

Entrainement à vitesse variable de la machine asynchrone

Rappels sur les moteurs asynchrones :

Rappels sur les moteurs asynchrones :

Constitution des moteurs asynchrones :

Le moteur asynchrone se compose d'un **stator** (fixe) comportant des enroulements ou bobinages reliés au réseau et un **rotor** (mobile) qui peut être en court-circuit ou bobiné.

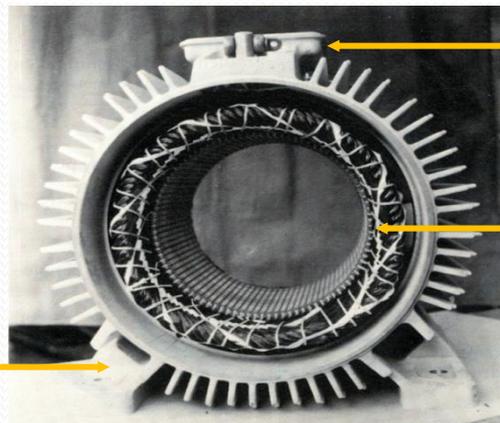
Le stator (partie fixe) :

Il est constitué par trois enroulements (un par phase) qui sont alimentés par des tensions triphasées et produisent ainsi un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation :

$$n_s = f_s / p$$

Stator d'un moteur asynchrone triphasé

Patte de fixation



Plaque à bornes

Stator bobiné

Le rôle du stator est de canaliser le flux magnétique et de créer le champ tournant statorique.

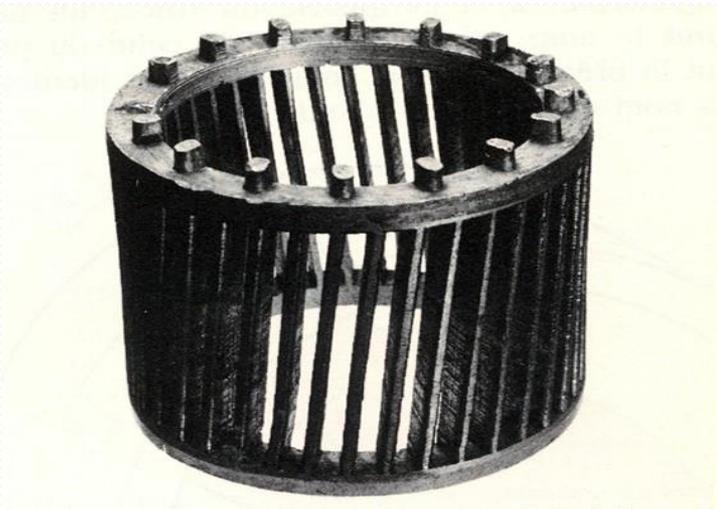
Rappels sur les moteurs asynchrones :

Constitution des moteurs asynchrones :

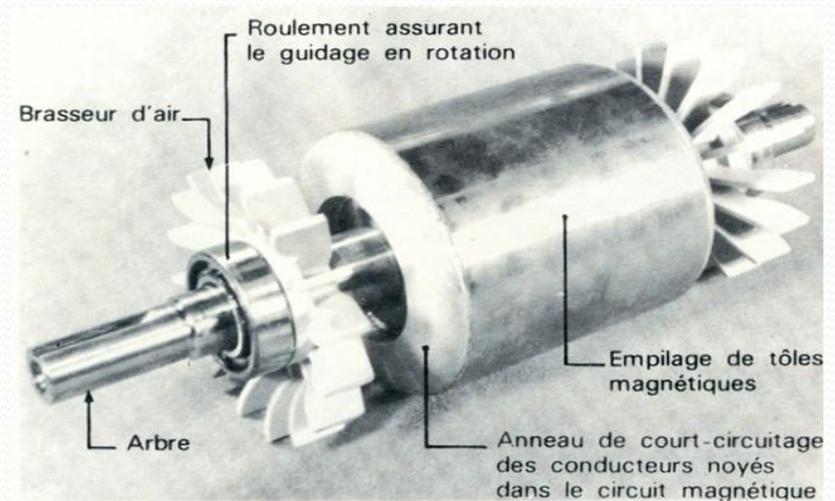
Le rotor (partie mobile) :

Selon la nature du bobinage rotor, on distingue deux grandes classes de machines asynchrones :

- **Les machines à « à cage d'écureuil » ou à rotor en court-circuit :** Les encoches rotor sont occupées par des barreaux conducteurs réunis à chaque extrémité du circuit magnétique par deux anneaux de court circuit.



Rotor à cage d'écureuil



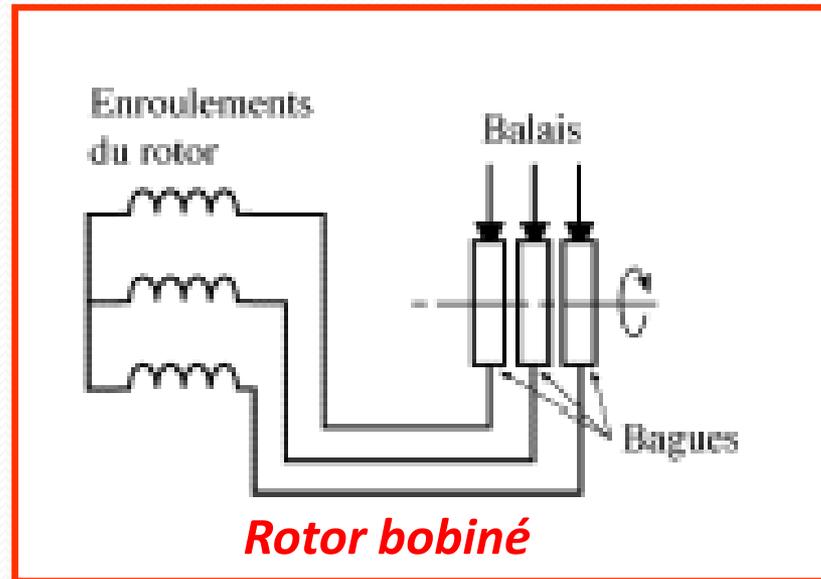
Rotor complet

Rappels sur les moteurs asynchrones :

