

3

2

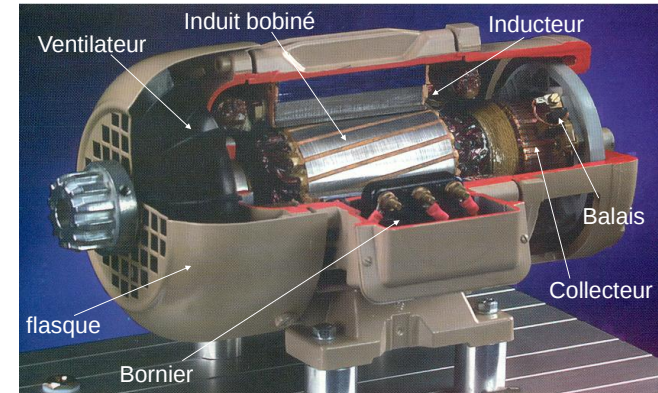
4

Partie I

Actionneurs électriques

5

1. Le moteur à courant continu

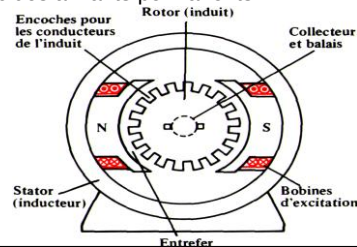


7

1. Le moteur à courant continu

1.1 Notions générales :

Le moteur à collecteur à courant continu a été inventé, pour sa première réalisation industrielle, en **1871** par **Zénobe Gramme**. D'un point de vue structurel, un moteur à courant continu comporte une partie tournante (**l'induit**) et une partie fixe (**l'inducteur**). Cette dernière partie peut être soit bobinée, soit réalisée avec des aimants permanents.



6

1. Le moteur à courant continu

1.2 Principe de fonctionnement :

Tous les moteurs électriques sont basés sur le principe physique du couplage magnétique entre : deux champs magnétiques, champ magnétique et courant, champ magnétique et matériaux magnétiques.

Dans le cas du moteur à courant continu (MCC) le stator (inducteur), crée un champ magnétique d'excitation B_s . Le rotor (induit), est alimenté par un courant continu I_a . Les conducteurs du rotor, de longueur L , traversés par le courant sont immergés dans le champ B_s , or le physicien **Laplace** a démontré que le conducteur est soumis à une **force de LAPLACE** :

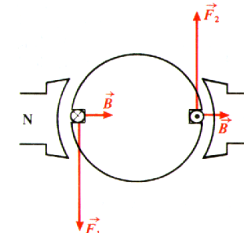
$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 = I_a \vec{L} \wedge \vec{B}_s = I_a L B_s \sin(\alpha)$$

α est l'angle entre B_s et I_a .

$$\text{Dans la MCC: } B_s \perp I_a \Rightarrow \alpha = \frac{\pi}{2}$$

Donc :

$$F = B_s I_a L$$



8

1. Le moteur à courant continu

Cette force est tangentielle au rotor et la quadrature (entre le courant et le flux d'excitation) est conservée durant toute la rotation (à cause des pièces polaires).

Donc le couple créé par une spire (appliqué sur le rotor) est donné par:

$$C = 2rF = 2rB_s I_a L \quad ; r \text{ est le rayon du rotor}$$

Lorsque le rotor tourne, les lames-balais inversent les courants dans les conducteurs du rotor, afin que le pôle Nord continue à voir des croix et le pôle Sud des points. Les forces de Laplace engendrent donc toujours une force (un couple) de même signe. L'ensemble **lames-balais** se comporte comme un redresseur tournant.



www.LearnEngineering.org

9

1. Le moteur à courant continu

Le couple électromagnétique créé par tous les conducteurs N_c du rotor est donné par:

$$C = 2N_c r L B_s I_a = K \phi I_a = K' I_a \quad ; \text{ en Newton.mètre (N.m)}$$

Avec: $\phi = S B_s = \frac{2\pi}{p} r L B_s$

Remarque:

Pour le **fonctionnement en génératrice**, Le principe physique utilisé est le phénomène d'induction électromagnétique (**loi de Faraday**):

$$e(t) = - \frac{d\phi(t)}{dt}$$

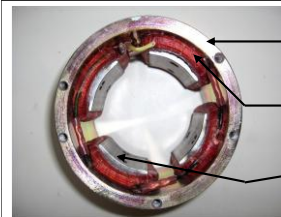
la force-électromotrice (FEM) créée dans ce cas est donnée par:

$$E = K \phi \Omega = K' \Omega$$

K est la même constante que dans la formule du couple.

11

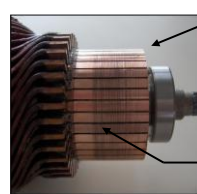
1. Le moteur à courant continu



Carcasse du stator

Enroulement de l'inducteur

Pôle magnétique de l'inducteur, avec les épanouissements polaires.



Collecteur

Balais et Porte Balais

Une lame



10

1. Le moteur à courant continu

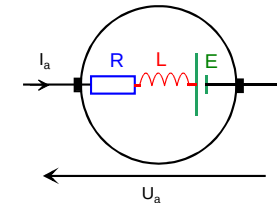
1.3 Modélisation de la MCC:a- L'induit:

Le schéma équivalent et le modèle mathématique de l'induit d'une MCC peut être représenté par la figure suivante (**une bobine en rotation et soumise à un champ**):

$$U_a = R I_a + L \frac{dI_a}{dt} + E$$

Avec:

$$E = K \phi \Omega$$



R : résistance de l'induit.

L : inductance de l'induit.

K : constante du couple électromagnétique.

Ω : vitesse de rotation du rotor.

ϕ : flux moyen sous un pôle, ce flux peut être créé soit par un enroulement d'excitation ou par des aimants permanents.

12

1. Le moteur à courant continu

b- L'inducteur:

Pour la création du flux d'excitation, on trouve deux principes: inducteur à aimants permanents (flux fixe) et inducteur bobiné (flux variable).

Pour le cas d'une MCC à inducteur bobiné de N_f spires, on peut le modéliser par l'équation suivante:

$$U_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt}$$

Avec:

R_f, L_f : résistance et inductance de l'inducteur.

I_f, U_f : courant et tension d'alimentation de l'inducteur (excitation).

c- La partie mécanique en rotation:

Pour trouver le modèle mathématique de la partie mécanique (la partie tournante), on applique le 2^e principe fondamental de la dynamique PFD :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C - C_r - f\Omega$$

Avec:

J : moment d'inertie de l'axe du rotor en Kg.m^2 .

f : coefficient de frottements visqueux.

