

Conversion d'énergie

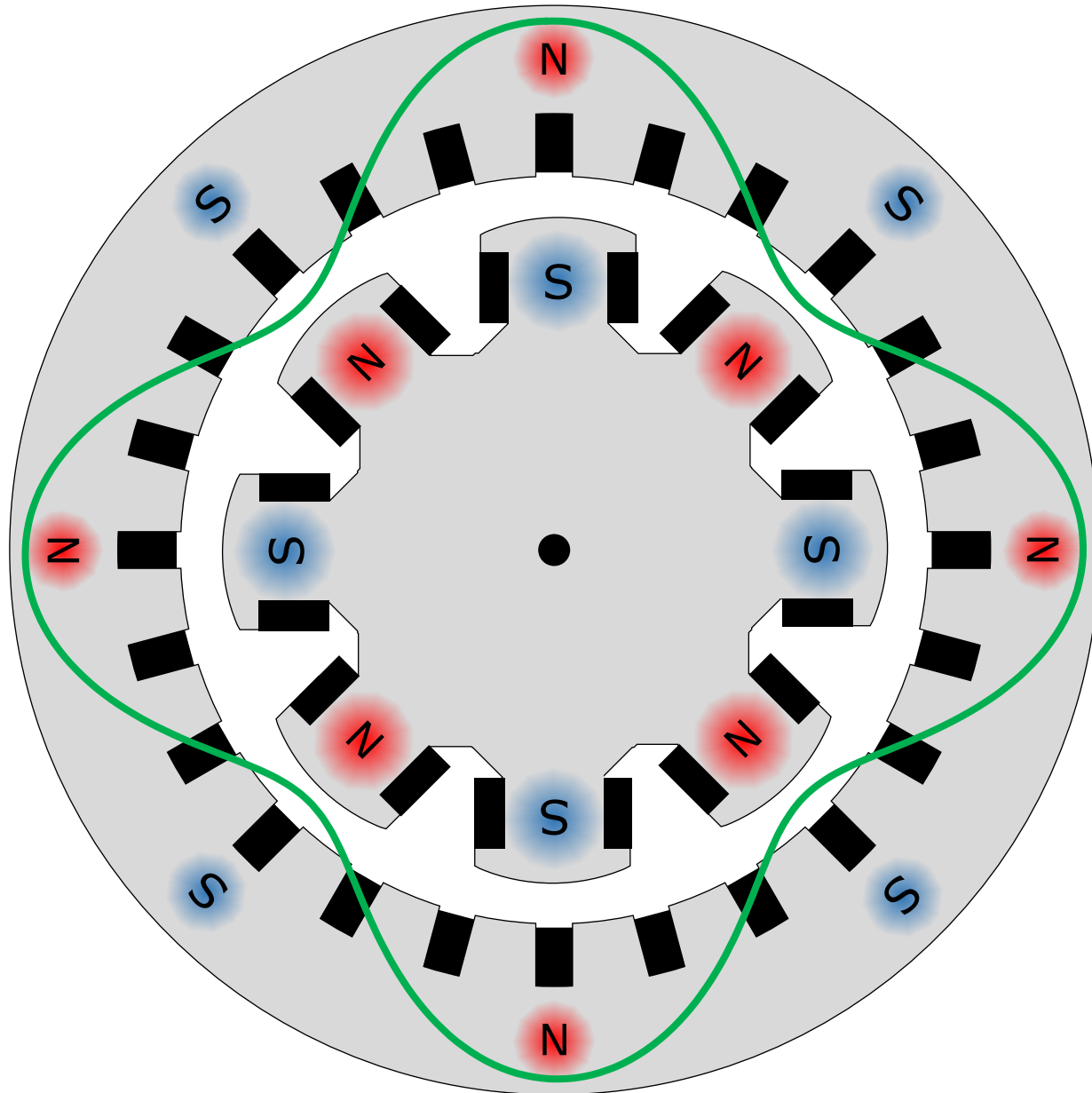
Machine synchrone

André Hodder

Sommaire

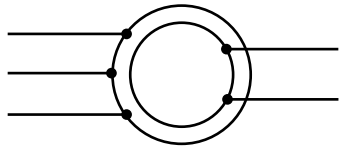
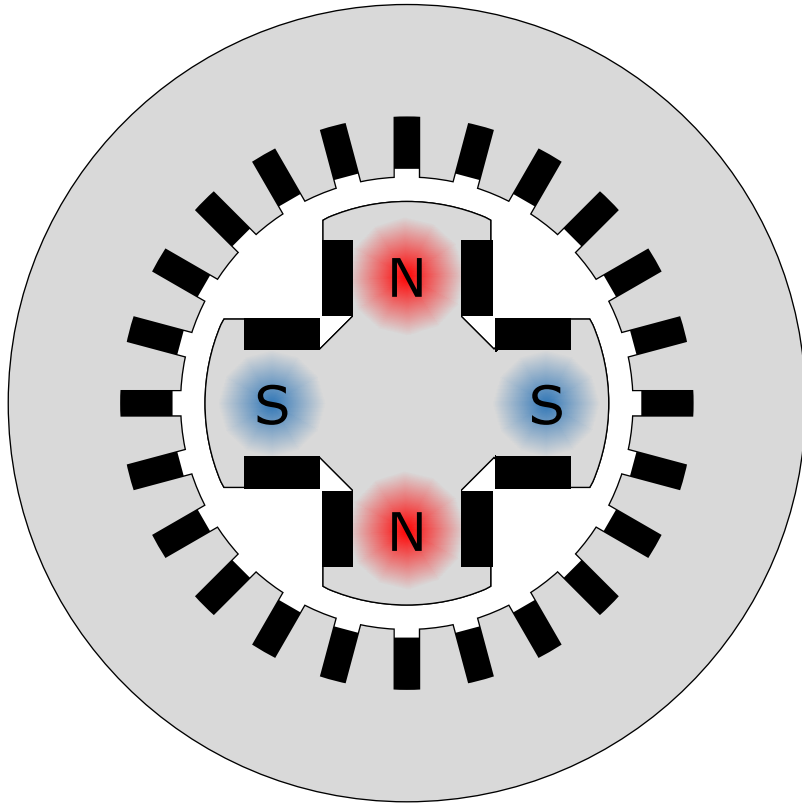
- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement
- Schéma équivalent
- Bilan de puissance et caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau

Principe de fonctionnement

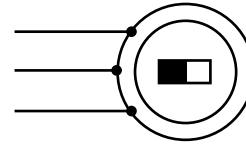
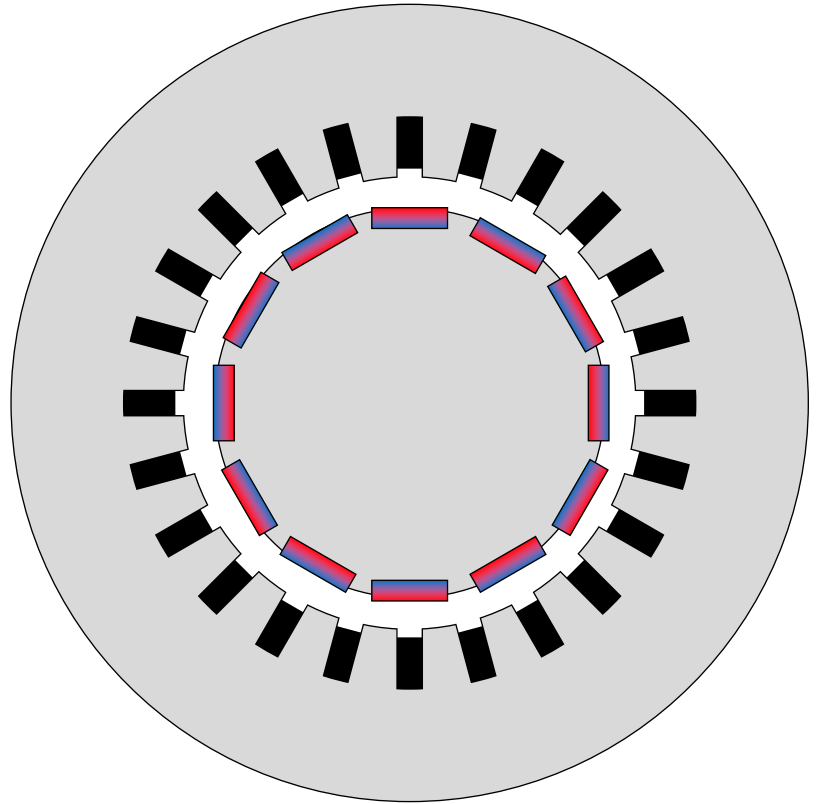