Constitution des moteurs asynchrones :

Le rotor (*partie mobile*):

- **Les machines à bagues ou à rotor bobiné :** Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant des bobinages presque toujours triphasé. On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de **trois bagues** et **trois balais**. Ce dispositif permet de modifier les propriétés électromécaniques du moteur.

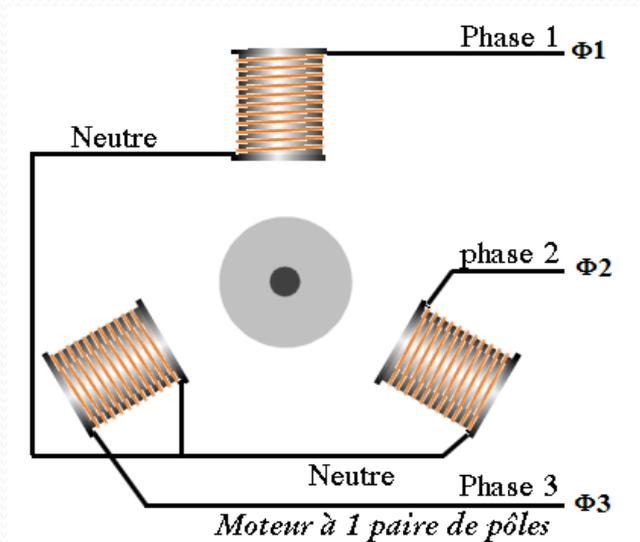


Le rôle du rotor est de **canaliser le flux venant du stator** et de créer **le champ tournant rotorique**.

Rappels sur les moteurs asynchrones :

Principe de fonctionnement :

On alimente le stator par un système triphasé de pulsation . Les courants alternatifs dans le stator créent (**Théorème de Ferraris**) p pôles d'un champ magnétique B tournant à la pulsation de synchronisme : $\Omega = \omega/p$



Supposons le rotor tourne à la vitesse Ω . Ses enroulements voient défiler les p paires pôles du champ tournant statorique à la vitesse relative : $\Omega_s - \Omega$. Ce qui va induire aux bornes des enroulements rotoriques un système de f.é.m. de pulsation $p(\Omega_s - \Omega)$. Si ces enroulements sont fermés sur des résistances ou sont court-circuités, ils sont alors parcourus par un système triphasé de courant.

Rappels sur les moteurs asynchrones :

La présence de courants triphasés et d'un champ tournant est à l'origine d'un couple électromagnétique. Ce couple tend, d'après la loi de Lenz à réduire la cause qui a donné aux courants, c'est-à-dire à la rotation relative du champ magnétique tournant par rapport au rotor. Ainsi il doit :

- **Entraîner le rotor** à la suite du champ tournant statorique si : $\Omega \leq \Omega_s$
→ fonctionnement en **moteur asynchrone**.
- **Freiner le rotor** si $\Omega \geq \Omega_s$ → fonctionnement en **génératrice asynchrone**.

Avantages :

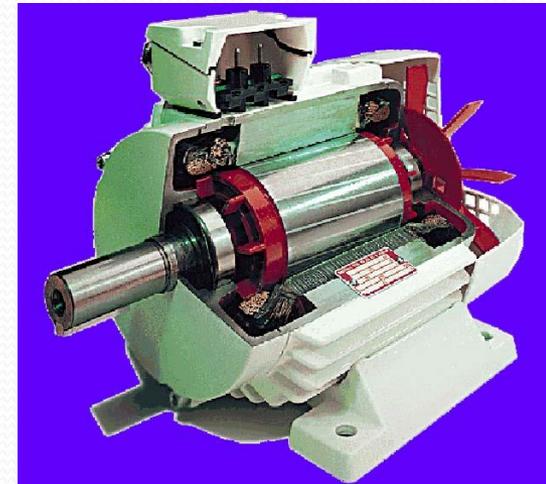
Les moteurs asynchrones et plus particulièrement le moteur à cage d'écurie ont certains avantages comparativement aux moteurs à courant continu. Parmi ces avantages citons:

- ✓ Robuste
- ✓ Construction simple
- ✓ Peu coûteuse.
- ✓ Capacité de fonctionner dans un environnement poussiéreux et où il y a risque d'explosion (gaz).

Inconvénients :

Commande complexe : **Problème de découplage** entre les 2 paramètres de commande :

- ✓ le flux magnétique ϕ_m et
- ✓ le couple électromagnétique T_{em} .



