

# Machines électriques

pour Génie Mécanique

## Machine asynchrone

André Hodder

# Sommaire

- Introduction
- Circuit magnétique
- Transformateur
- Éléments de base des machines
- **Machine asynchrone**
- Machine à courant continu
- Machine synchrone
- Moteur synchrone à aimants permanents
- Moteur pas à pas

# Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- Caractéristique de couple
- Impédance équivalente
- Démarrage des moteurs à cage
- Alimentation à tension et fréquence variables
- Modes de fonctionnement et bilan de puissance

# La machine asynchrone

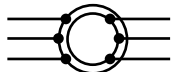
Selon la définition du Vocabulaire Electrotechnique International (IEV 411-31-09) :

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse en charge et la fréquence du réseau auquel elle est reliée ne sont pas dans un rapport constant.

Les anglophones l'appellent "induction machine".

Le rotor peut être soit :

- bobiné (enroulement triphasé)

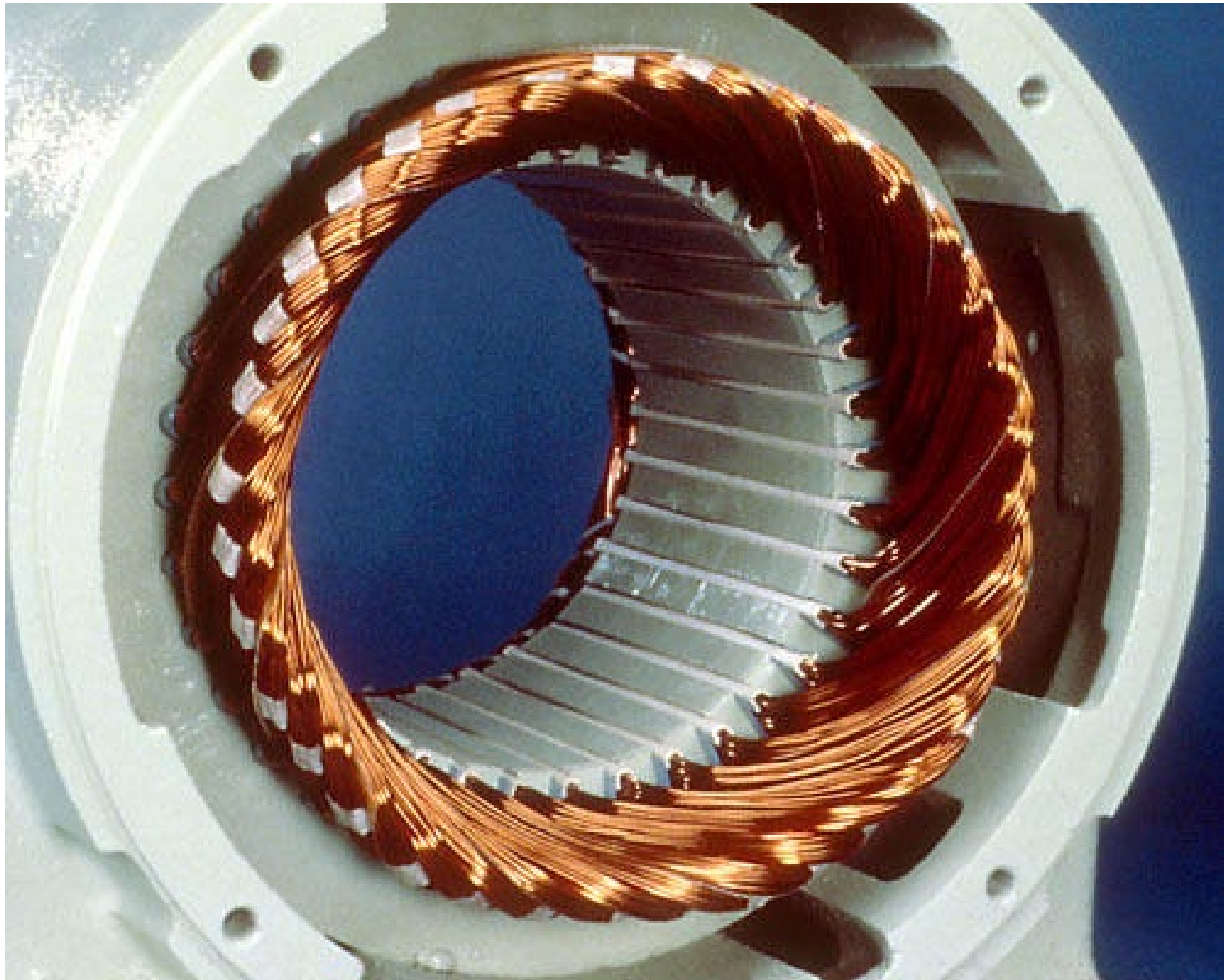


- à cage d'écureuil

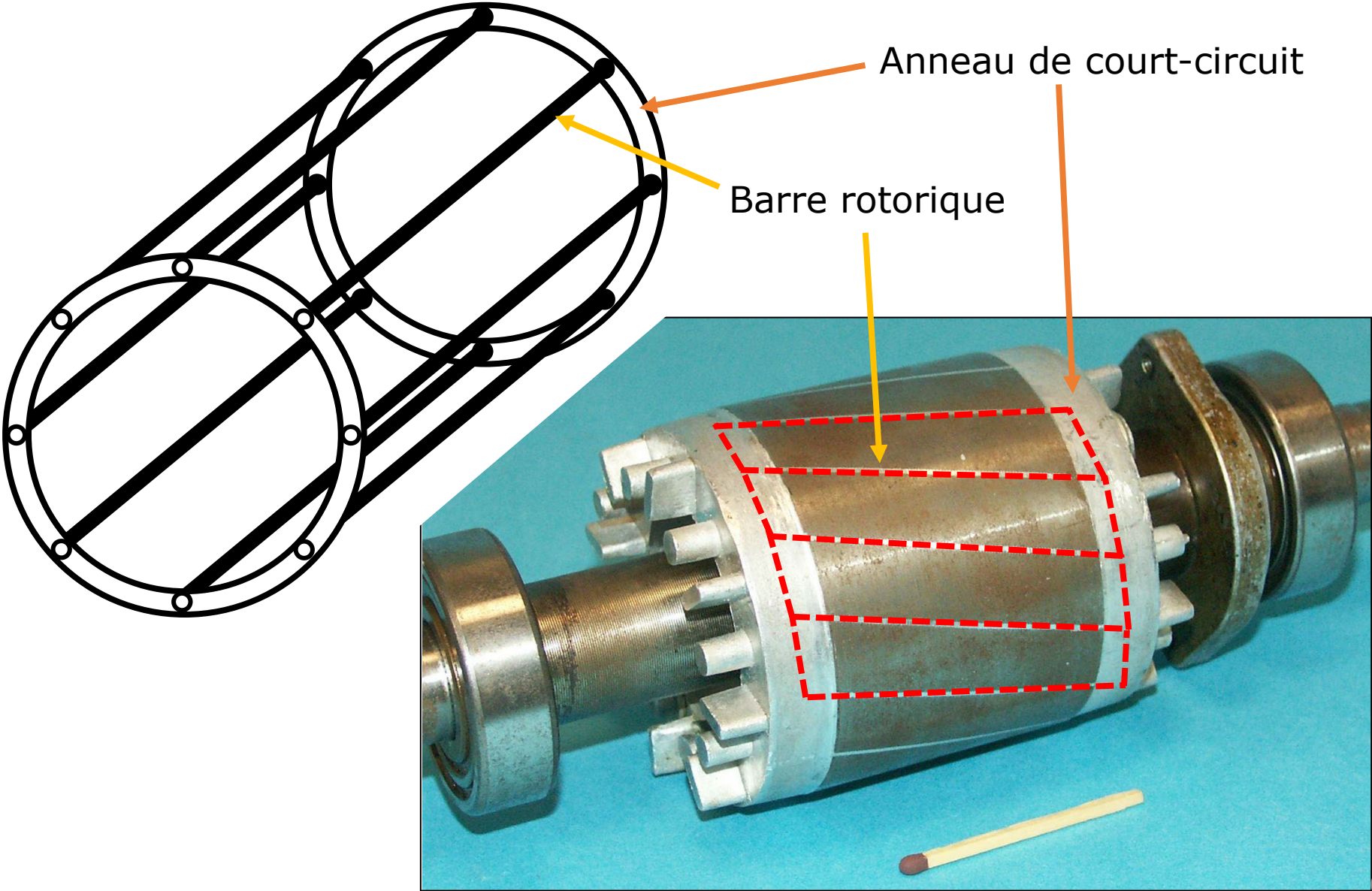


[electropedia.org](http://electropedia.org)

# Stator d'une machine asynchrone



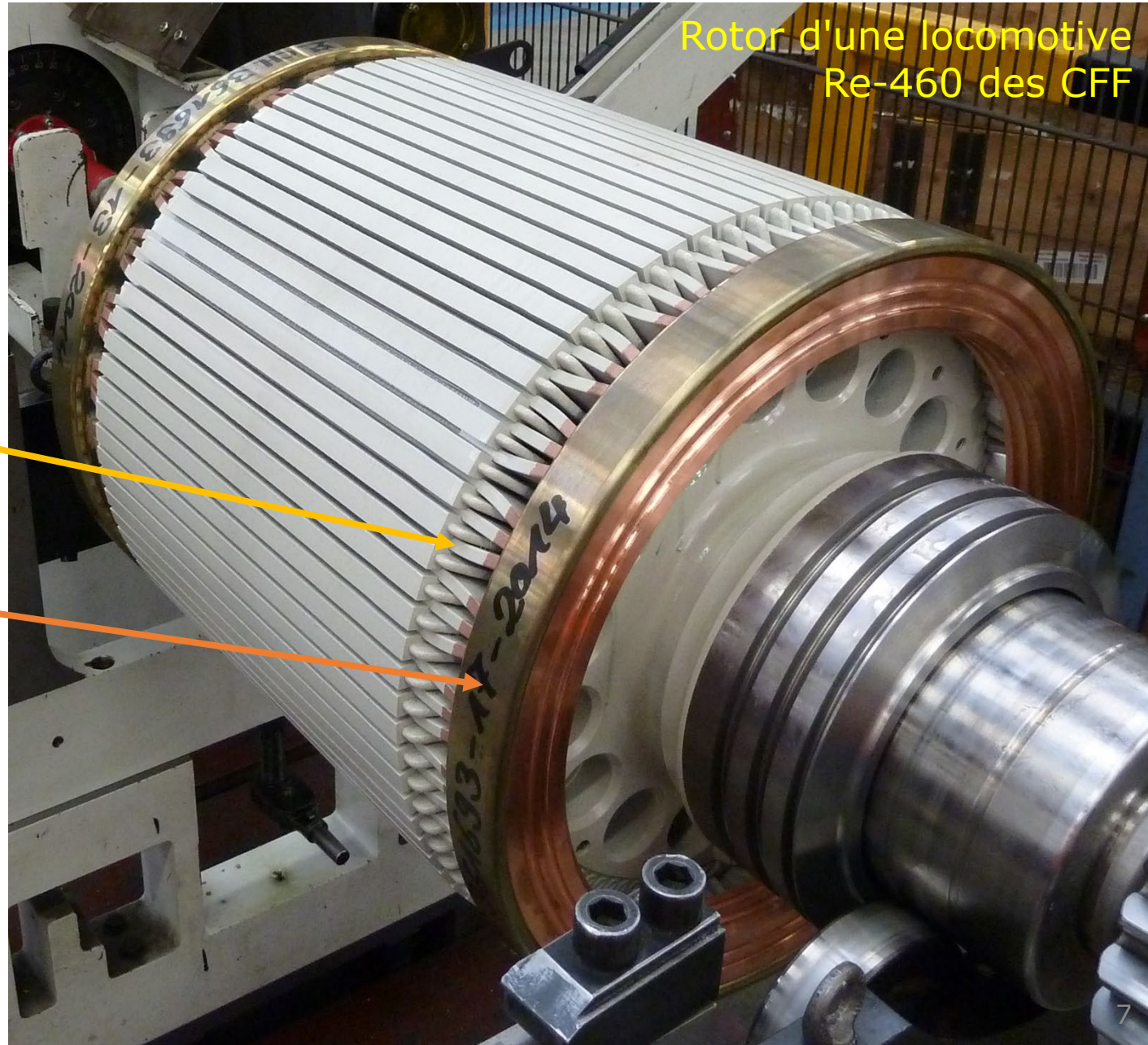
# Rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil



# Rotor d'une machine asynchrone à cage



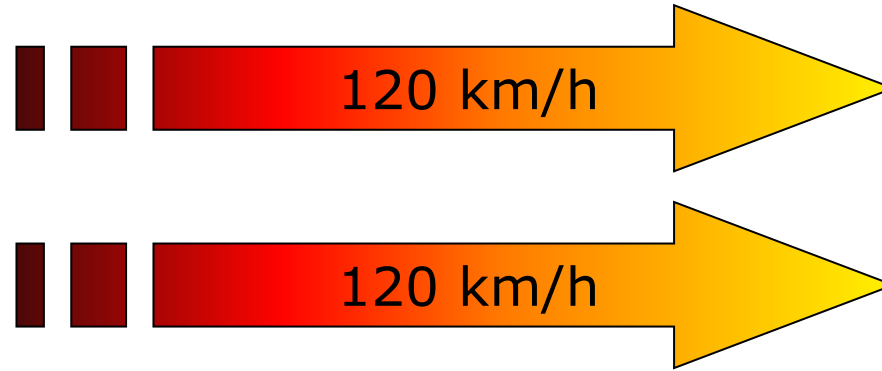
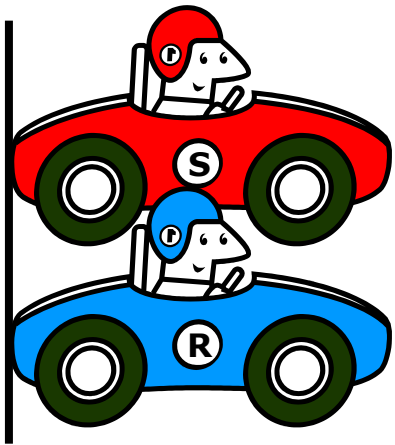
Rotor d'une locomotive  
Re-460 des CFF



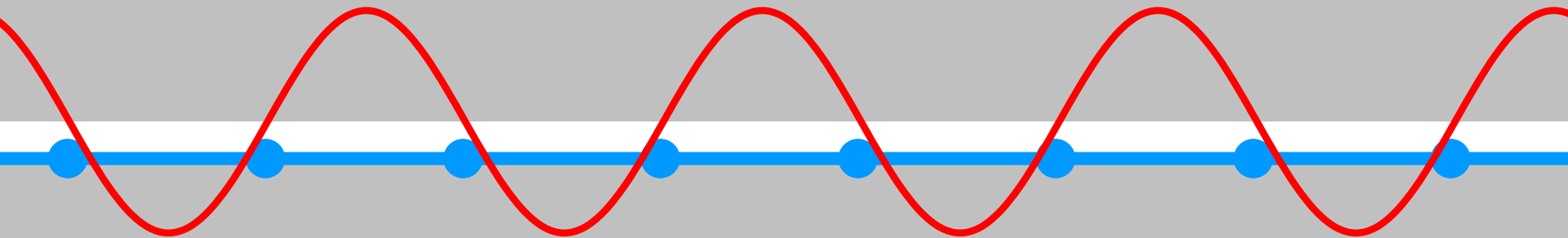
Barre rotorique

Anneau de  
court-circuit

# Principe de fonctionnement

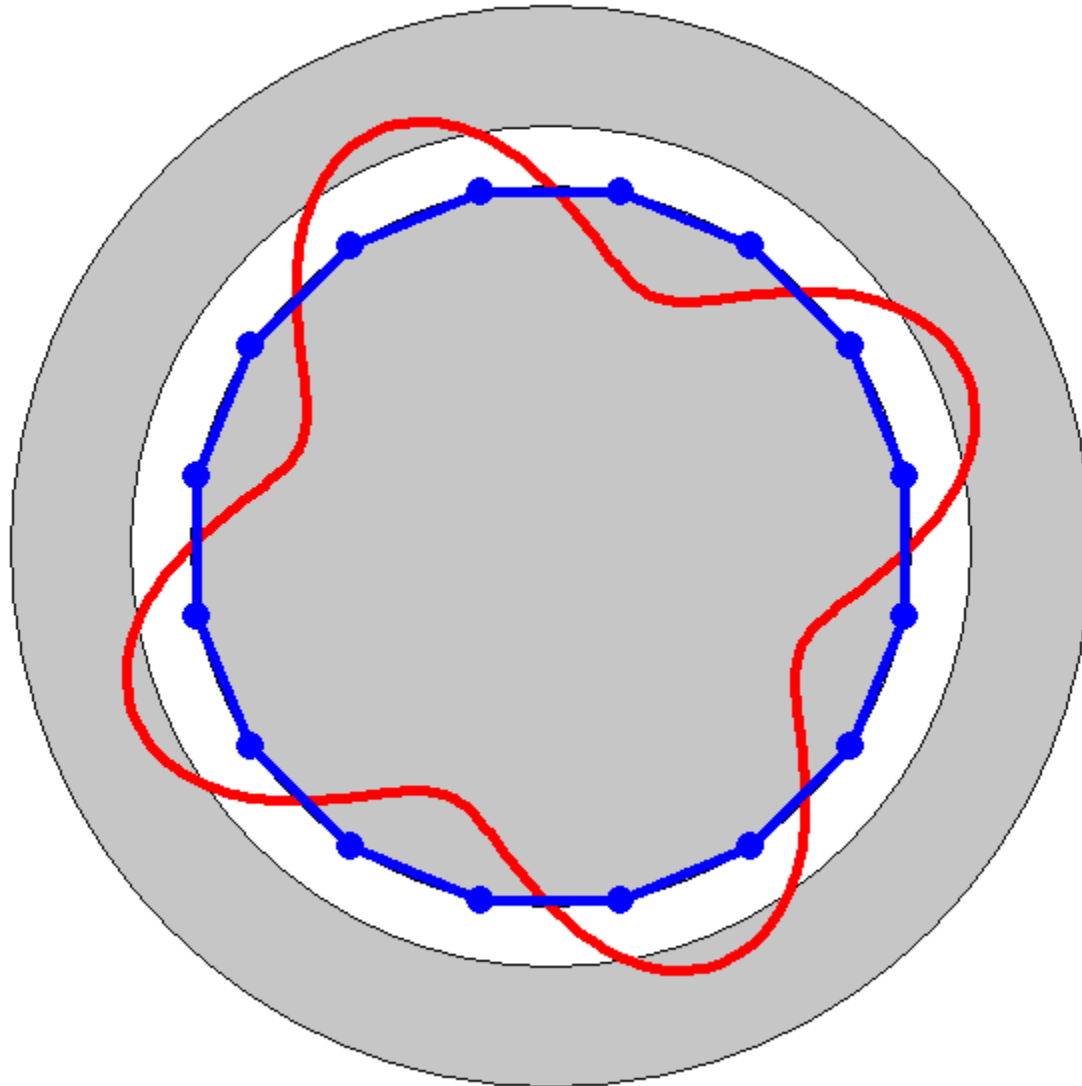


Stator



Rotor

# Principe de fonctionnement

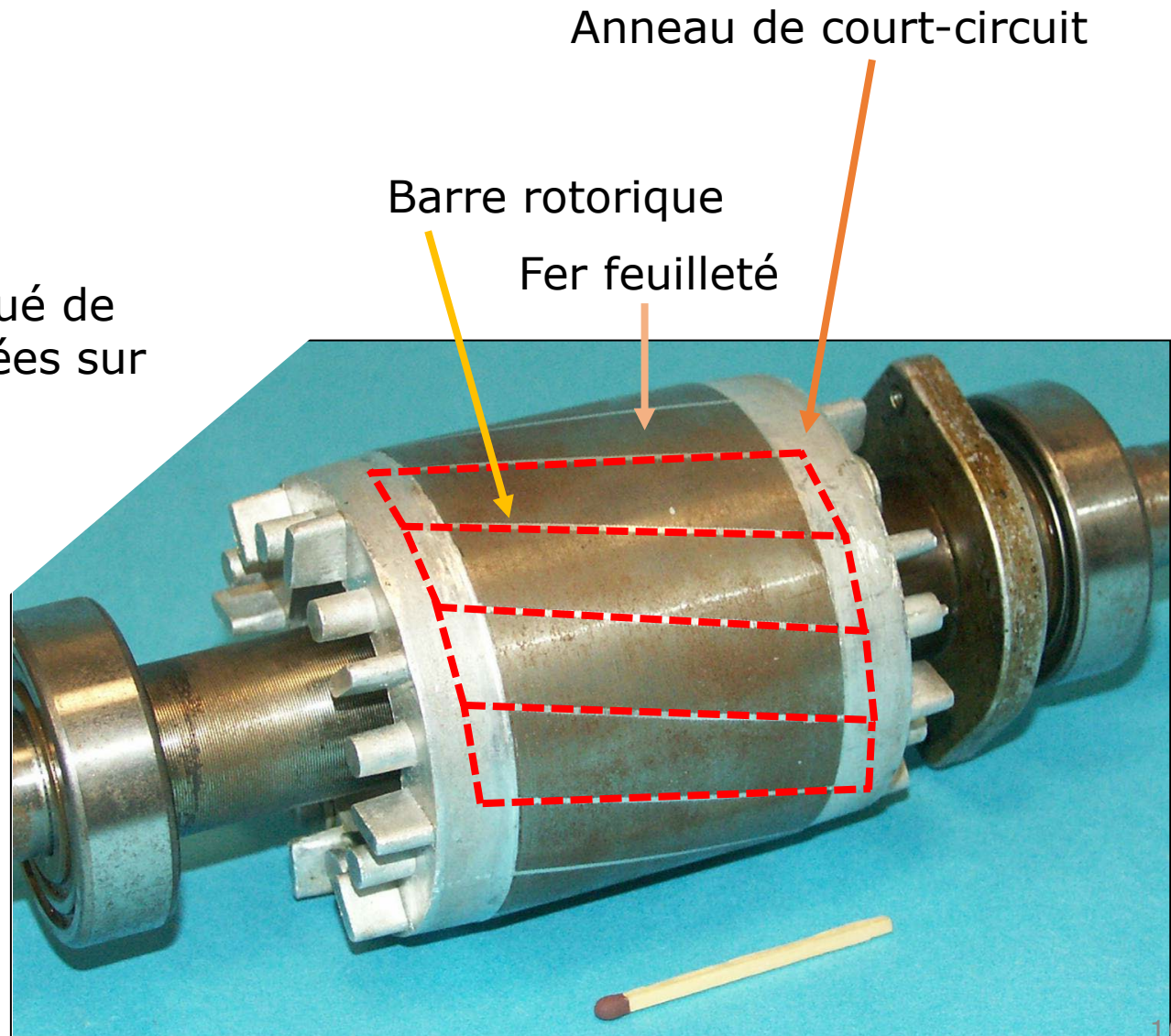


# Rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

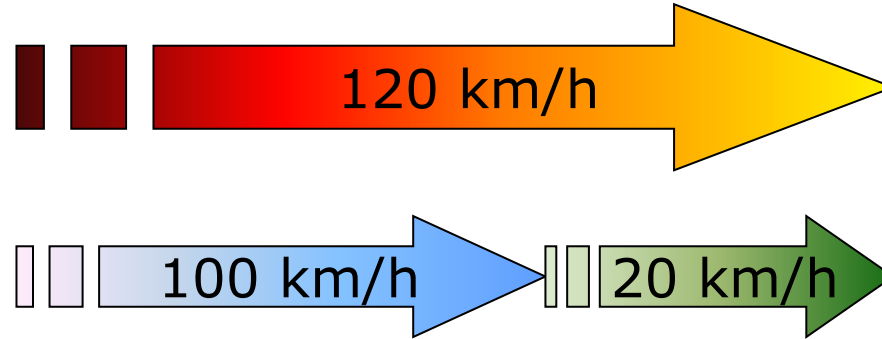
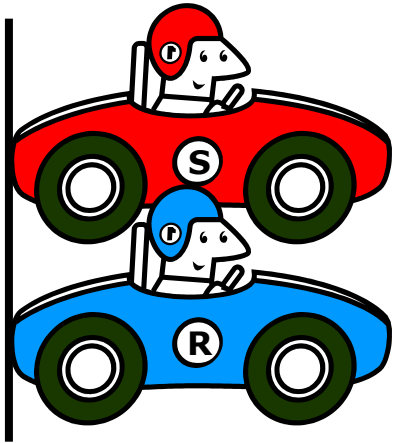
$$u_r = R_r i_r + \frac{d\Psi}{dt}$$

