



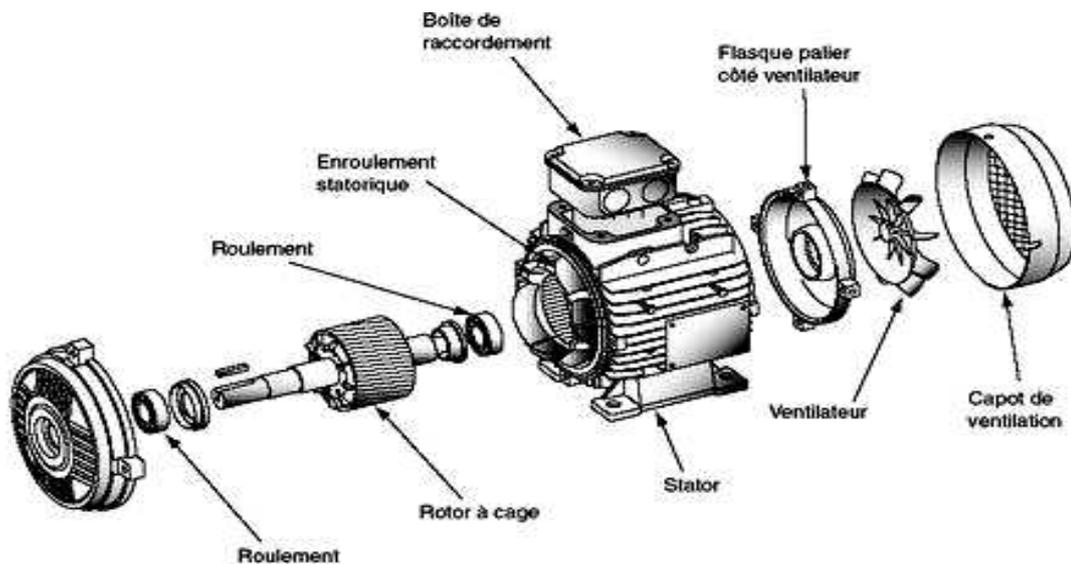
## MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE



### 1. Présentation:

La **machine asynchrone** connue également sous le terme anglo-saxon de "**machine à induction**", est une machine électrique à **courant alternatif**.

On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur mais, grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en **génératrice**. C'est par exemple le cas dans les **éoliennes**. La plupart des machines asynchrones sont de types **triphasés**, dans les équipements on rencontre aussi d'autres types qui sont monophasés.



### 2. Constitution :

Le moteur asynchrone comprend une partie fixe appelée stator (**inducteur**) et une partie mobile appelé rotor (**induit**).

#### 2.1. Le stator :

Il est constitué d'une carcasse ; avec un nombre de **pole** bien défini muni d'**encoches** destinées à recevoir son enroulement.

L'enroulement est constitué de **trois (3)** bobines **identiques** connectées à un réseau de tension triphasé équilibré, ces trois bobines sont donc couplées soit en **étoile** soit en **triangle**.

Il crée un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation  $n_s$  :

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

$n_s$  : Fréquence de rotation du champ ;

$f$  : fréquence des courants d'alimentation et

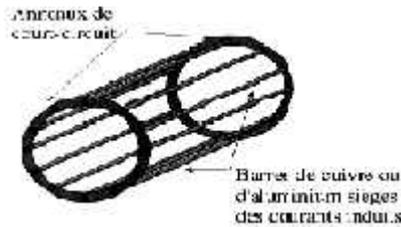
$p$  : Nombre de paires de pôles.

## 2.2. Le rotor :

Il en existe deux types : le rotor à **bague** ou **rotor bobiné** et le rotor en **court circuit** ou **rotor à cage d'écureuil**.

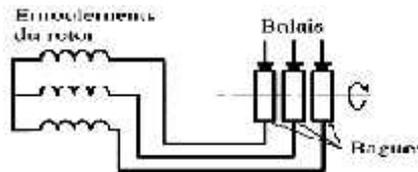
### 2.2.1. Le rotor à cage (court-circuit):

Le rotor à cage d'écureuil ou simplement à cage est souvent appelé rotor en **court-circuit**. Il est constitué de barres conductrices généralement en **aluminium**, logées dans un empilement de tôles. Les extrémités des ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices. Il peut être aussi constitué de bobinages de cuivre en court-circuit.

