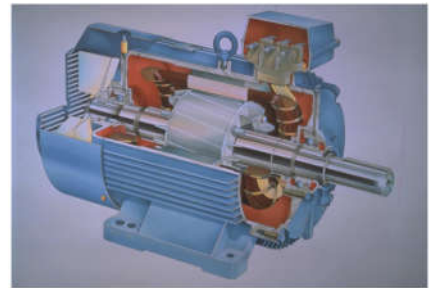


## Actionneurs électriques : Moteurs asynchrones et synchrones

### 3.1. Le moteur asynchrone

#### 3.1.1. Généralités et utilisations

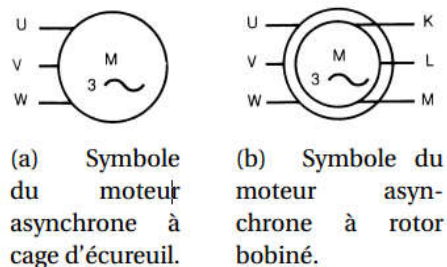
Le moteur asynchrone, appelé aussi « moteur à induction », a été inventé par Nikola Tesla vers 1890, aux USA. Le Moteur asynchrone (MAS) est un actionneur électrique très utilisé dans l'industrie. D'une puissance allant de moins d'un kilo Watt, à plusieurs dizaines de MW, les MAS équipent plusieurs mécanismes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



**Figure 3.1.** Symboles du moteur asynchrone.

#### 3.1.2. Symboles

La machine asynchrone est généralement représentée par les symboles suivants



**Figure 3.2.** Symboles du moteur asynchrone.

### 3.1.3. Rappels sur le réseau triphasé

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

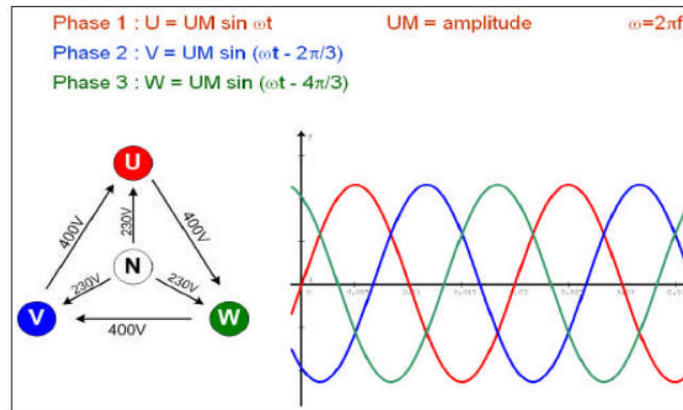


Figure 3.3. Réseau triphasé.

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

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

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

#### Les courants de Foucault

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

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

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

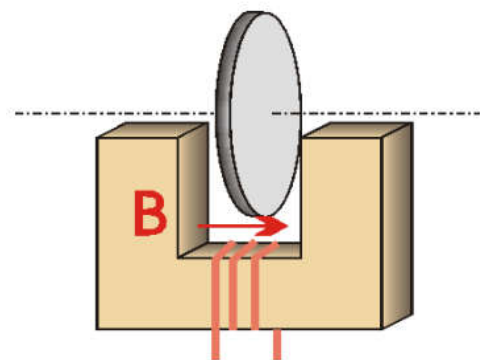
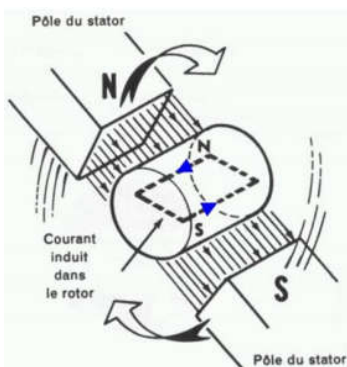


Figure 3.4. Illustration des courants de Foucault.