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

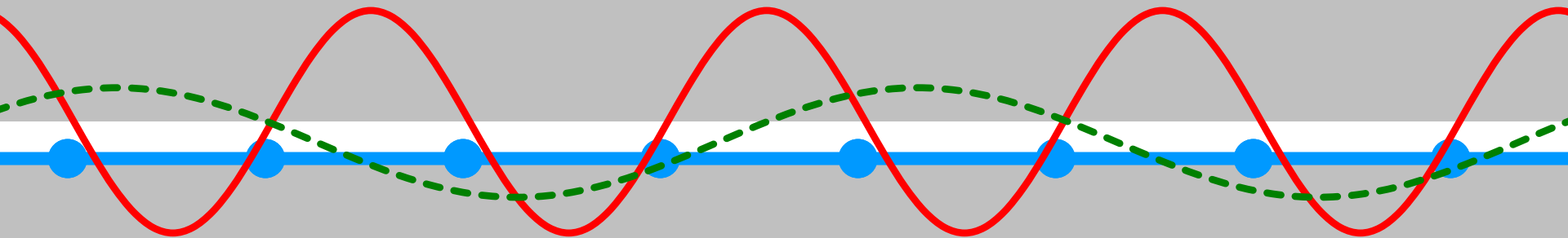
$$0 = R_r i_r + \frac{d\Psi}{dt}$$



# Principe de fonctionnement

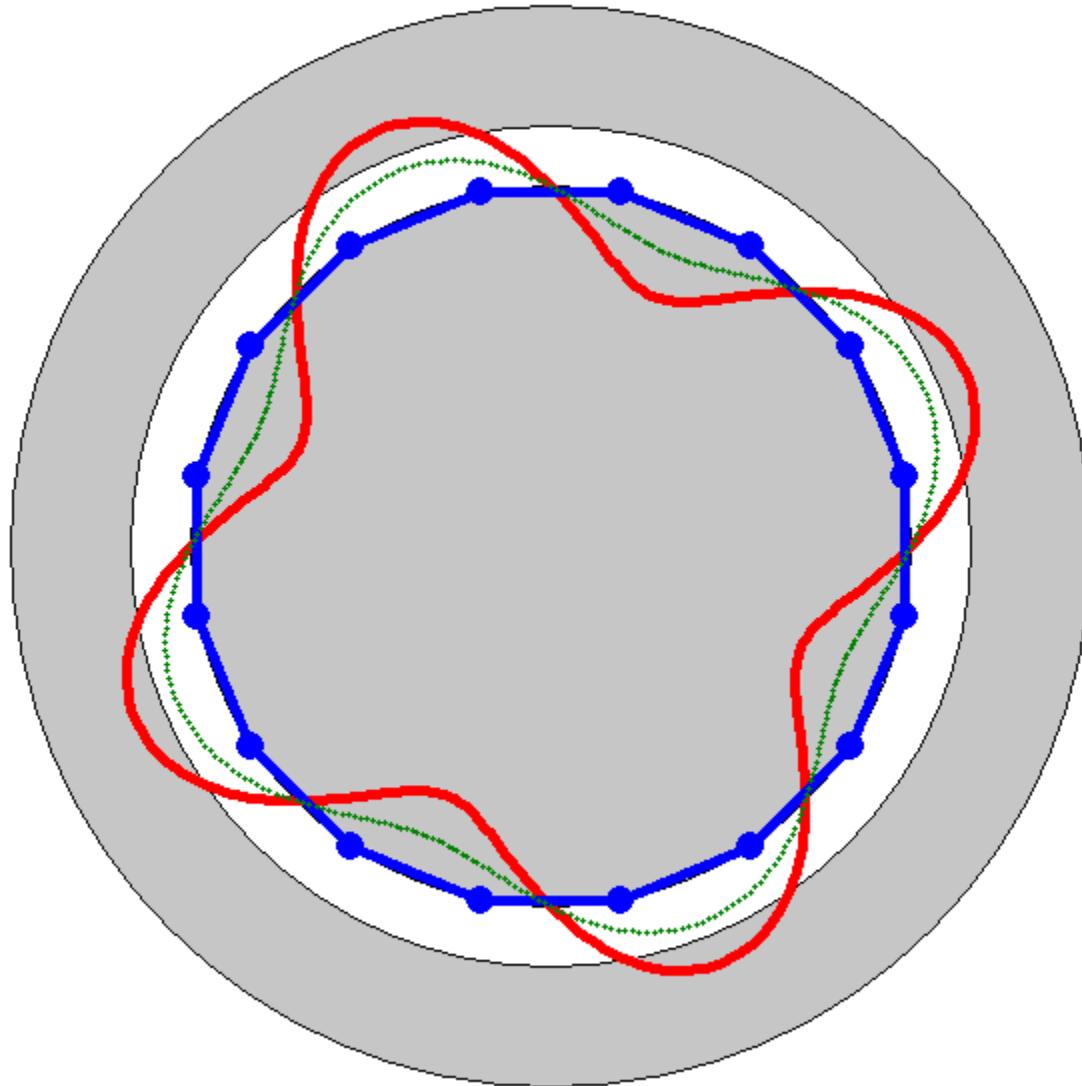


Stator

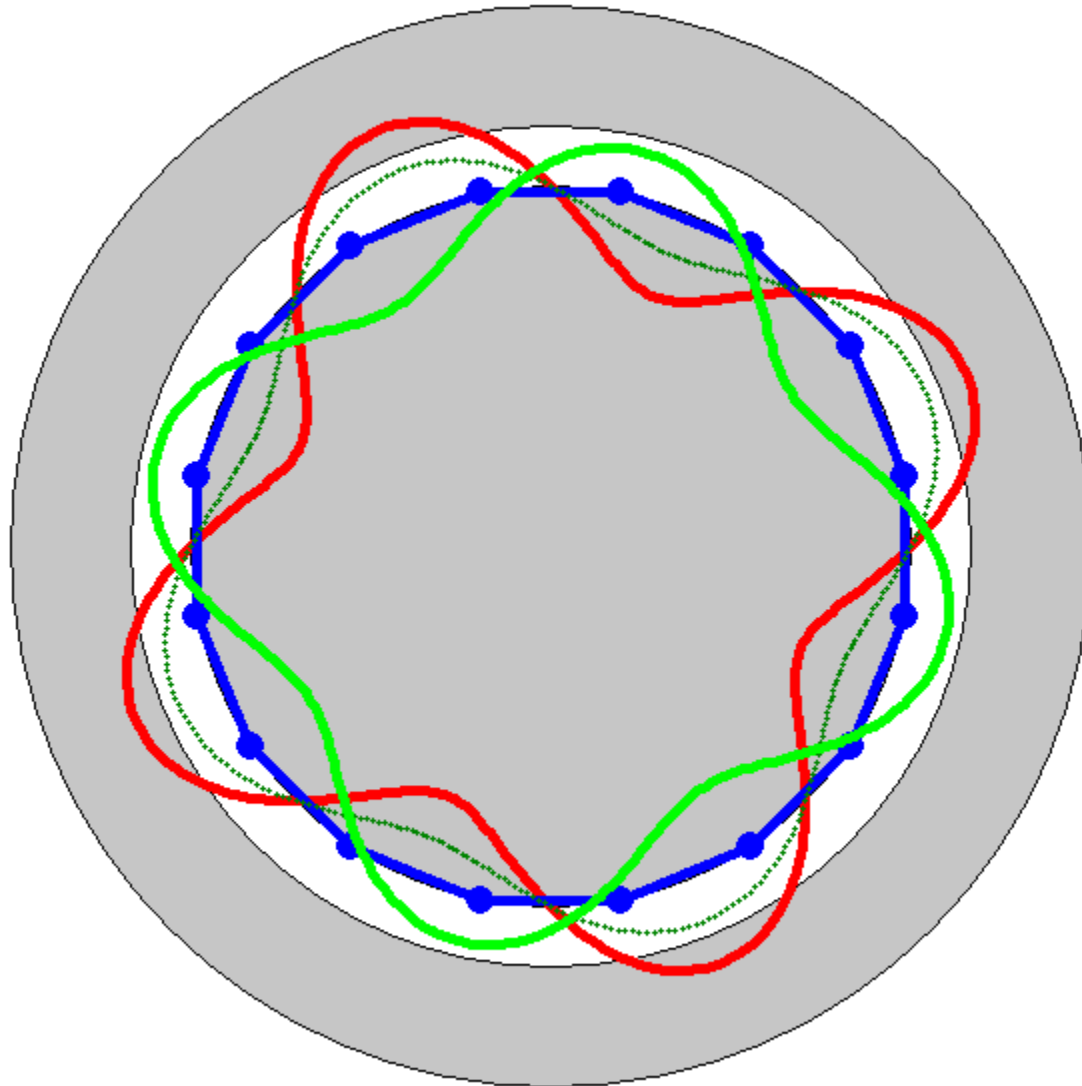


Rotor

# 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  $48 \text{ Hz} + 2 \text{ Hz} = 50 \text{ Hz}$

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 des moteurs à cage
- Alimentation à tension et fréquence variables
- Modes de fonctionnement et bilan de puissance

# Schéma équivalent du transformateur

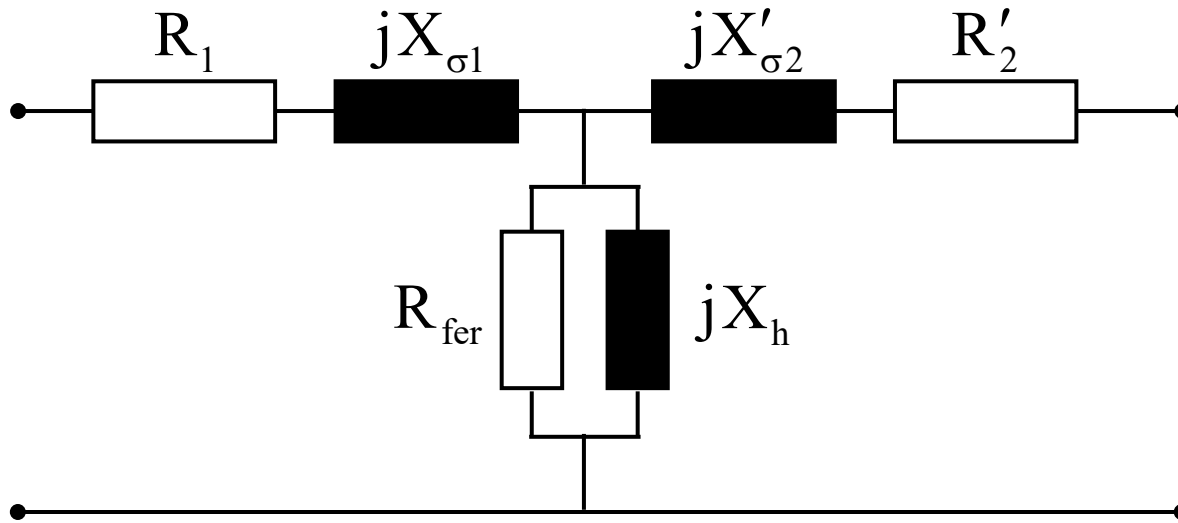
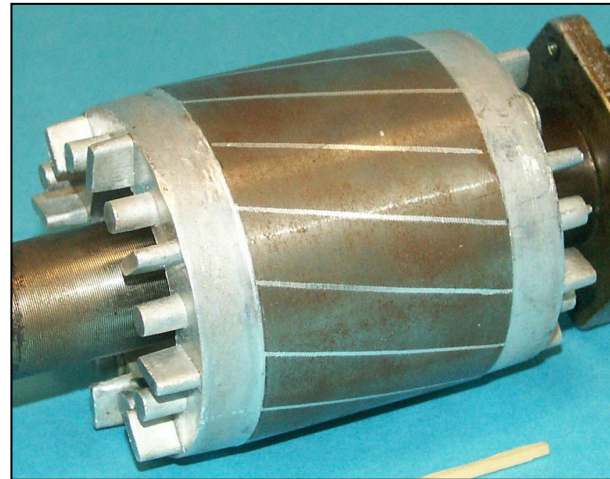
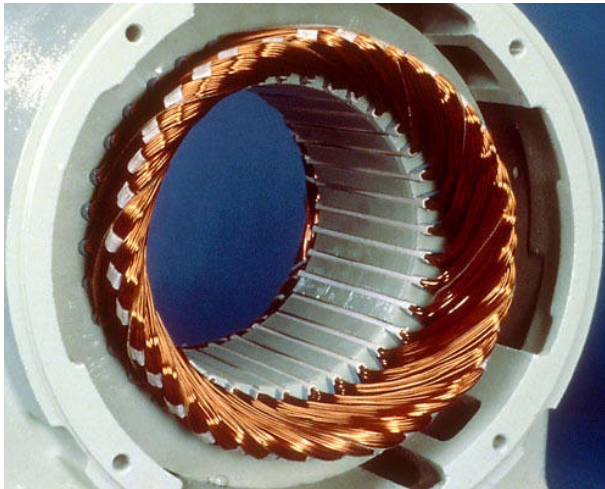
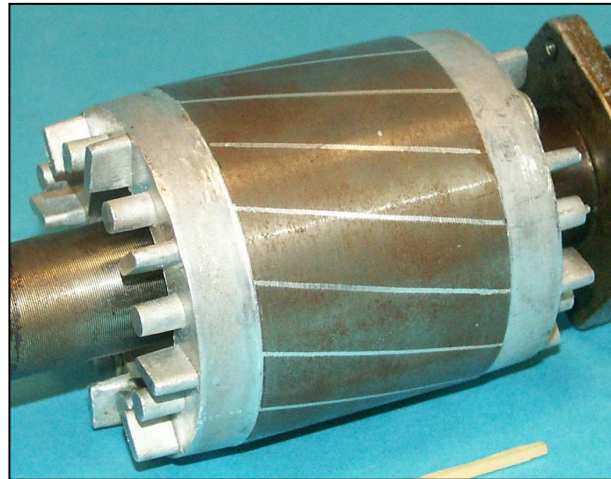
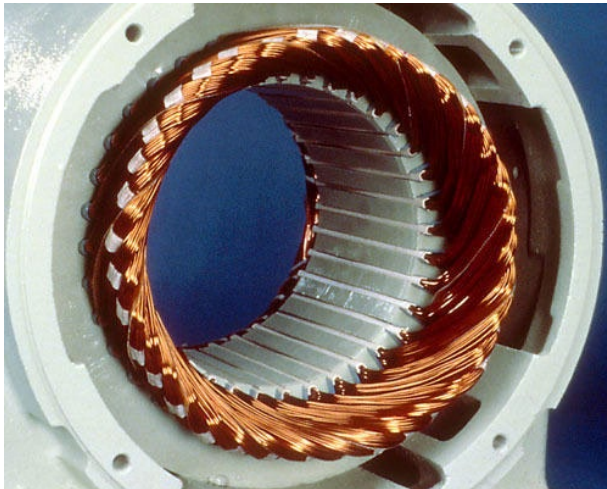
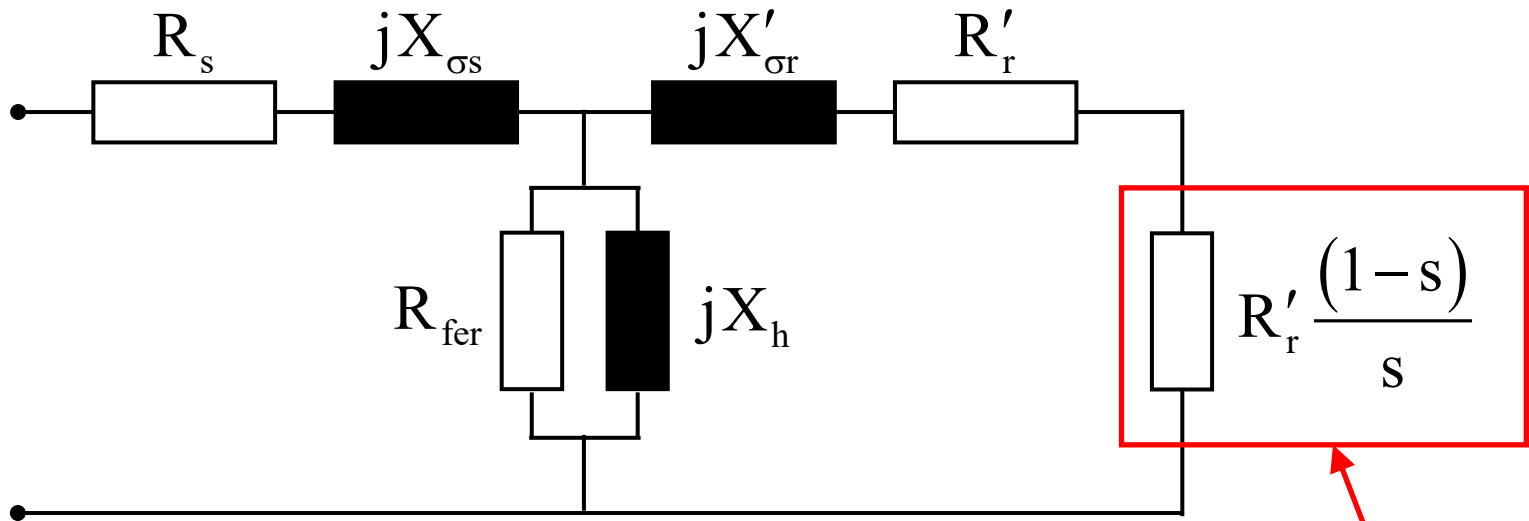