Rappels sur les moteurs asynchrones :

Glissement du rotor par rapport au champ tournant du stator :

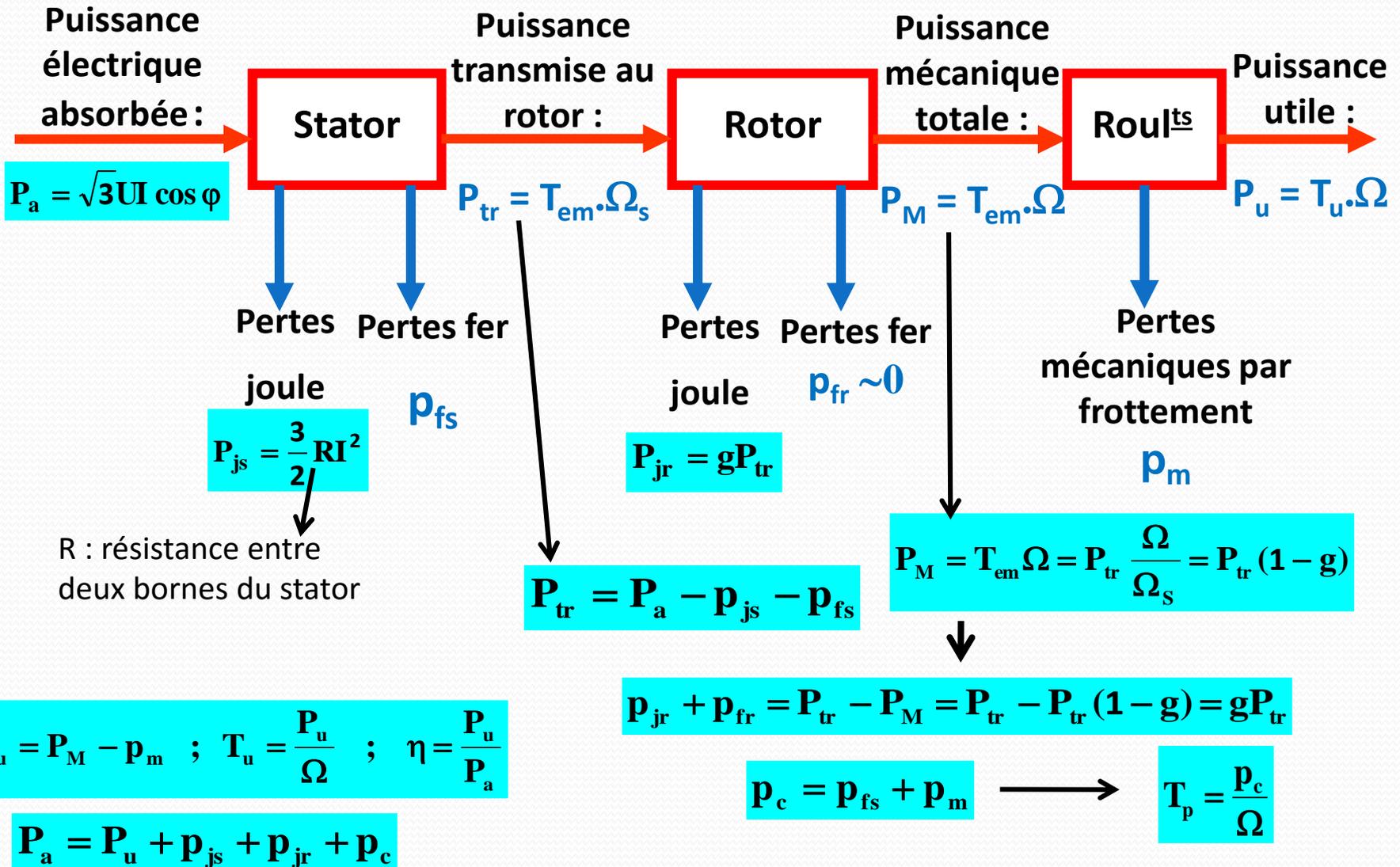
La vitesse N du rotor du moteur asynchrone est nécessairement inférieure à la vitesse du champ tournant N_s . Tout se passe comme s'il y avait **glissement** du rotor par rapport au champ tournant :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad \text{avec :} \quad N_s = \frac{f_s}{p} \quad \begin{array}{l} f_s : \text{fréquence du réseau (Hz)} \\ p : \text{nombre de paires de pôles} \end{array}$$

- $0 < g < 1$ ($\Omega < \Omega_s$) correspond au **fonctionnement moteur**
- $g = 0$ ($\Omega_s = \Omega$) correspond au **fonctionnement au synchronisme**
- $g < 0$ ($\Omega_s < \Omega$) correspond au **fonctionnement en génératrice**
- $g = 1$ ($\Omega = 0$) correspond au **rotor bloqué**.
- $g > 1$ ($\Omega < 0$) correspond au **fonctionnement en frein** (la machine ne restitue pas d'énergie au réseau et n'est donc pas génératrice) obtenu en inversant l'ordre des phases de l'alimentation pour inverser le sens du champ tournant.

