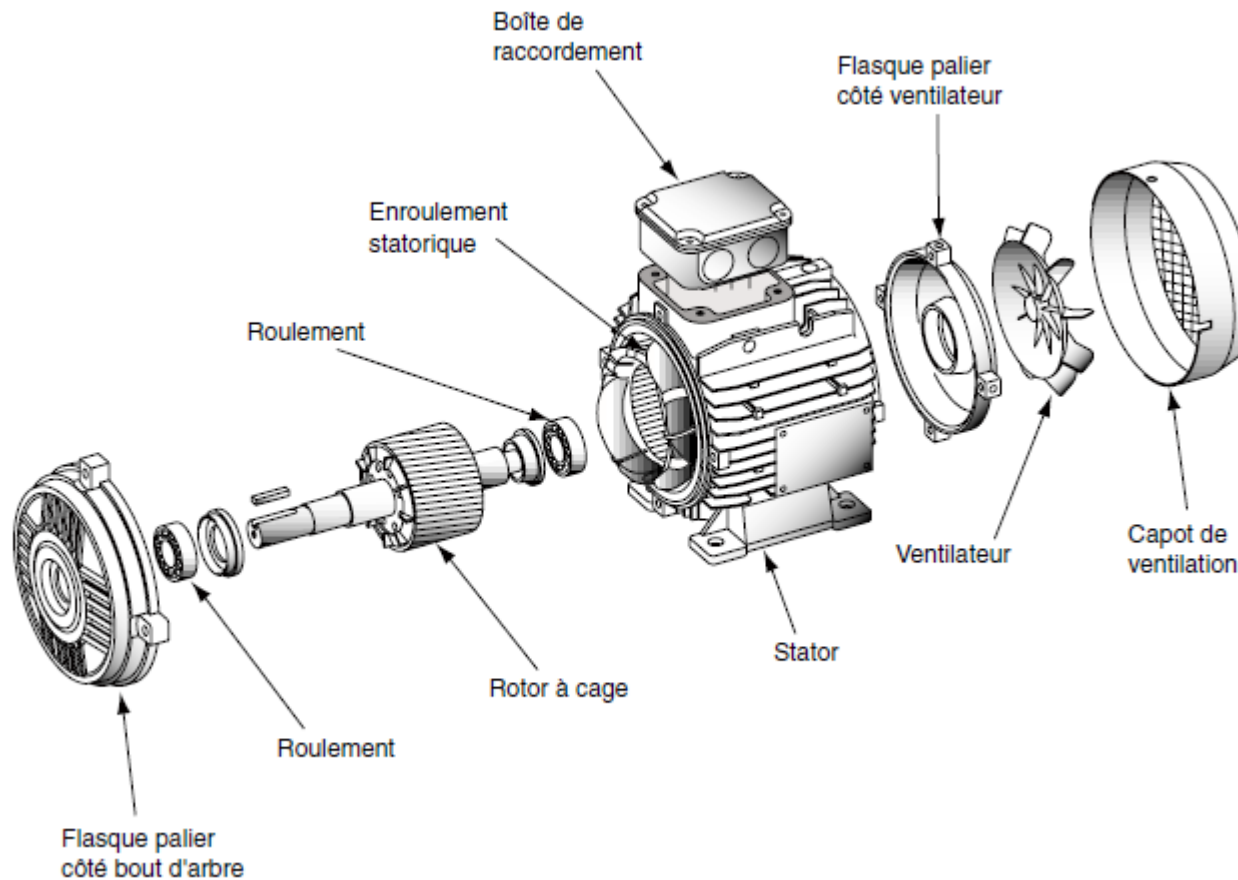


# CHAPITRE 4 MACHINES ASYNCHRONES

Les machines asynchrones sont très utilisées (on estime que 80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) car

- leur coût est inférieur à celui des autres machines,
- de plus ces machines sont robustes.
- la machine asynchrone est réversible



# CHAPITRE 4 MACHINES ASYNCHRONES

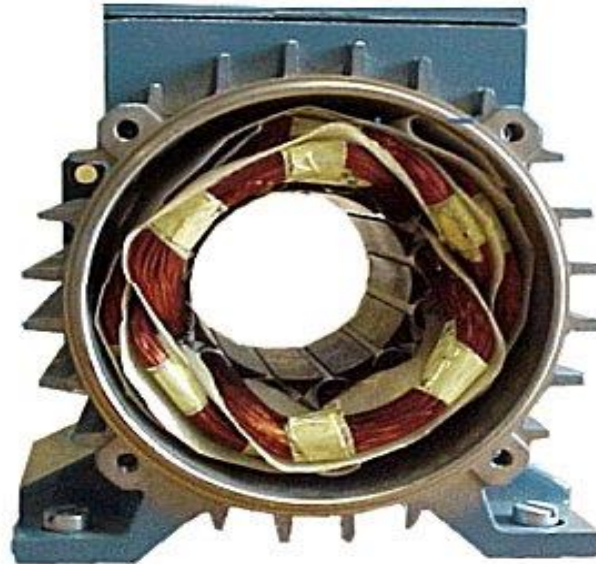
Ce chapitre représente **le minimum** de ce qui doit être compris pour être capable de mener un **projet de machine asynchrone** ou **le maximum** de ce qui est **tolérable** pour comprendre ce qu'il y a dedans.