C_r : couple de la charge mécanique

13

1. Le moteur à courant continu

b- excitation série:

Un moteur à excitation série a son inducteur connecté en série avec l'induit. Dans ce cas, les deux bobines (induit et inducteur) sont parcourues par le même courant:

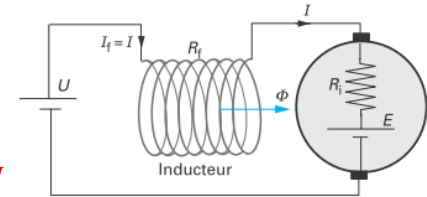
$$I = I_a = I_f$$

Donc:

$$\phi = h I_f = h I$$

Ce qui donne:

$$\begin{cases} E = K\phi\Omega = Kh\Omega I = k\Omega I \\ C = K\phi I_a = KhI_a^2 = kI^2 \end{cases}$$



Les équations de l'induit et de l'inducteur s'ajoutent, ce qui donne:

$$U = (R + R_f)I + (L + L_f) \frac{dI}{dt} + E$$

L'équation mécanique ne change pas.

15

1. Le moteur à courant continu

1.4 Les différents modes d'excitation de la MCC:

a- Excitation séparée:

Un moteur à excitation séparée nécessite deux alimentations, une pour l'induit et l'autre pour le circuit d'excitation (inducteur).

L'équation du circuit d'excitation est la suivante:

$$U_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt}$$

Avec:

$$\phi = h I_f$$

Donc:

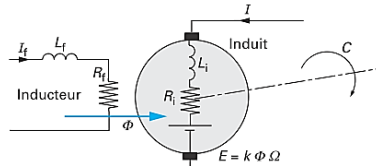
$$E = K h I_f \Omega$$

$$C = K h I_f I_a$$

L'équation de l'induit et l'équation mécanique ne changent pas.

Les avantages de cette machine (à excitation séparée) sont:

- Si, on fixe la tension d'excitation, le modèle de la machine devient linéaire, ce qui simplifie sa commande.
- La possibilité de faire varier le flux d'excitation permet d'augmenter la plage de variation de la vitesse du moteur (le défluxage).



14

1. Le moteur à courant continu

Les avantages de la MCC série sont :

- Le bobinage inducteur réalisé avec un fil de gros diamètre. Cette conception lui procure une très bonne robustesse face aux vibrations, et lui a valu un grand succès inégalé en traction ferroviaire.
- Dans ce moteur une seule alimentation est utilisée.
- Un faible coût de fabrication.
- Le couple de démarrage est très fort (dépend du carré du courant).

À cause de ce couple fort notamment aux faibles vitesses, ce moteur est très utilisé dans la traction (notamment la traction ferroviaire jusque dans les années 1980).

La version alimentée en courant alternatif de ce moteur (appelé **moteur universel**) est très utilisée dans plusieurs domaines: l'électroménager (aspirateur, mixeur...), les outils à main (perceuse, tronçonneuse,...)

Les inconvénients de la MCC série sont:

- la commande difficile à cause de la non linéarité de son modèle.
- Rendement faible 40%.
- Lorsque C_e tend vers zéro (fonctionnement à vide) la vitesse tend vers l'infini : il y a emballement à vide du moteur.

16

1. Le moteur à courant continu

c- excitation composée et parallèle :

Une machine à excitation parallèle, son inducteur connecté en parallèle avec le circuit de l'induit.

Un machine à excitation composée, son inducteur est composé de deux inducteurs (un série et l'autre parallèle).
Ils sont souvent utilisées en mode génératrice.

I_{fp} et I_{fs} courant inducteur respectivement dans l'inducteur parallèle et dans l'inducteur série

Φ_{fp} et Φ_{fs} flux inducteurs correspondant

17

2.5 Energie et pertes dans une MCC:

2. Réglage de la vitesse des moteurs à CC

Le moteur à courant continu absorbe la puissance électrique suivante:

$$P_e = P_{ea} + P_{ei} = U_a I_a + U_f I_f$$

Si, on remplace les tensions par leurs expressions dans le régime permanent (courants et vitesse constants), on trouve:

$$P_e = (R I_a + E) I_a + R_f I_f^2 = (R I_a^2 + R_f I_f^2) + K \Phi I_a$$

De cette équation, on déduit:

- Les pertes Joule dans l'induit : $P_{Ja} = R I_a^2$
- Les pertes Joule dans l'inducteur: $P_{Ji} = R I_f^2$
- La puissance électromagnétique: $P_{em} = E I_a = K \Phi \Omega I_a = \Omega C_{em}$
- Il y a aussi les pertes fer (par courant de Foucault et par Hystérésis) localisées surtout dans l'induit car le fer de l'inducteur n'étant pas soumis à une variation de flux. Ces pertes ne sont pas figurées dans l'équation.
- Pertes mécanique par frottement P_{mec} .

Rendement de MCC: $\eta = \frac{P_u}{P_e} = \frac{C_u \Omega}{C_u \Omega + P_{Ja} + P_{Ji} + P_{fer} + P_{mec}}$

19

1. Le moteur à courant continu

d- excitation à aimants permanents :

Dans ce type d'excitation, le flux inducteur est créé par des aimants permanents.

Les avantages sont:

- Une seule alimentation pour l'induit.
- Un rendement et une puissance massique (volumique) élevée à cause des aimants.

Les inconvénients:

- Ils ne permettent pas une variation du flux d'excitation. Donc, le moteur ne peut pas fonctionner en survitesse.
- Le coût élevé des aimants,

Ces moteurs sont généralement utilisés pour les petites et moyennes puissances.

18

2. Réglage de la vitesse des moteurs à CC

La puissance utile à la sortie de l'arbre est égale au produit de couple utile et de la vitesse de rotation (en rad par seconde). Cette puissance utile est celle qui est donnée par le constructeur ou bien indiquée sur la plaque signalétique.

Le couple utile est légèrement inférieur au couple électromagnétique.

