

Circuit magnétique

Potentiel magnétique (tension)

$$\Theta = N i = H l$$

Flux d'induction magnétique (courant)

$$\Phi = B S$$

longueur

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 $\Psi = L i$

Inductance propre $L_{11} = \frac{\Psi_1}{i_1} = L_{h1} + L_{\sigma 1}$

Inductance de champ principal $L_{h1} = N_1^2 \Lambda_{h1}$

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

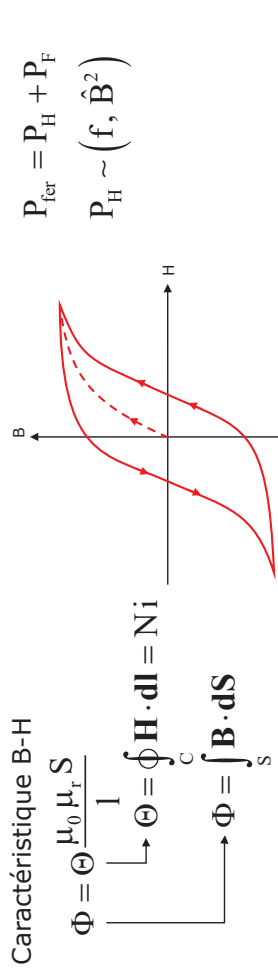
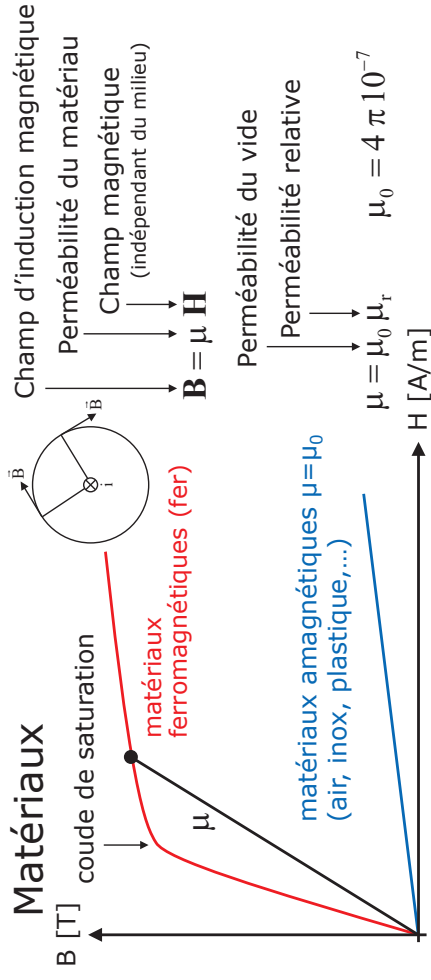
Inductance mutuelle $L_{21} = \frac{\Psi_2}{i_1} = N_1 N_2 \Lambda_{21}$

$$\Lambda_{21} = \Lambda_{12}$$

$$L_{21} = L_{12}$$

Facteur de couplage $k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11} L_{22}}} \leq 1$

Facteur de dispersion $\sigma = 1 - k^2 = 1 - \frac{L_{12}^2}{L_{11} L_{22}} \leq 1$



Tension induite généralisée

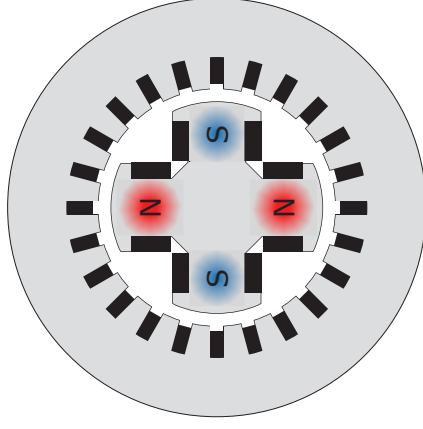
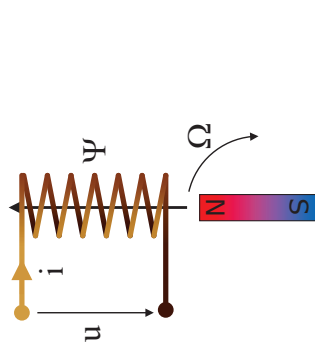
$$u = R i + \frac{d\Psi}{dt}$$

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

Tension induite de transformation

Tension induite de mouvement

Tension induite de saturation

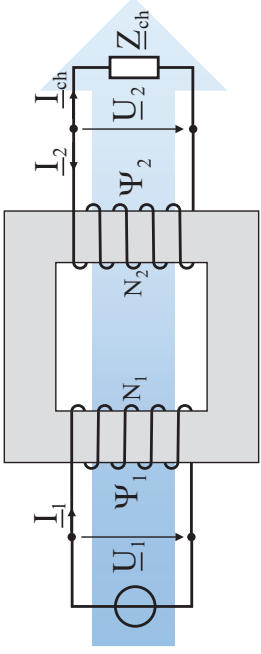


Transformateur

Grandeurs rapportées

Rapport de transformation	Tension secondaire rapportée au primaire
$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = -\frac{I_2}{I_1}$	$\underline{U}'_2 = \ddot{u} \underline{U}_2$
	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



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

Résumé schémas équivalents

- Idéal
- Kapp

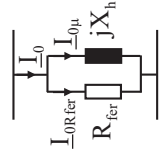
$$\underline{Z}_{cc} = \underline{R}_{cc} + j \underline{X}_{cc}$$

$$\underline{R}_{cc} = \underline{R}_1 + \underline{R}'_2$$

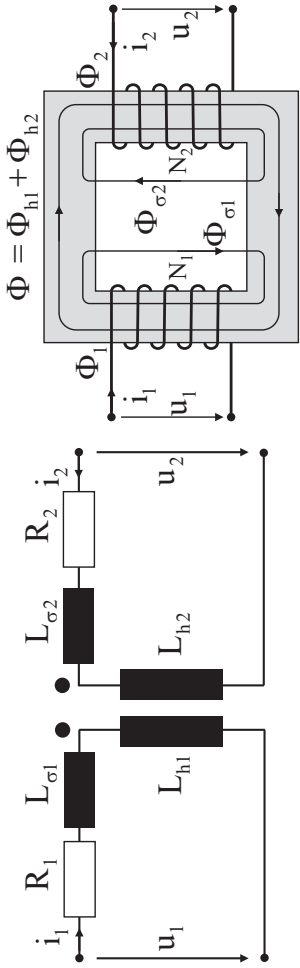
$$\underline{X}_{cc} = \underline{X}_{\sigma 1} + \underline{X}'_{\sigma 2}$$
- Complet

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

En per unit
 $\underline{Z}_{cc} = \underline{u}_{cc}$



Transformateur monophasé réel



$$\begin{cases} \underline{u}_1 = \underline{R}_1 \underline{i}_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \\ \underline{u}_2 = \underline{R}_2 \underline{i}_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \end{cases}$$

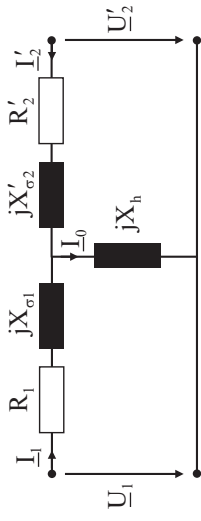
$$\begin{cases} \Psi_1 = L_{11} \underline{i}_1 + L_{12} \underline{i}_2 = (\underline{L}_{h1} + \underline{L}_{\sigma 1}) \underline{i}_1 + \underline{L}_{12} \underline{i}_2 \\ \Psi_2 = L_{22} \underline{i}_2 + L_{21} \underline{i}_1 = (\underline{L}_{h2} + \underline{L}_{\sigma 2}) \underline{i}_2 + \underline{L}_{21} \underline{i}_1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \underline{L}_{\sigma 1} &= N_1^2 \underline{\Lambda}_{\sigma 1} \\ \underline{L}_{h1} &= N_1 N_2 \underline{\Lambda}_h \\ \underline{L}_{12} &= \underline{L}_{21} = N_1 N_2 \underline{\Lambda}_h \\ \underline{L}_{h2} &= N_2 N_2 \underline{\Lambda}_h \\ \underline{L}_{\sigma 2} &= N_2^2 \underline{\Lambda}_{\sigma 2} \end{aligned}$$

Transformateur triphasé

Mais comment fait-on ?

Schéma équivalent par **phase**

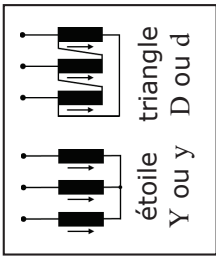


On donne les grandeurs de lignes, donc on adapte la tension et le courant en fonction du couplage.