### Champ magnétique

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

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

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

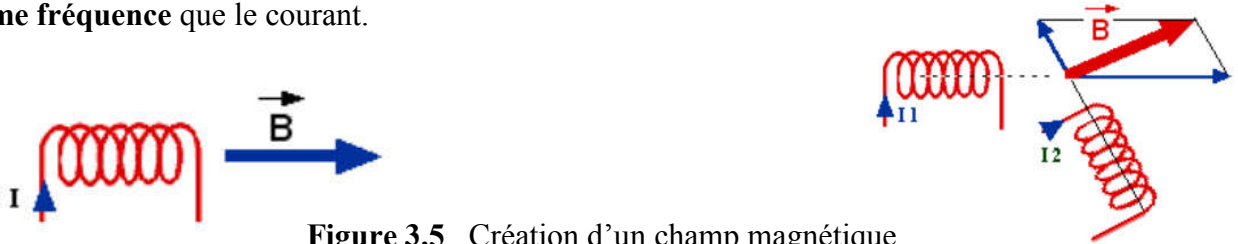


Figure 3.5. Création d'un champ magnétique.

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

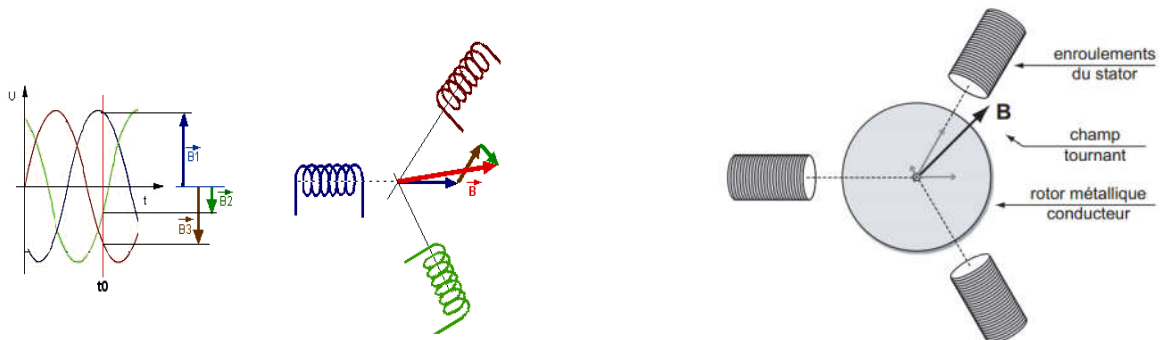


Figure 3.6. Création d'un champ magnétique tournant par trois bobines .

#### 3.1.4. Principe de fonctionnement :

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

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

**Notons que si le rotor tournait à la même vitesse que le champ tournant généré par le stator, le rotor ne verrait pas de variation de champ magnétique et les courants induits**

**disparaîtraient.** C'est la raison pour laquelle le rotor tourne forcément à **une vitesse différente du champ tournant** d'où le nom de moteur asynchrone (asynchrone : **différence de vitesse**).

Le coefficient de glissement  $g$  représente cette différence de vitesse.

