

# Moteur asynchrone triphasé

## 1. Constitution et principe de fonctionnement

Ces moteurs sont robustes, faciles à construire et peu coûteux. Ils sont intéressants, lorsque la vitesse du dispositif à entraîner n'a pas à être rigoureusement constante.

### 1.1. Stator = inducteur

Il est constitué de trois enroulements (bobines) et possède p paires de pôles. Il est identique à celui d'une machine synchrone alimentée par des courants triphasés de fréquence  $f$  et produit un champ magnétique tournant à la pulsation

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

$\Omega_s$  : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en  $\text{rad.s}^{-1}$ .

$\omega$  : pulsation des courants alternatifs en  $\text{rad.s}^{-1}$ .  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

$p$  : nombre de paires de pôles.



de synchronisme:

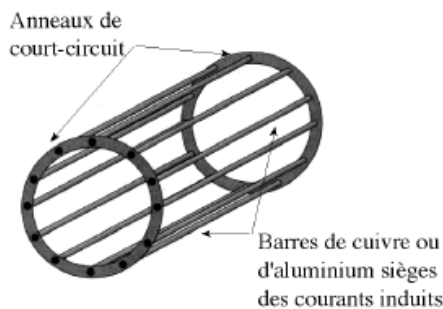
Les enroulements du stator sont prévus pour être couplés, soit en étoile, soit en triangle. Le couplage des enroulements dépendra de la tension nominale par phase prévue pour le moteur et du réseau dont on dispose.

### 1.2. Rotor = induit

Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il tourne à la vitesse de rotation  $\Omega$ .

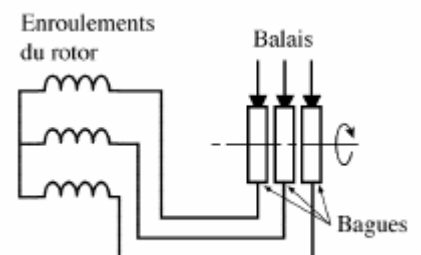
#### 1.2.1- Rotor en cage d'écureuil

Il porte un système de barres conductrices très souvent en aluminium, logées dans un empilement de tôles. Les extrémités de ces barres sont réunies par des couronnes également conductrices. On dit que le rotor est en court circuit. L'ensemble n'est parcouru que par les courants de Foucault induits par la rotation du champ statorique.



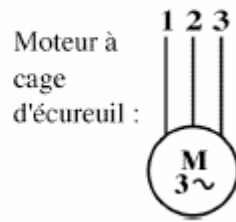
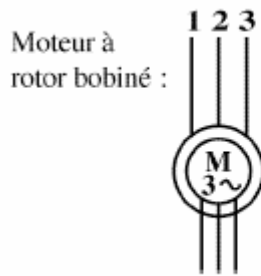
#### 1.2.2- Rotor bobiné :

Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches, où sont placés des conducteurs formant un enroulement triphasé dont le nombre de pôles  $2p$  est le même qu'au stator. Trois bagues et trois balais sont prévus pour accéder à ces enroulements rotoriques. Ce dispositif permet de modifier les propriétés électromécaniques du moteur asynchrone.



Ces machines sont d'un prix de revient plus important que leurs homologues dits à « cage d'écureuil ».

### 1.3- Symbole



### 1.4- Plaque signalétique :

V : tension nominale que peut supporter un enroulement.  
Si la tension composée du réseau est de **220 V**,  
Couplage triangle, le courant en ligne sera  $I = 1.75$  A alors.

Si la tension composée du réseau est de **380 V**, couplage étoile,  
le courant en ligne sera  $I = 1$  A.  
Fréquence du réseau : 50 Hz  
Puissance utile : 0,3 W  
Fréquence de rotation: 1440 tr.min-1  
Facteur de puissance: 0,66.

V		Hz	min <sup>-1</sup>	kW	cos φ	A
Δ 220 V	50	1440	0,3	0,66	1,75 A	
Y 380 V						1 A

Additional text on the nameplate: LEROY SOMER, Mot 3~ AIS, N° 473731F, 0000 kg, 55 l.c.l B °C 40 S SI, IEC 34-1

## 2°) Principe de fonctionnement

### 2.1) Explications

Dans le chapitre sur les champs tournants, nous avons vu qu'un champ tournant produisait la rotation d'un disque métallique et que ce dernier tournait à une vitesse inférieure à celle du champ statorique.

Les bobines du stator, parcourues par des courants triphasés, produisent un champ magnétique tournant avec une vitesse angulaire  $\Omega_s$ , dans l'entrefer et à la périphérie du rotor.

En régime établi, le rotor de la machine tourne à la vitesse angulaire  $\omega$  inférieure à  $\omega_s$ . Les conducteurs du rotor sont alors soumis à un champ magnétique variable, qui tourne par rapport à eux-mêmes à la vitesse angulaire  $(\Omega_s - \Omega)$ . Il en résulte l'induction de f.e.m dans ces conducteurs. Ceux-ci faisant partie de circuits fermés, des courants induits de même pulsation circulent dans ces conducteurs rotoriques.

Si le moteur comporte p paires de pôles, la pulsation des f.e.m induites et des courants rotoriques induits est :  $\omega_r = p (\Omega_s - \Omega)$ .

### 2.2) Vitesse de synchronisme

Le moteur asynchrone triphasé démarre seul et il prend rapidement sa vitesse de régime en charge comme à vide. Sa fréquence de rotation  $n$  est proche de la fréquence de rotation de synchronisme  $n_s (=f/p)$ , mais toujours inférieure, elle diminue peu entre la marche à vide et en charge.

### 2.3) Glissement

On appelle glissement le rapport de la fréquence (vitesse) de rotation de glissement à la fréquence (vitesse) de rotation de synchronisme.

$$g = \frac{n_g}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}, \quad \Omega_s = 2\pi n_s \text{ et } \Omega = 2\pi n$$

Le glissement  $g$  va dépendre de la charge. On peut, dans le cas d'un rotor bobiné accéder à la fréquence de rotation de glissement par l'intermédiaire de la fréquence des courants rotoriques.

Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pour cent : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées. Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement.

### 3. Caractéristiques

#### 3.1. Fonctionnement à vide

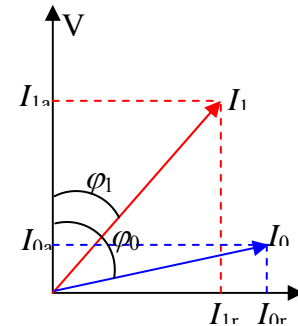
A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

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

A vide:  $g = 0$  et donc  $n_0 = n_s$

##### Autres observations :

- le facteur de puissance à vide est très faible ( $< 0,2$ ) et le courant absorbé reste fort ( $P$  est petit et  $Q$  est grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique).