Exemple : 20 kV / 6.6 kV

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

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



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

Eléments de base

Couple électromagnétique

- Interaction entre 2 champs magnétiques
- Action d'un champ magnétique sur une structure à réluctance variable

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

↑
nombre de paires de pôles

$$T_{em} = k \hat{B}_s^2 p \sin(2\delta)$$

↑
nombre de paires de pôles

2 conditions :

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

2 conditions :

- Même nombre de pièces saillantes que de pôles (ou multiple)
- Même vitesse

Grandeurs relatives – Per Unit – [pu]

- Tension
 - Courant
 - Puissance
 - Couple
 - Impédance
 - ...
- S'affranchir des **vraies grandeurs** physiques en établissant des **grands relatifs** 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.

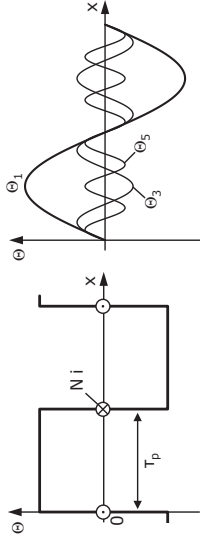
Exemple pour la tension et le courant au primaire d'un transformateur

- 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



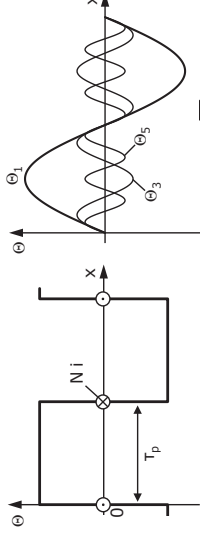
$$i(t) = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

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

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

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

Champ d'induction dans l'entrefer



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

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

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

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{\delta A}(x, t) = \left(\sum_v \hat{B}_v \sin \left(v \frac{\pi x}{\tau_p} \right) \right) \cos(\omega t) \\ B_{\delta B}(x, t) = \left(\sum_v \hat{B}_v \sin \left(v \frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ B_{\delta C}(x, t) = \left(\sum_v \hat{B}_v \sin \left(v \frac{\pi x}{\tau_p} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{array} \right. \quad \text{avec } \hat{B}_v = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{4}{\pi} \frac{1}{v} \frac{NI}{\sqrt{2}}$$

Décalié de 90° temporel
et géométrique

Champ tournant généré avec du biphase

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{\delta A}(x, t) = \left(\sum_v \hat{B}_v \sin \left(v \frac{\pi x}{\tau_p} \right) \right) \cos(\omega t) \\ B_{\delta B}(x, t) = \left(\sum_v \hat{B}_v \sin \left(v \frac{\pi x}{\tau_p} \pm \frac{\pi}{2} \right) \right) \cos \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) \end{array} \right.$$

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

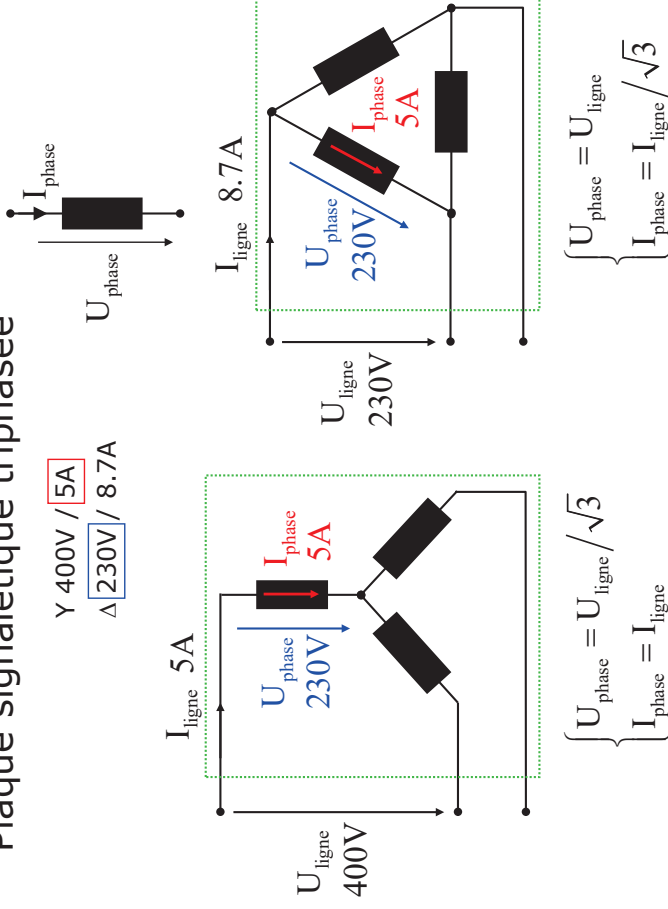
Triphasé

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

1.5 fois plus grand que le fondamental
de chaque champ pulsant

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

Rappel sur les couplages étoile-triangle Plaque signalétique triphasée



Vitesse et nombre de paires de pôles

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad \Omega \rightarrow \text{Vitesse angulaire dans le monde mécanique}$$

$$\omega \rightarrow \text{Vitesse angulaire dans le monde électrique (appelée pulsation)}$$

nombre de paires de pôles

Rappel :

$$\begin{array}{ll} \Omega \rightarrow [\text{rad/s}] \rightarrow & \text{Monde mécanique} \\ \omega \rightarrow [\text{rad/s}] \rightarrow & \text{Monde électrique} \\ f \rightarrow [\text{Hz}] \rightarrow & \text{Monde électrique} \\ n \rightarrow [\text{tr/s}] \rightarrow & \text{Monde mécanique} \\ N \rightarrow [\text{tr/min}] \rightarrow & \text{Monde mécanique} \end{array}$$

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

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

Schéma équivalent de la machine asynchrone

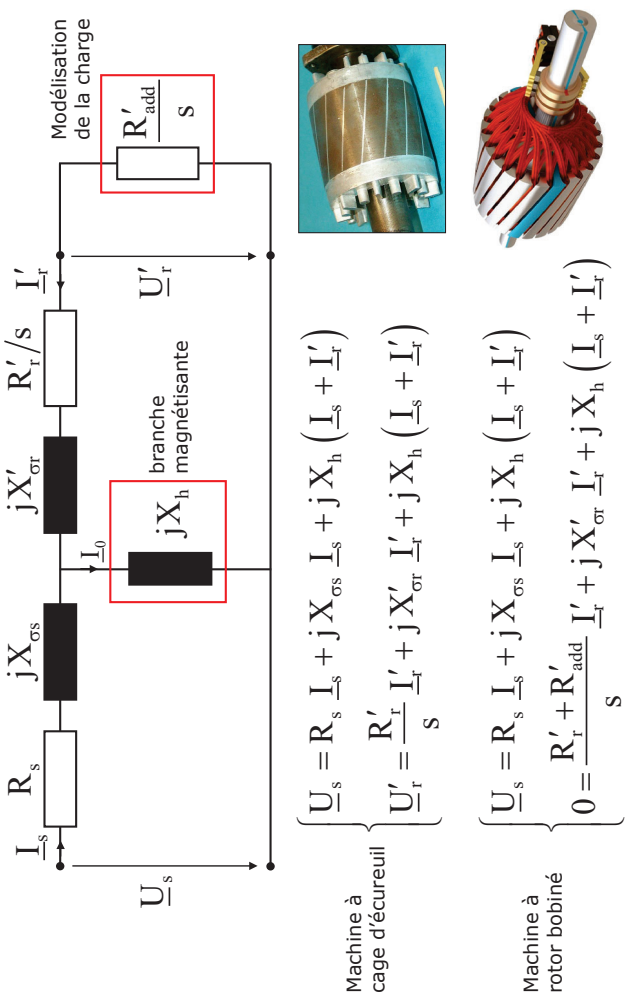
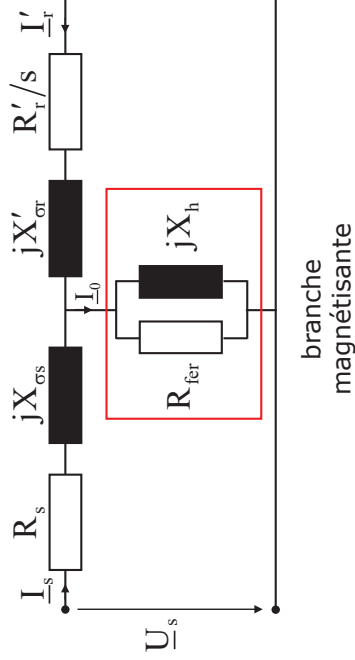


Schéma équivalent d'une machine asynchrone à cage d'écureuil en tenant compte de Rfer



