

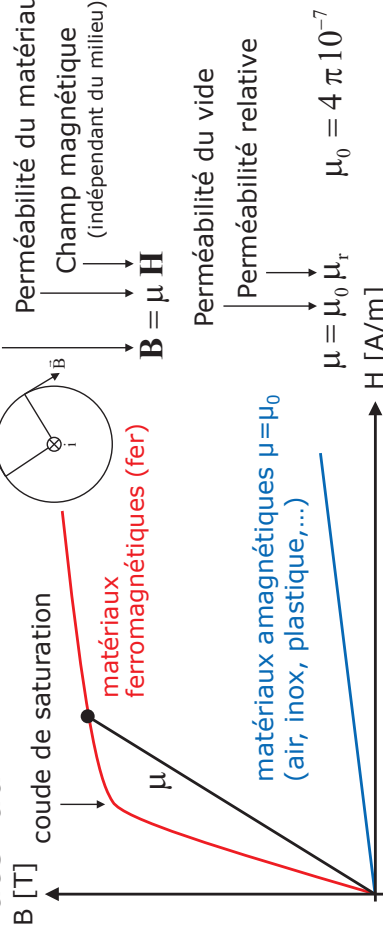
Circuit magnétique

- Potentiel magnétique (tension) $\Theta = Ni = Hl$
- Flux d'induction magnétique (courant) $\Phi = BS$
- Flux totalisé $\Psi = N\Phi$
- Perméance (résistance⁻¹) $\Lambda = \mu \frac{S}{l}$
- Perméabilité $\mu = \mu_0 \mu_r \rightarrow \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$
- Loi d'Ohm $\Phi = \Lambda \Theta$
- Mise en parallèle de perméances $\Lambda_{eq\text{ parallèle}} = \sum_k \Lambda_k$
- Mise en série de perméances $\Lambda_{eq\text{ série}} = \frac{1}{\sum_k \frac{1}{\Lambda_k}}$

Inductances Flux totalisé $\Psi = Li$

- Inductance de champ principal $L_{h1} = N_1^2 \Lambda_{h1}$
- Inductance propre $L_{11} = \frac{\Psi_1}{i_1} = L_{h1} + L_{\sigma 1}$
- Inductance mutuelle $L_{21} = \frac{\Psi_2}{i_1} = N_1 N_2 \Lambda_{21}$
- Inductance de fuite $L_{\sigma 1} = N_1^2 \Lambda_{\sigma 1}$
- $\Lambda_{21} = \Lambda_{12}$
- $L_{21} = L_{12}$

Matériaux



Tension induite généralisée

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt}$$

Tension induite de saturation $\frac{\partial L}{\partial i} \frac{di}{dt}$

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + k_\phi \Omega + i \frac{\partial L}{\partial i} \frac{di}{dt}$$

Tension induite de mouvement

Tension induite de transformation

Perméance équivalente et longueur moyenne

$$\frac{1}{\Lambda_{eq}} = \sum_k \frac{l_k}{\mu_k S} = \frac{l_1}{\mu_{fer} S} + \frac{l_2}{\mu_{fer} S} + \frac{l_3}{\mu_{fer} S} + \frac{l_4}{\mu_0 S} + \frac{l_5}{\mu_{fer} S}$$

$$= \frac{\mu_{fer} S}{(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5)} + \frac{\mu_0 S}{\delta} = \frac{\mu_{fer} S}{(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + \mu_{rfer} \delta + l_5)}$$

$$\Lambda_{eq} = \frac{\mu_{fer} S}{(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + \mu_{rfer} \delta + l_5)}$$

Transformateur

Rapport de transformation

$$\underline{\ddot{u}} = \frac{N_1}{N_2} \frac{U_1}{U_2} = -\frac{I_2}{I_1}$$

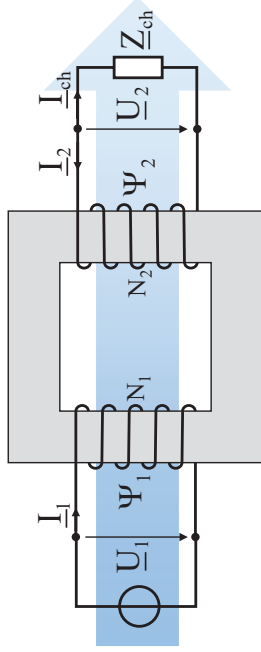
Grandeurs rapportées

Tension secondaire rapportée au primaire $\underline{U}'_2 = \ddot{u} \underline{U}_2$

Courant secondaire rapporté au primaire $\underline{I}'_2 = \frac{1}{\ddot{u}} \underline{I}_2$

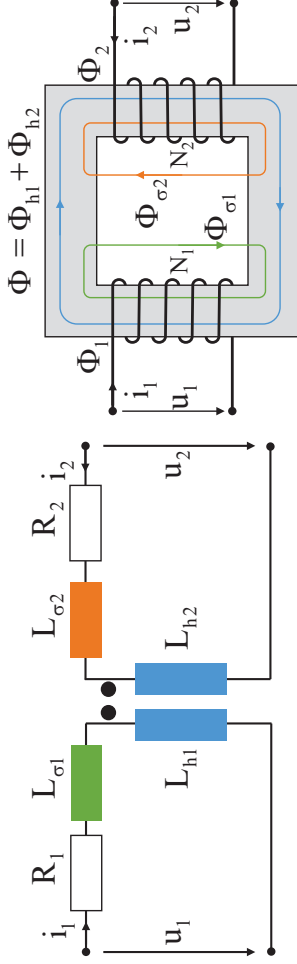
Impédance secondaire rapportée au primaire $\underline{Z}'_{ch} = \ddot{u}^2 \underline{Z}_{ch}$

Transformateur monophasé idéal



$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = \frac{N_1}{N_2} \underline{U}_2 \left(-\frac{N_2}{N_1} \right) \underline{I}_2^* = -\underline{U}_2 \underline{I}_2^* = -\underline{S}_2$$