#### 3.2. Fonctionnement en charge

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

Le moteur asynchrone triphasé démarre seul et il prend rapidement sa vitesse de régime, en charge comme à vide. Ce moteur présente un couple de démarrage de moment important.

### 4. Modélisation de la machine asynchrone - Schéma équivalent

Sous le vocable **schéma équivalent**, on désigne un circuit électrique composé de dipôles linéaires permettant de **modéliser** la machine réelle. Les enroulements du stator sont en regard des enroulements du rotor sur un même circuit magnétique, comme pour un transformateur. Le modèle du transformateur est donc exploitable. La machine est triphasée, mais on considère le modèle pour un seul bobinage du stator et du rotor.

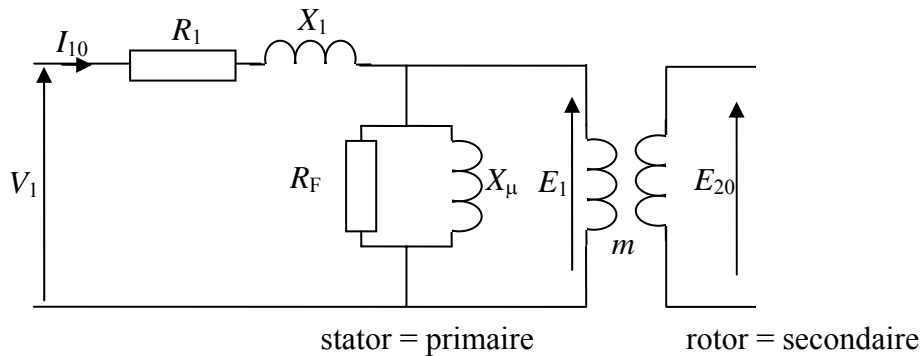
#### 4.1 Rotor ouvert :

Si on ouvre le circuit secondaire (rotor), le moteur ne tourne pas (pas de courants secondaires donc pas de couple moteur), il se comporte comme un transformateur à vide. Les courants primaires de fréquence  $f$  créent un flux tournant  $\phi$  commun aux deux enroulements. Ce flux va induire dans chaque phase de primaire une f.c.é.m d'auto-induction de valeur efficace  $E_1 = k_1 N_2 f \phi$  et dans chaque phase du secondaire une f.é.m de valeur efficace  $E_2 = k_2 N_1 f \phi$ .

Avec  $N_1$  et  $N_2$  le nombre de conducteurs en série par phase au primaire (stator) et au secondaire (rotor).

$m=E_1/E_2 = k_1 N_1 / k_2 N_2$  est le rapport de transformation.

#### - MODELE EQUIVALENT PAR PHASE



- Le courant statorique est faible et très déphasé en arrière de la tension car le primaire crée un flux que le rotor, ouvert, ne peut compenser.

L'équation d'une phase primaire peut s'écrire :

$$\underline{V}_1 = R_1 \underline{I}_{10} + j l_1 \omega \underline{I}_{10} + \underline{E}_1$$

Avec :

$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$  est l'impédance propre d'une des phases du stator où  $R_1$  est la résistance de l'enroulement de cette phase et où  $X_1$  est la réactance de fuite de ce même enroulement (l'inductance de fuite causée par le flux magnétique qui ne coupe pas les deux enroulements).

$\underline{I}_{10}$  le courant statorique à rotor ouvert.

$R_F$  résistance fictive représentant les pertes fer et  $X_\mu$  réactance **réelle** servant à représenter la puissance réactive requise pour produire le champ magnétique tournant.

#### 4.2 Rotor en rotation

Pour chaque phase, le rotor est une bobine que l'on peut représenter par une impédance inductive :

$$\underline{Z}_r = R_r + jX_r$$

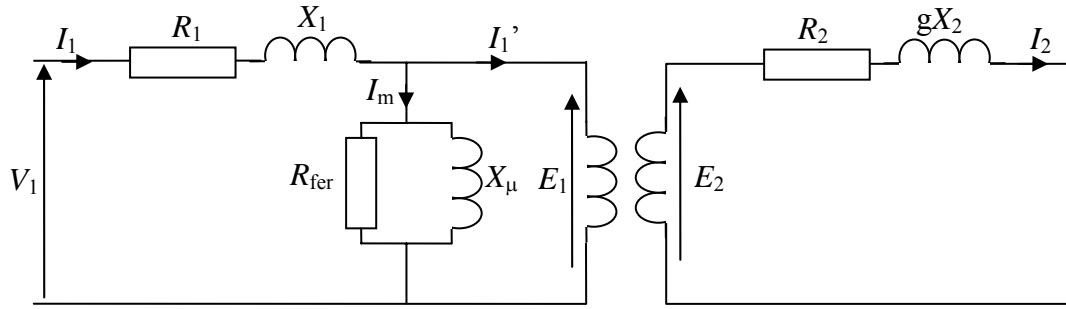
$R_r = R_2$  est la résistance totale de la phase considérée,

$X_r$  est la réactance totale de la phase considérée

La fréquence des variations de flux au rotor dépend du glissement  $f_r = g.f$ . Cette fréquence variable a un effet direct sur l'impédance liée à  $l_r$  et sur l'amplitude du générateur de tension au rotor  $E_2 = g.E_{20} = g.m.E_1$

$$X_r = 2\pi f_r l_r = 2\pi (g.f) l_r = gX_2$$

$X_2 = l_r \omega$  réactance du rotor à circuit ouvert et sans rotation (même fréquence que le stator)

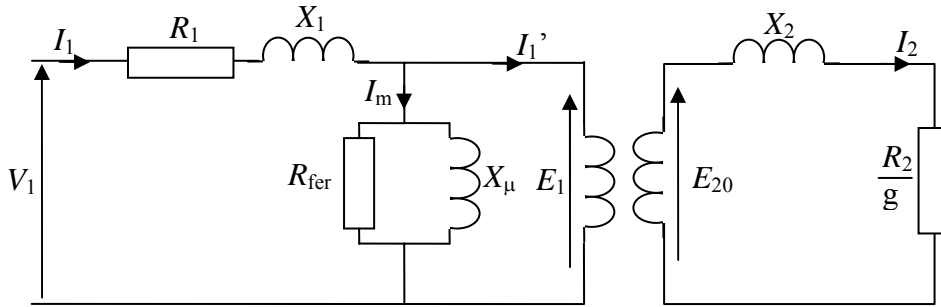


Pour une phase du stator :  $\underline{V}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j l_1 \omega \underline{I}_1 + \underline{E}_1 = (R_1 + jX_1) \underline{I}_1 + \underline{E}_1$

