

Conversion d'énergie

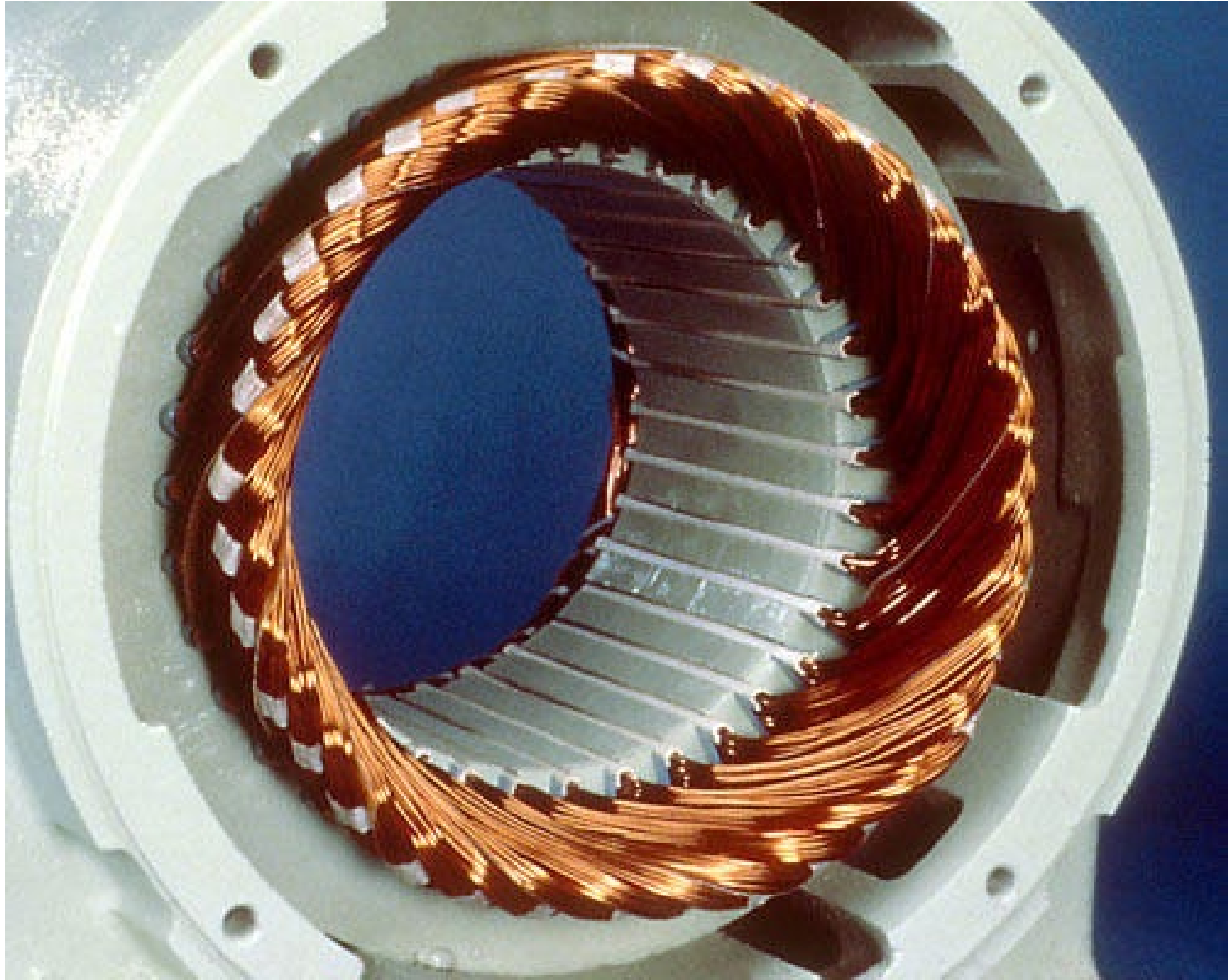
Machine asynchrone

André Hodder

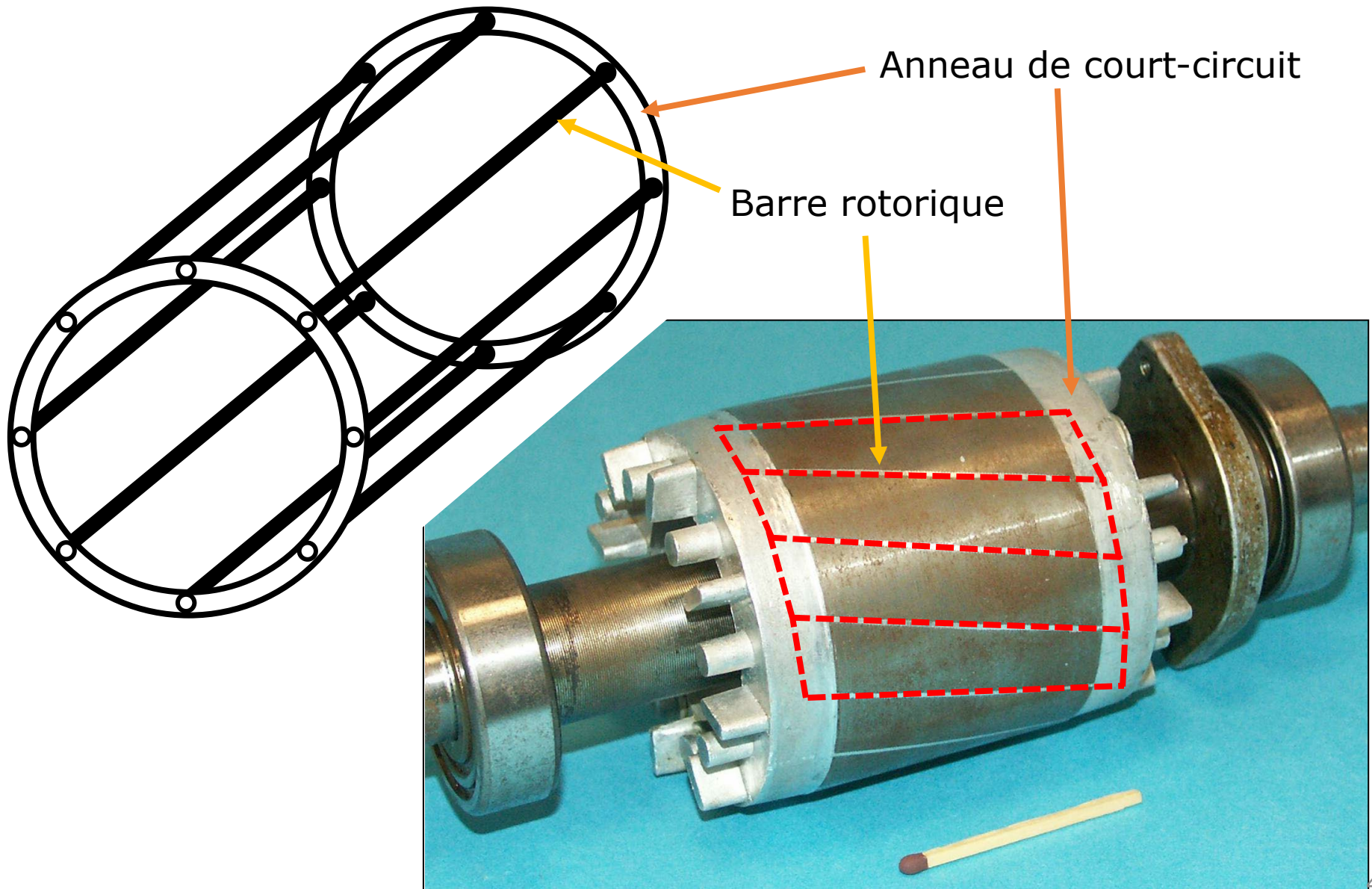
Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- Caractéristique de couple
- Impédance équivalente
- Démarrage

Stator d'une machine asynchrone



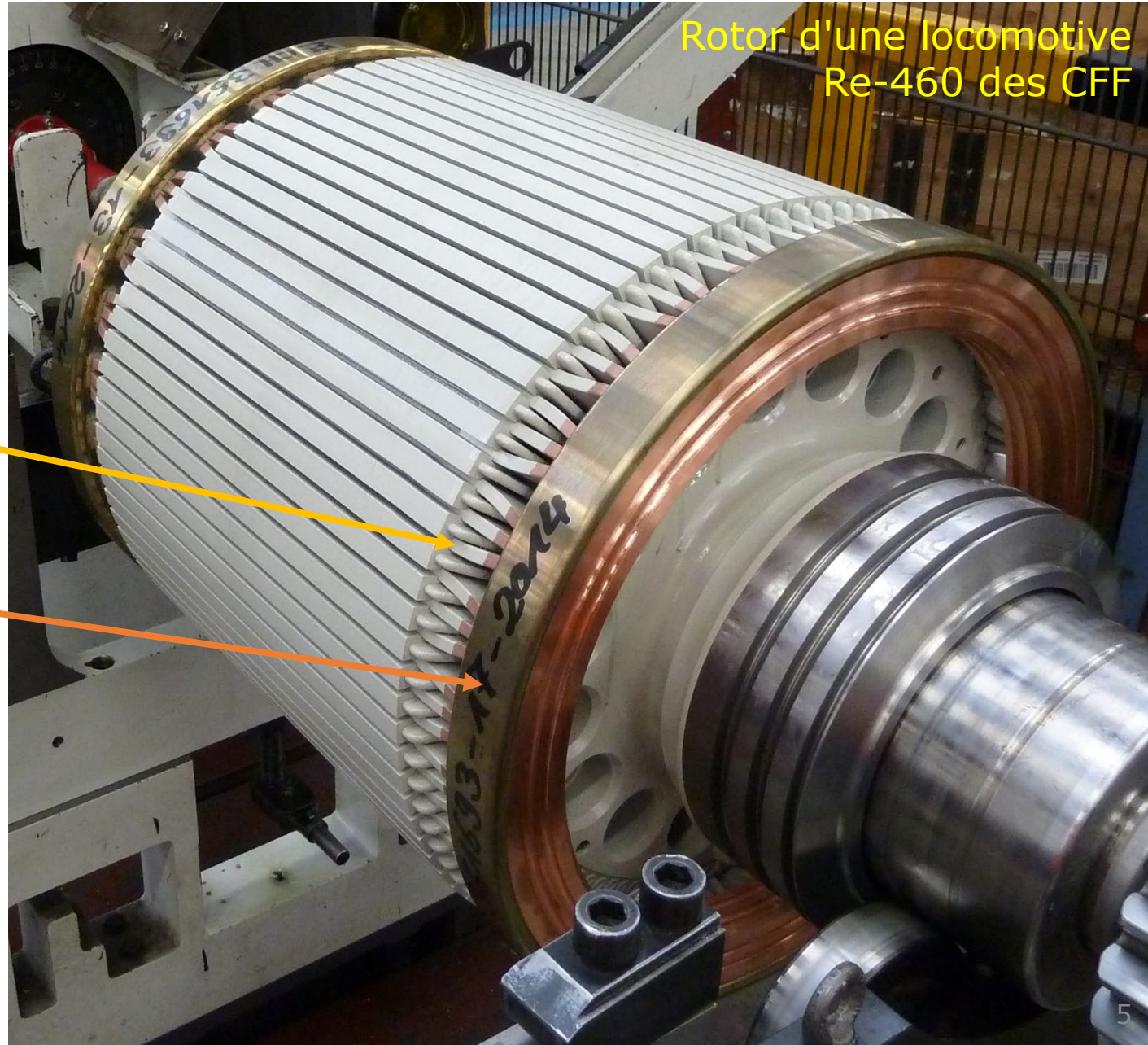
Rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil



Rotor d'une machine asynchrone à cage



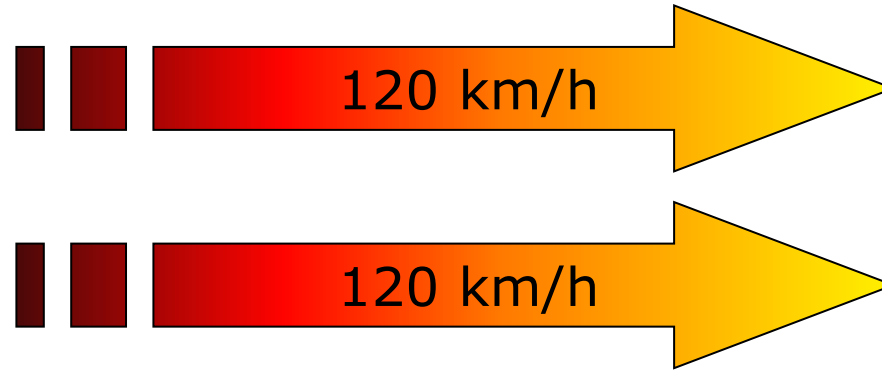
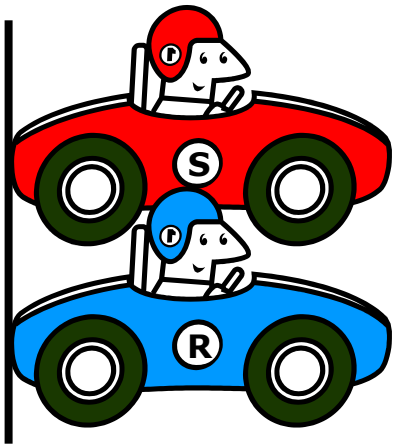
Rotor d'une locomotive
Re-460 des CFF