20

2. Réglage de la vitesse des moteurs à CC

2.6 Réglage de la vitesse d'une MCC à excitation séparée :

D'après l'équation de l'induit dans le régime permanent (courant constant):

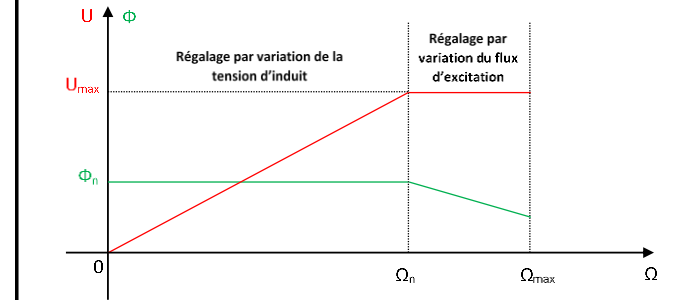
$$\Omega = \frac{U_a - RI_a}{K\phi}$$

On voit que pour faire varier la vitesse de rotation, on a deux possibilités:

- **Cas du flux d'excitation constant et tension d'induit variable :** en négligeant le terme résistif, la vitesse de rotation et la tension d'alimentation d'induit sont proportionnelles. C.à.d. l'augmentation de la tension fait augmenter la vitesse et l'inverse est vrai.
- **Cas de la tension d'induit constante et flux variable :** en négligeant le terme résistif, la vitesse de rotation et le flux d'excitation sont inversement proportionnels. C.à.d. l'augmentation du flux fait diminuer la vitesse et l'inverse est vrai.

21

2. Réglage de la vitesse des moteurs à CC



Pour régler la vitesse de la MCC, on peut utiliser deux types de convertisseurs qui peuvent fournir une tension continue variable: le redresseur commandé (monophasé ou triphasé) et le Hacheur (réversible ou pas en tension/courant).

23

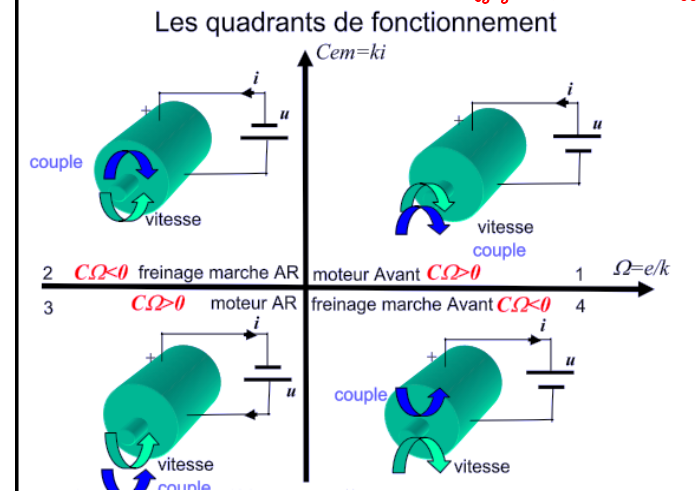
2. Réglage de la vitesse des moteurs à CC

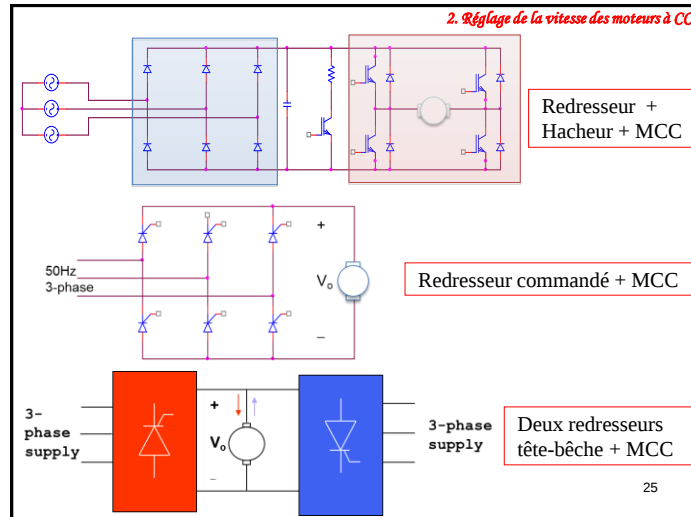
Pratiquement, pour régler la vitesse de la MCC à excitation séparée sur une grande plage de vitesses, on applique les étapes suivantes :

- Pour une vitesse comprise entre 0 et la vitesse nominale Ω_n : on fixe la valeur du flux d'excitation à sa valeur nominale, pour que la MCC aura la capacité pour développer son couple maximal, puis on règle la vitesse par la variation de la tension de l'induit jusqu'à la tension maximale admissible. C'est la commande à couple constant.
- Pour une vitesse comprise entre Ω_n et la vitesse maximale Ω_{max} : on fixe la tension d'induit à sa valeur maximale et on règle la vitesse par la variation du flux d'excitation (appelé aussi défluxage). C'est la commande à puissance constante. *Notons que ce mode existe uniquement pour le cas de l'excitation bobinée séparée.*

22

2. Réglage de la vitesse des moteurs à CC





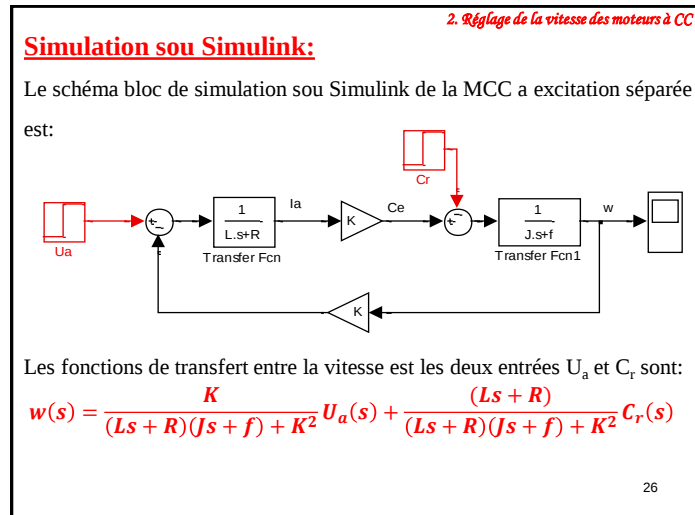
2. Moteur asynchrone

1. Notions générales :

Les machines électriques à courant alternatif sont devenues très utilisées dans tous les domaines (domestiques, traction, industrie,...). Parmi ces machines, on trouve essentiellement la Machine Asynchrone **MAS** et la Machine Synchrone **MS**.