Transformateur monophasé réel



$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \\ u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 = (L_{h1} + L_{\sigma 1}) i_1 + L_{12} i_2 \\ \Psi_2 = L_{22} i_2 + L_{21} i_1 = (L_{h2} + L_{\sigma 2}) i_2 + L_{21} i_1 \end{cases}$$

$$L_{\sigma 1} = N_1^2 \Lambda_{\sigma 1}$$

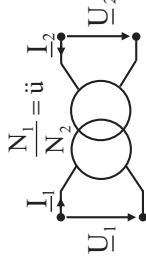
$$L_{h1} = N_1 N_1 \Lambda_h$$

$$L_{12} = L_{21} = N_1 N_2 \Lambda_h$$

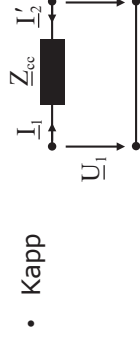
$$L_{h2} = N_2 N_2 \Lambda_h$$

$$L_{\sigma 2} = N_2^2 \Lambda_{\sigma 2}$$

Résumé schémas équivalents



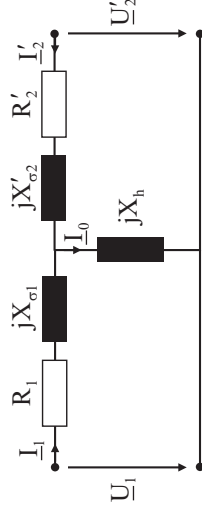
• Idéal



• Kapp

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{cc} &= R_{cc} + j X_{cc} \\ R_{cc} &= R_1 + R'_2 \\ X_{cc} &= X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} \end{aligned}$$

• Complet



$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j X_{h1} \underline{I}_1 + j X_{\sigma 1} \underline{I}_1 + j X_{h2} \underline{I}'_2 \\ \underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + j X_{h2} \underline{I}'_2 + j X'_{\sigma 2} \underline{I}'_2 + j X_{h1} \underline{I}_1 \end{cases}$$

Transformateur triphasé

Mais comment fait-on ?

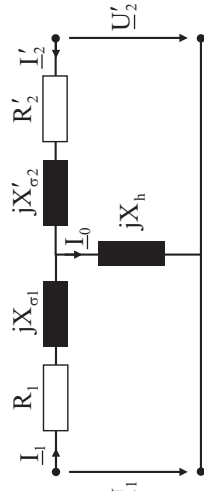


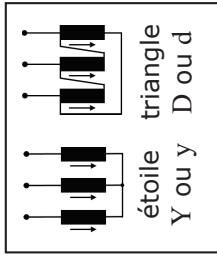
Schéma équivalent par **phase**

On donne les grandeurs de lignes, donc on adapte la tension et le courant en fonction du couplage.

Exemple : 20 kV / 6.6 kV

$$Yy \rightarrow \underline{U}_{1ph} = \frac{20}{\sqrt{3}} \text{ kV} \quad \underline{U}_{2ph} = \frac{6.6}{\sqrt{3}} \text{ kV}$$

$$Dy \rightarrow \underline{U}_{1ph} = 20 \text{ kV} \quad \underline{U}_{2ph} = \frac{6.6}{\sqrt{3}} \text{ kV}$$



Montage Dy souvent utilisé entre machine (basse tension, fort courant) et sous-station (haute tension, faible courant)

Éléments de base

Couple électromagnétique

- Interaction entre 2 champs magnétiques

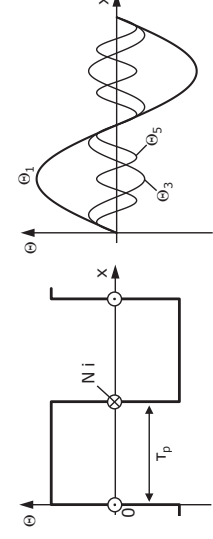
$$T_{em} = k \hat{B}_s \hat{B}_r p \sin \delta$$

↑
nombre de paires de pôles

2 conditions :

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

Champ d'induction dans l'entrefer



T_p : Pas polaire – Longueur d'un pôle le long de l'axe X

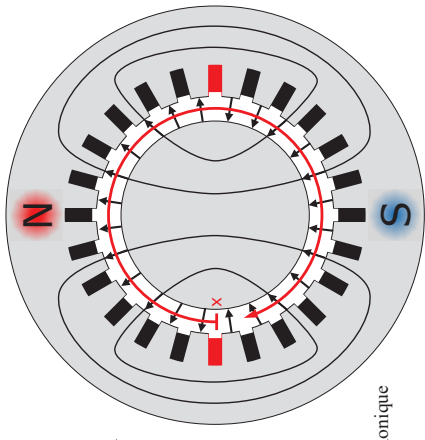
$$i(t) = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

$$\hat{\Theta}_v = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} N I$$

v : rang harmonique

$$\Theta(x, t) = \left(\hat{\Theta}_1 \sin \left(\frac{x}{\tau_p} \pi \right) + \hat{\Theta}_3 \sin \left(\frac{3x}{\tau_p} \pi \right) + \hat{\Theta}_5 \sin \left(\frac{5x}{\tau_p} \pi \right) + \dots \right) \cos \omega t$$

$$= \left(\sum_v \hat{\Theta}_v \sin \left(\frac{v x}{\tau_p} \pi \right) \right) \cos \omega t \longrightarrow B_\delta(x, t) = \mu_0 \frac{\Theta(x, t)}{2\delta}$$



Grandeurs relatives – Per Unit – [pu]

- Tension
 - Courant
 - Puissance
 - Couple
 - Impédance
 - ...
- S'affranchir des **vraies grandeurs** physiques en établissant des **grandes relatives** à des valeurs de références.
Les valeurs de références sont habituellement les grandeurs nominales.

Grandeurs nominales = ce pour quoi c'est dimensionné pour un fonctionnement « à vie ». Ne pas confondre avec les grandeurs max !
Données dans le datasheet ou déduisibles de la plaque signalétique.

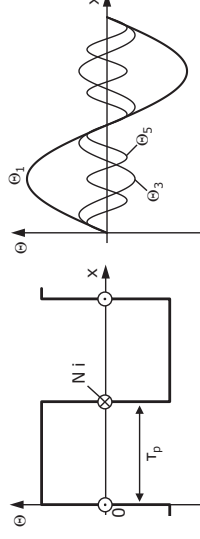
Exemple pour la tension et le courant au primaire d'un transformateur

- tension de référence U_{In} (valeur efficace)
- courant de référence I_{In} (valeur efficace)

$$u_1 = \frac{U_1}{U_{In}} \quad i_1 = \frac{I_1}{I_{In}} \quad \text{per unit} \quad x [pu] = \frac{X}{X_n}$$

Les « per unit » [pu] sont notés en minuscule et la valeur est comprise entre 0 et 1 pour un fonctionnement normal.