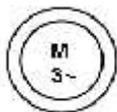


### 2.2.2. Le rotor à bagues (bobiné) :

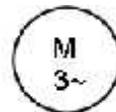
Pour ce type, le rotor a trois bobines (semblables à celles du stator). Les bobines sont couplées en étoile par leurs trois extrémités, les autres sont connectées à des bagues fixes sur l'arbre du rotor. Des balais frottant sur ces bagues permettent d'accéder au rotor, ceci permet d'insérer un rhéostat dans leur circuit. Ce rhéostat, qui est mis en court-circuit en **marche normale**, permet d'assurer des meilleures conditions au démarrage.



### 2.2.3. Symbole :

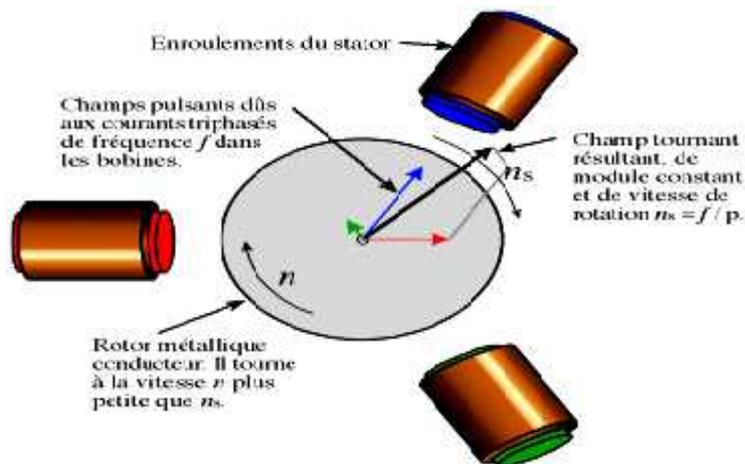


Moteur asynchrone à **bagues**



Moteur asynchrone à **cage**

## 3. Principe de fonctionnement :



Les **3** enroulements statoriques alimentés par un réseau triphasé équilibré créent dans l'**entrefer** un **champ magnétique tournant** à la fréquence de rotation de synchronisme  **$n_s$** . La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la **fréquence des courants statoriques**, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. L'enroulement du rotor est donc soumis à des variations de **flux du champ magnétique**. Une **force électromotrice induite** apparaît et crée des **courants rotoriques**. Ces courants induits s'opposent à la cause qui leur a donné naissance (**loi de Lenz**) : **ici la rotation du champ statorique**. Et comme ils ne peuvent empêcher la rotation du champ statorique, ces courants induits entraînent le rotor dans le même sens que ce champ tournant mais à une vitesse  **$n_r$**  inférieure à  **$n_s$** . Le rotor se met donc à tourner à la fréquence de rotation  **$n_r$**  pour tenter de suivre le champ statorique. De par son principe la machine est dite asynchrone car le rotor est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur d'atteindre la même vitesse que le champ statorique:  **$n_r < n_s$** .

**Remarque :**

Lorsque le rotor est entraîné **au-delà** de la **vitesse de synchronisme**, la machine fonctionne en **hyper synchrone**. La machine fonctionne en **générateur alternatif**. Mais son stator doit être forcément relié au réseau car le rotor seul peut créer le champ magnétique nécessaire pour faire apparaître les courants rotoriques.

**4. Glissement machine asynchrone :**

La différence entre la vitesse du champ tournant **statorique** et celle du **rotor** est appelée **vitesse de glissement** :  **$n_g = n_s - n_r$**

Soit  **$p$**  le nombre de **paires de pôles** de la machine et  **$f$**  la **fréquence** de l'alimentation (**réseau**). On a :

$$\boxed{n_s = \frac{f}{p}} \text{ en tr/s} \quad \text{ou} \quad \boxed{n_s = \frac{60f}{p}} \text{ en tr/min.}$$

De la même manière, on démontre que :

$$\boxed{n_r = \frac{f}{p}} \text{ en tr/s} \quad \text{ou} \quad \boxed{n_r = \frac{60f}{p}} \text{ en tr/min.}$$

Le glissement  **$g$**  est le quotient de la vitesse de glissement  **$n_g$**  sur la vitesse de synchronisme  **$n_s$** :

On définit le glissement par l'expression :  $g = \frac{n_s - n_r}{n_s}$

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad g n_s = n_s - n_r \quad n_r = n_s - g n_s = n_s(1 - g)$$

Le glissement peut aussi être calculé à partir des vitesses angulaires :

$$\boxed{g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}} \text{ vec} \quad \boxed{\Omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}} \quad \boxed{\Omega_r = \frac{2\pi n_r}{60}}$$

