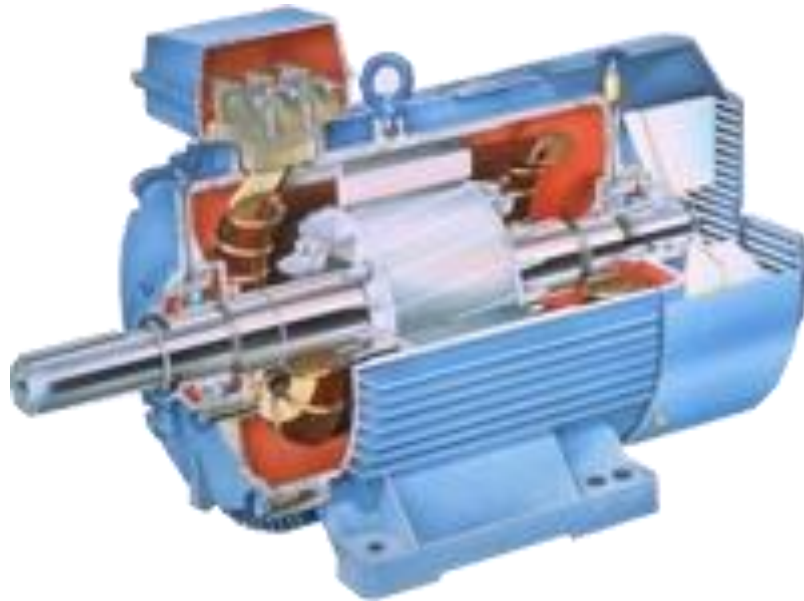
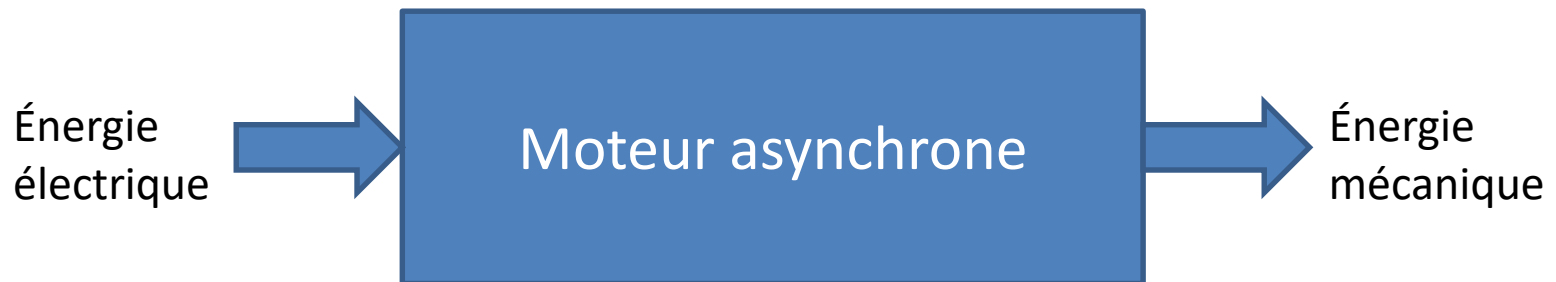


LE MOTEUR ASYNCHRONE

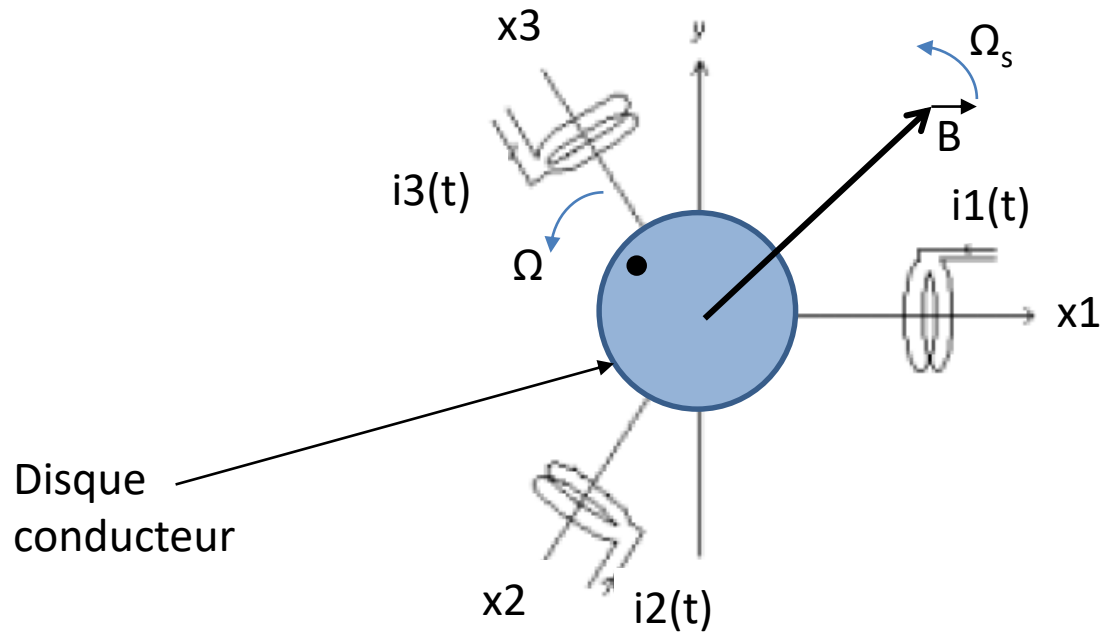


Définition

- La machine asynchrone triphasée est un **convertisseur électromagnétique** permettant de convertir l'énergie **électrique** en énergie **mécanique**.



Principe



\vec{B} est un champ tournant créé par trois bobines alimentées par un système de courants triphasé équilibré.