# STRUCTURE

Une machine asynchrone comprend généralement :

- un stator triphasé comportant  $p$  paires de pôles par phase, identique à celui d'une machine synchrone

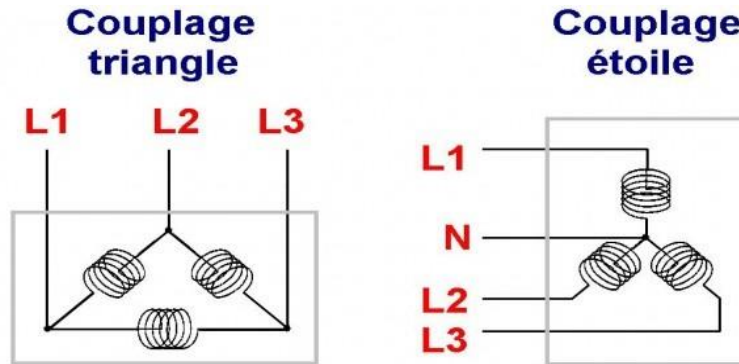
## stator



ICI 3 PAIRES DE PÔLES

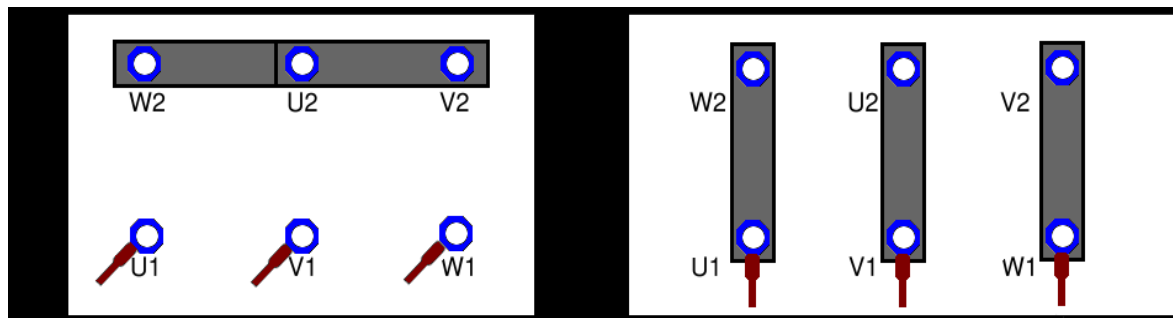
## Deux couplages sont possibles :

Etoile (Y) qui impose une tension simple à chaque enroulement ou triangle (D) qui impose une tension composée à chaque enroulement.



Couplage du stator d'un moteur asynchrone

## Plaque à bornes de la machine



Couplage étoile

Couplage triangle

# Rotor

## Rotor à cage

– Un rotor est constitué de conducteurs mis en circuit fermé. On rencontre deux types de rotor

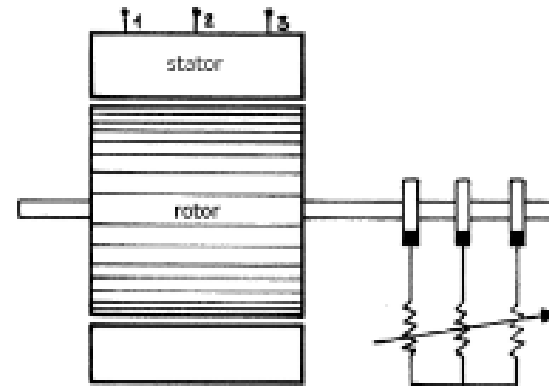


Le rotor est constitué de **barreaux de cuivre** ou d'aluminium reliés aux deux extrémités par **deux couronnes conductrices**. Ce modèle (en forme de cage d'écureuil) peu coûteux et très robuste est le plus répandu

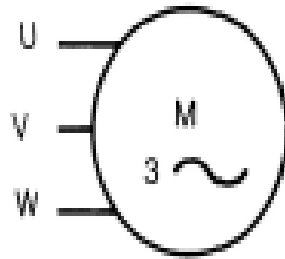
# Rotor

## Rotor bobiné

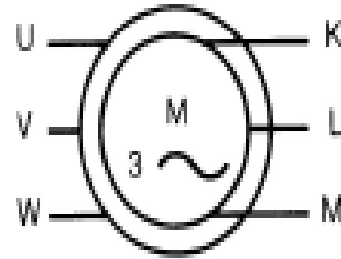
L'enroulement, semblable à celui du stator, comporte  $p$  paires de pôles par phase ; les trois paires sont reliées à **trois bagues** qui permettent d'insérer un **rhéostat** dans le circuit du rotor. Ce moteur est aussi nommé **moteur à bagues**



Deux **symboles** employés pour représenter la machine asynchrone



(a) Symbole du moteur asynchrone à cage d'écureuil.

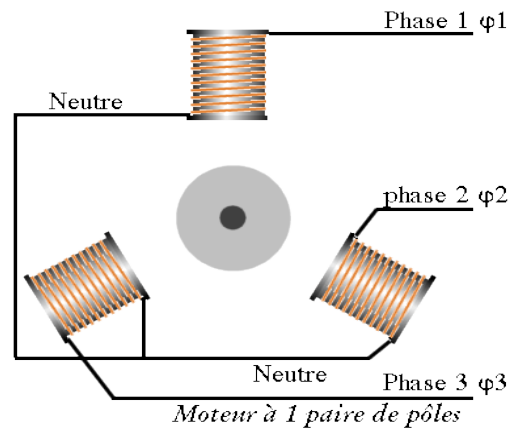


(b) Symbole du moteur asynchrone à rotor bobiné.