Pour une phase du rotor :  $\underline{V}_2 = 0 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - jgX_2 \underline{I}_2$

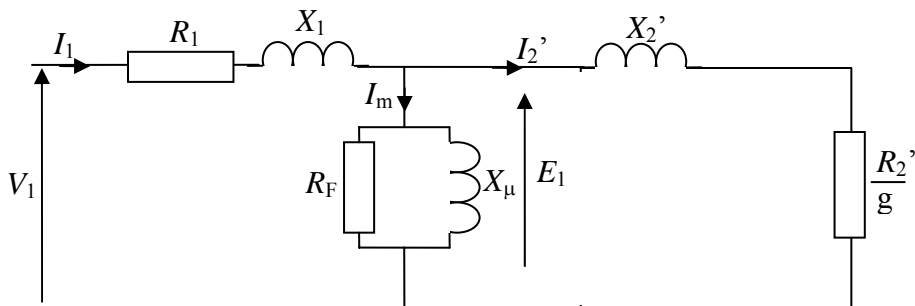
Une manipulation algébrique simple (division par  $g$ ) transforme le circuit pour donner:

$$\underline{E}_2 = (R_2 + jgX_2) \underline{I}_2 = g \underline{E}_{20} \quad \Rightarrow \quad \underline{E}_{20} = \frac{R_2}{g} \underline{I}_2 + jX_2 \underline{I}_2$$



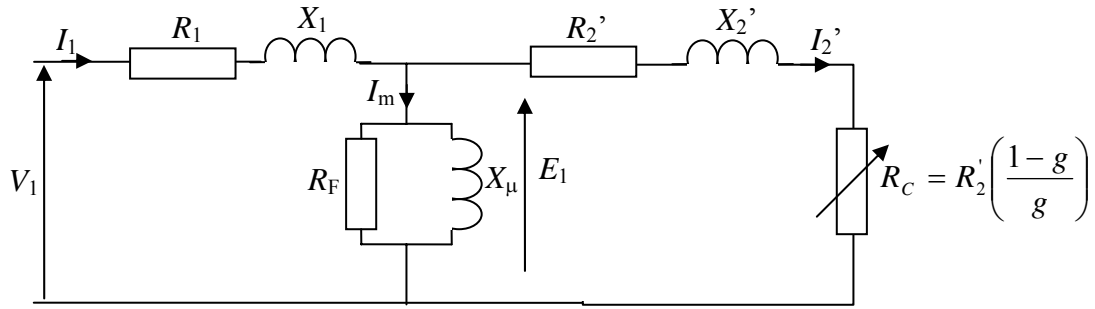
Le modèle précédent peut être simplifié en transférant les valeurs rotoriques de l'autre côté du transformateur idéal.

**Modèle équivalent reporté au stator :**



Où :  $I_m$  = courant de magnétisation de la carcasse de fer,

$$R_2' = R_2 / m^2 \quad X_2' = X_2 / m^2$$



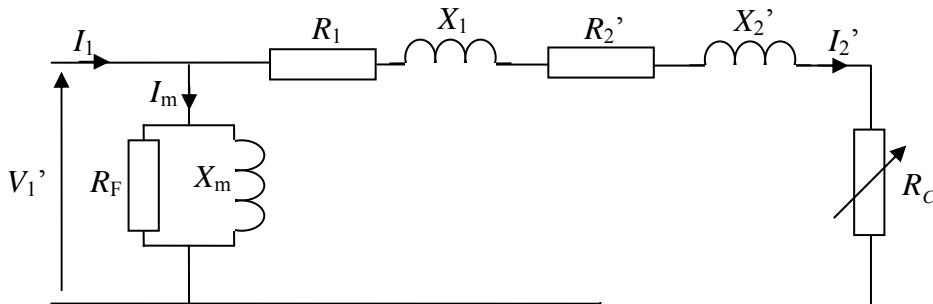
$\mathbf{Z}'_2 = R'_2 + jX'_2$  = impédance propre transformée (à la fréquence du stator) d'une des phases du rotor où  $R'_2$  est la résistance transformée de l'enroulement de cette phase et où  $X'_2$  est la réactance de fuite transformée de ce même enroulement (l'inductance de fuite causée par le flux magnétique qui ne coupe pas les deux enroulements).

$R_c = R'_2(1-g)/g$  résistance fictive variable qui représente le taux de conversion d'énergie électromécanique.

Cette conversion contient l'énergie mécanique disponible pour tourner une machine quelconque ainsi que les pertes de rotation du moteur lui-même.

**Remarque :** Ce modèle contient deux boucles et exige la solution de deux équations simultanées.

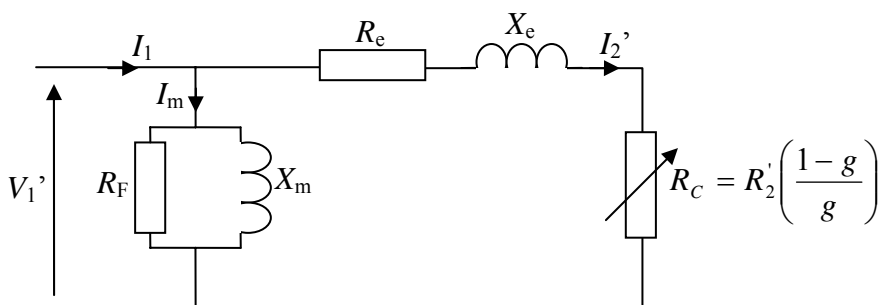
Par expérience avec le transformateur, on perçoit que si  $\mathbf{Z}_1$  était de l'autre côté de  $R_m$ ,  $X_m$ , la solution serait pour deux branches en parallèles si on utilise  $\mathbf{V}'_1$  existant lorsque  $\mathbf{I}_m$  circule seul.



$\mathbf{V}'_1$  = tension statorique simple moins la chute sur  $\mathbf{Z}_1$ .

En posant :  $R_e = R_1 + R'_2$   $X_e = X_1 + X'_2$

Le circuit équivalent approximatif suivant peut être utilisé.



Ce circuit peut être déterminé au moyen des mesures  $V$ ,  $I$ ,  $P$ , et de deux montages:

**Moteur tournant à vide**, (équivalent au transfo. à circuit ouvert) ; à ce moment  $g \approx 0$  et  $R_c \approx \infty$  et seulement  $I_m$  circule, ce qui permet de calculer  $R_F$  qui représentera la puissance active mesurée dans cet essai alors que  $X_m$  représentera la puissance réactive.