**$\Omega_s$**  : vitesse angulaire de synchronisme du champ statorique dans la machine en **rad.s<sup>-1</sup>**

**$\Omega_r$**  : vitesse angulaire de rotation de la machine **rad.s<sup>-1</sup>**

La fréquence des courants rotoriques est alors :  $f_r = g \cdot f$

❖ Exemple de vitesses de synchronisme  $n_s$  pour :

Fréquence 50Hz :

Fréquence du réseau	Nbr de pôles	Nbr de paires de pôles	Type de moteur	Fréquence de synchronisme
50Hz	2	1	Bipolaire	50tr/s soit 3000tr/mn
	4	2	Tétrapolaire	25tr/s soit 1500tr/mn
	6	3	Héxapolaire	16,666tr/s soit 1000tr/mn
	8	4	Octapolaire	12,5tr/s soit 750tr/mn
	10	5	Décapolaire	10tr/s soit 600tr/mn
	12	6	Dodecapolaire	8,33tr/s soit 500tr/mn
	14	7		7,14tr/s soit 428,57tr/mn

Fréquence 60Hz :

Fréquence du réseau	Nbr de pôles	Nbr de paires de pôles	Type de moteur	Fréquence de synchronisme
60Hz	2	1	Bipolaire	60tr/s soit 3600tr/mn
	4	2	Tétrapolaire	30tr/s soit 1800tr/mn
	6	3	Héxapolaire	20tr/s soit 1200tr/mn
	8	4	Octapolaire	15tr/s soit 900tr/mn
	10	5	Décapolaire	12tr/s soit 720tr/mn
	12	6	Dodecapolaire	10tr/s soit 600tr/mn
	14	7		8,57tr/s soit 514,28tr/mn

## 5. Plaque signalétique – Couplage :

### 5.1. Plaque signalétique :

Sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone, deux tensions sont indiquées ( $U_{\Delta}$  et  $U_Y$ ); la plus petite des deux tensions, appelée **tension triangle**  $U_{\Delta}$  est celle appliquée aux bornes d'un enroulement (dans certains cas seule cette tension est indiquée). L'autre tension la plus grande est appelé **tension étoile**  $U_Y$ .

Par exemple : 230 V / 400 V ( $U_{\Delta} = 230V$  ;  $U_Y = 400V$ )

Aussi les éléments suivants sont indiqués sur la place signalétique :

- La puissance utile du moteur **P** en charge nominale
- Le rendement du moteur  $\eta$  en charge nominale
- La fréquence du réseau d'alimentation
- Le courant  $I_{\Delta}$  correspondant à la tension  $U_{\Delta}$  en charge nominale
- Le courant  $I_Y$  correspondant à la tension  $U_Y$  en charge nominale
- La vitesse de rotation du moteur **n** en charge nominale
- Le facteur de puissance **Cos  $\phi$**  en charge nominale.

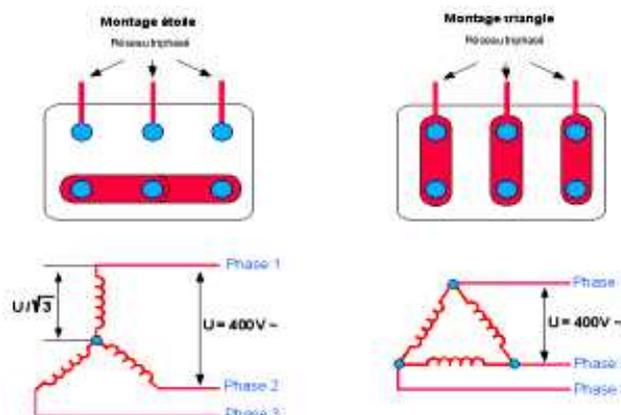
IP 55	I c.l. F	40°C	S1	%	c/h
$\Delta$ 380	50	1415	3	0,83	7,1
$\Delta$ 400	50	1420	3	0,78	7,2
$\Delta$ 415	50	1430	3	0,74	7,3