Schéma équivalent d'un transformateur

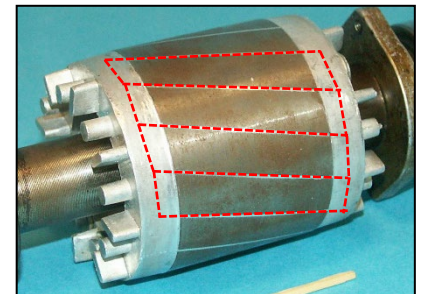
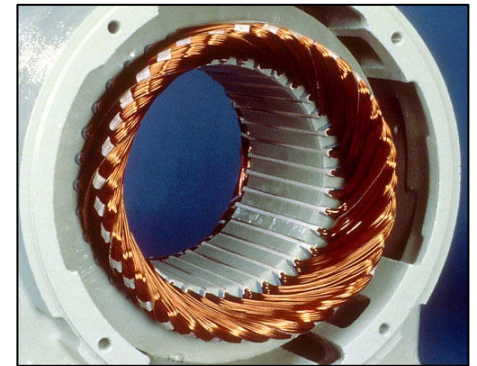
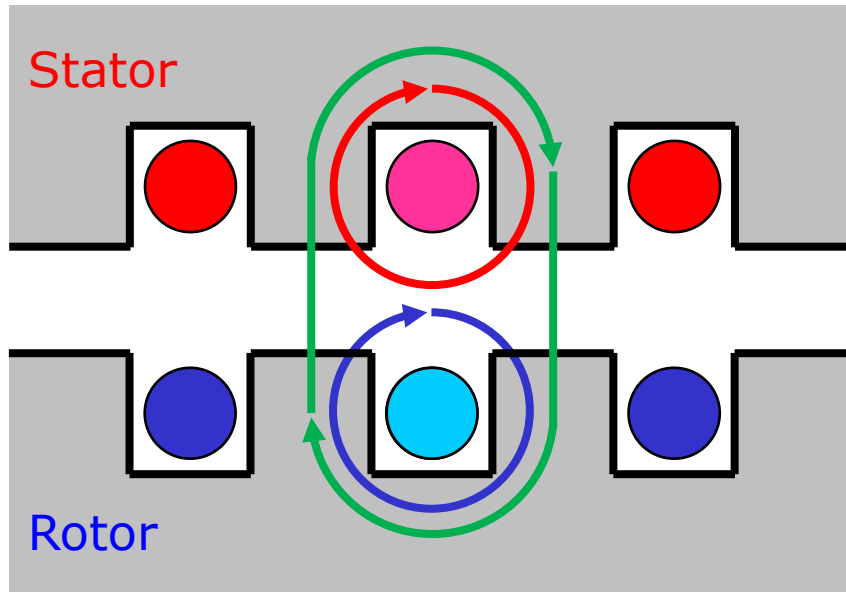
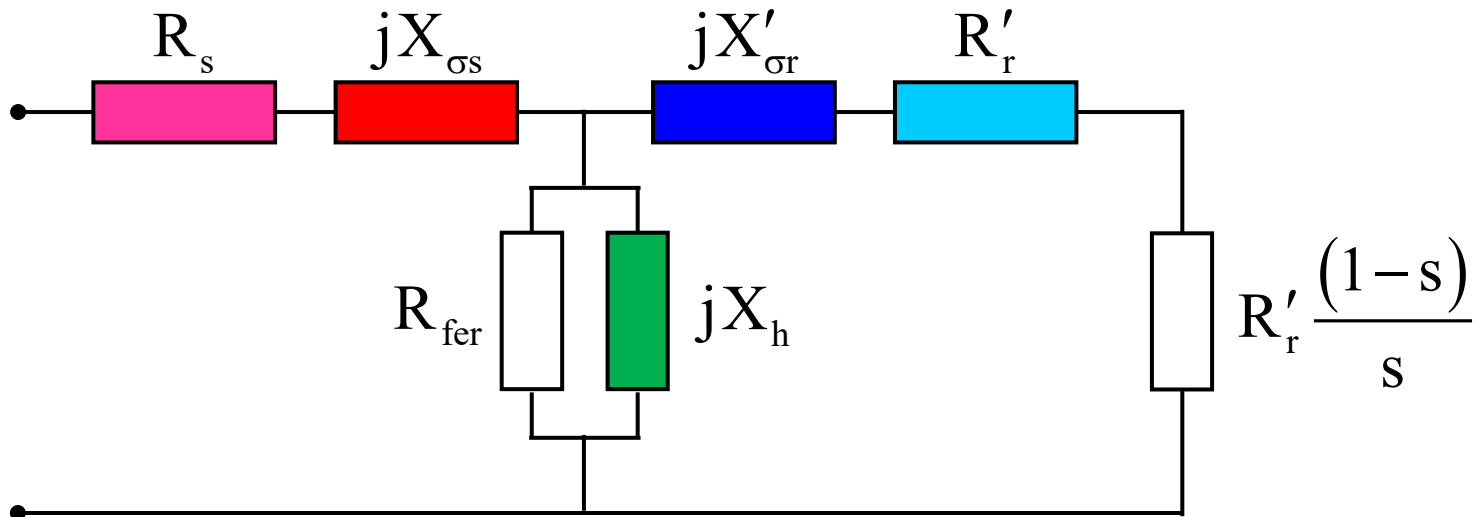


# Schéma équivalent de la machine asynchrone

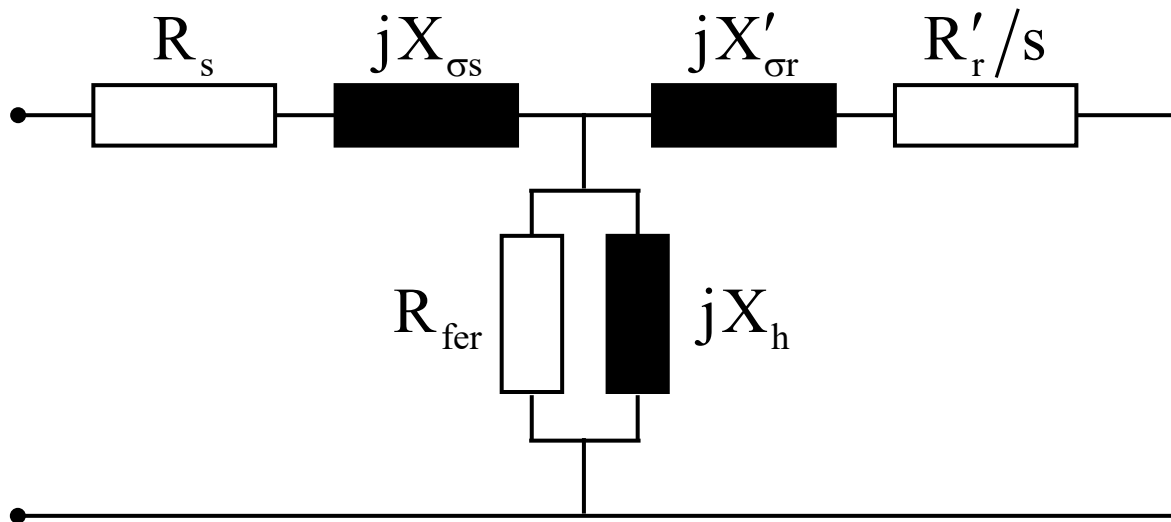
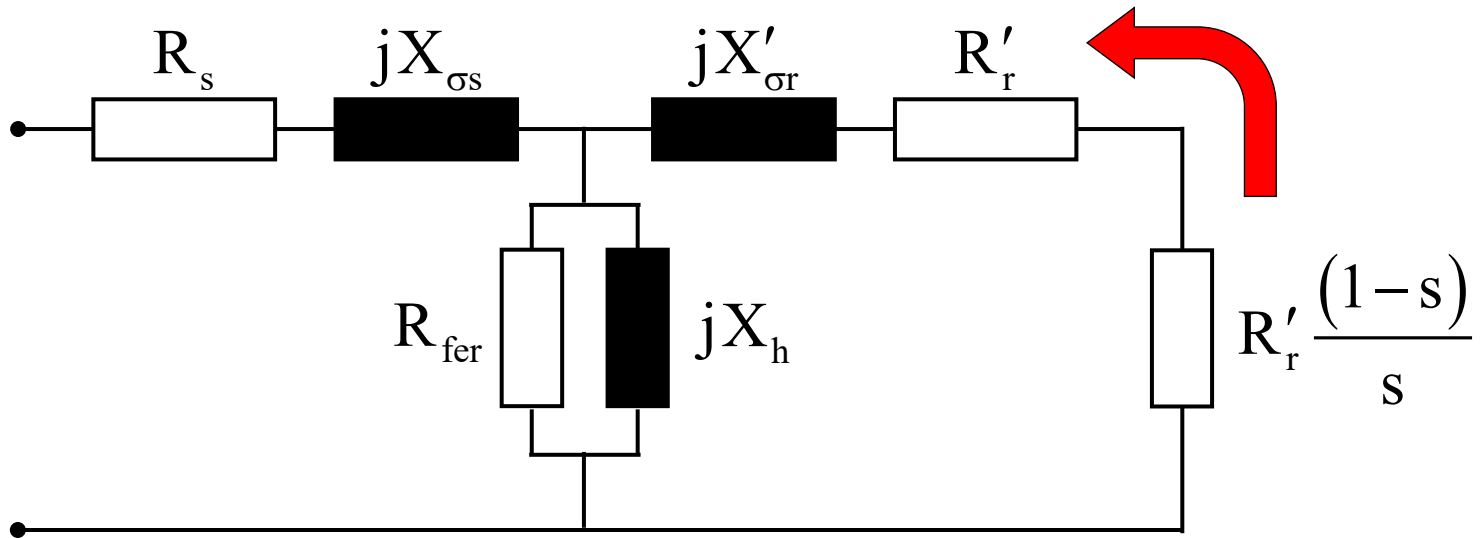


Modélisation  
de la charge

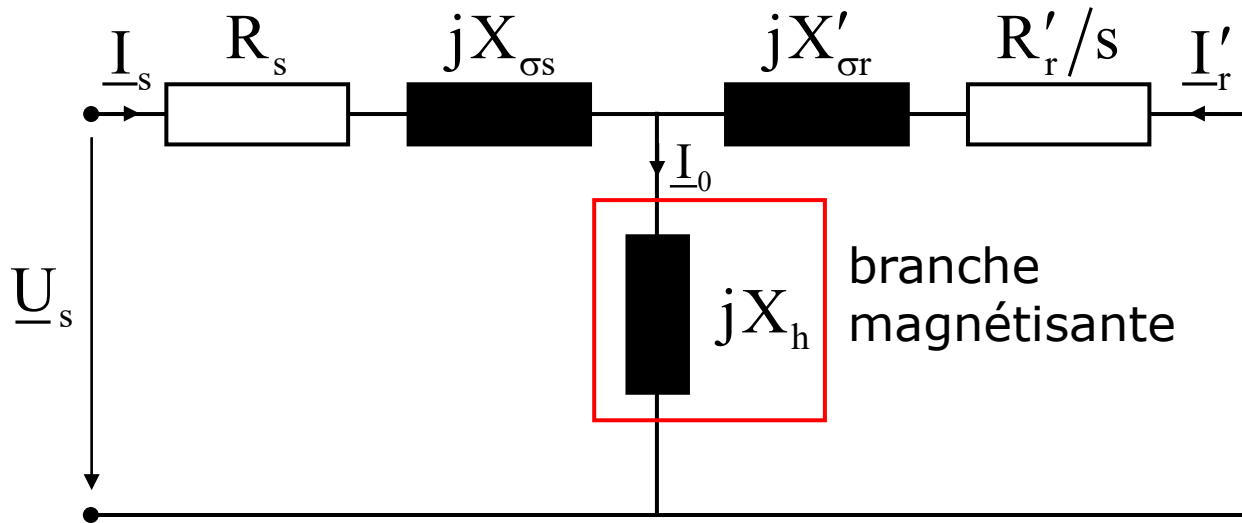
# Schéma équivalent de la machine asynchrone



# Schéma équivalent de la machine asynchrone

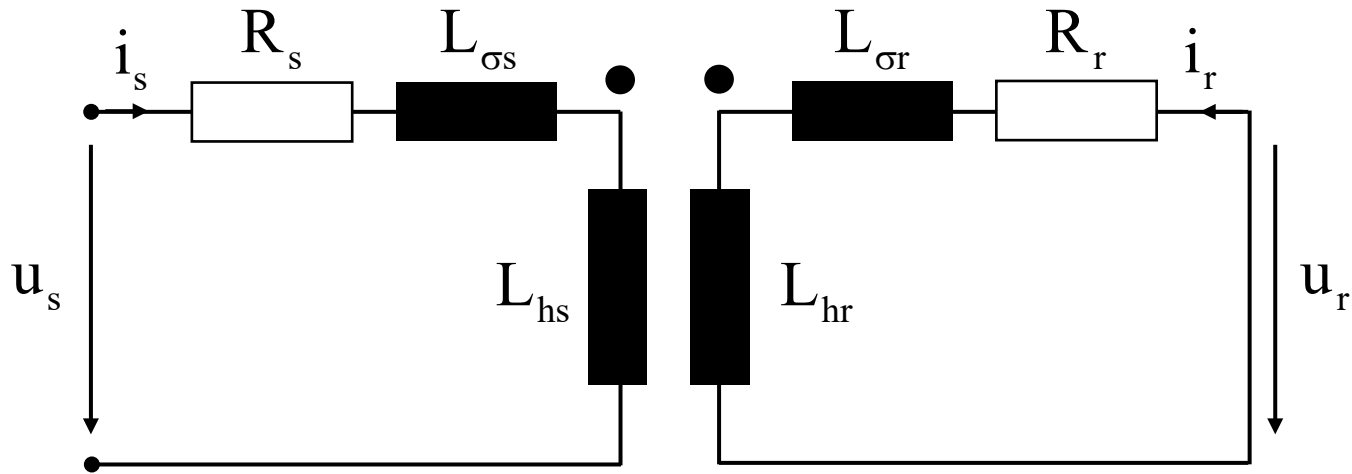


# Schéma équivalent de la machine asynchrone



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

# 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

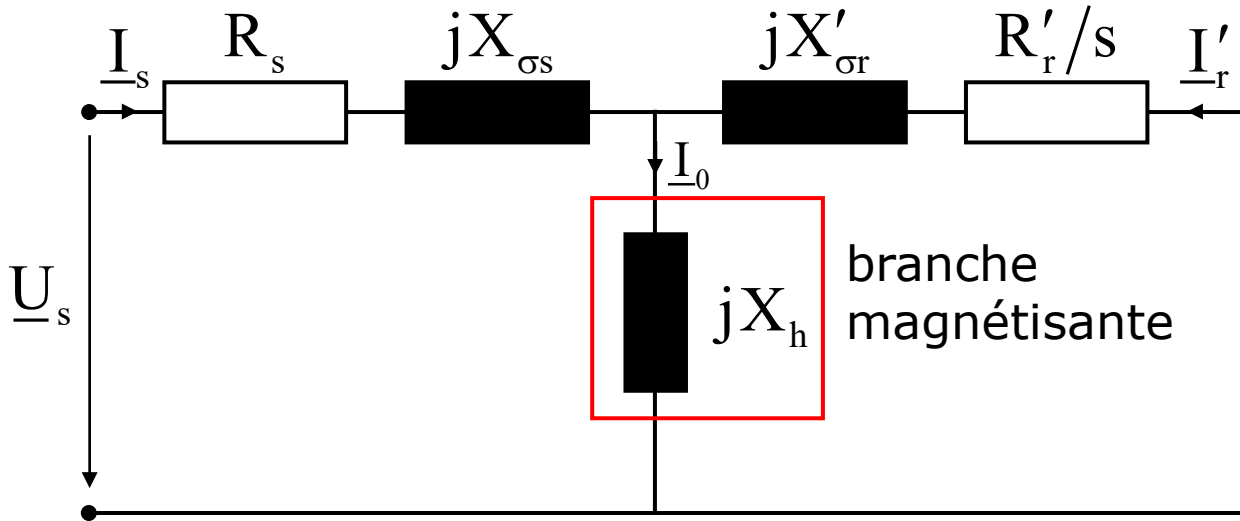
$$\ddot{u} = \frac{N_s k_{ws}}{N_r k_{wr}} \longrightarrow \begin{cases} L_{hs} = \ddot{u} L_{sr} \\ L'_{hr} = L_{hs} \end{cases}$$

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

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

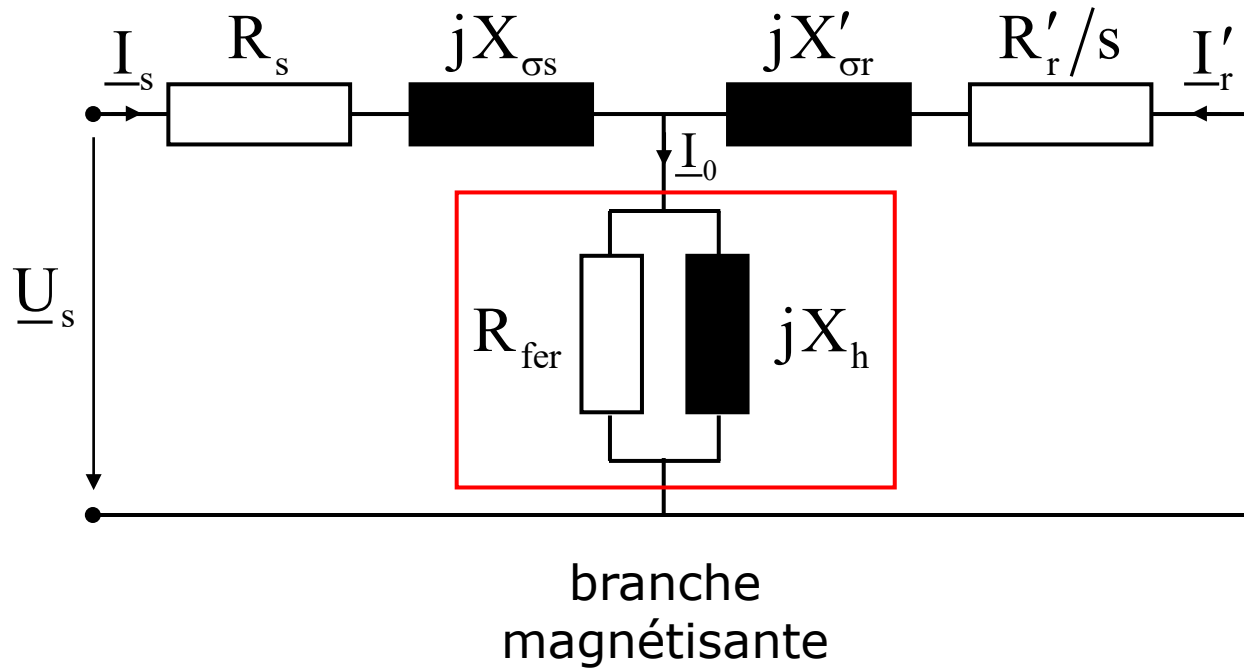
$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j X_{\sigma s} \underline{I}_s + j X_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \\ 0 = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + j X'_{\sigma r} \underline{I}'_r + j X_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \end{cases}$$

# Schéma équivalent

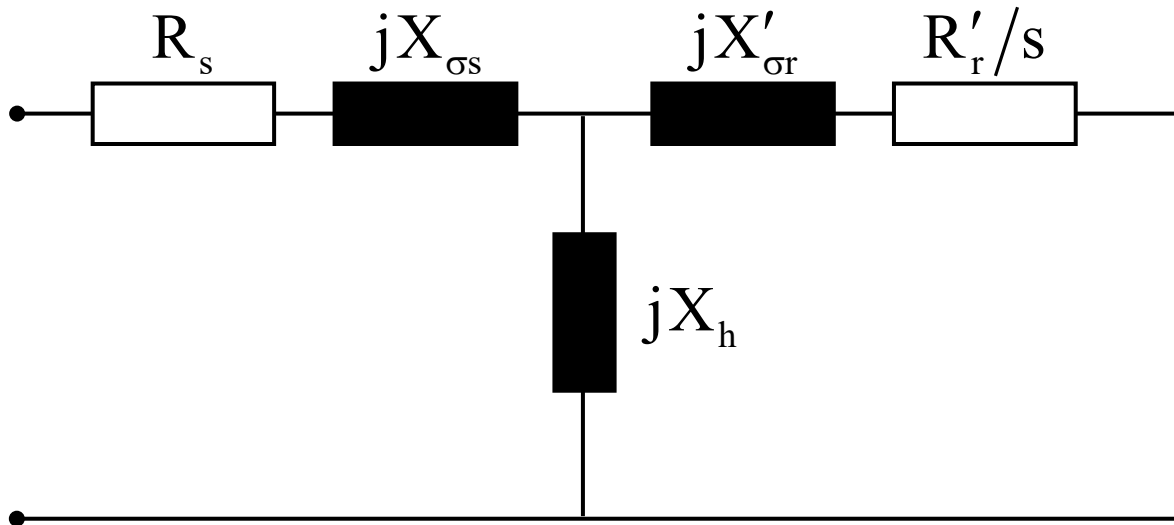


$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{\sigma s} \underline{I}_s + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \\ 0 = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{\sigma r} \underline{I}'_r + jX_h (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \end{cases}$$

# Schéma équivalent



# Paramètres du schéma équivalent



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

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

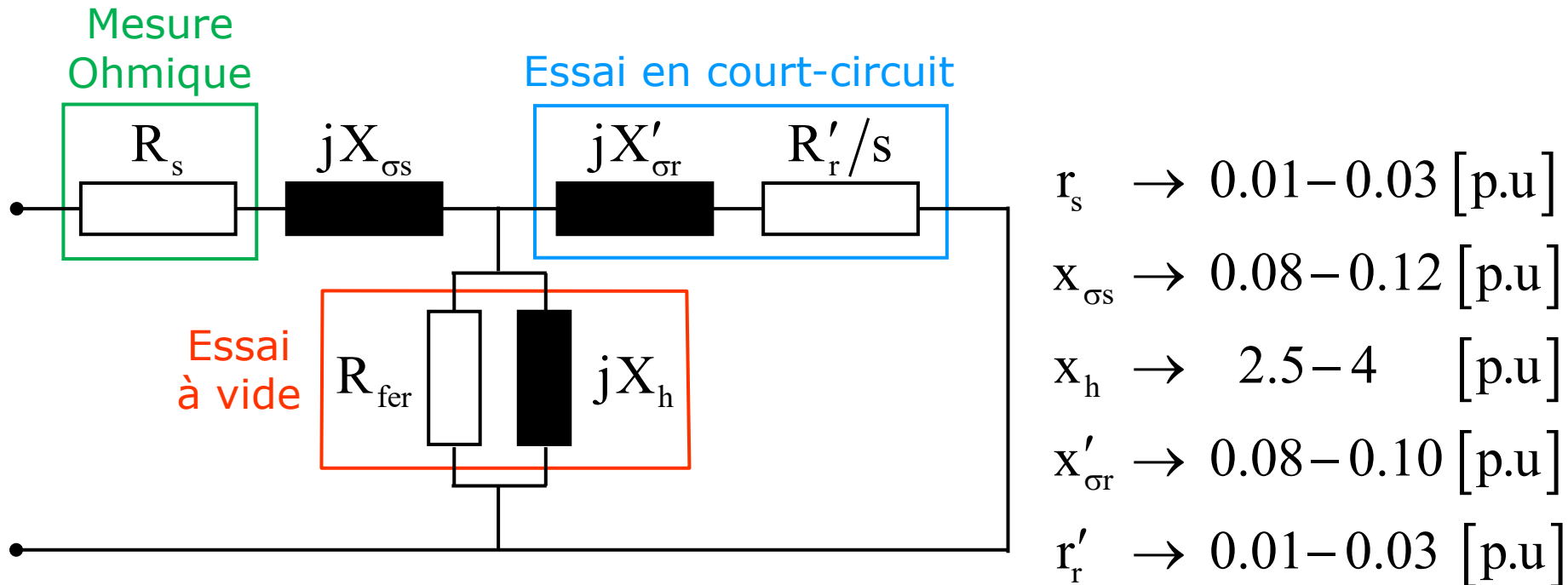
$$x_h \rightarrow 2.5 - 4 \text{ [p.u]}$$