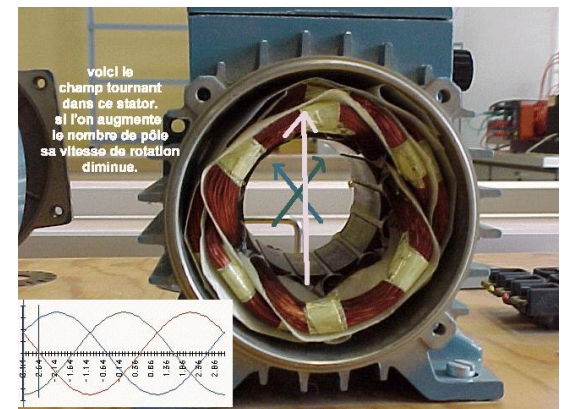
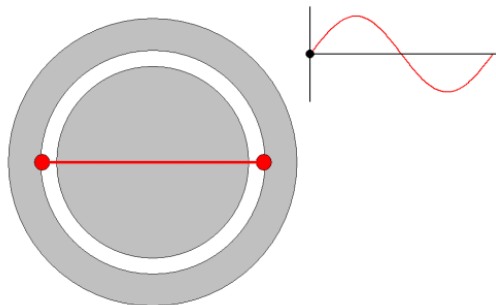
# PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE ASYNCHRONE

## NOTION DE CHAMP TOURNANT

Un ensemble de **trois bobines** identiques, disposées de manière que leurs axes se trouvent dans le même plan et fassent entre eux un **angle de 120°**, et parcourues par des **courants triphasés** décalés entre eux de **120°**, produisent un **champ tournant** à une **vitesse** égale à la **pulsation des courants**



Création d'un champ tournant



## PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Le stator, alimenté par un réseau de fréquence  $f_s$ , crée une induction tournante dans l'espace

$B_s$  de vitesse  $N_s$ , telle que  $N_s = \frac{60 \times f_s}{p}$ . Avec  $N_s$  vitesse de synchronisme en tr/min,  $f_s$

fréquence du réseau d'alimentation en Hz (50 Hz), et  $p$  nombre de pair de pôles.

Supposons le rotor immobile : il est balayé par cette induction  $\phi = B_s \times S$  et des forces

d'électromotrices sont engendrées dans les conducteurs (loi de Faraday  $e = \frac{d}{dt} \phi$  ).

VITESSE DU CHAMPS TOURNANT       $N_s = \frac{60 \times f_s}{p}$

p (pair de pôle)	1	2	3	4	5
$N_s$ (tr / min)	3000	1500	1000	750	600

Comme les circuits rotoriques sont fermés, des courants du rotor prennent naissance. Il apparaît des forces électromotrices dues à l'action de l'induction statorique sur les courants rotoriques. En vertu de la loi de Lenz, ces forces tendent à entraîner le rotor dans le sens des inductions tournantes. Il existe un couple de démarrage, le rotor se met à tourner.

Le rotor va suivre le champ tournant  $B_s$  mais il va tourner à une fréquence légèrement inférieure  $N$  à la fréquence de synchronisme  $N_s$  d'où le nom de moteur asynchrone.

Cette différence de vitesse s'appelle le glissement.

### Glissement

L'origine des courants rotoriques réside dans la différence des vitesses  $N_s$  et  $N$ . On introduit

#### **GLISSEMENT**

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

#### **VITESSE DU ROTOR**

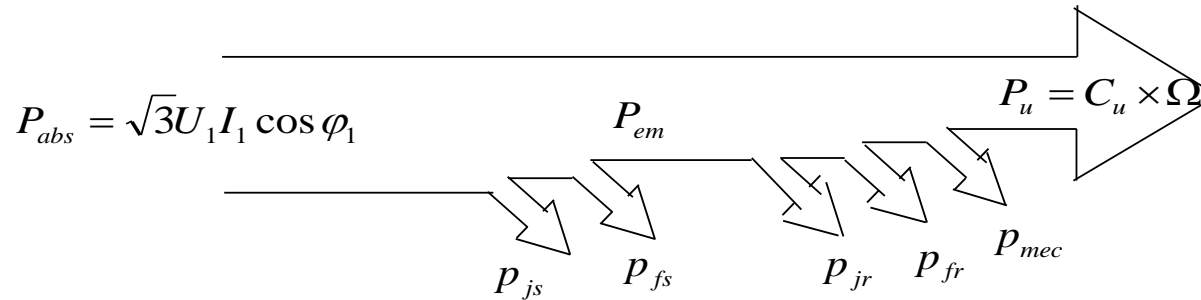
$$N = N_s (1 - g)$$

#### **FRÉQUENCES DU ROTOR**

$$f_R = g \times f_s$$

## Bilan de puissances

On peut regrouper sur un diagramme les diverses pertes de puissance active du **moteur** :