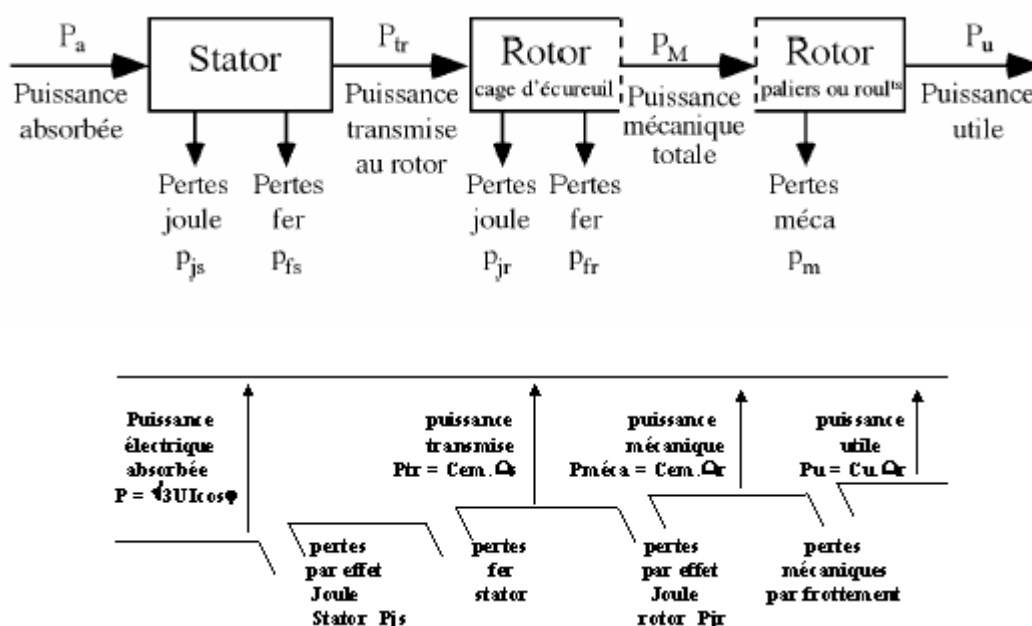
**Moteur à rotor bloqué**, (équivalent au transfo. en court-circuit) ; à ce moment  $g \approx 1$  et  $R_c \approx 0$  et  $I_m$  devient négligeable devant  $I_1$  et  $I_2$ , car il faut réduire de beaucoup la tension appliquée pour faire cet essai. Les mesures permettent de calculer une valeur pour  $R_e$  qui représentera les watts mesurés dans cet essai alors que  $X_e$  représentera les VARs.

Les watts dissipés par  $R_e$  sont des pertes variables avec la charge, alors que les watts dissipés sur  $R_m$  sont des pertes presque constantes car les moteurs opèrent normalement à tension constante.

La valeur de  $R_c$  s'ajustera pour que la puissance "fictivement" dissipée sur ce  $R_c$  soit égale à la puissance demandée par la charge plus les pertes de rotation du moteur.

Pour que  $R_c$  change, il faut que " $g$ " change.

## 5. Bilan des puissances



### Observation

$$P_{jr} = P_{tr} - P_{méc} = C_{ém} \cdot (\Omega_s - \Omega_r) = C_{ém} \cdot \Omega_s \cdot (\Omega_s - \Omega_r) / \Omega_s = g \cdot P_{tr} \Rightarrow \boxed{P_{jr} = g \cdot P_{tr}}$$

**Puissance électrique absorbée**

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

U : tension entre deux bornes du moteur

I : courant en ligne

**Pertes par effet joule au stator**

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

R : résistance entre deux bornes du stator

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

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

C'est 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  $T_{em}$ .

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

**Puissance mécanique totale :  $P_M$**

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

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

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

Cette puissance comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.

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

Ces pertes sont négligeables

**Pertes joules au rotor**

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

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

Les pertes fer du rotor sont négligeables.

**Pertes collectives :  $p_c$**

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

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.

**Couple de perte :**

$$T_p = \frac{p_c}{\Omega_s}$$

Le couple de perte est une grandeur constante quelle que soit la vitesse et la charge de la machine

**Autres :**

$$P_u = P_M - p_m \quad ; \quad T_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad ; \quad \eta = \frac{P_u}{P_a}$$

**Bilan complet :**

$$P_a = P_u + p_{js} + p_{jr} + p_c$$



## Bilan des puissances à vide

Le bilan total, quelque soit la situation, est :  $P_a = P_u + p_{js} + p_{jr} + p_c$

A vide :

$$T_u = 0 \Rightarrow P_u = 0$$

$$g = 0 \Rightarrow p_{jr} = 0$$

$$P_{a0} = \sqrt{3}UI_0 \cos \varphi_0$$

$$p_{js0} = \frac{3}{2}RI_0^2$$

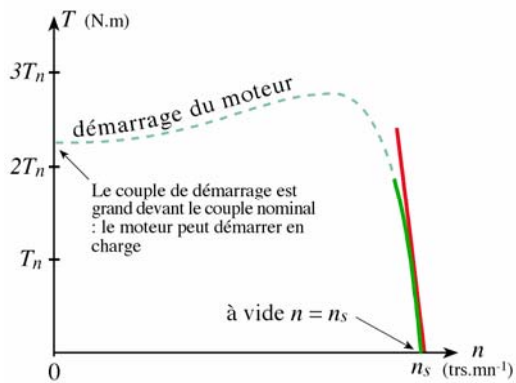
$$p_c \text{ à vide} \approx p_c \text{ en charge}$$

Bilan à vide :  $P_{a0} = p_{js0} + p_c$

En simplifiant :  $\boxed{P_{a0} \approx p_c}$  (les pertes joules à vide sont négligeables)

Un essai à vide permettra de déterminer les pertes collectives.

## 6. Caractéristique mécanique $T_u = f(n)$



### Légende

- $T_n$  Couple nominal
- Couple de démarrage du moteur.  
On constate que ce couple est fort : la machine peut démarrer en charge.
- Zone de fonctionnement du moteur.  
On constate qu'elle est presque linéaire.  
Cette partie de la courbe est très verticale : la vitesse varie peu avec la charge.
- La zone de fonctionnement peut être modélisée par une droite

### 6.1. Modélisation de la partie utile de la courbe

On veut déterminer l'équation de la droite qui modélise la partie utile de la caractéristique mécanique.