Rappels sur les moteurs asynchrones :

Bilan des puissances :



Rappels sur les moteurs asynchrones :

Schéma équivalent du moteur asynchrone :

Si le rotor est en court-circuit et maintenu bloqué on a :

$$\begin{cases} V_1 = jn_1\omega\Phi + r_1I_1 + jl_1\omega I_1 \\ V_2 = 0 = -jn_2\omega\Phi - r_2I_2 - jl_2\omega I_2 \end{cases}$$

avec : r_1 : résistance d'une phase statorique
 l_1 : inductance de fuite d'une phase statorique
 r_2 : résistance d'une phase rotorique
 l_2 : inductance de fuite rotorique

Si le rotor bobiné est en court-circuit tourne à la vitesse Ω , le champ tournant rotorique tourne à la vitesse $\Omega_s - \Omega = g\Omega_s$ par rapport aux enroulements statoriques où il induit des courants de fréquence $g\omega$, ce qui donne :

$$\begin{cases} V_1 = jn_1\omega\Phi + r_1I_1 + jl_1\omega I_1 \\ 0 = -jn_2g\omega\Phi - r_2I_2 - jgl_2\omega I_2 \end{cases}$$

Qui s'écrit aussi :

$$\begin{cases} V_1 = E_1 + (r_1 + jl_1\omega)I_1 \\ 0 = E_2 - \left(\frac{r_2}{g} + jl_2\omega\right)I_2 \end{cases}$$

soit :

$$\begin{cases} V_1 = jn_1\omega\Phi + r_1I_1 + jl_1\omega I_1 \\ 0 = -jn_2\omega\Phi - \left(\frac{r_2}{g} + jl_2\omega\right)I_2 \end{cases}$$

avec :

$$\begin{cases} E_1 = jn_1\omega\Phi \\ E_2 = -jn_2\omega\Phi \end{cases}$$

Rappels sur les moteurs asynchrones :

Schéma équivalent du moteur asynchrone :

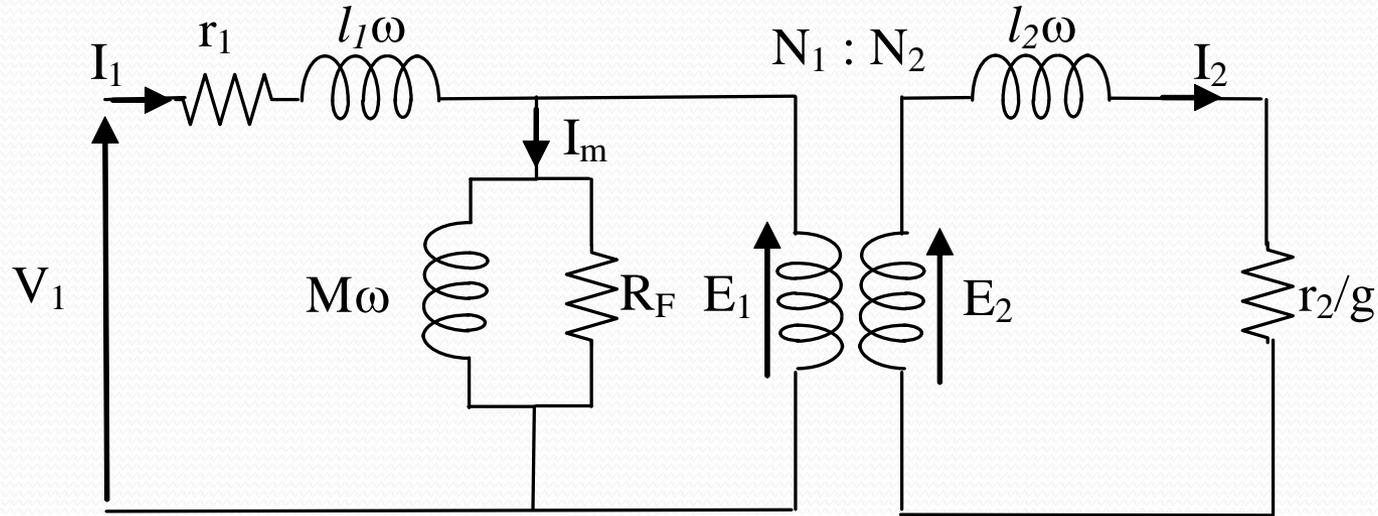


Schéma équivalent total par phase

avec :

V_1 : tension efficace simple d'alimentation

I_1 : courant dans une phase statorique

I_2 : courant équivalent dans une phase rotorique

r_2/g : résistance équivalente du rotor

M : inductance de magnétisation.

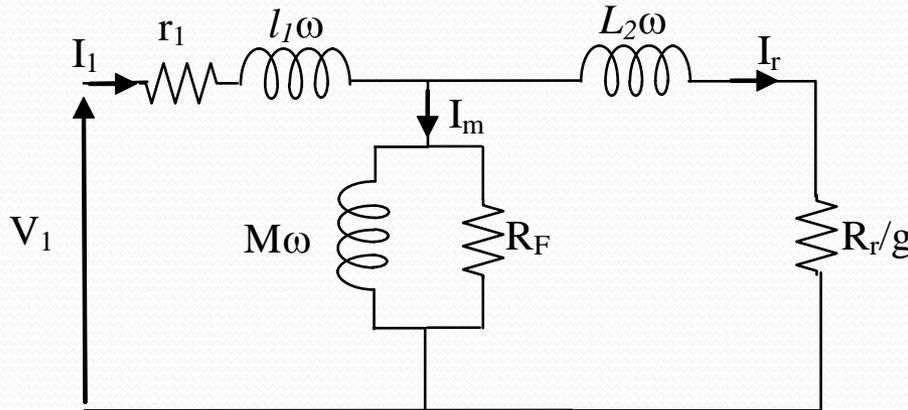
R_F : résistance équivalente aux pertes fer

$$\begin{cases} V_1 = jn_1\omega\Phi + r_1I_1 + jl_1\omega I_1 \\ 0 = -jn_2\omega\Phi - \left(\frac{r_2}{g} + jl_2\omega\right)I_2 \end{cases}$$