$g$  = glissement

$n_s$  = vitesse de synchronisme

$n$  = vitesse réelle

$f$  = fréquence du courant

$p$  = nombre de paire de pôle du stator

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

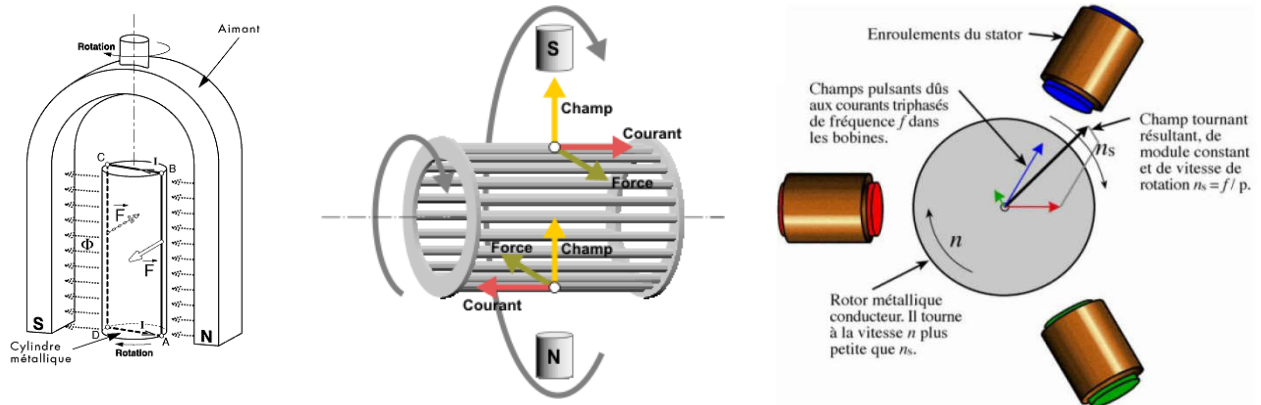


Figure 3.7. Principe du fonctionnement du moteur asynchrone.

### 3.1.5. Constitution du moteur asynchrone triphasé

#### A. Stator

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

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

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

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

$f$  : fréquence du réseau (courants inducteurs) ;

$p$  : nombre de paires de pôles.

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



Figure 3.8. Stator d'un moteur asynchrone.

#### B. Le rotor

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

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

Parmi les types les plus usités on distingue:

#### - Rotor bobiné

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

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

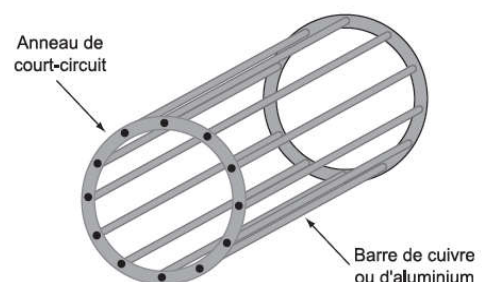
**Inconvénient:** fragilité des contacts glissants (balais frottant sur des bagues); coût élevé.

#### - Rotor à cage d'écureuil

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



**Figure 3.9.** Rotor bobiné d'un moteur asynchrone.



**Figure 3.10.** Rotor à cage d'écureuil d'un moteur asynchrone.

**Avantage :** robuste et peu coûteux

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

**C. Entrefer**

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

**3.1.6. Plaque signalétique**

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

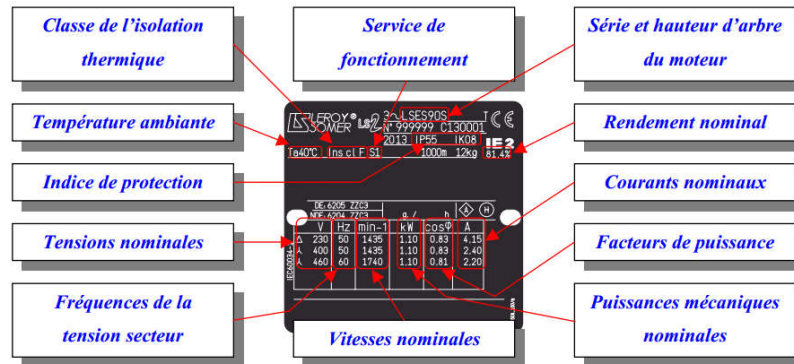


Figure 3.11. Plaque signalétique.