Machine synchrone

excitation



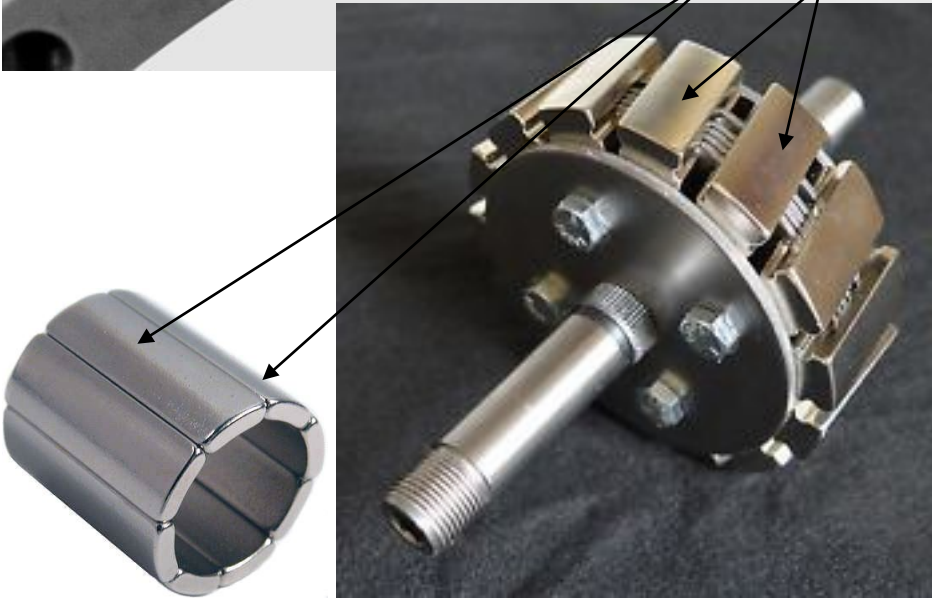
aimants permanents



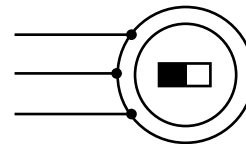
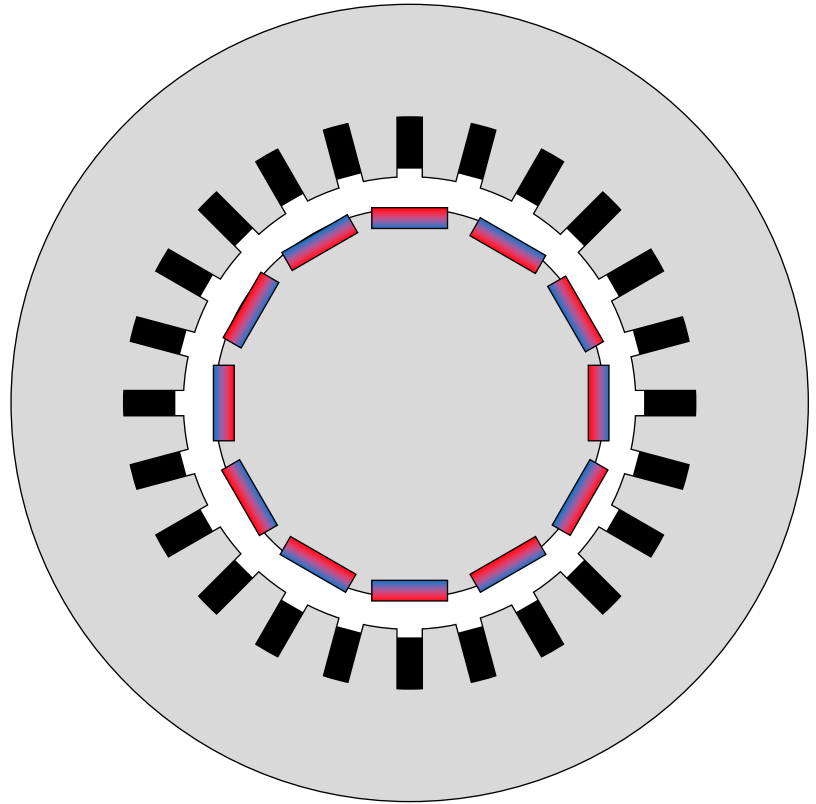
Machine synchrone



aimants

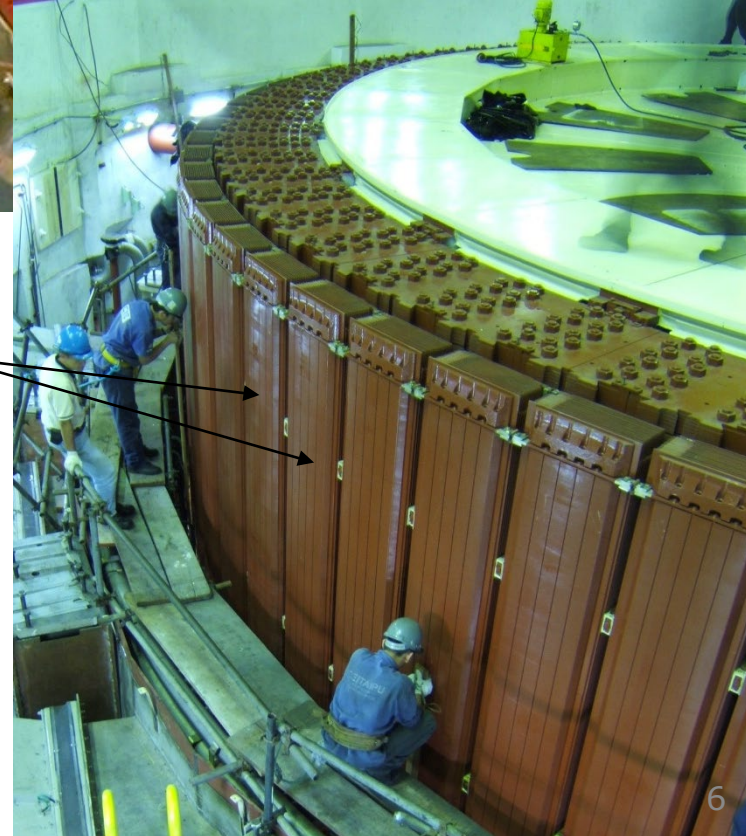
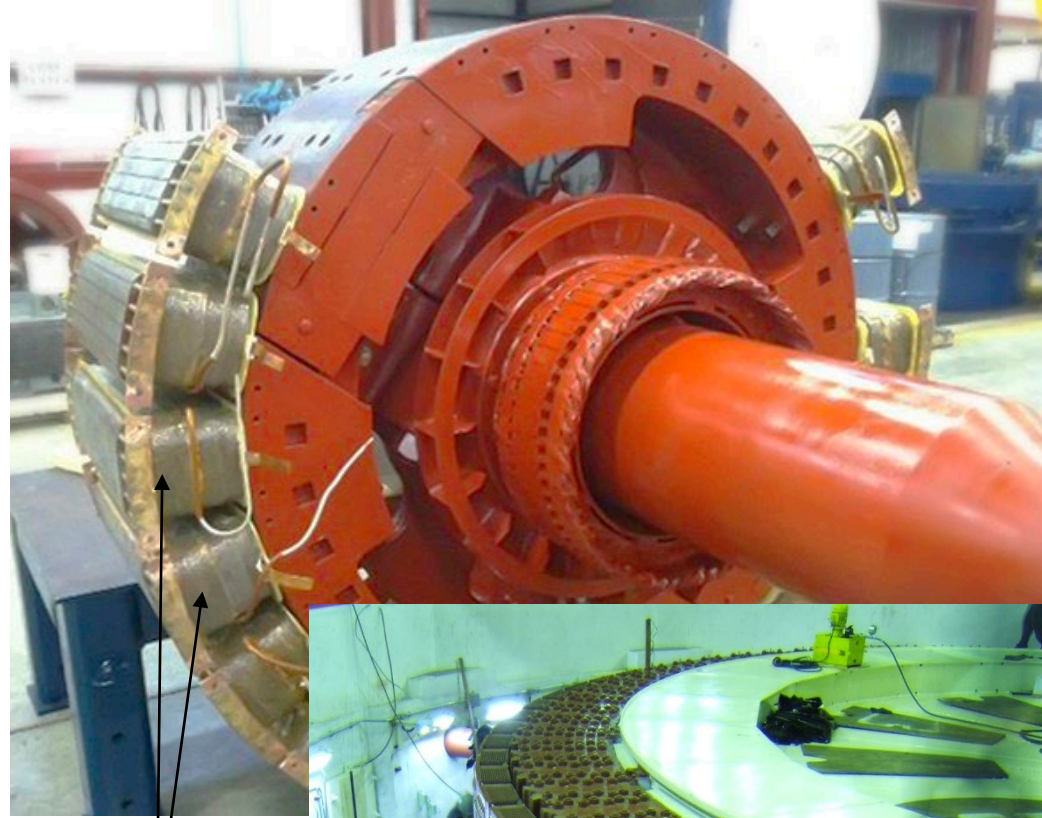
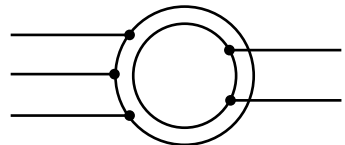
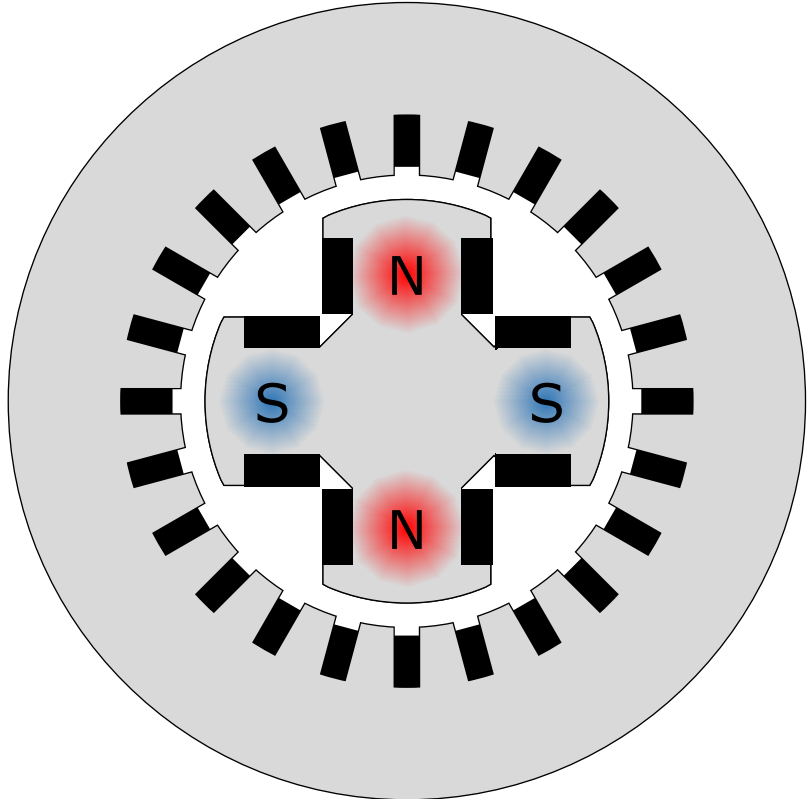


aimants permanents



Machine synchrone

excitation



pôles

Nombre de paires de pôles

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$$

$\Omega \longrightarrow$ Vitesse angulaire dans le monde mécanique

$\omega \longrightarrow$ Vitesse angulaire dans le monde électrique
(appelée pulsation)

↑
Nombre de paires de pôles

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

Rappel :