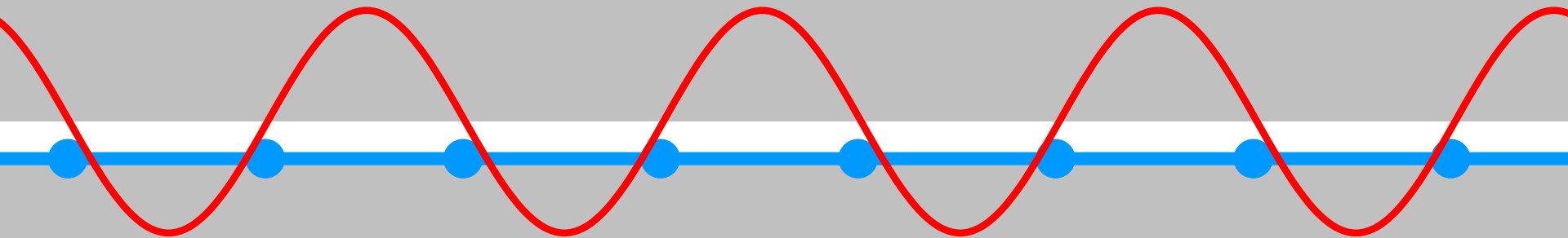
Barre rotorique

Anneau de
court-circuit

Principe de fonctionnement

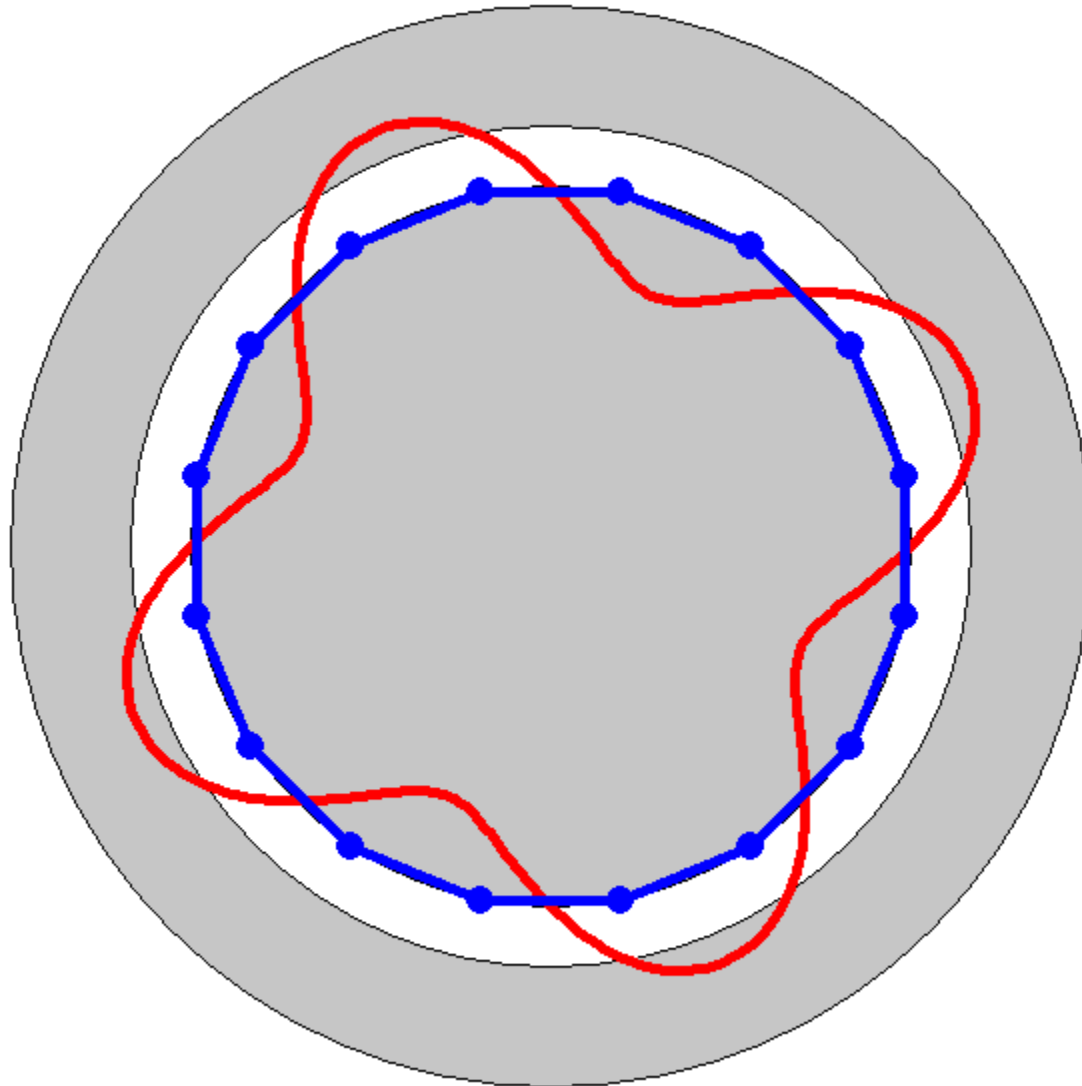


Stator



Rotor

Principe de fonctionnement

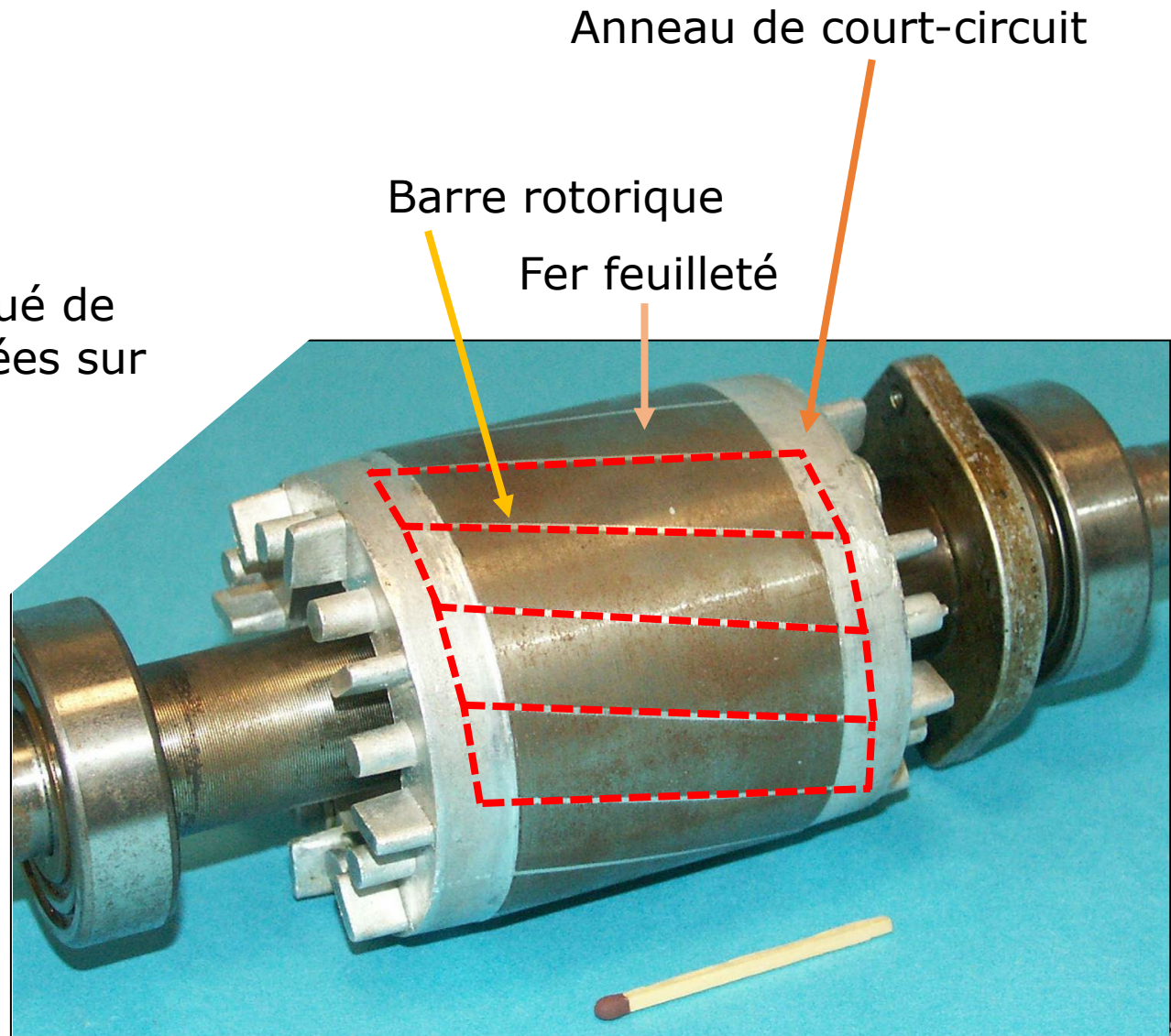


Rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

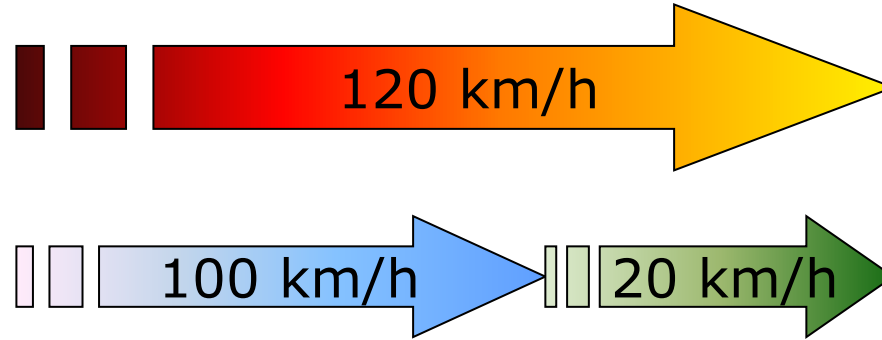
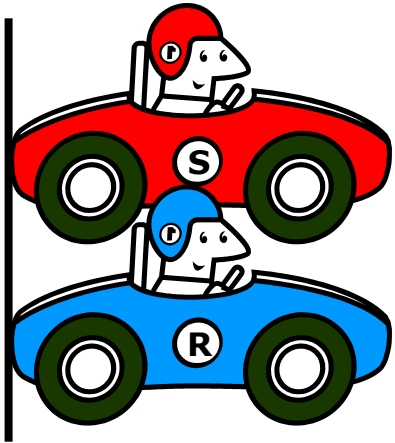
$$u_r = R_r i_r + \frac{d\Psi}{dt}$$