Caractéristique de couple

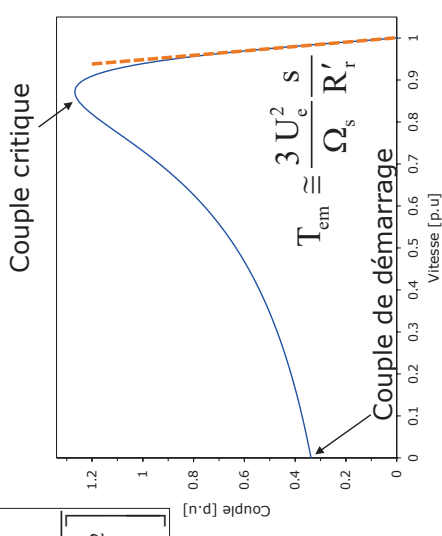
$$\underline{U}_e = \underline{U}_s \frac{jX_h}{R_s + j(X_{\sigma s} + X_h)} \quad \underline{Z}_e = jX_h \frac{R_s + jX_{\sigma s}}{R_s + j(X_{\sigma s} + X_h)} = R_e + jX_e$$

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

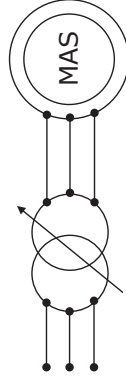
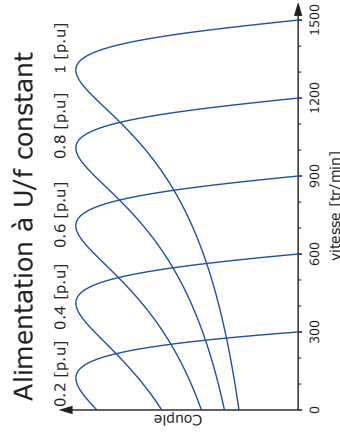
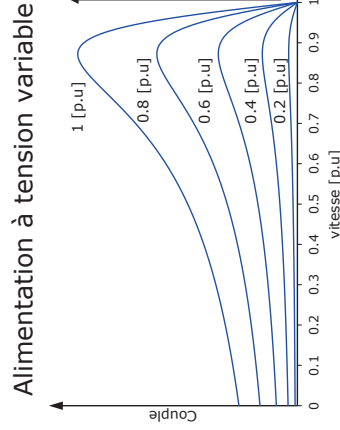
Couple et glissement critique

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

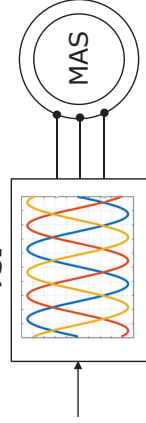
$$T_k = \frac{3 U_e^2}{2 \Omega_s \left[R_e + \sqrt{R_e^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2} \right]}$$



Alimentation à tension et fréquence variables

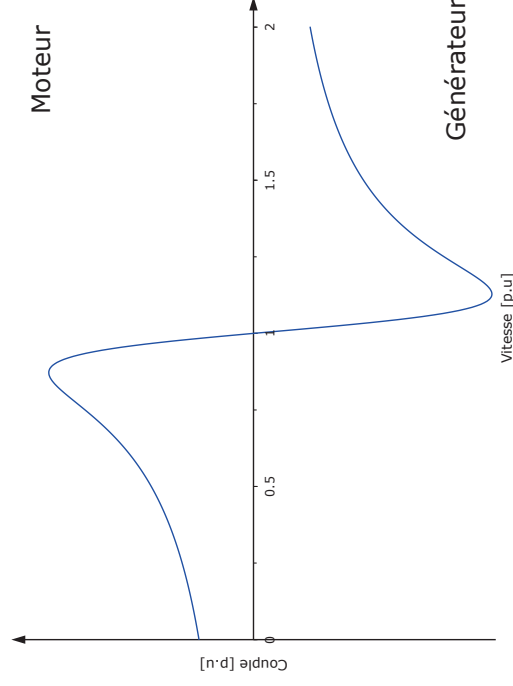


Permet de faire varier U_s en amplitude



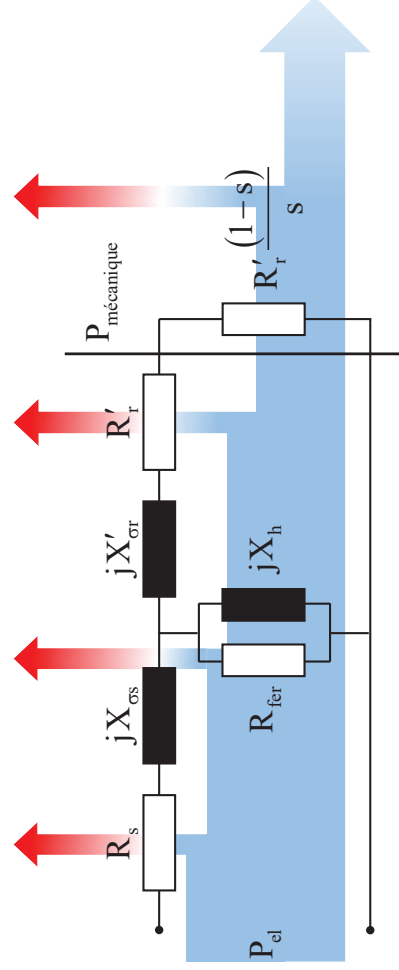
Permet de générer un système triphasé (Us) variable en amplitude et en fréquence

Caractéristique de couple et modes de fonctionnement



Bilan de puissance – Moteur

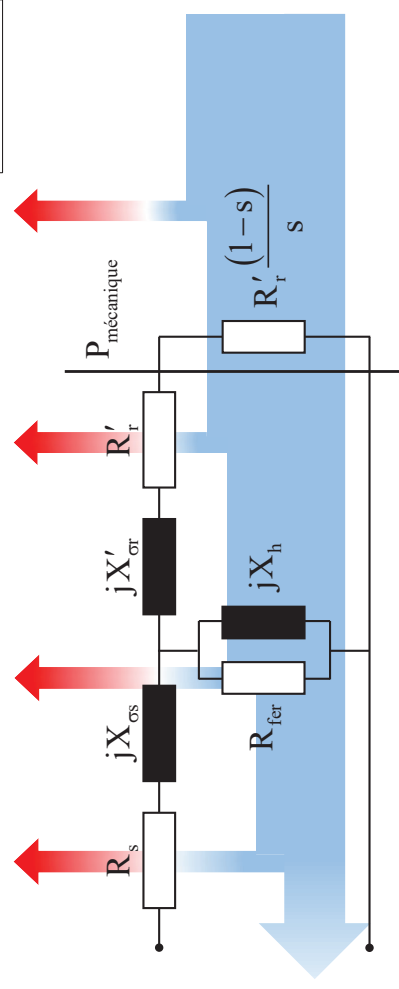
$$P_{el} = P_{js} + P_{fer} + P_{jr} + P_{f+v} + \underbrace{P_{mécanique}}_{P_{f+v} + P_{utile}}$$



Bilan de puissance – Génératrice

$$P_{el} = P_{js} + P_{fer} + P_{jr} + P_{f+v} + \underbrace{P_{mécanique}}_{P_{f+v} + P_{utile}}$$

P_{utile} et P_{el} sont négatifs

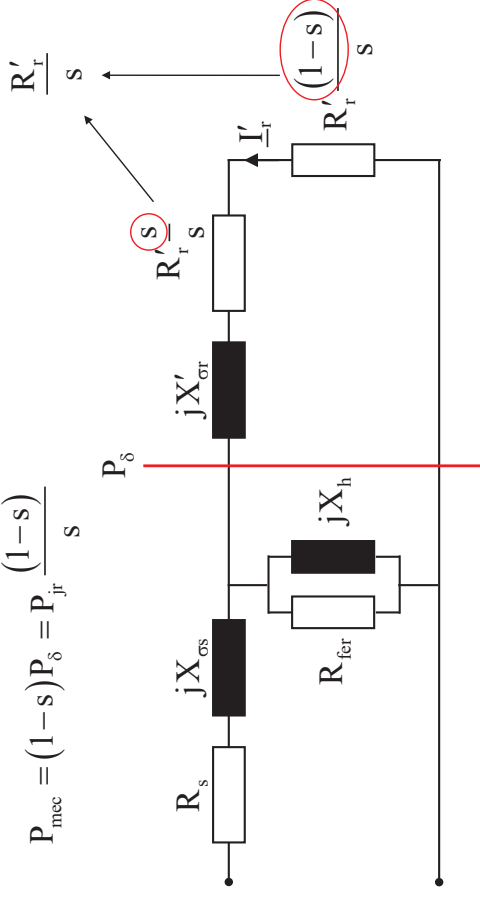


Puissance d'entrefer

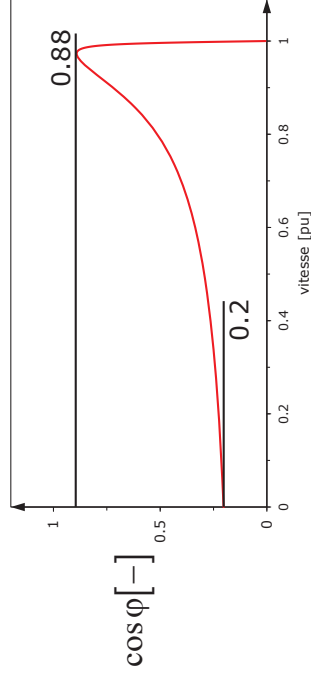
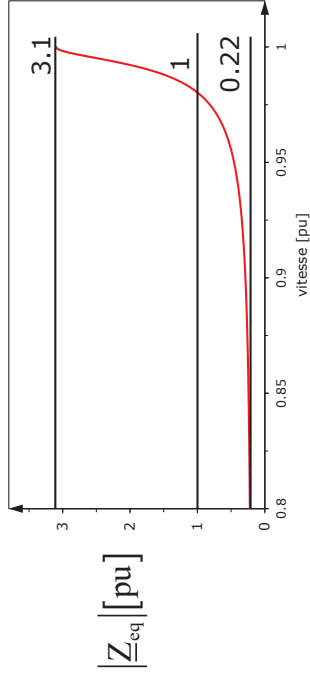
$$P_{\delta} = P_{el} - P_{js} - P_{fer} = P_{mec} + P_{jr} = 3 \frac{R'_r}{s} I_r'^2$$