$\Omega \rightarrow [\text{rad} / \text{s}] \rightarrow$ Monde mécanique

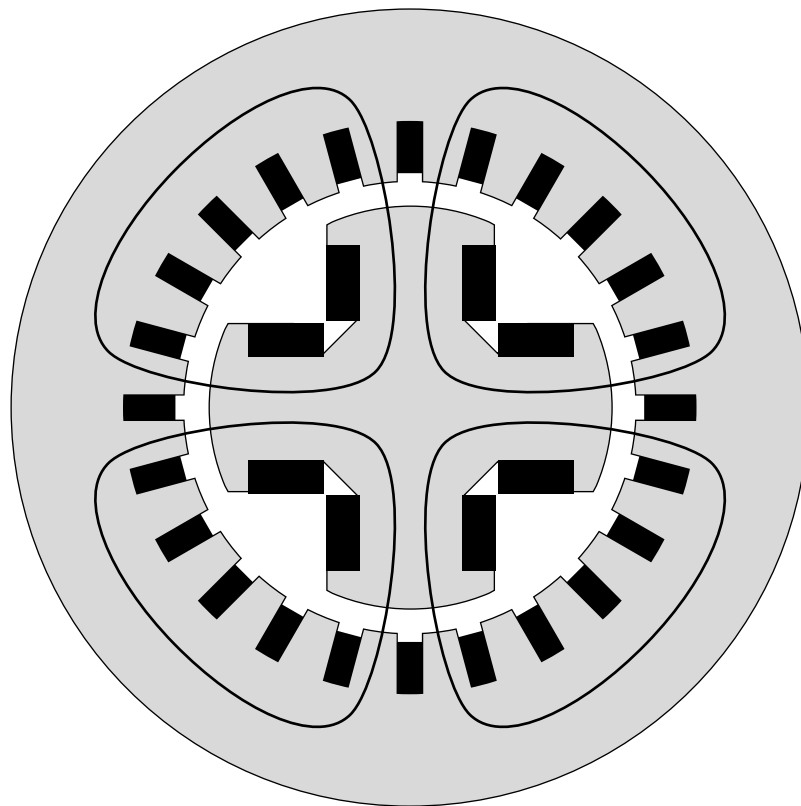
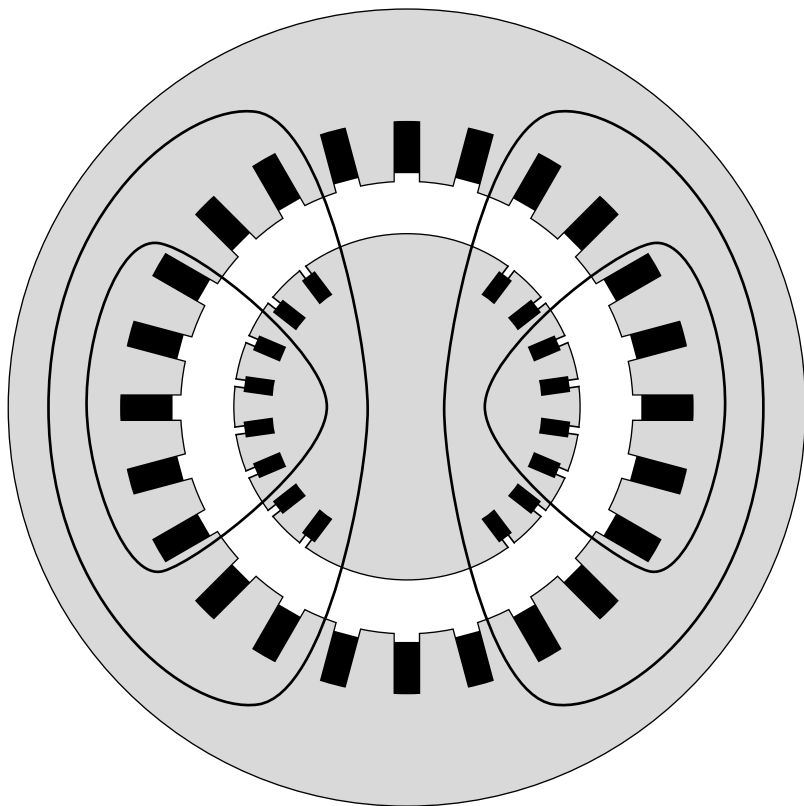
$\omega \rightarrow [\text{rad} / \text{s}] \rightarrow$ Monde électrique

$f \rightarrow [\text{Hz}] \rightarrow$ Monde électrique

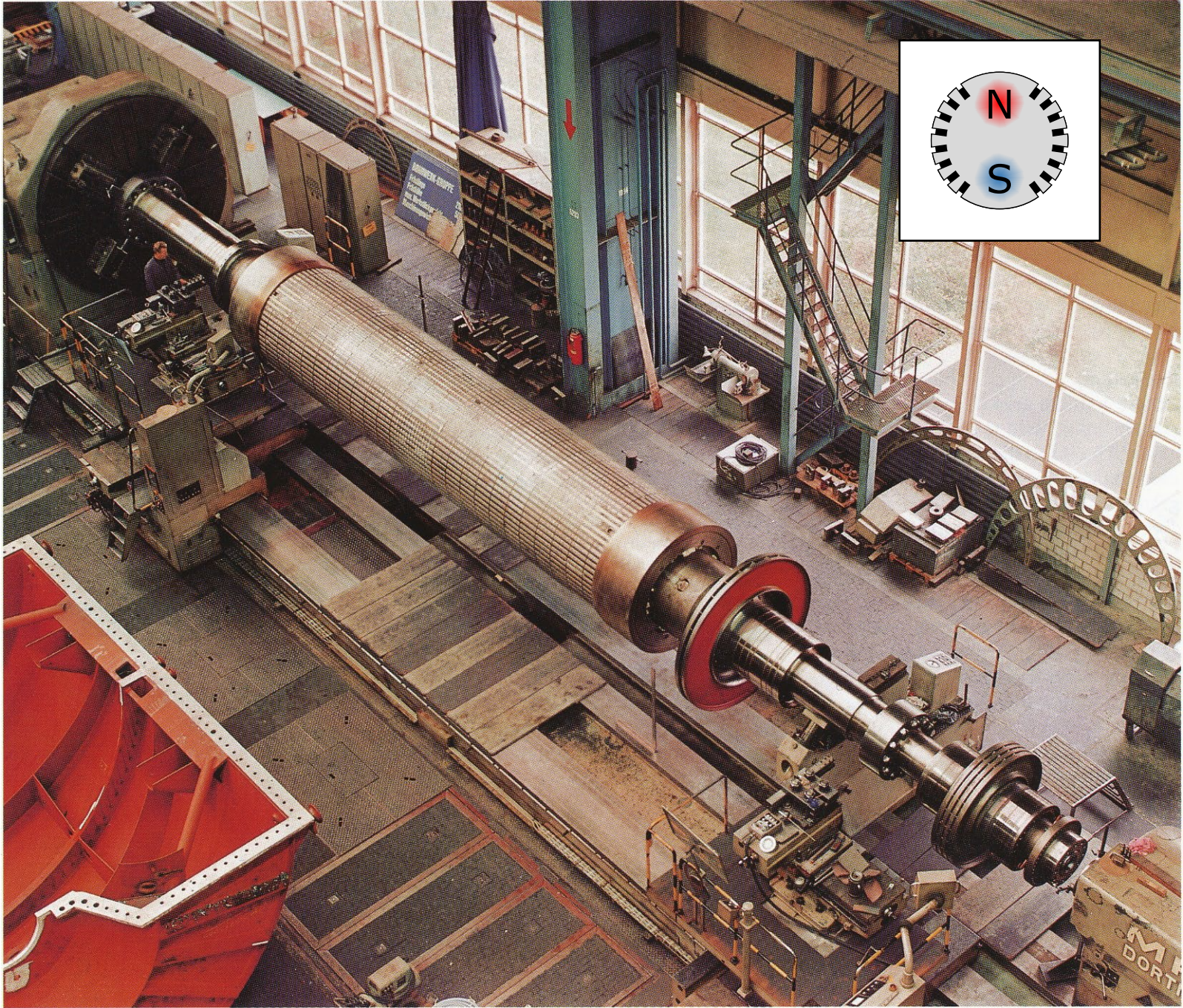
$n \rightarrow [\text{tr} / \text{s}] \rightarrow$ Monde mécanique

$N \rightarrow [\text{tr} / \text{min}] \rightarrow$ Monde mécanique

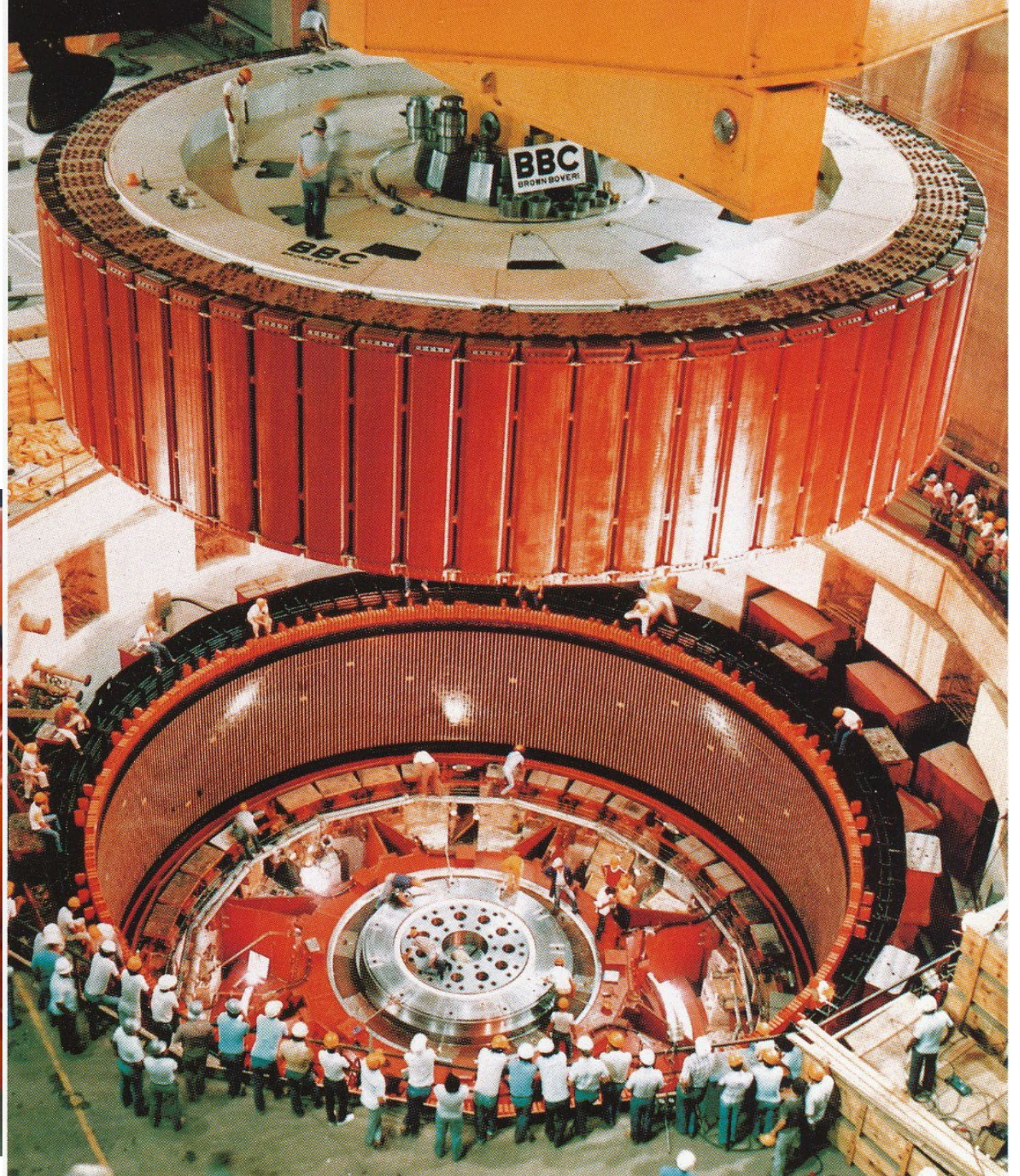
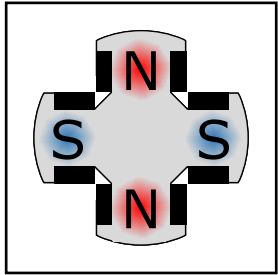
Machines à pôles lisses et à pôles saillants