$P_{abs}$  : Puissance absorbée

$P_{js}$  : Pertes joules au stator

$P_{fs}$  : Pertes fer au stator

$P_{em}$  : Puissance électromagnétique ou puissance transmise au rotor

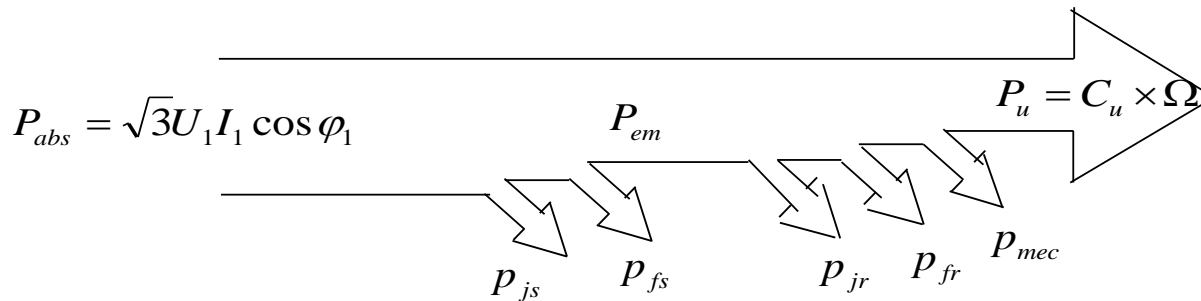
$p_{jr}$  : Pertes joules au rotor

$P_{fr}$  : Pertes fer au rotor

$p_{mec}$  : Pertes mécaniques

$P_u$  : Puissance utile

## Bilan de puissances



Puissance électrique absorbée par le stator  $P_{abs} = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi_1$

Pertes Joule du stator : si  $r_1$  est la résistance d'une phase statorique, alors  $p_{js} = 3 \times r_1 \times I_1^2$

Pertes fer stator: comme pour le transformateur, elles seront liées au carré de la tension  $P_{FS}$

Puissance électromagnétique  $P_{em}$

c'est la puissance transmise du **stator** au **rotor** par les inductions tournantes à la vitesse  $\Omega_s$

$$P_{em} = C_{em} \times \Omega_s = C_{em} \times \frac{2\pi \times N_s}{60} \qquad P_{em} = P_{mec} + p_{jr}$$

Pertes Joule rotor : si  $r_2$  est la résistance d'une phase du rotor et  $I_2$  le courant du rotor, on

aura  $p_{jR} = 3 \times r_2 \times I_2^2$

La puissance **mécanique** est fournie par le rotor à la vitesse  $\Omega$

$$P_{mec} = C_{mec} \times \Omega = C_{mec} \times \frac{2\pi \times N}{60} \qquad P_{mec} = P_u + p_{mec}$$

## Bilan de puissances

– Les pertes mécaniques  $p_{mec}$  correspondent à un couple de frottement  $c_f = \frac{P_{mec}}{\Omega}$

La **puissance utile**, délivrée sur l'arbre de sortie du moteur, s'écrit en introduisant le **couple utile**

$$P_u = C_u \times \Omega = C_u \times \frac{2\pi \times N}{60} \quad C_u = C_{mec} - c_f$$

Il en résulte une **propriété remarquable** du moteur:

$$P_{em} = C_{em} \times \Omega_s = P_{mec} + p_{jr}$$

$$p_{jr} = g \times P_{em} = \frac{g}{1-g} P_{mec}$$

$$P_{abs} = P_u + p_{jS} + p_{FS} + p_{jR} + p_{fr} + P_{mec}$$

$$P_{em} = P_{abs} - p_{jS} - p_{FS}$$

# SCHÉMA ÉQUIVALENT MONOPHASÉ D'UNE MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE

On étudie uniquement les grandeurs relatives à une phase

A l'arrêt, la machine se comporte comme un transformateur à champ tournant ( $g=1$ )

Ces équations conduisent à un schéma équivalent de transformateur dont le primaire est le stator et le secondaire le rotor

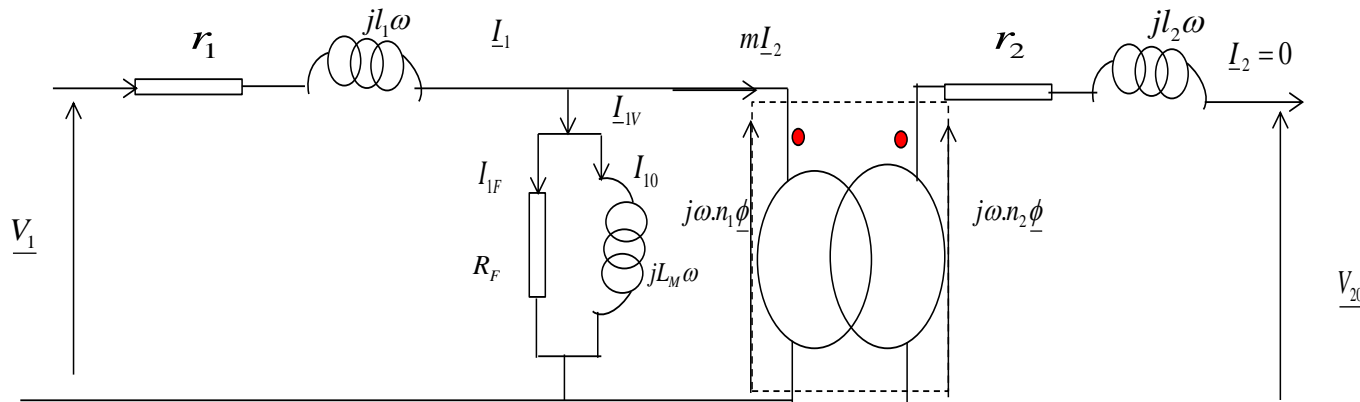


Schéma équivalent d'une machine asynchrone, stator et rotor sont à la même pulsation

$$E_1 = n_1 \omega \phi \rightarrow E_2 = n_2 \omega \phi \rightarrow \frac{E_1}{n_1} = \frac{E_2}{n_2} = \omega \phi \rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