### 5.2. Couplage :

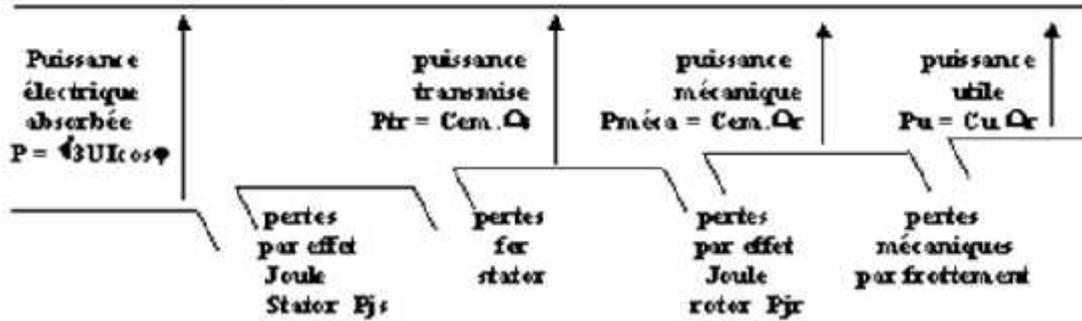
Pour vérifier que cette tension est bien appliquée sur un enroulement, le réseau doit être connu et représenté ainsi que les deux couplages possibles. Un seul sera retenu.

Pour le Réseau :

- si deux tensions sont mentionnées, ce sont les tensions simples **V** et composée **U** (Tension réseau  $U_R=U$ ). Par exemple : Réseau : 230 V / 400 V ( $U_R = 400V$ )
- si une seule tension est indiquée il s'agit de la tension composée **U** (C'est la tension du réseau  $U_R$ ). Par exemple : Réseau 220 V ( $U_R = 220V$ )
- Le moteur est couplé en **Etoile (Y)** quand  $U_R = U_Y$
- Le moteur est couplé en **Triangle ( $\Delta$ )** quand  $U_R = U_{\Delta}$
- Le couplage du moteur est **impossible** quand  $U_R \neq U_Y$  et  $U_R \neq U_{\Delta}$



6. Bilan des puissances :

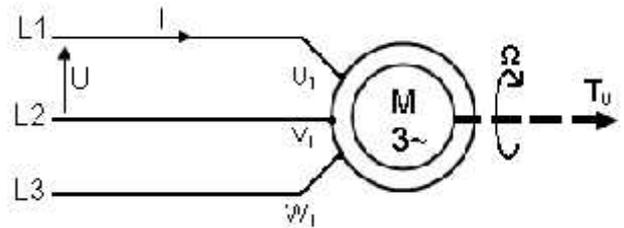


6.1. Puissance électrique absorbée  $P_a$  :

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

U : entre deux bornes du moteur

I : courant en ligne



6.2. Pertes par effet joule au stator  $P_{js}$  :

$$P_{js} = \frac{3}{2}RI^2$$

R : résistance entre deux bornes du stator (entre phases) et I : courant ligne quelque soit le couplage.

$$P_{js} = 3R_s J^2 \quad R_s \text{ résistance d'une bobine du stator et } J \text{ courant dans une bobine}$$

- Couplage Etoile :  $P_{js} = 3R_s I^2$  (Étoile  $J=I$ )

- Couplage Triangle :  $P_{js} = 3 R_s J^2$  (triangle  $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$ )  $P_{js} = R_s I^2$

6.3. Pertes fer au stator  $P_{fs}$  :

Elle ne dépende que de la tension U et de la fréquence f et sont donc constantes si le moteur est couplé au réseau.

6.4. Puissance transmise au rotor  $P_{tr}$  :

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

6.5. Moment du couple électromagnétique  $C_{em}$  :

$$C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} \quad C_{em} \text{ en (N.m) ; } P_{tr} \text{ en (W) et } \Omega_s \text{ en rad.s}^{-1}$$

### 6.6. Bilan des puissances transmises au rotor :

La puissance transmise au rotor est convertie d'une part en **puissance mécanique** et d'autre part en **pertes** par **effet joule** dans les conducteurs du rotor (**résistance rotor**).

#### 6.6.1. Puissance électromagnétique $P_{em}$ (Puissance mécanique totale):

Le couple électromagnétique du moment  $C_{em}$  entraîne le rotor à la vitesse  $\Omega_r$ . Il lui communique donc la puissance mécanique totale  $P_{em}$  :

$$P_{em} = C_{em} \Omega_r$$

**Autre expression:** en tenant compte de l'expression du moment  $C_{em}$  en fonction de  $P_{tr}$ , nous pouvons

écrire :

$$P_{em} = P_{tr} \frac{\Omega_r}{\Omega_s} \quad C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} \quad \text{avec } g = 1 - \frac{\Omega_r}{\Omega_s} \Rightarrow \frac{\Omega_r}{\Omega_s} = (1 - g) \Rightarrow P_{em} = P_{tr} (1 - g)$$

Cette puissance comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.