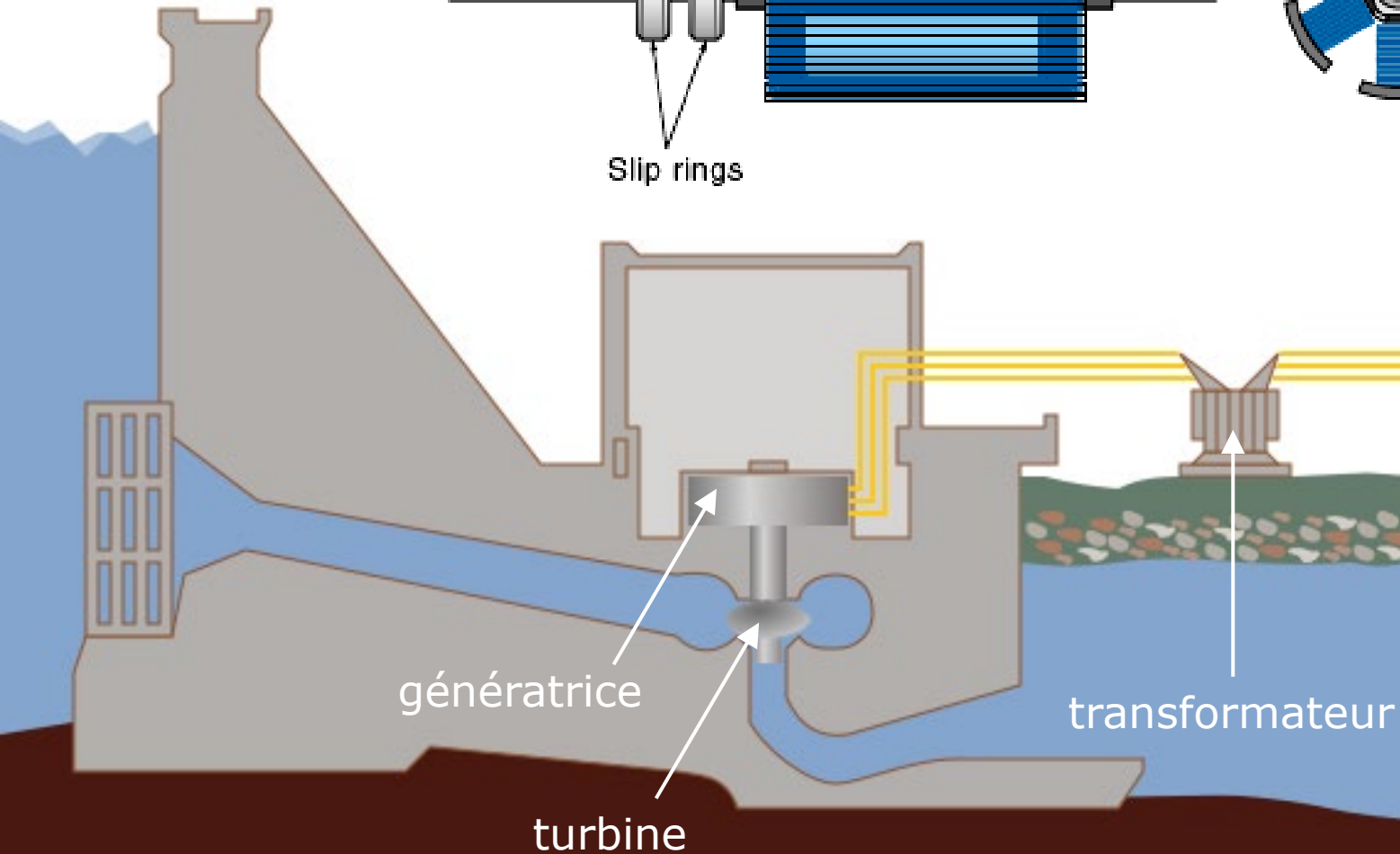
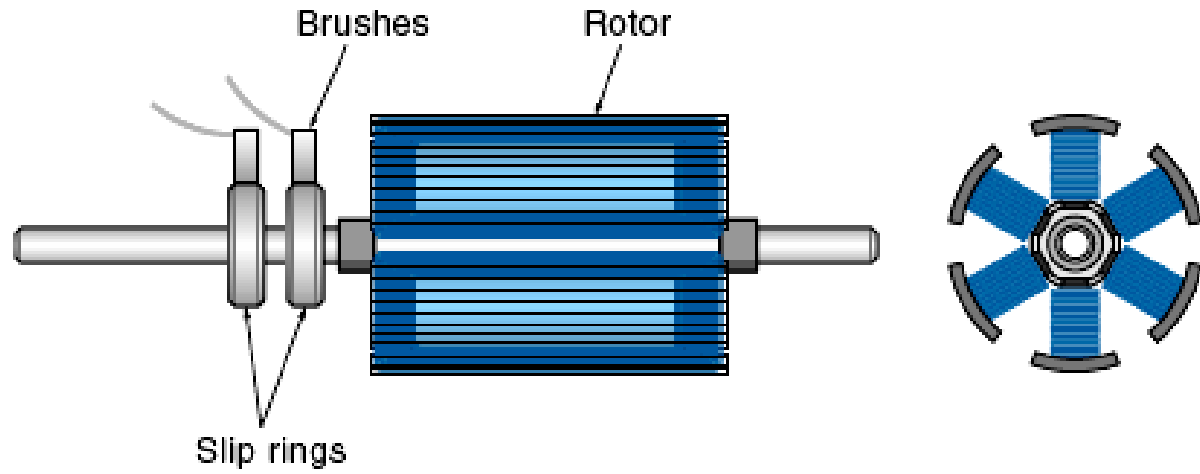
Machine à pôles lisses



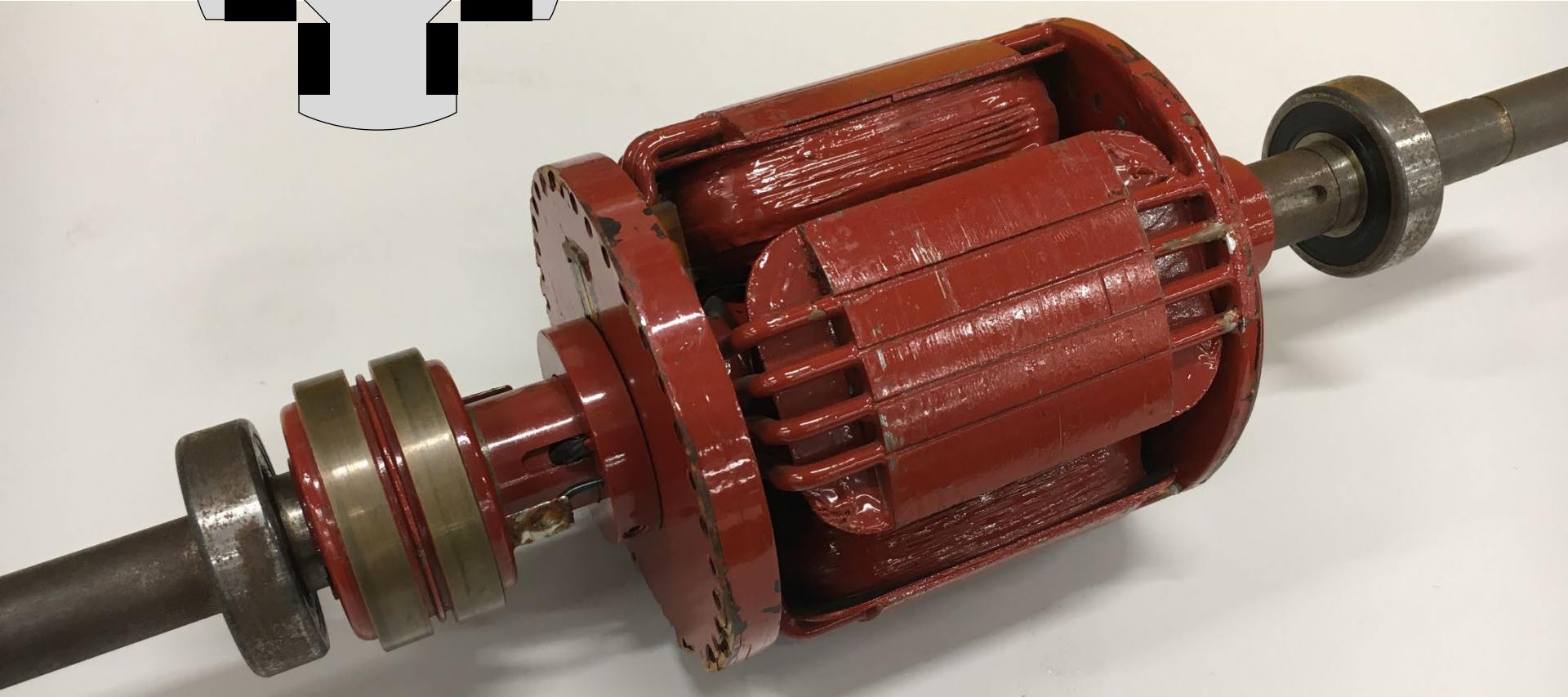
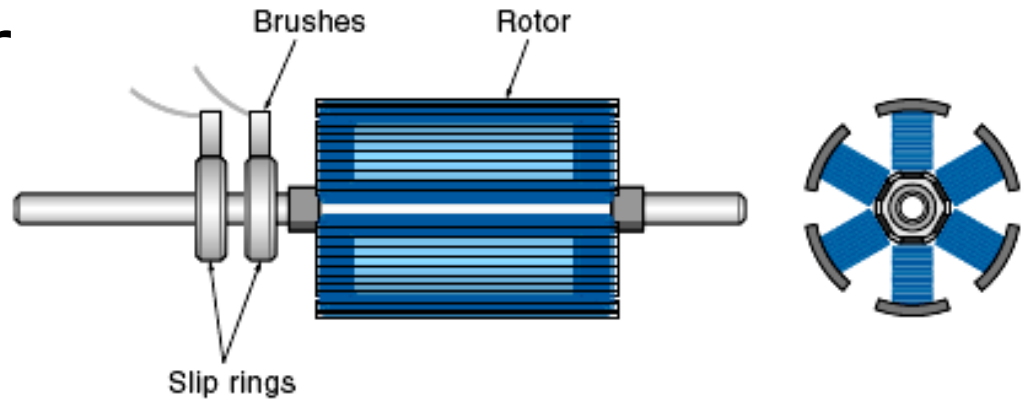
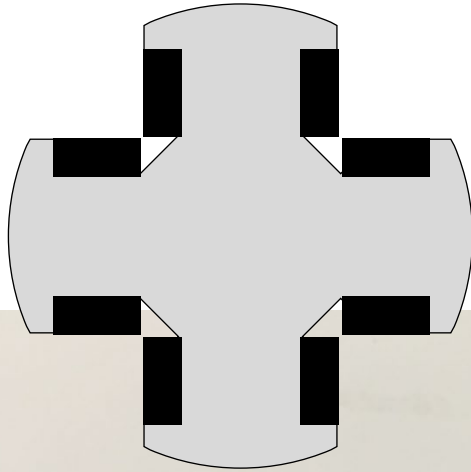
Machine à pôles saillants

