

Conversion électromécanique II

15 Moteur asynchrone

Christian Koechli

15. Moteur asynchrone

Objectifs du cours

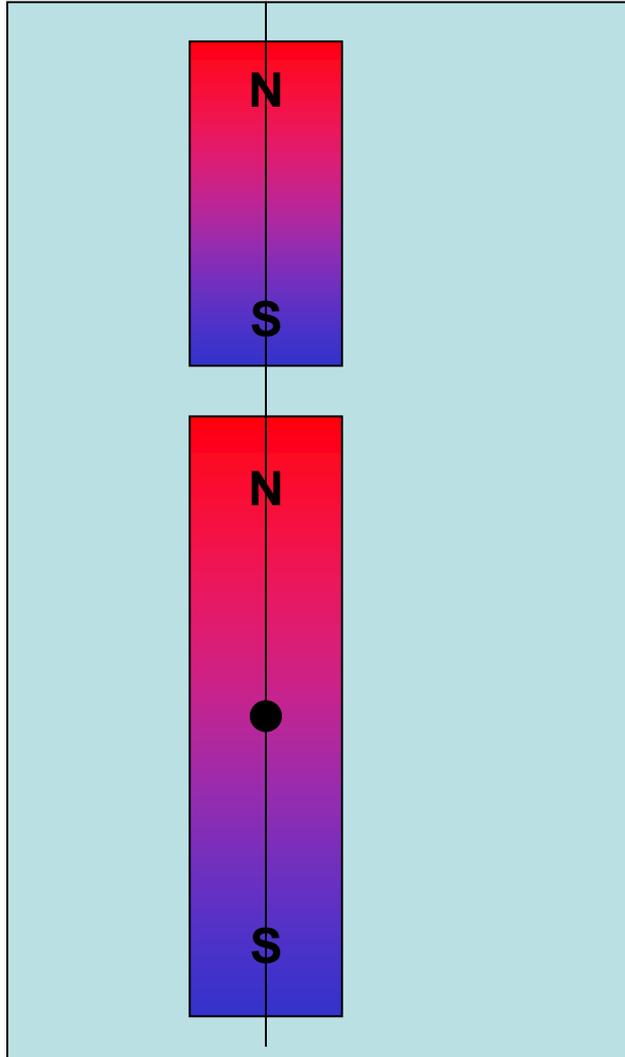
- Principe de fonctionnement
- Equations de tension induite
- Equations de couple
- Modes d'alimentation

Principe de fonctionnement

- Champ tournant statorique $\omega_s \neq 0$
- Champ tournant rotorique $\omega_r \neq 0$
- Le rotor ne tourne PAS à vitesse synchrone.
- Le couple est dû à l'interaction de ces deux champs
- Sa valeur moyenne est non nulle pour autant que $\omega_r = \omega_s - p\Omega$

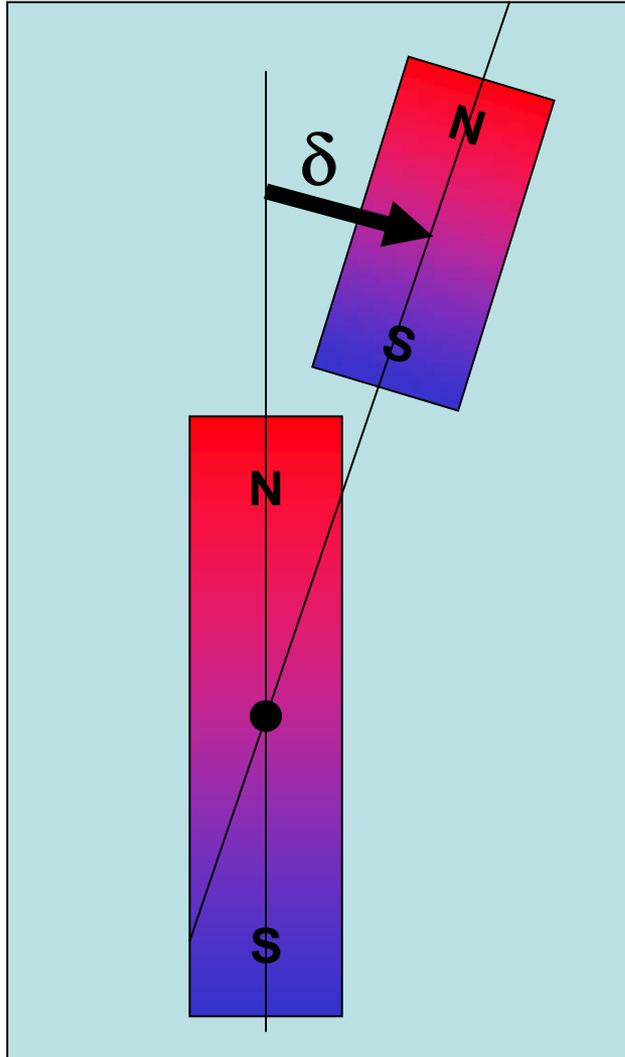
15. Moteur asynchrone

Génération d'un couple électromagnétique
par interaction de champs magnétiques



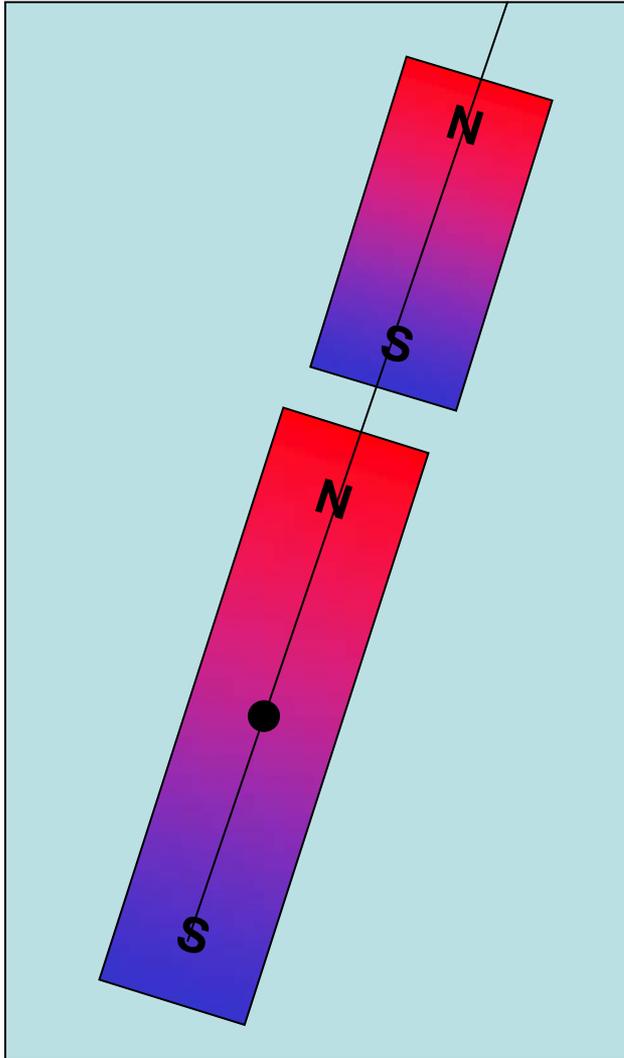
15. Moteur asynchrone

Génération d'un couple électromagnétique
par interaction de champs magnétiques



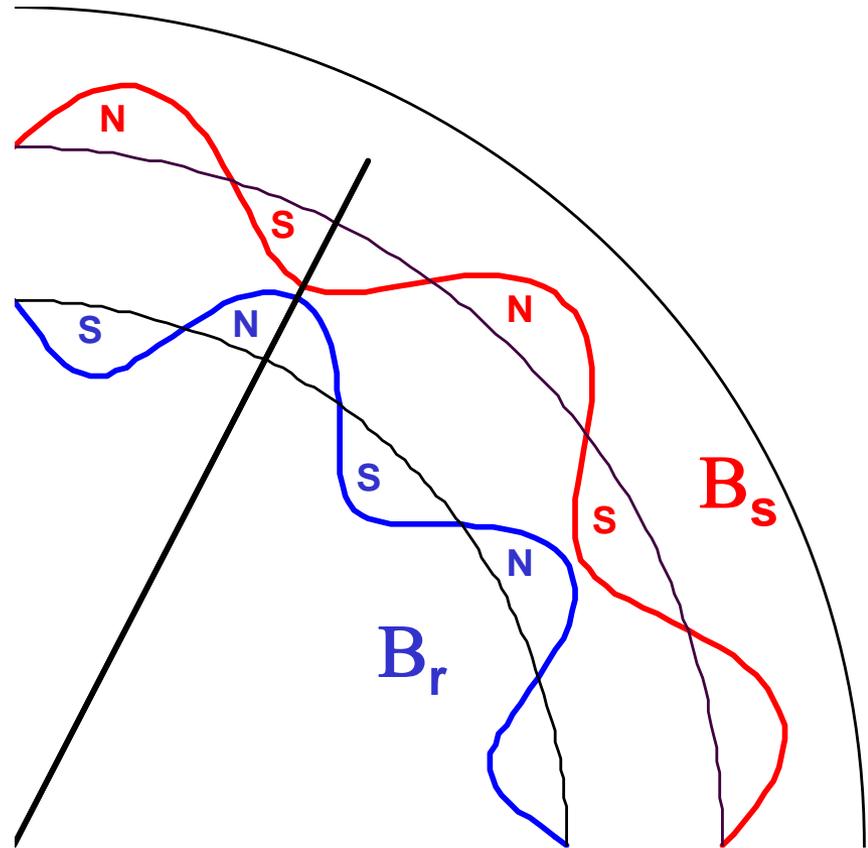
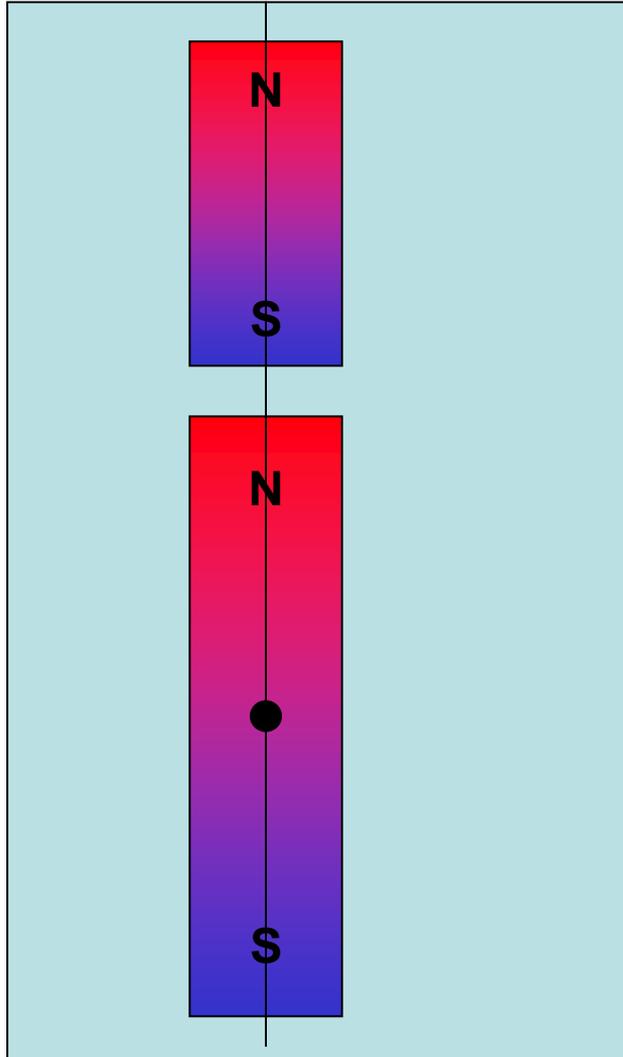
15. Moteur asynchrone

Génération d'un couple électromagnétique
par interaction de champs magnétiques



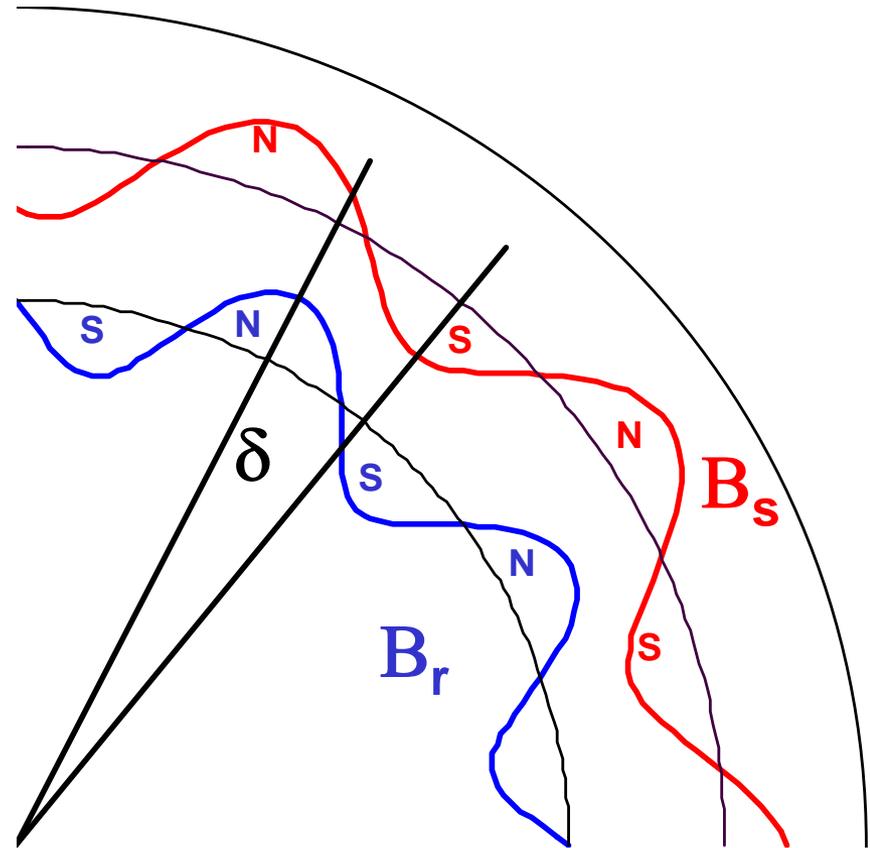
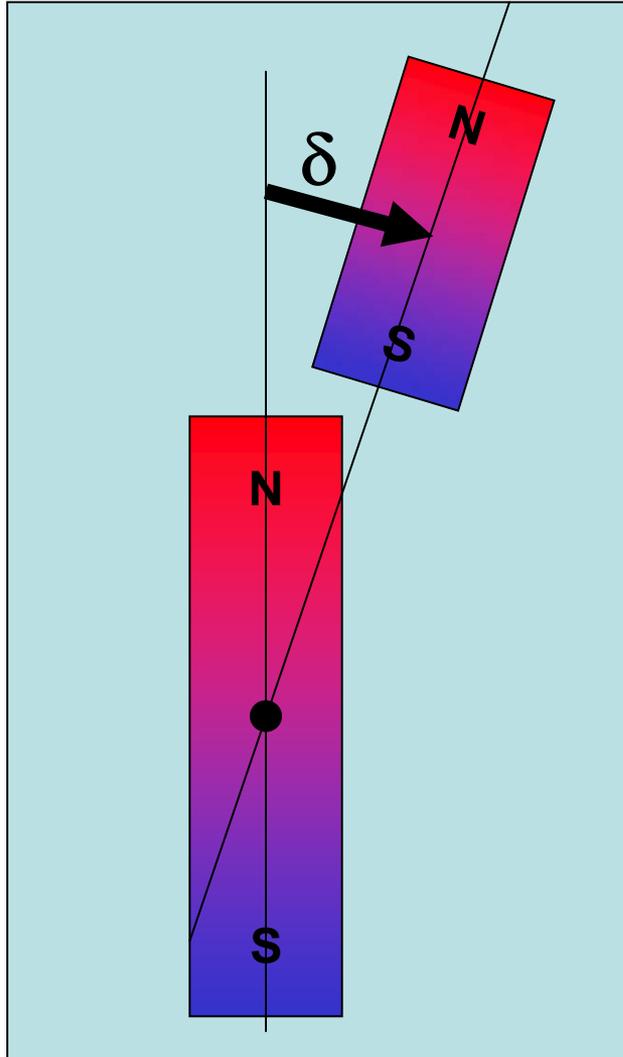
15. Moteur asynchrone