Le rotor est constitué de spires court-circuitées sur elles mêmes

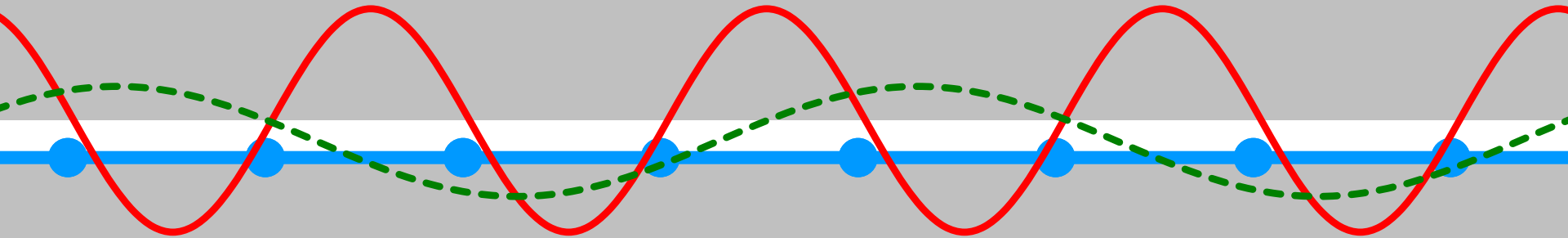
$$0 = R_r i_r + \frac{d\Psi}{dt}$$



Principe de fonctionnement

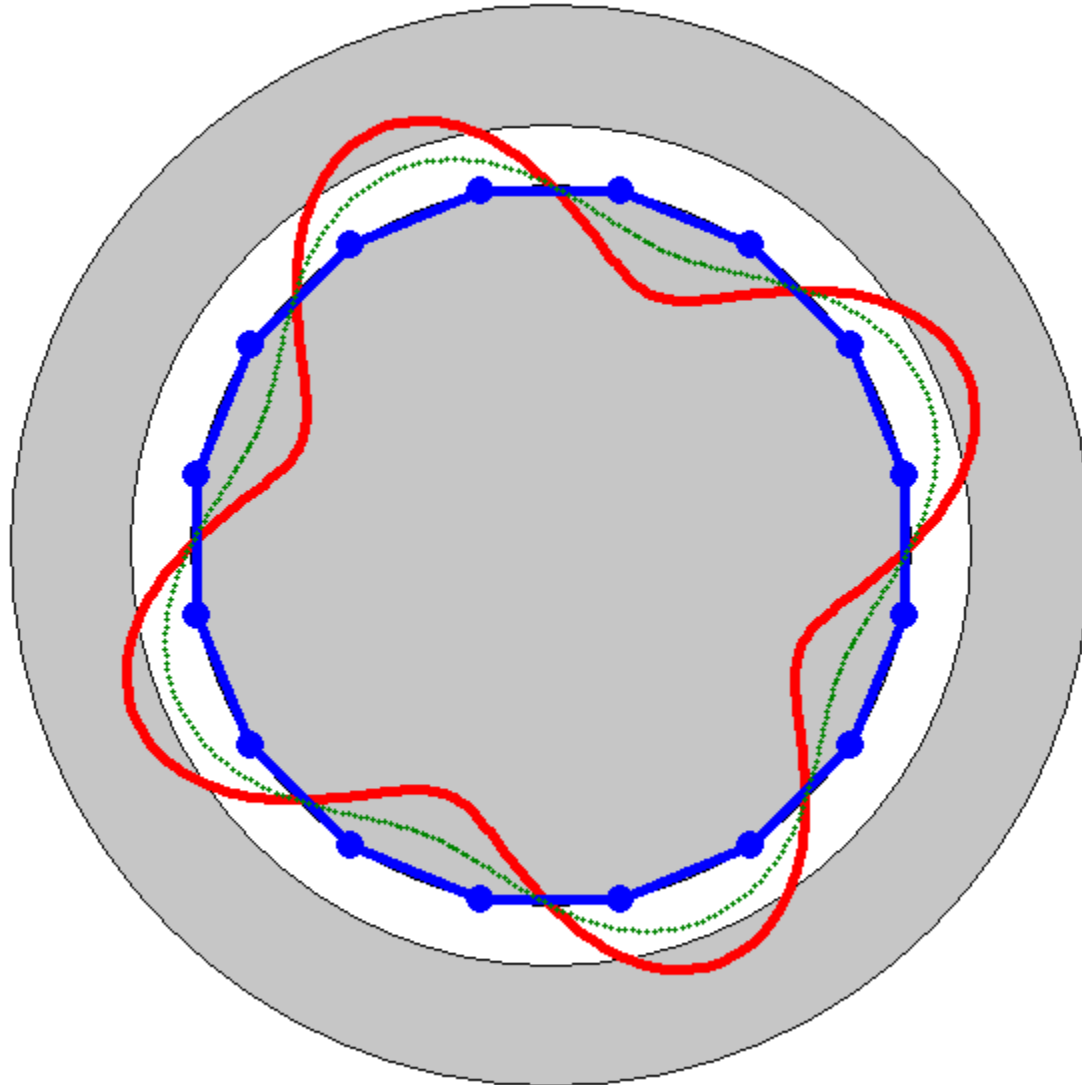


Stator

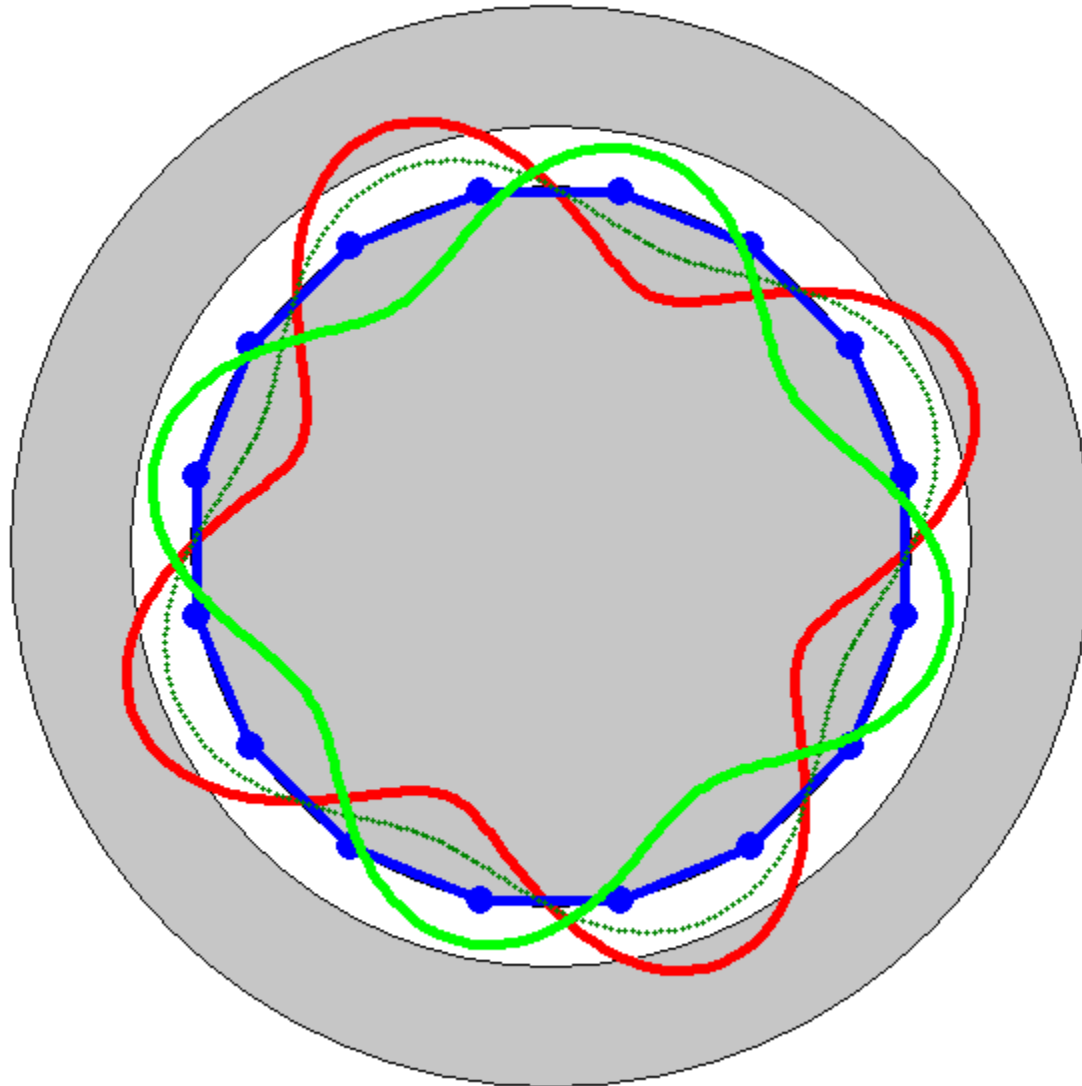


Rotor

Principe de fonctionnement



Principe de fonctionnement



Principe de fonctionnement

En raisonnant en fréquence électrique

$$\left. \begin{array}{l} f_s = 50 \text{ Hz} \\ f_m = 48 \text{ Hz} \end{array} \right\} f_s - f_m = 2 \text{ Hz}$$

Le courant induit au rotor a une fréquence de 2 Hz dans le rotor

Quelle est la fréquence de ce courant vu du stator ?

Les deux champs stator et rotor ont la même fréquence et leur interaction génère le couple.

2 Hz dans le rotor
mais le rotor tourne à 48 Hz
donc 48 Hz + 2 Hz = 50 Hz

Plus le glissement est grand, plus le courant induit est grand, et donc plus le champ B est grand et plus le couple est grand.

Avec

$$\Theta = N i$$

$$\Theta = \int H dl$$

$$B = \mu H \longrightarrow f_B = 50 \text{ Hz}$$

Principe de fonctionnement

Les deux champs stator et rotor ont la même fréquence et leur interaction génère le couple.

Plus le glissement est grand, plus le courant induit est grand, et donc plus le champ B est grand et plus le couple est grand.

$$T_{em} = k \hat{B}_s \hat{B}_r p \sin \delta$$

↑
nombre de paires de pôles

2 conditions :

- Même nombre de pôles (paires de pôles)
- Même vitesse (les champs sont dit synchrones)

Glissement

Par définition le glissement est l'écart de vitesse entre le champ tournant statorique et la vitesse mécanique du rotor, rapporté à la vitesse du champ tournant statorique.

Il est noté s et est sans dimension.

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega_m}{\Omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{N_s - N_m}{N_s} = \frac{f_s - f_m}{f_s} [-]$$

\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow
[rad / s] [rad / s] [tr / s] [tr / min] [Hz]
méca. élec. méca. méca. élec.

$$n = \frac{f}{p}$$

↙
nombre de paires de pôles

Sommaire

- Principe de fonctionnement
- **Schéma équivalent**
- Caractéristique de couple
- Impédance équivalente
- Démarrage

Schéma équivalent du transformateur

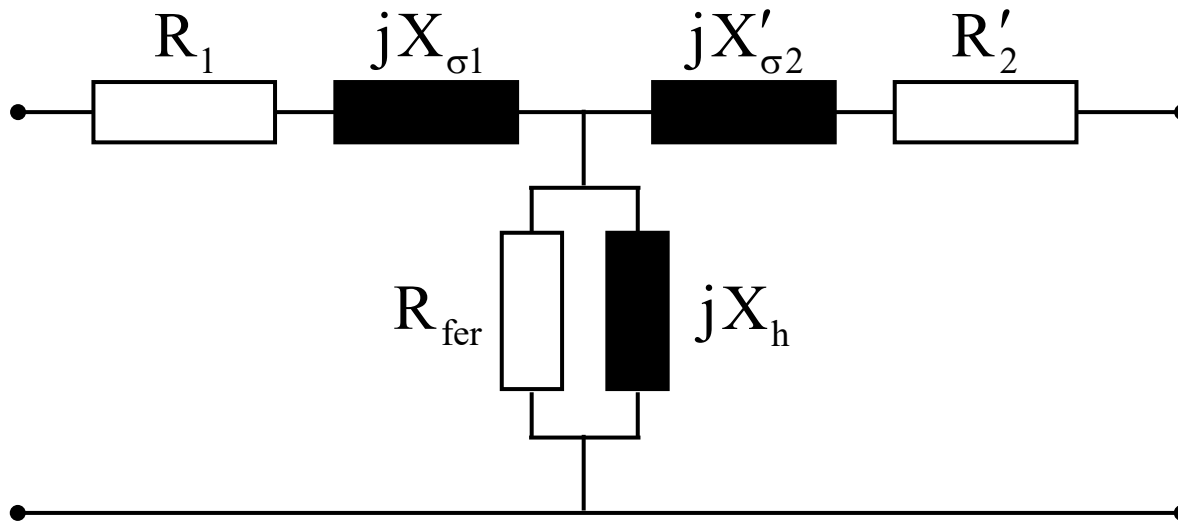


Schéma équivalent d'un transformateur

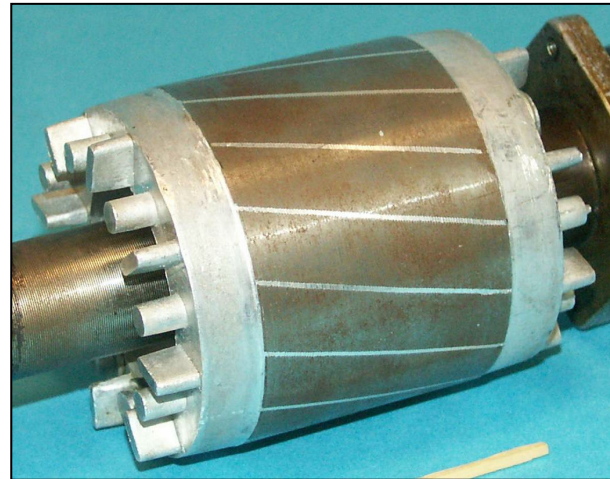
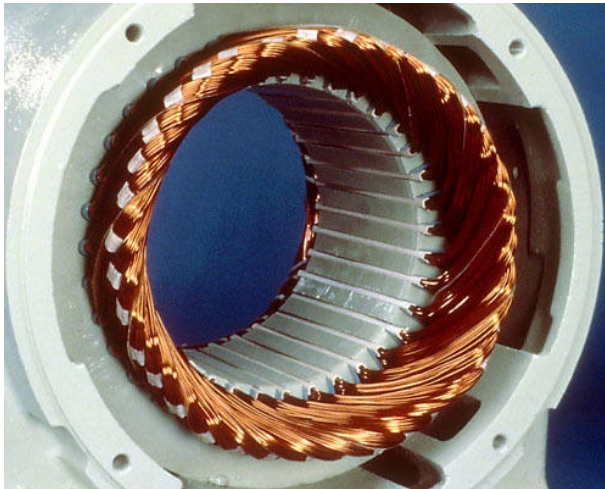
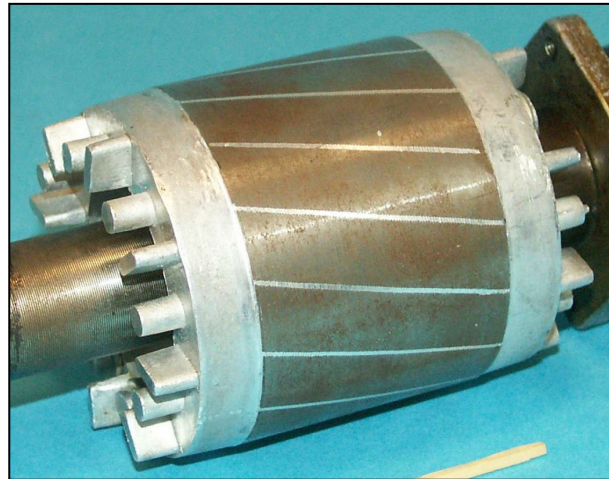
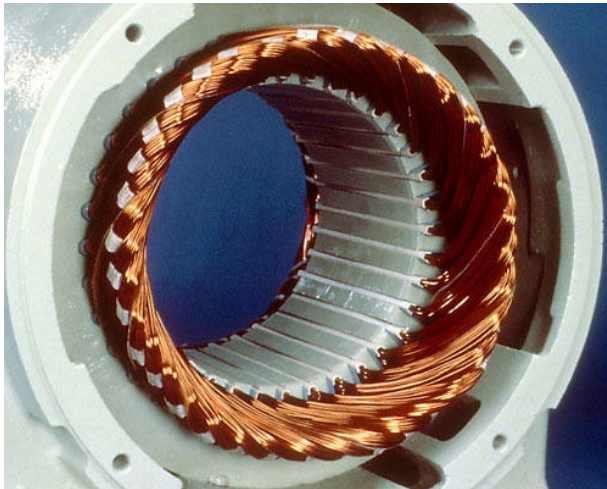
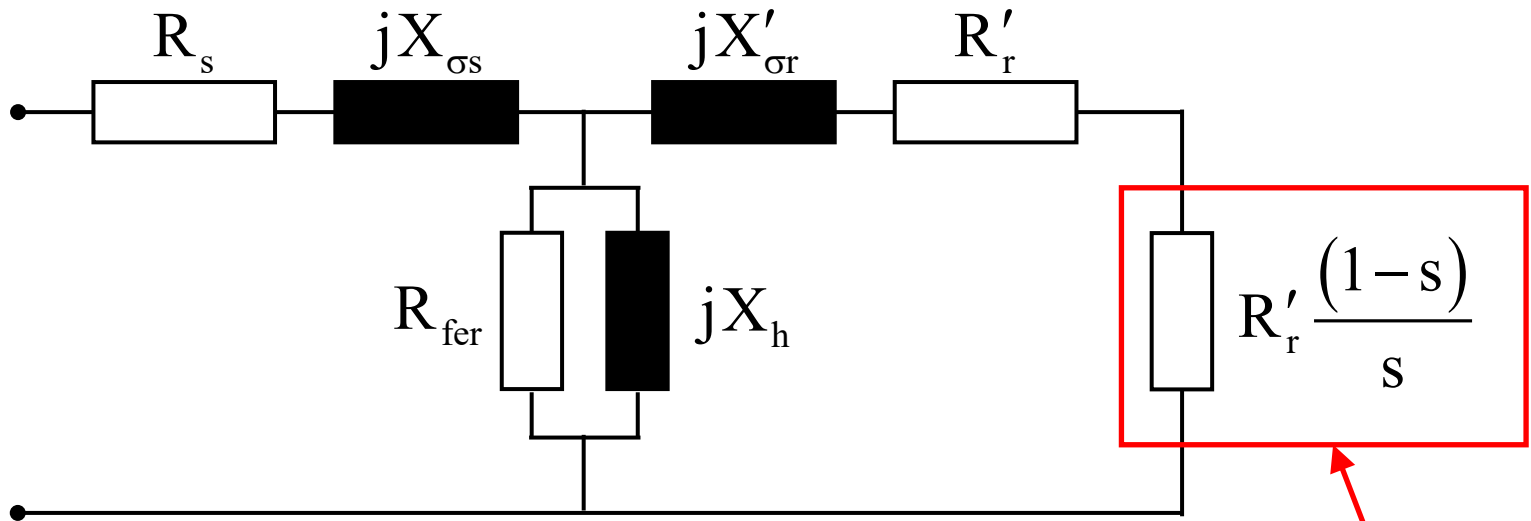