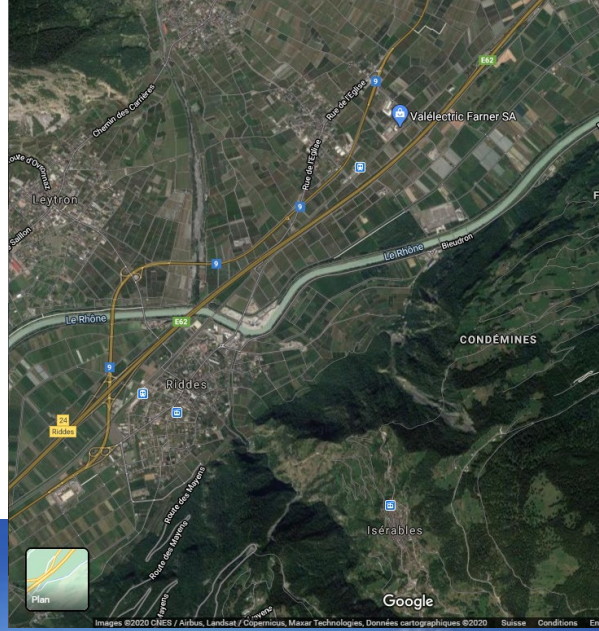
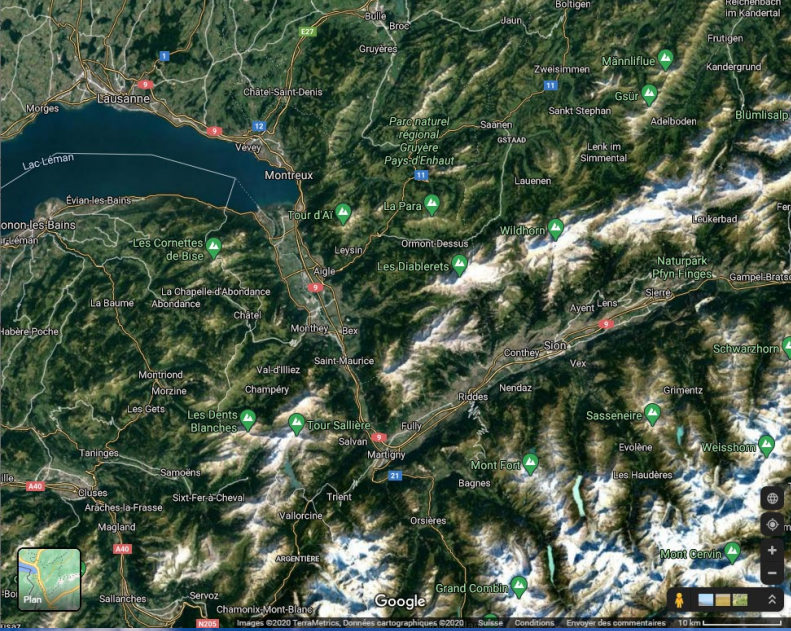


Centrale hydro-électrique



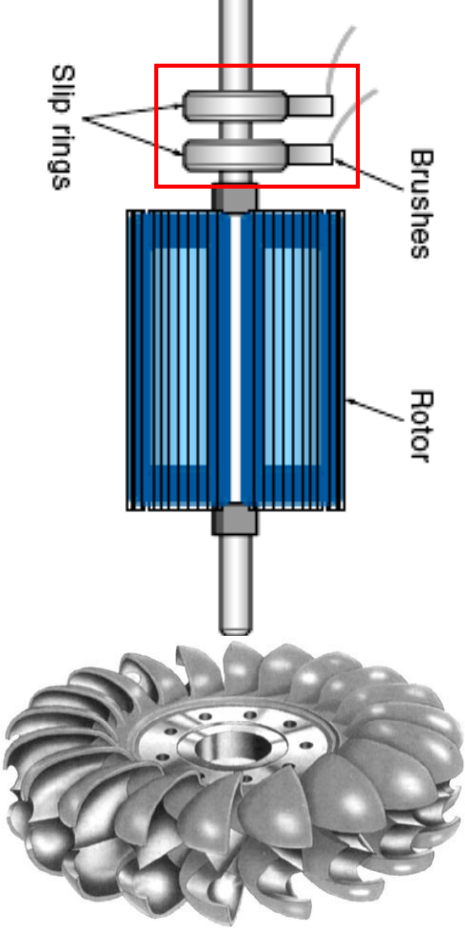
Excitation du rotor



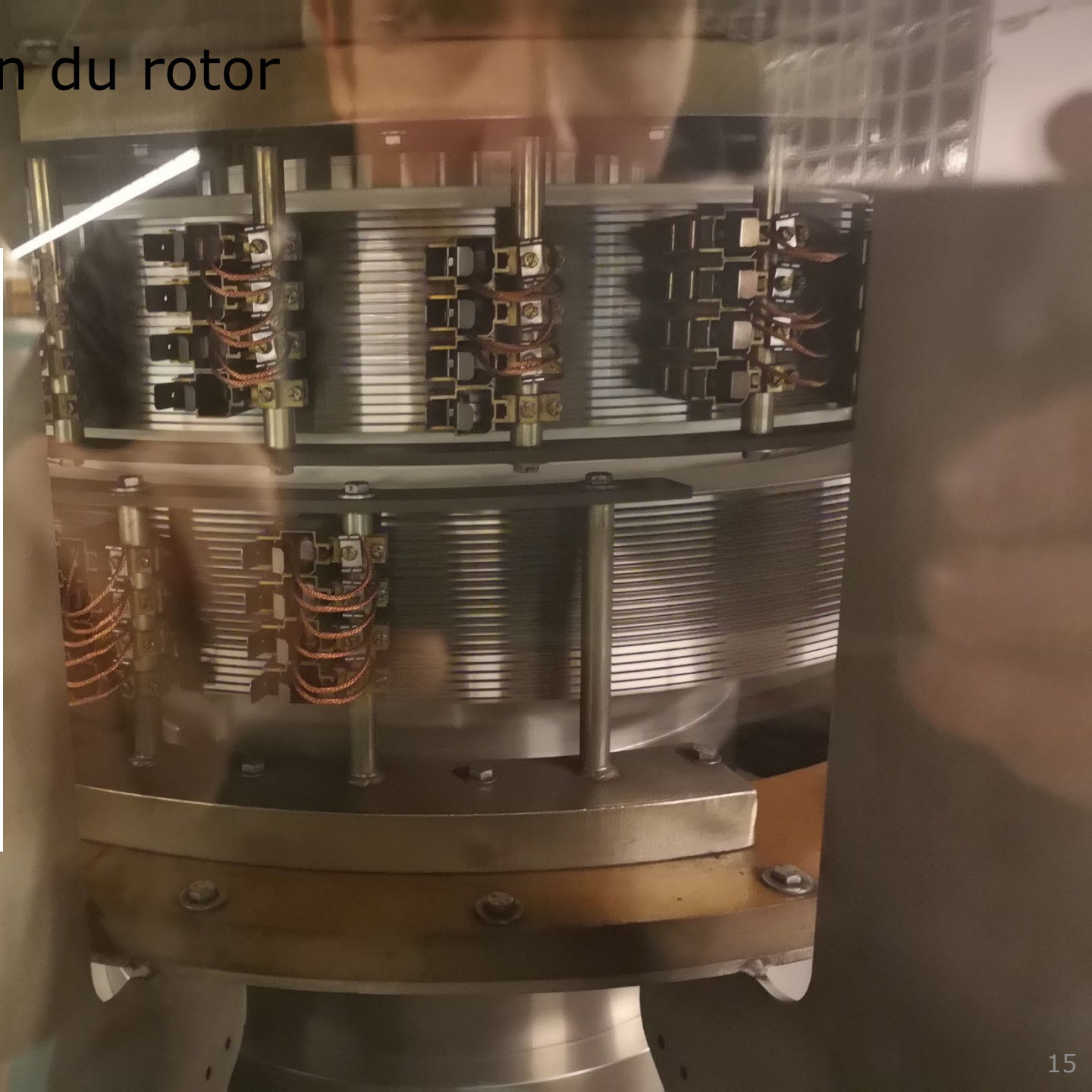
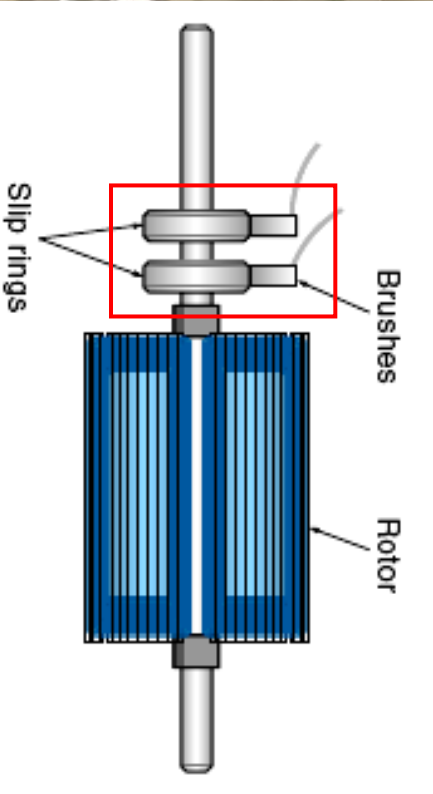