Génération d'un couple électromagnétique
par interaction de champs magnétiques



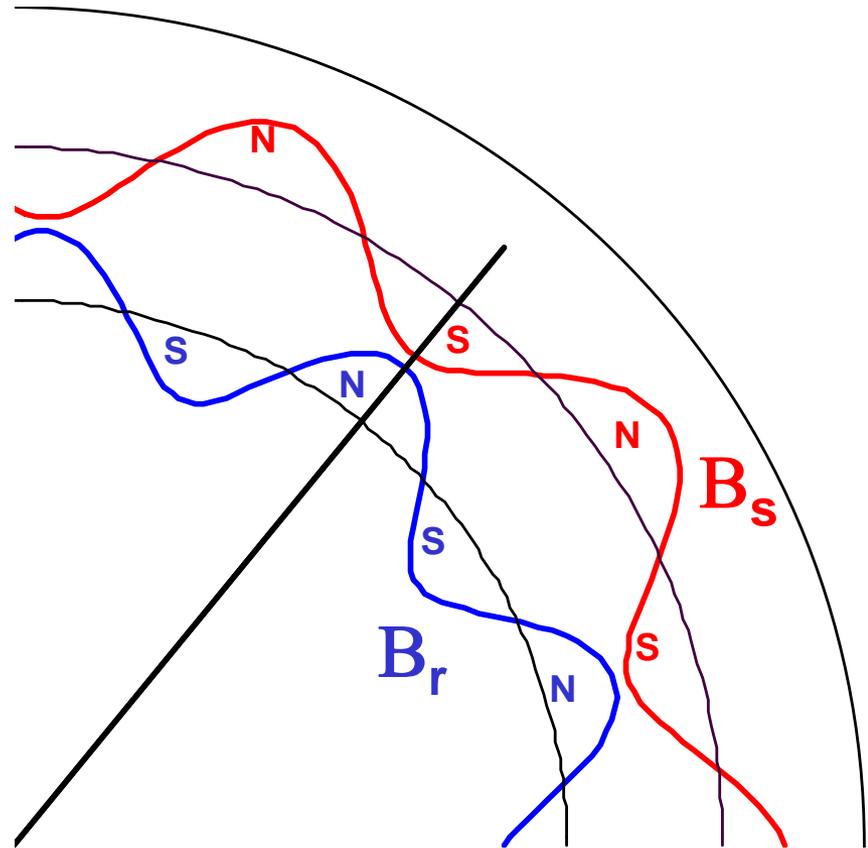
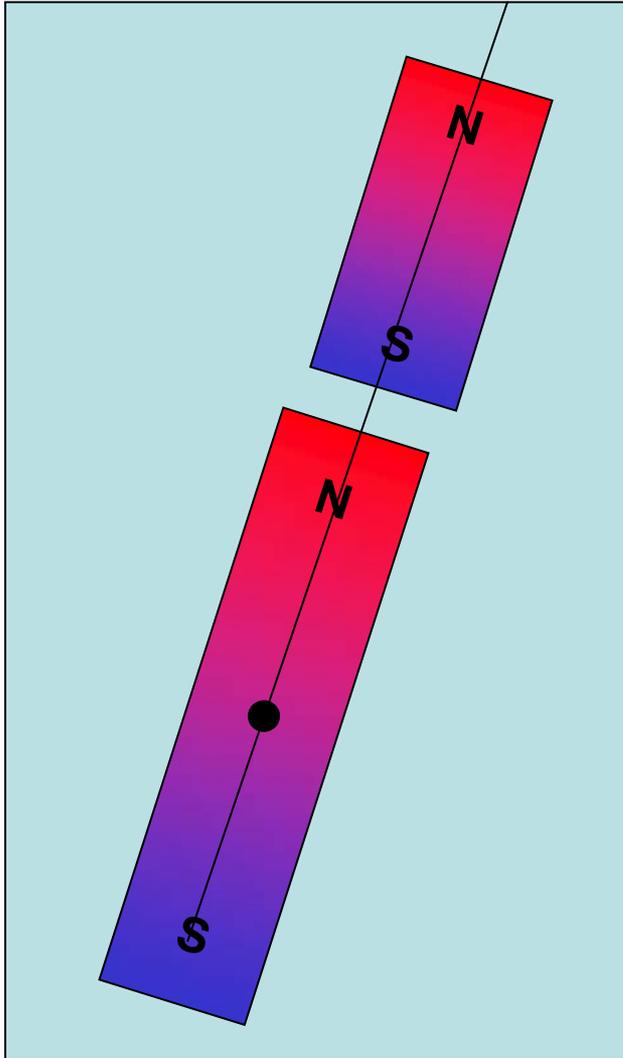
15. Moteur asynchrone