La MAS a été inventée par **Nikola Tesla** (brevet déposé en **1887**). Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée. On estime que 80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones, en plus elle est utilisée :

- Comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts.
 - Comme génératrice dans les éoliennes, les hydroliennes et les systèmes de génération d'électricité à vitesse variable.
- 27

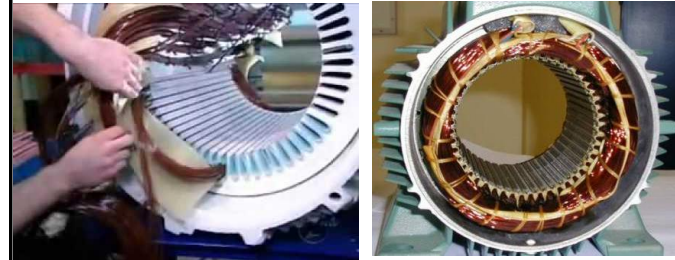


2. Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est constitué de deux parties : le **stator** et le **rotor**.

Le stator:

Le stator est formé d'un circuit ferromagnétique encoché qui contient **trois enroulements électriques**. C'est la **partie fixe du moteur**. Le stator est généralement enveloppé par une carcasse en fonte ou en acier, elle contient des ailettes pour dissiper la chaleur.

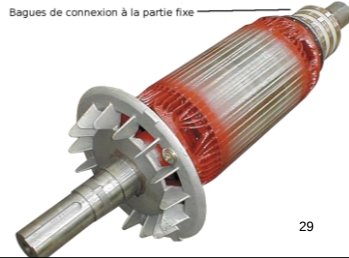


2. Moteur asynchrone

Le rotor:

Le circuit magnétique du rotor est constitué de tôles d'acier qui sont de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Le rotor est séparé d'un entrefer de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement du stator. Les rotors des MAS peuvent être de deux types :

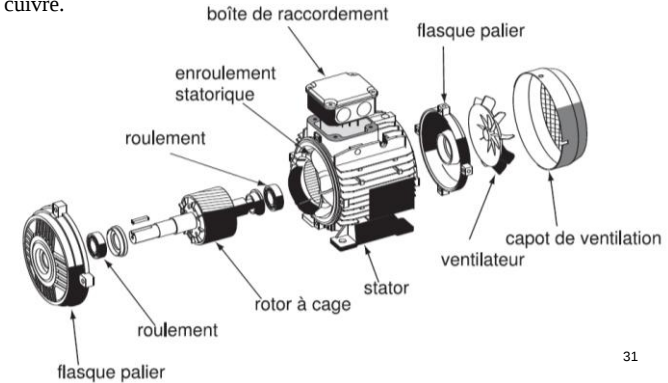
- **Rotor bobiné à bagues :** Un enroulement triphasé est bobiné sur le rotor. Les bobines sont raccordés en étoile et trois bornes sont donc accessibles par l'intermédiaire de balais frottant sur des bagues. On peut ainsi le court-circuiter en marche normale.



29

2. Moteur asynchrone

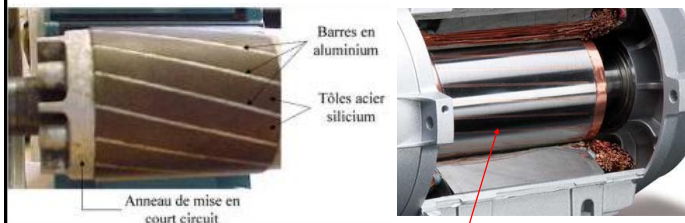
Le moteur à cage est de loin le plus utilisé dans l'industrie, notamment pour les faibles (cage en aluminium) et moyennes puissances (cage en cuivre).



31

2. Moteur asynchrone

- **Rotor à cages d'écureuil:** Des barres nues placées longitudinalement sont court-circuitées par deux anneaux à leurs extrémités. Il n'y a aucun moyen de faire des mesures électriques sur le rotor. Les barres peuvent être en aluminium moulé sous pression (pour les faibles puissances) ou en cuivre pour les moyennes et grandes puissances.



Rotor à cage en cuivre, moins de pertes Joule rotorique.

30

2. Moteur asynchrone

2. Principe de fonctionnement:

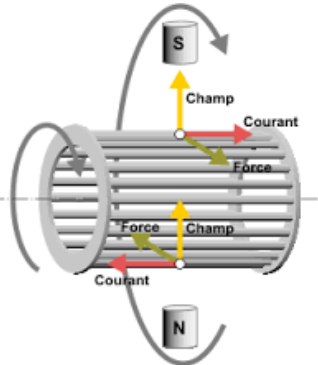
Le passage d'un courant triphasé dans les enroulements (reliés en étoile ou en triangle) crée un champ magnétique tournant à l'intérieur du stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, donc, elle est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée **vitesse de synchronisme**.

Ce champ variable créera des courants induits dans les bobines (barres) du rotor (lois de Faraday). Ces courants, avec le champ tournant, créent une force de Laplace qui tend à mettre le rotor en rotation pour s'opposer à la cause qui leur a donné naissance (c'est la loi de Lenz). Cette cause, est le déplacement du champ par rapport aux conducteurs du rotor. **Le rotor en court circuit part ainsi à la "poursuite" du champ magnétique tournant.**

32

2. Moteur asynchrone

Cependant, à mesure que le rotor gagne de la vitesse, la « coupure » des conducteurs par le champ magnétique tournant se fait moins rapidement et la tension induite dans les barres diminue, de même que le courant I des barres. Par conséquent, la force agissant sur les barres diminue. Si le rotor se déplaçait à la même vitesse que le champ, la tension induite, le courant I et la force deviendraient nuls.



À cause des frottements le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ tournant. Un observateur placé sur le rotor voit ainsi "glisser" le champ magnétique autour de lui d'où le nom **moteur Asynchrone**.

33

2. Moteur asynchrone

3. Vitesse de synchronisme ω_s :

- Pour une machine dont le nombre de paires de pôles est $p=1$:
 - Si t varie de 0 jusqu'à $T=0,02$ seconde.
 - La position du champ tournant varie de 0 à 2π .
 - Donc la vitesse du champ [rd/s] est: $\omega_s = 2\pi/T = 2\pi f$
- Pour une machine dont le nombre de paires de pôles est $p > 1$:
 - Si t varie de 0 jusqu'à $T=0,02$ seconde.
 - La position du champ tournant varie de 0 à $2\pi/p$.
 - Donc la vitesse du champ [rd/s] est: $\omega_s = 2\pi/pT = 2\pi f/p$

Donc, la vitesse de synchronisme est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles. Elle s'exprime en tours par minutes par:

$$\Omega_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ en tours par minute [tr.mn}^{-1}\text{].}$$

35

2. Moteur asynchrone

Glissement:

La vitesse de rotation de l'arbre du moteur est différente de la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant). Cette différence s'appelle le **glissement « g »**. Il est généralement exprimé en pourcentage de la vitesse de synchronisme par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

Avec: ω_s est la vitesse de synchronisme (du champ tournant) en rd/s.
 ω_r est la vitesse du rotor en rd/s.
 N_s est la vitesse de synchronisme (du champ tournant) en tr/mn.
 N_r est la vitesse du rotor en tr/mn.