$$P_{jr} = s P_{\delta}$$

$$P_{mec} = (1-s) P_{\delta} = P_{jr} \frac{(1-s)}{s}$$

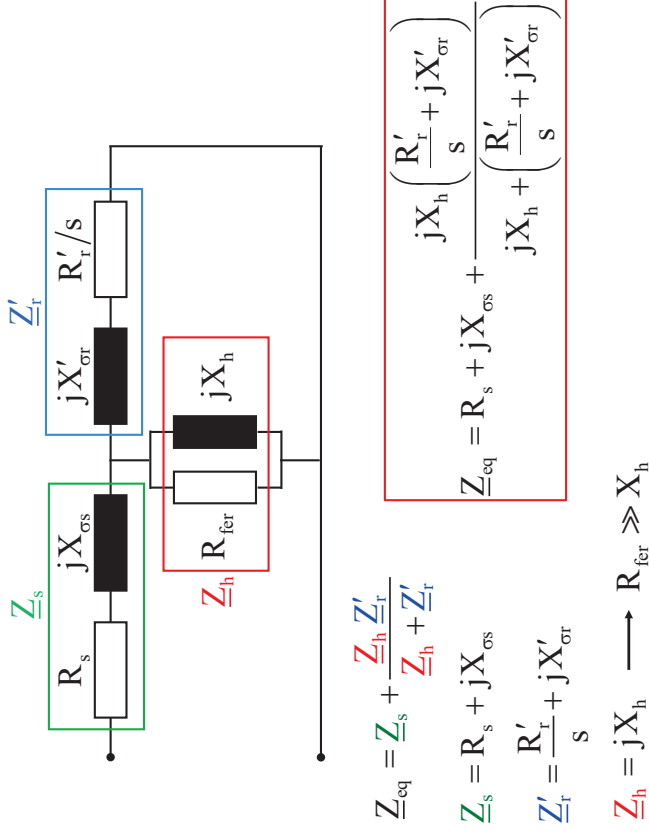


Impédance équivalente en fonction du glissement



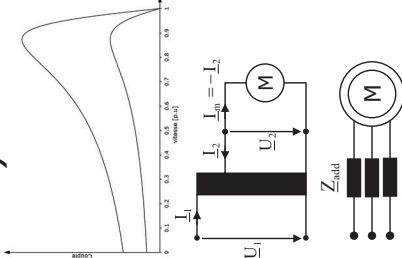
consomme
du réactif !

Impédance équivalente



Différentes techniques existent pour réduire le courant au démarrage (in rush current)

- Démarrage étoile-triangle
 - Un moteur prévu pour fonctionner en triangle est câblé en étoile lors du démarrage.
- Démarrage par autotransformateur
 - Un transformateur abaisseur de tension est inséré entre le réseau et le moteur.
- Démarrage par impédance additionnelle
 - Une résistance ou une inductance est ajoutée en série avec le stator.



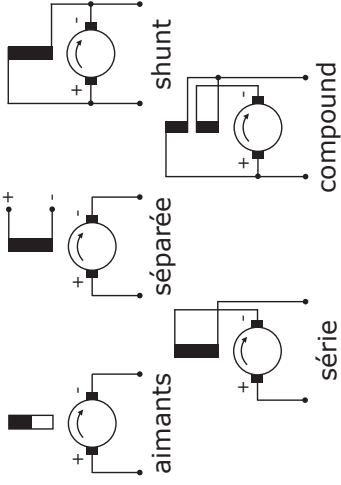
- Soft starter
 - Utilisation d'un convertisseur de puissance possédant des triacs. Contrôle du courant (limitation du courant).



Machine à courant continu

Différents types d'excitation

- Aimants permanents
- Electrique
 - Séparée
 - Shunt (parallèle)
 - Série
 - Compound (hyper ou hypo)



Pour l'excitation :

$$u_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \xrightarrow{\text{régime permanent}} U_f = R_f I_f$$

Equation de tension et schéma équivalent

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

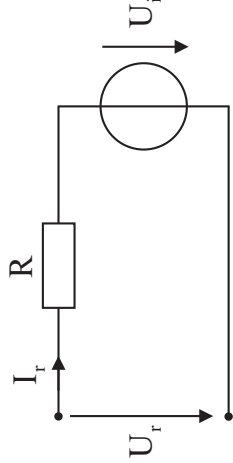
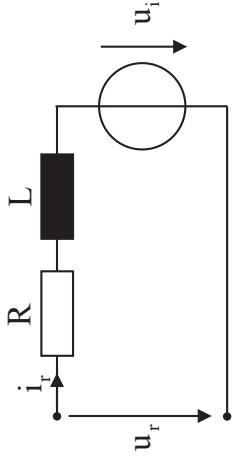
$$\frac{d\Psi}{dt} = L_r \frac{di_r}{dt} + u_i$$

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

$$\xrightarrow{\text{régime permanent}} U_r = R_r I_r + U_i = R_r I_r + k_\phi \Omega$$

$$U_i = k_\phi \Omega = k_{if} I_f \Omega$$

$$U_r = R_r I_r + k_{if} I_f \Omega$$



Tension induite de mouvement

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

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

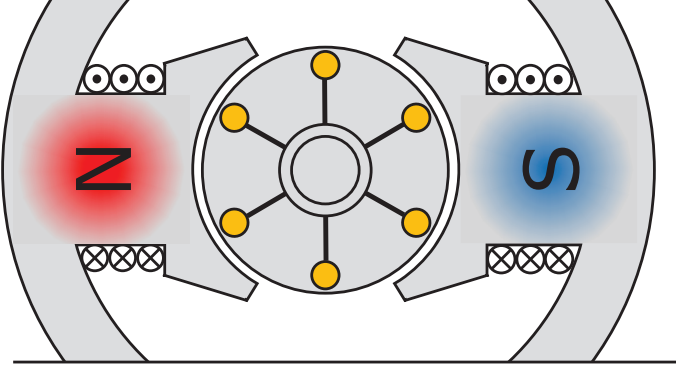
$$U_{i+} = \sqrt{2} U_{i-} = \sqrt{2} \sqrt{2} \pi N f \hat{\Phi} = 2\pi N f \hat{\Phi}$$

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

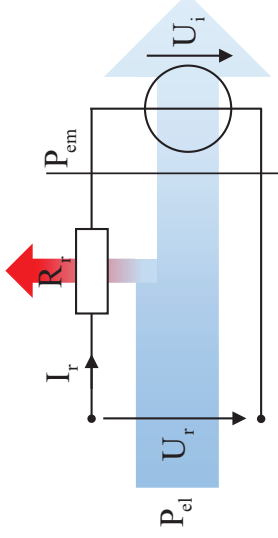
$$U_i = 2\pi N \frac{\Omega p}{2\pi} \hat{\Phi} = N \Omega p \hat{\Phi}$$

la tension induite est proportionnelle à la vitesse de rotation
 $\rightarrow U_i = k_\phi \Omega$