. En **rotation**, le rotor est en **court-circuit** et tourne à une vitesse inférieure à celle du synchronisme. On aura donc le schéma suivant

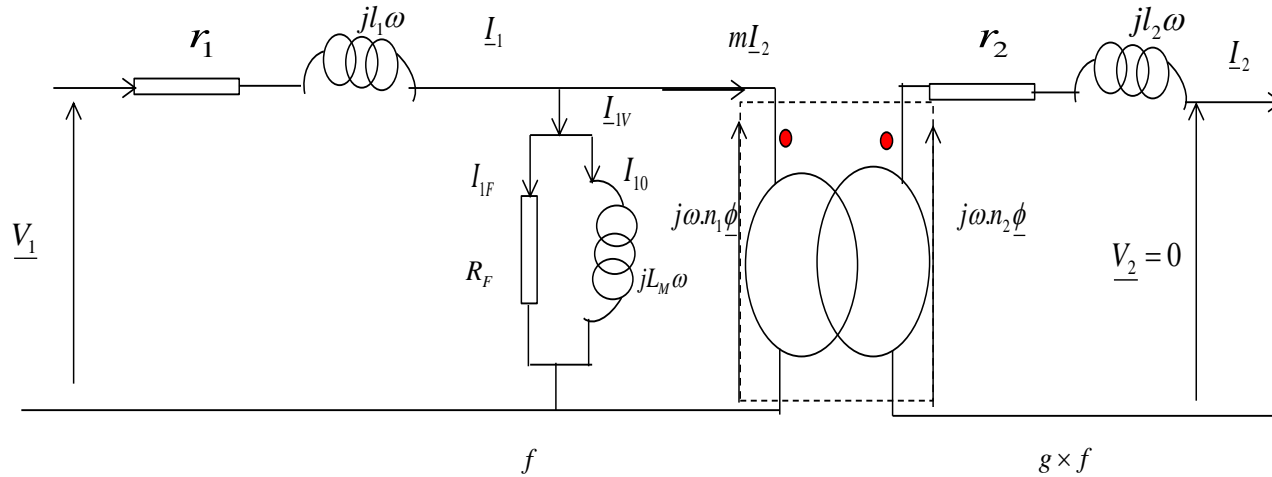


Schéma équivalent d'une machine asynchrone, stator et rotor sont à des **pulsations différentes**

A partir du schéma ci-dessus on peut écrire

$$\begin{cases} \frac{E_1}{n_1} = \omega\phi \\ \frac{E_2}{n_2} = \omega_r\phi = g\omega\phi \end{cases} \Rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{g} \frac{n_1}{n_2}$$

Ces équations conduisent à un schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone **vu du stator**