Génération d'un couple électromagnétique
par interaction de champs magnétiques



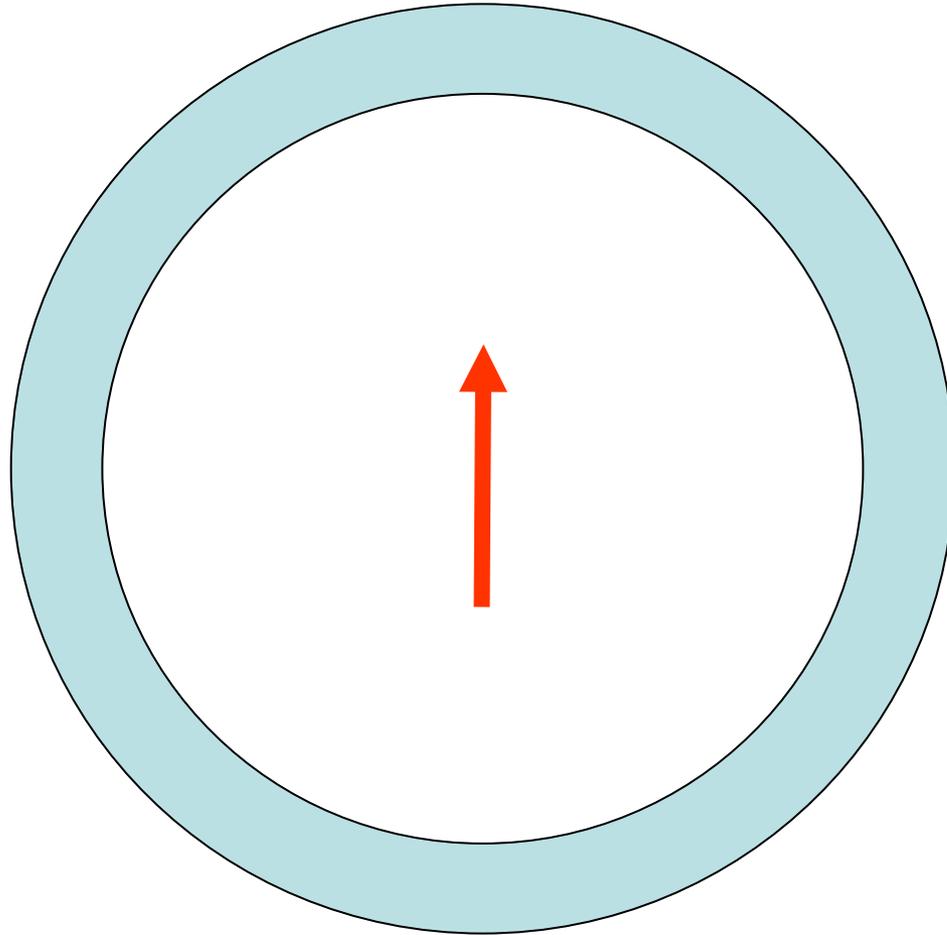
15. Moteur asynchrone

Génération d'un couple électromagnétique
par interaction de champs magnétiques



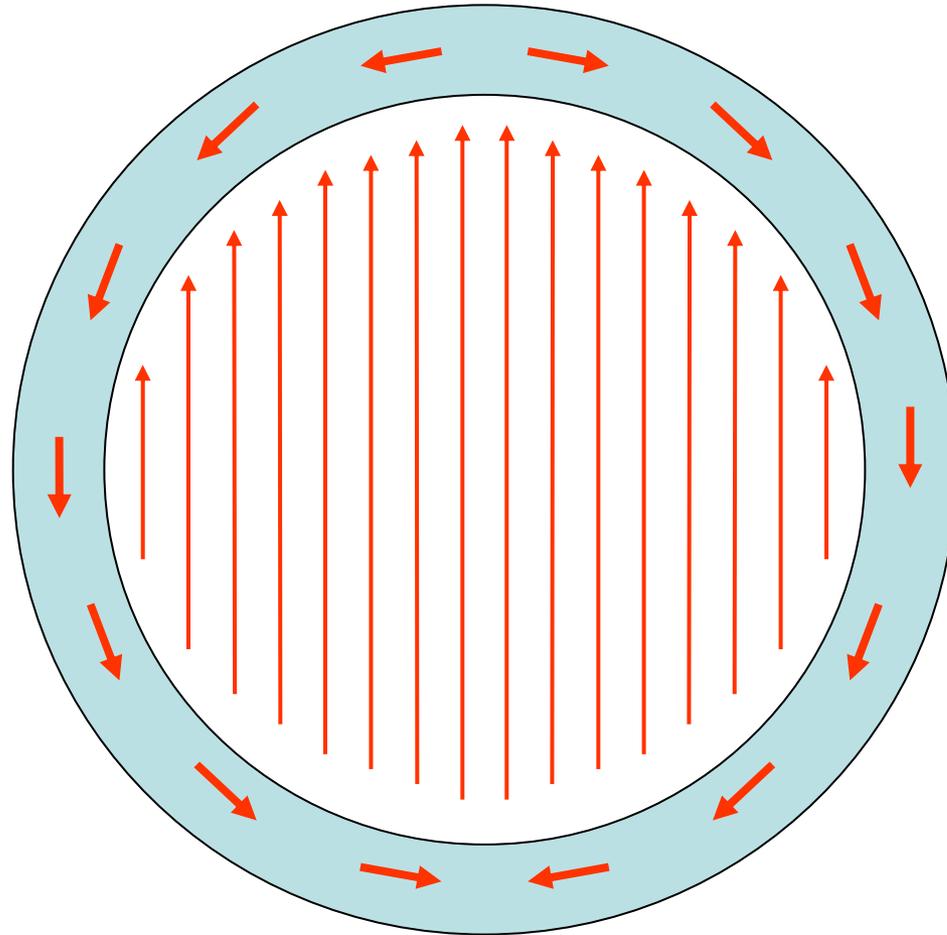
15. Moteur asynchrone

Champ tournant statorique



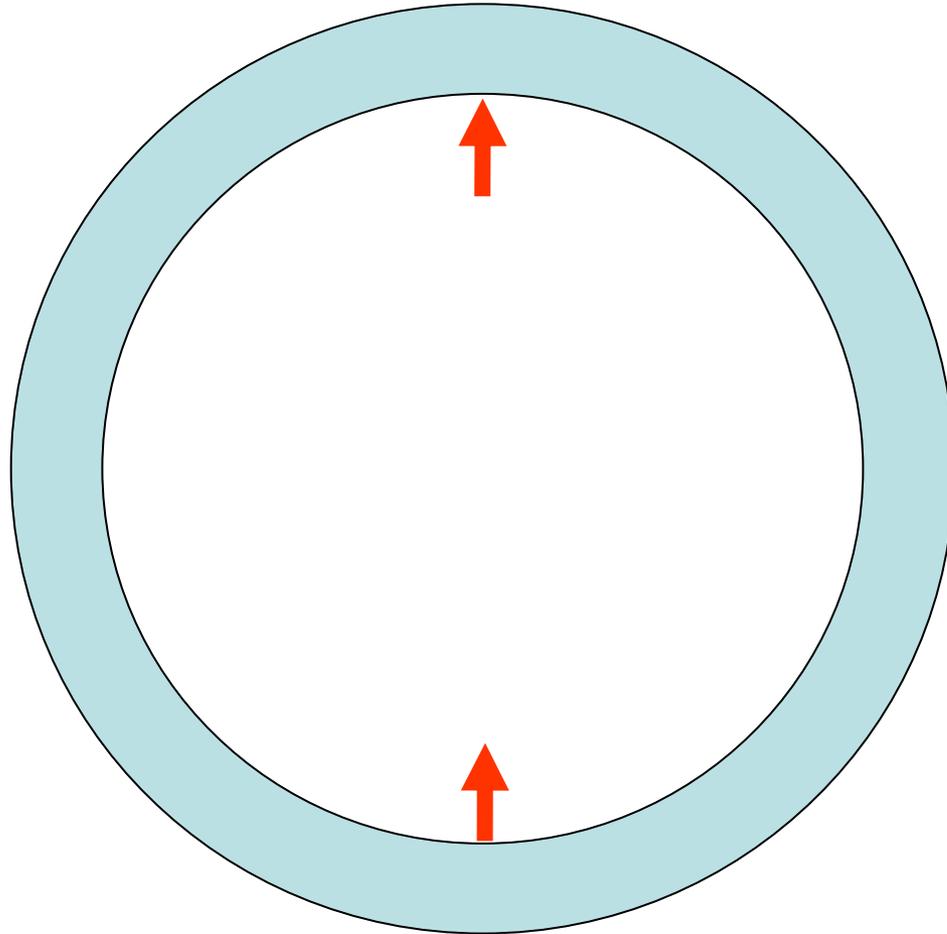
15. Moteur asynchrone

Champ tournant statorique



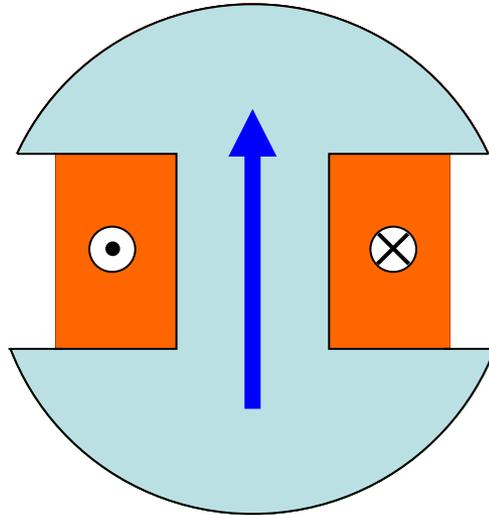
15. Moteur asynchrone

Champ tournant statorique



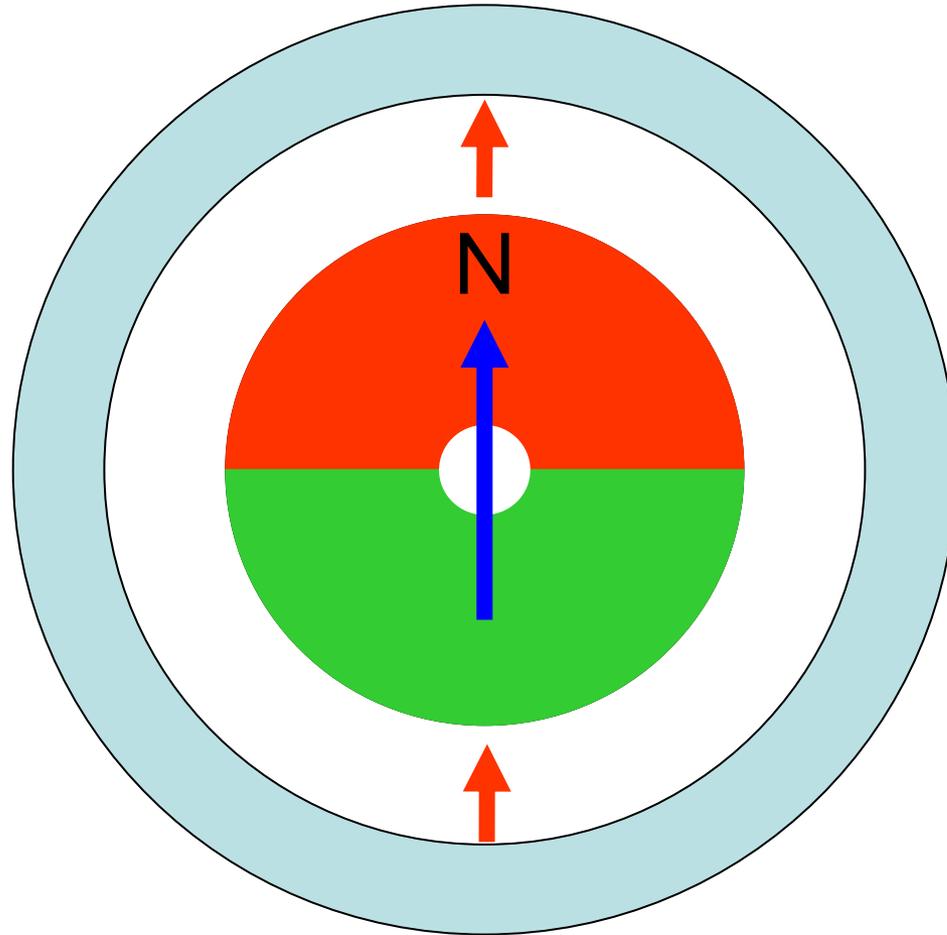
15. Moteur asynchrone

Rappel, moteur synchrone:
Champ rotorique



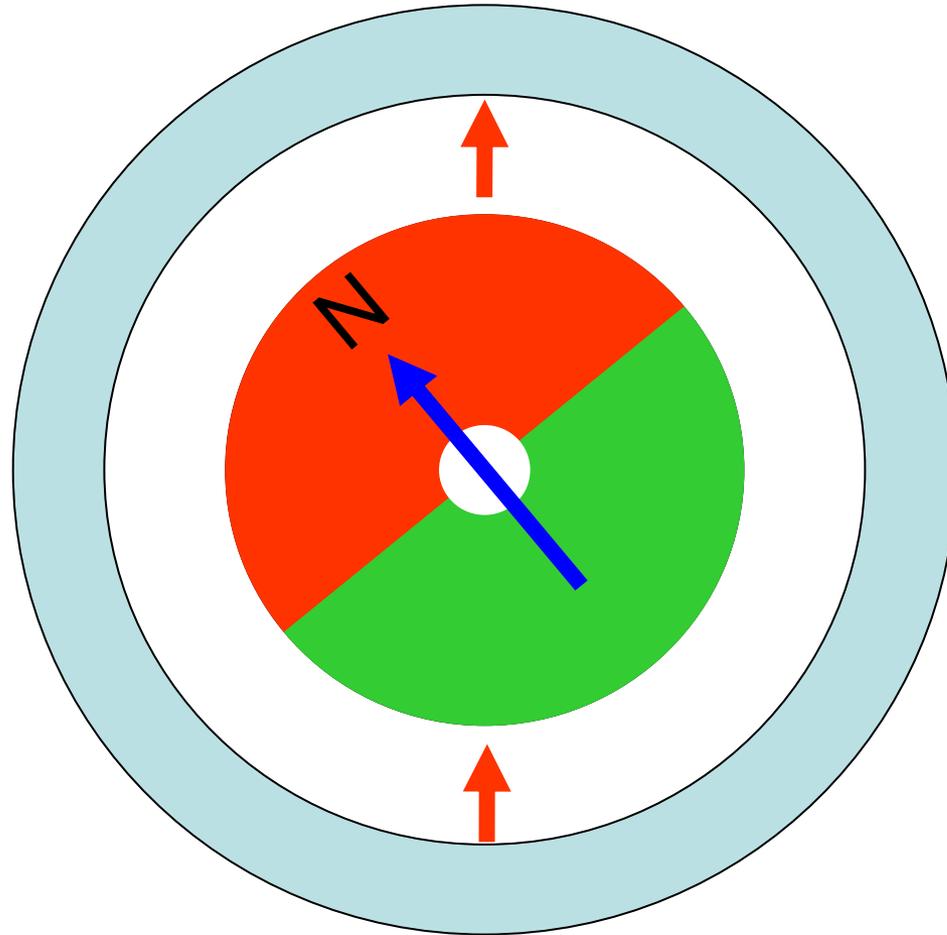
15. Moteur asynchrone

Moteur synchrone
Champs en phase: couple nul



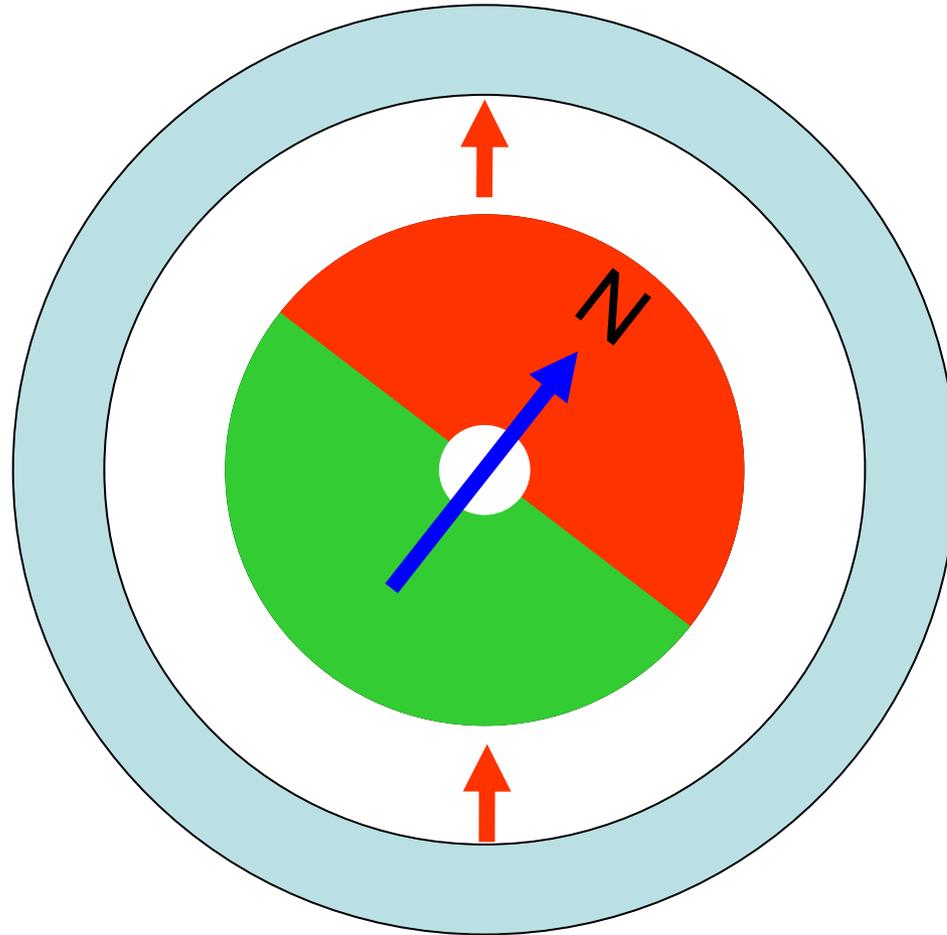
15. Moteur asynchrone

Moteur synchrone
Champs déphasés (moteur)



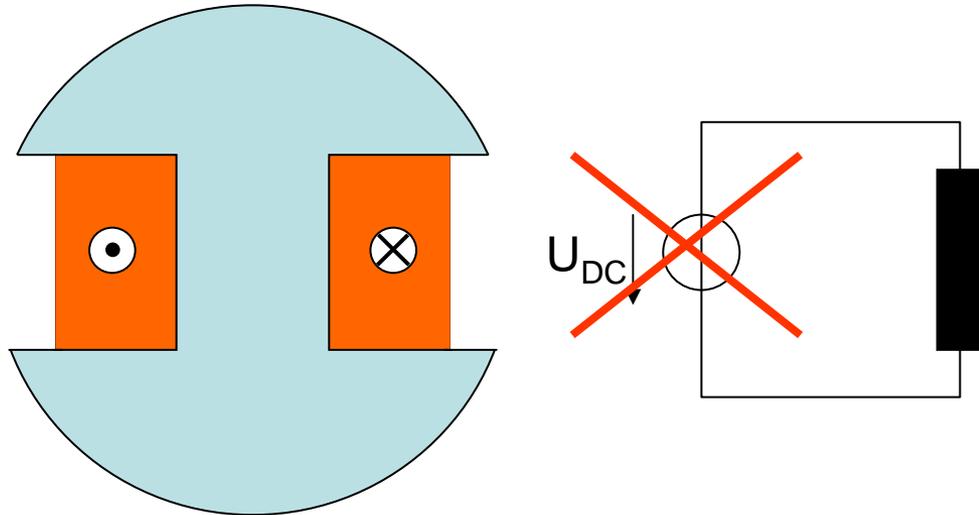
15. Moteur asynchrone

Moteur synchrone
Champs déphasés (génératrice)



15. Moteur asynchrone

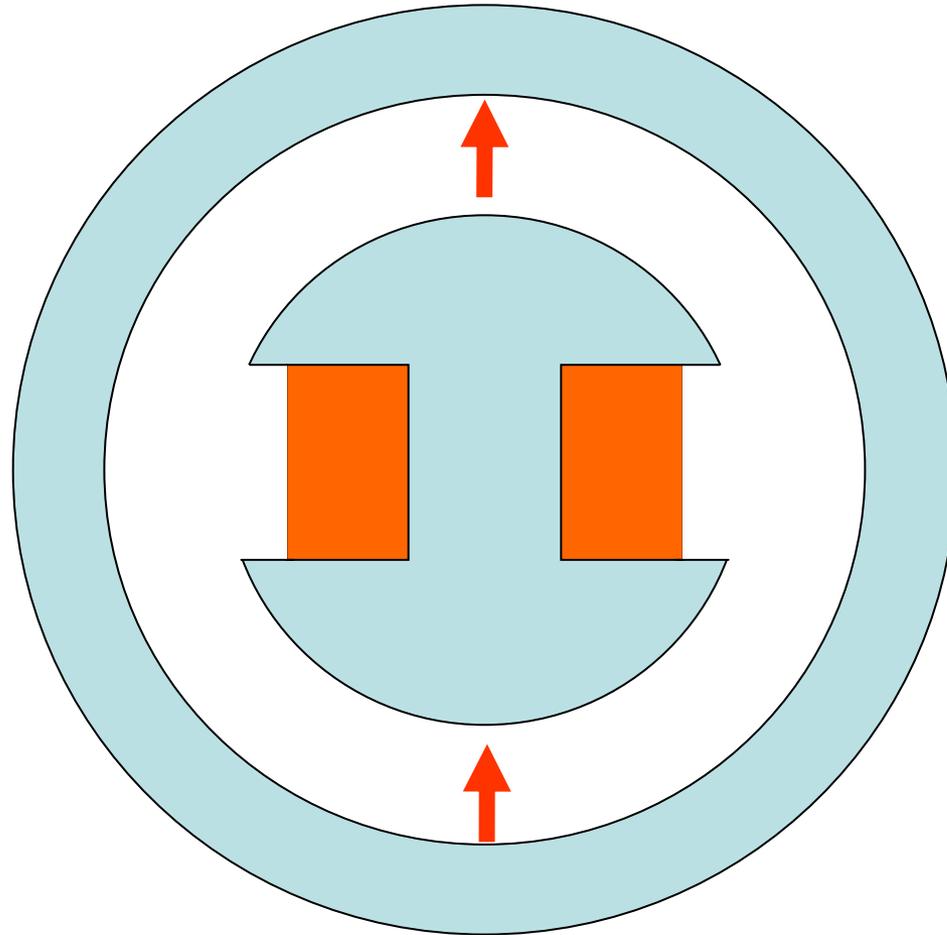
Moteur asynchrone: différence avec le moteur synchrone



Bobinage rotorique en court circuit

15. Moteur asynchrone

Le rotor ne tourne pas forcément à la même vitesse que le champ tournant

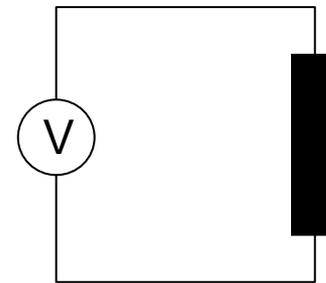
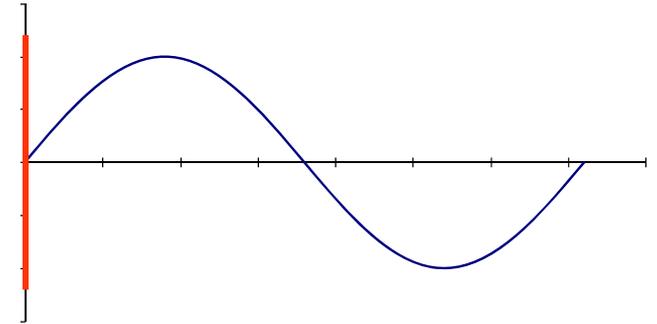
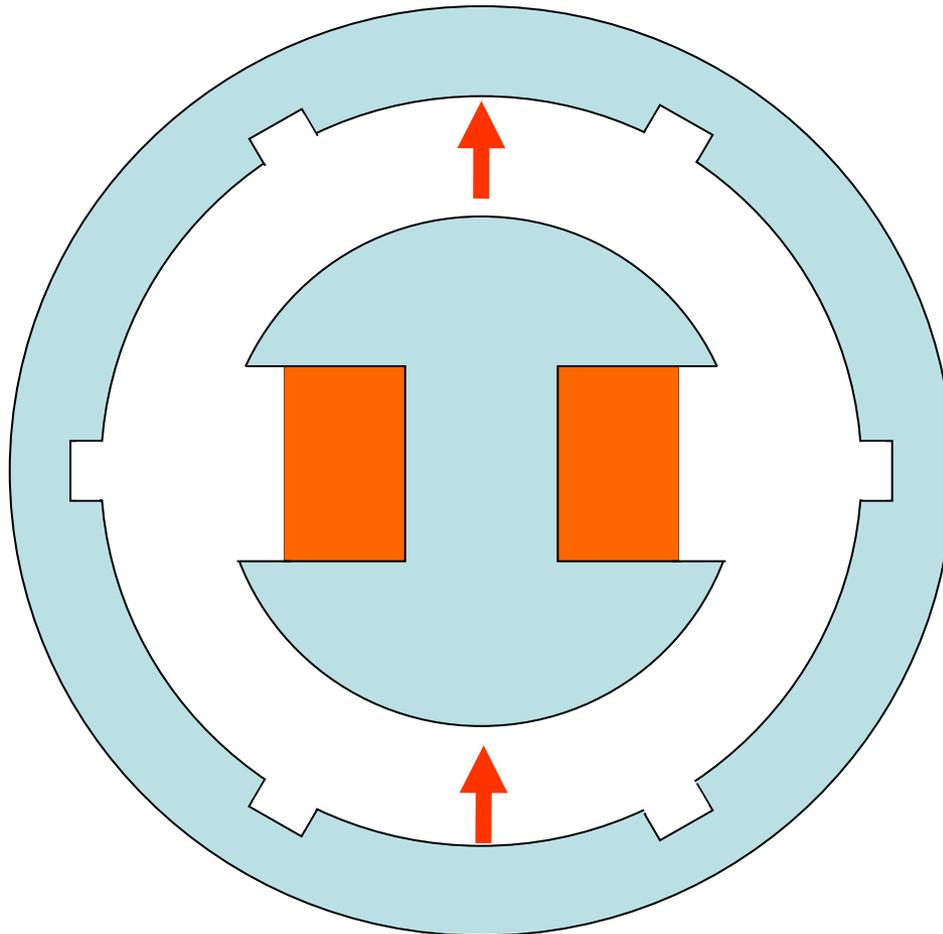


15. Moteur asynchrone

Changement de référentiel: référentiel rotorique

Cas 1:

le rotor est à l'arrêt

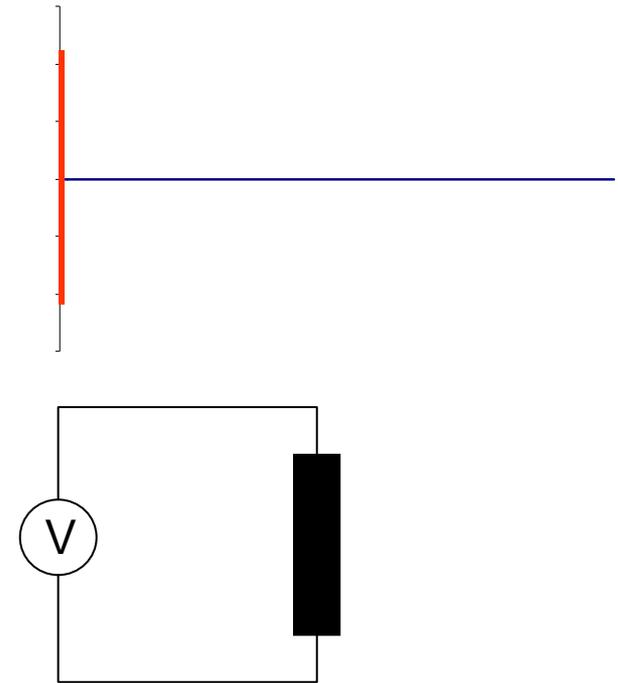
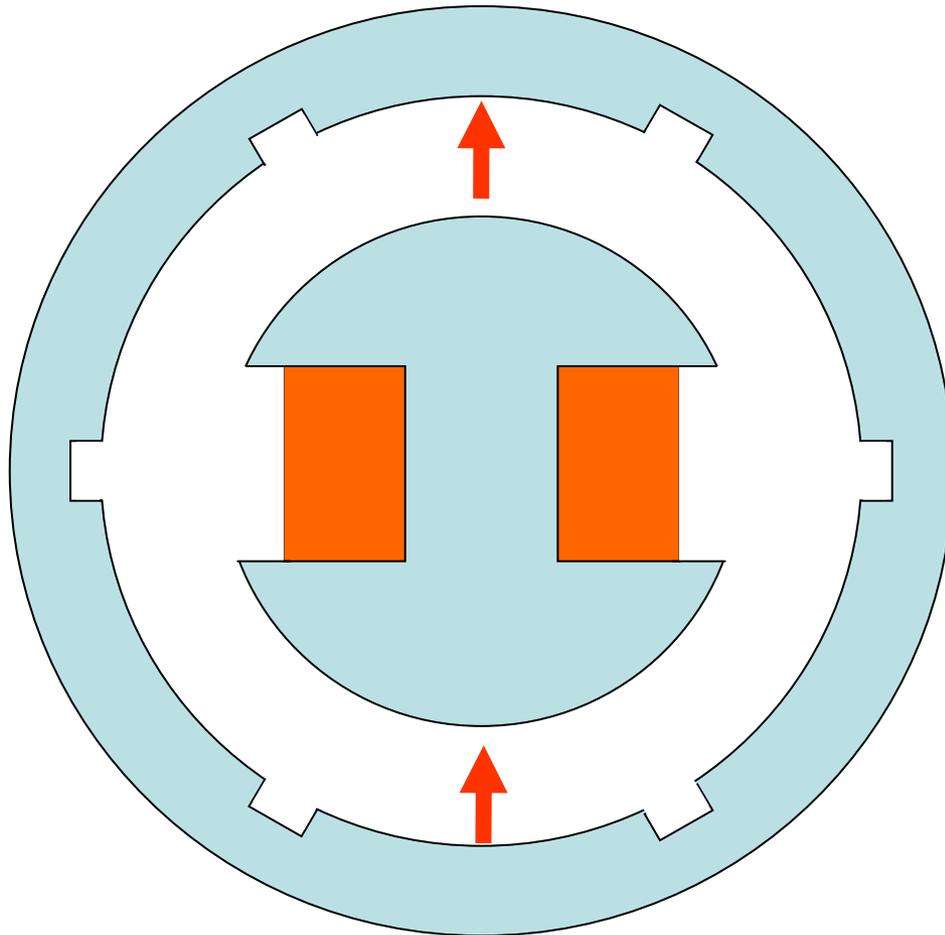