**3.1.7. Caractéristiques**

**A. Fonctionnement à vide**

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

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

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

**B. Fonctionnement en charge**

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

**Remarque** : le moteur asynchrone peut démarrer en charge.

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

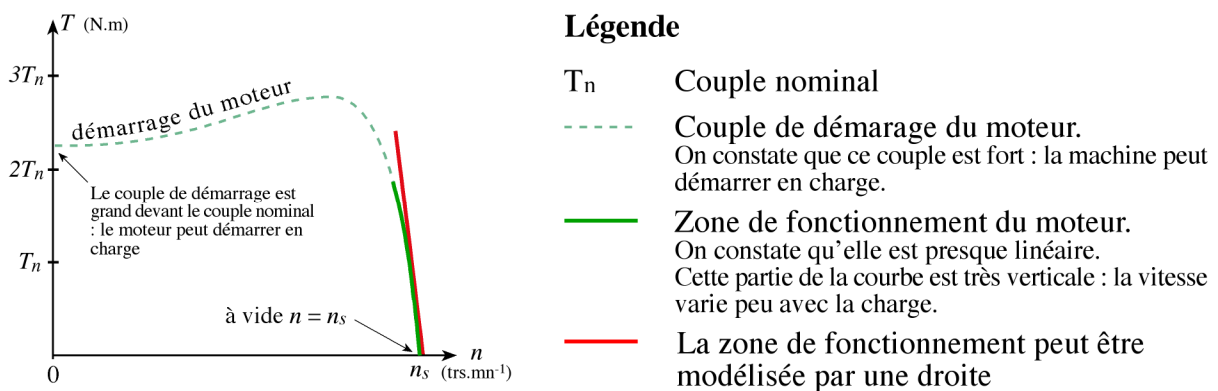
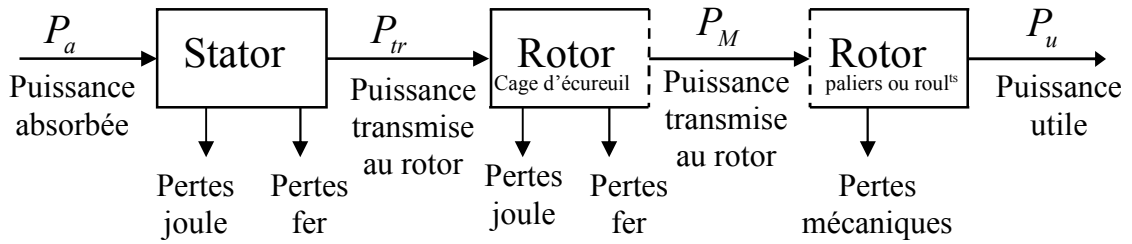


Figure 3.12. Caractéristique mécanique  $T_u = f(n)$ .

**3.1.8. Bilan des puissances pour un moteur asynchrone**



**Figure 3.13.** Bilan des puissances.

**Puissance électrique absorbée**

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

U : tension entre deux bornes du moteur

I : courant en ligne

$\varphi$  : déphasage entre courant et tension

**Pertes par effet joule au stator**

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

R : résistance entre deux bornes du stator

**Puissance transmise :  $P_{tr}$**

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

Elle représente la puissance que reçoit le rotor.

**Moment du couple électromagnétique :  $T_{em}$**

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

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

$T_{em}$  (N.m) ;  $P_{tr}$  (W) ;  $\Omega_s$  (rad.s<sup>-1</sup>)

**Puissance mécanique totale :  $P_M$**

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

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

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

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

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

Ce type de pertes est négligeable

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

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

Les pertes fer du rotor sont négligeables.

**Pertes collectives :  $p_c$**

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

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



---

**Couple de perte :**  $T_p = \frac{p_c}{\Omega_s}$  Le couple de perte est constant quelle que soit la vitesse et la charge de la machine

**Autres :**  $P_u = P_M - p_m$  ;  $T_u = \frac{P_u}{\Omega}$  ;  $\eta = \frac{P_u}{P_a}$

**Bilan complet :**  $P_a = P_u + p_{js} + p_{jr} + p_c$

**Bilan des puissances à vide**

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

$P_{a0} = \sqrt{3}UI_0 \cos\varphi_0$  et  $p_{js0} = \frac{3}{2}RI_0^2 \approx 0$  (puisque  $I_0$  est faible)