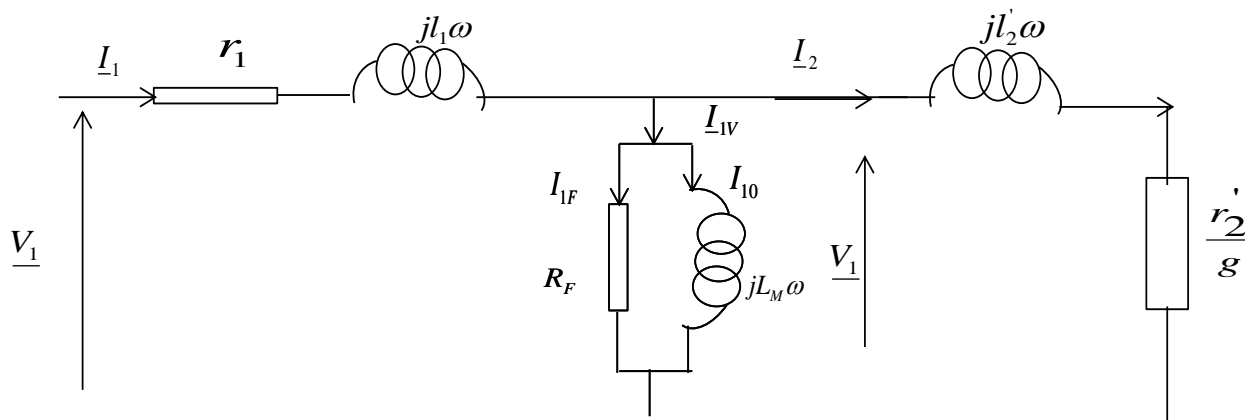


Schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone **vu du stator**

**Séparation des pertes joules au rotor et la puissance électromagnétique**

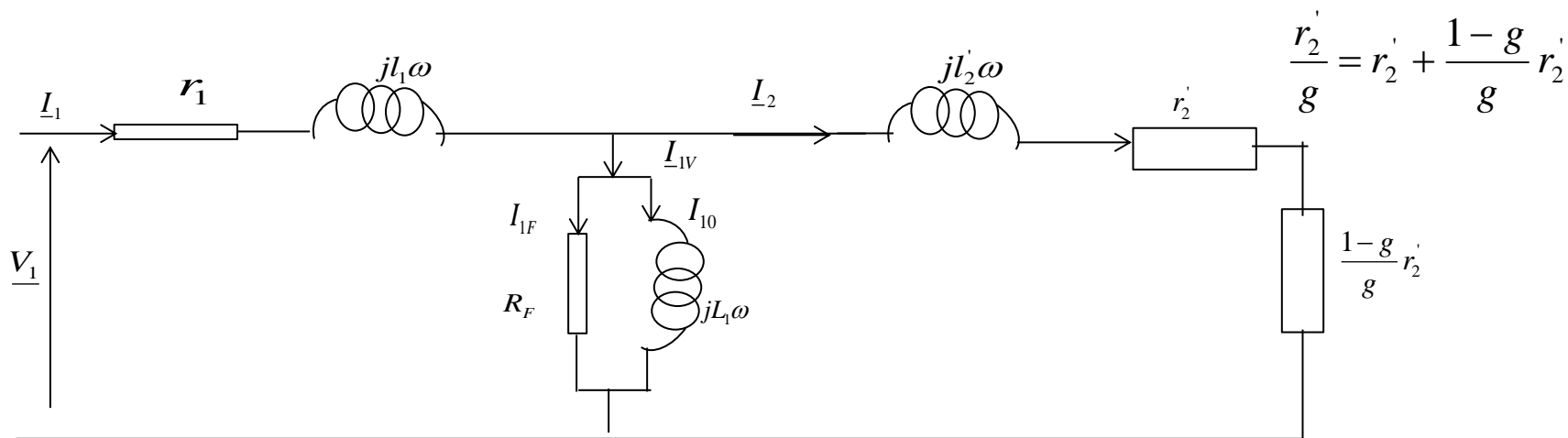


Schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone **Séparation des pertes joules au rotor**

Ces équations conduisent à un schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone vu du stator

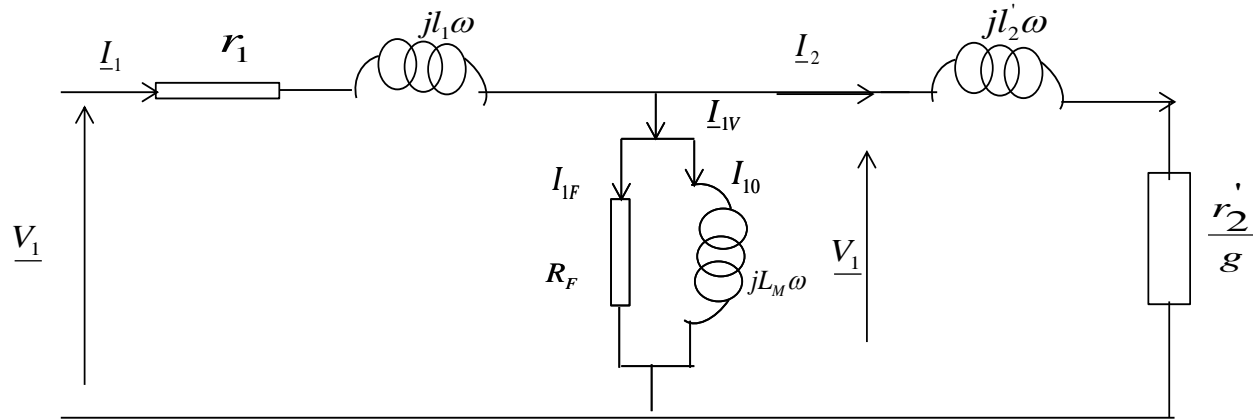
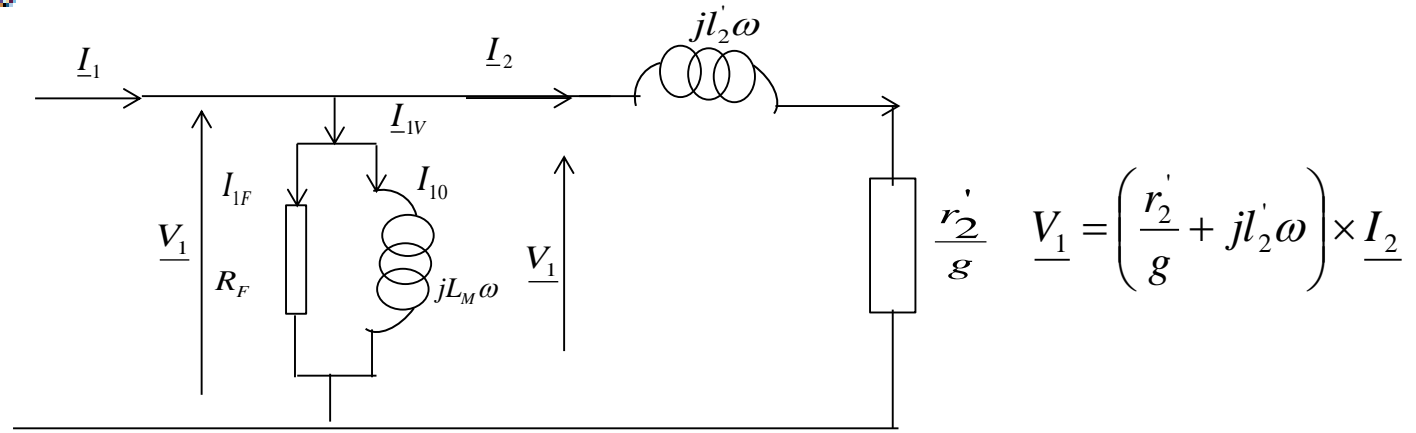


Schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone vu du stator

en négligeant  $r_1$  et  $l_1\omega$



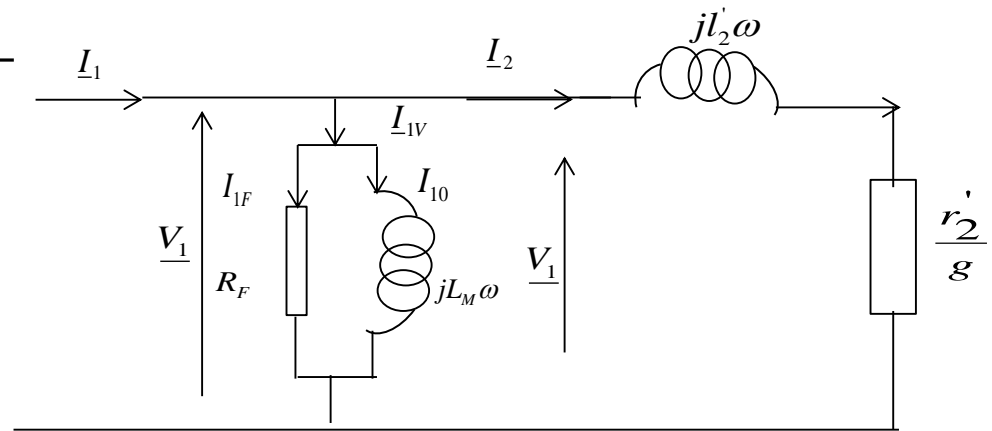
$$\underline{V}_1 = \left( \frac{r_2'}{g} + jl_2'\omega \right) \times \underline{I}_2$$

Schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone en négligeant  $r_1$  et  $l_1\omega$

Expression de couple électromagnétique :

$$P_{em} = 3 \times \frac{r_2'}{g} \times (I_2)^2$$

$$C_{em} = \frac{3p}{\omega} \times \frac{r_2'}{g} \times (I_2)^2 \rightarrow \Omega_s = \frac{\omega}{p}$$



Dans l'expression de couple on remplace le terme  $(I_2)^2$

$$I_2 = \frac{V_1}{\left( \frac{r_2'}{g} + j l_2' \omega \right)}$$

$$|I_2| = \frac{|V_1|}{\sqrt{\left( \left( \frac{r_2'}{g} \right)^2 + (l_2' \omega)^2 \right)}}$$

Il en résulte l'expression de **couple électromagnétique** du moteur :

$$C_{em} = \frac{3p}{\omega} \times \frac{V_1^2}{(l_2' \omega) \left( \left( \frac{1}{g} \frac{r_2'}{l_2' \omega} \right) + g \left( \frac{l_2' \omega}{r_2'} \right) \right)} = \frac{3p}{\omega} \times \frac{V_1^2}{\left( \frac{r_2'}{g} \right) + \left( \frac{g (l_2' \omega)^2}{r_2'} \right)}$$

L'utilisation normale du moteur asynchrone correspond aux **faibles glissements**  $g$  ( $g < 0, 1$ ) et les calculs étant alors particulièrement simples

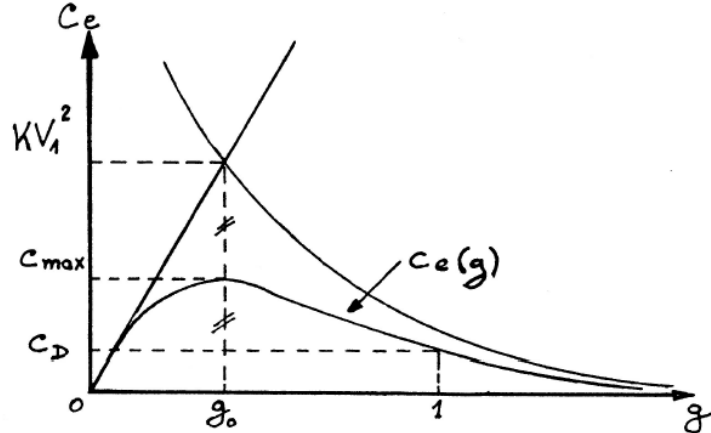
Si le glissement est faible alors on peut écrire  $C_{em} = \frac{3p}{\omega} \frac{1}{r_2'} V_1^2 \times g$

sachant que  $\frac{3p}{\omega} \frac{1}{r_2'} V_1^2$  est constant en régime établi, il en résulte

$$C_{em} = k' \times g = K \times (N_s - N) \text{ Avec } K = \frac{90}{\pi \times r_2' \times N_s} \times V_1^2$$

**Le couple maximum** correspond à un glissement  $g_0 = \frac{r_2'}{l_2' \omega}$   $C_{max} = \frac{3p}{\omega} \frac{V_1^2}{2 \times l_2' \omega}$

$$\frac{C_{nom}}{C_{max}} = \frac{g_0}{g_{nom}} \frac{2}{1 + \left(\frac{g_0}{g_{nom}}\right)^2} \rightarrow g_0 = \frac{r_2'}{x_2'}$$



Caractéristique mécanique de la machine asynchrone en fonction du glissement.