Sources :
google map
panoramik.ch³

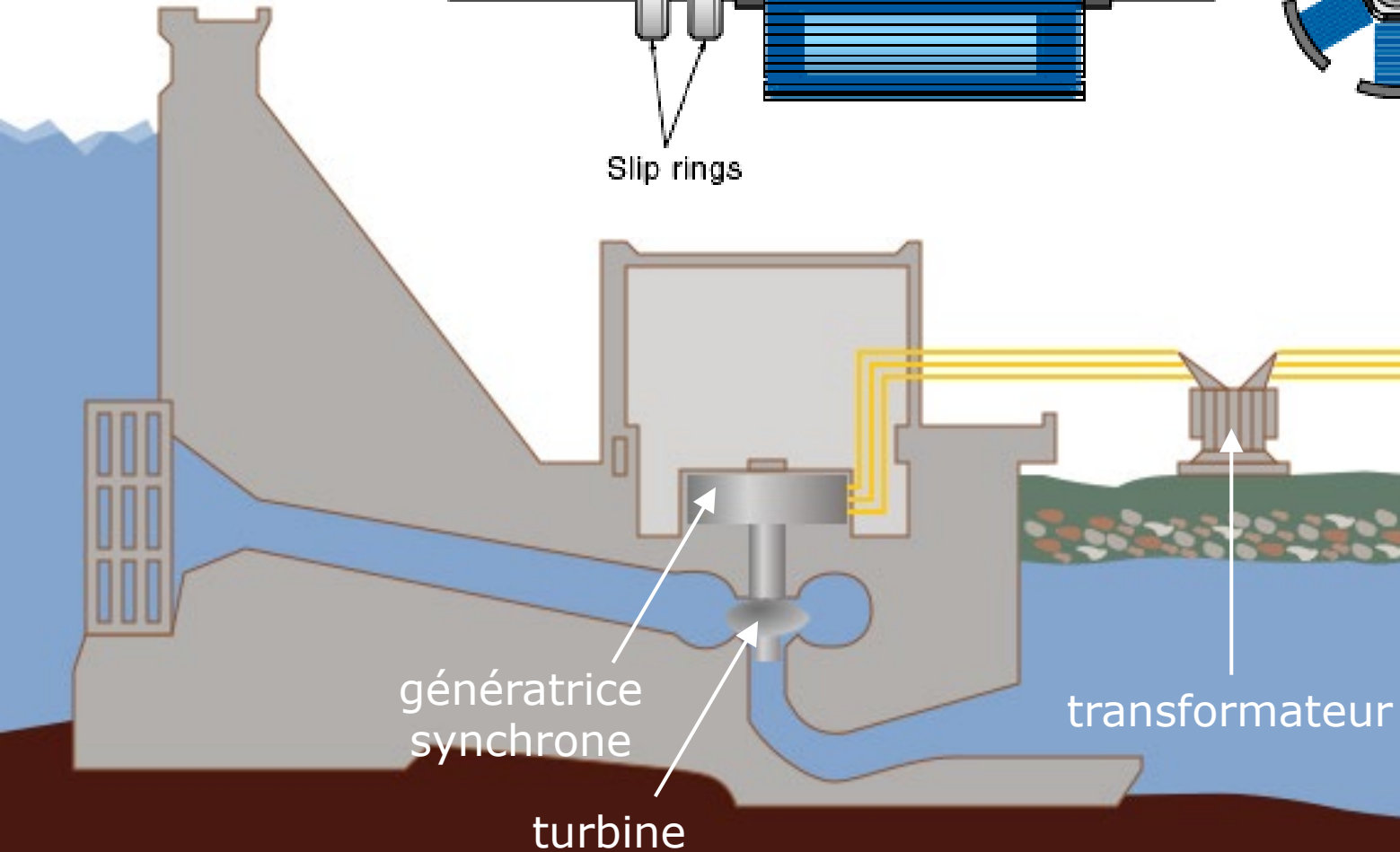
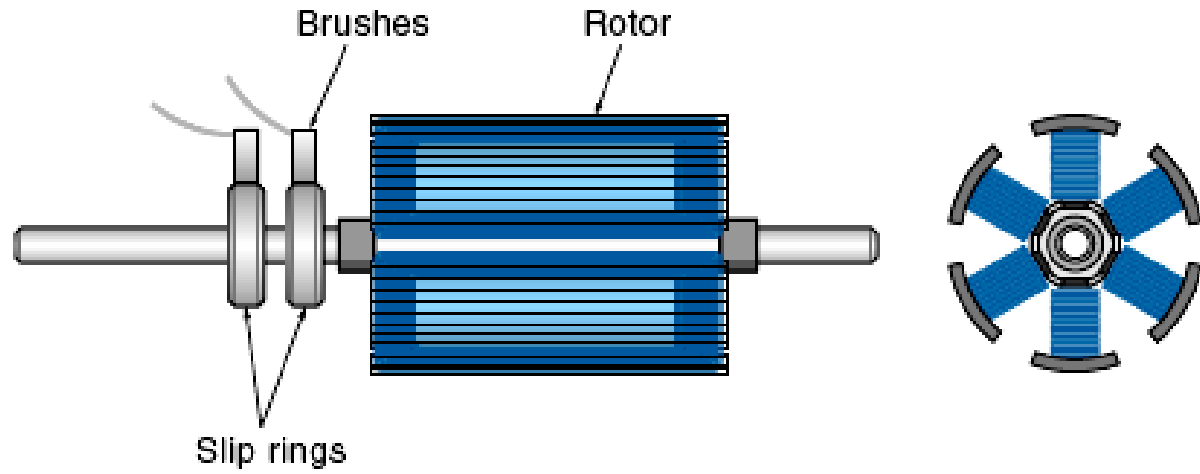
Excitation du rotor