$p_c$  à vide  $\approx p_c$  en charge

**Bilan à vide :**  $P_{a0} \approx p_c$  Il est possible de déterminer les pertes collectives par un essai à vide.

## 3.2. Le moteur synchrone

### 3.2.1. Définition

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

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

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

### 3.2.2. Domaines d'emploi

Parmi les applications des moteurs synchrones nous pouvons citer

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

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

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

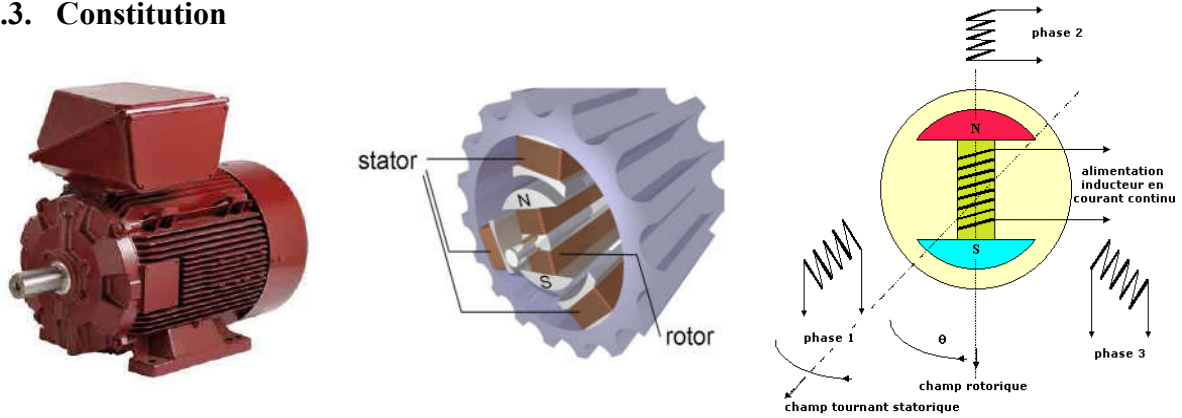
- Machines d'usinage numérique (UGV), commande de mécanismes (aéronautique et espace...).
- Motorisation de véhicules électriques ou hybrides (vélo à assistance électrique, scooter, Prius Toyota...).

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

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



**3.2.3. Constitution**



**Figure 3.14.** Structure d'un moteur synchrone.

**A. Stator = induit**

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

**B. Rotor = inducteur**

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

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

**3.2.4. Principe de fonctionnement**

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

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

La vitesse de synchronisme  $n_s$  est donnée par la relation suivante

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

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

**3.2.5. Symbole**



**Figure 3.15.** Symbole d'une machine synchrone.

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

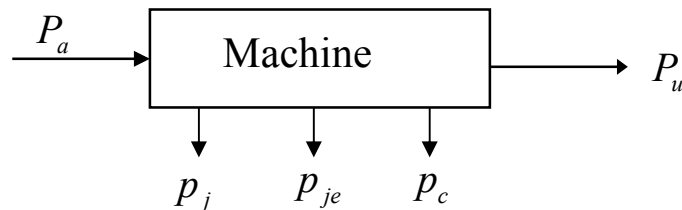


Figure 3.16. Exemple d'une plaque signalétique d'un moteur synchrone .

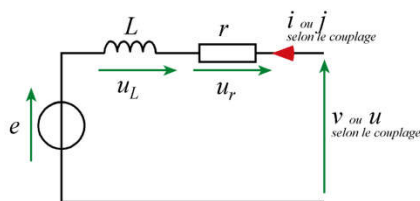
À partir de la plaque signalétique nous pouvons tirer les informations suivantes :

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

3.2.7. Bilan des puissances



Modèle d'un enroulement de l'induit (stator)



$e$  : f.é.m. à vide (V)

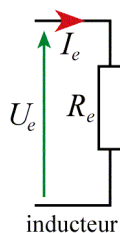
$v$  : tension aux bornes d'un enroulement du moteur (V)

$r$  : résistance de l'enroulement ( $\Omega$ )

$X = L \cdot \omega$  : réactance synchrone ( $\Omega$ )

$\varphi$  : déphasage entre courant et tension

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



$I_e$  : courant d'excitation (A)

$U_e$  : tension d'excitation (V)

$R_e$  : résistance de l'enroulement ( $\Omega$ )

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

	<b>Monophasé</b>	<b>Triphasé</b>
<b>Moteur</b>		
Puissance absorbée	$P_a = VI \cos \varphi + U_e I_e$	$P_a = \sqrt{3} UI \cos \varphi + U_e I_e$
Puissance utile	$P_u = \Omega_s T_u$	
<b>Pertes pour le moteur</b>		
Pertes joules	$p_j = rI^2 + R_e I_e$	$p_j = \frac{3}{2} R I^2 + R_e I_e^2$
Pertes collectives	$p_c = p_{fer} + p_{méca}$	
	Les pertes collectives peuvent s'estimer par un essai à vide	