La bobine rotorique « voit » un flux alternatif de pulsation ω_s
=> tension induite de fréquence ω_s (cas bipolaire)

15. Moteur asynchrone

Référentiel rotorique

Cas 2: le rotor tourne à la vitesse du champ tournant

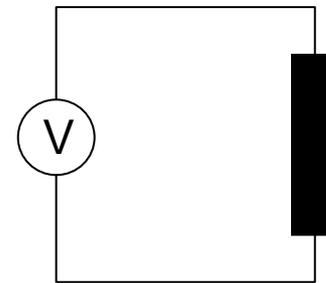
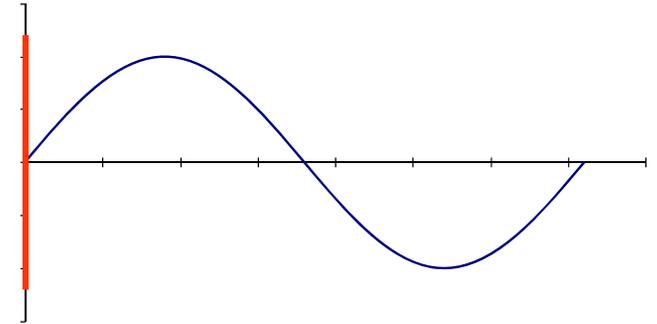
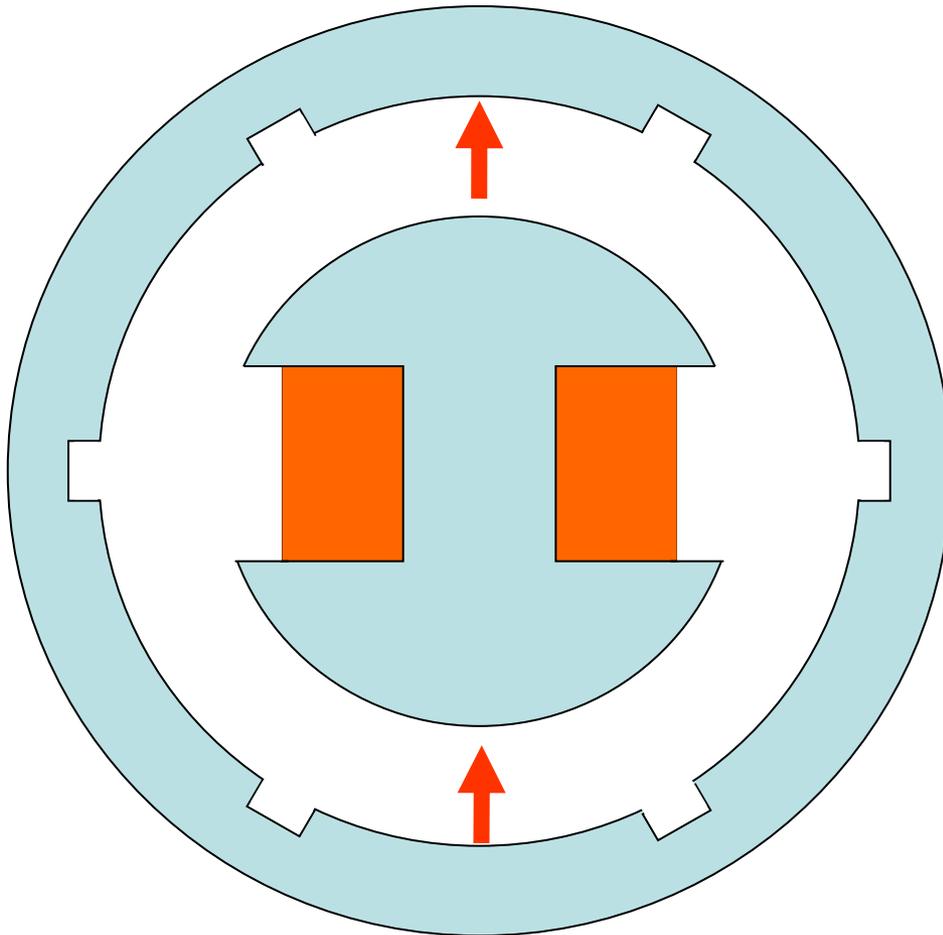


La bobine rotorique « voit » un flux continu => tension induite nulle

15. Moteur asynchrone

Référentiel rotorique

Cas 3: le rotor tourne à une vitesse différente Ω de celle du champ tournant

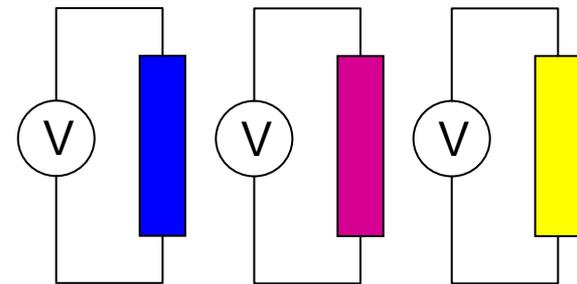
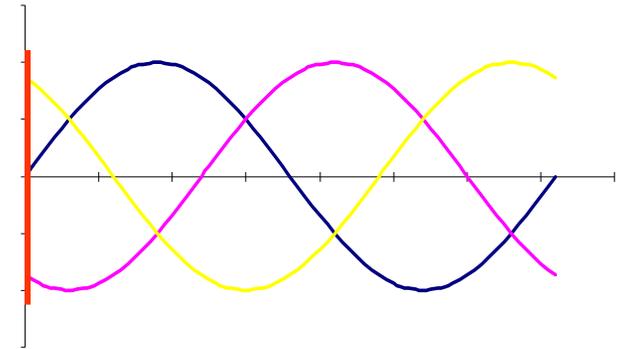
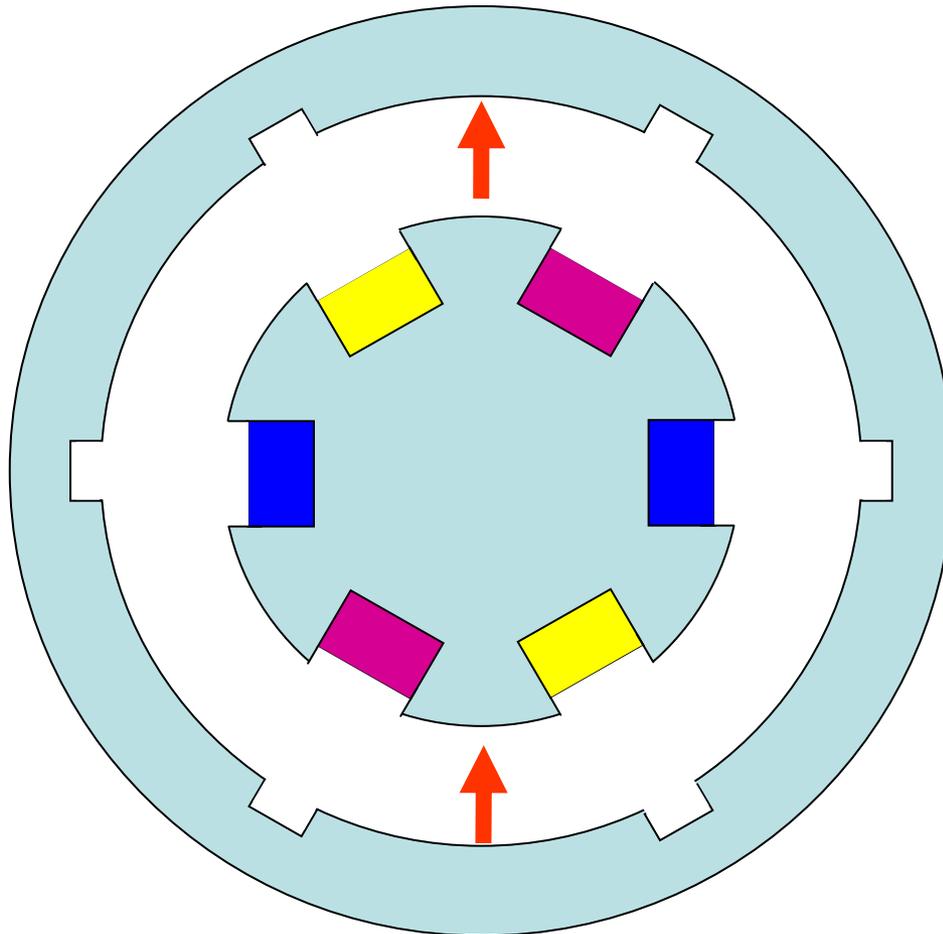


La bobine rotorique « voit » un flux alternatif de pulsation (pour $p=1$) $\omega_r = \omega_s - \Omega$

15. Moteur asynchrone

Référentiel rotorique, bobinage rotorique triphasé

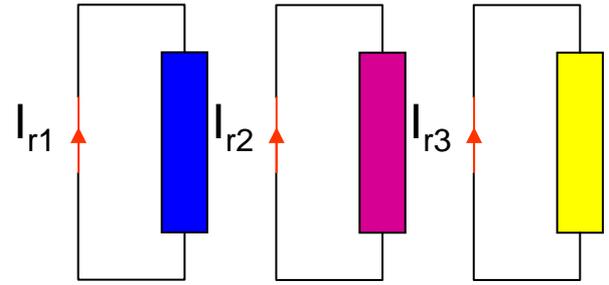
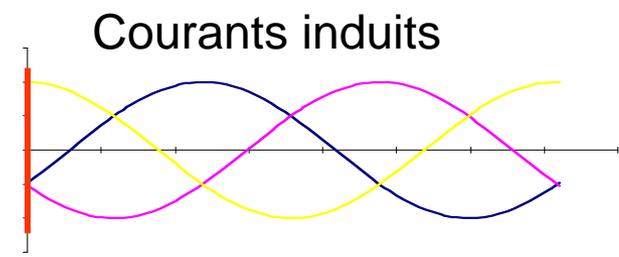
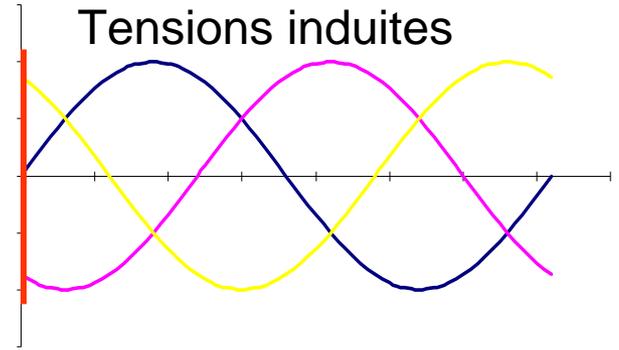
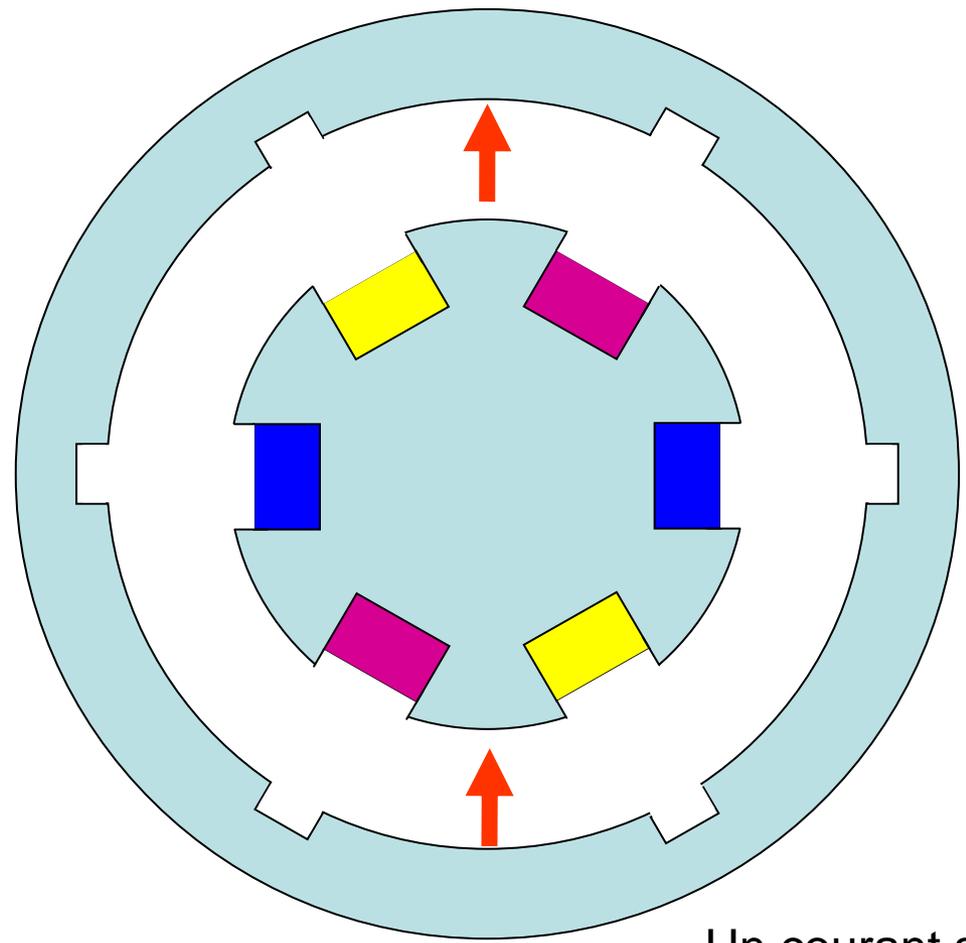
Cas 3: le rotor tourne à une vitesse différente Ω de celle du champ tournant



Les bobines rotoriques « voient » un flux alternatif de pulsation (pour $p=1$) $\omega_r = \omega_s - \Omega$

15. Moteur asynchrone

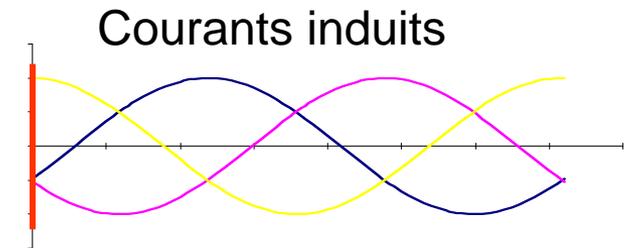
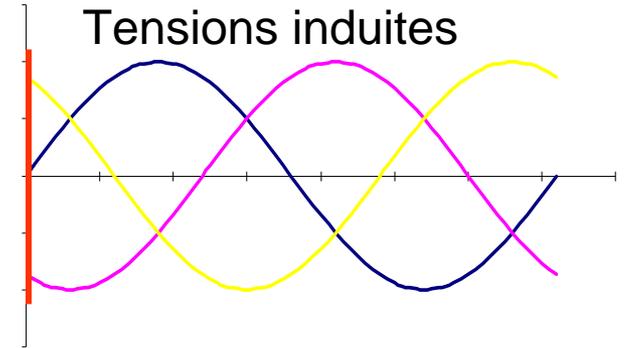
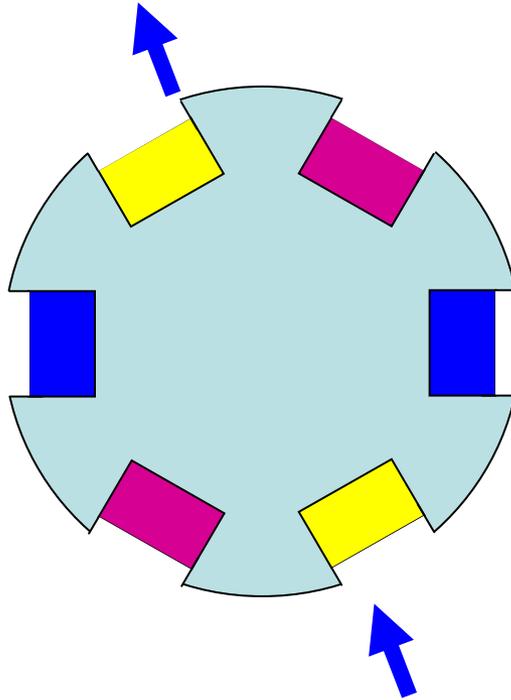
Référentiel rotorique, bobinage rotorique triphasé en court circuit