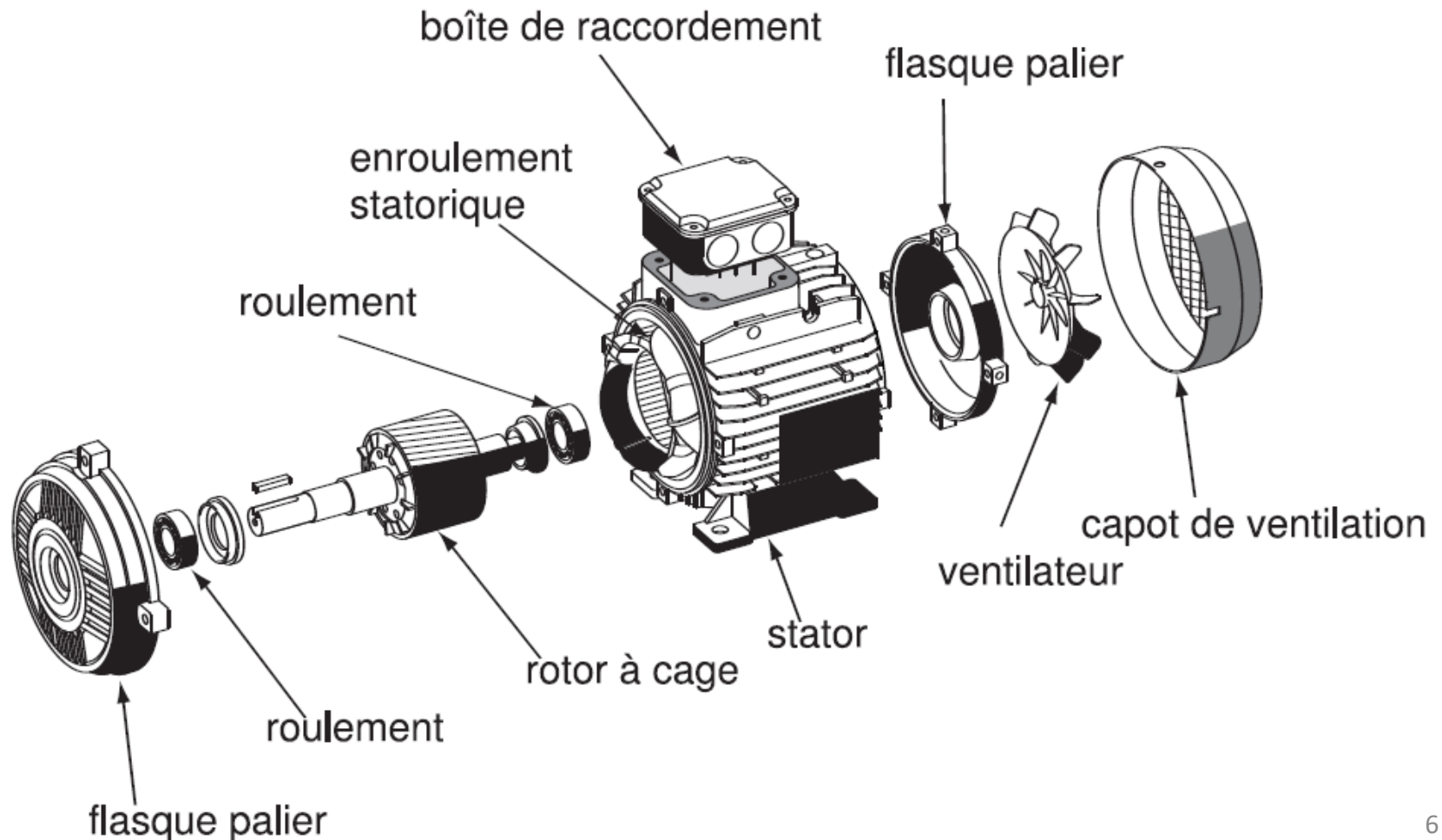
Principe..

- La variation de l'induction magnétique \vec{B} sur le disque entraîne l'apparition des courants induits dans celui-ci (courants de Foucault). D'après la loi de \vec{L} enz, le disque se met à tourner pour rattraper le mouvement de B .
- Si $\Omega < \Omega_s$, on dit que le mouvement du disque est *asynchrone* par rapport *au* champ tournant.
- Si on remplace le disque par un aimant permanent, le mouvement sera *synchrone* $\Omega = \Omega_s$.

Principe...

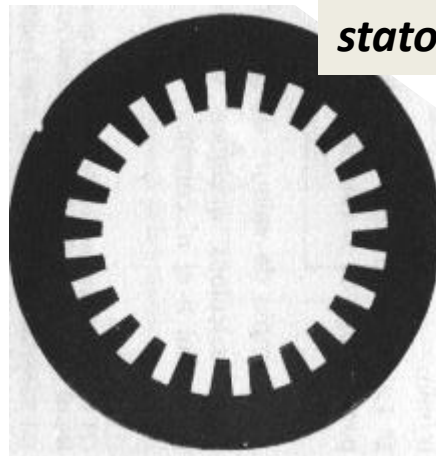
- Donc on peut dire que :
 - Conducteur en Al/Cu, c'est le principe du moteur *asynchrone*.
 - Conducteur aimanté, c'est le principe du moteur *synchrone*.

I. Constitution (exemple moteur à rotor à cage)



a. Le stator

- C'est la partie fixe du moteur. Il s'agit d'une carcasse constituée d'un empilement de tôles d'acier de qualité magnétique. Le stator supporte les enroulements. Ceux-ci sont connectés au réseau triphasé et produisent le champ tournant.



*Tôle du
stator*

...Le stator

- la fréquence de rotation du champs tournant est appelée n_s , appelée fréquence de synchronisme:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad \text{et} \quad \Omega_s = 2\pi \cdot n_s = 2\pi \cdot \frac{f}{p}$$

n_s : La fréquence de rotation du champ en tours par seconde [tr.s^{-1}]

f : La fréquence des tensions d'alimentation en Hertz [Hz]

p : Le nombre de paires de pôles

Ω_s : La vitesse angulaire du champ, en radians par seconde [rad.s^{-1}]

Exercice d'application

1. Si la fréquence des tensions d'alimentation est égale à 50 Hz, alors donner la relation entre n_s et p le nombre de paires de pôles.
2. Remplir le tableau suivant

p	1	2	3	4
n_s [tr.min ⁻¹]				

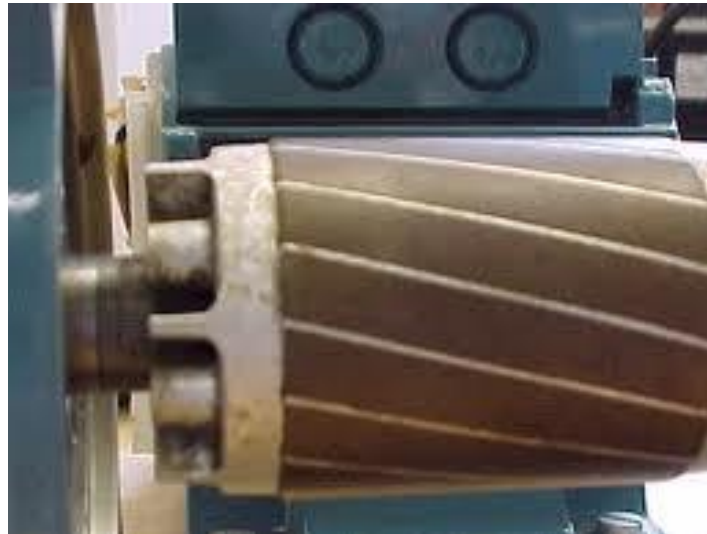
3. Sachant que, n , la fréquence du rotor, donc du moteur, est très légèrement inférieure à celle du champ tournant n_s et que n est de 980 tr.min⁻¹ quelle est alors la fréquence de synchronisme (fr. du stator) ainsi que le nombre de pôles?