Champ d'induction dans l'entrefer



$$i(t) = \sqrt{2} I \cos \omega t \quad \hat{\Theta}_v = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} N I$$

$$\Theta(x, t) = \left(\sum_v \hat{\Theta}_v \sin \left(\frac{v x}{\tau_p} \pi \right) \right) \cos \omega t$$

$$\Theta(x, t) = \left(\sum_v \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} N I \sin \left(\frac{v x}{\tau_p} \pi \right) \right) \cos \omega t$$

$$B_\delta(x, t) = \mu_0 \frac{\Theta(x, t)}{2\delta}$$

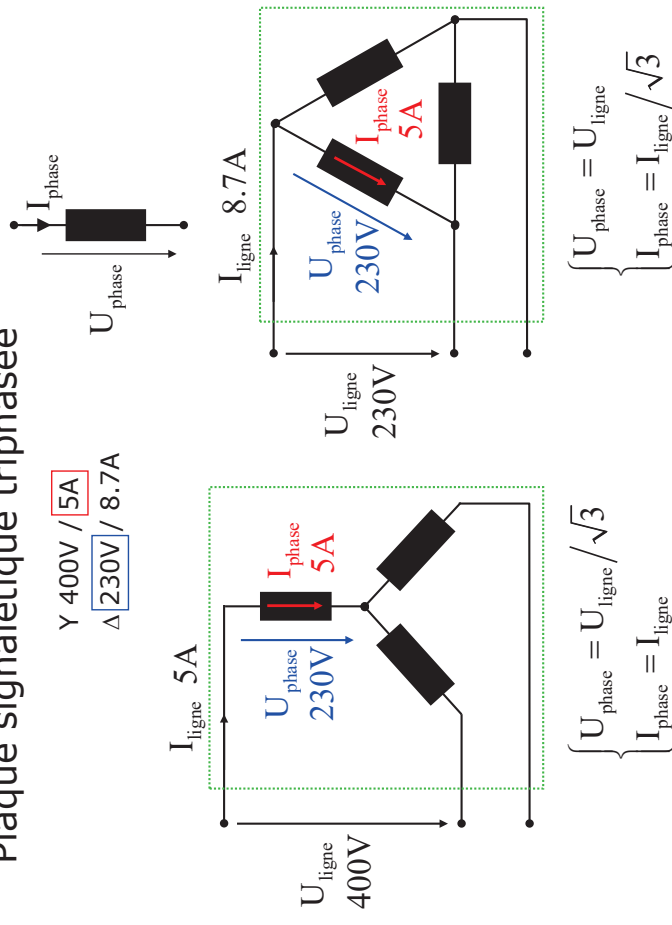
$$B_\delta(x, t) = \sum_v \frac{\mu_0}{\delta} \frac{4}{\pi \sqrt{2}} \frac{1}{v} N I \left(\sin \left(\frac{v x}{\tau_p} \pi \right) \right) \cos \omega t$$

Champ d'induction dans l'entrefer d'un enroulement triphasé

$$\begin{cases}
 \mathbf{B}_{\delta A}(x, t) = \left(\sum_v \hat{\mathbf{B}}_v \sin \left(v \frac{\pi x}{\tau_p} \right) \right) \cos(\omega t) & \text{avec } \hat{\mathbf{B}}_v = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{4 l N I}{\pi v \sqrt{2}} \\
 \mathbf{B}_{\delta B}(x, t) = \left(\sum_v \hat{\mathbf{B}}_v \sin \left(v \left(\frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right) \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\
 \mathbf{B}_{\delta C}(x, t) = \left(\sum_v \hat{\mathbf{B}}_v \sin \left(v \left(\frac{\pi x}{\tau_p} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right) \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\
 \mathbf{B}_{\delta t}(x, t) = \mathbf{B}_{\delta A}(x, t) + \mathbf{B}_{\delta B}(x, t) + \mathbf{B}_{\delta C}(x, t) = \frac{3}{2} \sum_v \hat{\mathbf{B}}_v \sin \left(\frac{v \pi x}{\tau_p} \right) \sin \left(\frac{v \pi x}{\tau_p} \pm \omega t \right)
 \end{cases}$$

↑
1.5 fois plus grand que le fondamental de chaque champ pulsant

Rappel sur les couplages étoile-triangle Plaque signalétique triphasée



Champ tournant généré avec du biphasé

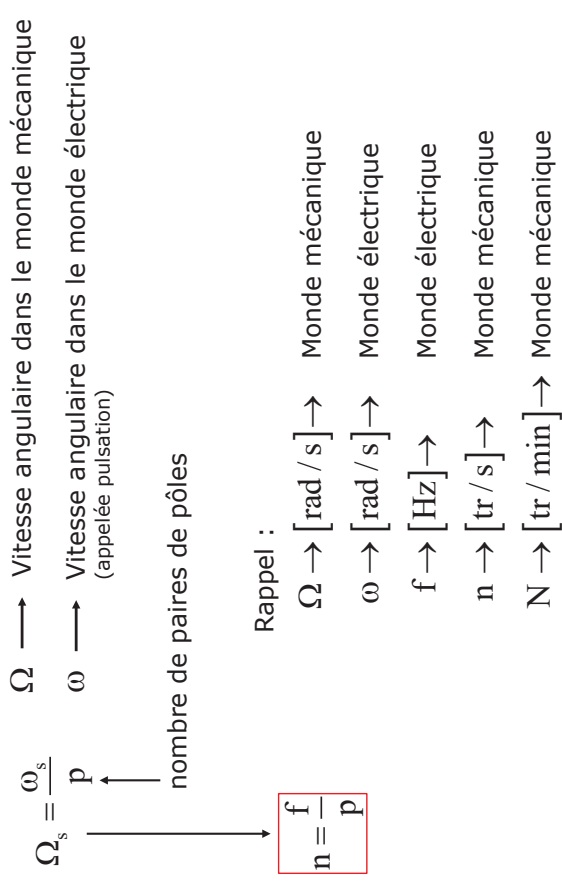
Décàlé de 90° temporel et géométrique

$$\begin{cases}
 \mathbf{B}_{\delta A}(x, t) = \left(\sum_v \hat{\mathbf{B}}_v \sin \left(v \frac{\pi x}{\tau_p} \right) \right) \cos(\omega t) \\
 \mathbf{B}_{\delta B}(x, t) = \left(\sum_v \hat{\mathbf{B}}_v \sin \left(v \left(\frac{\pi x}{\tau_p} \pm \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cos \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) \\
 \mathbf{B}_{\delta t}(x, t) = \mathbf{B}_{\delta A}(x, t) + \mathbf{B}_{\delta B}(x, t) = \sum_v \hat{\mathbf{B}}_v \sin \left(\frac{v \pi x}{\tau_p} \right) \sin \left(\frac{v \pi x}{\tau_p} \pm \omega t \right)
 \end{cases}$$

Triphasé

$$\mathbf{B}_{\delta t}(x, t) = \mathbf{B}_{\delta A}(x, t) + \mathbf{B}_{\delta B}(x, t) + \mathbf{B}_{\delta C}(x, t) = \frac{3}{2} \sum_v \hat{\mathbf{B}}_v \sin \left(\frac{v \pi x}{\tau_p} \right) \sin \left(\frac{v \pi x}{\tau_p} \pm \omega t \right)$$

Vitesse et nombre de paires de pôles



Machine asynchrone

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.