Rappels sur les moteurs asynchrones :

Schémas équivalents du moteur asynchrone :

Ramenons tout au stator :



$$L_2 = \frac{l_2}{m^2}$$

$$R_r = \frac{r_2}{m^2}$$

$$I_r = -mI_2$$

Schéma équivalent du moteur, ramené au stator

D'où l'on déduit le schéma final simplifié :

$$r_1 \approx 0 \quad l_1\omega \approx 0$$

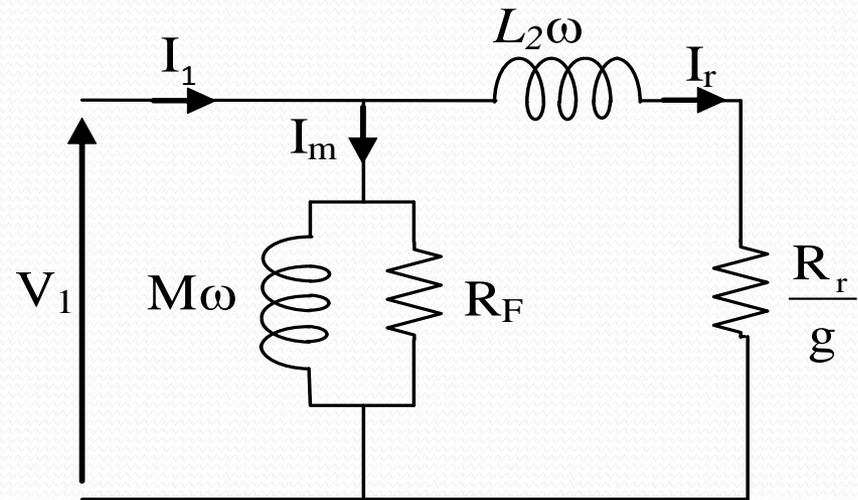


Schéma simplifié par phase

Rappels sur les moteurs asynchrones :

Expression du couple :

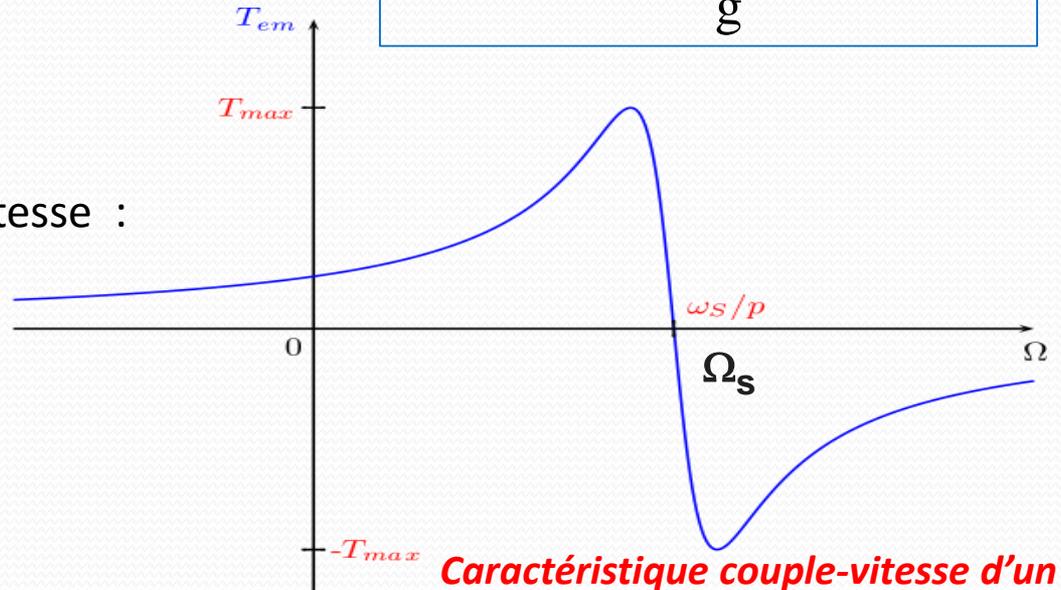
A partir du schéma équivalent simplifié, on a :

$$P_{tr} = 3 \frac{R_r}{g} I_r^2 \longrightarrow T_{em} = \frac{(1-g)}{\Omega} P_{tr} = \frac{(1-g)}{\Omega} 3 \frac{R_r}{g} I_r^2 \quad (1)$$

On déduit en remplaçant dans l'équation (1) :

$$T_{em} = \frac{3}{\Omega_s} \frac{R_r}{g} \frac{V_1^2}{\left(\frac{R_r}{g}\right)^2 + (L_2 \omega)^2} \xrightarrow{\Omega_s = \frac{\omega}{p}} T_{em} = \frac{3p}{\omega} V_1^2 \frac{\frac{R_r}{g}}{\left(\frac{R_r}{g}\right)^2 + (L_2 \omega)^2}$$

D'où la caractéristique couple - vitesse :



Caractéristique couple-vitesse d'un MAS

Rappels sur les moteurs asynchrones :

Expression du couple :

Remarques :

- T_{em} est **proportionnel** au V^2
- Le couple est nul au synchronisme
- Au voisinage du synchronisme : le glissement est très faible ; de ce fait on peut faire l'approximation : $R_r \gg gL_2\omega$

L'expression du couple se simplifie : $T_{em} = \frac{3V^2}{\Omega_s R_r} g$  Le couple **est proportionnel** au glissement.