b. Le rotor

- C'est la partie mobile du moteur.
- La fréquence de rotation du rotor est appelée n , il tourne moins vite que le champ tournant du stator, l'enroulement rotorique n'est relié à aucune source extérieure. Les seuls courants qui le traversent sont les courants de Foucault induits par la rotation du champ statorique

b.1. Rotor à cage d'écureuil :

- Il est constitué d'un empilage de tôles d'acier (pour minimiser les i_F) formant un cylindre. Des trous ou des encoches longitudinales sont ménagées dans la périphérie de ce cylindre. C'est dans ces encoches que sont placés les conducteurs en cuivre ou injectés en aluminium. Aux 2 extrémités, ils sont court-circuités par une couronne. L'ensemble présente l'aspect d'une cage d'écureuil. Des ailettes de refroidissement sont prévues à une extrémité du rotor.



.. Rotor à cage d'écureuil

Caractéristiques :

- Ce rotor est compact, peut être parfaitement équilibré par recylindrage ce qui lui confère une grande robustesse mécanique.
- Vu sa simplicité et sa robustesse, son coût d'achat et son coût d'entretien sont faibles.
- D'un point de vue électrique, le moteur à cage d'écureuil présente un couple de démarrage assez faible ainsi qu'un appel de courant au démarrage très élevé.
- Les moteurs à rotor à cage de faible puissance peuvent la plupart du temps être employés en démarrage direct, mais ceux de moyenne et forte puissance nécessitent un dispositif réduisant le courant de démarrage.

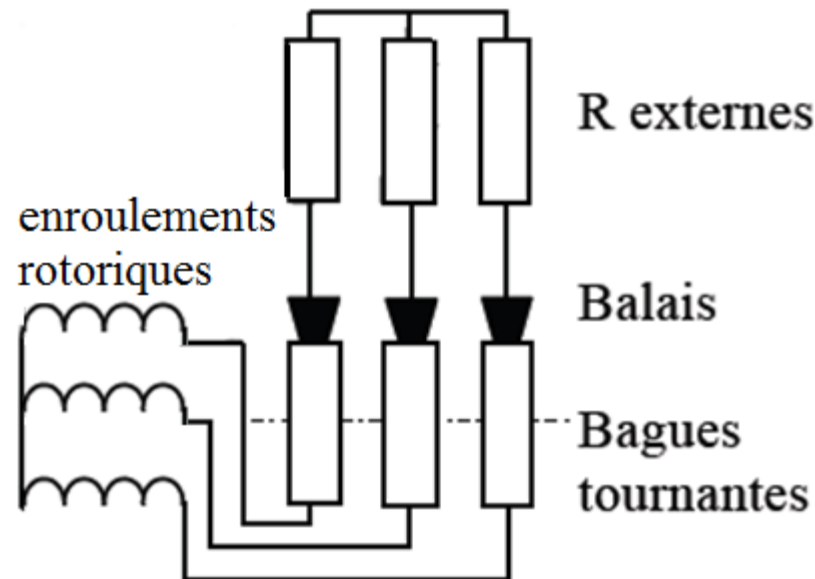
b.2. Rotor bobiné :

Bagues de connexion aux enroulements rotoriques



.. Rotor bobiné

- Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant un bobinage le plus souvent triphasé, trois bagues et trois balais sont prévus pour accéder à ces enroulements, permettant de modifier certaines des caractéristiques électriques du circuit rotorique.



.... Rotor bobiné

Caractéristiques :

- Ces résistances sont insérées au démarrage afin d'augmenter la résistance de l'enroulement et ainsi réduire fortement la pointe du courant de démarrage.
- Cette qualité est intéressante pour des moteurs puissants placés sur des réseaux relativement sensibles
- On constate également que l'insertion de ces résistances augmente le couple de démarrage, ce qui est précieux lorsqu'un moteur entraîne une charge dont le couple résistant de décollage est élevé.
- L'insertion de plus ou moins de résistances rotoriques, permet de faire varier la vitesse du moteur dans une certaine mesure.
- Ce moteur possède donc toutes les qualités électriques. Par contre, les enroulements rotoriques ainsi que le système de bagues et balais le rendent plus vulnérable mécaniquement et plus cher aussi bien à l'achat qu'à l'entretien.

. d Le glissement

- Le rotor tourne à la fréquence de rotation n , il tourne moins vite que le champ tournant qui lui tourne à la fréquence de synchronisme n_s . La différence Δn entre ces deux fréquences de rotation est donnée par la relation :

$$\Delta n = n_s - n$$

Δn : La fréquence de rotation du glissement en tours par seconde [tr.s^{-1}]

n_s : La fréquence de rotation du champ en tours par seconde [tr.s^{-1}]

n : La fréquence de rotation du rotor en tours par seconde [tr.s^{-1}]

.. Le glissement

- On appelle glissement d'un moteur asynchrone le rapport de la fréquence de glissement à la fréquence de synchronisme :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n}{n_s}$$

g: glissement du moteur asynchrone en pourcentage [sans unités]

- Si, par le principe de la loi de Lenz, le rotor rattrapait le champ tournant pour tourner à sa vitesse, leur vitesse *relative serait nulle (glissement $g = 0$)* donc il n'y aurait plus variation de flux et donc plus de couple moteur ce qui est impossible.
- C'est pourquoi ce moteur s'appelle **asynchrone (qui n'est pas synchrone)**. Ainsi le rotor tourne-t-il toujours moins vite que le champ tournant.
- On dit qu'il y a **glissement du rotor par rapport au champ tournant**.

d.1. Variation du glissement avec la charge :

- Si la charge (partie entraînée) appliquée au moteur augmente, le rotor va ralentir, le glissement augmente ainsi que la variation de flux. De ce fait, les courants induits au rotor et le couple moteur vont aussi augmenter et on retrouvera une vitesse pour laquelle l'équilibre sera rétabli entre le couple moteur et le couple résistant.
- Le glissement vaut en général de 1% à vide à 5% en charge. Pour un moteur dont $N_s = 3000\text{tr/min}$, la vitesse réelle du rotor varie de 2970 à 2850tr/min.