## Les différents procédés de démarrage

L'objectif fondamental est de limiter l'intensité absorbée tout en maintenant les performances mécaniques de l'ensemble « moteur-machine entraînée »

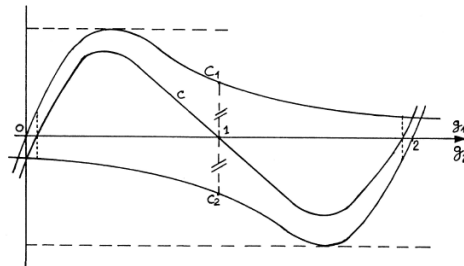
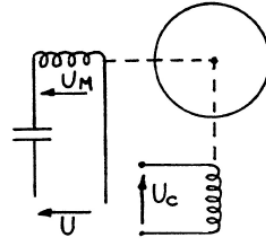
- Couplage étoile-triangle.
- Autotransformateurs
- Insertion dans chacune des phases du rotor bobiné d'une ou plusieurs résistances
- Action sur la fréquence

Couple de démarrage :  $g = 1$

$$C_{dem} = \frac{3p}{\omega} \times \frac{V_1^2}{r_2' + \left( \frac{(l_2' \omega)^2}{r_2'} \right)}$$

## MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ

Le moteur ne démarre pas seul, on utilise une seconde phase, comportant le même nombre de pôles, placée en quadrature dans l'espace par rapport à l'autre et alimentée par un courant déphasé par un condensateur qui fait démarrer le rotor



## QUESTIONS DE COURS

Q1. Donner la définition des grandeurs nominales d'une machine électrique

R1. Les grandeurs nominales d'une machine ( $U_{\text{nom}}$ ,  $I_{\text{nom}}$ ,  $P_{\text{nom}}$ , etc.) indiquent les limites supérieures avec lesquelles la machine peut fonctionner continuellement dans les conditions spécifiées (ventilation, refroidissement, température ambiante) sans être surchauffée. Ces grandeurs nominales sont usuellement indiquées par une plaque signalétique fixée sur la machine.

Q2. Citer les deux conditions pour la création de couple électromagnétique

R2. Pour qu'il y ait couple, il faut donc :

- que les circuits rotoriques soient fermés, sinon les courants rotoriques sont nuls ;
- que la vitesse  $N$  prise par le rotor soit différente de la vitesse  $N_s$  de l'induction.

Q3. Que se passe-t-il si  $N_s = N$  ?

R3. Si , les conducteurs tournent à la vitesse  $N_s$  de l'induction statorique  $B_s$   $e = \frac{d}{dt}\phi = 0$

aucune f.é.m. n'est induite, et par conséquent aucun courant ne circule dans le rotor : il ne peut y avoir de couple

Q4. A partir des plaques signalétiques suivantes, déterminer le nombre de paires de pôles des moteurs correspondants:

$f = 50\text{Hz}$ ,  $N = 1440\text{tr/min}$

$f = 50\text{Hz}$ ,  $N = 920\text{tr/min}$

$f = 50\text{Hz}$ ,  $N = 2800\text{tr/min}$



**Exercice 1.** Un moteur asynchrone triphasé, à rotor en court-circuit, possède des enroulements du stator hexa polaires branchés en étoile. Sa plaque signalétique porte les indications suivantes : tension d'alimentation : 440 V, 60 Hz ; puissance utile : 3,7 kW ; vitesse : 1140 tr/min ;  $\cos \varphi = 0,8$

À la charge nominale le moteur absorbe un courant en ligne d'intensité 6,9 A. La résistance, mesurée à chaud, entre deux bornes du stator est de  $0,9\Omega$  -. Au démarrage, le moteur développe un couple utile de 85 Nm.

On considérera la caractéristique mécanique  $C = f(N)$  comme une droite dans sa partie utile et on négligera les pertes fer rotor ainsi que les pertes mécaniques et par ventilation (le couple utile sera donc égal au couple électromagnétique).

1. Calculer la vitesse de synchronisme, le glissement, la puissance absorbée au régime nominal et le couple utile nominal développé.

2. Calculer les pertes fer au stator et les pertes Joule au rotor.

### Corrigé 1

1. La formule de Galileo Ferraris donne : 
$$N_s = \frac{60 \times f}{p} = \frac{60 \times 60}{3} = 1200 \text{tr} / \text{min}$$

Le glissement est donc : 
$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1200 - 1140}{1200} = 0,05 \text{ ou } 5\%$$

$$P_{abs} = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \times 440 \times 6,9 \times 0,8 \cong 4,2 kW \quad C_u = \frac{P_u \times 60}{2\pi N} = \frac{3700}{2\pi \times 1140} \cong 31 Nm$$

2. Calculons d'abord les pertes Joule au rotor, puisque les pertes mécaniques sont négligées,

on peut écrire :

$$P_{cm} = g \times P_{cm} + P_u \rightarrow P_{cm} = \frac{P_u}{1-g} = \frac{3700}{1-0,05} \cong 3,9 kW$$

$$p_{jR} = g \times P_{cm} = 0,05 \times 3,9 \times 10^3 \cong 195 W$$

Calculons les pertes Joule au stator, celui-ci étant connecté en étoile :

$$p_{jS} = 3 \times \frac{R_Y}{2} \times I_1^2 = 3 \times \frac{0,9}{2} \times 6,9^2 \cong 64 W$$

Et donc:  $p_{FS} = P_{abs} - p_{jS} - P_{cm} = 4,2 \times 10^3 - 64 - 3,9 \times 10^3 \cong 248 W$

**FIN**