- Il faut deux points :
- 1<sup>er</sup> point évident :  $A_1(n_s; 0)$
  - 2<sup>e</sup> point : il faut un essai de la machine  $A_2(n_2; T_2)$

Equation d'une droite :  $y = a.x + b$  soit  $T_u = a.n + b$

Coefficient directeur (pente) :  $a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$  soit  $a = \frac{T_2 - 0}{n_2 - n_s}$

$|a|$  est grand (droite presque verticale) et  $a$  est négatif.

Ordonnée à l'origine : point  $A_1$   $0 = a.n_s + b$  soit  $b = -a.n_s$

On peut écrire :  $T_u = a(n - n_s)$

**Remarque :** le point  $A_2$  peut aussi être fourni par les informations figurant sur la plaque signalétique de la machine (couple nominal  $T_n$  et vitesse nominale  $n_n$ ).

## 6.2 Caractéristique mécanique en fonction du glissement

### Changement d'axe

L'axe en  $n$  et l'axe en  $g$  sont inversés.

D'où la même caractéristique avec l'axe en  $g$ .

Cette fois ci le modèle est une droite passant par l'origine,

donc d'équation :

$$y = k.x \quad \text{soit} \quad T_u = k.g$$

### Finalement :

Au voisinage du point de fonctionnement nominal, le couple utile est proportionnel au glissement.

$$\boxed{T_u = k.g}$$

$k$  est une constante de proportionnalité (coefficient directeur) en N.m.

### Relation entre $a$ et $k$

Au paragraphe 3.4, nous avons vu que :  $T_u = a.n + b$  avec  $b = -a.n_s$

Ce qui donne :  $T_u = a.n - a.n_s = -a(n_s - n)$

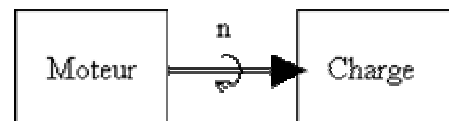
En remarquant que :  $g = \frac{n_s - n}{n_s}$  soit  $n_s - n = n_s.g$

On obtient :  $T_u = -a.n_s.g = k.g$  avec  $\underline{k = -a.n_s}$

## 7. Point de fonctionnement du moteur en charge

### Définition :

La charge impose un couple résistant de moment  $T_r$  sur l'arbre qui tourne à la vitesse  $\Omega$ .



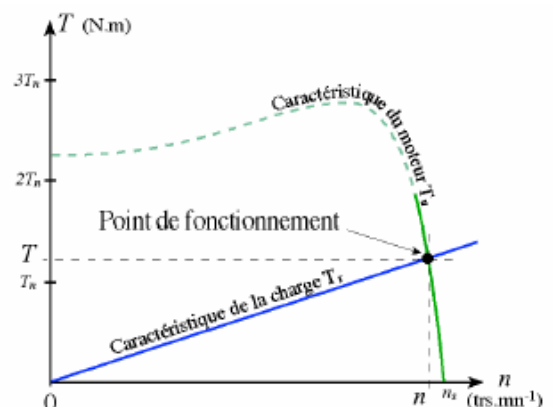
Le moteur doit fournir un couple utile de moment  $T_u$ , à l'équilibre  $T_u = T_r$ .

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

$T_u$  : couple utile du moteur

$T_r$  : couple résistant

La courbe du couple résistant dépend de la charge.



## 7.1 Méthode de résolution graphique

Tracer à l'échelle sur du papier millimétré les deux caractéristiques et relever les coordonnées du point d'intersection.

## 7.2 Méthode de résolution par le calcul

Il faut résoudre :  $T_u = T_r$

**Exemple :**

cas d'une charge ayant un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse :  $T_r = c.n^2$

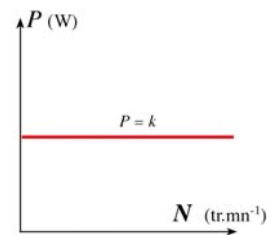
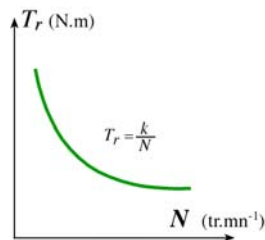
Le couple utile du moteur est :  $T_u = a.n + b$

$$T_u = T_r \Rightarrow a.n + b = c.n^2 \Rightarrow c.n^2 - a.n - b = 0$$

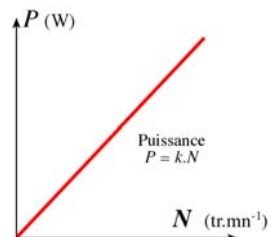
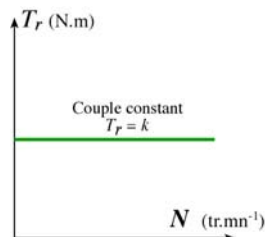
Finalement, il faut résoudre une équation du second degré. Une solution sur les deux trouvées sera la bonne (une des solutions n'aura pas de signification physique).

## 7.3 Caractéristiques $T_r=f(n)$ de quelques charges

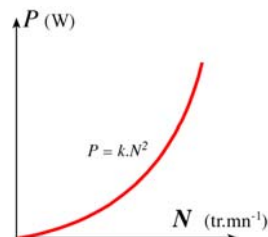
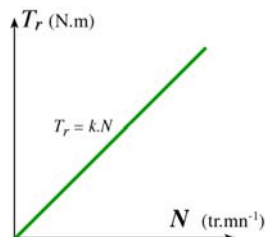
Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse)



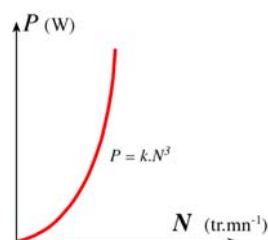
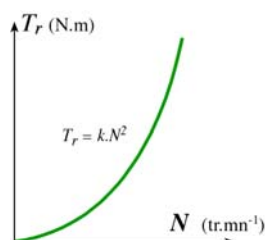
Machine à couple constant (levage, pompe)



Machine à couple proportionnel à la vitesse (pompe volumétrique, mélangeur)



Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur)



## 8 DIAGRAMME DU CERCLE

Pour un moteur donné, alimenté sous tension constante, lorsque le glissement varie l'extrémité du vecteur représentant les courants primaires se déplace sur un cercle.