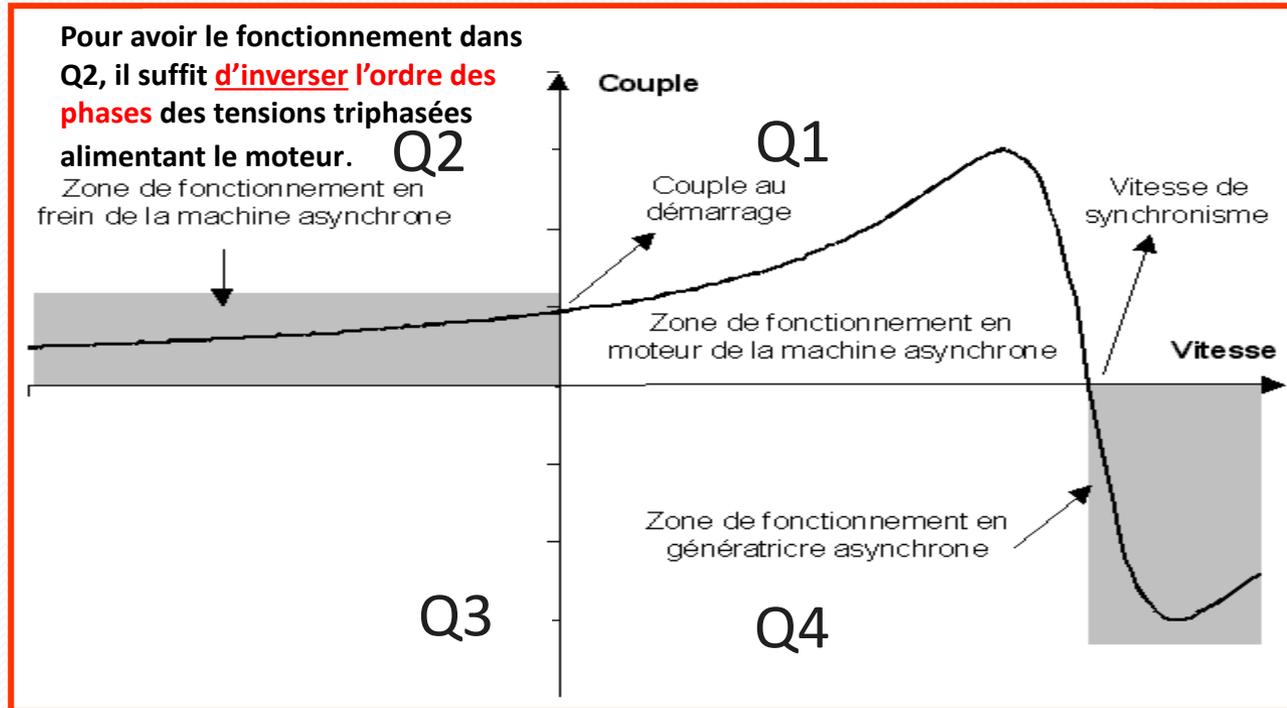
- Aux **forts glissements** : $R_r \ll gL_2\omega$  $T_{em} = \frac{3R_r V^2}{\Omega_s L_2^2 \omega^2} \frac{1}{g}$

Le couple est **inversement proportionnel** au glissement. Il présente un maximum (**couple de décrochage**) : $g_{max} = \frac{R_r}{L_2\omega}$

- Le **couple maximal** que peut développer le moteur **est indépendant de g** : $T_{max} = \frac{3 V^2}{2 \Omega_s} \frac{1}{L_2 \omega}$

Rappels sur les moteurs asynchrones :

Domaines de fonctionnement de la machine asynchrone et modes de freinage:



Le moteur asynchrone développe des **couples de freinage** dans les cas suivants :

- Quand la charge devient entraînant (exemple: phase de descente dans les applications de levage). Le moteur développe un couple de freinage, si la vitesse dépasse celle du synchronisme. C'est le **freinage hypersynchrone**.
- Quand on inverse 2 phases des tensions statoriques: C'est le **freinage en contre courant**.
- Quand on alimente deux phases statoriques en courant continu, on crée un flux statorique fixe qui freine le rotor de la machine : C'est le **freinage par injection de courant continu**. L'inconvénient majeur de ce type de freinage est la nécessité d'utiliser un équipement supplémentaire (une alimentation de courant continu).

Procédés de variation de vitesse du moteur asynchrone

Principe :

Modifier la caractéristique $T_{em}(\Omega)$. Les différents paramètres possibles pour faire varier la vitesse se résument dans la relation suivante :

$$N = \frac{(1-g)}{p} * f_s$$

1. Action sur le nombre de paires de pôles :

Ce procédé ne permet que l'obtention de vitesses discrètes. p est un nombre entier. Les différentes vitesses seront des multiples. **On parle de variation par couplage de pôles.**

Dans la pratique on limite la **variation à deux vitesses** (PV et GV).

