robotique », Dunod, 2000.
- [7] John R. Bauer « Magnetic Actuators and Sensors », John Wiley & Sons, 2006.
- [8] Michel Grout, Patrick Salaun, « Instrumentation industrielle », 3e édition, Dunod, 2012.
- [9] Eric Duckler KENMOE FANKEM. Etude de différentes structures d'actionneurs de positionnement pour l'aéronautique. Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [10] Hartmut Janocha «Actuators: Basics and Applications », Springer, 2013.