$k_\phi = k_{if} I_f$ et au courant d'excitation



Bilan de puissance et modes de fonctionnement



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

$$P_{ej} = U_r I_r$$

$$P_j = R_r I_r^2$$

$$P_{em} = U_i I_r$$

Moteur

Génératrice

$$P_{ej} = R_r I_r^2 + P_{em}$$

$$U_r = R_r I_r + U_i$$

$$P_{ej} > 0 \quad I_r > 0$$

$$T_{em} > 0 \quad U_r > U_i$$

$$P_{ej} = R_r I_r^2 + P_{em}$$

$$U_r = R_r I_r + U_i$$

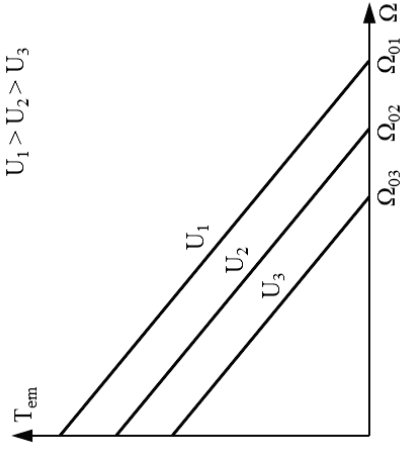
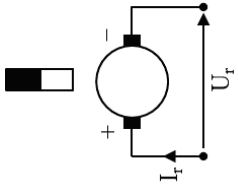
$$P_{ej} < 0 \quad I_r < 0$$

$$T_{em} < 0 \quad U_r < U_i$$

Moteur à aimants permanents

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

$$T_{em} = k_\phi I_r$$

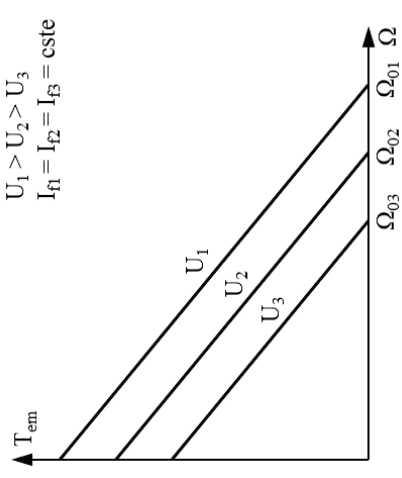
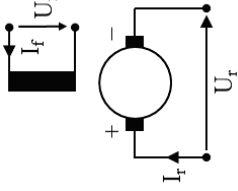


Moteur à excitation séparée

$$U_f = R_f I_f$$

$$U_r = R_r I_r + k_{if} I_f \Omega$$

$$T_{em} = k_{if} I_f I_r$$



Moteur à excitation shunt (parallèle)

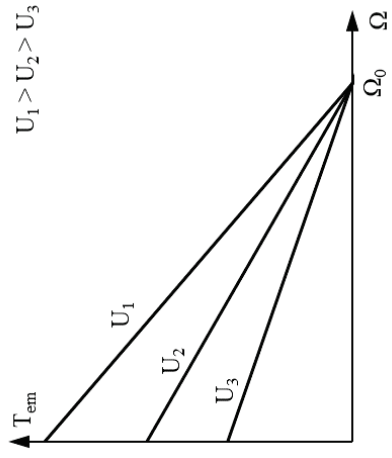
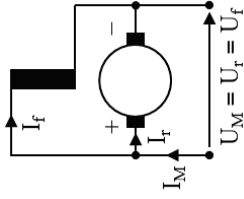
$$U_f = R_f I_f$$

$$U_r = R_r I_r + k_{if} I_f \Omega$$

$$T_{em} = k_{if} I_f I_r$$

$$U_M = U_r = U_f$$

$$I_M = I_r + I_f$$



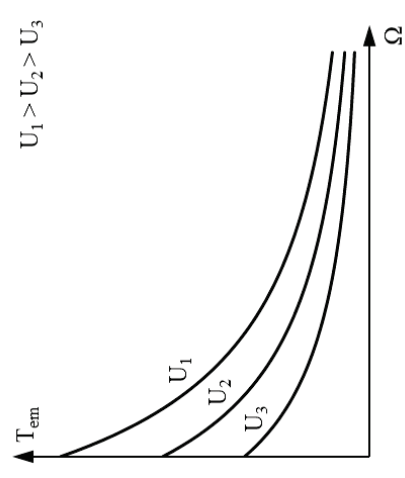
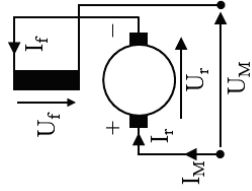
Moteur à excitation série

$$U_M = (R_f + R_r) I_M + k_{if} I_M \Omega$$

$$T_{em} = k_{if} I_M^2$$

$$U_M = U_r + U_f$$

$$I_M = I_r = I_f$$



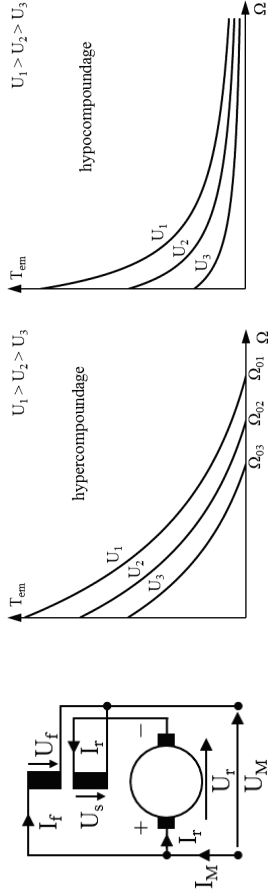
Moteur à excitation compound

$$U_M = U_f = R_f I_f$$

$$U_M = U_r + U_s = (R_r + R_s) I_r + (k_{is} I_r + k_{if} I_f) \Omega$$

$$T_{em} = k_{if} I_f I_r + k_{is} I_M^2$$

$$I_M = I_r + I_f$$



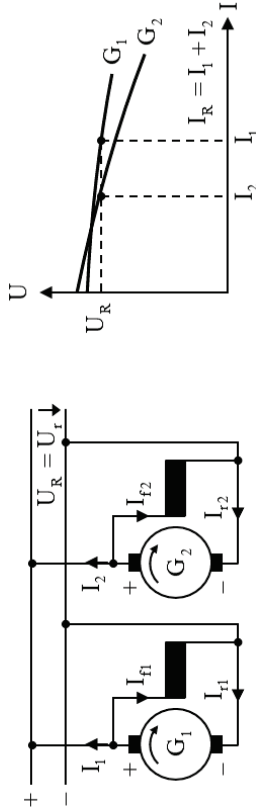
Génératrice à courant continu

Entrainée à vitesse constante, elle doit fournir une tension constante.

- Excitation séparée
- Excitation shunt (parallèle)

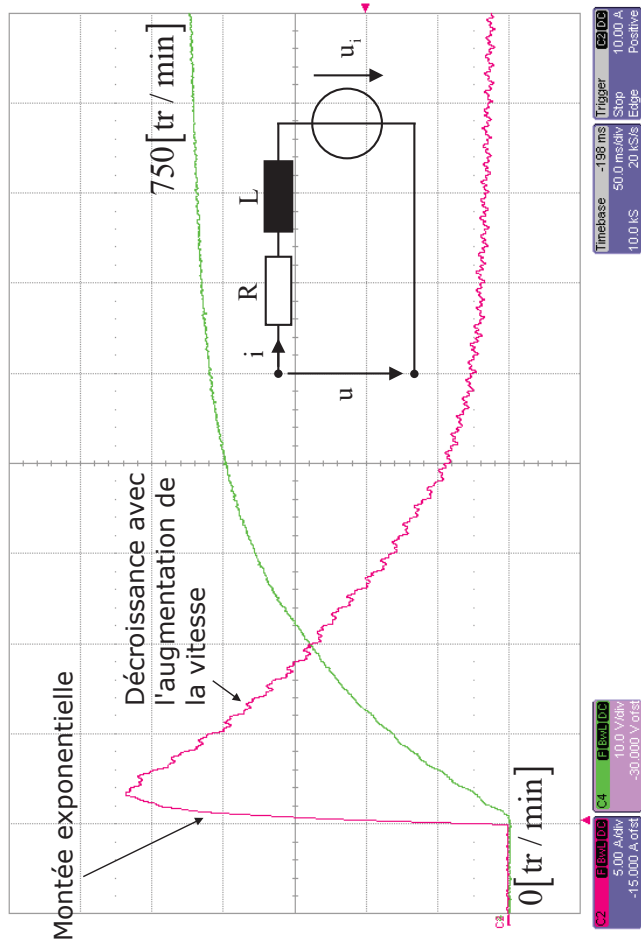
$$U_r = R_r I_r + k_{if} I_f \Omega$$

Mise en parallèle de génératrices à courant continu à excitation shunt

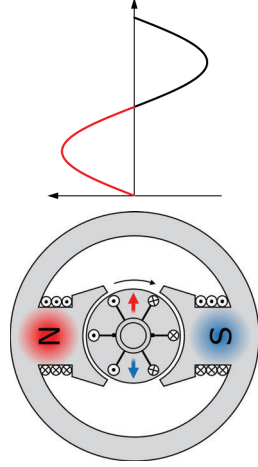
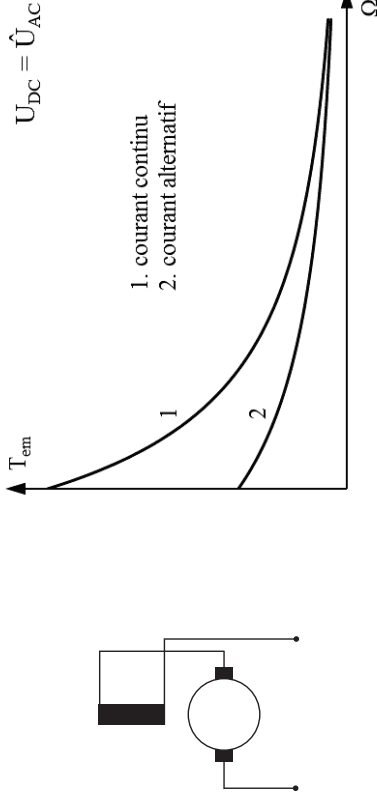