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

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

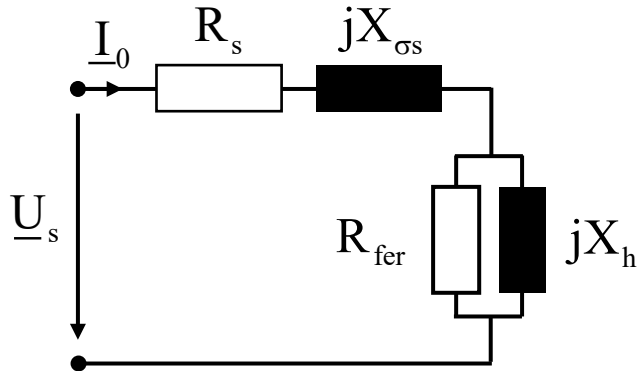
# Paramètres du schéma équivalent

Les paramètres se déterminent par différents essais



# Détermination des paramètres

Essai à vide



- $P_0$  = la puissance active totale
- $U_s$  = la tension stator de phase
- $I_0$  = le courant stator de phase

$$\underline{Z}_0 = R_s + jX_{\sigma s} + \frac{jR_{fer} X_h}{R_{fer} + jX_h} = R_0 + jX_0$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_0 - (R_s + jX_{\sigma s})} = \frac{1}{R_{fer}} + \frac{1}{jX_h}$$

$$\begin{cases} R_{fer} = \frac{(R_0 - R_s)^2 + (X_0 - X_{\sigma s})^2}{(R_0 - R_s)} \\ X_h = \frac{(R_0 - R_s)^2 + (X_0 - X_{\sigma s})^2}{(X_0 - X_{\sigma s})} \end{cases}$$

$$|\underline{Z}_0| = \frac{U_s}{I_0}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_0 - P_{fv}}{3 U_s I_0}$$

$$\sin \varphi = \sin(\cos^{-1}(\cos \varphi))$$

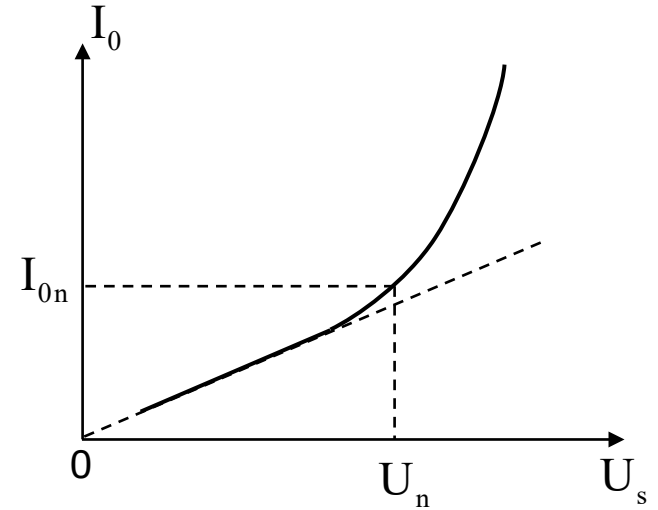
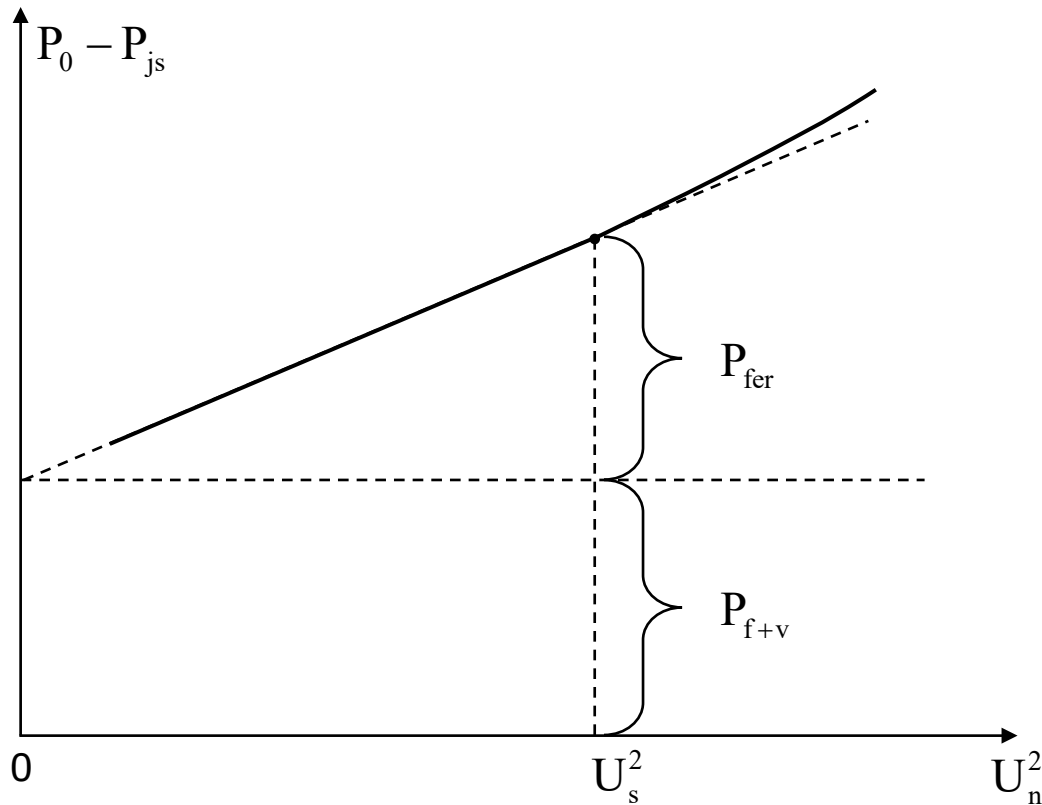
$$\begin{cases} R_0 = |\underline{Z}_0| \cos \varphi \\ X_0 = |\underline{Z}_0| \sin \varphi \end{cases}$$

# Détermination des paramètres

Essai à vide

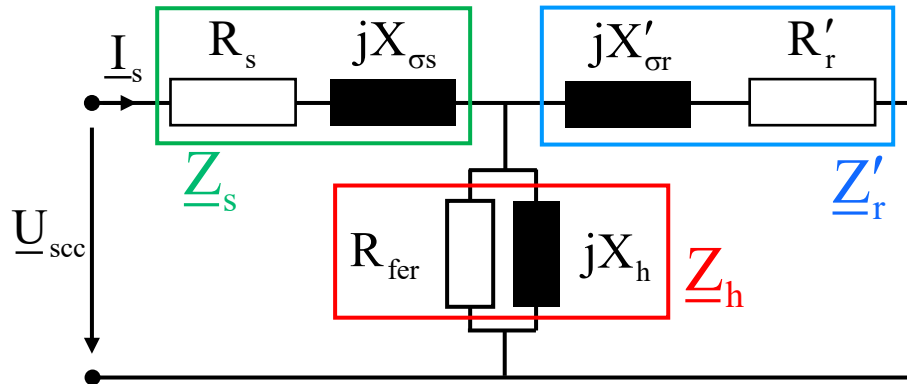
$$P_0 = P_{js} + P_{fer} + P_{fv}$$

$$P_{js} = 3 R_s I_0^2$$



# Détermination des paramètres

Essai en court-circuit (à rotor bloqué)



- $P_{cc}$  = la puissance active totale
- $U_{scc}$  = la tension stator de phase
- $I_s$  = le courant stator de phase

$$\underline{Z}_{cc} = \underline{Z}_s + \frac{\underline{Z}_h \underline{Z}'_r}{\underline{Z}_h + \underline{Z}'_r} = R_{cc} + jX_{cc}$$

$$\begin{cases} \underline{Z}_s = R_s + jX_{\sigma s} \\ \underline{Z}_h = \frac{jR_{fer} X_h}{R_{fer} + jX_h} \\ \underline{Z}'_r = R'_r + jX'_{\sigma r} \end{cases}$$

$$\begin{cases} R'_r = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\frac{1}{(\underline{Z}_{cc} - \underline{Z}_s)} - \frac{1}{\underline{Z}_h}} \right\} \\ X'_{\sigma r} = \operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{\frac{1}{(\underline{Z}_{cc} - \underline{Z}_s)} - \frac{1}{\underline{Z}_h}} \right\} \end{cases}$$

$$|\underline{Z}_{cc}| = \frac{U_{scc}}{I_s}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{cc}}{3 U_{scc} I_s}$$

$$\sin \varphi = \sin(\cos^{-1}(\cos \varphi))$$

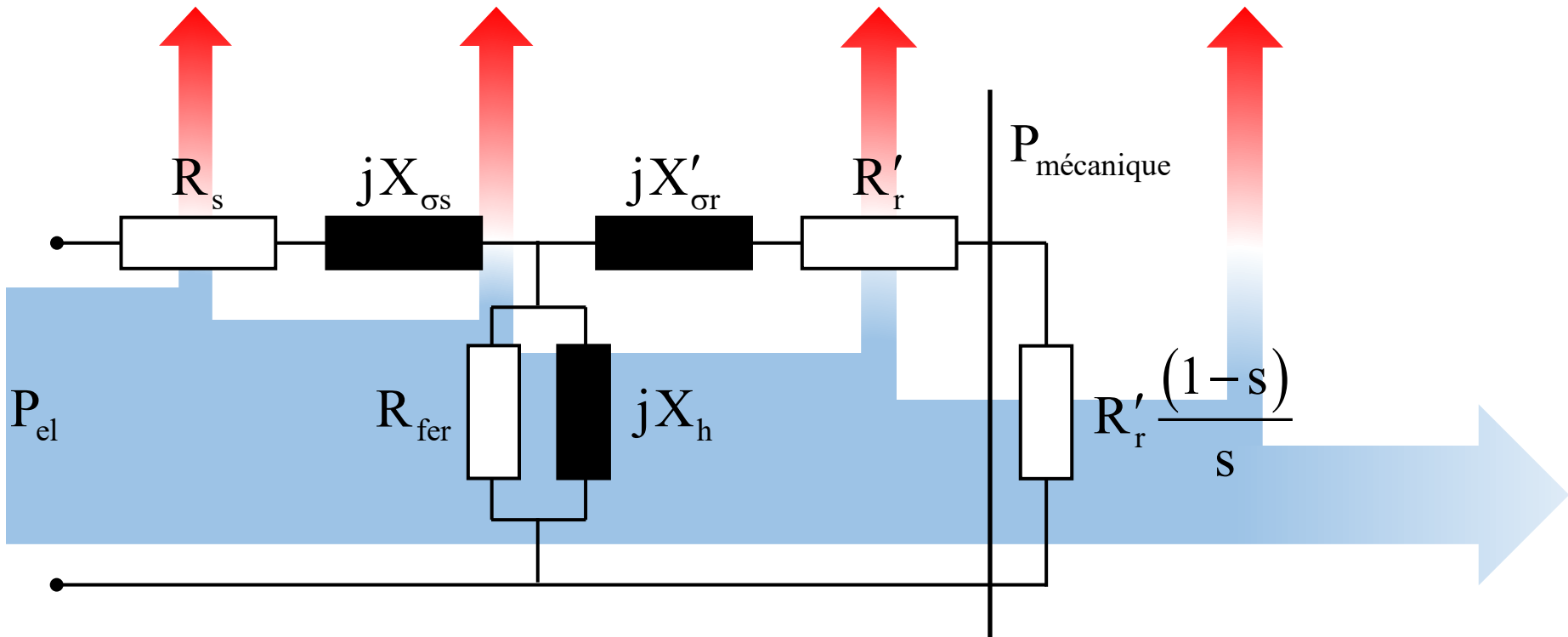
$$\begin{cases} R_{cc} = |\underline{Z}_{cc}| \cos \varphi \\ X_{cc} = |\underline{Z}_{cc}| \sin \varphi \end{cases}$$

# Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- **Caractéristique de couple**
- Impédance équivalente
- Démarrage des moteurs à cage
- Alimentation à tension et fréquence variables
- Modes de fonctionnement et bilan de puissance

# Bilan de puissance – Moteur

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

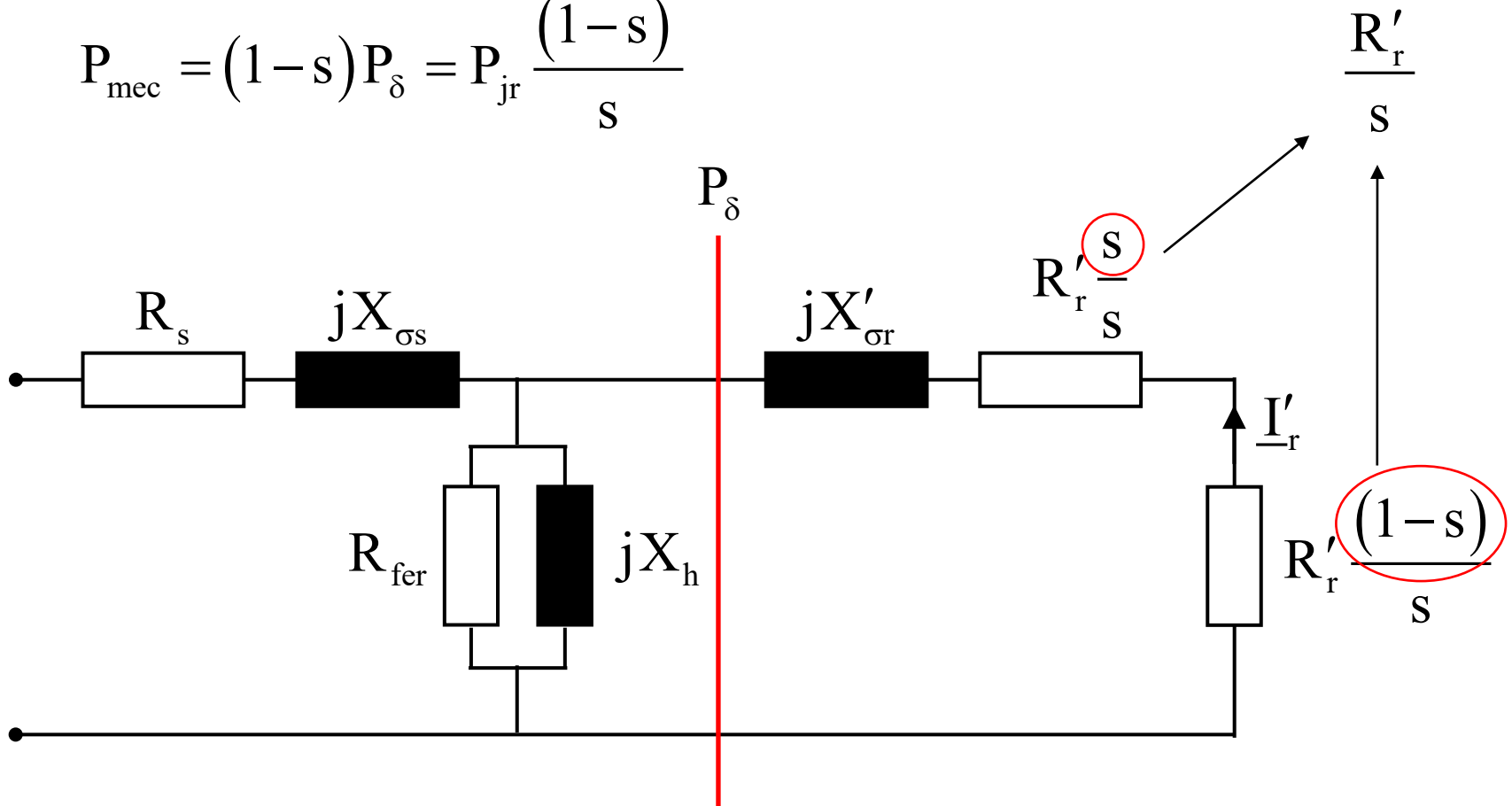


# Puissance d'entrefer

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

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

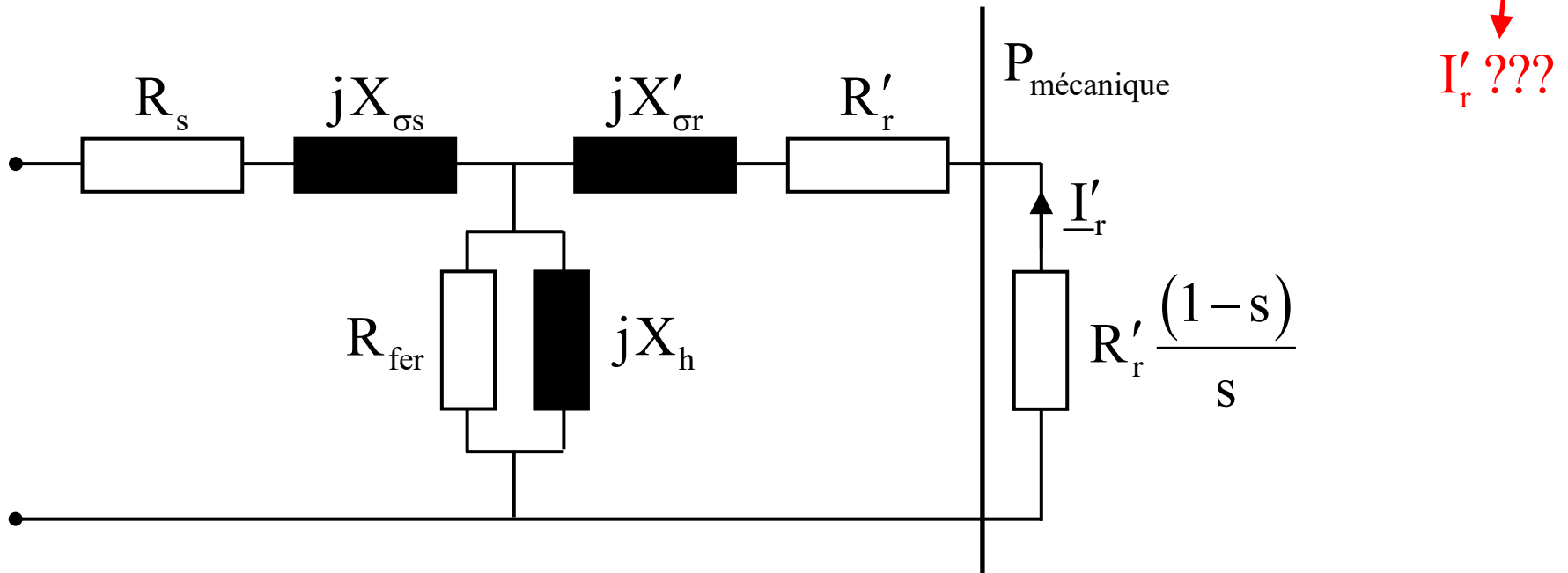
$$P_{mec} = (1-s) P_{\delta} = P_{jr} \frac{(1-s)}{s}$$



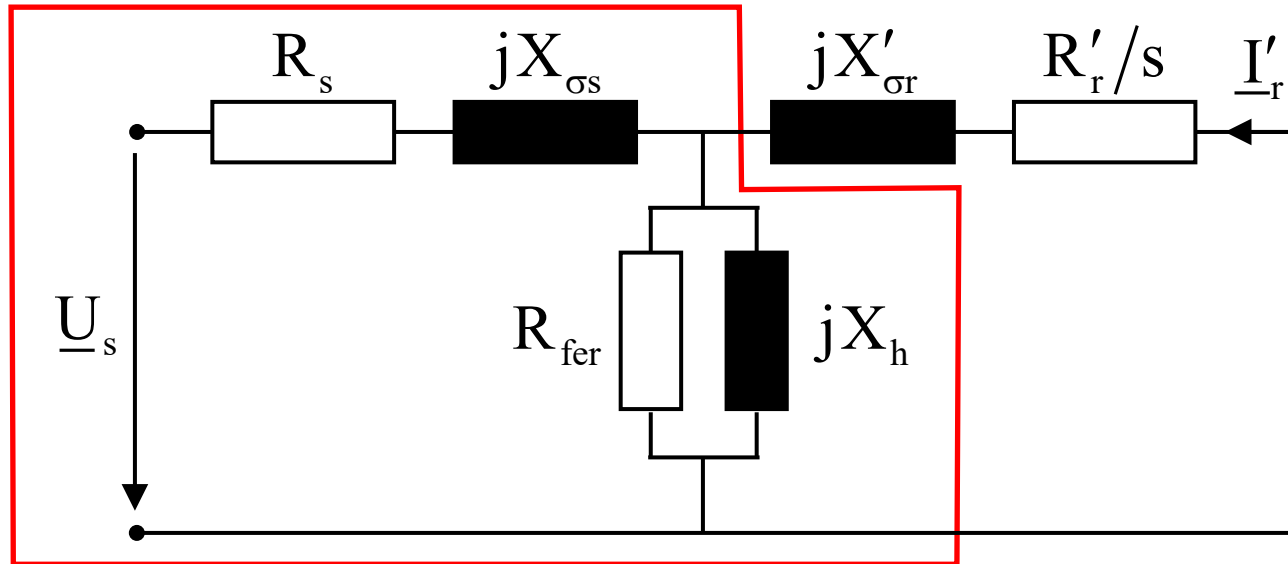
# Couple électromagnétique

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

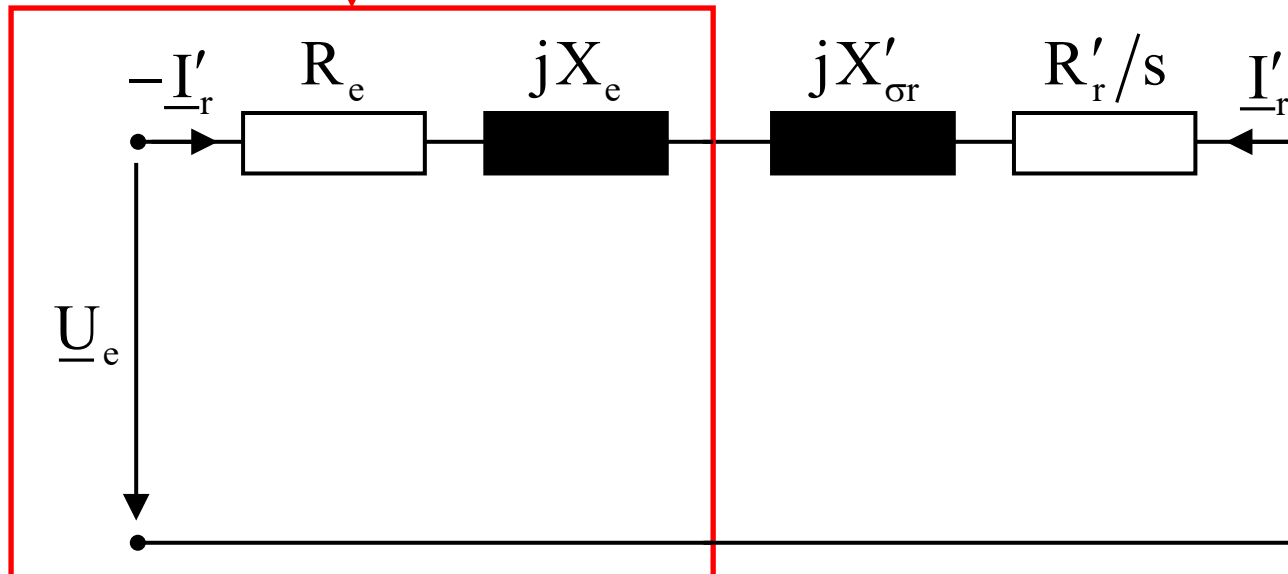
$$T_{\text{em}} = \frac{1}{\Omega_m} 3 R'_r \frac{(1-s)}{s} I_r'^2 \xrightarrow{\Omega_m = \Omega_s (1-s)} T_{\text{em}} = 3 \frac{1}{\Omega_s} \frac{R'_r}{s} I_r'^2$$