Schéma équivalent de la machine asynchrone



Modélisation
de la charge

Schéma équivalent de la machine asynchrone

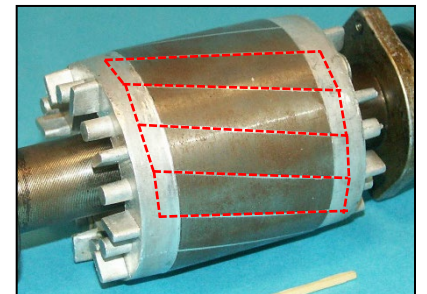
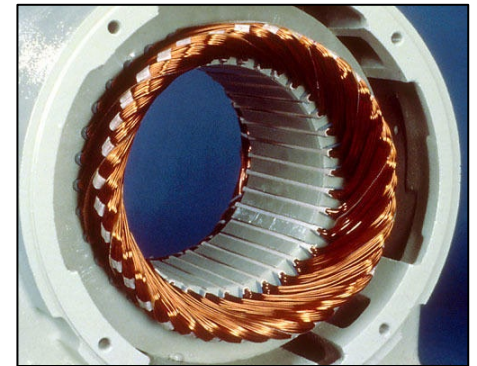
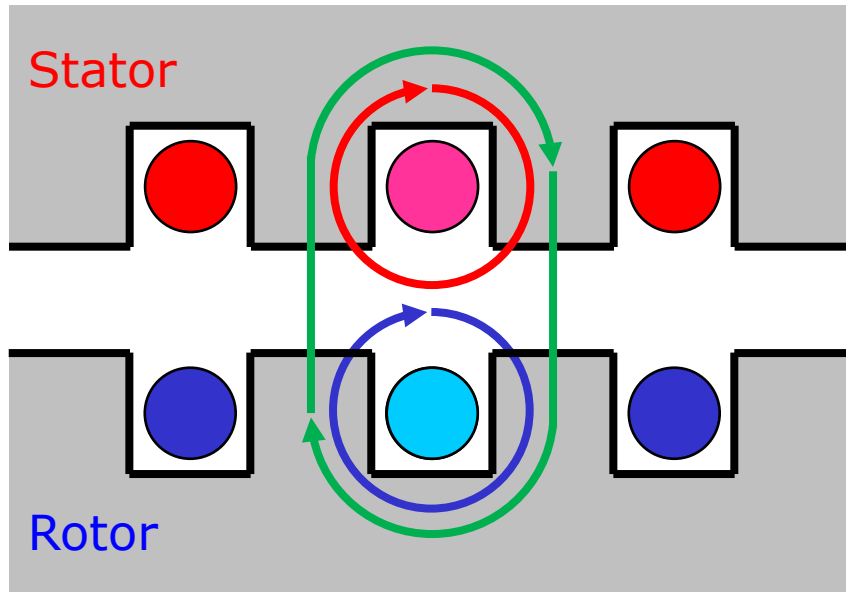
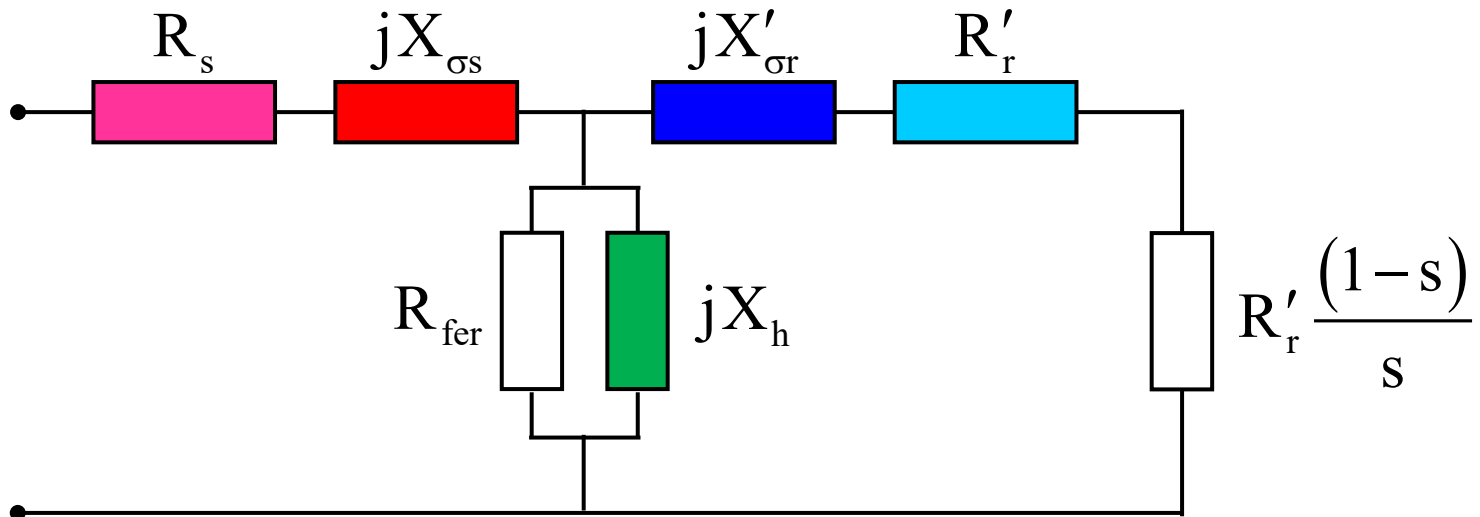


Schéma équivalent de la machine asynchrone

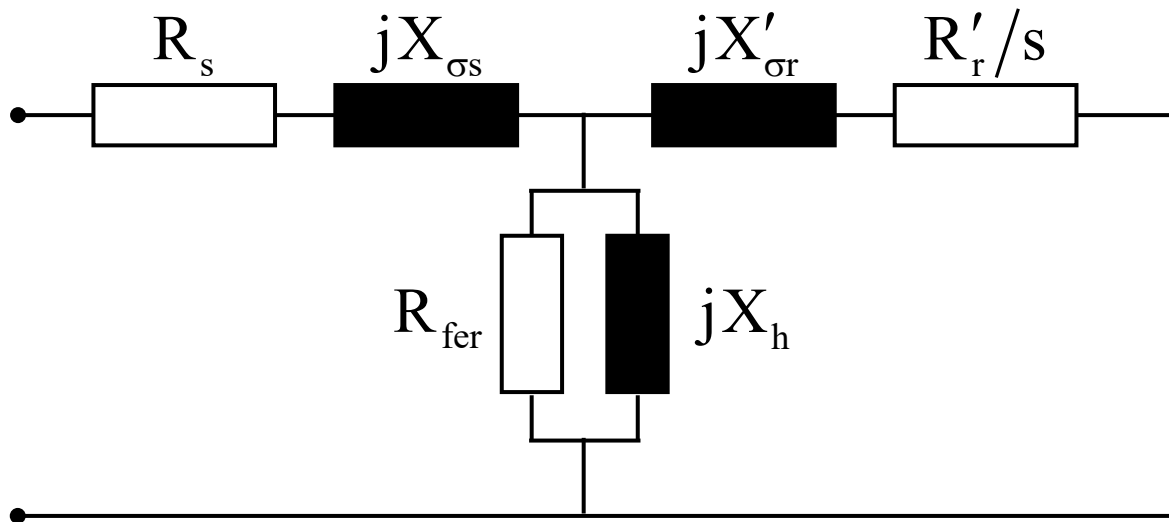
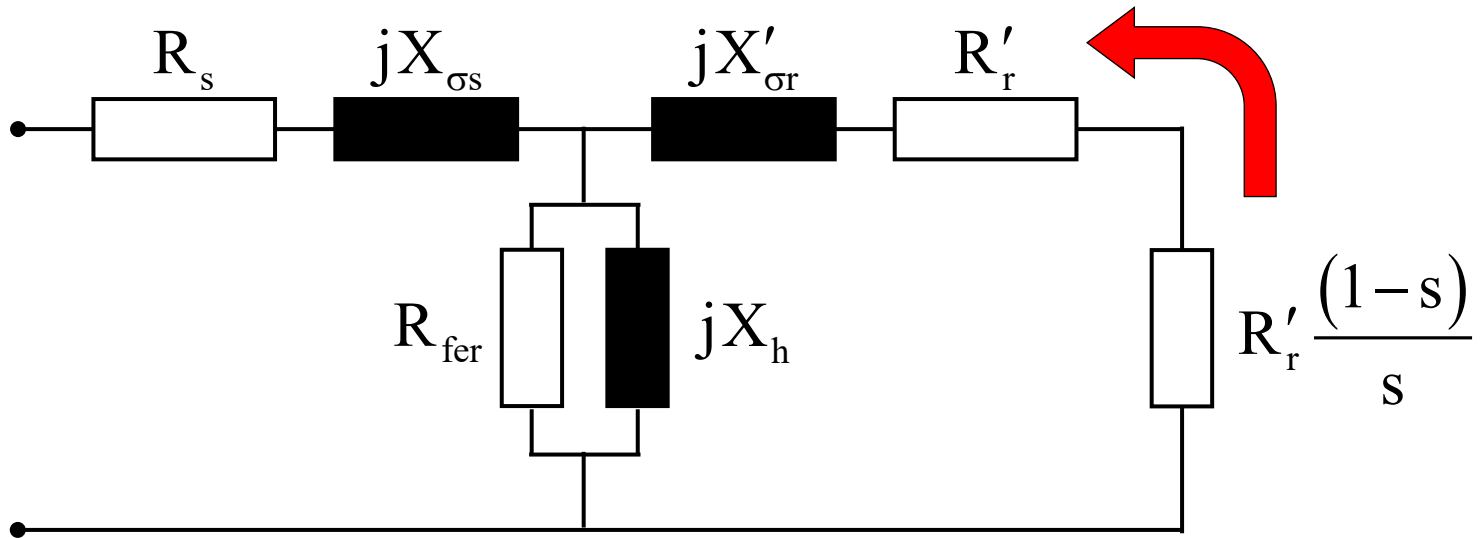
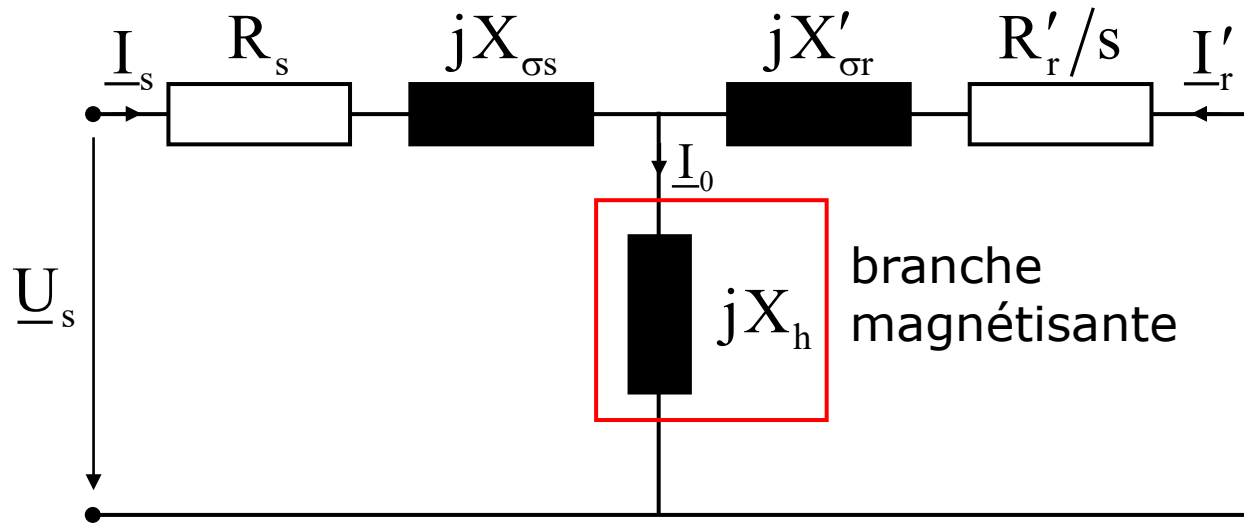
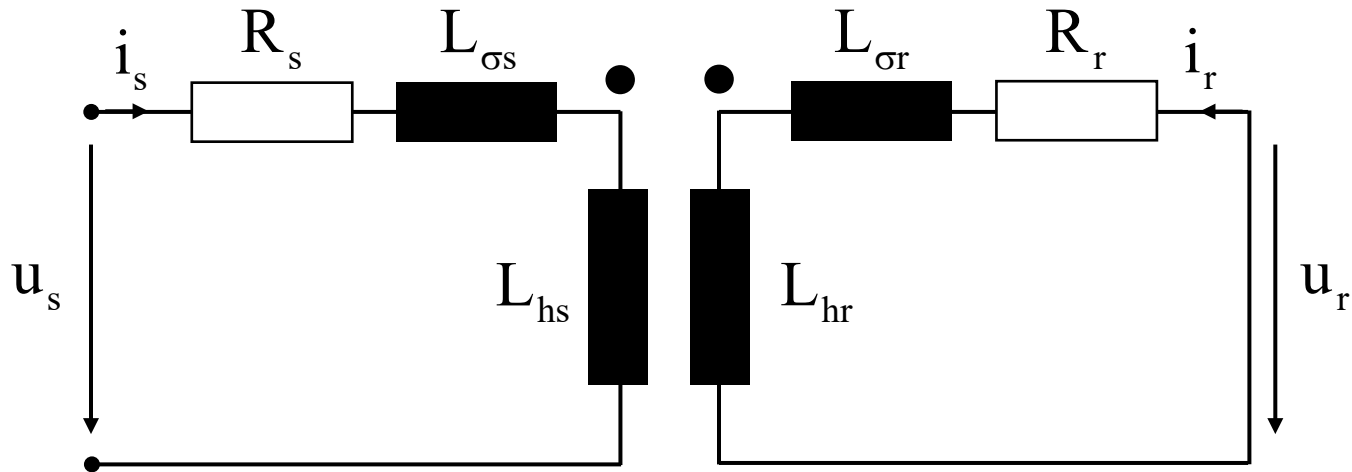