Démarrage d'un moteur à courant continu 1.8 kW

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

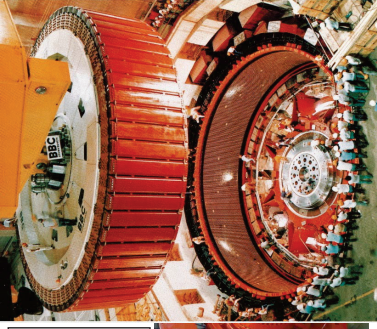
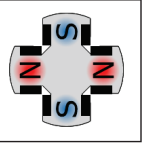
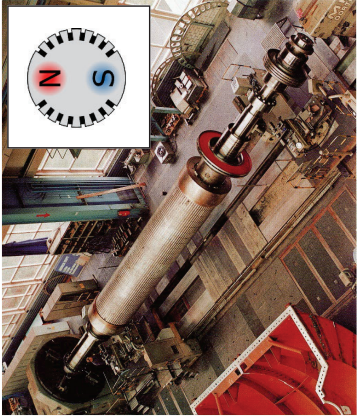
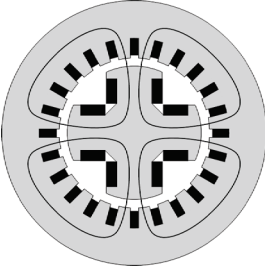
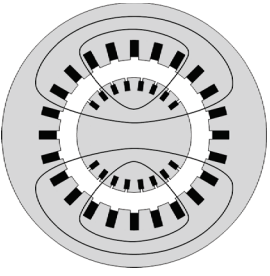


Moteur universel

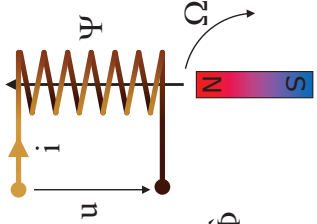


Machine synchrone

Machines à pôles lisses et à pôles saillants



Tension induite de mouvement



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

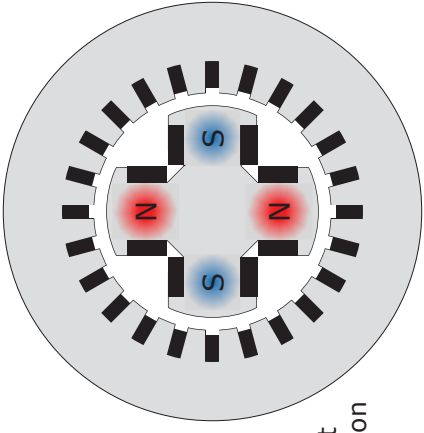
$$\Omega = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p} \text{ [rad/s]}$$

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

$$= N \Omega p \Phi = k_{\Phi} \Omega = k_{If} I_f \Omega$$

$$U_i = k_{\Phi} \Omega = k_{If} I_f \Omega$$

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



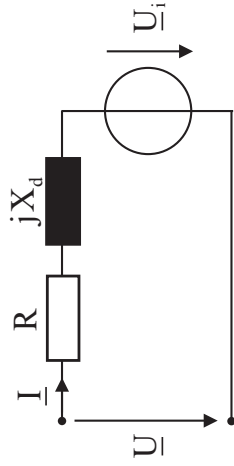
Equation de tension et schéma équivalent

$$u = R i + \frac{d\Psi}{dt}$$

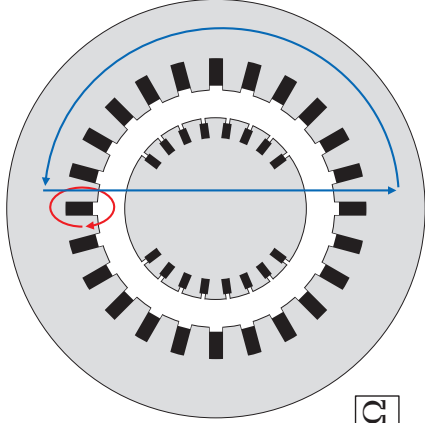
$$\frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + u_i$$

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

$X_d = X_{\sigma} + X_h$
tension induite de mouvement
 $\underline{U}_i = k_{\Phi} \Omega = k_{If} I_f \Omega$



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

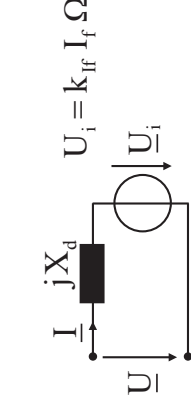


Puissances triphasées

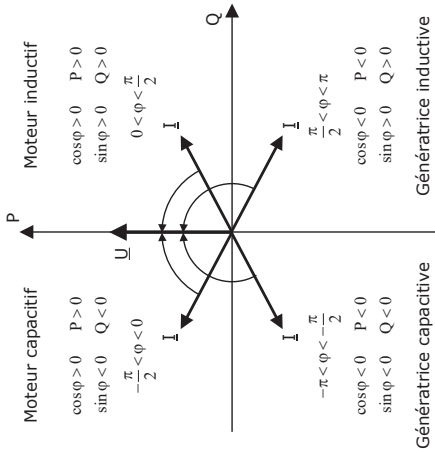
$$\text{Puissance apparente } S = 3 U_{ph} I_{ph} = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]}$$

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

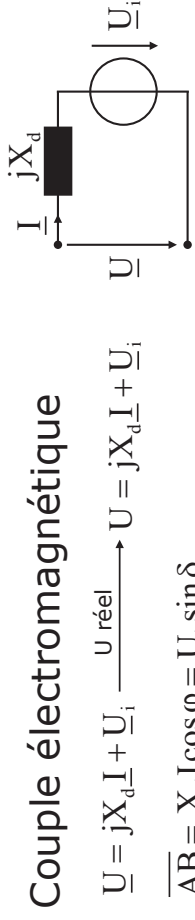
$$\text{Puissance réactive } Q = 3 U_{ph} I_{ph} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} \sin \varphi \text{ [VAR]}$$



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



Couple électromagnétique



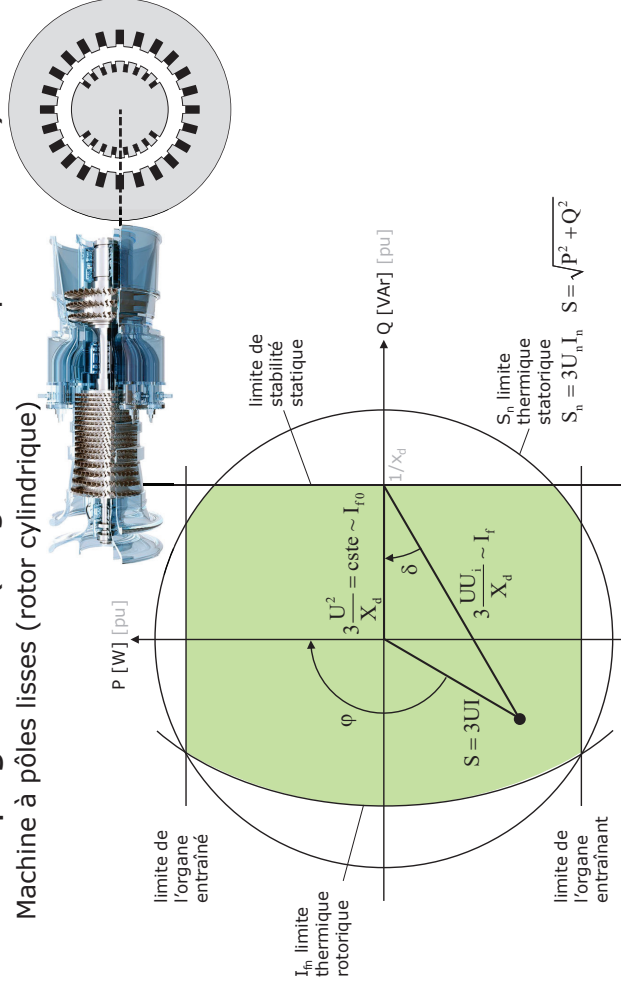
$$P_{el} = 3UI \cos \varphi$$

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

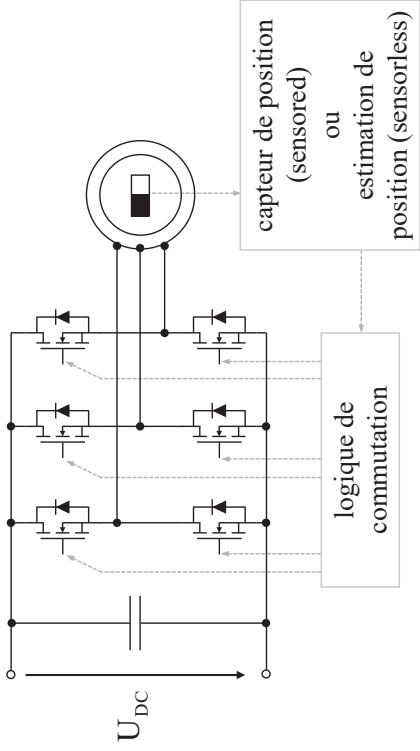
$$T_k = 3 \frac{U U_i}{2 \pi n_s X_d}$$

Le topogramme (diagramme des puissances)