# Equivalent de Thévenin



Théorème de Thévenin



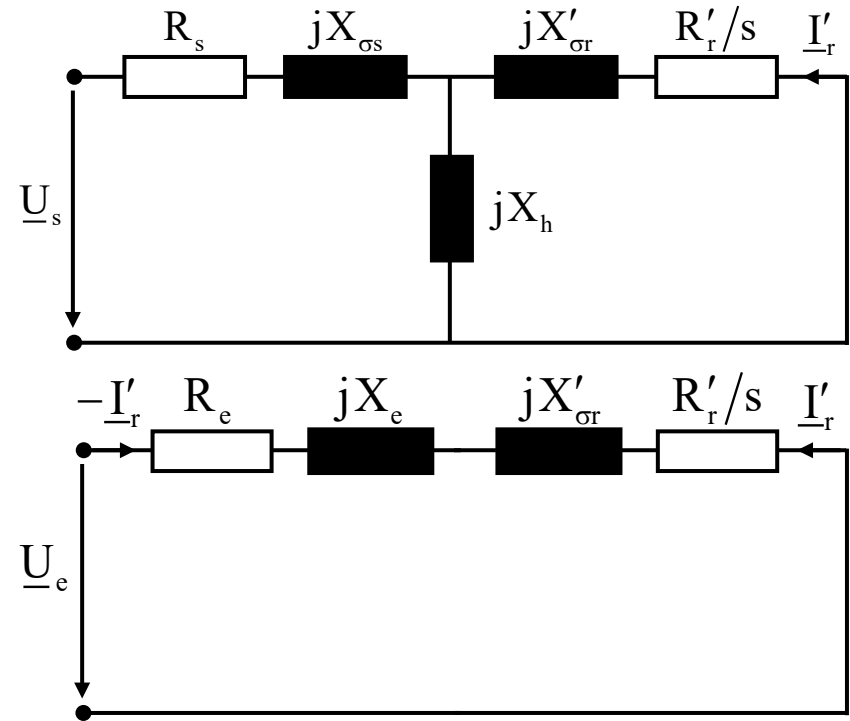
# Equivalent de Thévenin

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

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

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

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



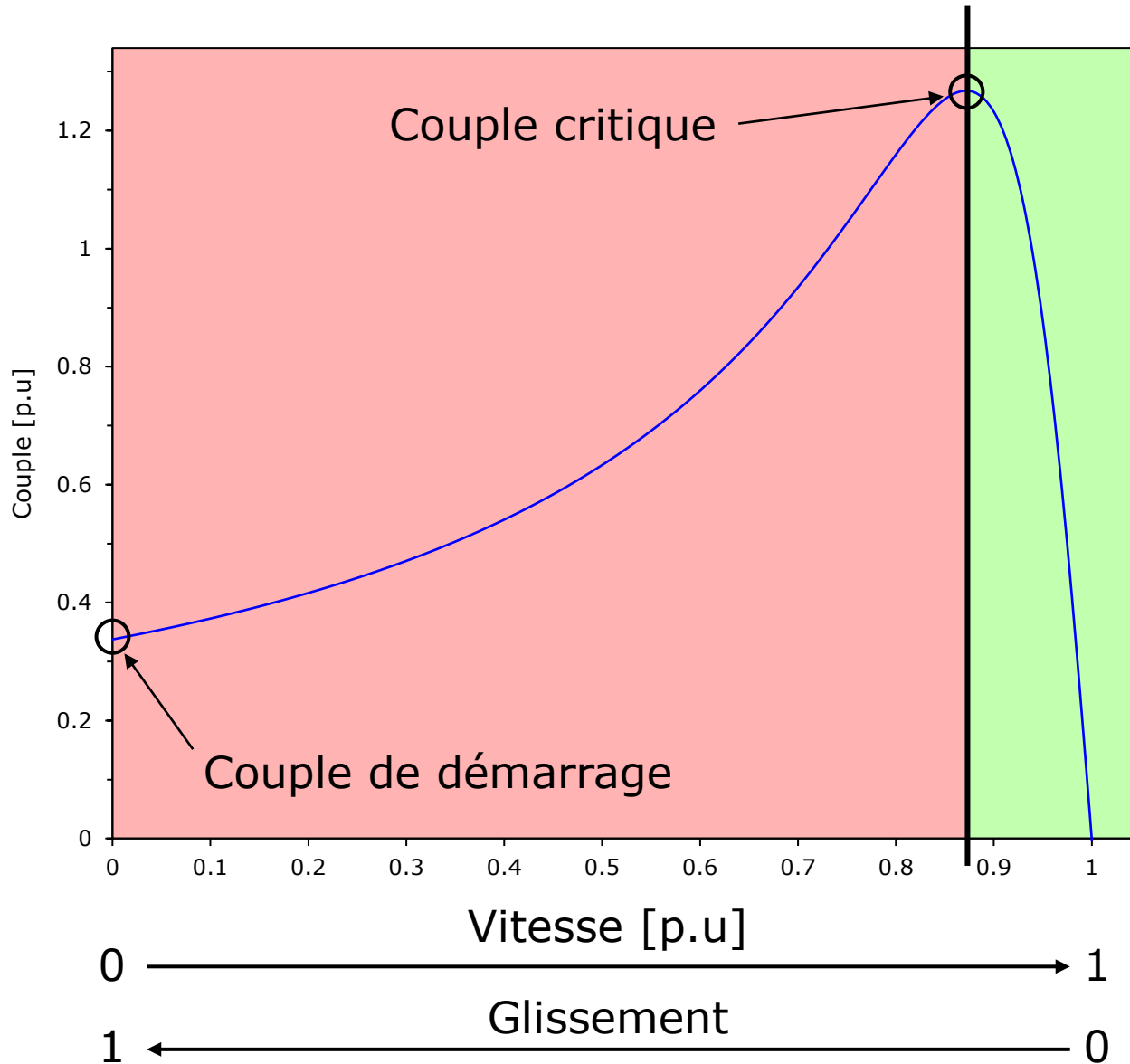
# Couple électromagnétique

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

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

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

# Caractéristique de couple

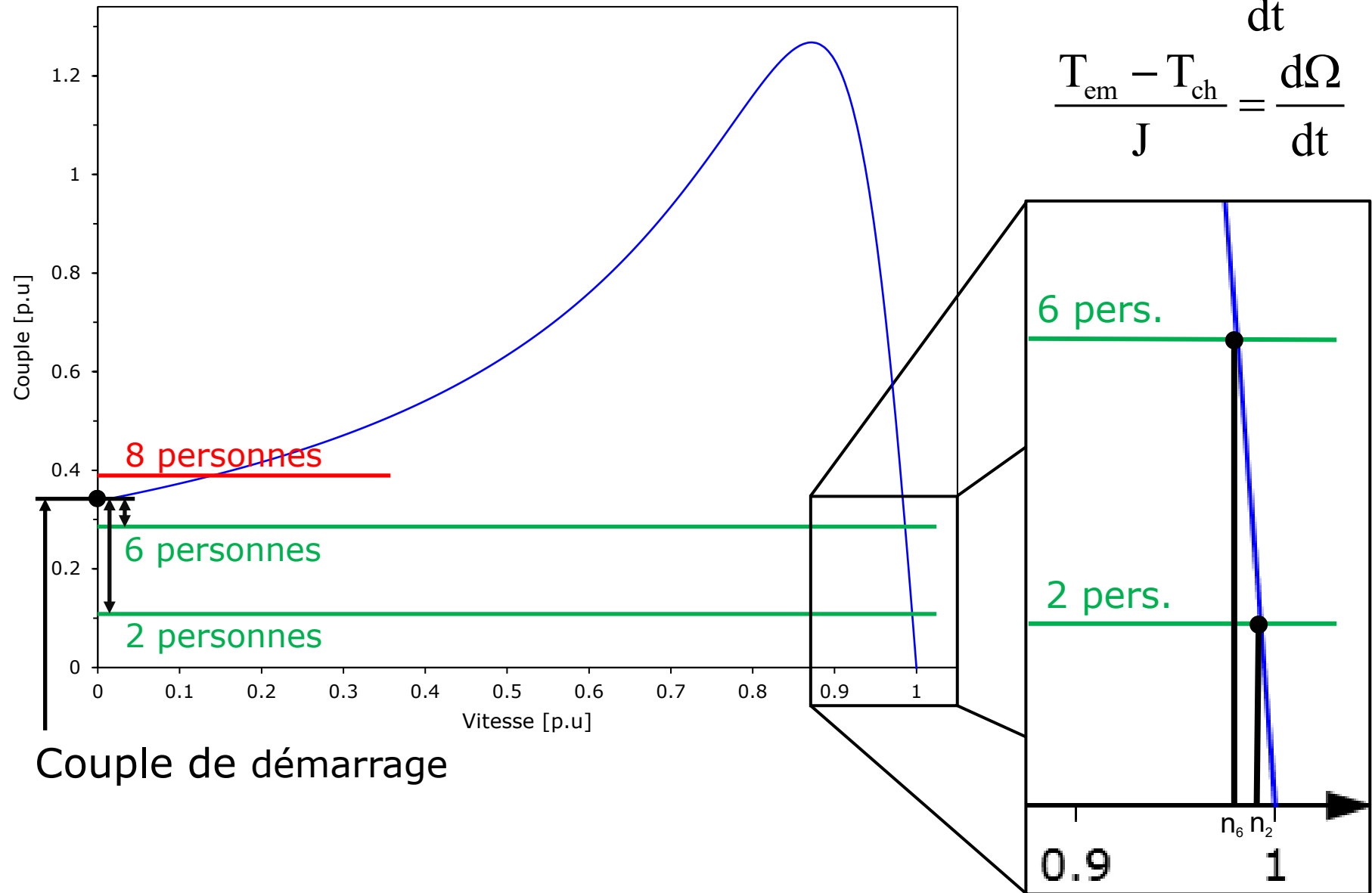


# Caractéristique de couple

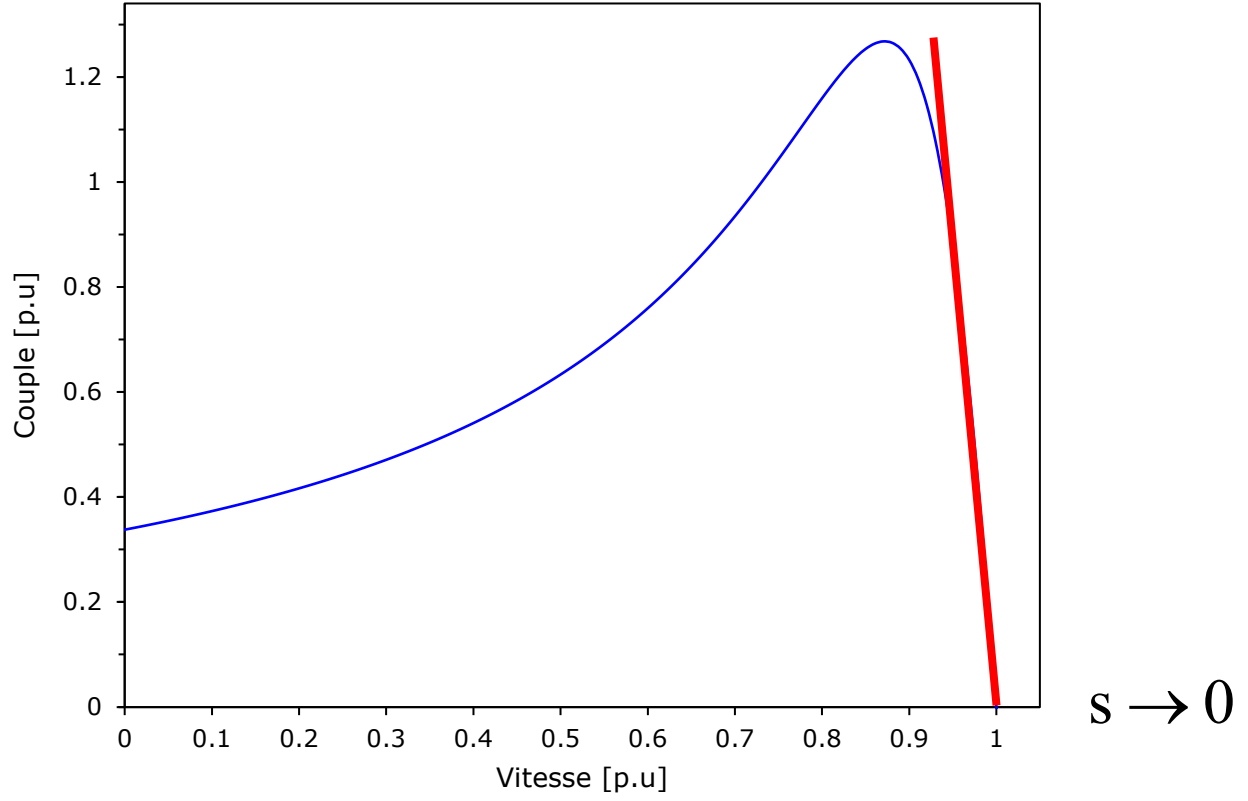
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$\Sigma T = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$$\frac{T_{em} - T_{ch}}{J} = \frac{d\Omega}{dt}$$



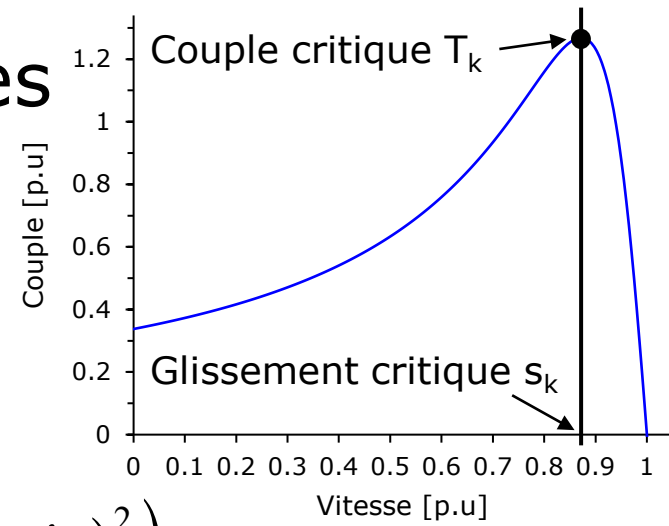
$$T_{em} = \frac{3 U_e^2 \frac{R'_r}{s}}{\Omega_s \left[ \left( R_e + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2 \right]}$$



$$T_{em} \approx \frac{3 U_e^2 \textcircled{s}}{\Omega_s R'_r}$$

# Couple et glissement critiques

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



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

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

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

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

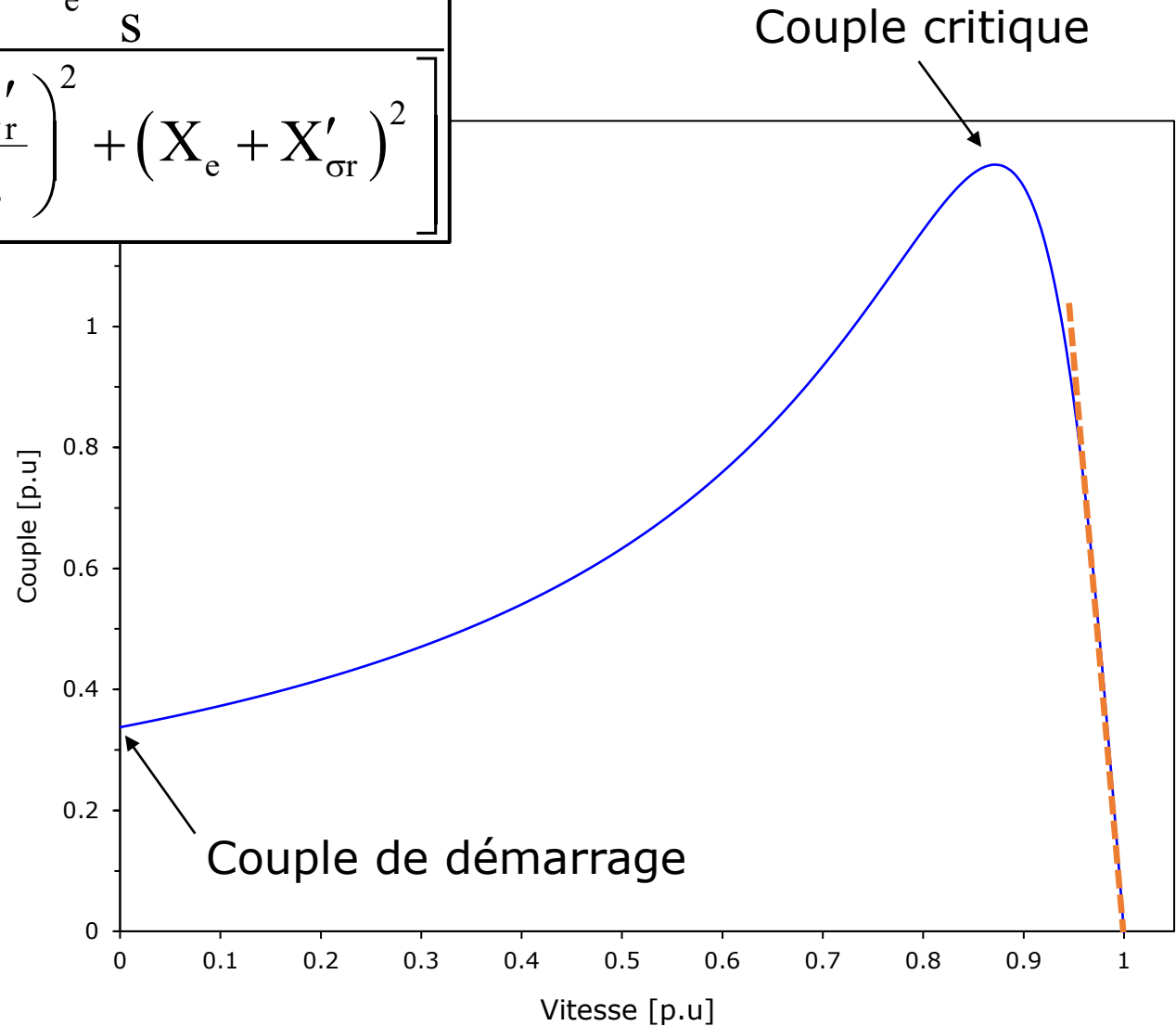
Résolution par le théorème d'échange de puissance maximum entre le réseau et la charge représentée par  $R'_r / s$

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

# Caractéristique de couple

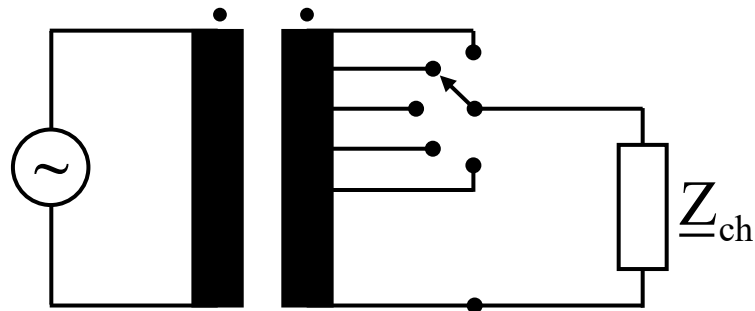
$$T_{em} = \frac{3 U_e^2 \frac{R'_r}{s}}{\Omega_s \left[ \left( R_e + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_e + X'_{\sigma r})^2 \right]}$$

$$T_{em} \approx \frac{3 U_e^2 s}{\Omega_s R'_r}$$

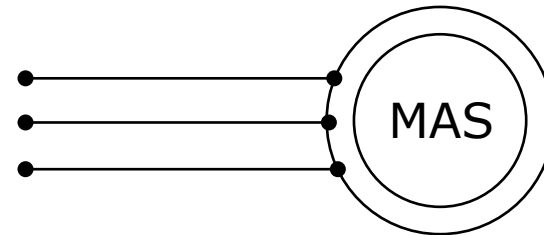
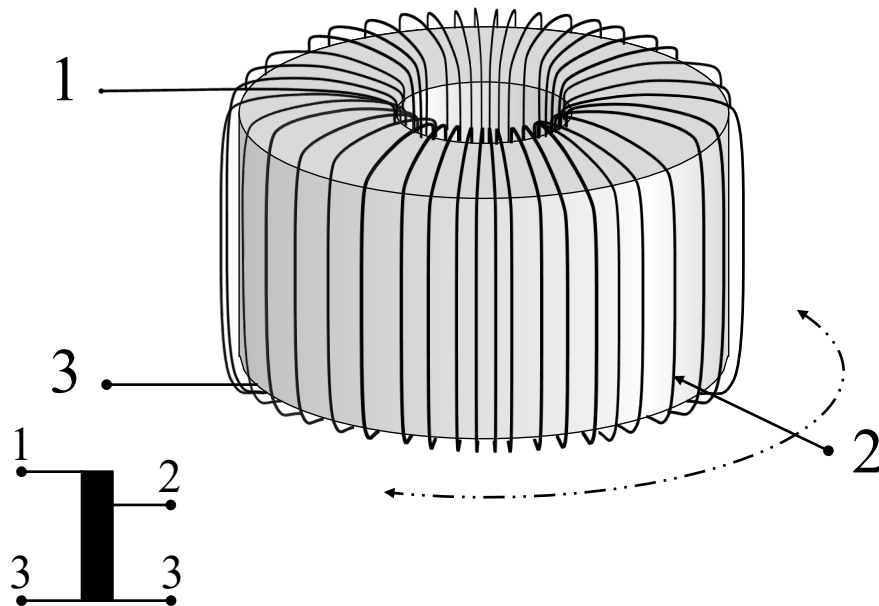