- Si $\omega_r = \omega_s$ (à vide et sans frottements) $g = 0$.
- Si $\omega_r = 0$ (démarrage) $g = 1$.
- Si $\omega_r < \omega_s$ (mode de fonctionnement nominal) $g = \text{quelques \%}$.

En pratique le glissement nominal varie entre 2% (grosses machines) et 6% (petites machines). Mais, généralement, le glissement max peut aller, pour de faibles durées, jusqu'à 20% ... au delà le moteur cale

34

2. Moteur asynchrone

Exemple de vitesse de synchronisme:

Si la fréquence du réseau $f=50$ Hz, les vitesses possibles sont:

- Si $p=1$, la vitesse de synchronisme est: $\Omega_s = 60 \cdot f/p = 3000/1 = 3000 \text{ tr/mn}$
- Si $p=2$, la vitesse de synchronisme est: $\Omega_s = 60 \cdot f/p = 3000/2 = 1500 \text{ tr/mn}$
- Si $p=3$, la vitesse de synchronisme est: $\Omega_s = 60 \cdot f/p = 3000/3 = 1000 \text{ tr/mn}$
- Si $p=4$, la vitesse de synchronisme est: $\Omega_s = 60 \cdot f/p = 3000/4 = 750 \text{ tr/mn}$

Mode de fonctionnement de la machine asynchrone:

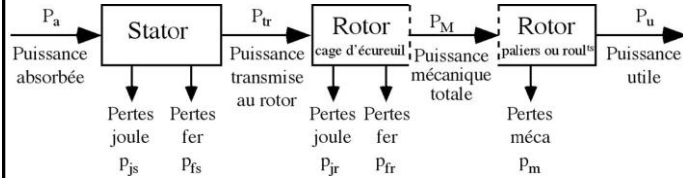
Mode moteur ($g > 0$): conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique

Mode générateur ($g < 0$): conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

36

4. Bilan de puissances:

2. Moteur asynchrone



Puissance électrique absorbée : $P_a = 3VI_s \cos(\varphi) = \sqrt{3}U I_l \cos(\varphi)$

Pertes fer (hystérésis + courant de Foucault) au stator : $P_{FS} = f(f_s, B)$

Pertes par effet Joule au stator : $P_{JS} = 3R_s I_s^2$

Pertes par effet Joule au rotor : $P_{Jr} = 3R_r I_r^2$

Pertes fer au rotor sont généralement négligées (f_r très faible)

Puissance transmise au rotor : $P_{Tr} = P_a - P_{JS} - P_{FS}$

37

5. Branchement des enroulements du stator:

2. Moteur asynchrone

DEFINITIONS:

Tension nominale : C'est la tension à appliquer au moteur pour un fonctionnement normale à vitesse et charge nominales; une tension trop élevée ou trop faible entraîne la destruction ou un mauvais fonctionnement du moteur.

Tension simple : C'est la tension mesurée entre une phase et le neutre du réseau ou des récepteurs.

Tension composée: C'est la tension mesurée entre deux phases quelconques du réseau ou des récepteurs. Une tension donnée sans autre précision est toujours la tension composée (ex : 15000 V, 380 V, etc.).

Couplage étoile (Y) : Un moteur est couplé en étoile quand chacun de ses trois enroulements est soumis à la tension simple du réseau.

Couplage triangle (Δ) : Un moteur est couplé en triangle quand chacun de ses trois enroulements est soumis à la tension composée du réseau.

39

Si on néglige les pertes fer rotor:

2. Moteur asynchrone

Puissance transmise au rotor : $P_{Tr} = C_{em} w_s$

Pertes Joule au rotor: $P_{Jr} = 3R_r I_r^2$

Puissance mécanique totale: $P_{mt} = P_{Tr} - P_{Jr} = C_{em} w_r$

Pertes Joule au rotor: $P_{Jr} = P_{Tr} - P_{mt} = C_{em}(w_s - w_r) = P_{Tr} * g$

Pertes mécaniques dues aux frottements: P_{mec}

Puissance utile disponible sur l'arbre: $P_u = P_{mt} - P_{mec} = C_u w_r$

Avec:

C_u couple utile disponible sur l'arbre.

w_r vitesse du rotor en rd/s.

Rendement du moteur asynchrone:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{C_u w_r}{C_u w_r + P_{JS} + P_{Jr} + P_{fer} + P_{mec}}$$

Rendement du rotor (pertes fer et mécaniques négligées):

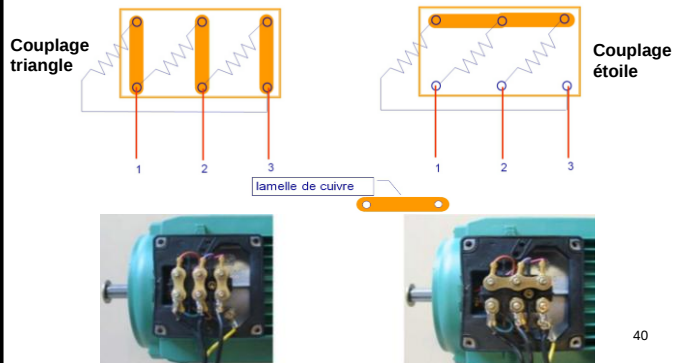
$$\eta = \frac{P_u}{P_{Tr}} = \frac{P_{mt}}{P_{Tr}} = (1 - g)$$

38

Choix du couplage des moteurs asynchrones triphasés :

2. Moteur asynchrone

Le couplage est choisi en fonction de la **tension nominale du moteur** et de la **tension composée du réseau d'alimentation**. Les trois barrettes livrées avec le moteur permettent de le coupler en étoile ou en triangle.