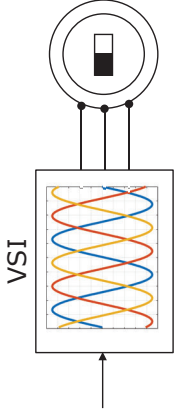
Machine à pôles lisses (rotor cylindrique)



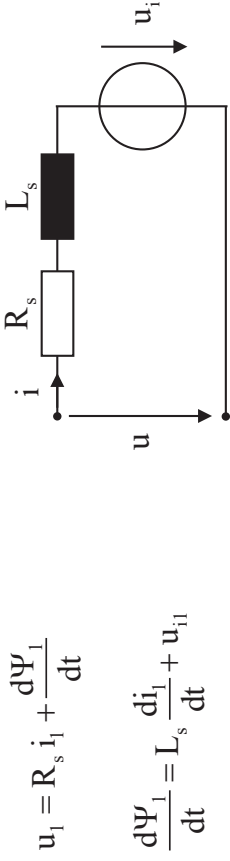
Moteur synchrone à aimants permanents



- VSI (Voltage Source Inverter)
- Onduleur
- Convertisseur de tension
- Pont à 6 transistors



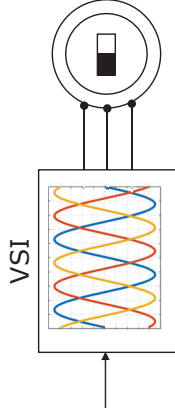
Equation de tension et schéma équivalent



$$u_1 = R_s i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}$$

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = L_s \frac{di_1}{dt} + u_{i1}$$

$$u_1 = R_s i_1 + L_s \frac{di_1}{dt} + u_{i1}$$



Tension induite de mouvement

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

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

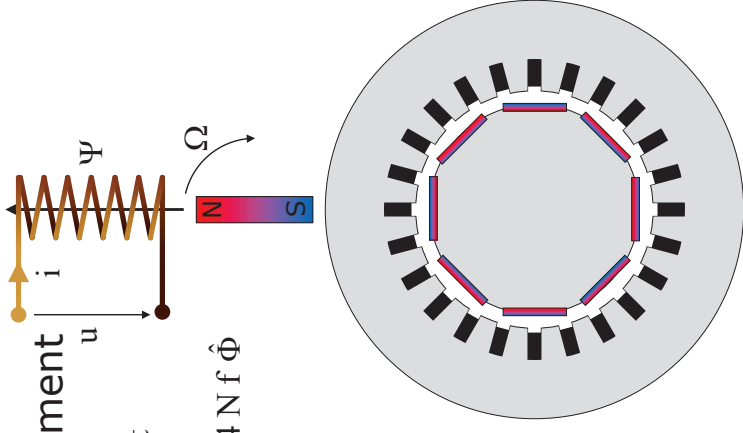
$$\Omega = \frac{2\pi f}{p} \text{ [rad/s]}$$

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

$$= N \Omega p \Phi$$

$$U_i = k_\Phi \Omega$$

la tension induite est proportionnelle à la vitesse de rotation



Bilan de puissance et Couple électromagnétique

$$P_{el} = P_j + P_{em} = 3 U I \cos \varphi$$

$$P_j = 3 R I^2$$

$$P_{em} = \Omega_s T_{em} = 3 U_i I \cos \Psi$$

$\varphi \rightarrow$ déphasage entre $\underline{U}$ et $\underline{I}$

$\Psi \rightarrow$ déphasage entre $\underline{U}_i$ et $\underline{I}$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3}{\Omega} U_i I \cos \Psi = \frac{3}{\Omega} k_\Phi \Omega I \cos \Psi = 3 k_\Phi I \cos \Psi$$

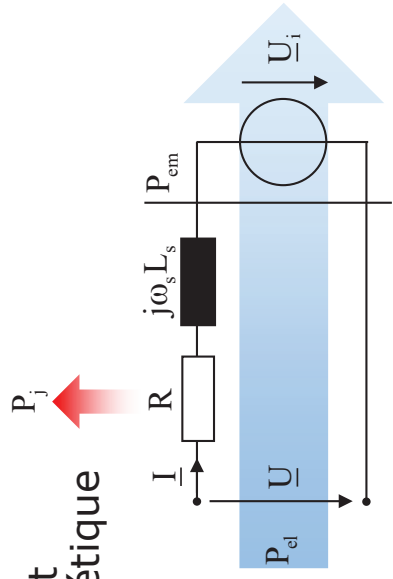
$$U_i = k_\Phi \Omega$$

le couple est proportionnel au courant

$$T_{em} = 3 k_\Phi I$$

$$\cos \Psi = 1 \quad (\Psi = 0)$$

courant en phase avec la tension induite

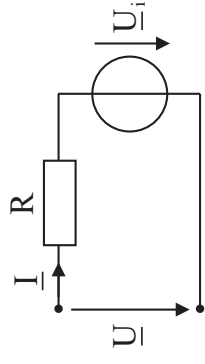
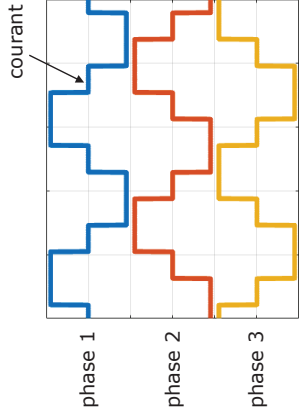
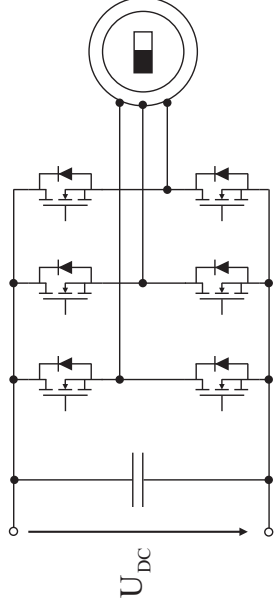


Courant en phase avec la tension induite

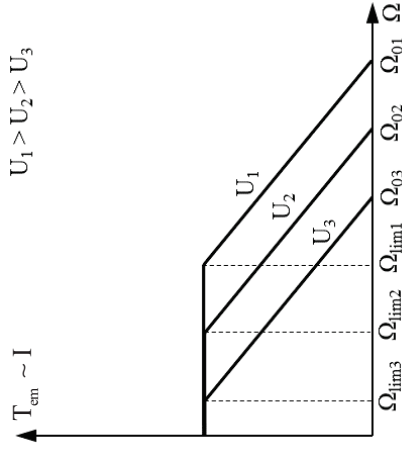
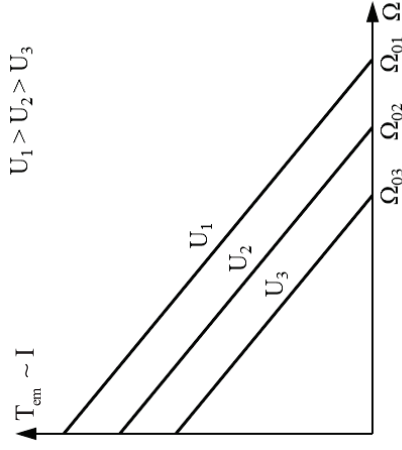
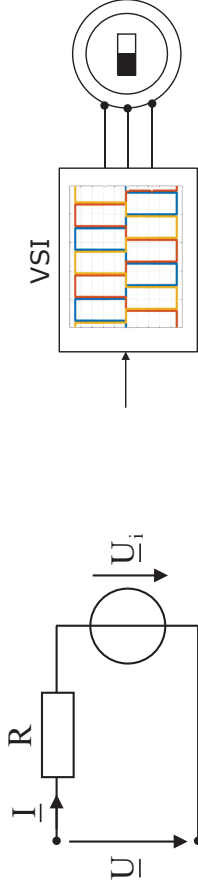
Commutation par blocs à 120°

$$T_{em} = k_{T_{em}} I \cos \Psi$$

$$\cos \Psi = 1 (\Psi = 0)$$



Caractéristique de couple Commutation par blocs à 120° (BLDC)