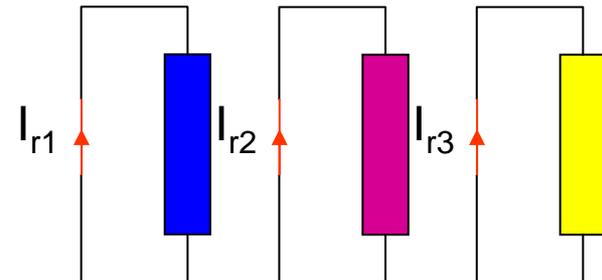
Un courant s'établi dans les phases rotoriques

15. Moteur asynchrone

Création d'un champ tournant rotorique

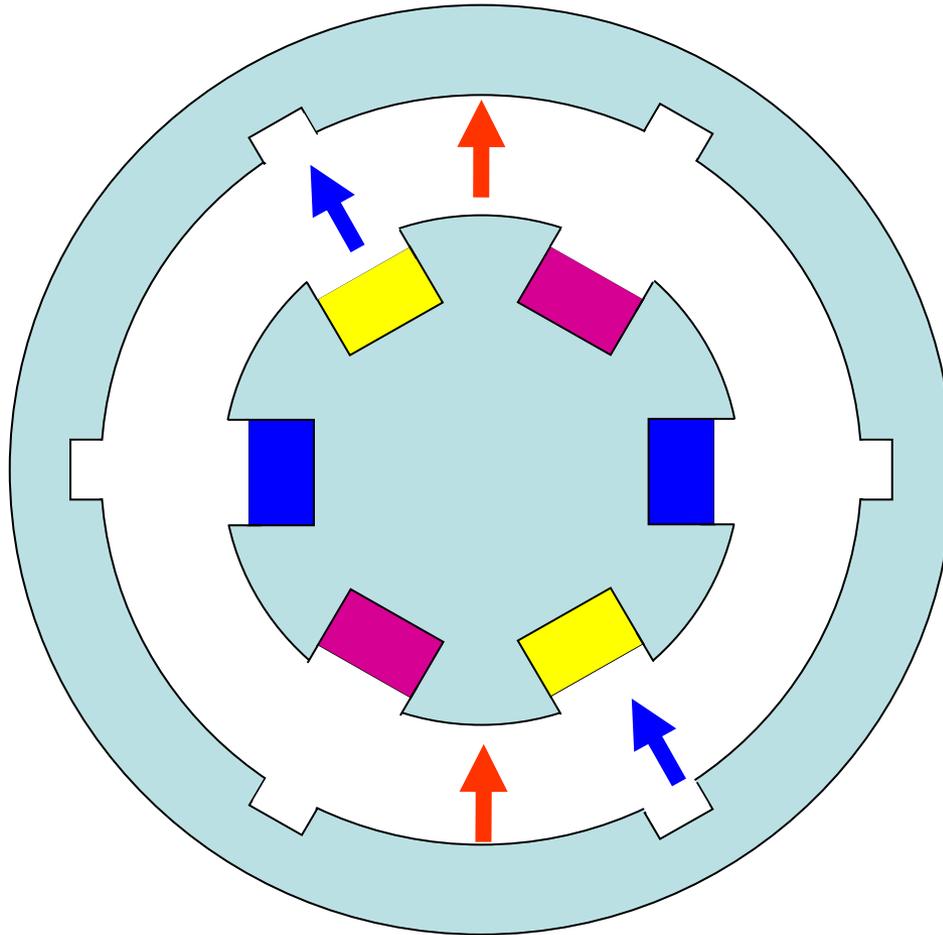


Les courants rotoriques induits par la différence de vitesse entre champ statorique et rotor créent à leur tour un champ tournant rotorique de vitesse égale à la pulsation rotorique (1 paire de pôles) $\Omega_r = \omega_r = \omega_s - \Omega$

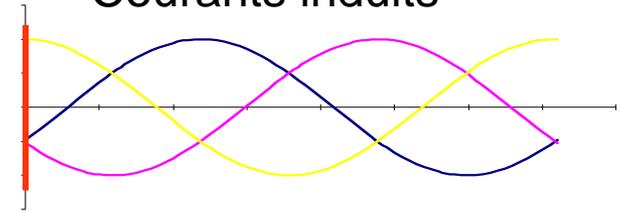


15. Moteur asynchrone

Référentiel rotorique, Interaction entre les champs tournants



Courants induits



Vitesse du champ tournant dans le référentiel rotorique ($p=1$):

$$\Omega_r = \omega_r = \omega_s - \Omega$$

Vitesse du rotor: Ω

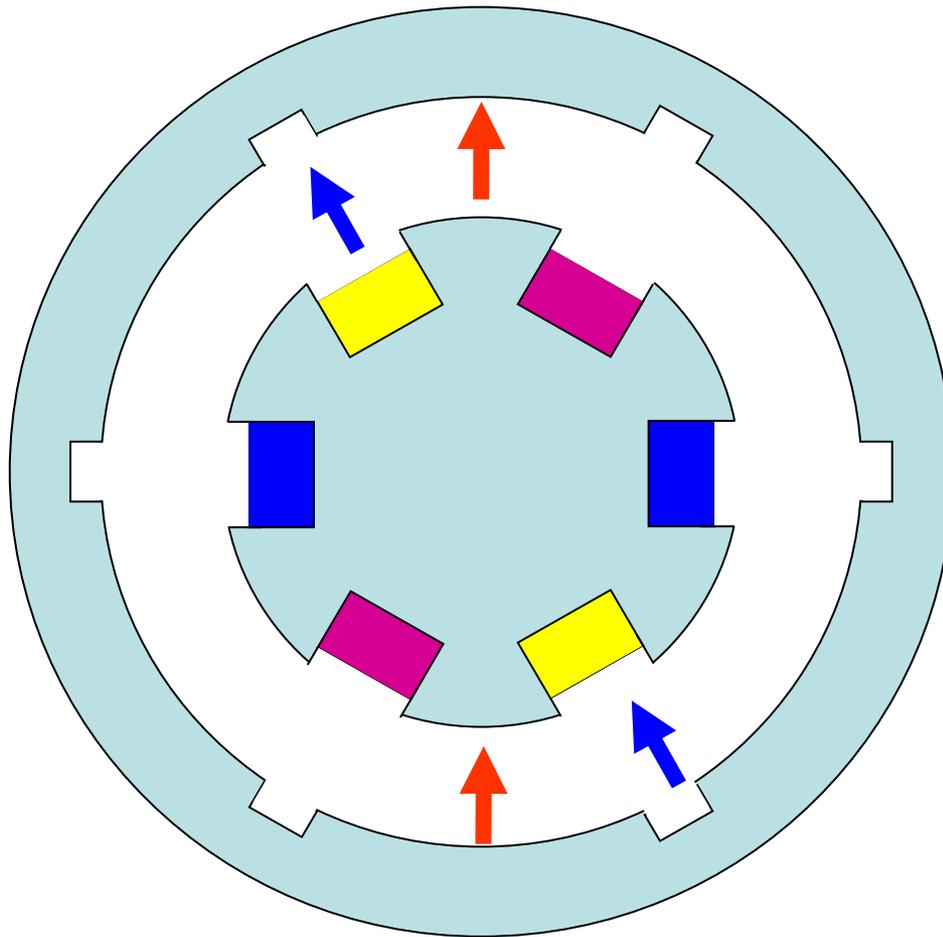
Vitesse du champ tournant dans le référentiel statorique:

$$\Omega_{rs} = \Omega_r + \Omega = \omega_s$$

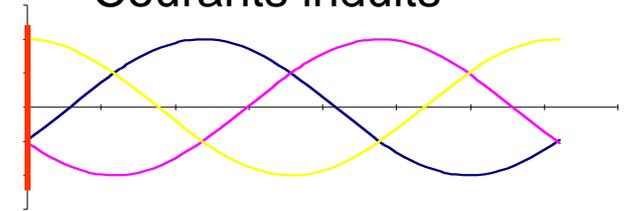
Les champs tournant statorique et rotorique tournent à la même vitesse, ils sont synchrones.

15. Moteur asynchrone

Référentiel statorique, interaction entre les champs tournants



Courants induits



Les champs tournant statorique et rotorique tournent à la même vitesse, ils sont synchrones.

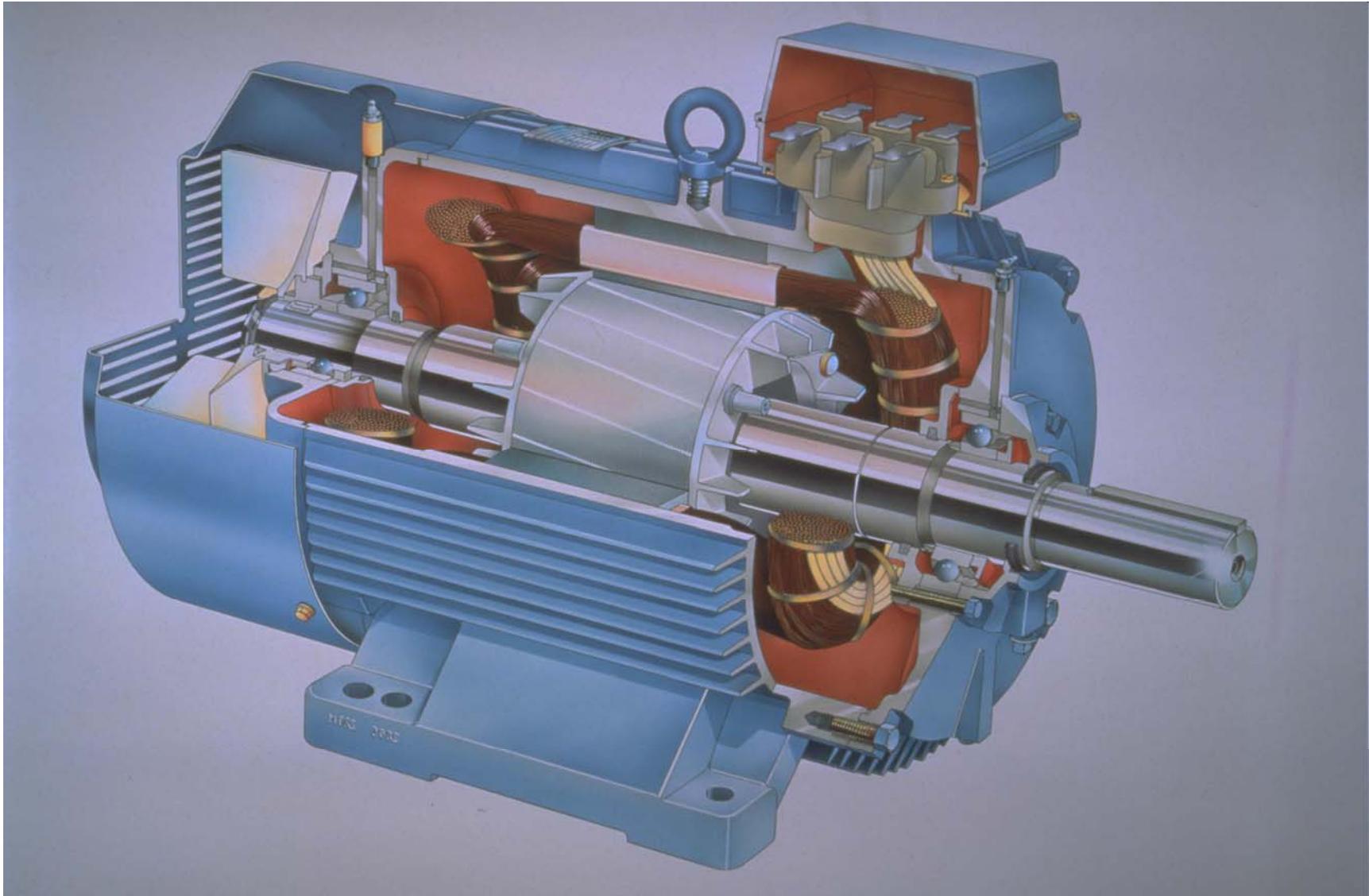
15. Moteur asynchrone

Principe de fonctionnement (cas général $p \geq 1$)

- Le stator crée un champ tournant de vitesse angulaire:
 $\Omega_p = \omega_s / p$ (vitesse synchrone)
- Si la vitesse du rotor Ω est différente de la vitesse synchrone, une tension est induite dans les bobines du rotor
- La pulsation de cette tension induite est:
 $\omega_r = \omega_s - p\Omega$
- Cette tension induite va générer des courants rotoriques de même pulsation.
- Ces courants génèrent à leur tour un champ tournant rotorique synchrone (même vitesse) avec le champ statorique.
- Le couple est dû à l'interaction de ces deux champs tournant