Excitation du rotor



Centrale hydro-électrique – Mode génératrice

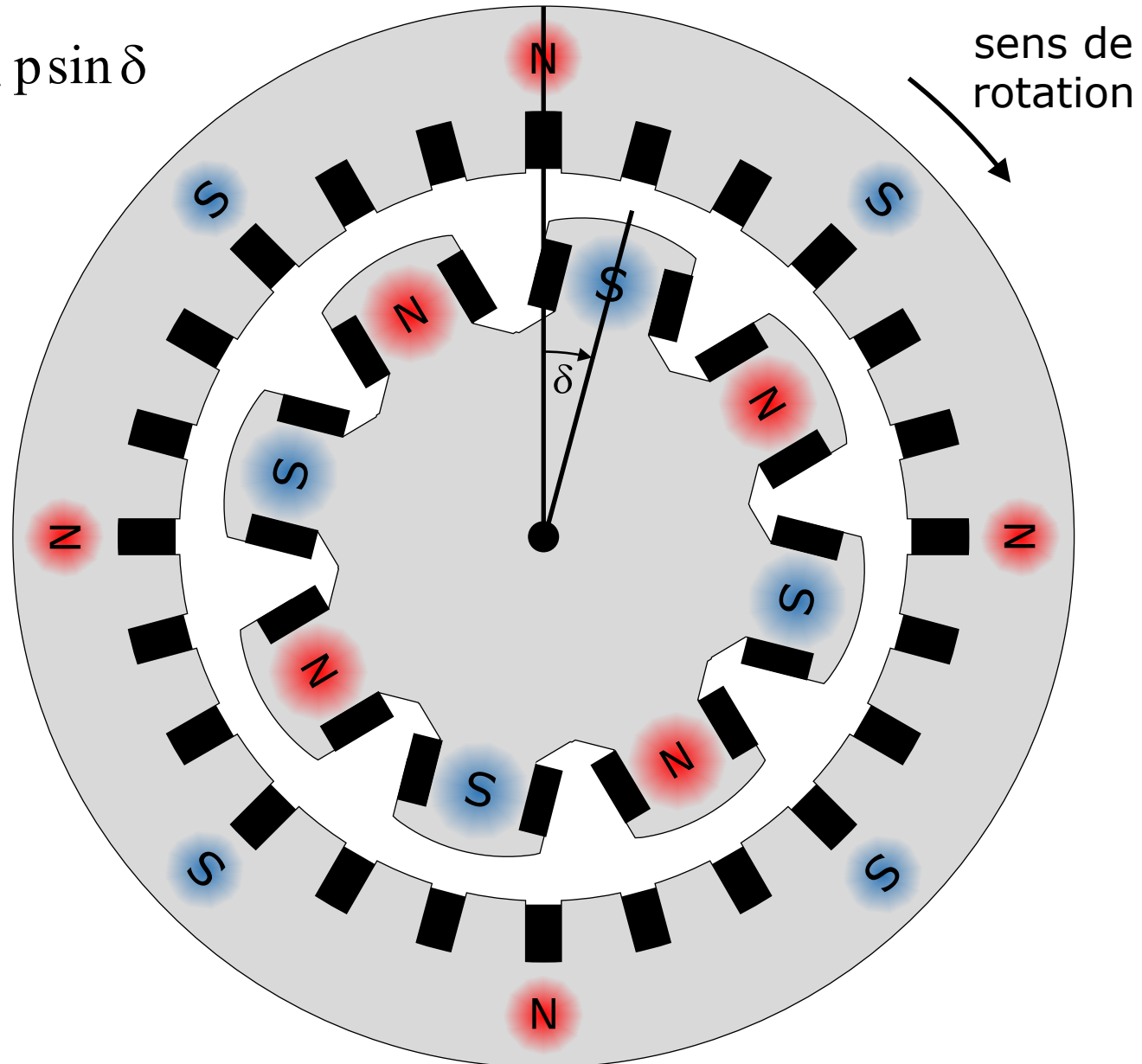


<https://www.swissgrid.ch/en/home/operation/grid-data/current-data.html>

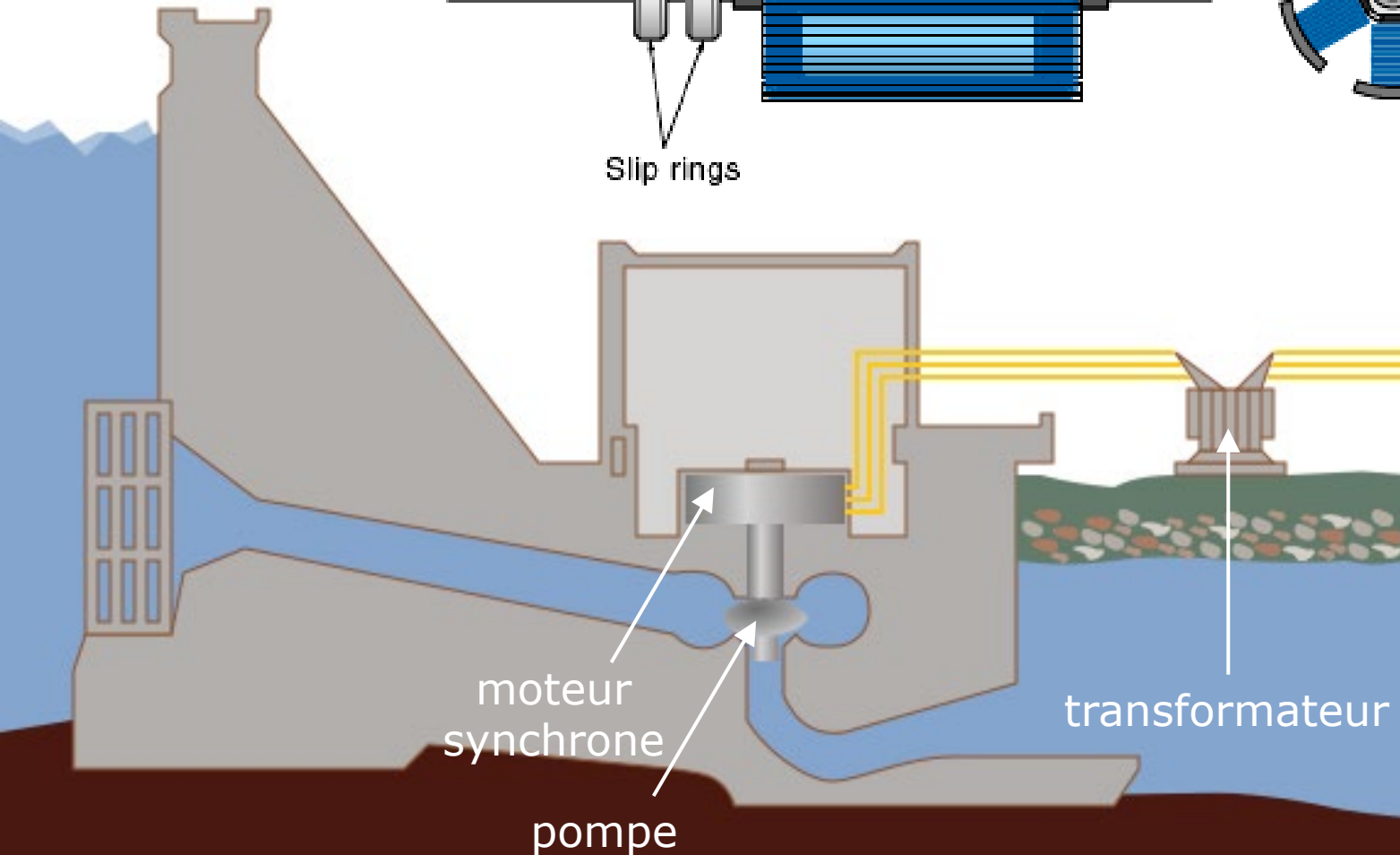
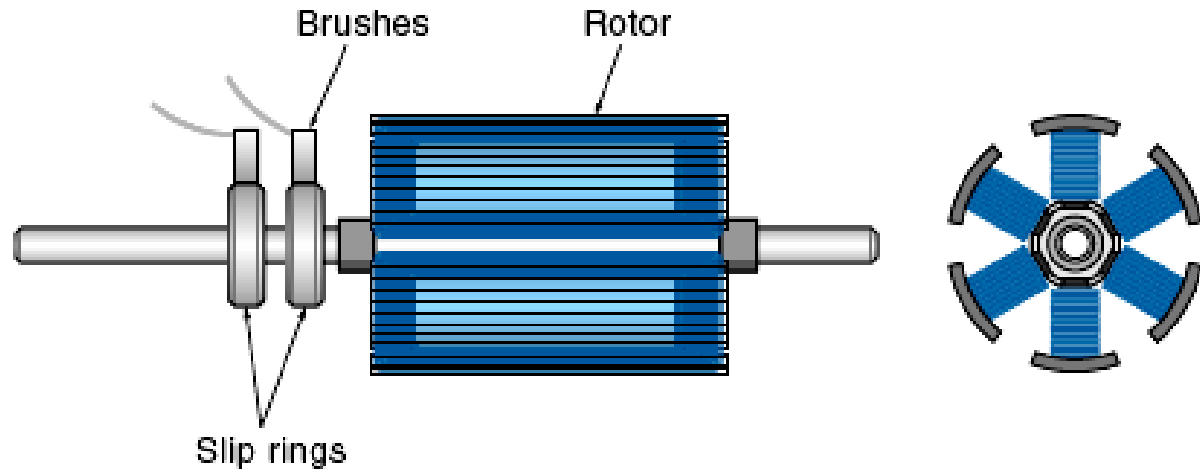
Modes de fonctionnement – Mode génératrice

Angle de charge

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



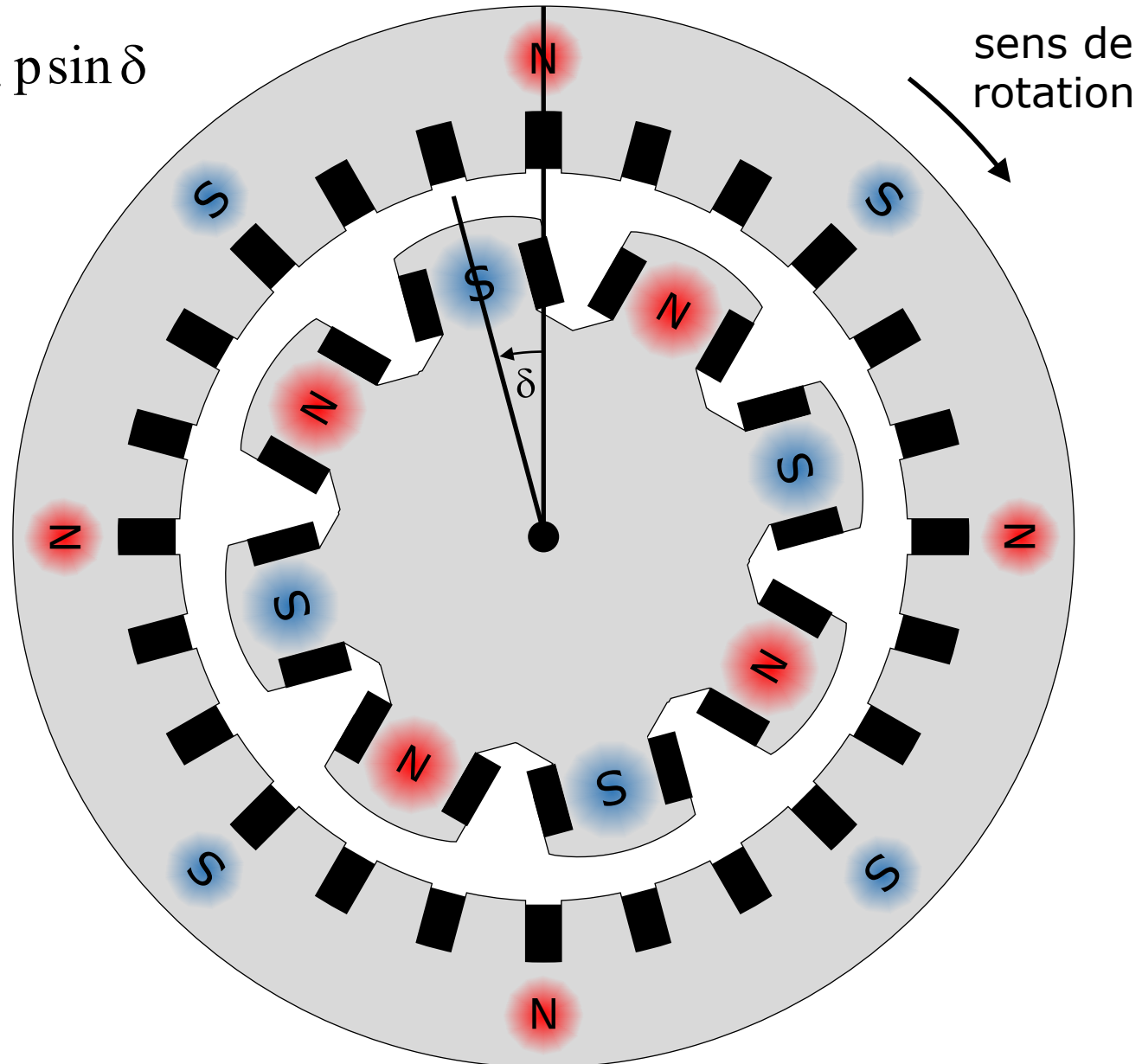
Centrale hydro-électrique – Mode moteur



Modes de fonctionnement – Mode moteur

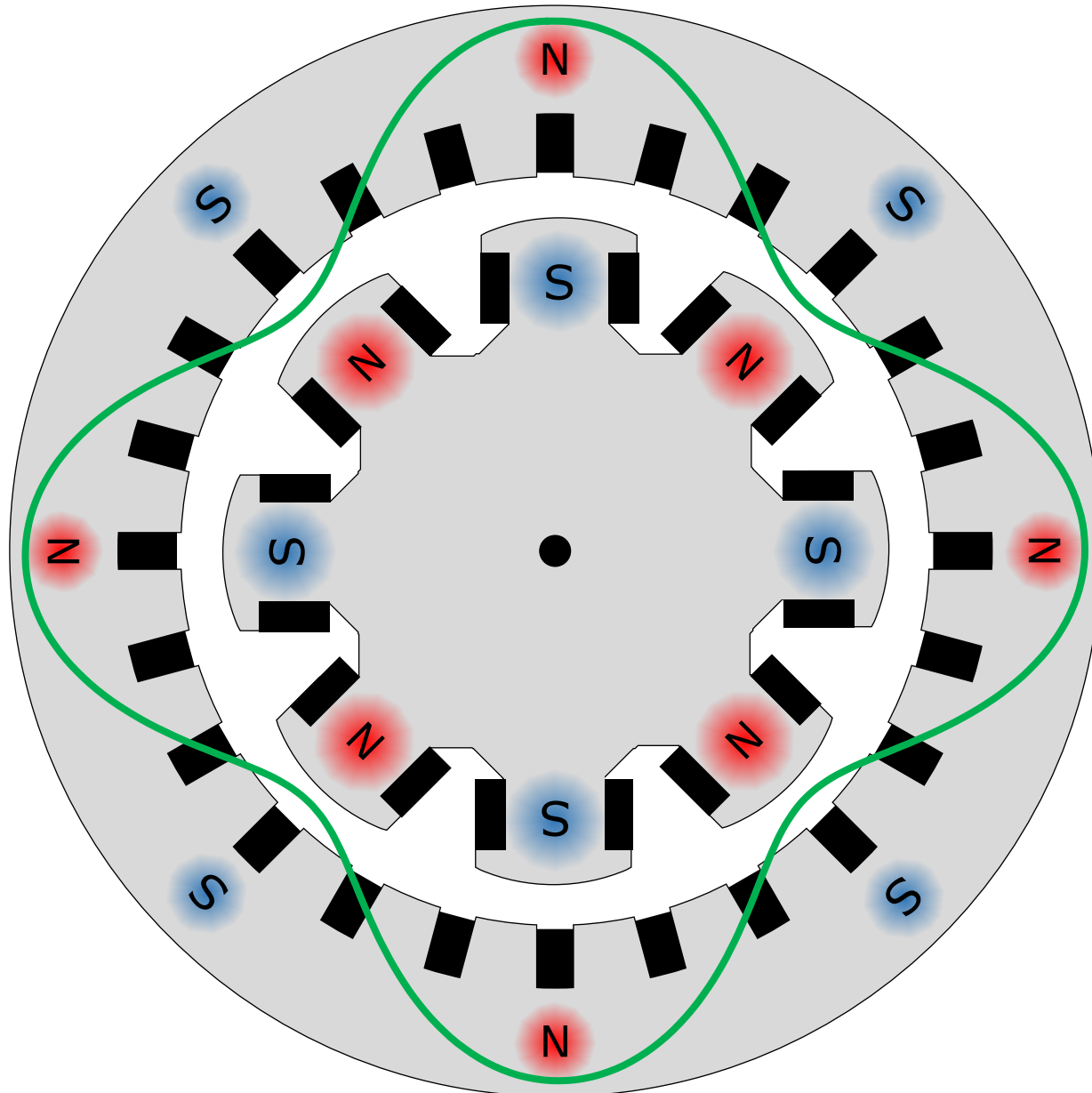
Angle de charge

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



Modes de fonctionnement

Angle de charge



Forces motrices de Hongrin-Léman SA

<http://www.fmhl.ch/>
<http://www.fmhl.ch/Images/Annexes/Brochure001.pdf>



Le barrage de l'Hongrin et ses prises d'eau
Der Stausee Hongrin und seine Wasserfassungen