40

Exemple:

	Moteur 127/230	Moteur 230/400	Moteur 400/660
Réseau: 127/230	étoile	triangle	Sous-tension
Réseau: 230/400	surtension	étoile	triangle
Réseau: 400/660	surtension	surtension	étoile

Plaque signalétique:

- LEROY SOMER: le fabricant.
- LS: série.
- 80: Hauteur de l'axe du rotor.
- IP: indice de protection (55 étanche)
- MOT.3~: moteur triphasé.
- kW: puissance utile.
- V: tension efficace, pour étoile Y et pour triangle Δ.
- min⁻¹: vitesse en tours par minute.
- cos φ: facteur de puissance.
- A: courant nominal.

* LEROY SOMER		MOT. 3~ LS 80 L T				
IP 55		I cl.F		40°C		S1
N° 734570 BJ 002		kg 9				
V	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A	
Δ 220	50	2780	0,75	0,86	3,3	
Y 380					1,9	
Δ 230	50	2800	0,75	0,83	3,3	
Y 400					1,9	
Δ 240	50	2825	0,75	0,80	3,3	
Y 415	**				1,9	

- kg: masse du moteur.

- S1: mode de service continu.

41

2. Moteur asynchrone

3. Moteur pas à pas**1. Notions générales:**

Un moteur pas à pas « **stepping motor** en anglais » a été inventé en 1936. Ce moteur permet de transformer une impulsion électrique en un mouvement mécanique angulaire appelé « **pas** ».

On trouve trois types de moteurs pas à pas :

- le moteur à réluctance variable ;
 - le moteur à aimants permanents ;
 - le moteur hybride (combinaison des deux technologies précédentes).
- On caractérise un moteur par le nombre de pas par tour (c'est à dire pour 360°). Les valeurs courantes sont 48, 100 ou 200 pas par tour.

Les moteurs pas à pas sont utilisés pour les positionnements angulaires précis des systèmes qui ont un modèle connu et identifié de façon stable, ex: imprimantes, scanners, disques durs, robotiques, machine-outil...

Contrairement aux MCC, les moteurs pas à pas **ne nécessitent pas de boucle d'asservissement**, ils sont commandés en boucle ouverte. ⁴³

6. Alimentation est réglage des moteurs asynchrones:

- Alimentation par un système de tension triphasé (fréquence fixe) :

Dans ce cas, le moteur démarre avec un fort courant (4 à 8 du courant nominal). Pour diminuer ce courant, on utilise soit: le démarrage étoile-triangle, un autotransformateur, des résistances de démarrage couplées au rotor (pour les moteurs à rotor bobiné), un gradateur....

Les techniques présentées peuvent aussi faire varier la vitesse de la MAS mais sur une petite plage en agissant sur le glissement.

- Alimentation par un onduleur de tension (fréquence et amplitude variables) :

Dans ce cas, on peut assurer plusieurs type de commandes: démarrage par variation de la tension et de la fréquence, commande scalaire, commande vectorielle, commande directe du couple,...

42

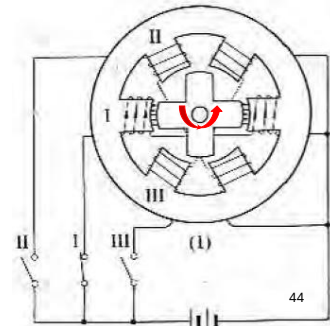
2. Moteur asynchrone

2. Moteur pas à pas à réluctance variable:

Ces moteurs sont composés d'un barreau de fer doux (le rotor) à plusieurs dents (ici 4) et d'un certain nombre de bobines (le stator). Lorsqu'on alimente une bobine, elle devient un électroaimant et le barreau de fer cherche naturellement à s'orienter suivant le champ magnétique afin de réduire l'entrefer.

Pour faire tourner ce moteur par **pas complet**, on alimente la phase 1, puis la phase 2, puis la phase 3...

Si nous souhaitons changer le sens du moteur, il suffit de changer l'ordre d'alimentation des bobines (1,3,2...). Donc le moteur tourne de 30° dès qu'on alimente une phase. Il faut 12 impulsions pour faire un tour complet. C'est un moteur 12 pas.



3. Moteur pas à pas

On peut faire fonctionner le moteur en **demi pas**, pour cela on doit envoyer les séquences suivantes: la phase 1, puis les deux phases 1 et 2, puis la phase 2, puis les deux phases 2 et 3, puis la phase 3, puis 3 et 1, puis 1,...

Donc le moteur tourne de 15° par pas. Il faut 24 impulsions pour faire un tour complet. C'est un moteur 24 pas.

3. Moteur pas à pas

3. Moteur pas à pas

3. Moteur pas à pas à aimants permanents:

Les moteurs à aimants permanents sont semblables aux moteurs à réluctance variable, sauf que le rotor possède des pôles NORD et SUD. À cause des aimants permanents, le rotor reste freiné à sa dernière position lorsque le bloc d'alimentation cesse de fournir des impulsions. Le moteur pas à pas à aimants permanents peut être excité par un stator à structure saillante ou à structure lisse (pas de force de freinage). Les moteurs à aimant permanent, qui se divisent en deux types : **les bipolaires** et **les unipolaires**.

Stator à structure lisse Stator à structure saillante

47

3. Moteur pas à pas

Inconvénients

- nécessite au moins trois bobinages, pour obtenir un cycle complet,
- pas de couple résiduel, c'est-à-dire que hors tension, le rotor est libre, ce qui peut être problématique pour ce genre de moteur.
- fabrication est assez délicate, les entrefers doivent être très faibles.

Avantages

- peu coûteux, d'une bonne précision.
- sens du courant dans la bobine n'a aucune importance.

Exemple: moteur pas à pas à 4 phases avec 8 pôles au stator et 6 pôles au rotor

Remarque:
Le nombre de pas par tour du moteur à réluctance variable est donné par :

$$N_p = 360 / (\alpha_r - \alpha_s)$$

Avec :

- α_r : Pas dentaire rotorique (en degrés)
- α_s : Pas dentaire statorique (en degrés)

46

3. Moteur pas à pas

Structure bipolaire:

Le courant de commande est bidirectionnel, une fois dans un sens et une fois dans l'autre sens. Ils créent dans les bobines une fois un pôle nord, une fois un pôle sud d'où le nom de **bipolaire**.