15. Moteur asynchrone

Exemple de réalisation



15. Moteur asynchrone

Rotors



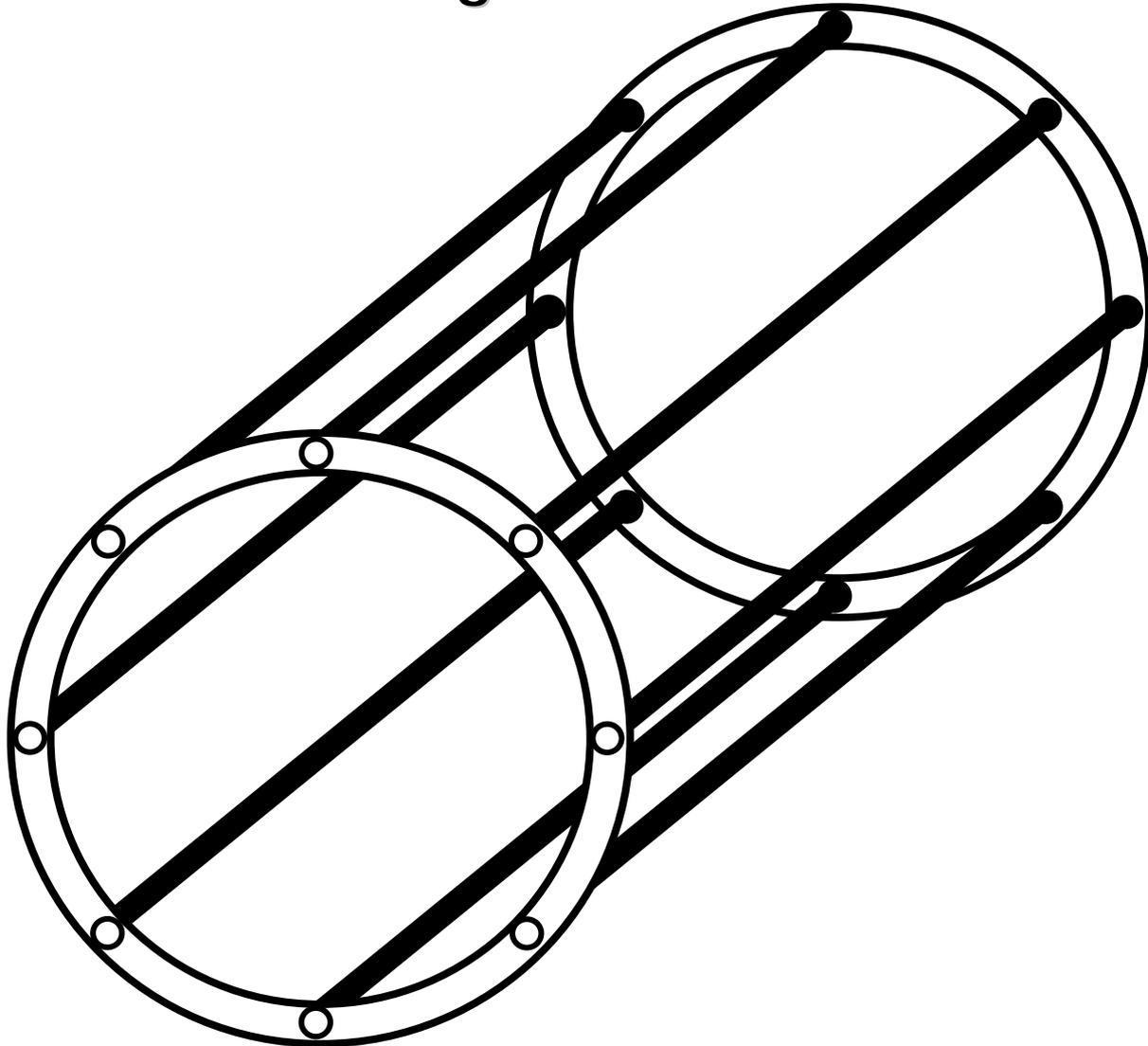
Rotor bobiné



Rotor à cage d'écureuil

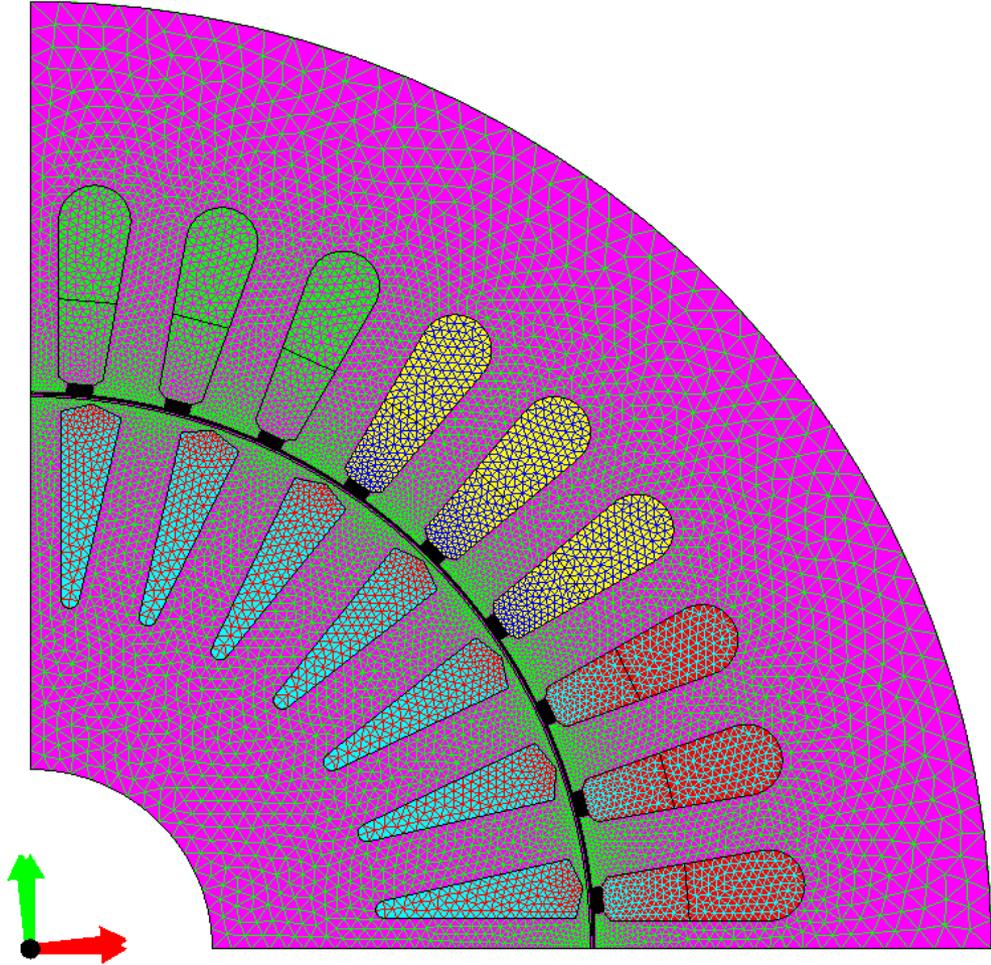
15. Moteur asynchrone

Rotor d'un moteur à cage



15. Moteur asynchrone

Coupe



15. Moteur asynchrone

Glissement

Définition:

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

$$s=0 \Rightarrow \Omega = \Omega_s$$

$$s=1 \Rightarrow \Omega = 0$$

15. Moteur asynchrone

Référentiels

Stator:

$$B = \hat{B} \cos\left(\omega t - \frac{\pi y}{\tau}\right)$$

Rotor:

$$y' = y - vt$$

v = vitesse tangentielle rotorique

$$v = \frac{p \Omega \tau}{\pi}$$

$$y = y' + \frac{p \Omega \tau}{\pi} t$$

$$B_r = \hat{B} \cos\left(\omega t - \frac{\pi y'}{\tau} - p \Omega t\right)$$

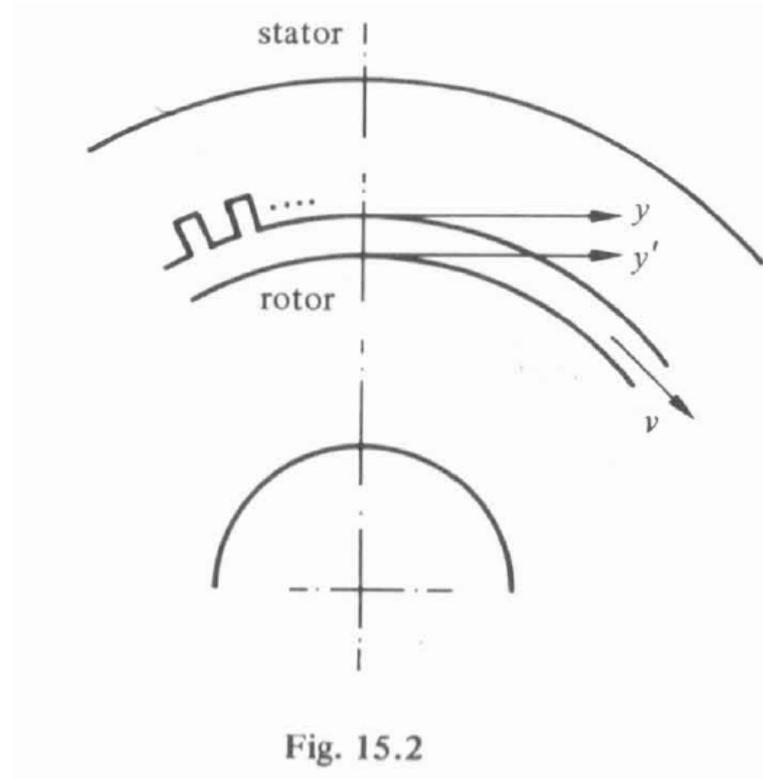
avec:

$$\Omega = (1 - s)\Omega_s$$

$$p \Omega = (1 - s)\omega$$

$$B_r = \hat{B} \cos\left(\underline{s\omega t} - \frac{\pi y'}{\tau}\right)$$

B_r fonction de ωt



$$\left. \begin{aligned} i_r &= \hat{I}_r \sin(s\omega t + \beta) \\ \underline{i}_r &= \hat{I}_r e^{j(s\omega t + \beta)} \\ i_r &= \text{Im}(\underline{i}_r) \end{aligned} \right\}$$

15. Moteur asynchrone

Tension induite, bobinages équivalents

Au stator:

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\Psi_s}{dt}$$

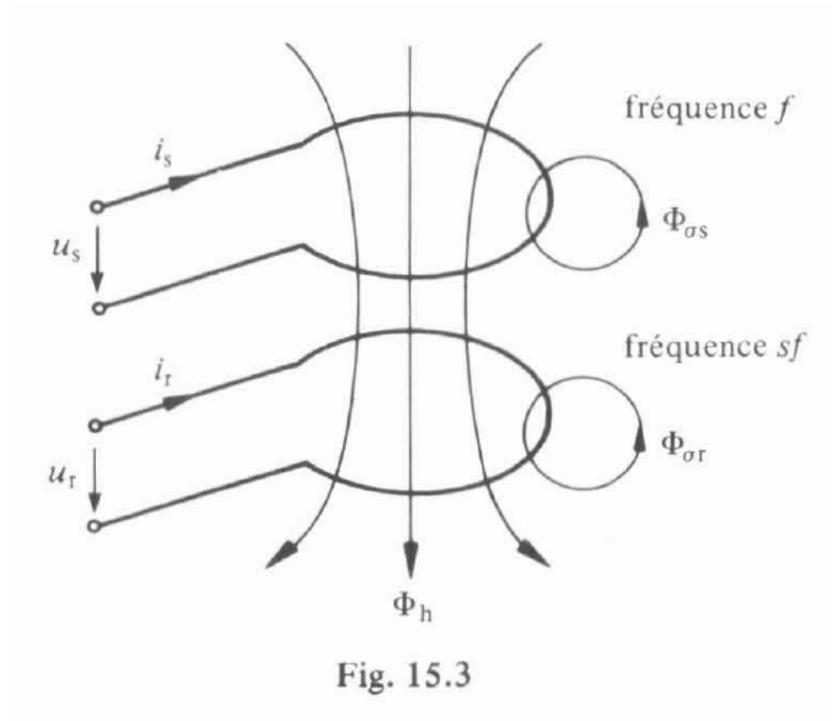
$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega \underline{\Psi}_s$$

$$\underline{\Psi}_s = L_s \underline{I}_s + L_{sr} \underline{I}_r$$

$$L_s = L_{\sigma s} + L_{hs}$$

Attention: I_r est dans le référentiel du stator

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega L_{\sigma s} \underline{I}_s + j\omega L_{hs} \underline{I}_s + j\omega L_{sr} \underline{I}_r$$



15. Moteur asynchrone

Tension induite, bobinages équivalents

Au rotor (pulsation rotorique):

$$\underline{U}_r = R_r \underline{I}_r + \frac{d\underline{\Psi}_r}{dt} = R_r \underline{I}_r + \underline{j s \omega \Psi}_r$$

$$\underline{\Psi}_r = L_r \underline{I}_r + L_{sr} \underline{I}_s$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_{hr}$$

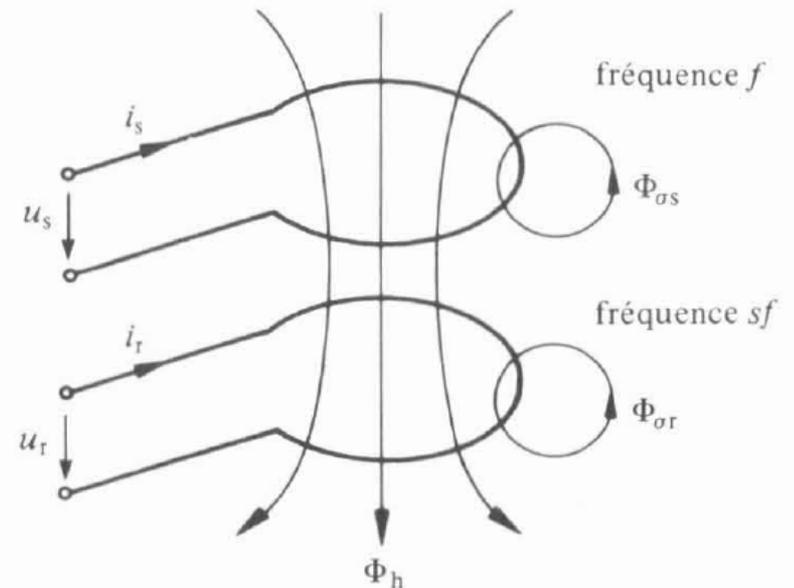


Fig. 15.3

$$\underline{U}_r = R_r \underline{I}_r + j s \omega L_{\sigma r} \underline{I}_r + j s \omega L_{hr} \underline{I}_r + j s \omega L_{sr} \underline{I}_s$$

Dans le référentiel du stator, toutes ces grandeurs ont une pulsation ω

15. Moteur asynchrone

Grandeurs rapportées

$$L_{\sigma s} = N_s^2 \Lambda_{\sigma s}$$

$$L_{\sigma r} = N_r^2 \Lambda_{\sigma r}$$

$$\left. \begin{aligned} L_{hs} &= N_s^2 \Lambda_h \\ L_{hr} &= N_r^2 \Lambda_h \end{aligned} \right\}$$

$$L_{sr} = N_s N_r \Lambda_h$$

$$\omega L_{\sigma s} = X_{\sigma s} ; \quad \omega L_{hs} = X_h ; \quad \omega L_{\sigma r} = X_{\sigma r}$$

Grandeurs rotoriques rapportées au stator:

$$\underline{U}'_r = \underline{U}_r \frac{N_s}{N_r}$$

$$\underline{I}'_r = \underline{I}_r \frac{N_r}{N_s}$$

$$\underline{Z}'_r = \underline{Z}_r \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2$$

15. Moteur asynchrone

Equations caractéristiques, schéma équivalent

Stator:

$$\underline{U}_s = \underline{R}_s \underline{I}_s + jX_{\sigma s} \underline{I}_s + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r)$$

Rotor:

$$\frac{\underline{U}'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{\sigma r} \underline{I}'_r + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_s &= \underline{R}_s \underline{I}_s + jX_{\sigma s} \underline{I}_s + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \\ 0 &= \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{\sigma r} \underline{I}'_r + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \end{aligned} \right\}$$

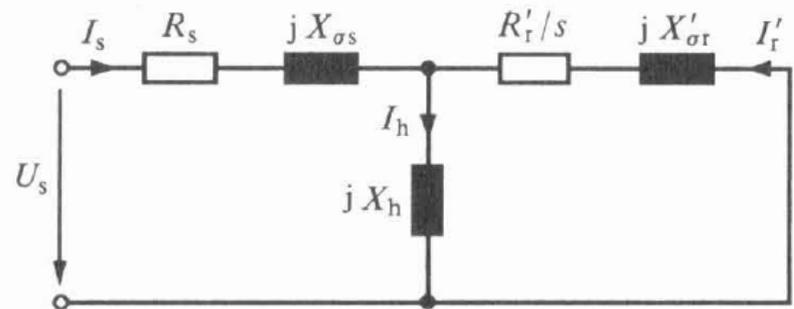


Fig. 15.4

15. Moteur asynchrone

Bilan énergétique

$$\left. \begin{aligned}
 \text{Pertes Joule au stator} &= 3R_s I_s^2 = P_{Js} \\
 \text{Pertes Joule au rotor} &= 3R_r' I_r'^2 = P_{Jr} \\
 \text{Puissance rotorique totale} &= 3R_r' I_r'^2 / s
 \end{aligned} \right\}$$

$$P_{mec} = 3R_r' I_r'^2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) = 3R_r' I_r'^2 \frac{1-s}{s}$$

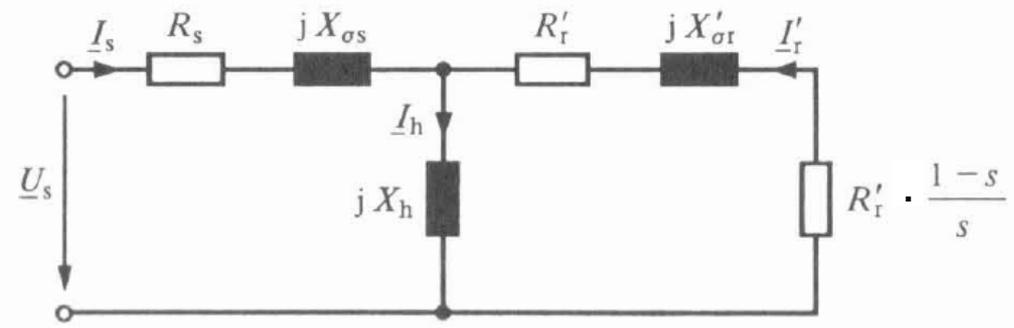
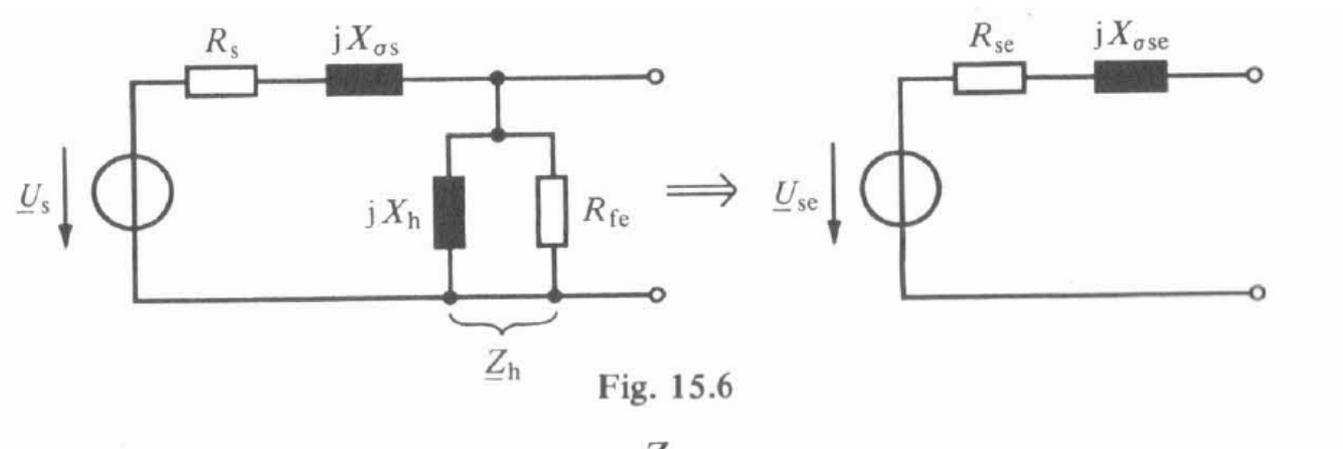