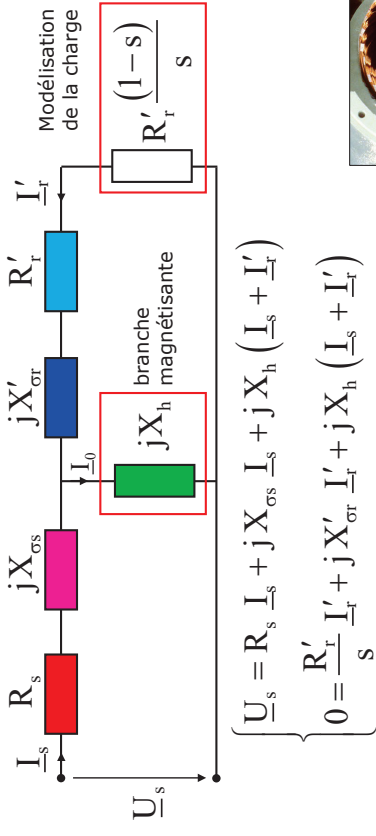
Il est noté s et est sans dimension.

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

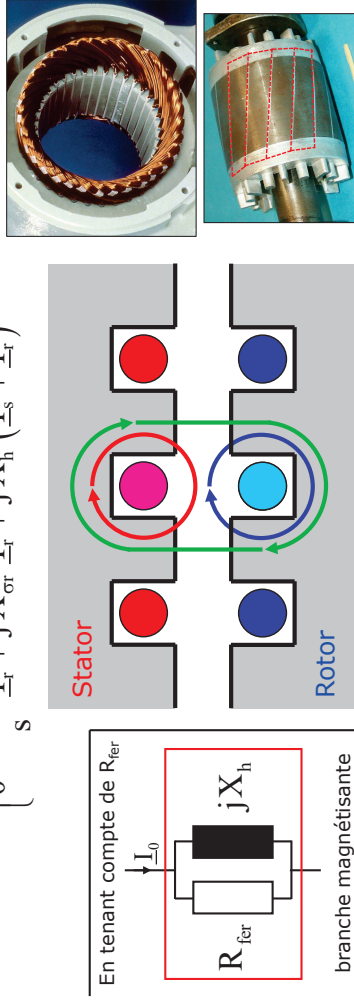
\uparrow [rad/s] méca. \uparrow [tr/s] méca. \uparrow [tr/min] méca. \uparrow [Hz] élec.

$$n = \frac{f}{p} \leftarrow \text{nombre de paires de pôles}$$

Schéma équivalent de la machine asynchrone



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



Equations de tension

alimentation sinusoïdale

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

grandeurs rapportées au primaire

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

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

$$\begin{aligned} \omega_r &= s \omega_s \longrightarrow X_{gs} = \omega_s L_{gs} \\ &\longrightarrow X_h = \omega_s L_{hs} \\ &\longrightarrow X'_{gr} = \omega_s L'_{gr} \end{aligned}$$

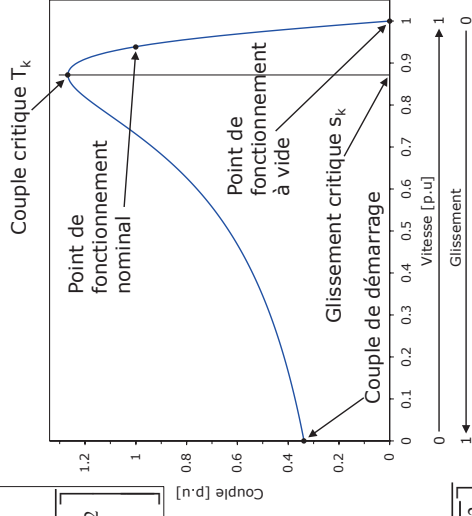
$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{gs} \underline{I}_s + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \\ 0 = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{gr} \underline{I}'_r + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \end{cases}$$

Caractéristique de couple

$$\underline{U}_c = \underline{U}_s \frac{jX_h}{R_s + j(X_{gs} + X_h)} \quad Z_c = jX_h \frac{R_s + jX_{gs}}{R_s + j(X_{gs} + X_h)} = R_c + jX_c$$

$$T_{em} = \frac{3 U_c^2 \frac{R'_r}{s}}{\Omega_s \left[\left(R_c + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_c + X'_{gr})^2 \right]}$$