Fonctionnement à pas complet (entier) à faible couple:

figure 1 figure 2 figure 3 figure 4

Moteur à 4 pas	Figure 1	Figure 2	Figure 3	Figure 4
Bobine A	+	0	-	
Bobine B	0	+	0	

48

Fonctionnement à pas complet à couple maximal:

On alimente les bobines, deux par deux à chaque fois. Il y a toujours quatre pas mais le couple développé par le moteur est deux fois plus grand.

figure 1 figure 2 figure 3 figure 4

Moteur à 4 pas	Figure 1	Figure 2	Figure 3	Figure 4
Bobine A	+	+	-	-
Bobine B	+	-	-	+

49

Structure unipolaire:

Les enroulements sont à **point milieu** et ils sont alimentés avec une polarité (tension) toujours du même signe, d'où le nom d'**unipolaire**. On peut faire un fonctionnement à pas complet à faible couple (une seule bobine alimentée) ou à couple maximal (2 bobines alimentées).
Exemple de moteur unipolaire à couple maximal de 4 pas:

figure 1 figure 2 figure 3 figure 4

Moteur à 4 pas	Figure 1	Figure 2	Figure 3	Figure 4
T1, T2, T3, T4	0110	1010	1001	0101

51

Fonctionnement à demi pas (plus précis mais couple irrégulier):

Si on mélange les deux fonctionnements, on peut obtenir le double de pas, pour faire un tour complet, il faut 8 pas. On parle alors de demi-pas.

50

4. Moteur pas à pas hybride:

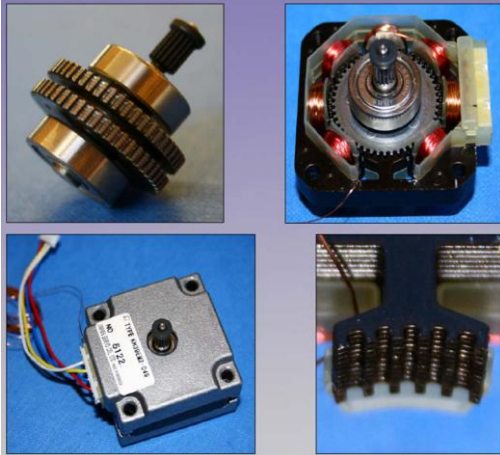
Le moteur pas à pas hybride est un mélange entre le moteur à aimant permanent et le moteur à réluctance variable. Son **rotor** comprend 2 structures cylindriques dentées et décalées d'une 1/2 dent l'une par rapport à l'autre et elles sont reliées ensemble par un aimant permanent magnétisé axialement. Le stator possède plusieurs pôles constitués de paquets de tôles entourés chacun d'une bobine; les tôles se terminant par des dents. Une phase est constituée de plusieurs dents. L'avantage est un nombre de pas très élevé.
La commande est similaire à un moteur pas à pas à aimant permanent.

(a) (b)

52

Exemple du moteur hybride:

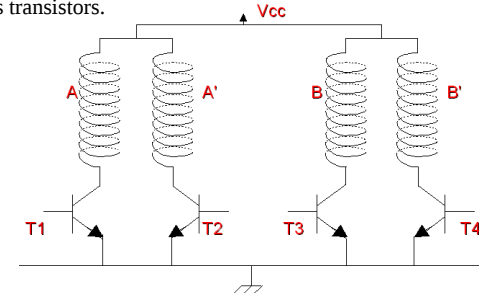
3. Moteur pas à pas



53

3. Moteur pas à pas

- Pour un moteur pas à pas type unipolaire (courant unidirectionnel dans la bobine), on utilise un hacheur simple pour chaque bobine. Des diodes de roue libre sont nécessaires pour assurer la circulation du courant lors du blocage des transistors.



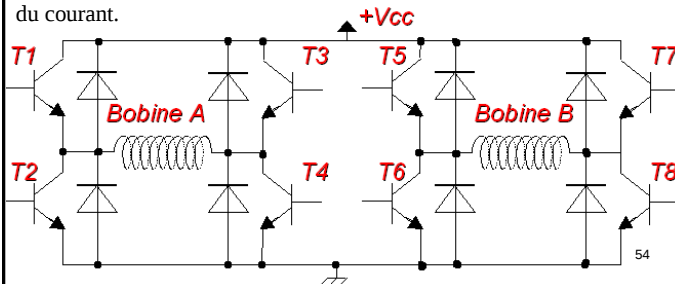
Conclusion: le moteur bipolaire est plus simple à fabriquer, mais il nécessite 8 transistors alors que le moteur unipolaire ne nécessite que 4 transistors.

55

Commande des bobines des moteurs pas à pas:

3. Moteur pas à pas

- Pour un moteur pas à pas type bipolaire (courant bidirectionnel dans la bobine), on utilise un hacheur en pont H pour chacune des deux bobines. si on commande T1 et T4, alors on alimente dans un sens, soit on alimente en T2 et T3, on change le sens de l'alimentation, donc le sens du courant.



54

Partie II

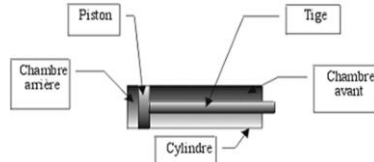
Actionneurs pneumatiques

56

1. Les vérins pneumatiques

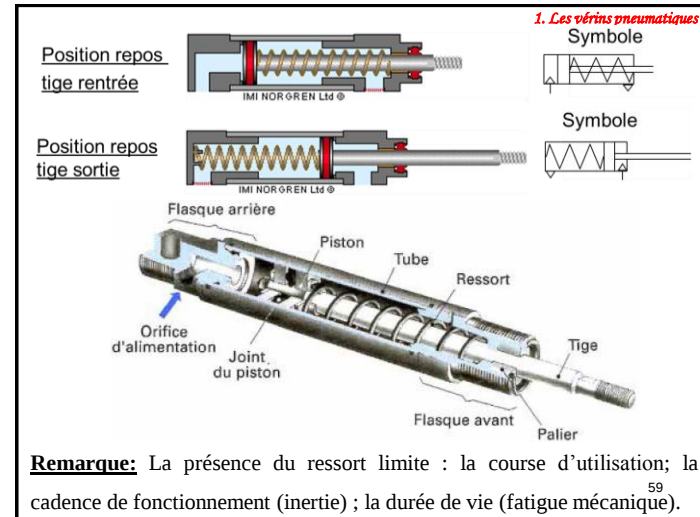
1. Notions générales :

Un vérin pneumatique transforme l'énergie pneumatique (l'air comprimé) en énergie mécanique. Il est constitué d'un tube cylindrique (le cylindre) dans lequel une pièce mobile (le piston) sépare le volume du cylindre en deux chambres isolées l'une de l'autre. Une tige rigide est attachée au piston et permet de transmettre l'effort (le déplacement). Le vérin pneumatique est utilisé avec de l'air comprimé entre 2 et 10 bars dans un usage courant.