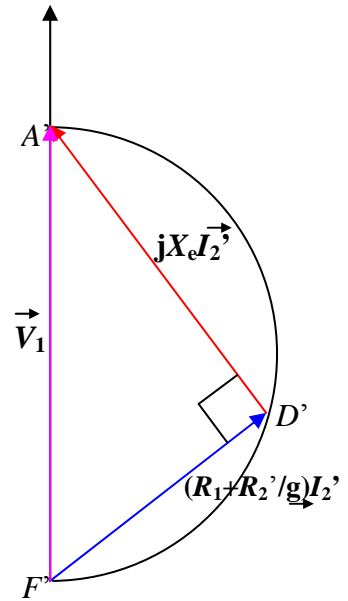
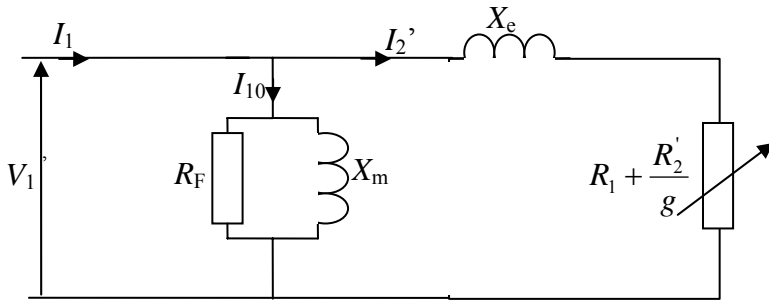
Le diagramme circulaire est très utilisé car il permet d'obtenir rapidement les diverses caractéristiques du moteur. On peut le tracer facilement à partir des essais à puissance réduite ; essai à vide et essai en court-circuit (rotor calé sous tension réduite).

Pour la construction du diagramme circulaire nous utiliserons le schéma monophasé en  $\Gamma$  :

Le courant statorique  $I_1$  est la somme du courant magnétisant  $I_{10}$  et du courant de travail  $-mI_2 = I_2'$

En posant  $X_e = l_1 \omega + l_2' \omega = X_1 + X_2'$ , l'équation électrique du circuit s'écrit :

$$\underline{V_1} = jX_e \underline{I_2'} + (R_1 + \frac{R_2'}{g}) \underline{I_2'} \quad \text{avec} \quad \underline{I_1} = \underline{I_{10}} + \underline{I_2'}$$



Quand  $g$  varie, l'angle en  $D'$  reste droit, le point  $D'$  décrit un arc de cercle de diamètre  $F'A'$ .

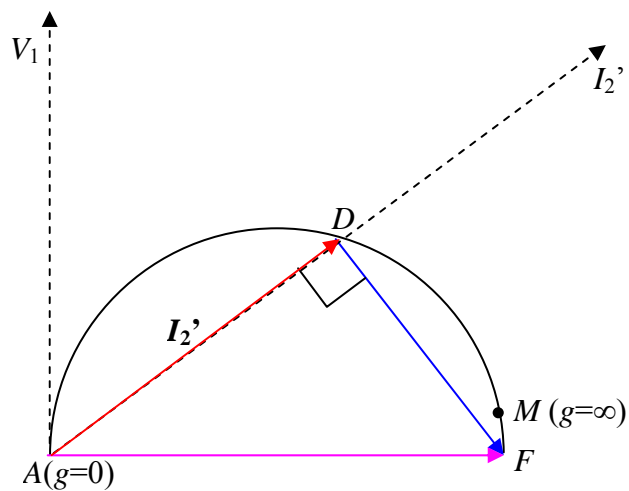
En divisant l'équation précédente par  $jX_e$ , on obtient:

$$\frac{V_1}{jX_e} = \underline{I_2'} - j \frac{(R_1 + \frac{R_2'}{g})}{X_e} \underline{I_2'}$$

$$AF = \frac{V_1}{X_e}$$

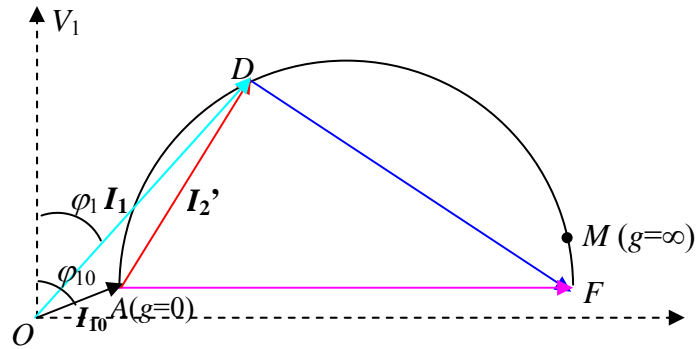
$$AD = \underline{I_2'}$$

$$DF = \frac{(R_1 + \frac{R_2'}{g})}{X_e} \underline{I_2'}$$



Quand  $g$  varie,  $D$  décrit l'arc  $AM$ . Il va de  $A'(g=0)$  jusqu'à  $M(g=\infty)$

Puisque  $\underline{I_1} = \underline{I_{10}} + \underline{I_2'}$ , on obtient le lieu de l'extrémité de  $I_1$  en portant  $I_{10}$  en  $OA$  et  $I_2'$  en  $AD$ . Quand  $g$  varie, l'extrémité de  $I_1$  se déplace sur le cercle de diamètre  $AF$  passant de  $A$  quand  $g$  est nul à  $M$  quand  $g$  est infini.



### Tracé du diagramme du cercle

- Essai à vide : relever  $I_{10}$ ,  $U_1$  et  $P_{10}$ . Nous avons  $P_{10} = \sqrt{3}.U.I_{10} \cos \varphi_{10} \Rightarrow$  calculer  $\varphi_{10}$ .
- Essai à rotor bloqué : relever sous tension réduite  $U_{1cc}$ ,  $I_{1cc}$  et  $P_{cc}$ . On ramène alors le courant et la puissance à leurs valeurs qu'ils auraient sous la tension nominale  $U_{1n}$ .

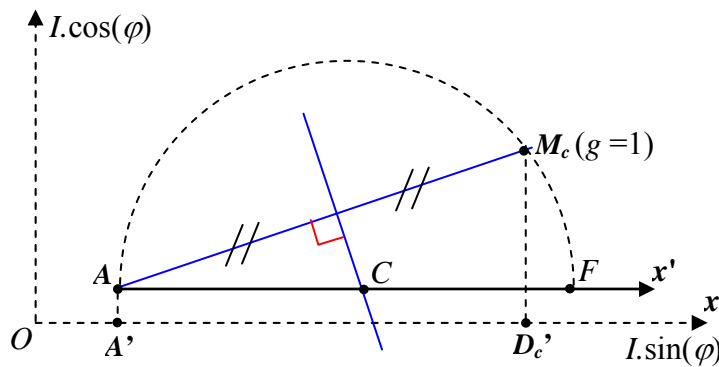
$$I_{lcc} = I'_{lcc} \frac{U_{ln}}{U_{lcc}} \quad P_{cc} = P'_{cc} \left( \frac{U_{ln}}{U_{lcc}} \right)^2$$

Nous avons alors  $P_{cc} = \sqrt{3}.U_1.I_{1cc} \cos \varphi_{1cc} \Rightarrow$  calculer  $\varphi_{1cc}$ .

$$OA' = I_{10} \sin \varphi_{10} \quad A'A = I_{10} \cos \varphi_{10} \quad OM'_c = I_{1cc} \sin \varphi_{1cc} \quad M_c M'_c = I_{1cc} \cos \varphi_{1cc}$$

Le diagramme du cercle s'obtient alors par :

- Tracer une parallèle à l'axe  $Ox$  passant par le point  $A$
- Tracer la médiatrice du segment  $AM_c$ , elle coupe l'axe  $Ax'$  au point  $C$  centre du cercle de diamètre  $AF$ .