Indice 'c' pour équivalent de Thévenin

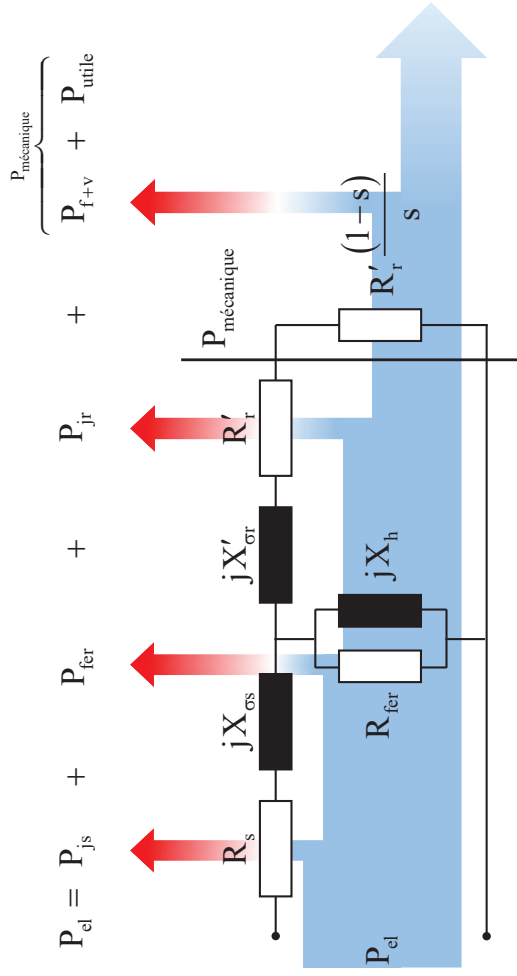


Couple et glissement critique

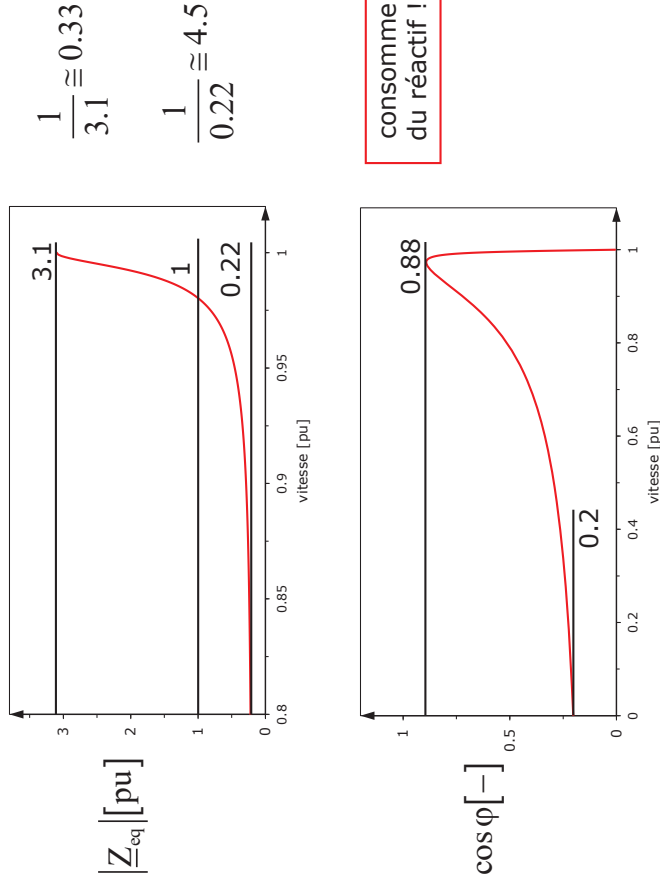
$$s_k = \frac{R'_r}{\sqrt{R_c^2 + (X_c + X'_{gr})^2}}$$

$$T_k = \frac{3U_c^2}{2\Omega_s} \frac{R'_r}{R_c + \sqrt{R_c^2 + (X_c + X'_{gr})^2}}$$