# Alimentation à tension variable

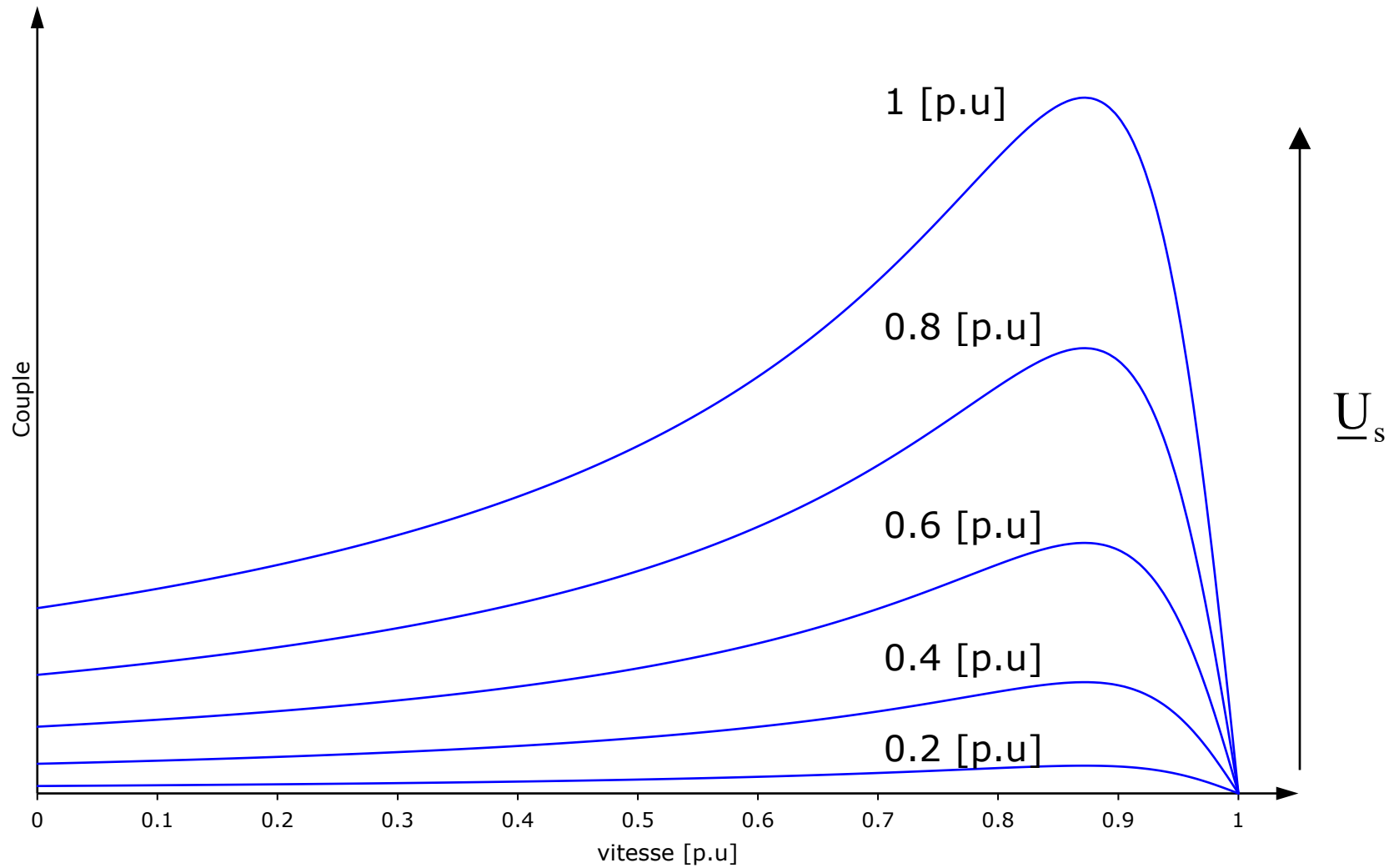
Transformateur à gradins



Le variac



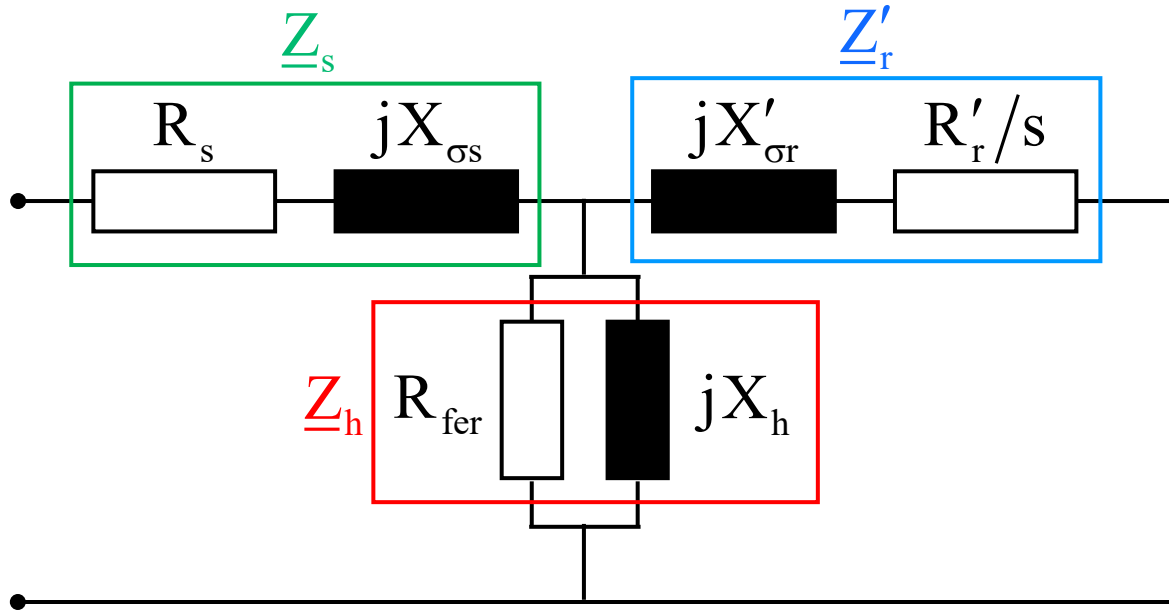
# Alimentation à tension variable



# Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- Caractéristique de couple
- **Impédance équivalente**
- Démarrage des moteurs à cage
- Alimentation à tension et fréquence variables
- Modes de fonctionnement et bilan de puissance

# Impédance équivalente



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

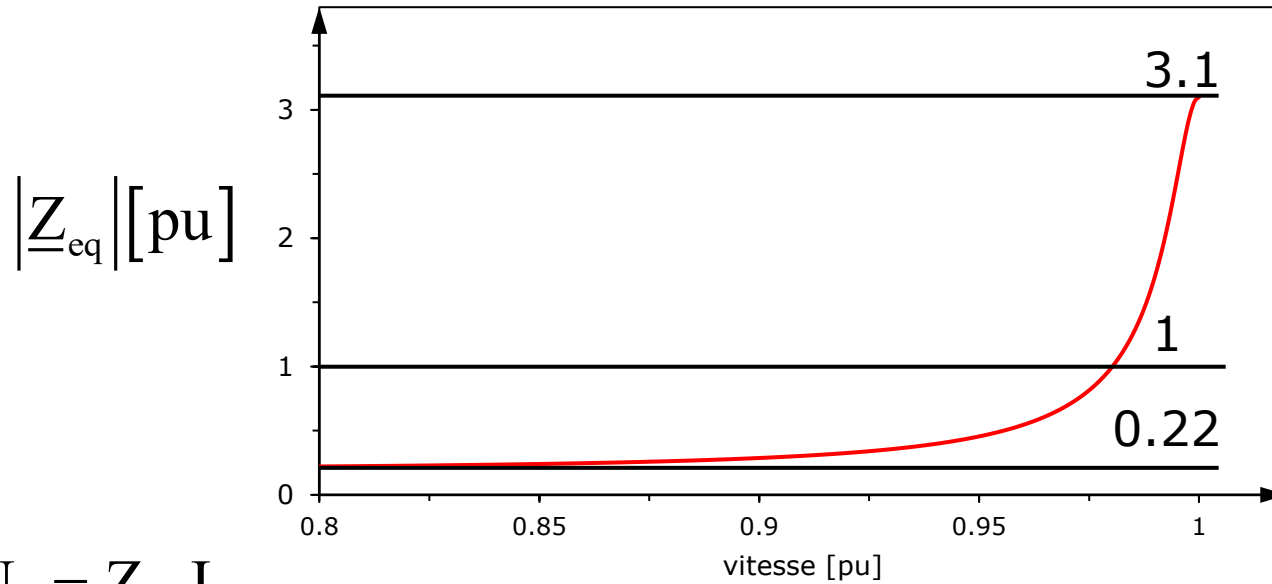
$$\underline{Z}_s = R_s + jX_{\sigma s}$$

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

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

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

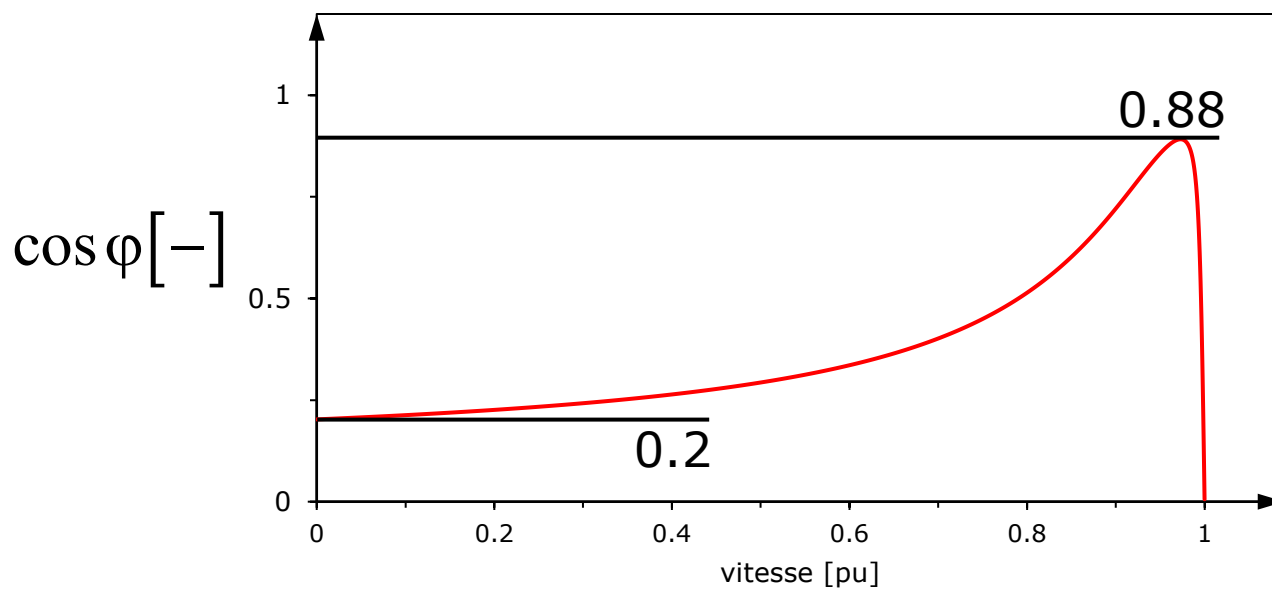
# Impédance équivalente en fonction du glissement



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

$$\frac{1}{3.1} \cong 0.33$$

$$\underline{U}_s = \underline{Z}_{eq} \underline{I}_s$$

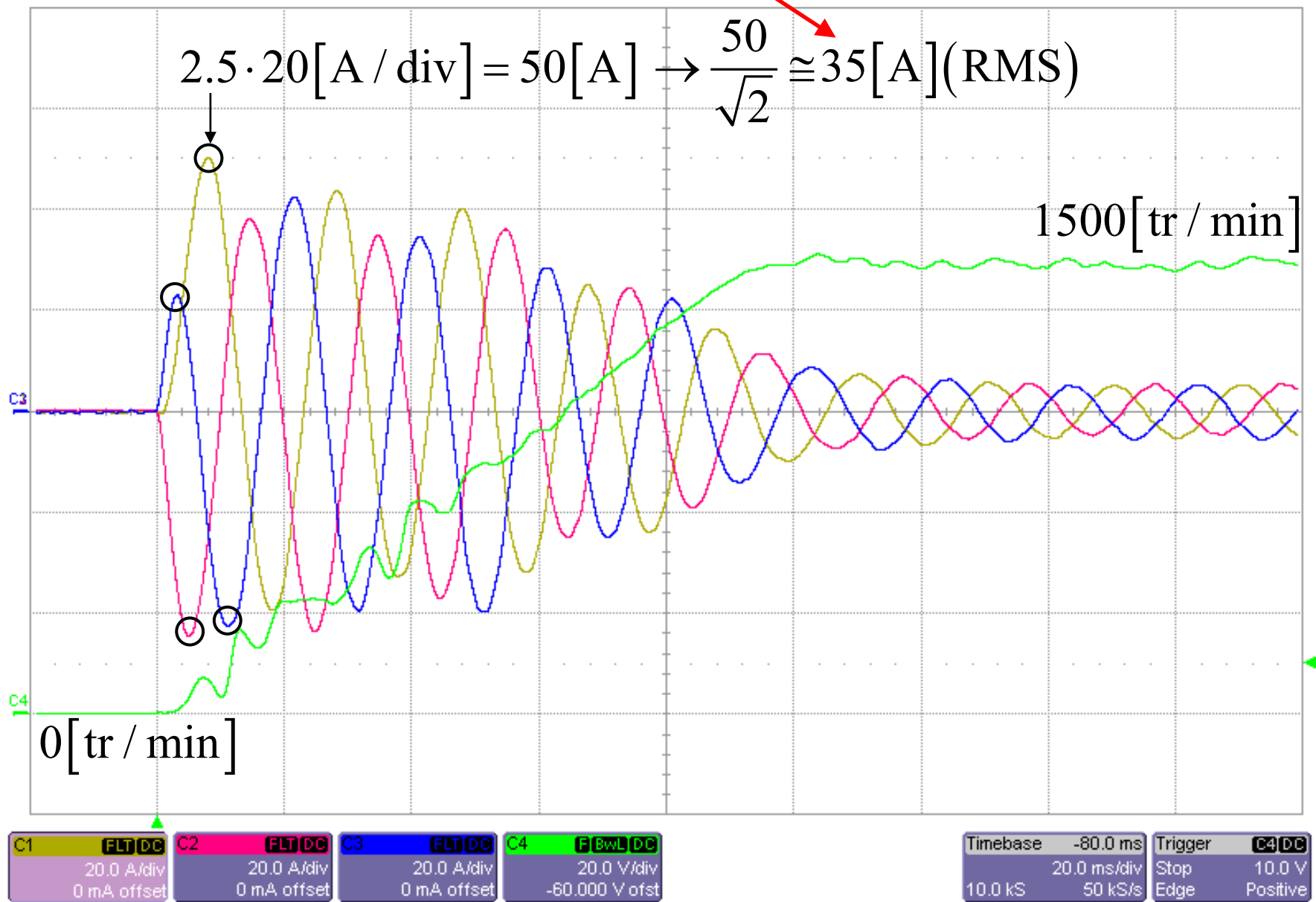


consomme  
du réactif !

# Sommaire

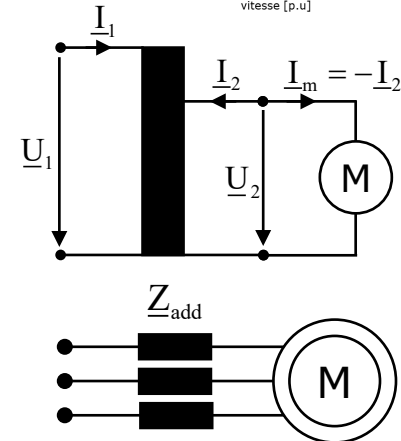
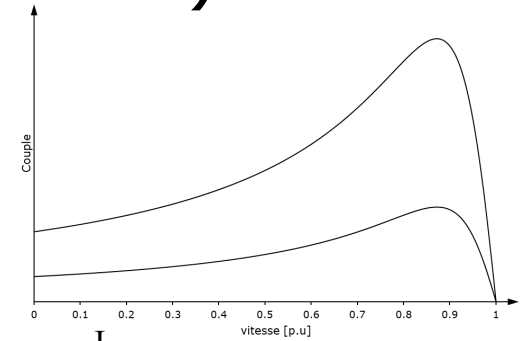
- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- Caractéristique de couple
- Impédance équivalente
- Démarrage des moteurs à cage
- Alimentation à tension et fréquence variables
- Modes de fonctionnement et bilan de puissance

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



# 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).



3RW3013-1BB04 - Soft Starter SIRIUS S00 3.6A 400V 1.5kW 24VAC/DC, Siemens SIEMENS

Distrelec Article Number: 137-65-965 [Manufacturer Part Number: 3RW3013-1BB04](#) [Brand: Siemens](#) | [Product family](#)



PRICE PER PIECE  
CHF 142.64 (inc. VAT)  
**CHF 132.44** (exc. VAT)

1+ CHF 132.44  
5+ CHF 129.13

1 min order

Image is for illustrative purposes only. Please refer to product description.

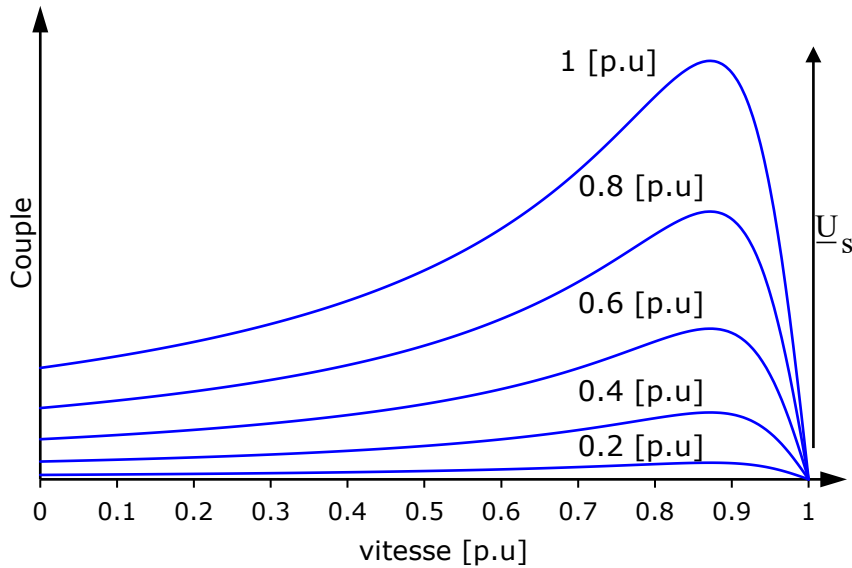
[Shopping list](#) [Compare](#)

# Sommaire

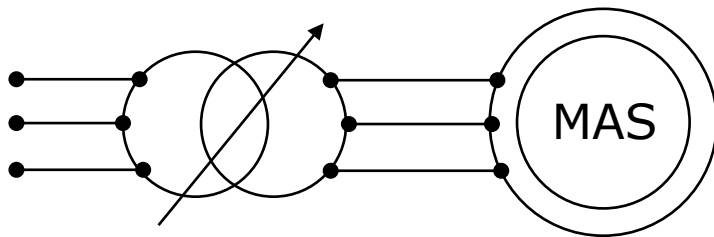
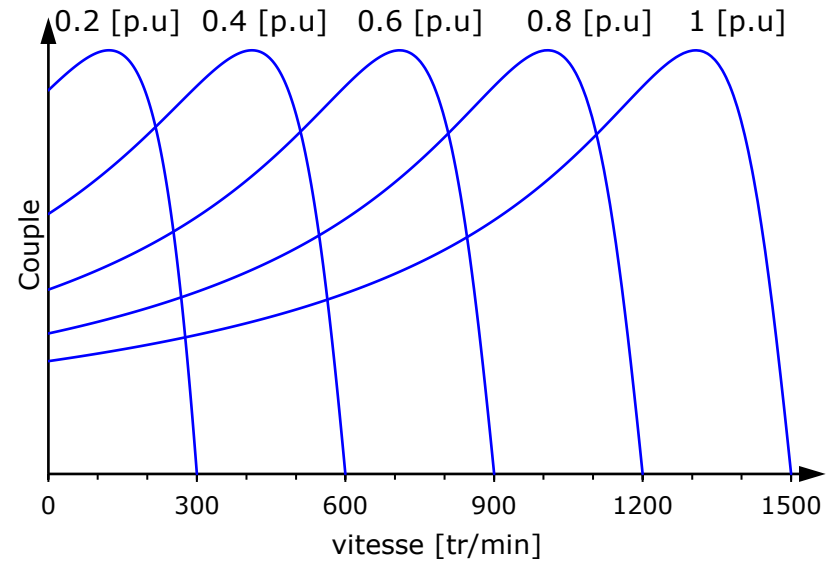
- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- Caractéristique de couple
- Impédance équivalente
- Démarrage des moteurs à cage
- Alimentation à tension et fréquence variables
- Modes de fonctionnement et bilan de puissance