#### 6.6.2. Pertes par effet joule et fer au rotor ( $P_{jr}$ et $P_{fr}$ ):

Ces pertes représentent la différence entre  $P_{tr}$  et  $P_{em}$ . Elles sont dues aux **courants induits** et ne sont pas mesurables car le rotor est **court-circuité**. On les calcule.

Donc :  $P_{jr} + P_{fr} = P_{tr} - P_{em} = P_{tr} - P_{tr}(1 - g) = g P_{tr}$

$$P_{jr} = g P_{tr}$$

Les pertes fer au rotor sont **négligeables** car la fréquence des courants rotoriques est faible.

#### 6.6.3. Les pertes mécaniques $P_m$ :

Elles sont dues au **frottement** et à la **ventilation**. Elles sont pratiquement **constantes** car la vitesse de rotation varie peu en marche normale.

$$P_m = P_{em} - P_u$$

#### 6.6.4. Les pertes collectives $P_c$ :

Ces pertes ne dépendent que de  $U$ ,  $f$  et  $n$ . Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi.

$$P_c = P_{fs} + P_m$$

On définit le **couple de perte** par :

$$C_p = \frac{P_c}{\Omega_s}$$

Le couple de perte est une grandeur constante quelque soit la vitesse et la charge de la machine.

#### 6.6.5. La puissance utile $P_u$ :

Puissance utile :

$$P_u = P_{em} - P_m$$

Couple utile :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega_r}$$

## 7. Le rendement :

Le rendement est le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée du moteur :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Ce rendement s'écrit aussi :

$$\eta = \frac{T_u \Omega}{UI\sqrt{3}\cos\varphi}$$

$$\text{Ou : } \eta = \frac{P_a - P_{fs} - P_{js} - P_{jr} - p_m}{P_a} = \frac{P_{tr}(1-g) - p_m}{P_a}$$

### ➤ Expression approchée du rendement :

Quand le moteur fonctionne au voisinage de sa **puissance nominale**, pour avoir seulement un ordre de grandeur du rendement, les pertes peuvent être **négligées** devant la **puissance absorbée**. La puissance transmise au rotor se confond alors avec la puissance absorbée ( $P_{tr} = P_a$ ).

De la même manière, les pertes mécaniques **Pm** peuvent être **négligées** mais il faut tenir compte des pertes par effet joule au rotor **Pjr**, relativement importantes à **pleine charge**. La puissance utile est alors donnée par l'expression :

$$P_u = P_{tr} - P_{jr} = (1 - g) P_{tr}$$

Avec ces hypothèses simplificatrices le rendement s'écrit :  $\eta = \frac{P_u}{P_a} \approx \frac{P_u}{P_{tr}} = 1 - g$

$$\eta \approx 1 - g$$

Ce résultat exprime que **(1 - g)** constitue le **rendement maximum**.

## 8. Caractéristiques :

### 8.1. Etude à vide :

$$P_a = P_u + \Sigma \text{ Pertes}$$

A vide le moteur tourne sans rien entrainer et  $T_u$  est nul ainsi  $P_u$  est nulle

$P_{ao} = P_{fs} + P_{jso} + P_{jro} + P_m + P_{fr}$  Avec  $P_{jso} = \frac{3}{2} RI_0^2$ ,  $P_{jr}$  et  $P_{fr}$  sont négligeables car **g** est faible à vide et fréquence rotorique  $f_r$  faible.

$$P_{ao} = P_{fs} + P_{jso} + P_m$$

$$\text{Posons : } P_{fs} + P_m = P_c \text{ (perte constantes)} \Rightarrow P_c = P_{ao} - P_{jso}$$

En générale on admet que :  $P_{fs} = P_m = \frac{P_c}{2}$

**8.2. Etude en charge :**

➤ **Point de fonctionnement :**

La charge impose un **couple résistant** de moment  $T_r$  sur l'arbre qui tourne à la fréquence  $n_r$ . Le moteur doit fournir un **couple utile** de moment  $T_u$ , à l'équilibre  $T_u = T_r$ .

Le **point de fonctionnement** du groupe **moteur-charge** se situe à l'intersection des caractéristiques mécaniques  $T_u = f(n)$  et  $T_r = f(n)$  des deux machines.

➤ **Caractéristique mécanique  $T_u = f(n)$  ou  $T_u = f(g)$**