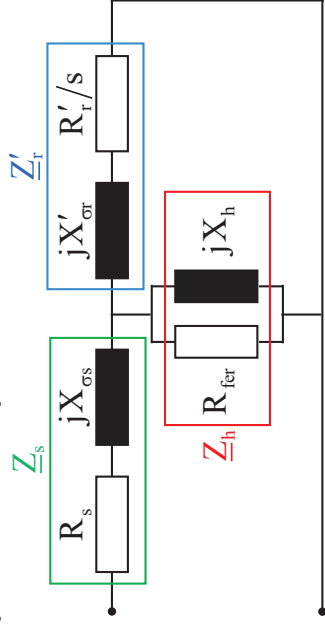
Bilan de puissance – Moteur



Impédance équivalente en fonction du glissement



Impédance équivalente



$$Z_{eq} = Z_s + \frac{Z_h Z_r}{Z_h + Z_r}$$

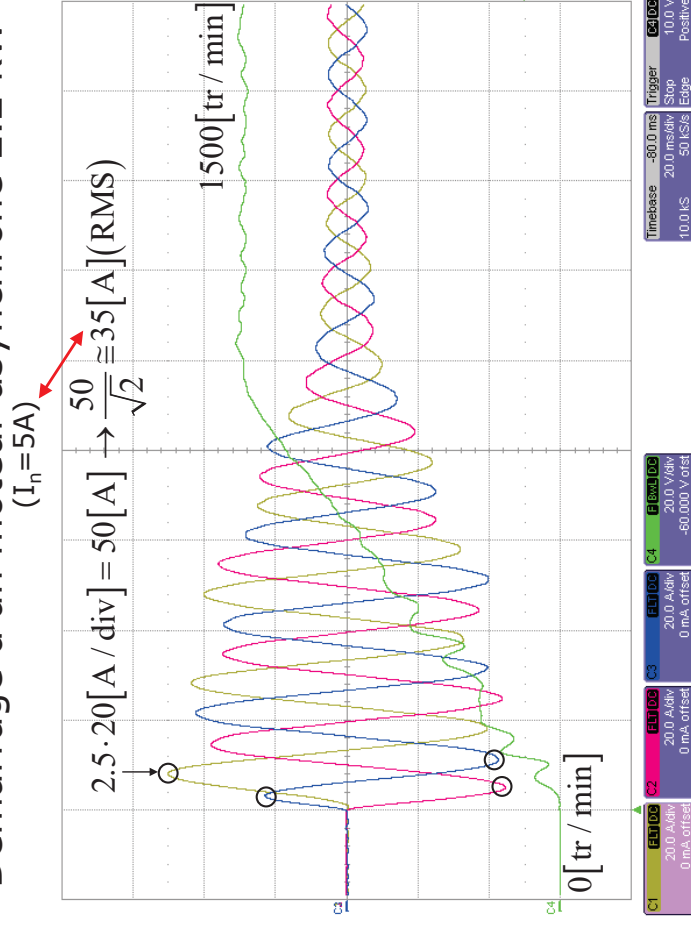
$$Z_s = R_s + jX_{os}$$

$$Z_r = \frac{R_r' + jX_{or}'}{s}$$

$$Z_h = jX_h \longrightarrow R_{fer} \gg X_h$$

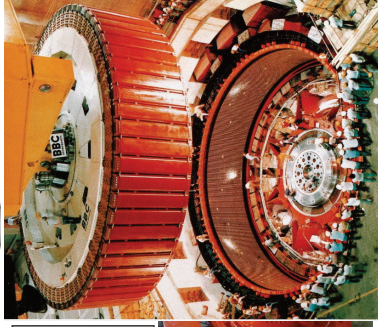
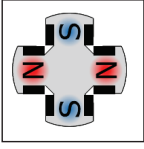
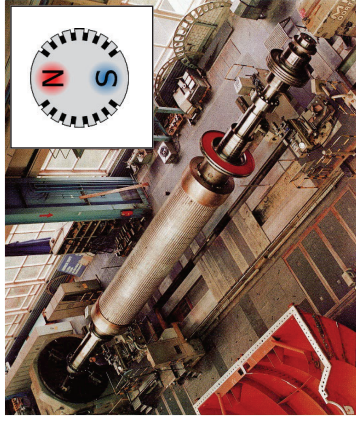
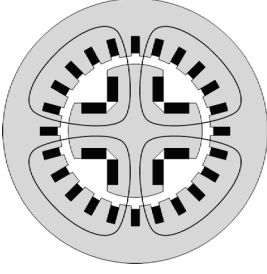
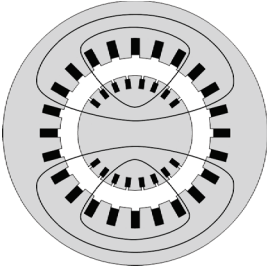
$$Z_{eq} = R_s + jX_{os} + \frac{jX_h \left(\frac{R_r'}{s} + jX_{or}' \right)}{jX_h + \left(\frac{R_r'}{s} + jX_{or}' \right)}$$

Démarrage d'un moteur asynchrone 2.2 kW



Machine synchrone

Machines à pôles lisses et à pôles saillants



Equation de tension et schéma équivalent

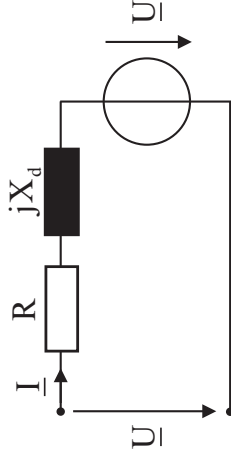
$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt}$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + u_i$$

$$\underline{U} = R \underline{I} + jX_d \underline{I} + \underline{U}_i$$

$X_d = X_c + X_h$
tension induite de mouvement

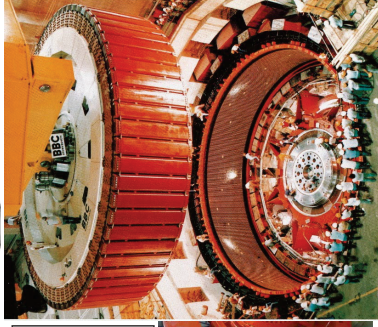
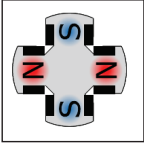
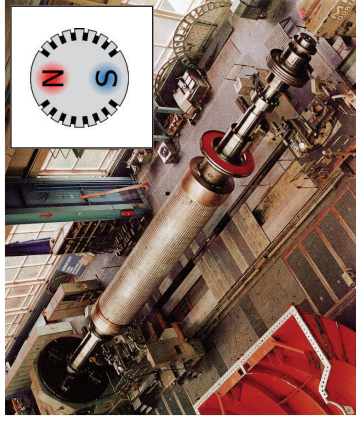
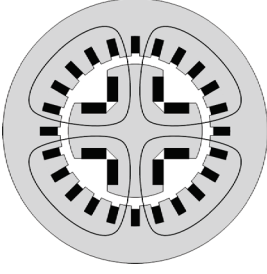
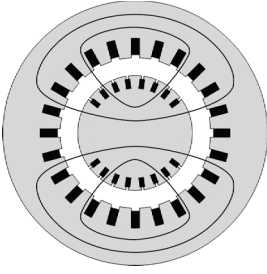
$$\underline{U}_i = k_\phi \Omega = k_{fr} I_f \Omega$$



dans la moyenne et grande puissance R est souvent négligée
 $R \ll X_d$

Tension induite de mouvement

la tension induite de mouvement est proportionnelle à la vitesse de rotation et au courant d'excitation



Tension induite de mouvement

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} = \sum \dot{\Phi}_v \sin \omega_v t$$

$$U_i = \frac{1}{\sqrt{2}} N \omega \hat{\Phi} = \sqrt{2} \pi N f \hat{\Phi} \cong 4.44 N f \hat{\Phi}$$

$$\Omega = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p} \text{ [rad/s]}$$

$$U_i = \sqrt{2} \pi N \frac{\Omega p}{2\pi} \hat{\Phi} = N \Omega p \frac{\hat{\Phi}}{\sqrt{2}} = N \Omega p \Phi = k_\phi \Omega = k_{fr} I_f \Omega$$

$$\underline{U}_i = k_\phi \Omega = k_{fr} I_f \Omega$$

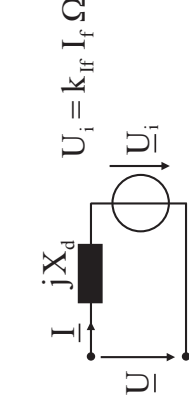
la tension induite de mouvement est proportionnelle à la vitesse de rotation et au courant d'excitation

Puissances triphasées

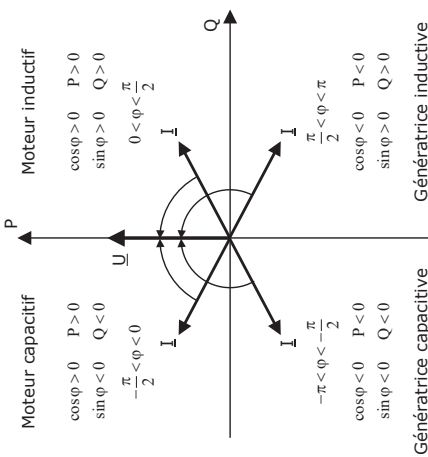
Puissance apparente $S = 3 U_{ph} I_{ph} = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} = \sqrt{P^2 + Q^2}$ [VA]

Puissance active $P = 3 U_{ph} I_{ph} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} \cos \varphi$ [W]