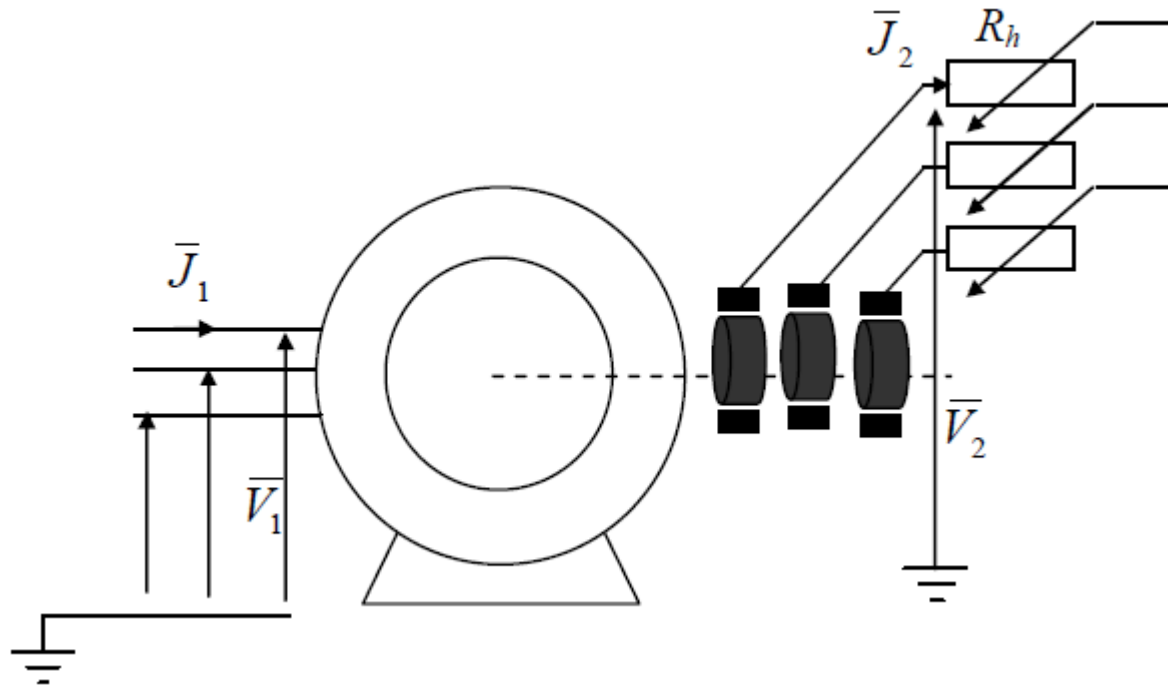
d.2. Courant de démarrage :

- Au démarrage, le rotor étant encore immobile (glissement max $g = 1$), les variations de flux sont maximales. Les courants induits au rotor ainsi que le courant absorbé par le stator au réseau (qui est son image) sont importants.
- Cette pointe de courant de démarrage vaut 5 à 7 fois le courant nominal (à charge normale maximum). Retenons pour un moteur à cage d'écureuil : **$I_d = 6 I_n$**