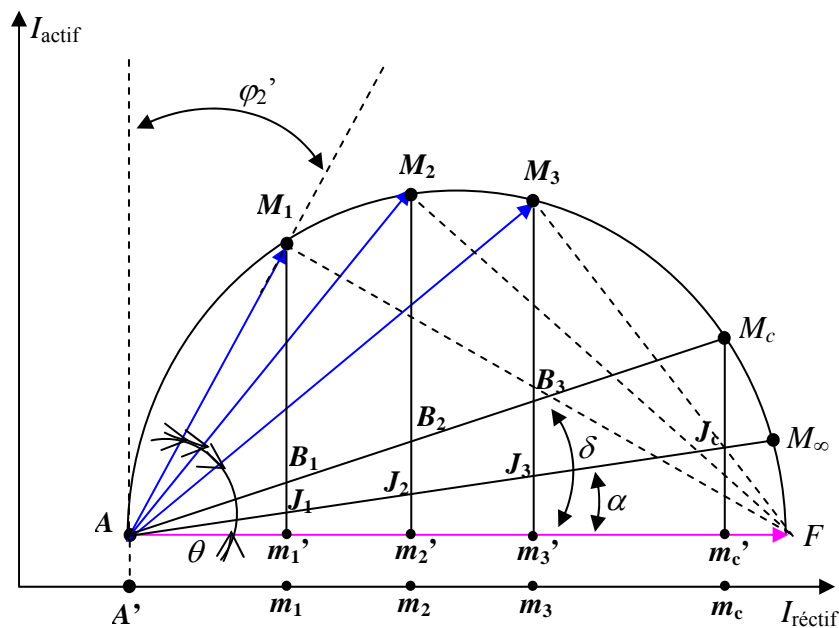
## Représentation des pertes joules

Ayant en grandeur et phase le courant  $I_1$ , on peut par ses projections  $I_1 \cos \varphi_1$  sur  $V_1$  et  $I_1 \sin \varphi_1$  sur  $-jV_1$  lire sur le diagramme les puissances actives  $3V_1 I_1 \cos \varphi_1$  et réactives  $3V_1 I_1 \sin \varphi_1$  consommée par le moteur.

$I_2$  est déphasé en AR par rapport à  $V_1$  d'une quantité  $\varphi_2'$  qui correspond à l'argument de la branche secondaire d'impédance :  $Z_e = \left( R_1 + \frac{R_2'}{g} \right) + jX_e$

$$\text{On en déduit donc que : } \tan \varphi_2' = \frac{gX_e}{gR_1 + R_2'}, \quad \sin \varphi_2' = \frac{X_e}{Z_e}$$

$$\text{Soit } \theta = \frac{\pi}{2} - \varphi_2'$$



**Les pertes joules** sont représentées par une droite. Si pour diverses valeurs  $AM_1, AM_2, AM_3 \dots$  du courant  $I_2'$ , on porte en  $m_1' B_1, m_2' B_2, m_3' B_3 \dots$  les courants actifs correspondant aux pertes Joule, les points  $B_1, B_2, B_3 \dots$  s'alignent sur une droite passant par A et le point  $M_c$  ( $g=1$ ).

$$\text{En effet: } AM_1 = I_2' = AF \cos \theta$$

$$P_j = P_{js} + P_{jr} = 3.(r_2' + r_1).I_2'^2 = 3.(r_2' + r_1).I_2' AF \cos \theta$$

$$\text{Ces pertes sont représentées par: } m_1' B_1 = \frac{P_j}{3V_1} = \frac{3.(r_2' + r_1).AF}{3V_1} I_2' \cos \theta$$

$$\tan \delta = \frac{m_1' B_1}{Am_1'} = \frac{m_1' B_1}{I_2' \cos \theta} = \frac{3.(r_2' + r_1).AF}{3V_1} = \frac{(r_2' + r_1).AF}{V_1}$$

$$\text{Et comme } AF = \frac{V_1}{X_e}$$

$$\Rightarrow \operatorname{tg} \delta = \frac{(r_2' + r_1)}{X_e} \text{ est indépendant de } I_2'$$

**Pertes joules statoriques :** sont représentées par la droite passant par A et le point  $M_\infty$  ( $g=\infty$ ) et faisant l'angle  $\alpha$  avec l'axe portant AF.

On montrerait de même que :  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{r_1}{X_e}$

*Les pertes joules, pour un point de fonctionnement quelconque, sont donc données par  $m'J$  pour  $P_{js}$  et  $JB$  pour  $P_{jr}$ .*

### Le diagramme et son utilisation:

#### a- Points particuliers théoriques

Le cercle passe par les points A et M

- *Point à glissement nul* A. OA est égal au courant magnétisant à une composante active A'A correspondant aux seules pertes dans le fer statorique supposées constantes.
- *Point à glissement infini* M. Ce point est purement théorique car si le rotor tournait en sens inverse du champ tournant statorique à une vitesse infinie, les pertes mécaniques et les pertes dans le fer rotorique seraient infinies.

#### a- Points particuliers pratiques

C'est à partir des points de fonctionnement à vide  $M_0$  et à rotor calé  $M_c$  qu'on construit le cercle.

- *A vide*, le courant  $I_{10} \approx I_m$  et  $P_{10} = 3V_1 I_{10} \cos \varphi_{10} \approx P_{fs} + P_{méc}$ , les pertes Joule au stator et au rotor étant supposées négligeables et la puissance utile étant nulle, le point  $M_0$  a pour ordonnées :  $P_{10}/3V_1$ .
- *A rotor calé*, le moteur absorbe, en plus des pertes au stator données par la droite AM en  $m_c' J_c$ , les pertes Joule au rotor représentées par  $M_c J_c$ . La droite  $AM_c$  donnera donc les pertes Joule rotoriques. Le couple de démarrage  $P_1'/\Omega$  est donné par  $3V_1 \cdot J_c m_c / \Omega$

## 9 Réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone

La vitesse de synchronisme  $n_s$  dépend de la fréquence  $f_s$  des courants statoriques. Et comme la vitesse  $n$  reste très proche de la vitesse de synchronisme, pour varier la vitesse du moteur il faut en fait varier la fréquence  $f_s$  à l'aide d'un **onduleur**.