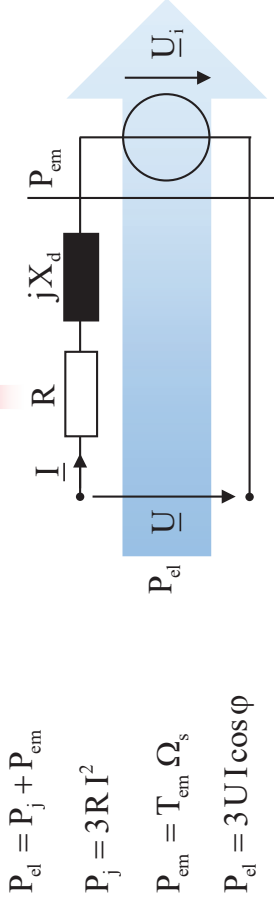
Puissance réactive $Q = 3 U_{ph} I_{ph} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} \sin \varphi$ [VAR]



$$\underline{U} - \underline{U}_i = \underline{I} jX_d$$



Bilan de puissance et Couple électromagnétique



$$P_{el} = P_j + P_{em}$$

$$P_j = 3RI^2$$

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

$$P_{el} = 3UI \cos \varphi$$

φ déphasage entre \underline{U} et \underline{I}

$$P_{em} = \Omega_s T_{em} = P_{el} - P_j = 3UI \cos \varphi - 3RI^2$$

$$T_{em} = (3UI \cos \varphi - 3RI^2) \frac{1}{2\pi n_s} \xrightarrow{R \ll X_d} T_{em} = \frac{3UI \cos \varphi}{2\pi n_s}$$

Couple électromagnétique

$$\underline{U} = jX_d \underline{I} + \underline{U}_i \xrightarrow{U \text{ réel}} U = jX_d I + U_i$$

$$\overline{AB} = X_d I \cos \varphi = U_i \sin \delta$$

$$U = jX_d I (\cos \varphi - j \sin \varphi) + U_i (\cos \delta - j \sin \delta)$$

$$U = X_d I (\sin \varphi + j \cos \varphi) + U_i (\cos \delta - j \sin \delta)$$

les parties imaginaires doivent s'annuler car U est réel

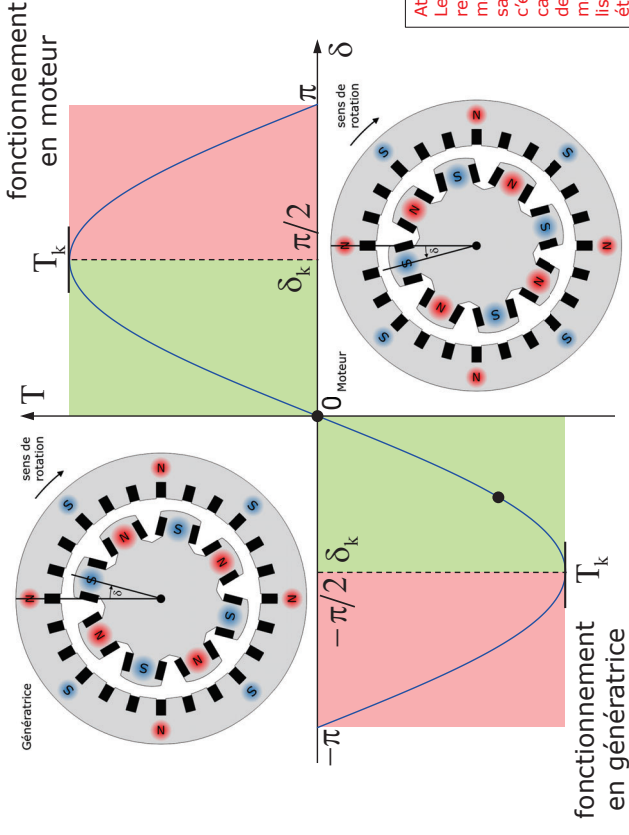
$$X_d I \cos \varphi = U_i \sin \delta \rightarrow I \cos \varphi = \frac{U_i \sin \delta}{X_d}$$

$$P_{em} = T_{em} \Omega_s = 3UI \cos \varphi = 3 \frac{UU_i \sin \delta}{X_d}$$

$$T_{em} = 3 \frac{UU_i}{2\pi n_s X_d} \sin \delta \rightarrow T_k = 3 \frac{UU_i}{2\pi n_s X_d}$$

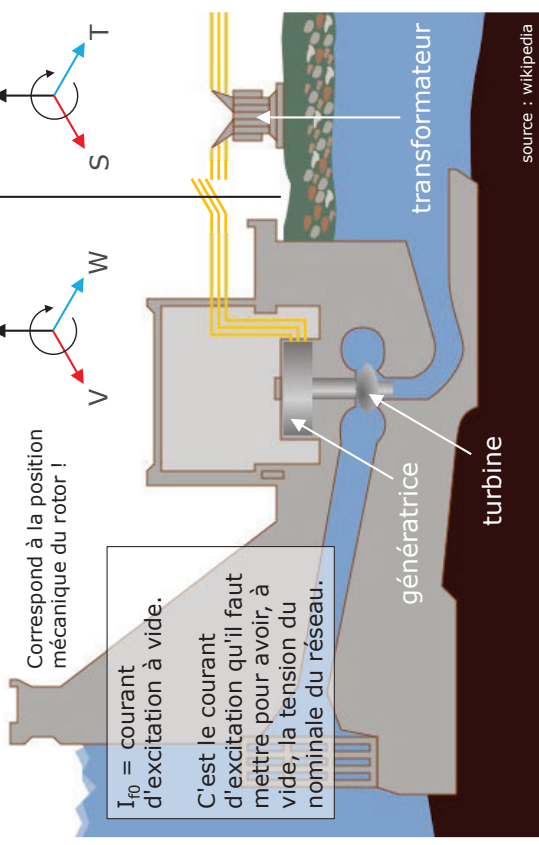
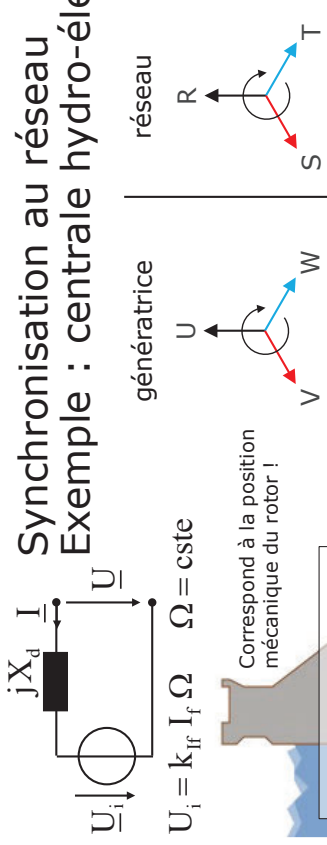
Caractéristique de couple

$$T_{em} = 3 \frac{UU_i}{2\pi n_s X_d} \sin \delta \quad T_{em} = k \hat{B}_s \hat{B}_r p \sin \delta$$