Fig. 15.5

$$\begin{aligned}
 M &= P_{mec} / \Omega \\
 \Omega &= (1-s) \Omega_s \text{ par (15.1)} \\
 M &= \frac{3R_r' I_r'^2}{s \Omega_s} = \frac{P_{Jr}}{s \Omega_s}
 \end{aligned}$$

15. Moteur asynchrone

Equivalent de Thévenin



$$\underline{U}_{se} = \underline{U}_0 = \underline{U}_s \frac{\underline{Z}_h}{R_s + jX_{\sigma s} + \underline{Z}_h} = \underline{\sigma}_s \underline{U}_s$$

avec

$$\underline{\sigma}_s = \frac{\underline{Z}_h}{R_s + jX_{\sigma s} + \underline{Z}_h} \quad |\underline{\sigma}_s| < 1$$

$$\underline{I}_{cc} = \frac{\underline{U}_s}{R_s + jX_{\sigma s}}$$

15. Moteur asynchrone

Schéma équivalent de Thévenin

Impédance éq. équivalente:

$$\underline{Z}_i = \frac{\underline{U}_0}{I_{cc}} = \underline{\sigma}_s (R_s + jX_{os}) = R'_s + jX'_{os} = R_{se} + jX_{ose}$$

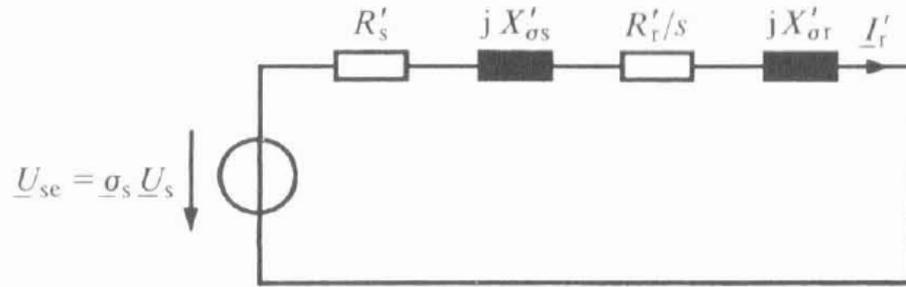


Fig. 15.7

avec:

$$\underline{\sigma}_s = \frac{\underline{Z}_h}{R_s + jX_{os} + \underline{Z}_h}$$

15. Moteur asynchrone

Expression du couple

$$M = \frac{3R_r' I_r'^2}{s\Omega_s}$$

$$I_r' = \frac{\sigma_s U_s}{\sqrt{(R_s' + R_r'/s)^2 + (X_{\sigma s}' + X_{\sigma r}')^2}}$$

On pose:

$$X_{\sigma s}' + X_{\sigma r}' = X_{cc}$$

$$M = \frac{3R_r' \sigma_s^2 U_s^2}{[(R_s' + R_r'/s)^2 + X_{cc}^2] s\Omega_s}$$

avec:

$$\underline{\sigma}_s = \frac{\underline{Z}_h}{R_s + jX_{\sigma s} + \underline{Z}_h}$$

15. Moteur asynchrone

Analyse du couple

Petits glissements (Ω proche de Ω_s):

$$\left. \begin{aligned} R'_r/s &\gg R'_s \\ (R'_r/s)^2 &\gg X_{cc}^2 \end{aligned} \right\}$$

$$M = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2}{R'_r \Omega_s} s \quad \text{pour } s \rightarrow 0$$

Grands glissements (démarrage, freinage):

$$\frac{R'_r}{s}, R'_s \ll X_{cc}$$

pas valable pour de petits moteurs $P_{mec} < 100W$

$$M = \frac{3R'_r \sigma_s^2 U_s^2}{X_{cc}^2 \Omega_s} \cdot \frac{1}{s} \quad \text{pour } s \rightarrow \infty$$

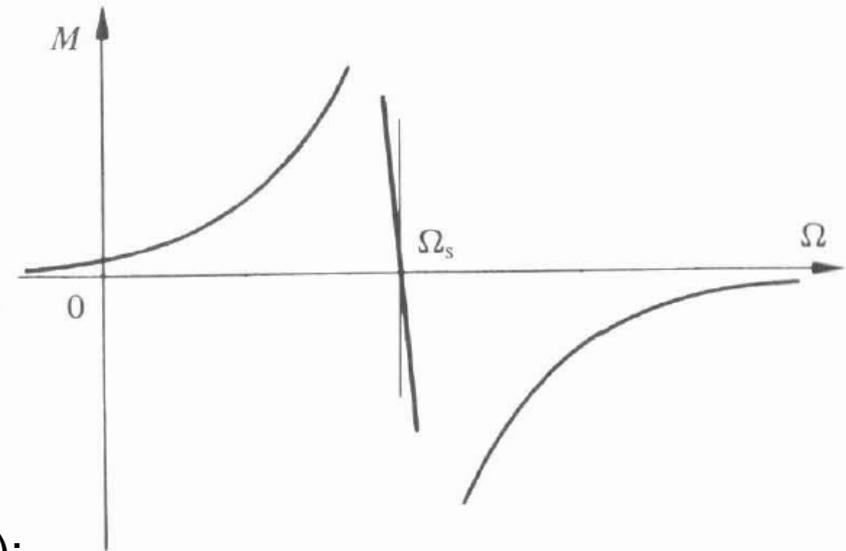


Fig. 15.8

15. Moteur asynchrone

Extrema du couple

$$\frac{dM}{ds} = 0$$

$$R_s'^2 + X_{cc}^2 - \frac{R_r'^2}{s^2} = 0$$

$$s_K = \frac{\pm R_r'}{\sqrt{R_s'^2 + X_{cc}^2}}$$

glissement pour le *couple maximum*

Pour un grand moteur ($P_{mec} > 1\text{kW}$) : $R_s^2 \ll X_{cc}^2$

$$\left. \begin{aligned} s_K &= \pm \frac{R_r'}{X_{cc}} \\ M_K &= \pm \frac{3\sigma_s^2 U_s^2}{2\Omega_s X_{cc}} \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2R_r' X_{cc}}{s[(R_s' + R_r'/s)^2 + X_{cc}^2]}$$

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{s/s_K + s_K/s}$$

15. Moteur asynchrone

Caractéristique de couple

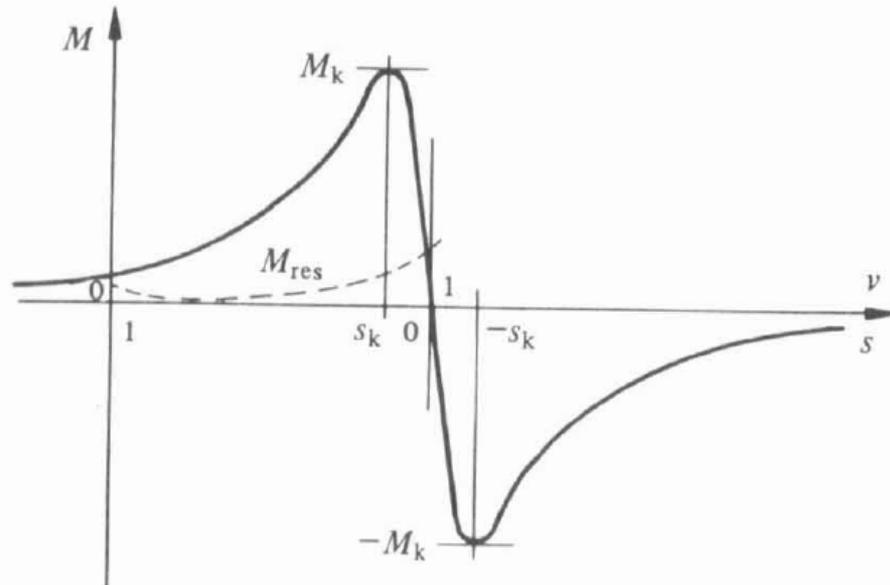


Fig. 15.9

15. Moteur asynchrone

Récapitulation

Inductances:

$$L_{\sigma s} = N_s^2 \Lambda_{\sigma s}$$

$$L_{\sigma r} = N_r^2 \Lambda_{\sigma r}$$

$$L_{hs} = N_s^2 \Lambda_h$$

$$L_{hr} = N_r^2 \Lambda_h$$

$$L_{sr} = N_s N_r \Lambda_h$$

Réactances:

$$\omega L_{\sigma s} = X_{\sigma s}$$

$$\omega L_{hs} = X_h$$

$$\omega L_{\sigma r} = X_{\sigma r}$$

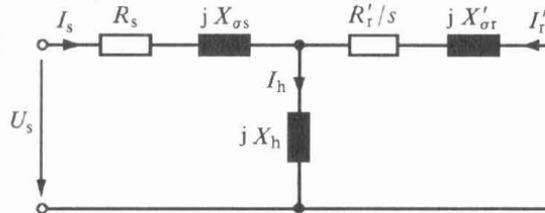


Fig. 15.4

Grandeurs rapportées ($\underline{Z}'_r = R'_r + jX'_r$):

$$\underline{Z}'_r = \underline{Z}_r \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2$$

Thévenin:

$$\underline{\sigma}_s (R_s + jX_{\sigma s}) = R'_h + jX'_{\sigma h}$$

$$\underline{\sigma}_s = \frac{\underline{Z}_h}{R_s + jX_{\sigma s} + \underline{Z}_h}$$

Expression du couple (cas général):

$$M = \frac{3R'_r \sigma_s^2 U_s^2}{[(R'_s + R'_r/s)^2 + X_{cc}^2] s \Omega_s}$$

avec:

$$X'_{\sigma s} + X'_{\sigma r} = X_{cc}$$

Glissement au couple max:

$$s_K = \frac{\pm R'_r}{\sqrt{R'^2_s + X_{cc}^2}}$$

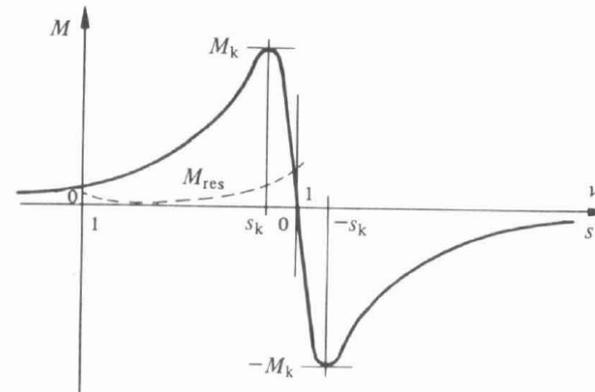


Fig. 15.9

15. Moteur asynchrone

Exemple

Un moteur asynchrone est tel que selon le schéma transformé de Thévenin, on a:

$$X'_{\sigma s} = X'_{\sigma r} \quad R'_s = R'_r = 1/4 X'_{\sigma r}$$

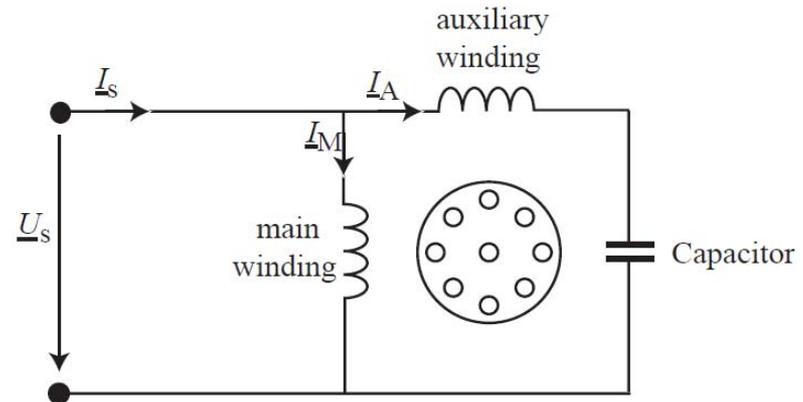
Déterminer les couples de démarrage et de décrochage à une tension réduite égale à 70% de la tension nominale sachant que le couple nominal vaut 620Nm à $s=3\%$