2 technologies sont utilisées suivant le rapport : $\frac{GV}{PV}$

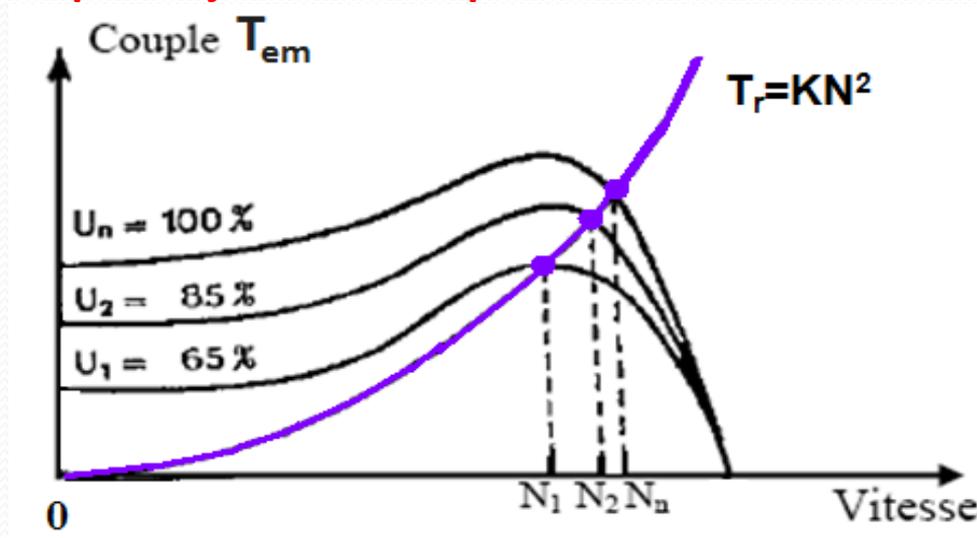
- rapport quelconque : stator à enroulements séparés
- rapport = 2 : stator composé de 6 demi-bobines

Procédés de variation de vitesse du moteur asynchrone

2. Action sur le glissement :

a. Variation de vitesse par réglage de tension V_s à f_s fixe :

Le principe est illustré par la figure suivante. La plage de variation de vitesse est limitée pour des raisons de stabilité, et que cette diminution de vitesse se fait par **augmentation du glissement** donc **des pertes joules rotorique**.



Convertisseurs utilisés :

Gradateurs à thyristors où la tension statorique est ajustée en agissant sur l'angle d'amorçage.

Procédés de variation de vitesse du moteur asynchrone

2. Action sur le glissement :

b. Variation de vitesse par réglage de R_r à V_s et f_s fixes :

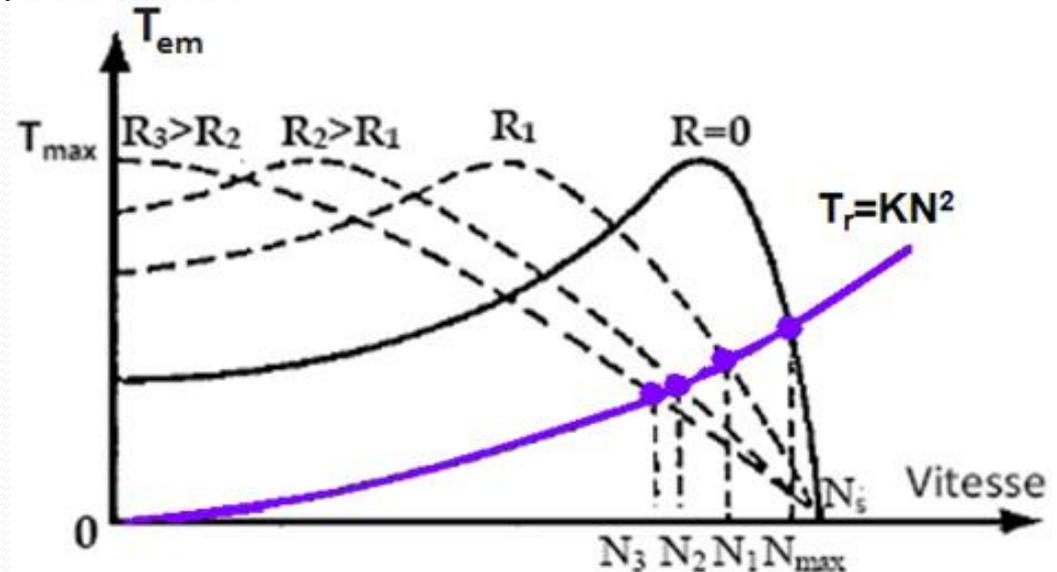
Cette commande est applicable pour le **moteur à rotor bobiné** pour la simple raison que son rotor est bien sûr accessible contrairement à celui d'un moteur à cage d'écureuil. Le principe de cette action est illustré par la figure suivante :

Applications :

- ✓ Cas où le rendement est secondaire.
- ✓ Levage, grue et pont roulant.
- ✓ Couple de démarrage élevé.
- ✓ Applications manuelles.