En réalité pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile il faut garder le rapport  $V_s/f_s$  constant ( $V_s$  est la tension d'alimentation d'un enroulement).

Si on augmente la vitesse, il faut augmenter la fréquence et la tension d'alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine.

### *Variateur de vitesse*

Un variateur de vitesse est un équipement électrotechnique alimentant un moteur électrique de façon à pouvoir faire varier sa vitesse de manière continue, de l'arrêt jusqu'à sa vitesse nominale. Un variateur de vitesse est constitué d'un redresseur combiné à un onduleur. Le redresseur va permettre d'obtenir un courant quasi continu. À partir de ce courant continu, l'onduleur va permettre de créer un système triphasé de tensions alternatives dont on pourra faire varier la valeur efficace et la fréquence

*Pour que le flux reste constant, lorsque la fréquence varie, il faut que le rapport  $U/f$  soit constant.*

## 10 Démarrage du moteur

Le moment du couple de démarrage sous tension nominale est très important. Au démarrage, le moment du couple moteur est, dans les conditions habituelles d'utilisation, très supérieur au moment du couple résistant. L'accélération est donc brutale et le courant appelé est susceptible d'être important (4 à 8 fois  $I_n$ ). Pour ne pas détériorer le moteur, il convient de réduire cet appel de courant.

### *Limitation du courant de démarrage*

Pour les **moteurs à cage** la solution la plus couramment employée consiste à sous alimenter la machine pendant la phase de démarrage. Il faut cependant que la charge mécanique permette cette sous alimentation car diminuer la tension dans un rapport  $\frac{1}{n}$  entraîne une diminution du couple dans un rapport  $\frac{1}{n^2}$ . Les solutions techniques sont les suivantes :

- **Démarrage étoile - triangle** : il nécessite la sortie des 6 bornes moteur et n'est envisageable que pour des petites puissances à cause de la brutalité des régimes transitoires lors des changement de couplage. C'est un procédé extrêmement simple et peu coûteux. Le couplage nominal de la machine doit être "triangle".
- **Insertion de résistances ou inductances statoriques** : cette méthode permet d'avoir plusieurs crans de démarrage. Les résistances sont de type métallique ou électrolytique à variation continue. Cette solution est de plus en plus abandonnée au profit de solutions électroniques d'un coût voisin, d'un volume moindre et d'un rendement bien meilleur.
- **Démarrage par autotransformateur** : Dans ce mode de démarrage, le stator de la machine asynchrone est relié à un auto-transformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable. La tension est progressivement augmentée, l'intensité du courant ne dépassant pas la valeur maximale désirée.



- **Démarrage rotorique** (à tension nominale) : Lors d'un démarrage rotorique, des résistances de puissance sont insérées en série avec les enroulements du rotor. Ce type de démarrage permet d'obtenir un fort couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné.

## 11 Machine asynchrone monophasée

La constitution interne d'une machine asynchrone monophasée est la même que celle d'une machine triphasée à la différence près, que son stator est composé d'un enroulement et non de trois. Le champ magnétique créé par une bobine monophasée est un champ pulsant et non tournant comme pour celui créé par trois bobines triphasées. Un champ pulsant peut se décomposer en deux champs tournants qui se déplacent dans des sens opposés. Chaque champ tournant tendant à entraîner la machine dans le même sens que lui. Lorsque le rotor est à l'arrêt, le couple créé par chacun des champs tournants est de même valeur. Ainsi, le moteur ne peut démarrer. Pour démarrer un tel moteur, il faut donc le lancer ou avoir recours à un dispositif annexe. Une fois le moteur lancé, et amené à sa vitesse nominale, le moteur possède un glissement proche de 0 pour l'un des champs tournants, et de 2 pour le second. Le couple créé par le premier champ étant plus important que le couple créé par celui de sens contraire, le moteur continue à tourner.

Les machines asynchrones monophasées ont des caractéristiques (couple/puissance massique, rendement, facteur de puissance, etc.) plus faibles que leurs homologues multiphasées. Ces machines sont toujours utilisées en moteur et généralement limitées à des puissances de quelques kilowatts.

### Dispositifs de démarrage

Lorsqu'il est alimenté en monophasé, le moteur asynchrone nécessite un système de démarrage. Différentes solutions permettent une différenciation de ces moteurs :

- *Les spires de Frager* (ou bagues de déphasage) qui sont utilisées dans des dispositifs exigeant un couple assez faible au démarrage tels que les ventilateurs électriques et d'autres petits appareils électroménagers.
- Un *enroulement auxiliaire de démarrage* en série avec un condensateur, avec éventuellement un commutateur centrifuge de coupure : ce type de moteur peut généralement fournir un plus grand couple de démarrage. On les trouve dans les machines à laver et dans l'outillage électroportatif de puissance moyenne (supérieure à 1500 W).
  - À l'arrêt le condensateur et l'enroulement de démarrage sont reliés à la source d'énergie, fournissant le couple de démarrage et déterminant le sens de rotation. Il suffit d'inverser l'enroulement auxiliaire pour que le moteur tourne dans l'autre sens.
  - Usuellement, une fois le moteur lancé à une certaine vitesse, un interrupteur centrifuge ouvre le circuit de l'enroulement et du condensateur de démarrage.

## 12 Intérêts et utilisation :

Le moteur asynchrone triphasé, d'une puissance de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques. Son rapport coût/puissance est le plus faible.

Associés à des onduleurs de tension, les moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine.

Toutefois l'emploi de ce type de moteur est à éviter en très forte puissance ( $P > 10$  MW) car la consommation de puissance réactive est alors un handicap.

**Remarques :** en électroménager (lave-linge) la vitesse des moteurs asynchrones n'est pas réglée par un onduleur, mais ces moteurs possèdent plusieurs bobinages. Il est alors possible de changer le nombre de paires de pôles et donc la vitesse.

## 13 Réversibilité :

Toutes les machines tournantes sont réversibles. Dans le cas de la machine asynchrone, étant donné que son rotor n'est pas excité, elle ne peut être autonome. Mais elle est réversible dans le sens où elle peut fournir de la puissance au réseau en fonctionnant en charge.