# Alimentation à tension et fréquence variables

## Alimentation à tension variable

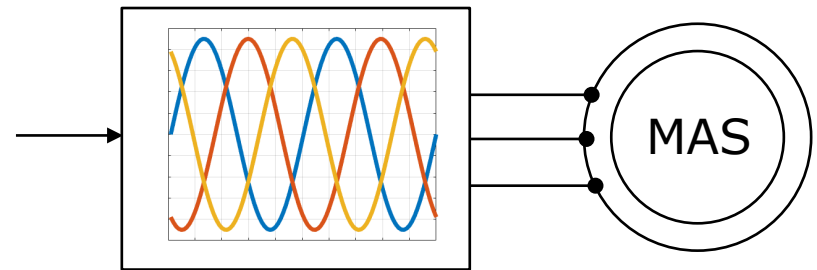


## Alimentation à U/f constant



Permet de faire varier  $U_s$  en amplitude

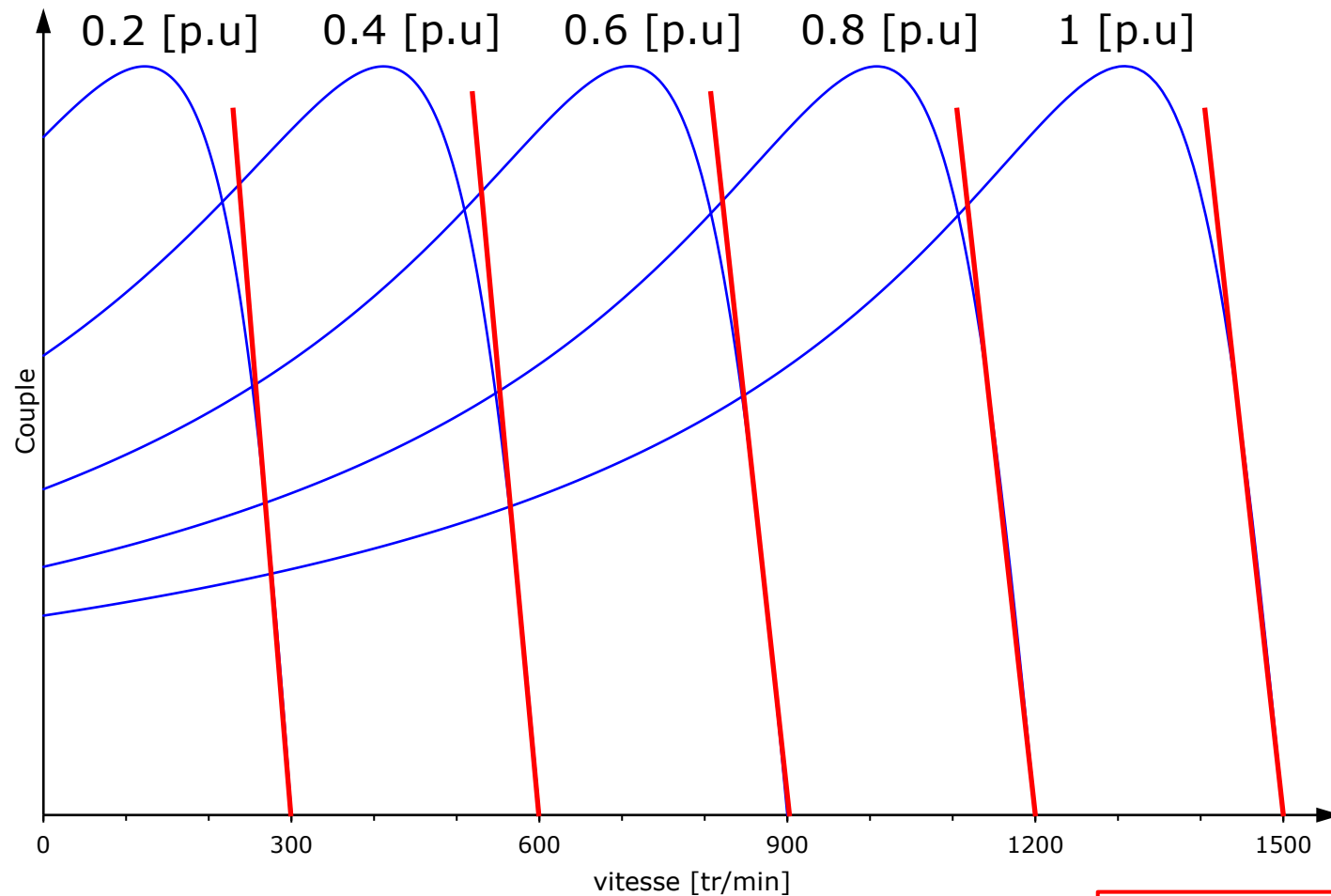
## VSI



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

# Alimentation à tension et fréquence variables

Alimentation à U/f constant

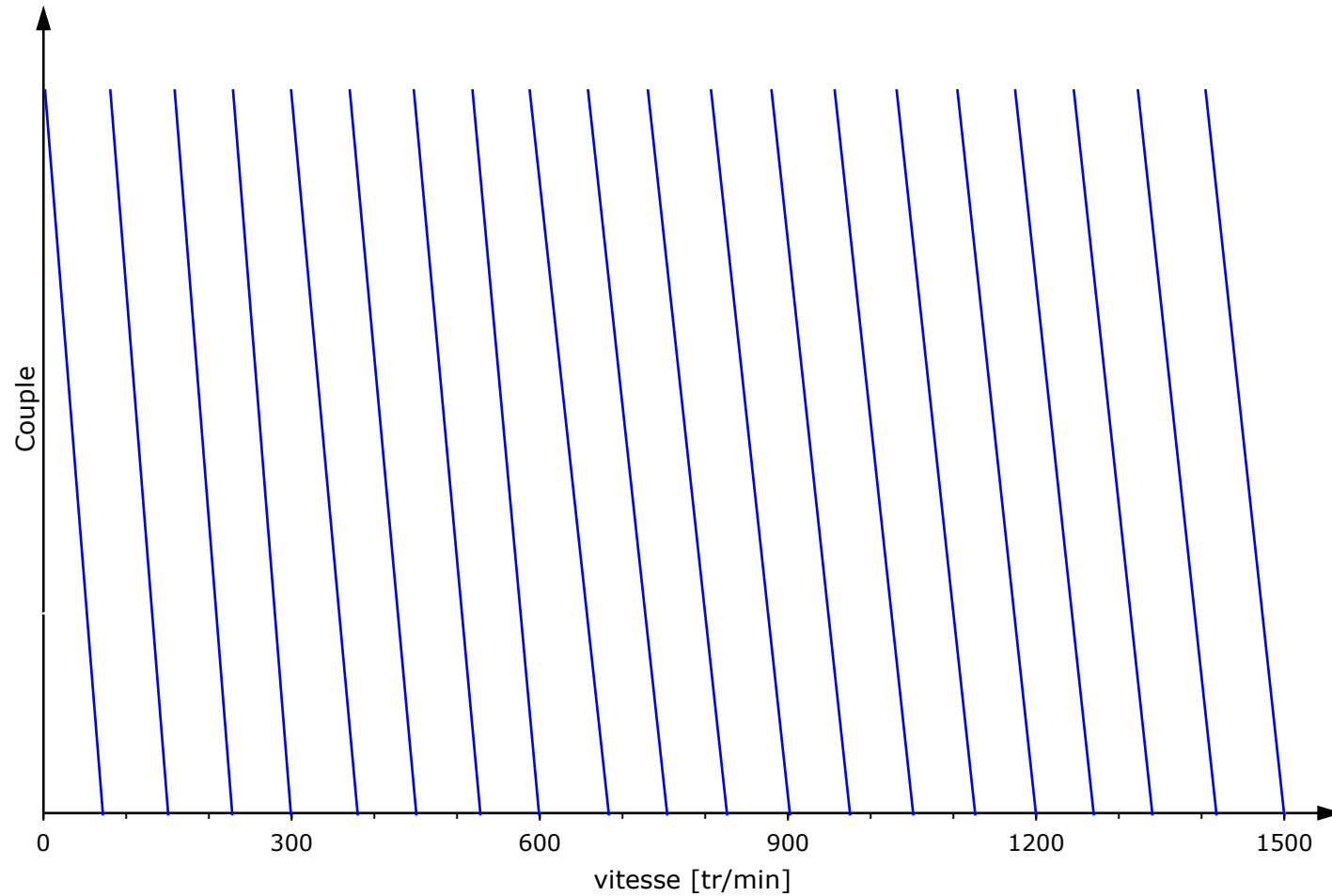


Exemple :  $\frac{230 \text{ V}}{50 \text{ Hz}} \rightarrow 0.5 \rightarrow \frac{115 \text{ V}}{25 \text{ Hz}}$

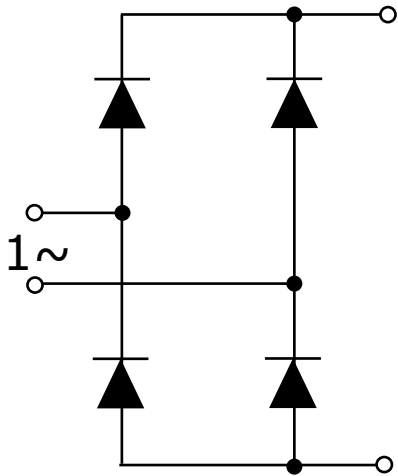
$$T_{\text{em}} \approx \frac{3 U_e^2}{\Omega_s R'_r} s$$

# Alimentation à tension et fréquence variables

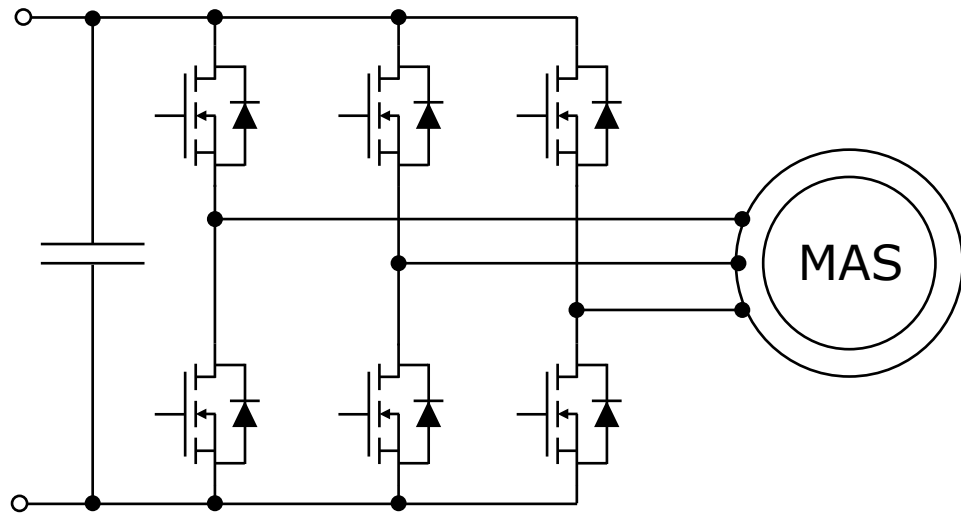
Alimentation à  $U/f$  constant



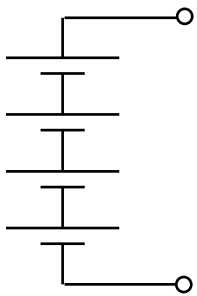
# Alimentation à tension et fréquence variables



- Redresseur à diodes
- Pont de diodes



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

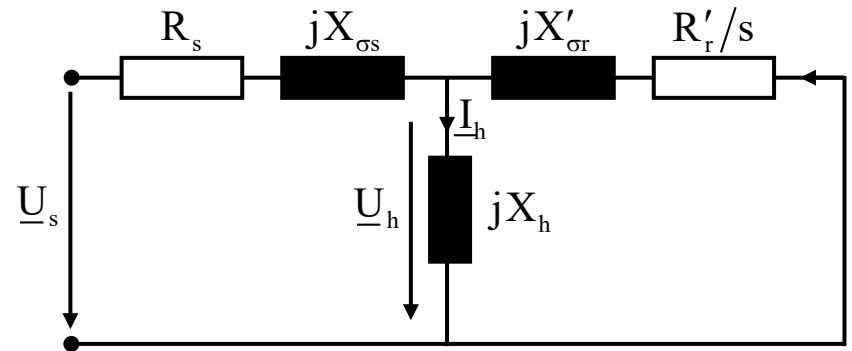


Batteries

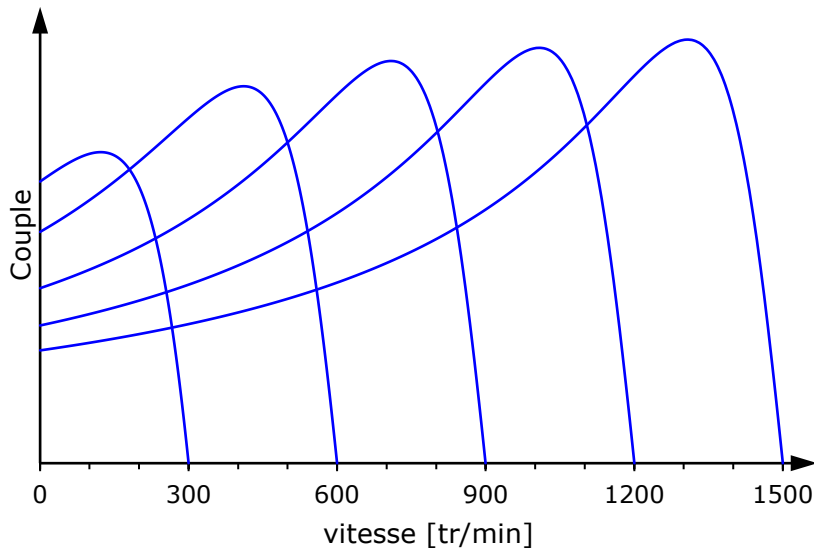


# Alimentation à tension et fréquence variables

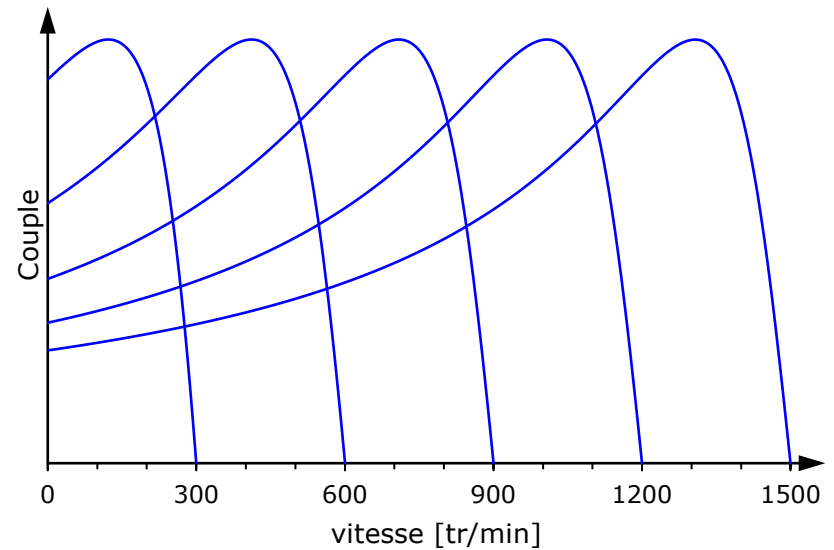
$$\Psi_h = L_h I_h = \frac{X_h}{2\pi f} I_h = \frac{U_h}{2\pi f}$$



$$U_s / f = \text{cste}$$



$$U_h / f = \text{cste}$$

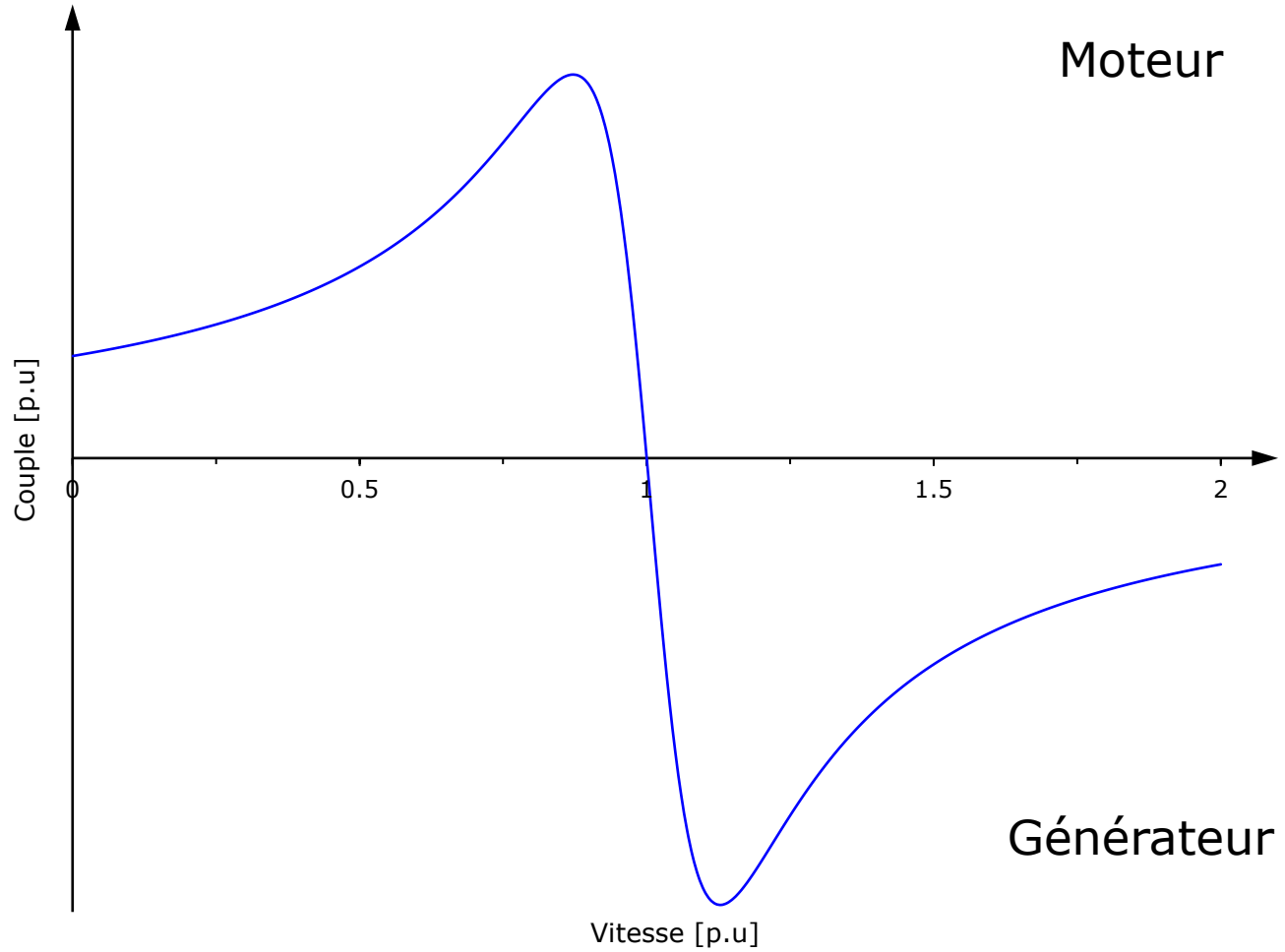


<https://www.youtube.com/watch?v= ZztDN5XX5o>

# Sommaire

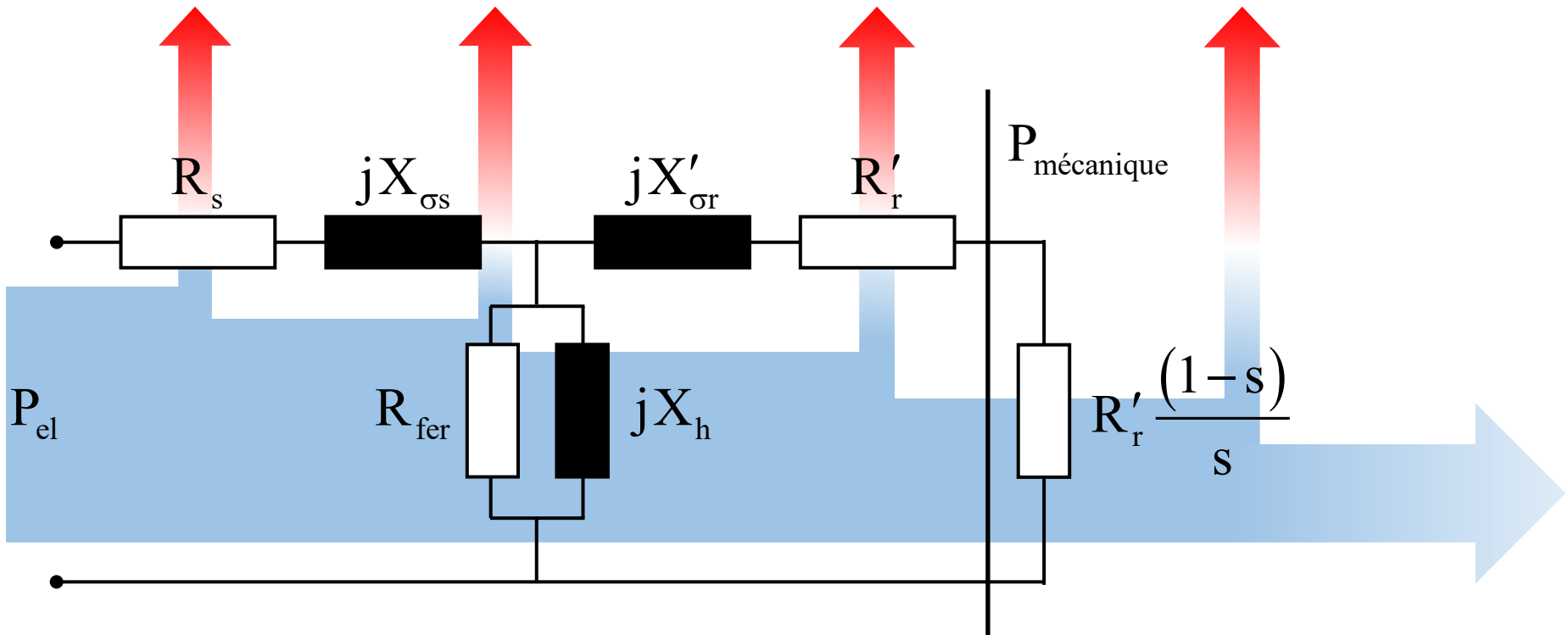
- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- Caractéristique de couple
- Impédance équivalente
- Démarrage des moteurs à cage
- Alimentation à tension et fréquence variables
- Modes de fonctionnement et bilan de puissance