15. Moteur asynchrone

Moteur biphasé

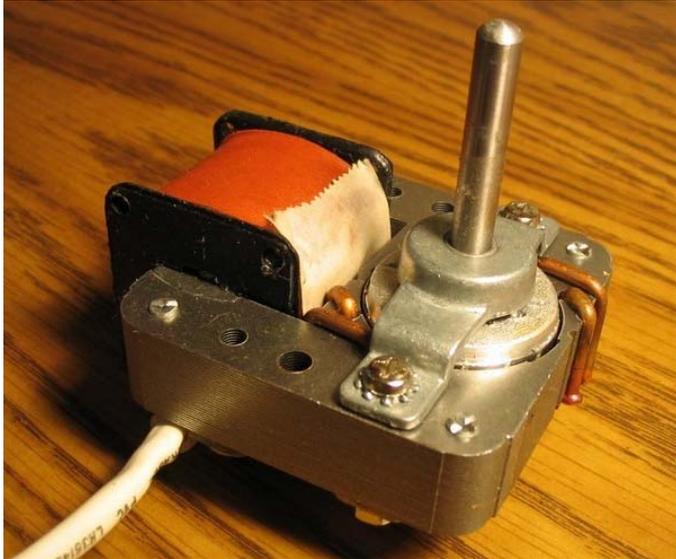


Exemple: pompe de chauffage

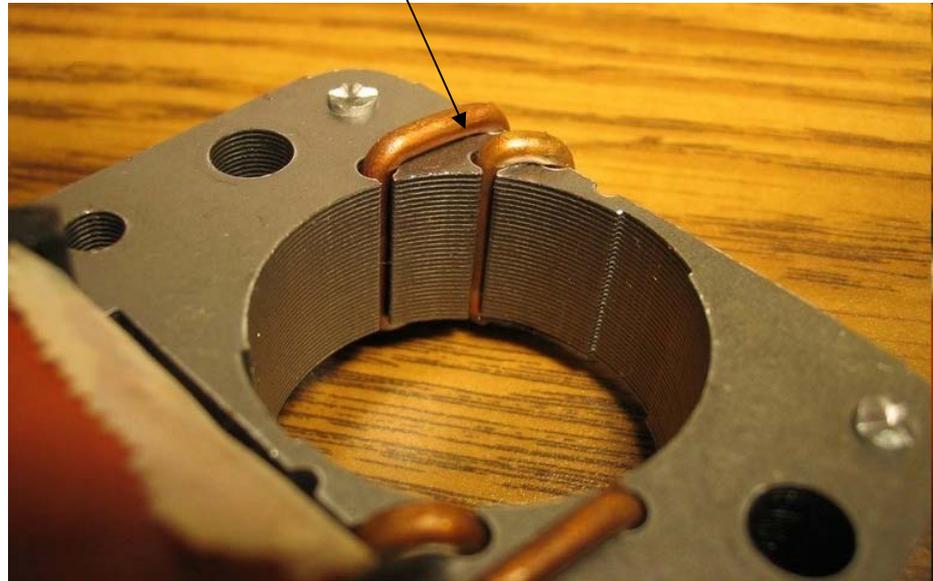


15. Moteur asynchrone

Moteur asynchrone monophasé



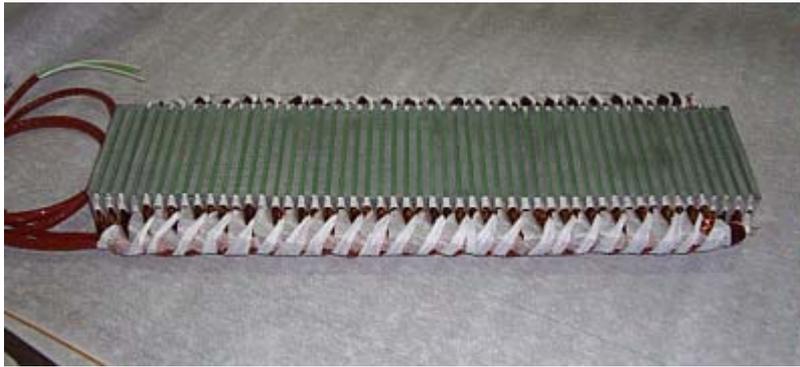
Spires de Frager



Moteurs de petite puissance
électroménager

15. Moteur asynchrone

Moteurs linéaires



15. Moteur asynchrone

Moteur de train Bombardier

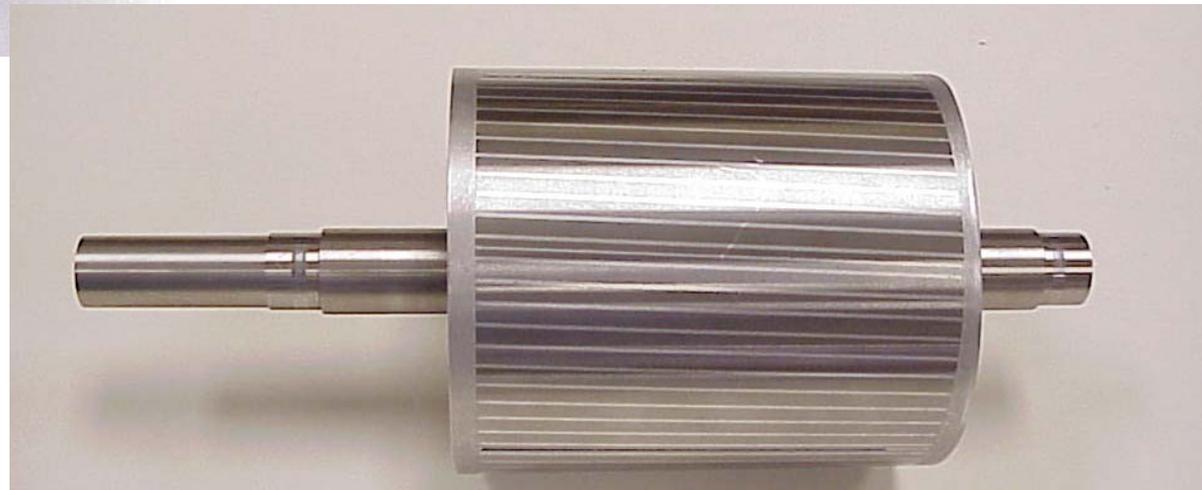
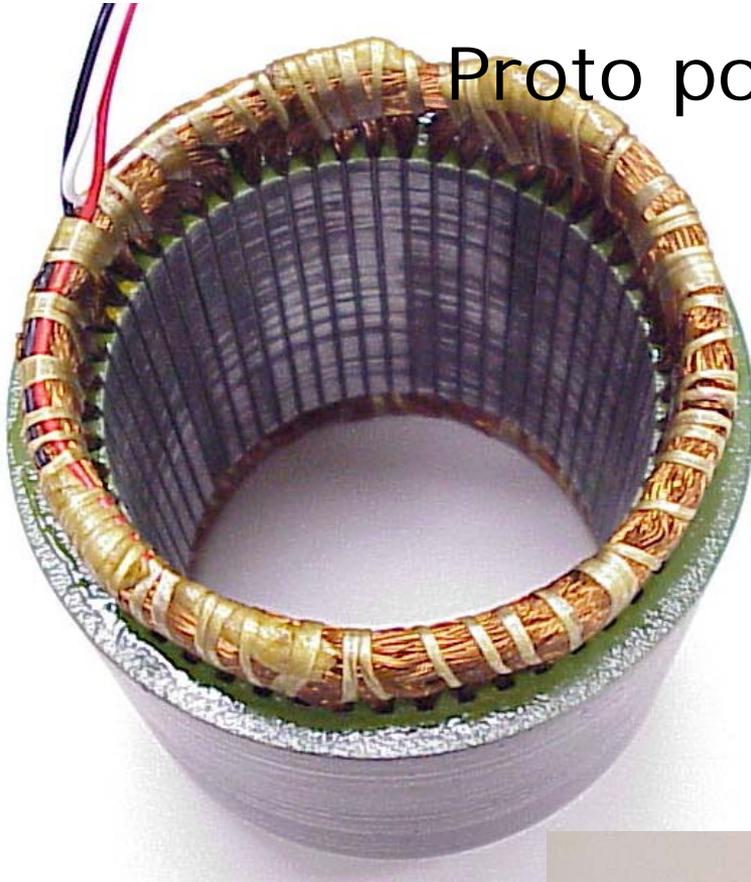


Applications du moteur asynchrone

- Solutions économiques et robustes pour des applications:
 - Traction électrique
 - Machines-outils
 - Pompes
 - Ventilateurs,...

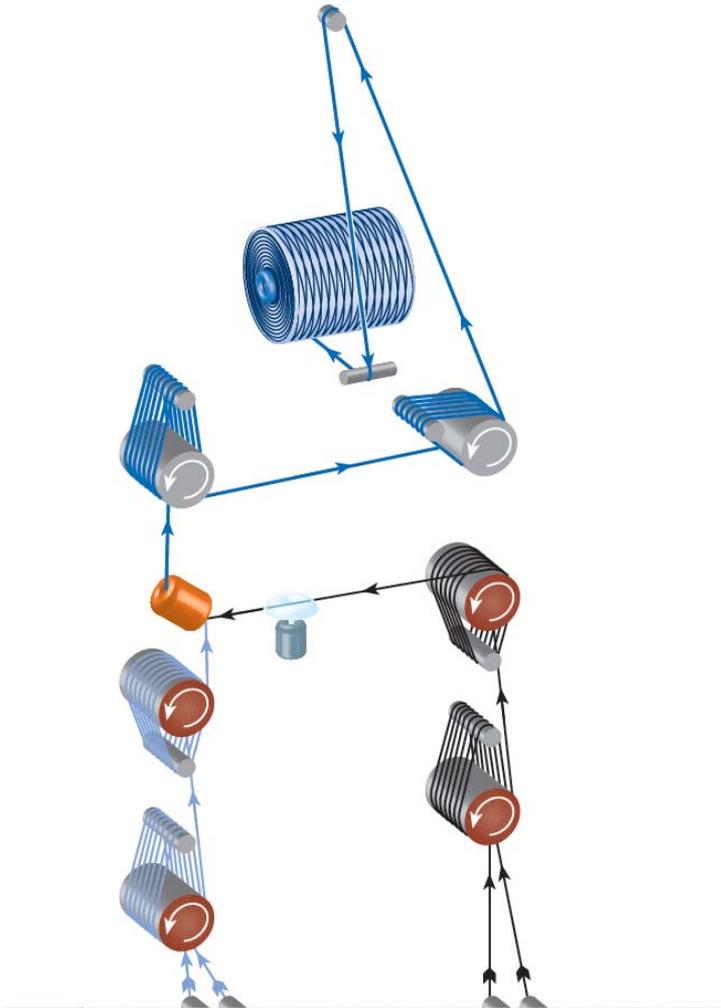
15. Moteur asynchrone

Proto pompe hydraulique avion



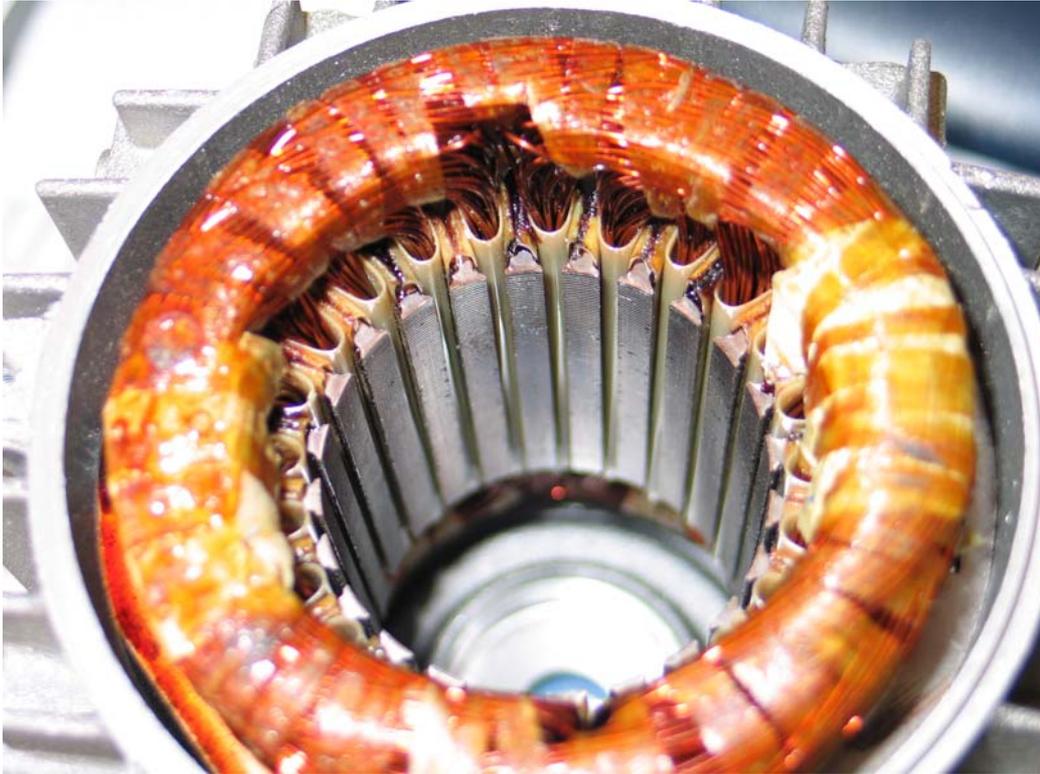
15. Moteur asynchrone

Machine textile



15. Moteur asynchrone

Solution asynchrone



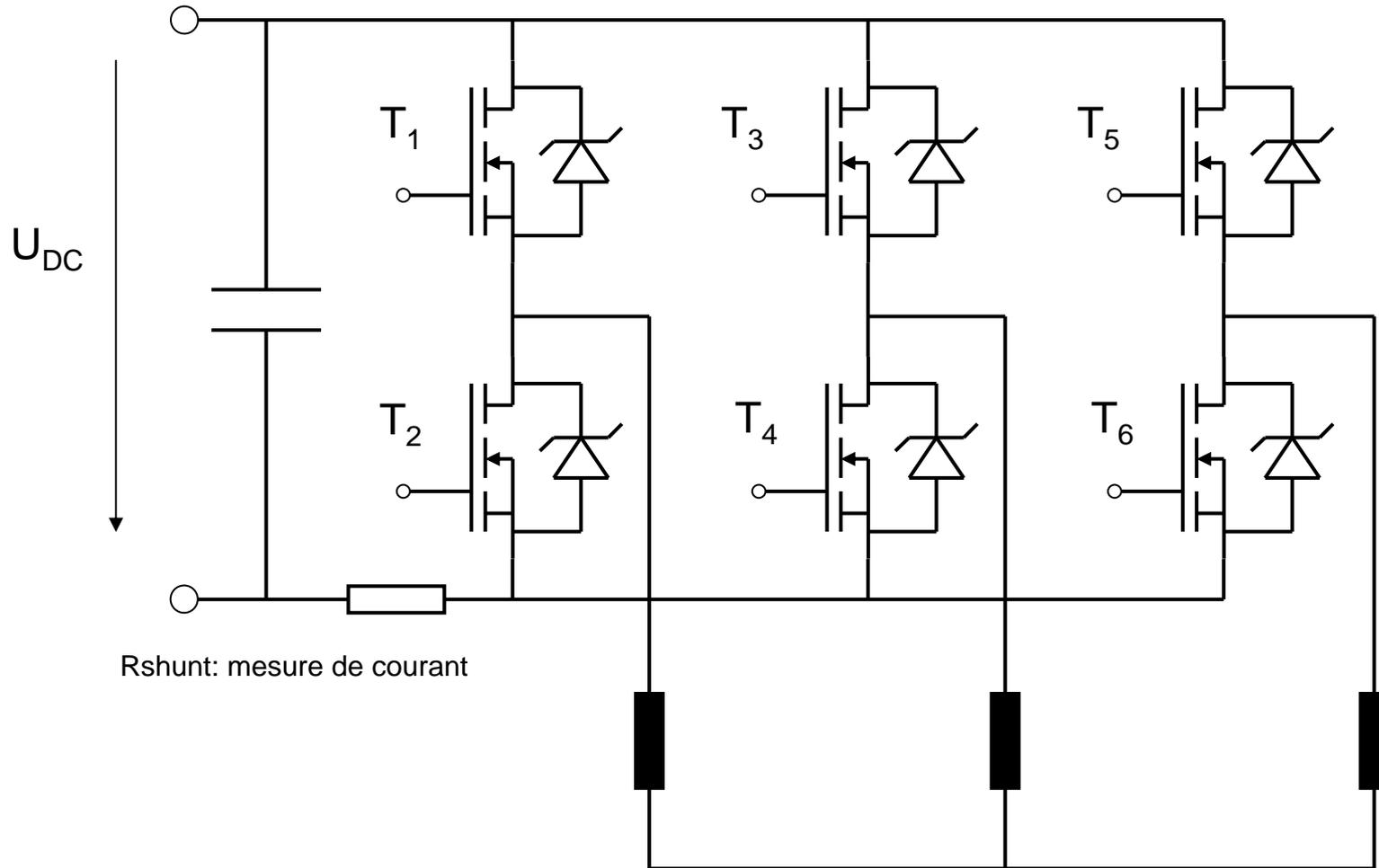
Puissance 370W

Vitesse max 6000 t/min



15. Moteur asynchrone

Commande électronique



15. Moteur asynchrone

Commande électronique

Plusieurs possibilités:

- Commande fréquence/tension
- Contrôle vectoriel
- Direct torque control

15. Moteur asynchrone

Relation tension-fréquence

$$M_K = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2}{2\Omega_s X_{cc}} \quad (\text{grand moteur})$$

En calculant le rapport des couples pour 2 fréquences f et f'

$$\frac{M'_K}{M_K} = \frac{(\sigma' U'_s / \sigma U_s)^2}{(\Omega'_s X'_{cc} / \Omega_s X_{cc})}$$

$$\sigma'_s \cong \sigma_s$$

$$\frac{X'_{cc}}{X_{cc}} = \frac{f'}{f}$$

$$\Omega'_s / \Omega_s = f' / f$$

On veut conserver le même couple $\Rightarrow \frac{M'_K}{M_K} = 1$

$$\frac{U'_s}{U_s} = \frac{f'}{f}$$

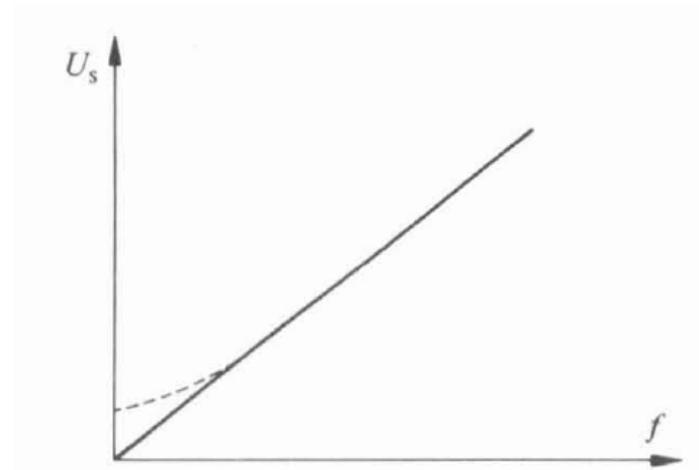


Fig. 15.26

15. Moteur asynchrone

Effet sur la caractéristique de couple

Dans la zone linéaire:

$$M = \frac{3\sigma_s^2 U_s^2}{R_r' \Omega_s} s$$

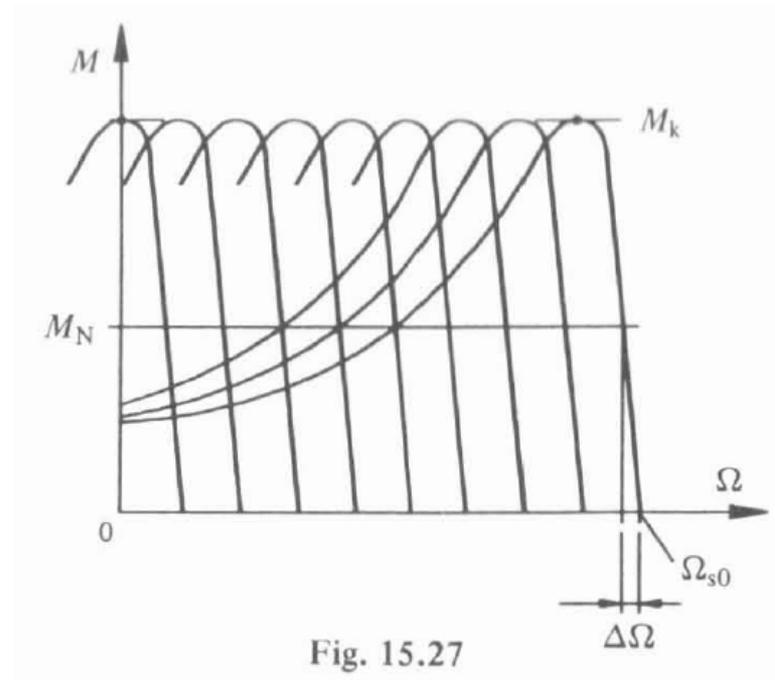
$$s = \frac{(\Omega_s - \Omega_r)}{\Omega_s} = \frac{\Delta\Omega}{\Omega_s}$$

Pour un même couple

$$\frac{M'}{M} = 1 = \frac{(U_s'/U_s)^2}{(\Omega_s'/\Omega_s)^2} \cdot \frac{\Delta\Omega'}{\Delta\Omega}$$

Donc:

$$\Delta\Omega' = \Delta\Omega$$



La pente de la caractéristique dans la zone linéaire reste constante

Caractéristiques moteur asynchrone

- Moteur robuste et bon marché
- Démarre tout seul sur un réseau à fréquence fixe (pas besoin d'électronique de commande)
- Pas d'usure
- Réglage (électronique) plus compliqué que le moteur synchrone
- Possibilité d'étendre la caractéristique de couple