III. Schéma équivalent d'un MAS

modèle de SteinMetz valable en régime permanent sinusoïdal

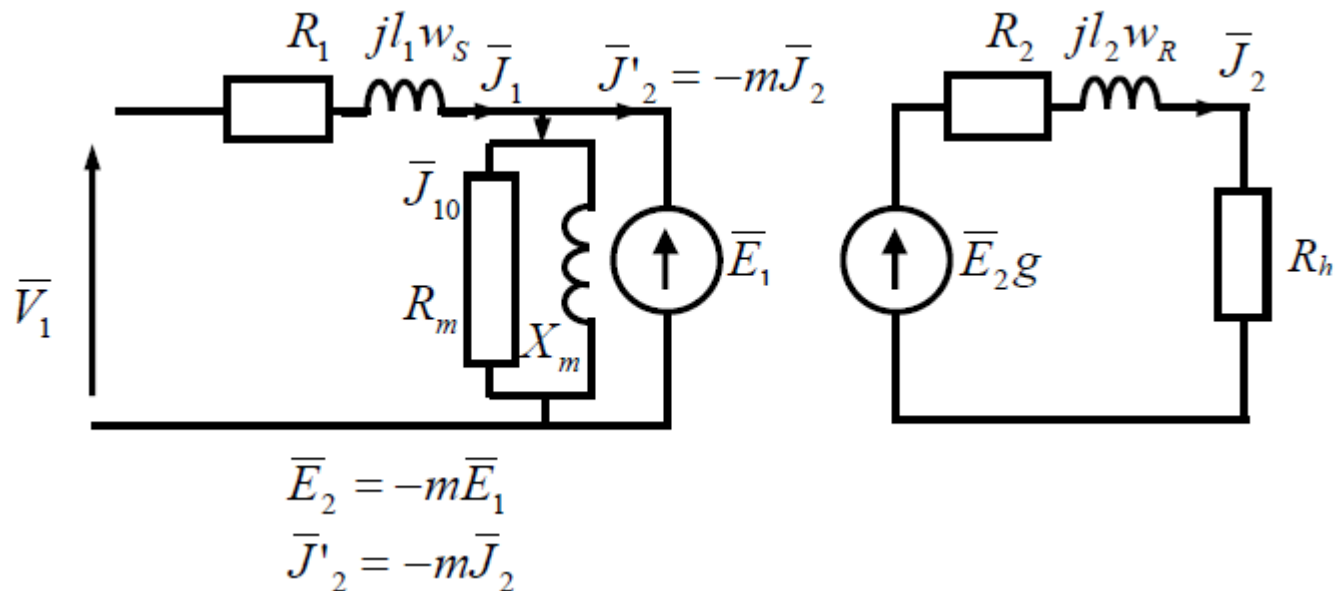
- Exemple du rotor bobiné



1. principe

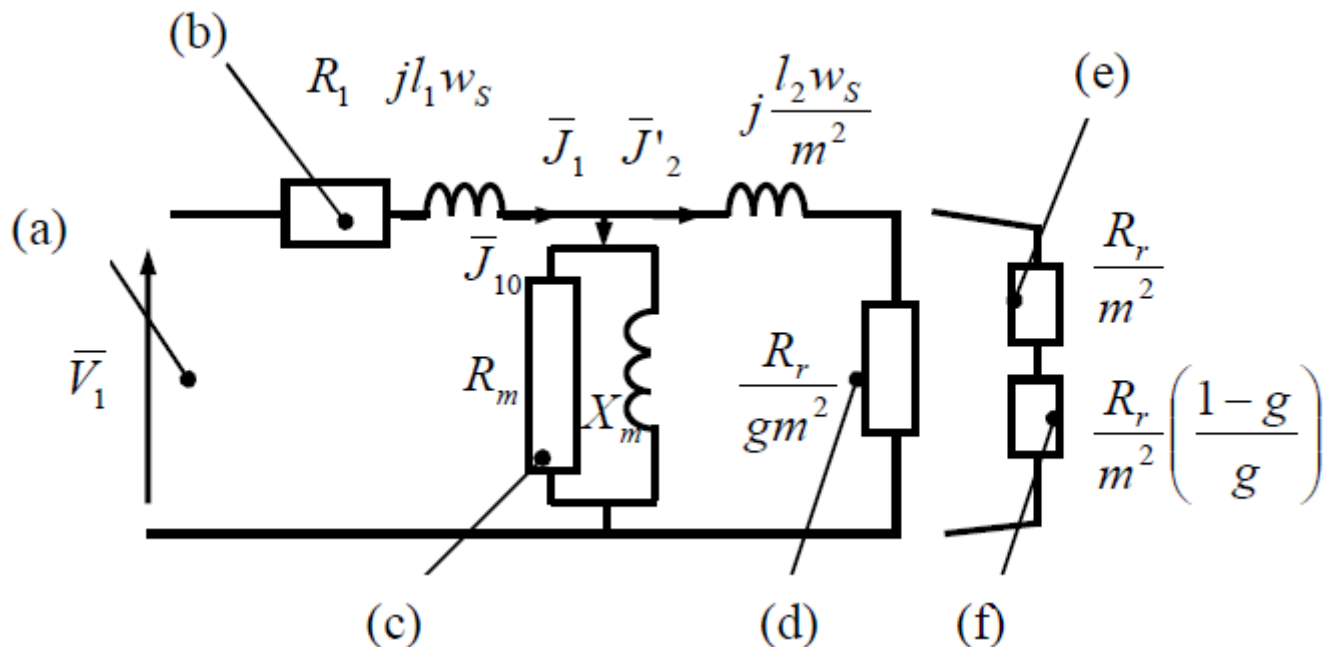
Le MAS peut être assimilé à un transformateur dont le primaire (stator) est alimenté par une tension constante en grandeur qui crée un champ magnétique variable (champ tournant) et dont le secondaire (rotor) est court-circuité. Lorsque le stator d'un moteur asynchrone est alimenté par une source triphasée de fréquence f_s , une f.é.m sera générée au rotor d'amplitude $g E_2$ et de fréquence $g f_s$.

Lorsque le stator d'un moteur asynchrone est alimenté par une source triphasée de fréquence f_s , une f.é.m sera générée au rotor d'amplitude $g E_2$ et de fréquence $g f_s$.



2. Schéma ramené au stator

$$\bar{E}_1 = \bar{J}'_2 \left[\frac{R_r}{gm^2} + \frac{jL_2 w_s}{m^2} \right] \quad \text{avec } R_r = R_h + R_2$$

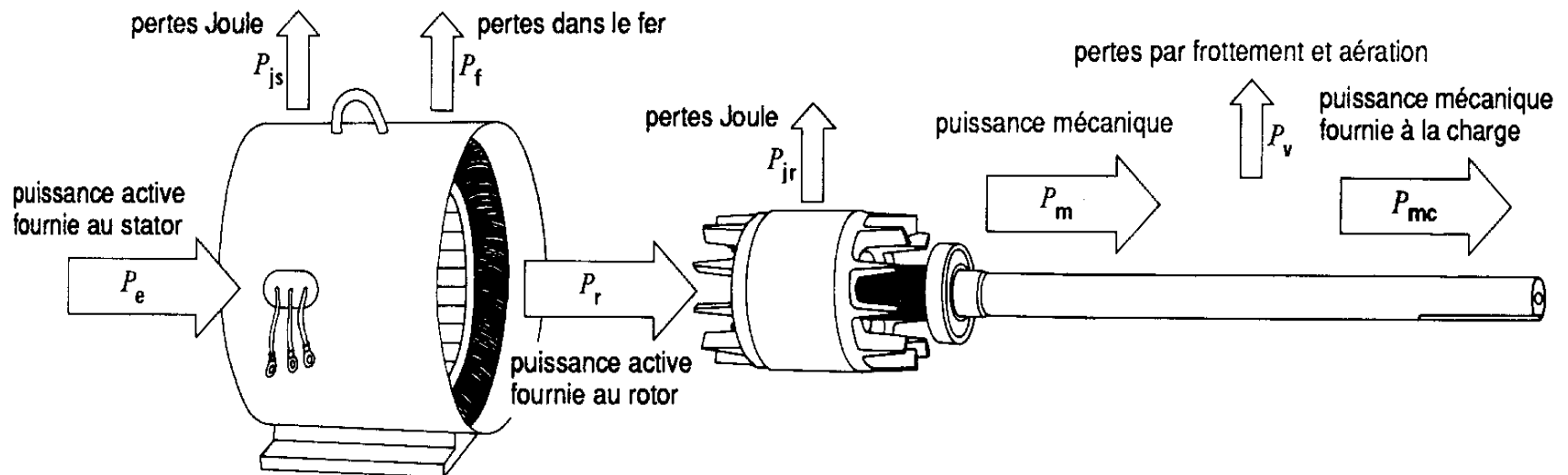


.. Schéma ramené au stator

- R_1 : la résistance équivalente des pertes par effet Joule au stator ;
- R_m : la résistance équivalente des pertes ferromagnétiques ;
- $R'_r = \frac{R_r}{m^2}$: la résistance du rotor ramenée au stator correspondante aux pertes par effet Joule au rotor où $R_r = R_2 + R_h$;
- $R'_r \frac{(1-g)}{g} = \frac{R_r(1-g)}{m^2 g}$: la résistance équivalente ramenée au stator correspondante à la puissance mécanique où $R_r = R_2 + R_h$;
- X_1 : la réactance cyclique de fuites au stator ;
- X_m : la réactance de fuite à vide ;
- $X'_2 = \frac{X_2}{m^2}$: la réactance cyclique de fuites au rotor ramenée au stator.