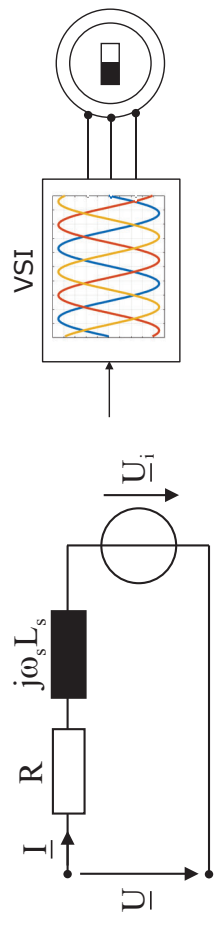
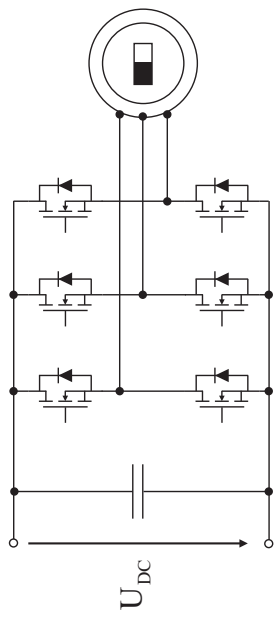


Courant en phase avec la tension induite

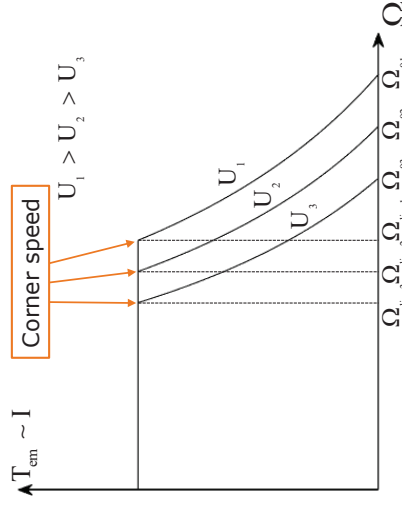
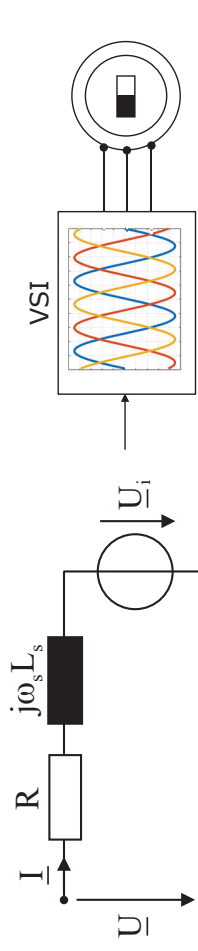
Alimentation sinusoïdale

$$T_{em} = 3 k_{\Phi} I \cos \Psi$$

$$\cos \Psi = 1 (\Psi = 0)$$

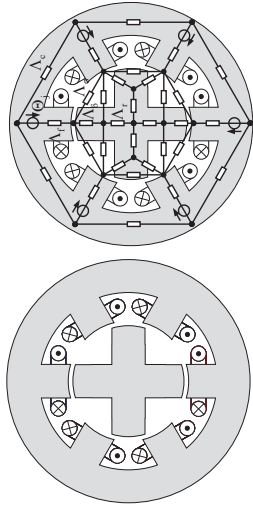


Caractéristique de couple Alimentation sinus (PMSM)



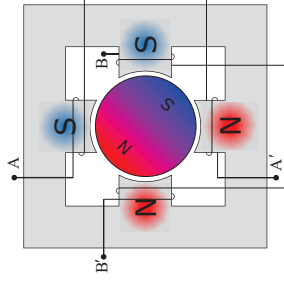
Moteur pas à pas

Moteur réluctant



- Nombre de phases le plus fréquent : 3, 4, 8
- Nombre de pas par tour habituellement : 12 - 72

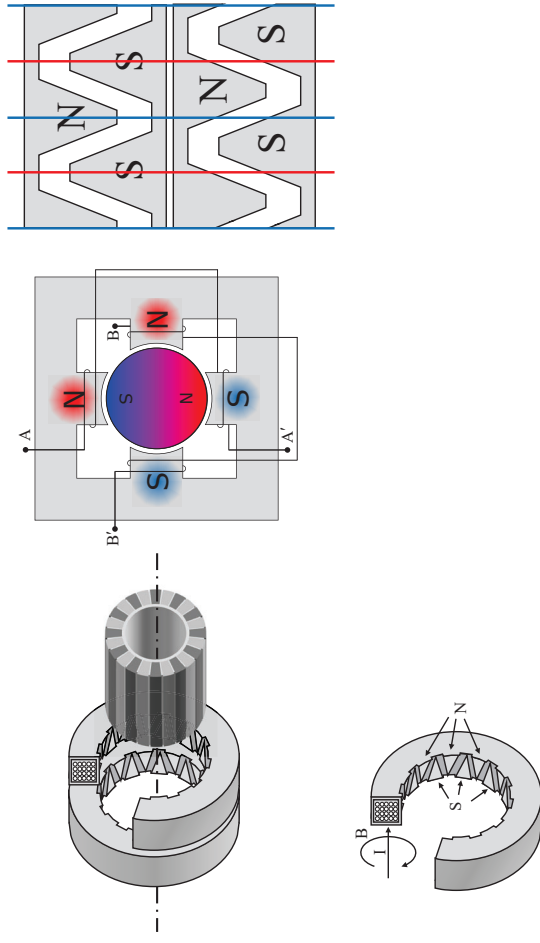
Moteur électromagnétique



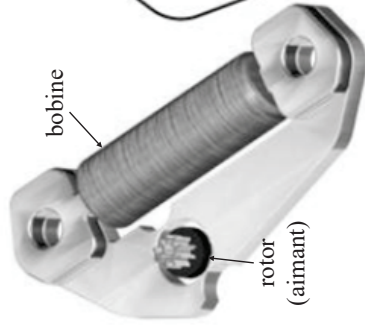
- Habituellement biphasé
- Nombre de pas par tour habituellement faible : 2 - 24
- Rendement élevé

Moteur électromagnétique

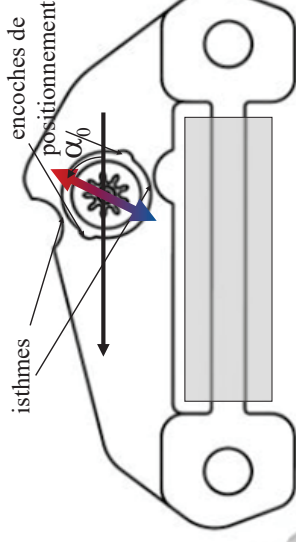
Moteur à griffes



Moteur Lavet

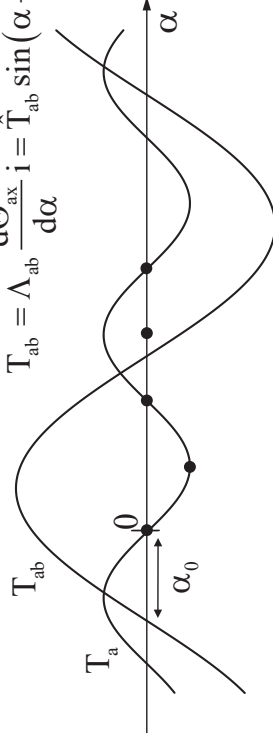


$+\alpha$

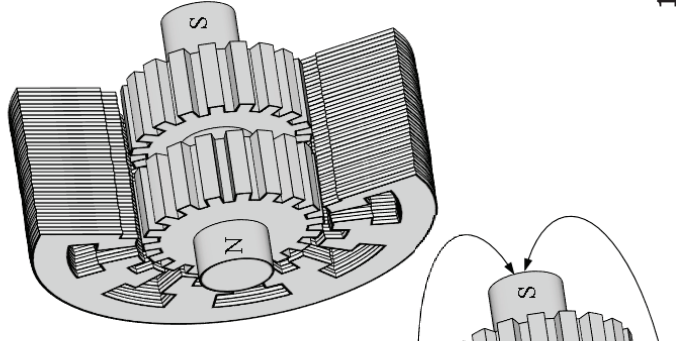
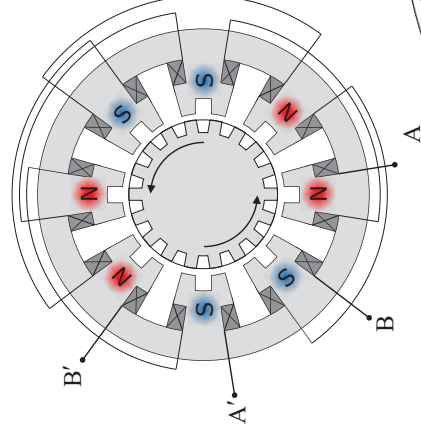


$$T_a = \frac{1}{2} \frac{d\Lambda_a}{d\alpha} \Theta_a^2 = \hat{T}_a \sin(2\alpha)$$

$$T_{ab} = \Lambda_{ab} \frac{d\Theta_{ax}}{d\alpha} \quad i = \hat{T}_{ab} \sin(\alpha + \alpha_0)$$



Moteur réluctant polarisé



- Utilisé pour un nombre de pas par tour élevé : 24 - 400
- Rendement habituellement bon