Schéma équivalent de la machine asynchrone



$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{\sigma s} \underline{I}_s + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \\ 0 = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{\sigma r} \underline{I}'_r + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \end{cases}$$

Equations de tension



$$\left\{ \begin{array}{l} u_s = R_s i_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \\ u_r = 0 = R_r i_r + \frac{d\Psi_r}{dt} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} L_{hs} = N_s N_s \Lambda_h \\ L_{hr} = N_r N_r \Lambda_h \\ L_{sr} = L_{rs} = N_s N_r \Lambda_h \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_s = L_s i_s + L_{sr} i_r = (L_{hs} + L_{\sigma s}) i_s + L_{sr} i_r \\ \Psi_r = L_r i_r + L_{rs} i_s = (L_{hr} + L_{\sigma r}) i_r + L_{rs} i_s \end{array} \right.$$

Equations de tension

alimentation
sinusoïdale

$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j \omega_s L_{\sigma s} \underline{I}_s + j \omega_s L_{hs} \underline{I}_s + j \omega_s L_{sr} \underline{I}_r \\ \underline{U}_r = 0 = R_r \underline{I}_r + j \omega_r L_{\sigma r} \underline{I}_r + j \omega_r L_{hr} \underline{I}_r + j \omega_r L_{sr} \underline{I}_s \end{cases}$$

grandeurs
rapportées
au primaire

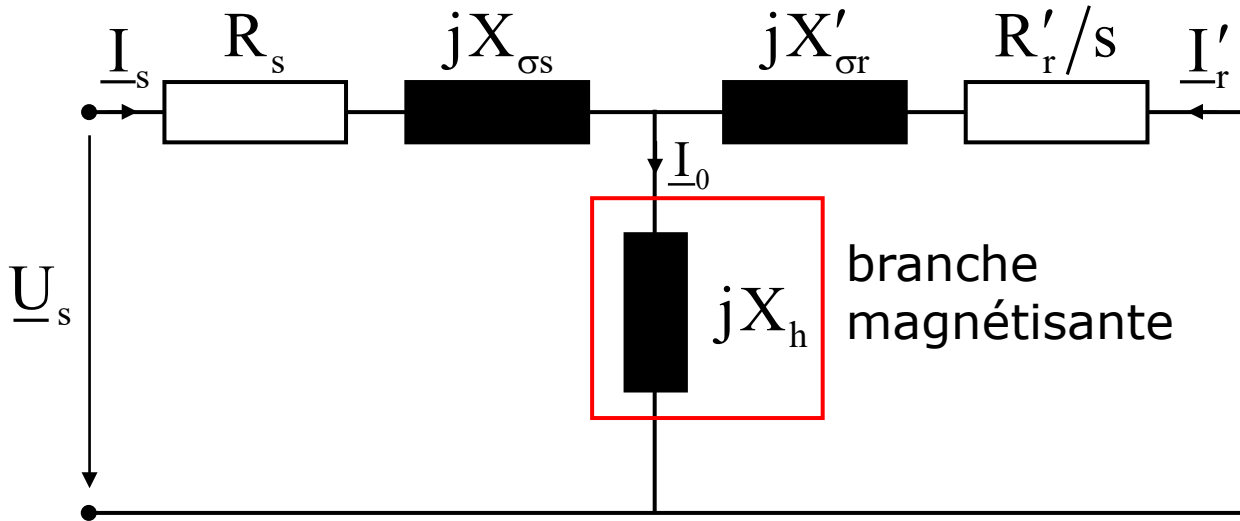
$$\ddot{u} = \frac{N_s k_{ws}}{N_r k_{wr}} \longrightarrow \begin{cases} L_{hs} = \ddot{u} L_{sr} \\ L'_{hr} = L_{hs} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j \omega_s L_{\sigma s} \underline{I}_s + j \omega_s L_{hs} \underline{I}_s + j \omega_s L_{hs} \underline{I}'_r \\ 0 = R'_r \underline{I}'_r + j \omega_r L'_{\sigma r} \underline{I}'_r + j \omega_r L'_{hr} \underline{I}'_r + j \omega_r L_{hs} \underline{I}_s \end{cases}$$

$$\omega_r = s \omega_s \longrightarrow \begin{cases} X_{\sigma s} = \omega_s L_{\sigma s} \\ X_h = \omega_s L_{hs} \\ X'_{\sigma r} = \omega_s L'_{\sigma r} \end{cases}$$

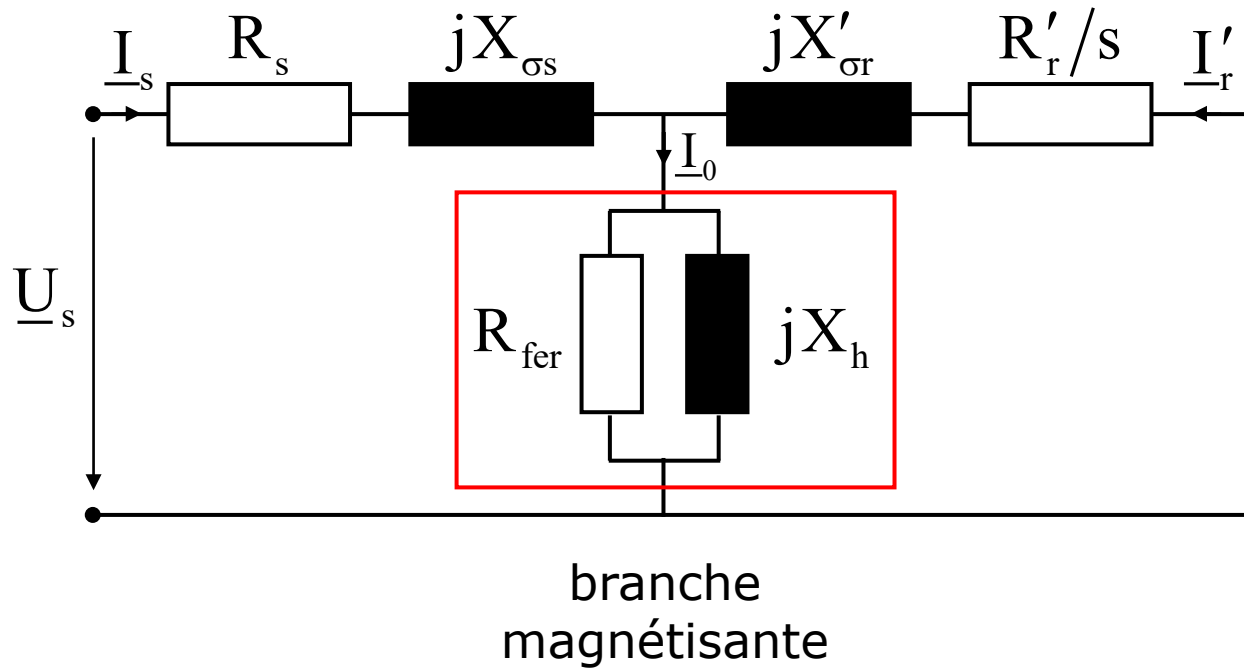
$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j X_{\sigma s} \underline{I}_s + j X_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \\ 0 = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + j X'_{\sigma r} \underline{I}'_r + j X_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \end{cases}$$

Schéma équivalent

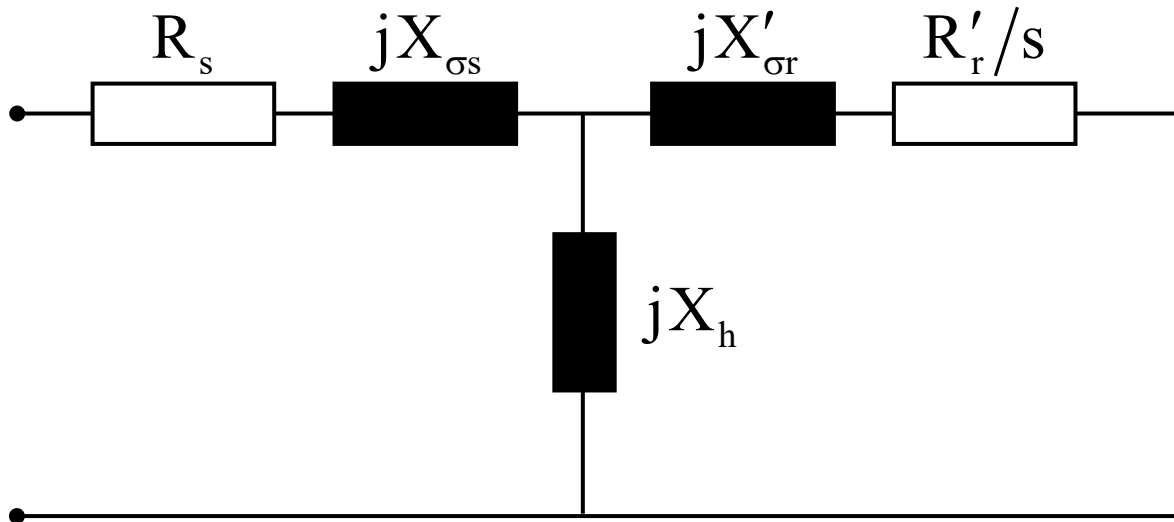


$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{\sigma s} \underline{I}_s + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \\ 0 = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{\sigma r} \underline{I}'_r + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \end{cases}$$

Schéma équivalent



Paramètres du schéma équivalent



$$r_s \rightarrow 0.01 - 0.03 \text{ [p.u]}$$

$$x_{\sigma s} \rightarrow 0.08 - 0.12 \text{ [p.u]}$$

$$x_h \rightarrow 2.5 - 4 \text{ [p.u]}$$

$$x'_{\sigma r} \rightarrow 0.08 - 0.10 \text{ [p.u]}$$

$$r'_r \rightarrow 0.01 - 0.03 \text{ [p.u]}$$

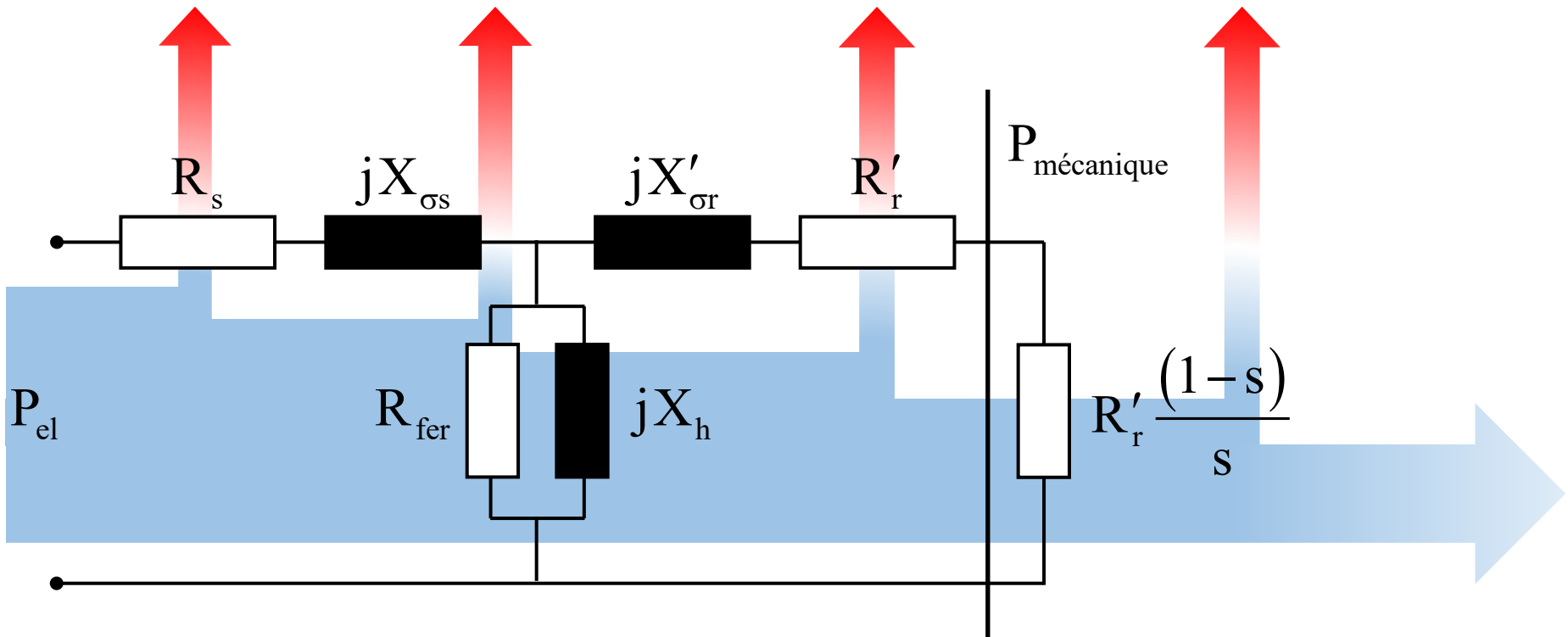
Y 400V / 5A
Δ 230V / 8.7A

Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- **Caractéristique de couple**
- Impédance équivalente
- Démarrage