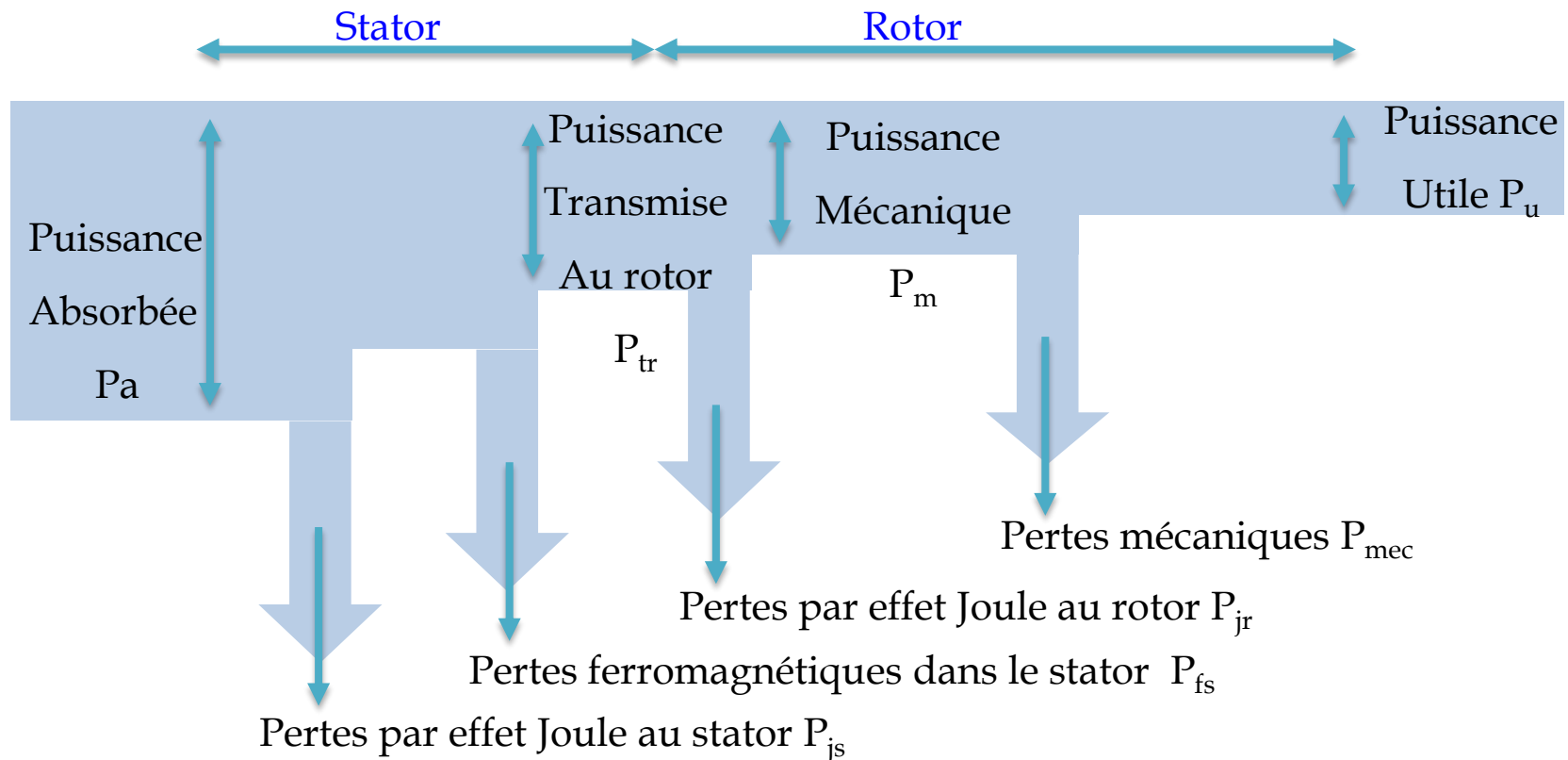
IV. Bilan de puissance

- D'après le schéma équivalent on peut établir un bilan de puissance d'un moteur asynchrone, telle que la puissance absorbée égale à la puissance utile plus la somme des pertes fer, Joule et mécaniques dans le rotor et le stator.
- La figure suivante montre où se situent les pertes et comment la puissance électrique est transformée en puissance mécanique.



.. Bilan de puissance

- Le bilan, peut aussi être revu à l'aide du schéma suivant :



1. La puissance absorbée

- La puissance absorbée (P_a) est en fonction de la tension, le courant de l'entrée et le facteur de puissance de la machine asynchrone, telle que

$$P_a = 3 V_1 J_1 \cos \varphi_1$$

2. Les pertes par effet Joule au stator

- Les pertes au stator sont les pertes ferromagnétiques et les pertes par effet Joule qui sont localisées respectivement dans la résistance R_m (c) et, R_1 (b)
- Les pertes par effet Joules au stator $P_{js} = 3 R_1 J_1^2$
- Les pertes à vide ou pertes ferromagnétiques

$$P_{10} = 3 V_1 J_{10} \cos \varphi_{10}$$

3. La puissance transmise ou bien la puissance électromagnétique

- Selon le schéma équivalent la puissance transmise égale à la puissance absorbée moins les pertes au stator, ou bien elle peut être exprimée sous les formes suivantes :

$$P_{tr} = P_{em} = 3 \frac{R_r}{g} J_2^2$$

$$P_{tr} = P_{em} = C_{em} \Omega_s \text{ où } \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = \frac{2\pi f}{p}$$

$$P_{tr} = P_{em} = \frac{P_{jr}}{g} \text{ puisque } P_{jr} = 3 R_r J_2^2 \text{ et } P_{tr} = 3 \frac{R_r}{g} J_2^2 \text{ où } R_r = R_2 + R_h$$

4. Les pertes par effet Joule au rotor

- Les pertes par effet Joule au rotor sont localisées uniquement dans la résistance (r) du rotor qui est parcourue par un courant secondaire, telle que:

$$P_{jr} = 3 R_r J_2^2$$

$$P_{jr} = P_{tr} - P_m = C_{em} \Omega_s - C_{em} \Omega = C_{em} \Omega_s g = g P_{tr}$$

5. La puissance mécanique

La puissance mécanique peut être établit sous plusieurs formes:

- $P_m = C_{em} \Omega$ où $\Omega = 2\pi N$ [rd/s] et N en [tr/mn] ;
- $P_m = P_{tr}(1 - g)$, puisque $P_m = P_{tr} - P_{jr}$ et $P_{jr} = gP_{tr}$;
- $P_m = P_u + P_{mec}$ où P_{mec} sont les pertes mécaniques ;

La résistance $\frac{R_r(1-g)}{gm^2}$ correspond à la puissance mécanique

du moteur, telle que:

$$P_m = 3J_2'^2 \frac{R_r(1-g)}{gm^2} = 3J_2^2 \frac{R_r(1-g)}{g} \text{ où } J_2' = m J_2$$