Convertisseurs utilisés :

1. *Rhéostat commandé manuellement*
2. *Variation électronique de R_r (Hacheur rotorique)*
3. *Variation par extraction de la puissance du rotor (Cascade hyposynchrone)*

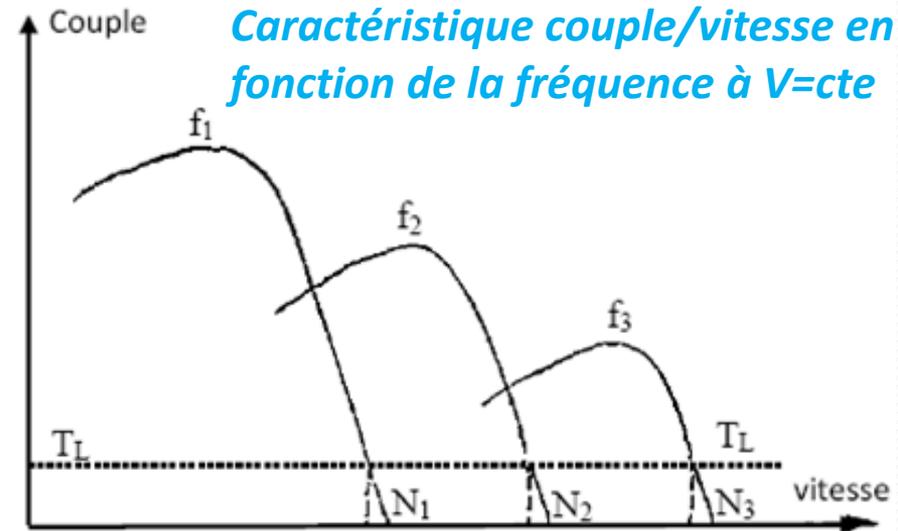


Procédés de variation de vitesse du moteur asynchrone

3. Action sur la fréquence :

a. Variation de vitesse par action sur la fréquence seule :

Pour différentes fréquences, la courbe du couple se déforme comme indiqué sur la figure suivante :



A tension donnée V , on distingue 2 remarques :

- ✓ Pour $f_1 < f_2$, le flux, donné par la relation $\Phi = k \frac{V}{f}$, **augmente**. Il y a donc **risque de saturation** et de **surintensité**. On **ne peut pas utiliser** cette méthode **jusqu'à la vitesse nulle**.
- ✓ Pour $f_3 > f_2$, le couple maximal décroît, il y a donc **risque de décrochage** du moteur à partir d'une certaine valeur de la fréquence.

Ce dernier type fonctionnement est qualifié de fonctionnement à **puissance constante**. En effet, on a : $P = T_{em} N = cste$

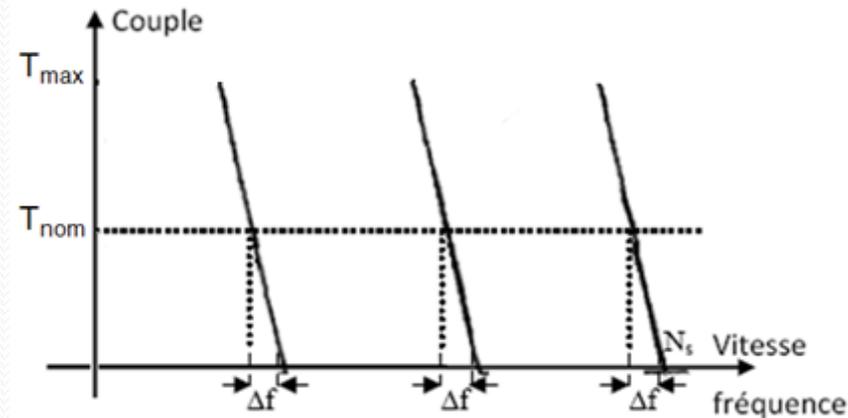
Procédés de variation de vitesse du moteur asynchrone

3. Action sur la fréquence :

b. Variation de vitesse par réglage de la tension et de la fréquence :

A **flux constant**, c'est-à-dire en faisant **varier** la tension d'alimentation **V proportionnellement** à la fréquence d'alimentation **f**, la relation "couple/vitesse" du moteur asynchrone **se translate** avec la fréquence.

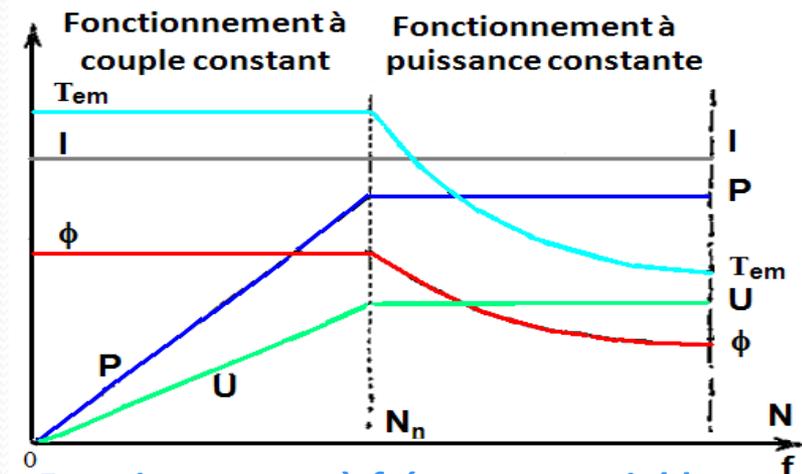
Il est possible de fonctionner à couple constant (par exemple, le couple maximal), à toutes les vitesses, y compris le démarrage.



Caractéristique couple/vitesse en fonction de la fréquence à flux constant.

Ce fonctionnement est qualifié de fonctionnement à **couple constant**. En effet on a : $T_{em} = k \cdot I \cdot \Phi = cste$

On utilise la plupart du temps une loi $V/f = constante$ pour faire varier la vitesse, tout au moins pour les vitesses inférieures à la vitesse nominale du moteur.



Fonctionnement à fréquence variable



FIN