# Caractéristique de couple et modes de fonctionnement



# Bilan de puissance – Moteur

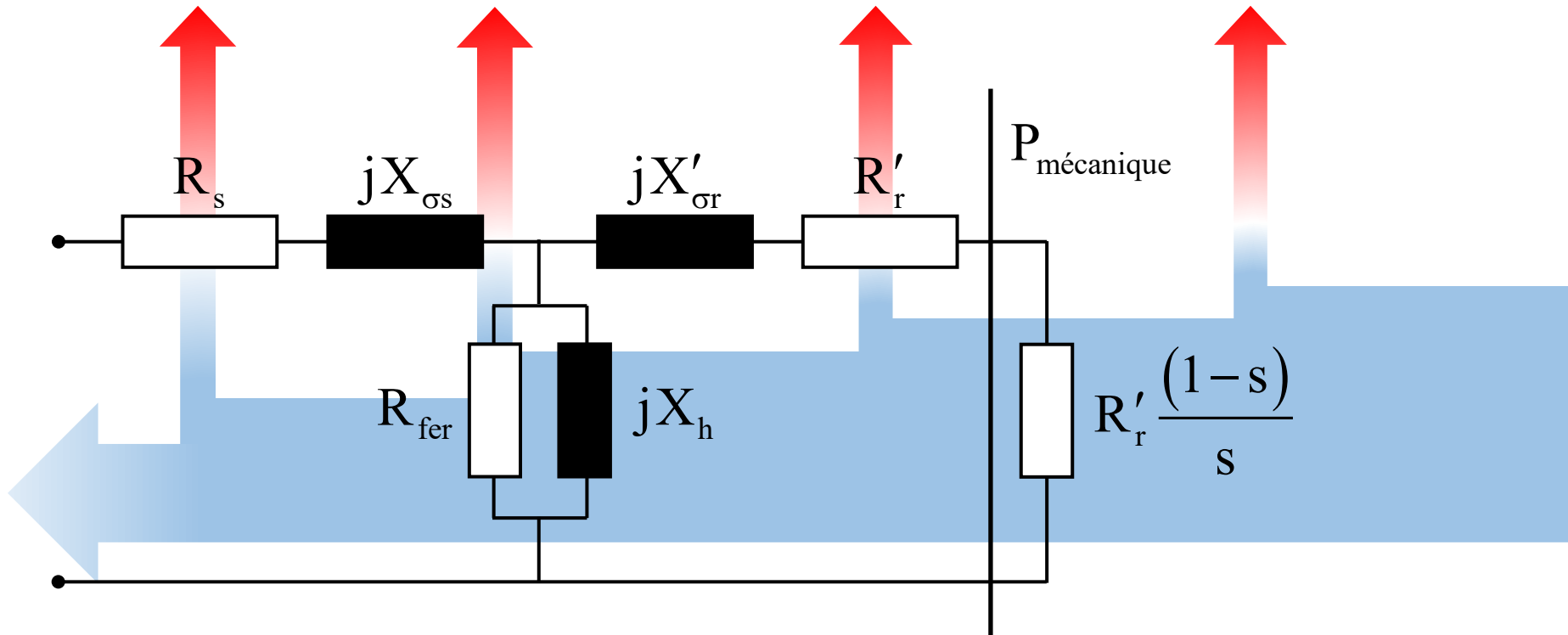
$$P_{el} = P_{js} + P_{fer} + P_{jr} + \underbrace{P_{f+v} + P_{utile}}_{P_{m\acute{e}canique}}$$



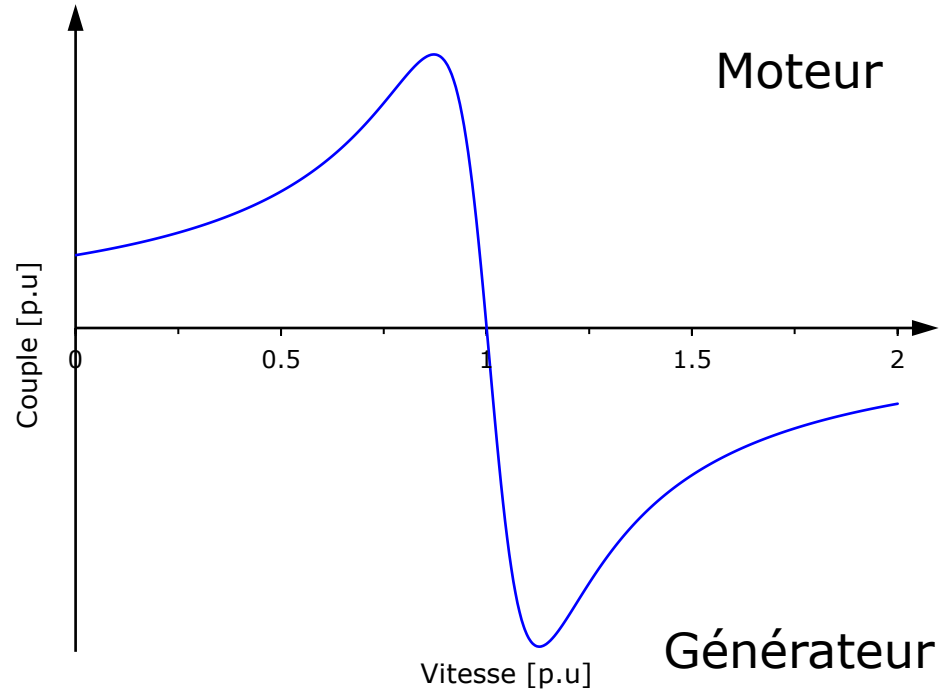
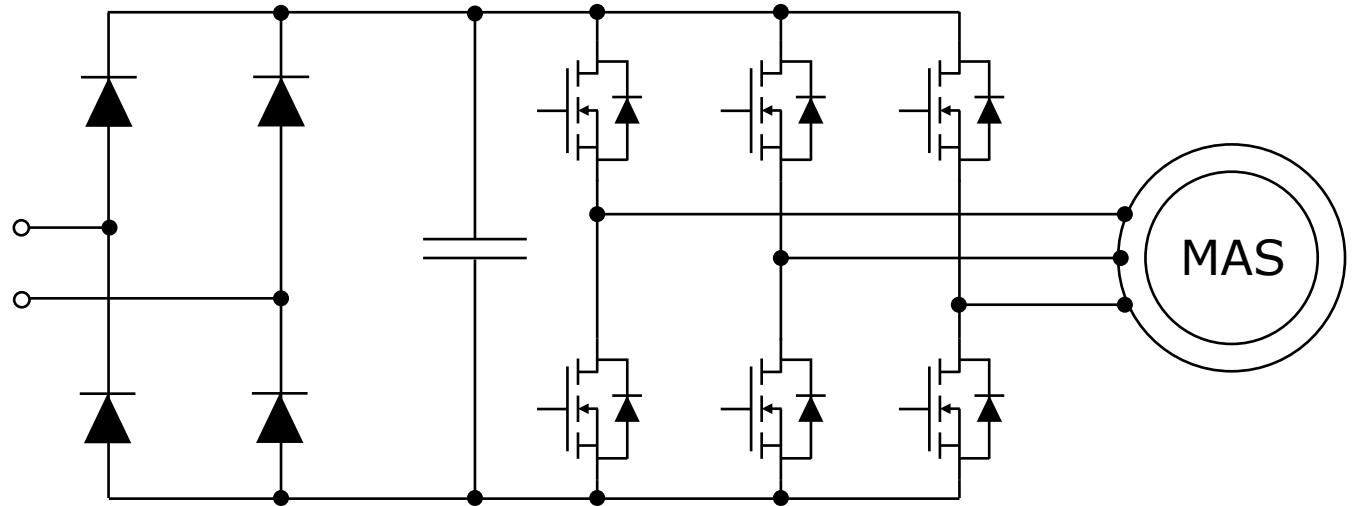
# Bilan de puissance – Génératrice

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

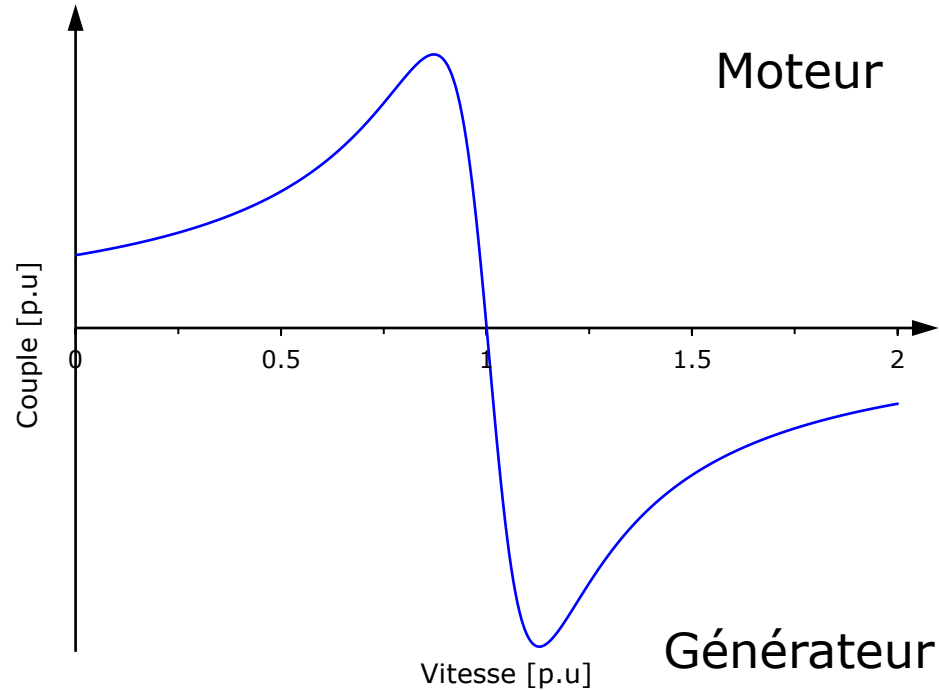
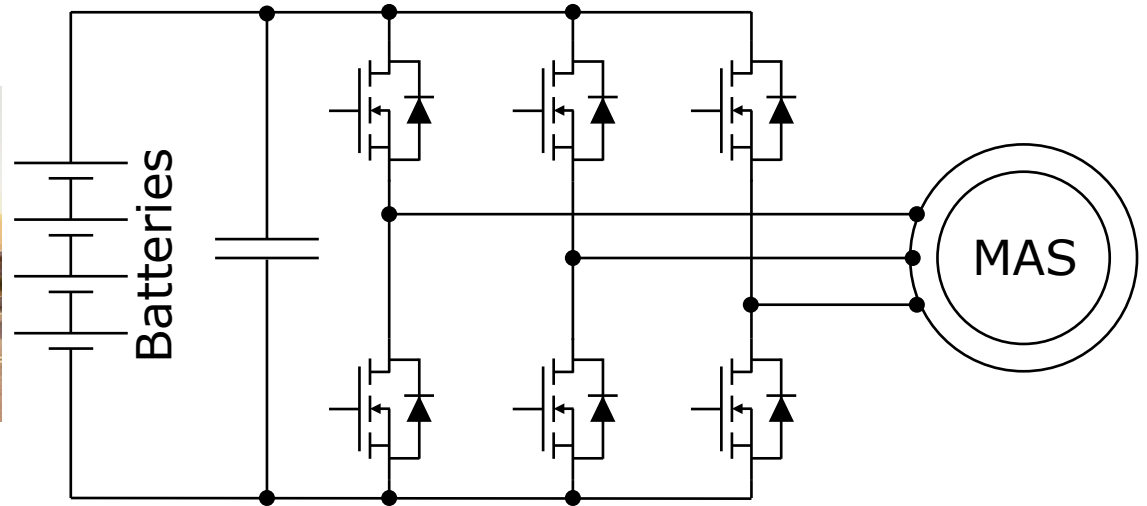
$P_{utile}$  et  $P_{el}$   
sont négatif



# Considération sur les modes de fonctionnement I



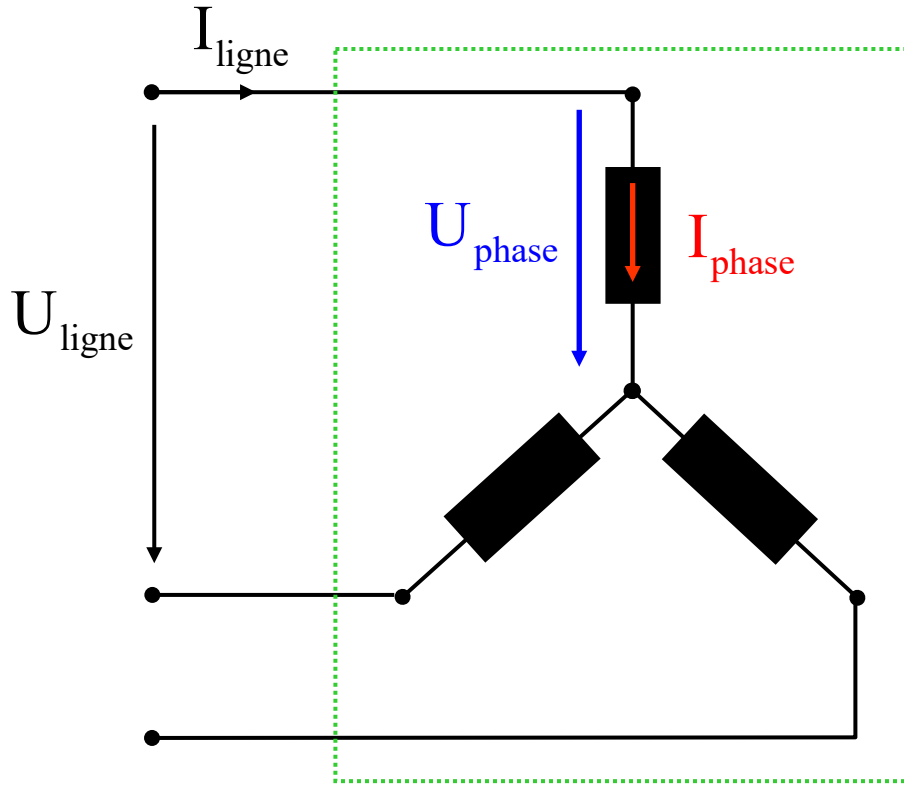
# Considération sur les modes de fonctionnement II



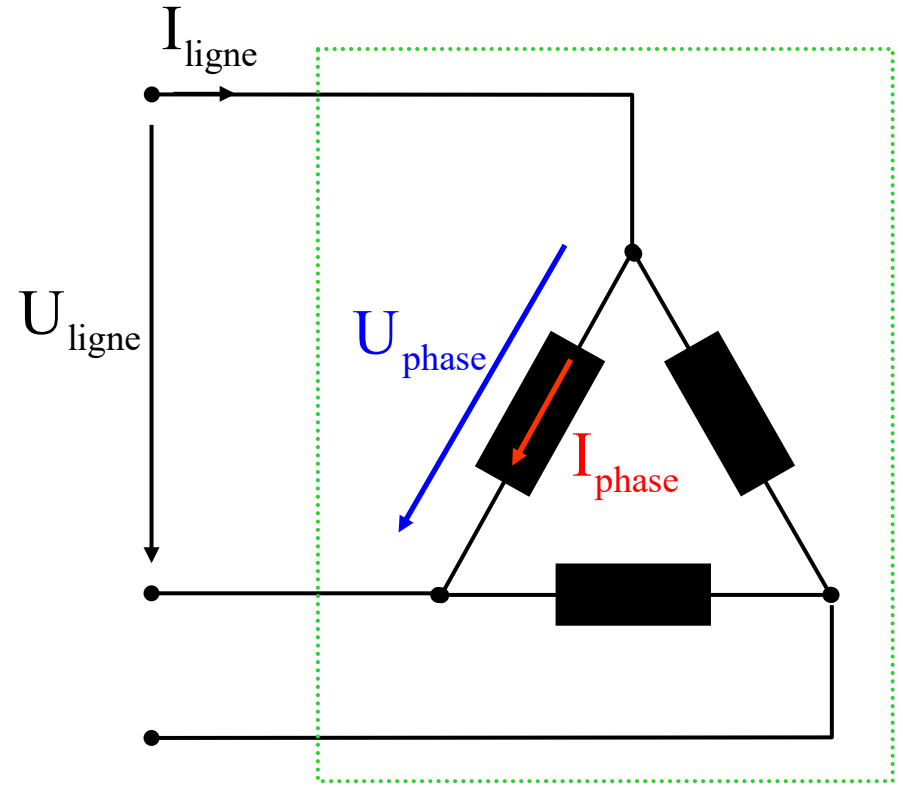
# Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Schéma équivalent
- Caractéristique de couple
- Impédance équivalente
- Démarrage des moteurs à cage
- Alimentation à tension et fréquence variables
- Modes de fonctionnement et bilan de puissance
- Complément sur le montage étoile et triangle

# Rappel sur les couplages étoile-triangle

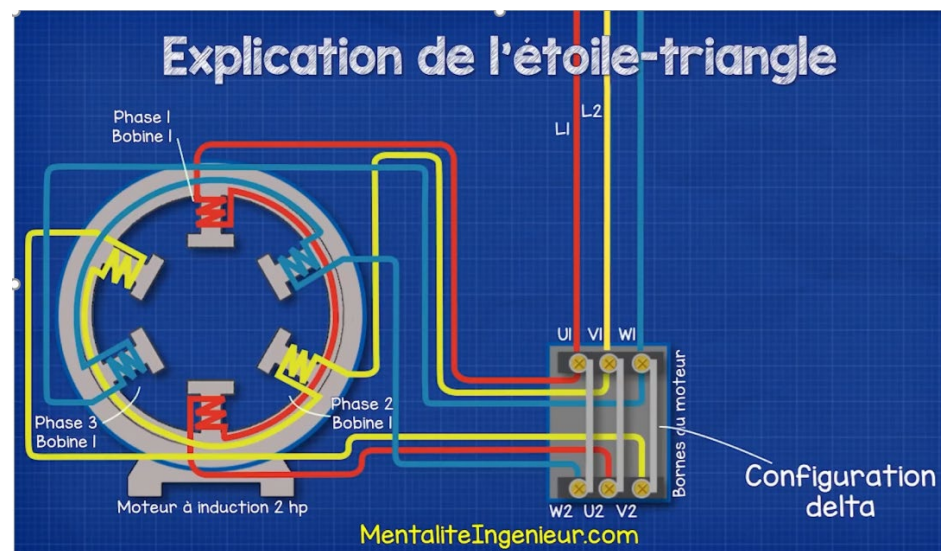
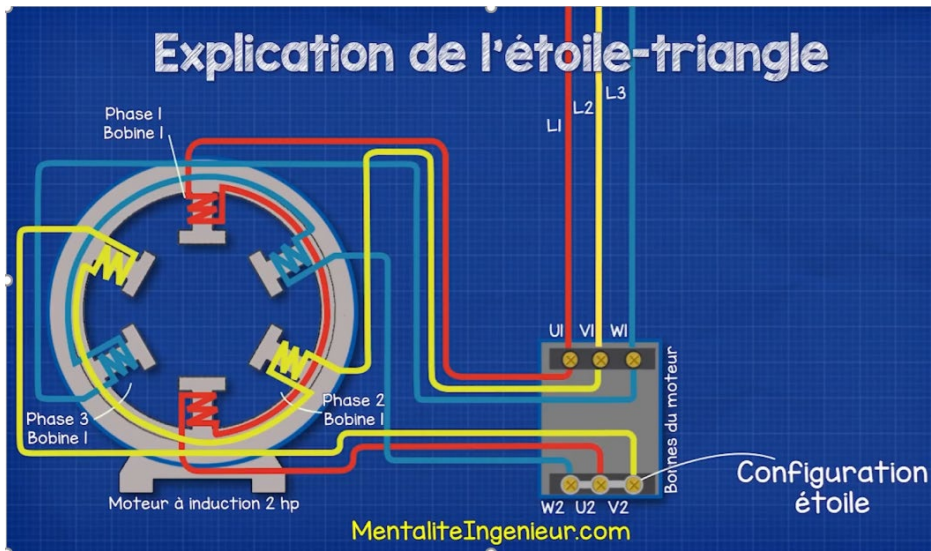


$$\begin{cases} U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}} / \sqrt{3} \\ I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}} \end{cases}$$



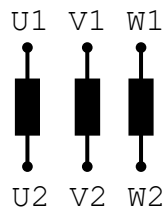
$$\begin{cases} U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}} \\ I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}} / \sqrt{3} \end{cases}$$

# Complément sur les couplages étoile-triangle

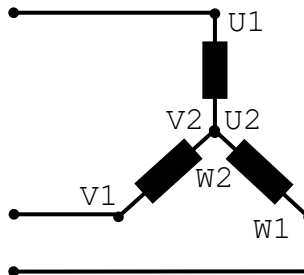


<https://www.youtube.com/watch?v=LX9KomXWYCs> (Français)

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



Etoile



Triangle