6. La puissance utile

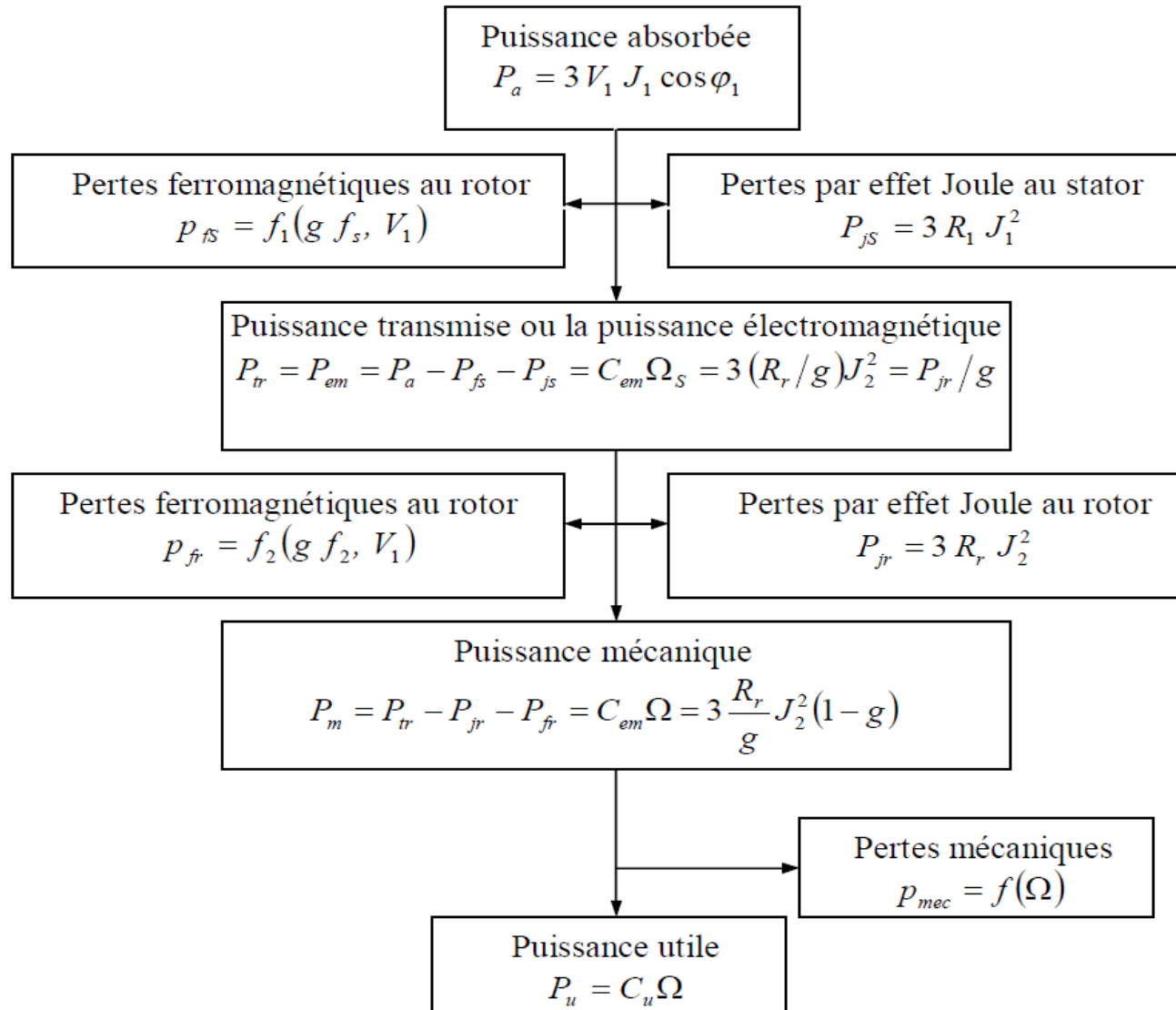
- La puissance utile est le produit entre le couple utile et vitesse angulaire du rotor, telle que

$$P_u = C_u \Omega \text{ où } \Omega = 2\pi N \text{ [rd/s] et } N \text{ en [tr/mn]}$$

- Dans le cas où les pertes mécaniques sont nulles le couple utile est égal au couple électromagnétique.

$$C_u = C_{em}$$

bilan de puissance d'un moteur asynchrone



7. Couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{P_{jr}}{g \Omega_s}$$

D'après l'hypothèse de kapp, on peut montrer que:

$$C_{em} = \frac{3V_1^2}{\Omega_s} \frac{\frac{R_r}{g}}{\left(\frac{R_r}{g}\right)^2 + X^2}$$

avec $X = l_2 \omega_s$





.. Couple électromagnétique

Si on suppose que $\frac{3V^2}{\Omega_s} = cte = K$ (cas de la commande vectorielle) alors C_{em} peut s'écrire sous la forme:

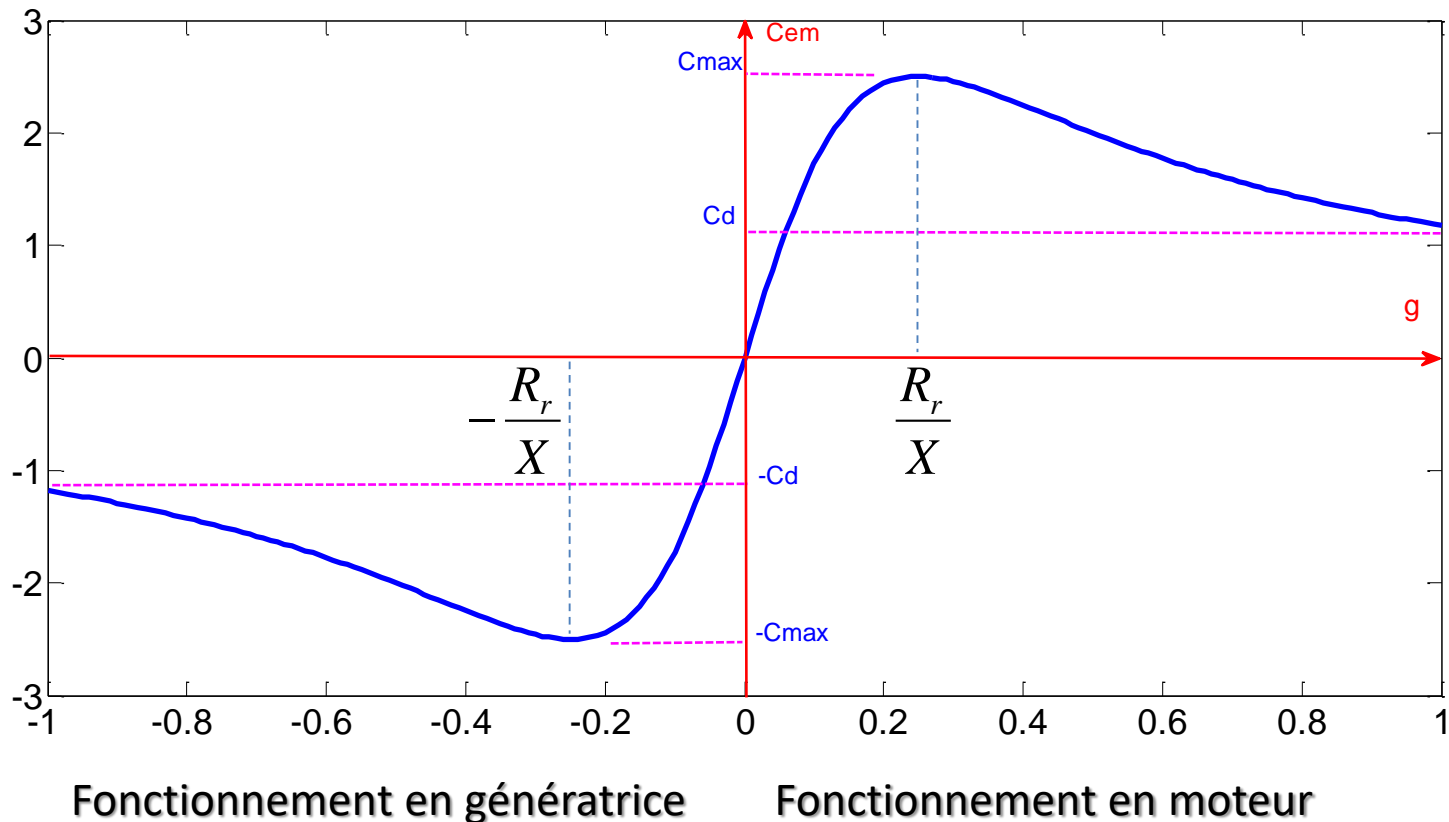
$$C_{em} = K \frac{1}{\left(\frac{R_r}{g}\right) + X^2 \left(\frac{g}{R_r}\right)}$$

.. Couple électromagnétique

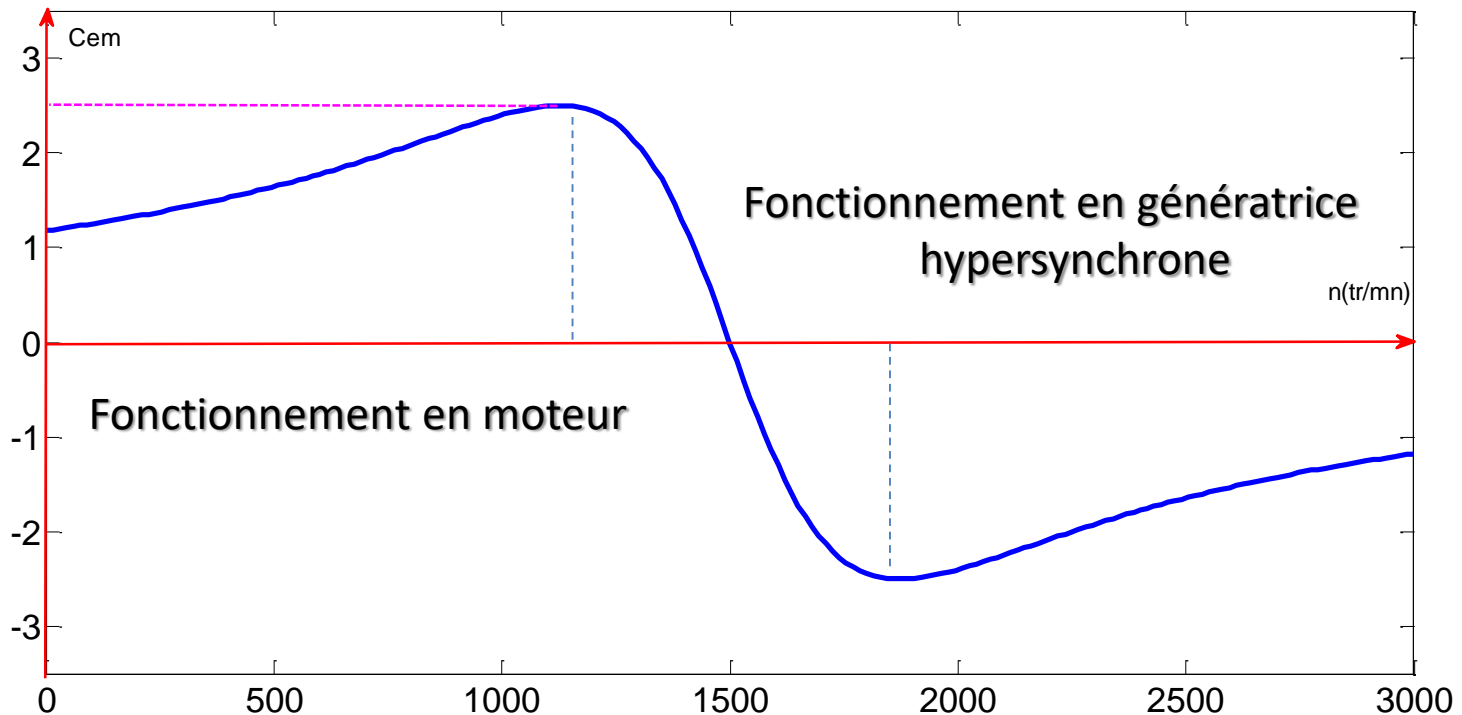
Etude de la fonction $C_{em}(g)$:

g	-1	-R _r /X	0	R _r /X	1
dC _{em} /dg	- 	+ 	+ 	- 	
C _{em}	-C _d	-C _{max}	0	C _{max}	C _d

..Caractéristique du couple électromagnétique $C_{em}=f(g)$



..Caractéristique du couple électromagnétique $C_{em}=f(n)$



8. Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - p_{js} - p_{fs} - p_{jr} - p_m}{P_a}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = 1 - \frac{p_{js} + p_{fs} + p_{jr} + p_m}{P_a}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + p_{js} + p_{fs} + p_{jr} + p_m}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{1}{1 + \frac{p_{js} + p_{fs} + p_{jr} + p_m}{P_u}}$$