Bilan de puissance – Moteur

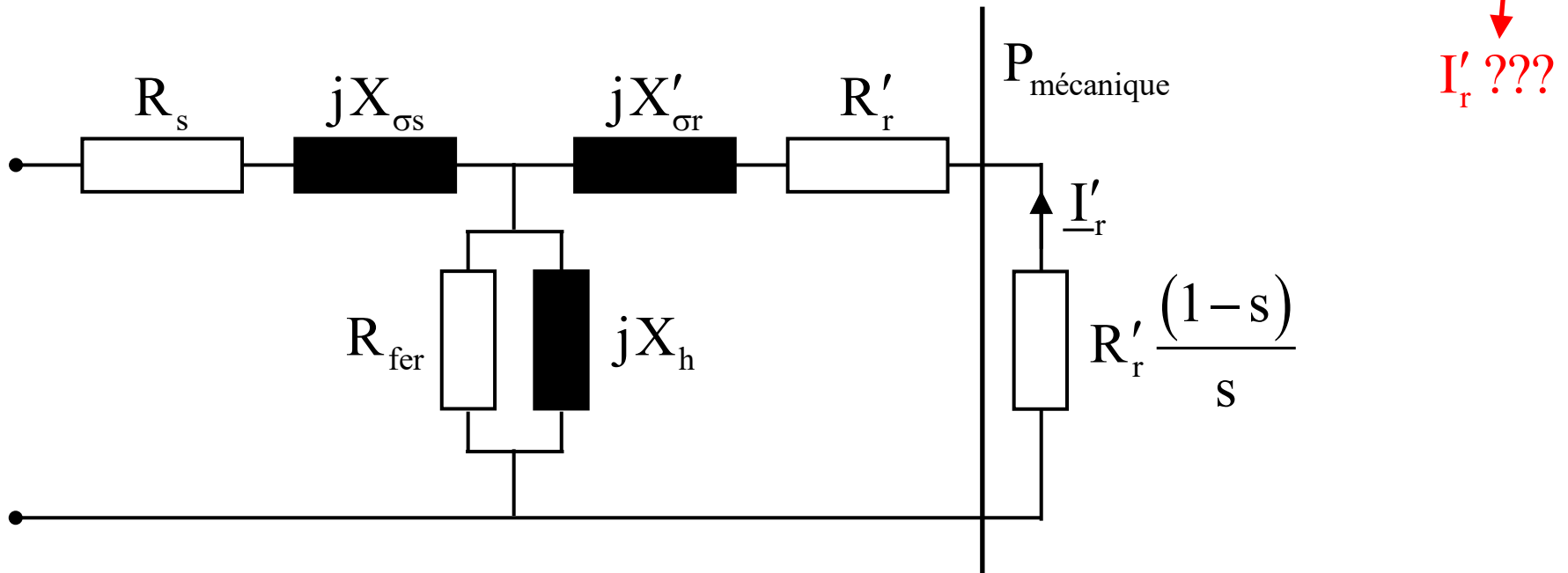
$$P_{el} = P_{js} + P_{fer} + P_{jr} + \underbrace{P_{f+v} + P_{utile}}_{P_{m\acute{e}canique}}$$



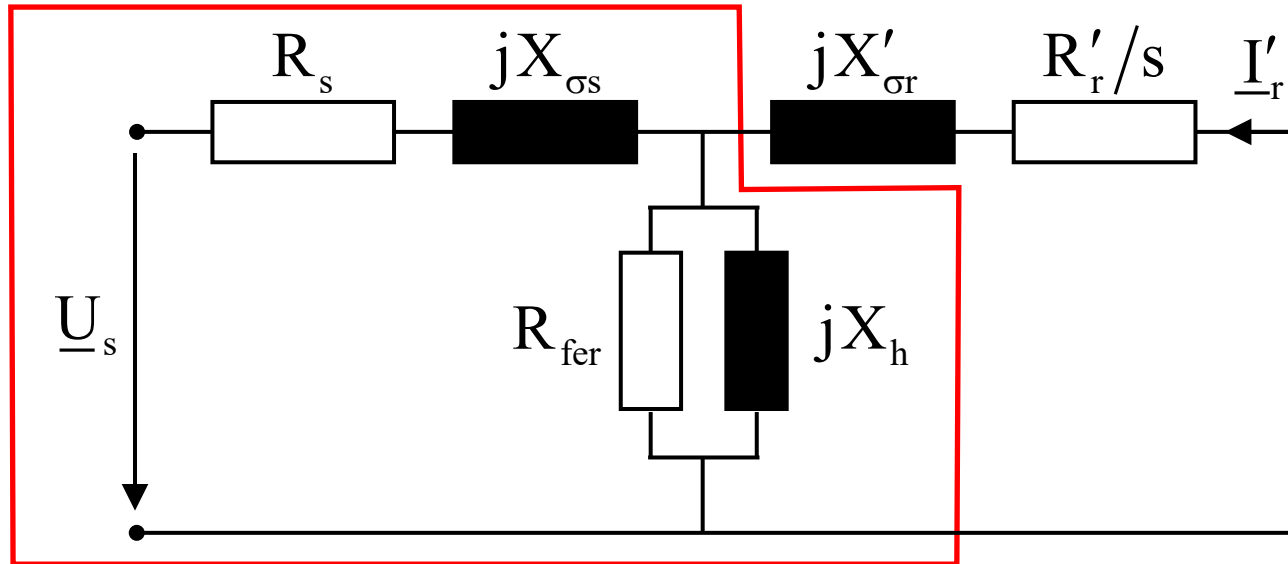
Couple électromagnétique

$$P_{\text{mec}} = \Omega_m T_{\text{em}} = 3 R'_r \frac{(1-s)}{s} I_r'^2$$

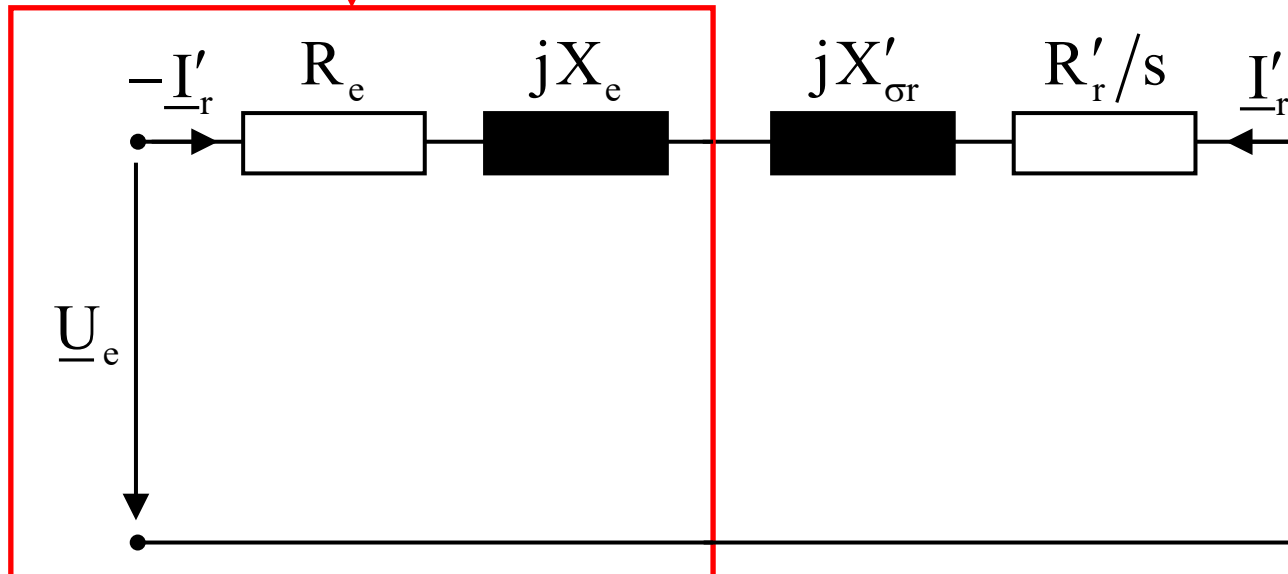
$$T_{\text{em}} = \frac{1}{\Omega_m} 3 R'_r \frac{(1-s)}{s} I_r'^2 \xrightarrow{\Omega_m = \Omega_s (1-s)} T_{\text{em}} = 3 \frac{1}{\Omega_s} \frac{R'_r}{s} I_r'^2$$



Equivalent de Thévenin



Théorème de Thévenin



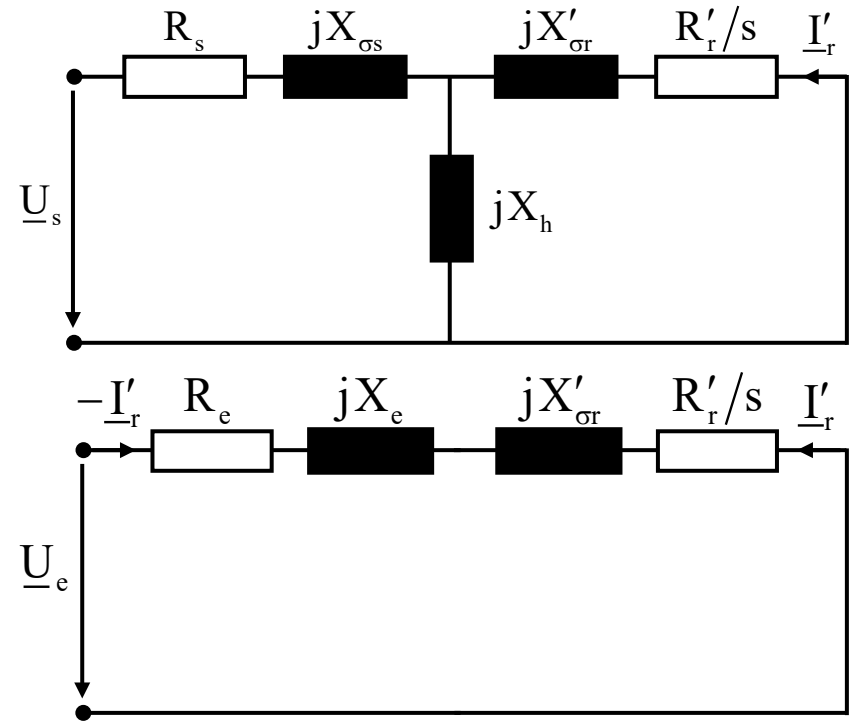
Equivalent de Thévenin

$$\underline{U}_e = \underline{U}_s \frac{jX_h}{R_s + j(X_{\sigma s} + X_h)}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_e &= jX_h \frac{R_s + jX_{\sigma s}}{R_s + j(X_{\sigma s} + X_h)} \\ &= R_e + jX_e \end{aligned}$$

$$-\underline{I}'_r = \frac{\underline{U}_e}{\underline{Z}_e + \frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r}} = \frac{\underline{U}_e}{\left(R_e + \frac{R'_r}{s}\right) + j(X_e + X'_{\sigma r})}$$