Il existe de très nombreux types de vérins, les plus courants sont : le **vérin simple effet**, le **vérin double effet** et le **vérin rotatif**.

57

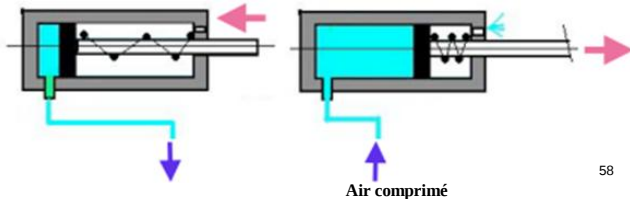


59

1. Les vérins pneumatiques

2. Vérin simple effet:

Il se caractérise uniquement par le fait qu'une seule arrivée d'air transmet la puissance au piston ; le retour en position d'origine de la tige est provoqué par un artifice mécanique lorsque la pression d'alimentation disparaît, ressort le plus souvent, mais il peut s'agir de l'élasticité d'une membrane faisant office de piston. L'emploi de ces vérins reste limité aux faibles courses.

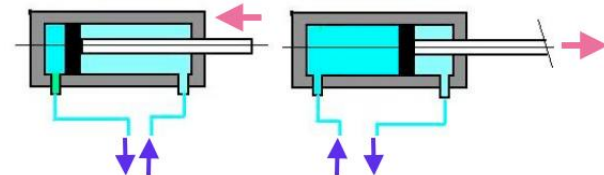


58

1. Les vérins pneumatiques

2. Vérin double effet:

Un vérin double effet a **deux directions de travail**. Il comporte deux orifices d'alimentation et la pression est appliquée alternativement de chaque côté du piston ce qui entraîne son déplacement dans un sens puis dans l'autre.



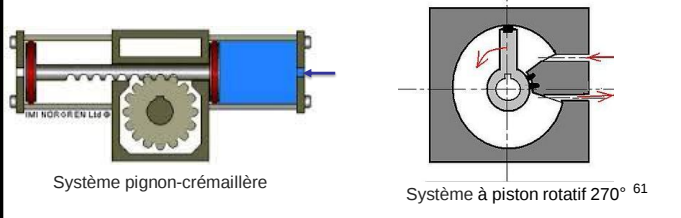
60

3. Vérin rotatif:

1. Les vérins pneumatiques

Les vérins rotatifs se classent en deux catégories :

- Ceux qui sont composés d'un corps cylindrique comprenant deux pistons reliés par un axe-crémaillère qui engrène avec pignon qui est mis en rotation par le mouvement de cet axe « **Système pignon-crémaillère** ».
- Ceux qui sont directement alimentés par un système rotatif type palette « **Système à piston rotatif** ».

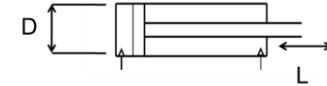


5. Caractéristiques et performances d'un vérin:

1. Les vérins pneumatiques

Le fonctionnement d'un vérin dépend des caractéristiques suivantes :

- Le diamètre du piston D;
- La course de la tige L;
- La pression d'alimentation.



Le choix et le dimensionnement d'un vérin s'effectuent en fonction de l'effort à transmettre.

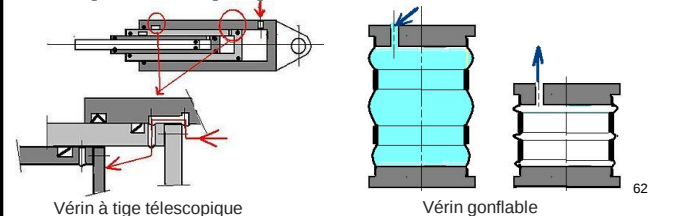
- Il faut déterminer la force que le vérin doit développer au cours du mouvement. Cela va nous permettre de définir le diamètre du vérin, en fonction de la pression de service.
- Il faut ensuite déterminer la longueur du mouvement à effectuer. Cela va nous permettre de déduire la course du vérin.
- Enfin, il faut déterminer les sens où le vérin travaille en charge:

1 sens (Vérin simple effet) ; 2 sens (Vérin double effet) 63

4. Vérin spéciaux:

1. Les vérins pneumatiques

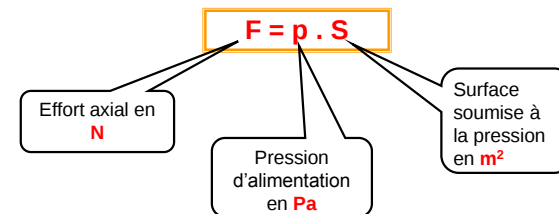
- Vérin à tige télescopique: telle une antenne télescopique, ce vérin comporte différentes tiges imbriquées l'une dans l'autre, qui permettent en se dépliant, d'atteindre des objets relativement loin (10m).
- Vérin souple (ou vérin gonflable) ; ce sont des vérins généralement gonflés à l'air, l'eau, l'huile, etc. Ces vérins sont composés d'un corps en caoutchouc seul ou pris entre deux flasques métalliques pour la fixation.



Force axiale:

1. Les vérins pneumatiques

La force axiale à la sortie du vérin est calculée par:



La pression est une notion physique fondamentale. Elle correspond à la force par unité de surface. L'unité légale de la pression (SI) est: **Le Pascal, Pa**..... Autres unités: **bar**, **atmosphère (atm)**, **livre par pouce carré (psi)**,...

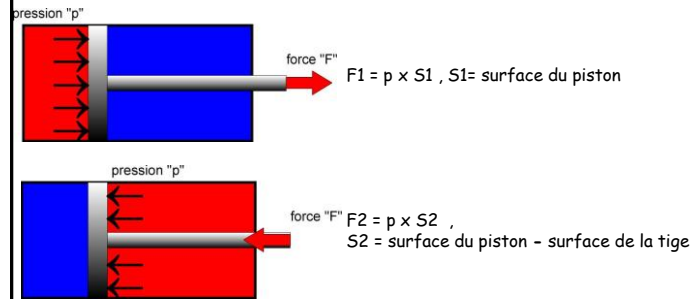
$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 10 \text{ N/cm}^2 = 10^5 \text{ Pa}$$

64

Remarque:*1. Les vérins pneumatiques*

L'effort dépend du sens du mouvement:

**Exemple:**

Calculer la force d'un vérin simple effet ayant un piston de diamètre $D = 8 \text{ mm}$ et alimenté par une pression de 6 bar....($F = 30,16 \text{ N}$)⁶⁵