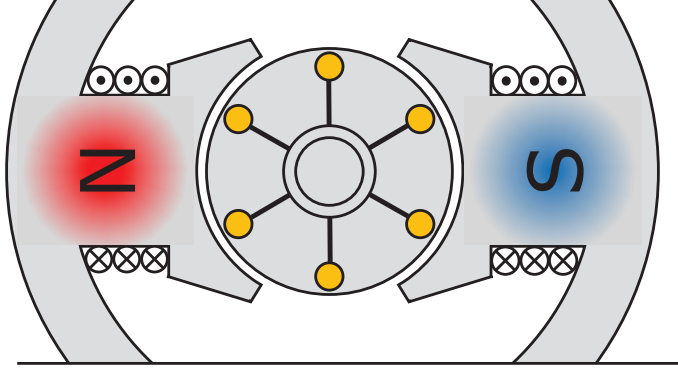


Attention : Les images représentent des machines à pôles saillants mais c'est bien la caractéristique de couple d'une machine à pôles lisses qui est étudiée ici.

Synchronisation au réseau Exemple : centrale hydro-électrique



Tension induite de mouvement



$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \text{ avec } \Phi = \sum \hat{\Phi}_v \sin \omega_v t$$

$$U_{i-} = \frac{1}{\sqrt{2}} N \omega \hat{\Phi} = \sqrt{2} \pi N f \hat{\Phi}$$

$$U_{i+} = \sqrt{2} U_{i-} = \sqrt{2} \sqrt{2} \pi N f \hat{\Phi} = 2\pi N f \hat{\Phi}$$

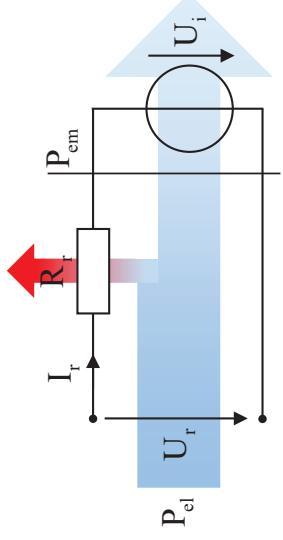
$$\Omega = \frac{2\pi f}{p} \text{ [rad/s]}$$

$$U_i = 2\pi N \frac{\Omega p}{2\pi} \hat{\Phi} = N \Omega p \hat{\Phi}$$

la tension induite est proportionnelle à la vitesse de rotation

$$\rightarrow \boxed{U_i = k_\phi \Omega}$$

Bilan de puissance



$$P_{el} = P_j + P_{em}$$

$$P_{el} = U_r I_r$$

$$P_j = R_r I_r^2$$

$$P_{em} = U_i I$$

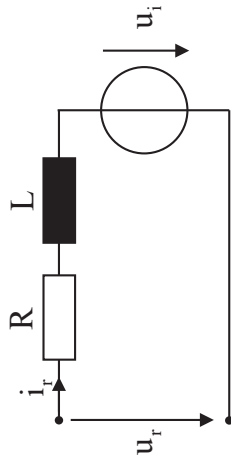
Couple électromagnétique

$$P_{mec} = T_{em} \Omega = U_i I_r$$

$$T_{em} = \frac{P_{mec}}{\Omega} = \frac{U_i I_r}{\Omega} = \frac{k_\phi \Omega I_r}{\Omega} \rightarrow \boxed{T_{em} = k_\phi I_r}$$

le couple est proportionnel au courant I_r

Equation de tension et schéma équivalent



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

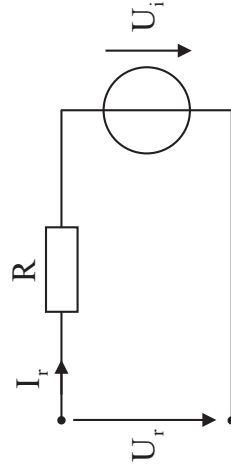
$$\frac{d\Psi}{dt} = L_r \frac{di_r}{dt} + u_i$$

$$u_r = R_r i_r + L_r \frac{di_r}{dt} + u_i$$

régime permanent $\rightarrow U_r = R_r I_r + U_i$

$$U_i = k_\phi \Omega$$

$$U_r = R_r I_r + k_\phi \Omega$$



Moteur à aimants permanents

$$\boxed{U = RI + U_i}$$

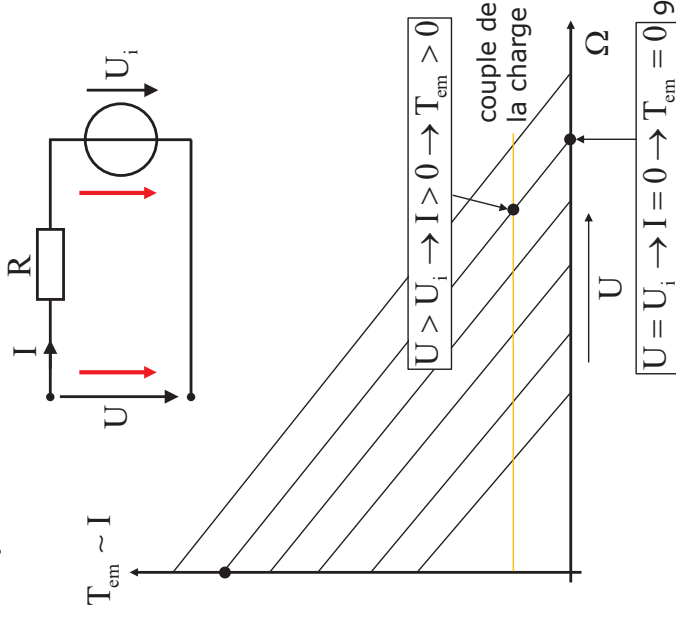
$$\boxed{U_i = k_\phi \Omega}$$

$$\boxed{T_{em} = k_\phi I}$$

$$U = RI + k_\phi \Omega$$

$$I = \frac{U - k_\phi \Omega}{R} = \frac{T_{em}}{k_\phi}$$

$$T_{em} = k_\phi \frac{U - k_\phi \Omega}{R}$$



$$\boxed{U = U_i \rightarrow I = 0 \rightarrow T_{em} = 0}$$

Démarrage d'un moteur à courant continu 1.8 kW

Démarrage à demi tension 100V (750 tr/min à vide)