$$T_{em} = 3 \frac{1}{\Omega_s} \frac{R'_r}{s} I_r'^2$$



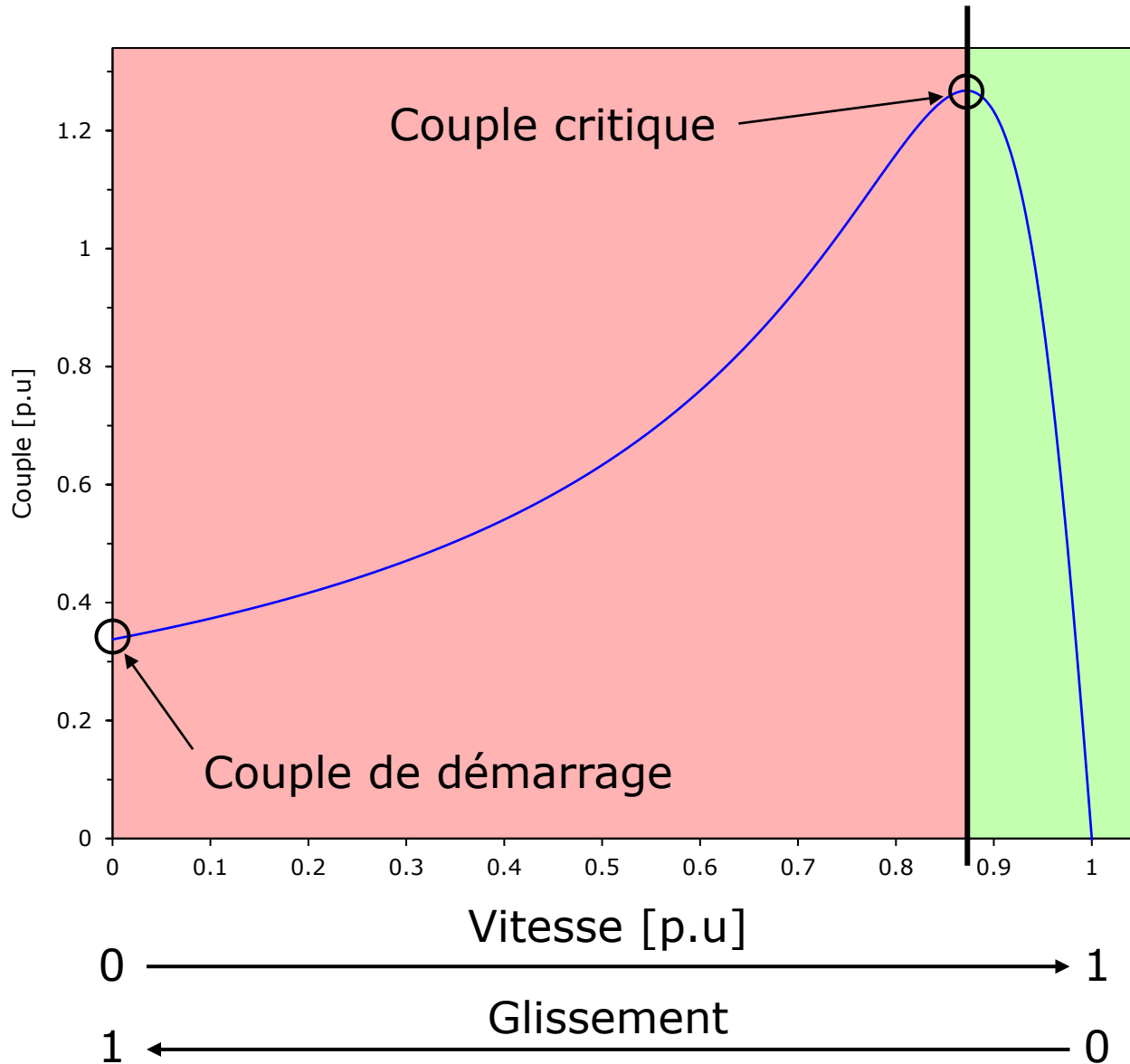
Couple électromagnétique

$$\underline{U}_e = \underline{U}_s \frac{j X_h}{R_s + j(X_{\sigma s} + X_h)}$$

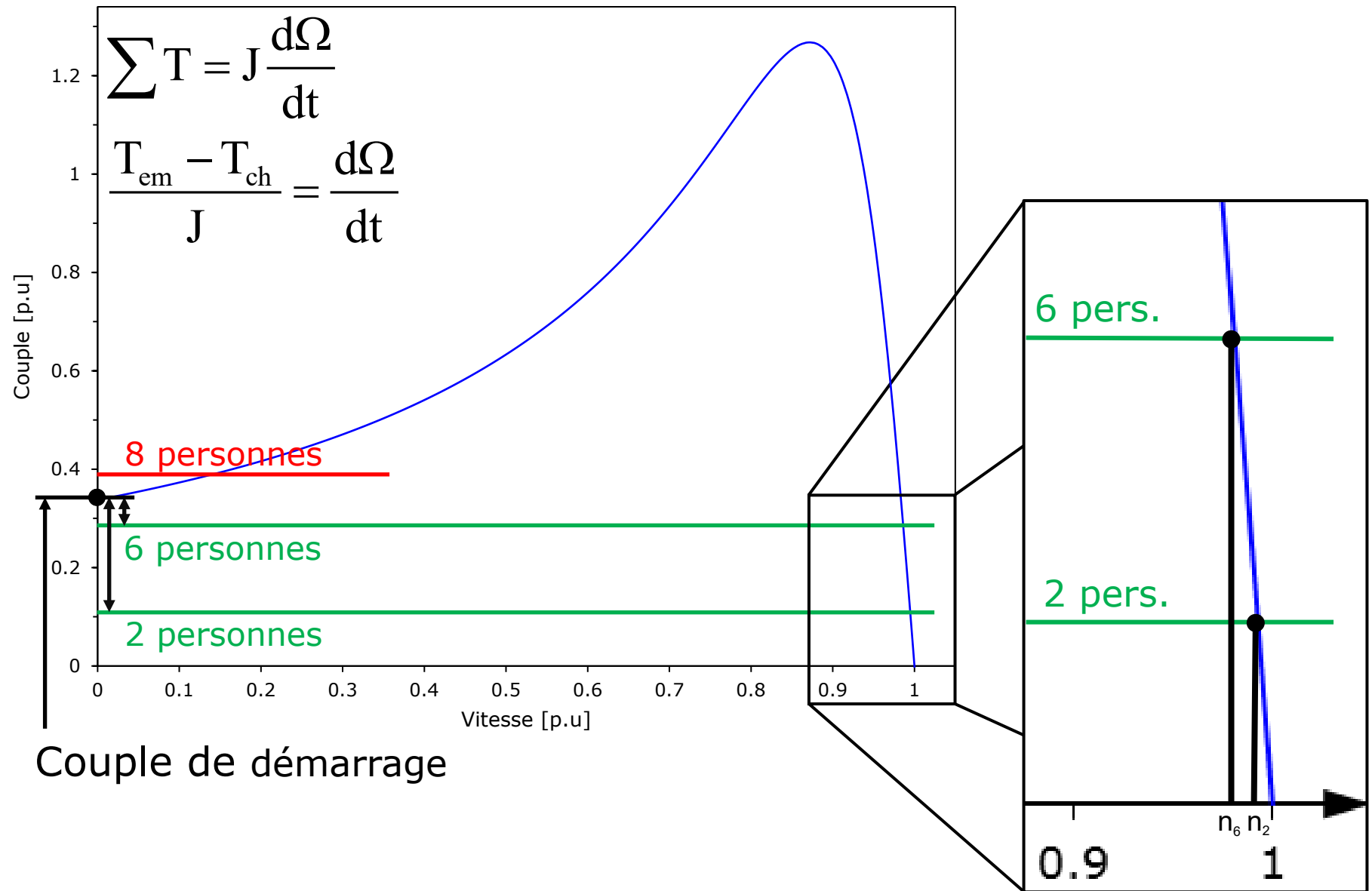
$$\underline{Z}_e = j X_h \frac{R_s + j X_{\sigma s}}{R_s + j(X_{\sigma s} + X_h)} = R_e + j X_e$$

$$T_{em} = \frac{3 U_e^2 \frac{R'_r}{s}}{\Omega_s \left[\left(R_e + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2 \right]}$$

Caractéristique de couple

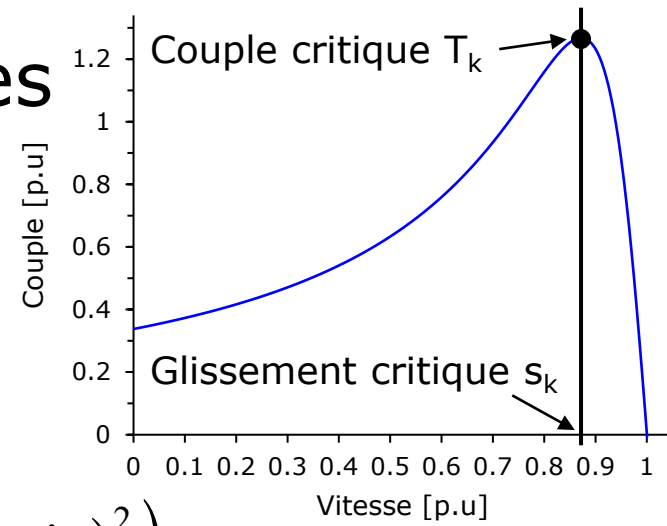


Caractéristique de couple



Couple et glissement critiques

$$T_{em} = \frac{3 U_e^2 \frac{R'_r}{s}}{\Omega_s \left[\left(R_e + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2 \right]}$$



$$\frac{dT_{em}}{ds} = \frac{3U_e^2 R'_r}{\Omega_s} \frac{R_r'^2 - s^2 (R_e^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2)}{\left(s^2 (R_e^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2) + 2R_e R'_r s + R_r'^2 \right)^2}$$

$$\frac{dT_{em}}{ds} = 0$$

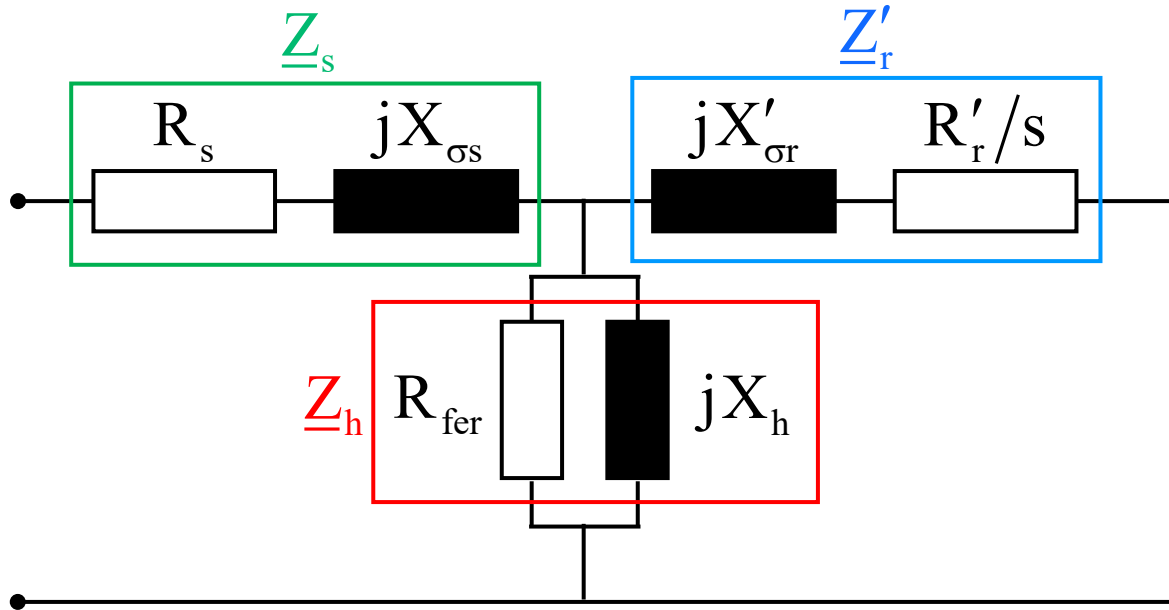
$$s_k = \frac{R'_r}{\sqrt{R_e^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2}}$$

$$T_k = \frac{3U_e^2}{2 \Omega_s \left[R_e + \sqrt{R_e^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2} \right]}$$

Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- Caractéristique de couple
- Impédance équivalente
- Démarrage

Impédance équivalente



$$\underline{Z}_{eq} = \underline{Z}_s + \frac{\underline{Z}_h \underline{Z}'_r}{\underline{Z}_h + \underline{Z}'_r}$$

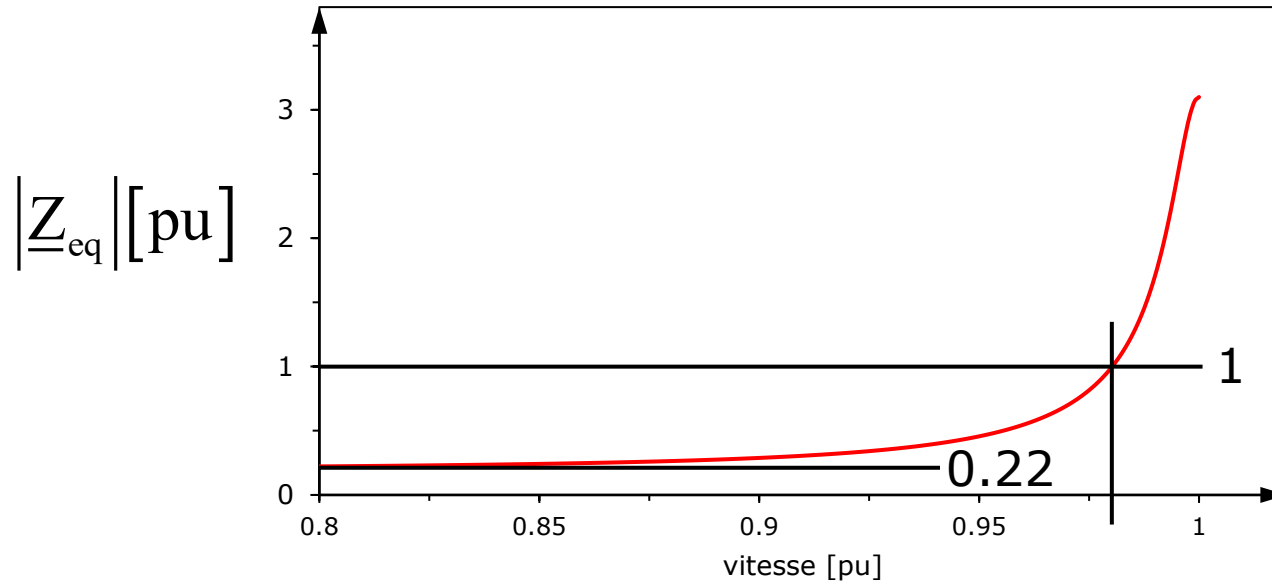
$$\underline{Z}_s = R_s + jX_{\sigma s}$$

$$\underline{Z}'_r = \frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r}$$

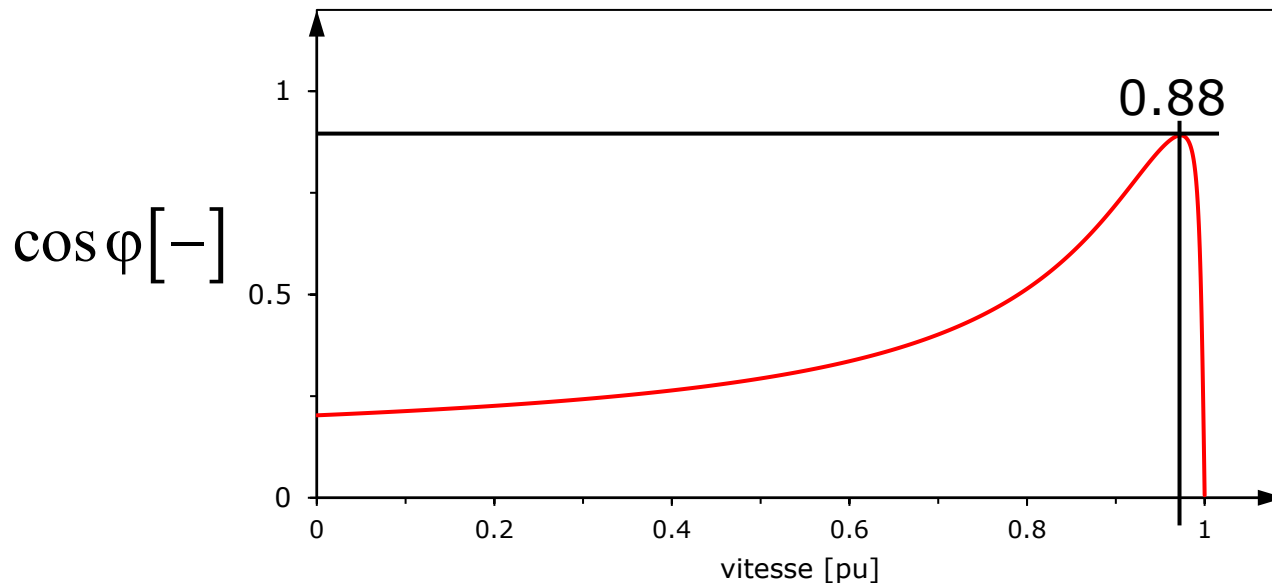
$$\underline{Z}_h = jX_h \longrightarrow R_{fer} \gg X_h$$

$$\underline{Z}_{eq} = R_s + jX_{\sigma s} + \frac{jX_h \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r} \right)}{jX_h + \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r} \right)}$$

Impédance équivalente en fonction du glissement



$$\frac{1}{0.22} \cong 4.5$$

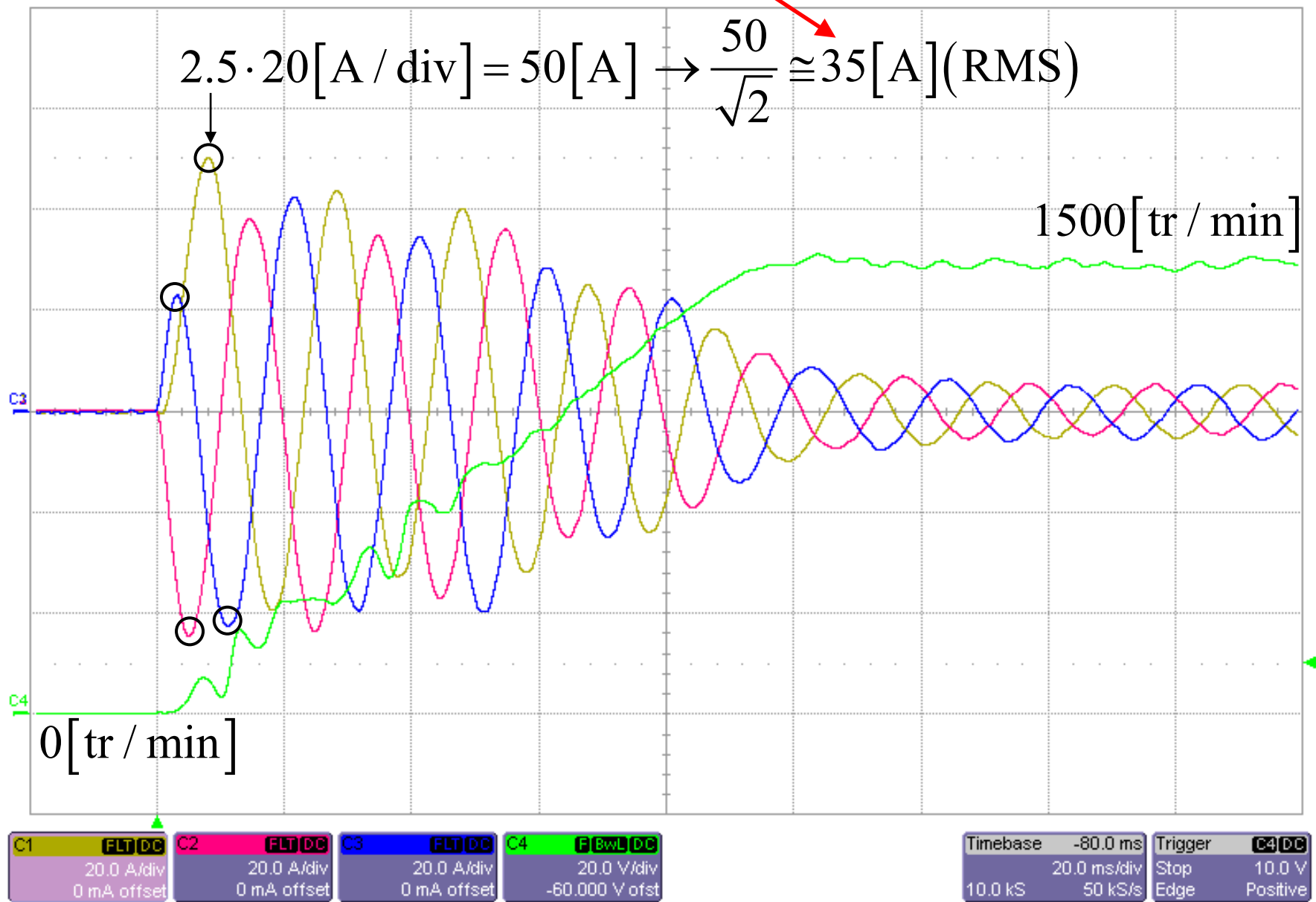


consomme
du réactif !

Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- Caractéristique de couple
- Impédance équivalente
- Démarrage

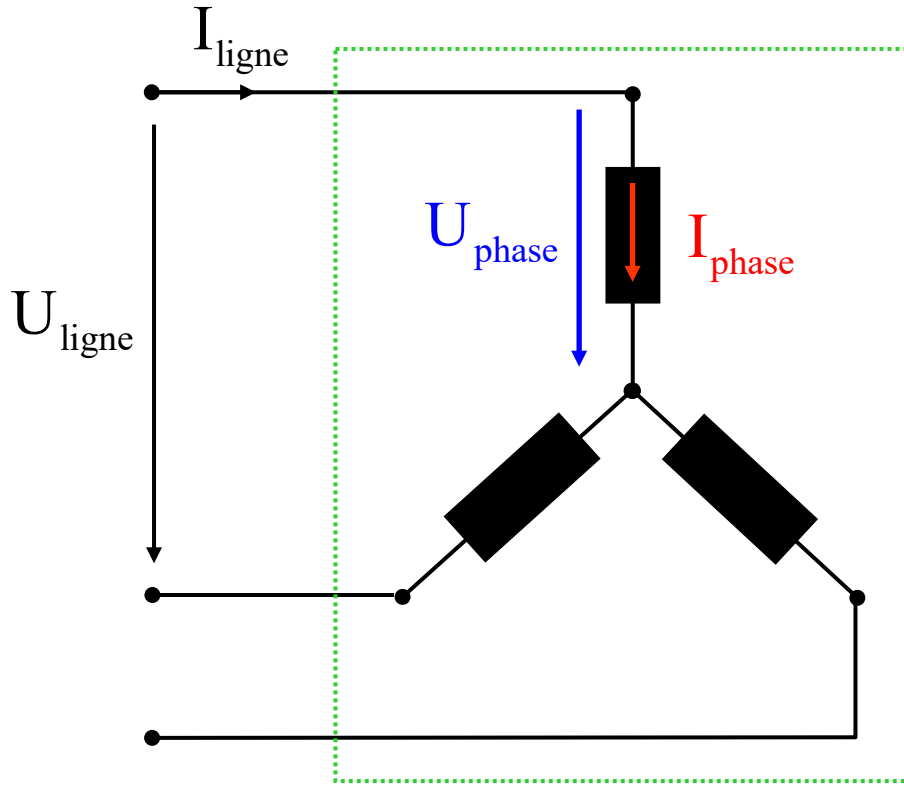
Démarrage d'un moteur asynchrone 2.2 kW ($I_n = 5A$)



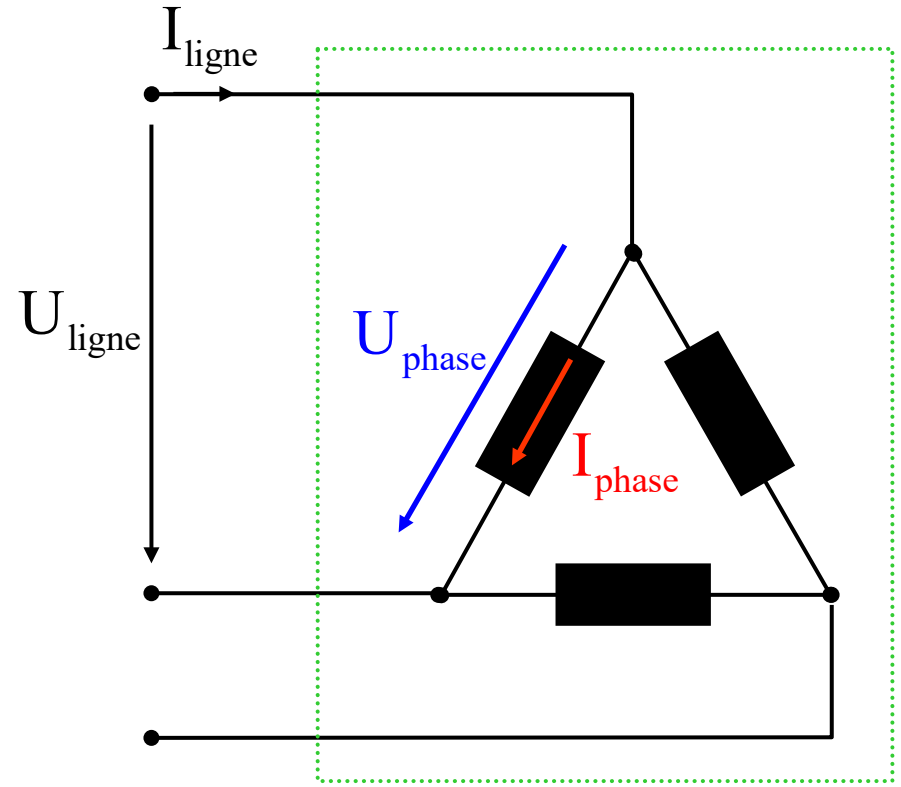
Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- Caractéristique de couple
- Impédance équivalente
- Démarrage
- Complément sur le montage étoile et triangle

Rappel sur les couplages étoile-triangle

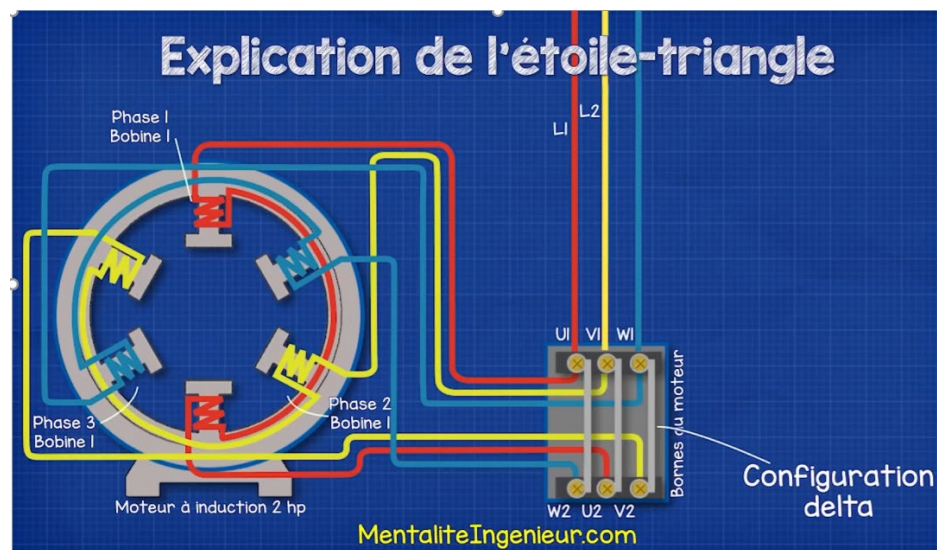
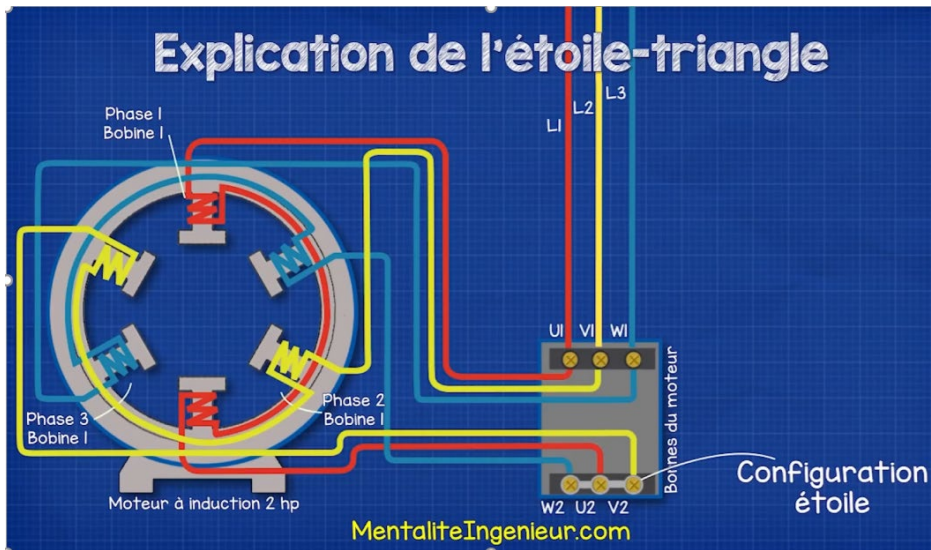


$$\begin{cases} U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}} / \sqrt{3} \\ I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}} \end{cases}$$



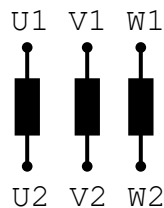
$$\begin{cases} U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}} \\ I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}} / \sqrt{3} \end{cases}$$

Complément sur les couplages étoile-triangle

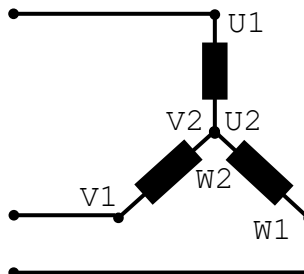


<https://www.youtube.com/watch?v=LX9KomXWYCs> (Français)

<https://www.youtube.com/watch?v=h89TTwINnpY> (English)



Etoile



Triangle