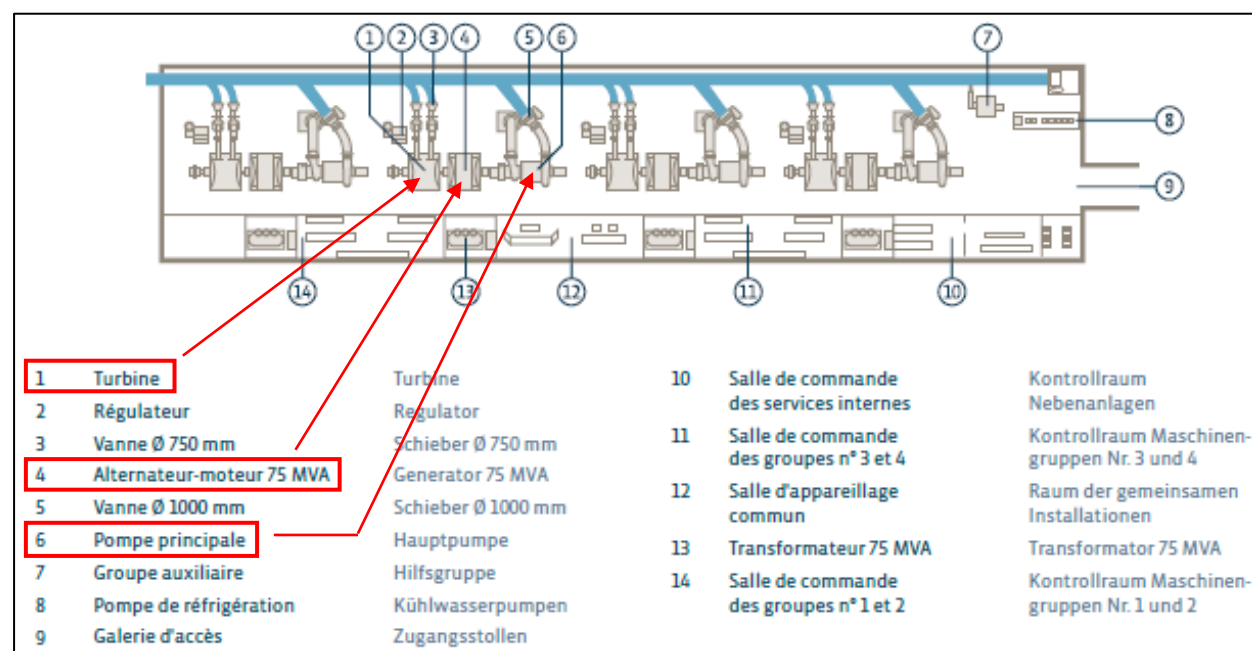
Bassin versant naturel et prises d'eau

Implanté au confluent de deux rivières, l'Hongrin et le Petit Hongrin, le lac de retenue occupe une surface de 160 ha. Aux apports du bassin versant naturel d'environ 46 km² s'ajoutent les volumes d'eau captés par huit prises situées entre six et dix kilomètres à vol d'oiseau du barrage. Les vallées avoisinantes représentent ainsi un bassin versant supplémentaire de 45 km². Ces eaux sont acheminées par écoulement gravitaire jusqu'à la retenue, au travers de plus de 20 km de galeries creusées en pente régulière. Les apports en eaux annuels, captés et provenant du bassin versant naturel, atteignent en moyenne un total de 90 millions de m³.

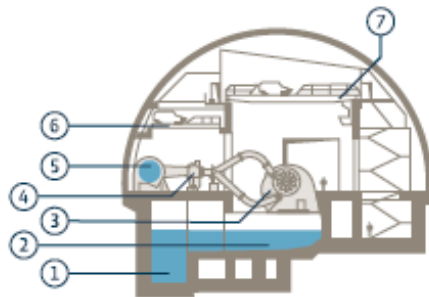
Forces motrices de Hongrin-Léman SA

<http://www.fmhl.ch/>

<http://www.fmhl.ch/Images/Annexes/Brochure001.pdf>

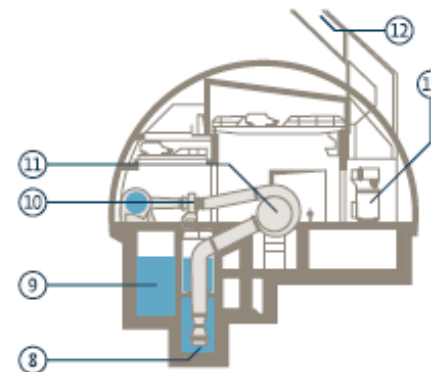


Coupe au droit d'une turbine
Querschnitt einer Turbine



1	Canal de fuite	Unterwasserkanal
2	Fosse de turbine	Turbinenschacht
3	Turbine	Turbine
4	Vanne de Ø 750 mm	Schieber Ø 750 mm
5	Collecteur-distributeur	Verteilleitung
6	Pont roulant 32/3t	Hallenkran 32/3 t
7	Pont roulant 65/16t	Hallenkran 65/16 t

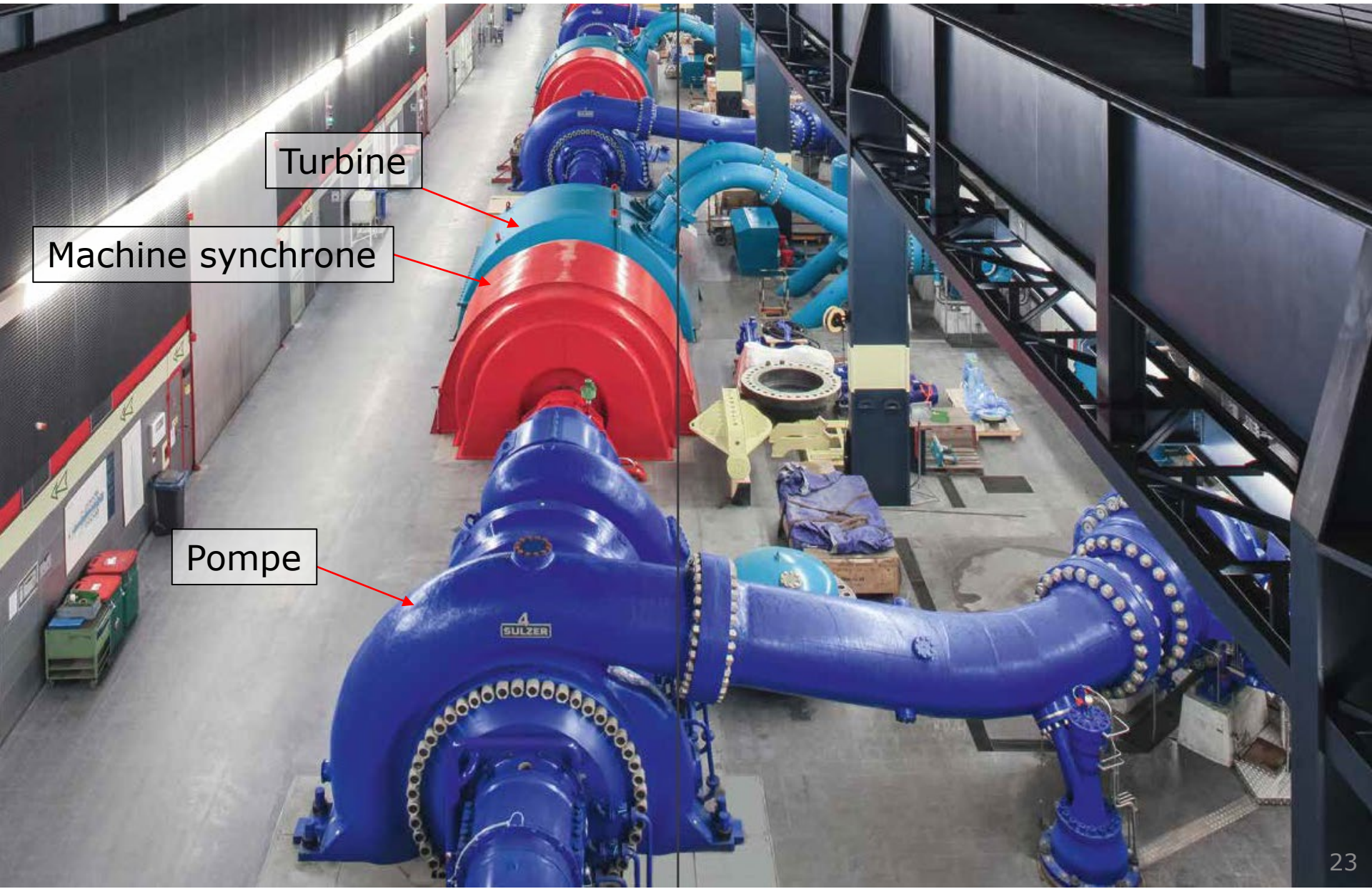
Coupe au droit d'une pompe
Querschnitt einer Pumpe



8	Fosse et pompe de mise en charge	Schacht mit Zubringerpumpe
9	Canal de fuite	Unterwasserkanal
10	Vanne de Ø 1000 mm	Schieber Ø 1000 mm
11	Pompe principale	Hauptpumpe
12	Puits des câbles HT	Kabelschacht Hochspannung
13	Transformateur 75 MVA	Transformator 75 MVA

Forces motrices de Hongrin-Léman SA

<http://www.fmhl.ch/>
<http://www.fmhl.ch/Images/Annexes/Brochure001.pdf>



Turbine

Machine synchrone

Pompe

Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement
- Schéma équivalent
- Bilan de puissance et caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène

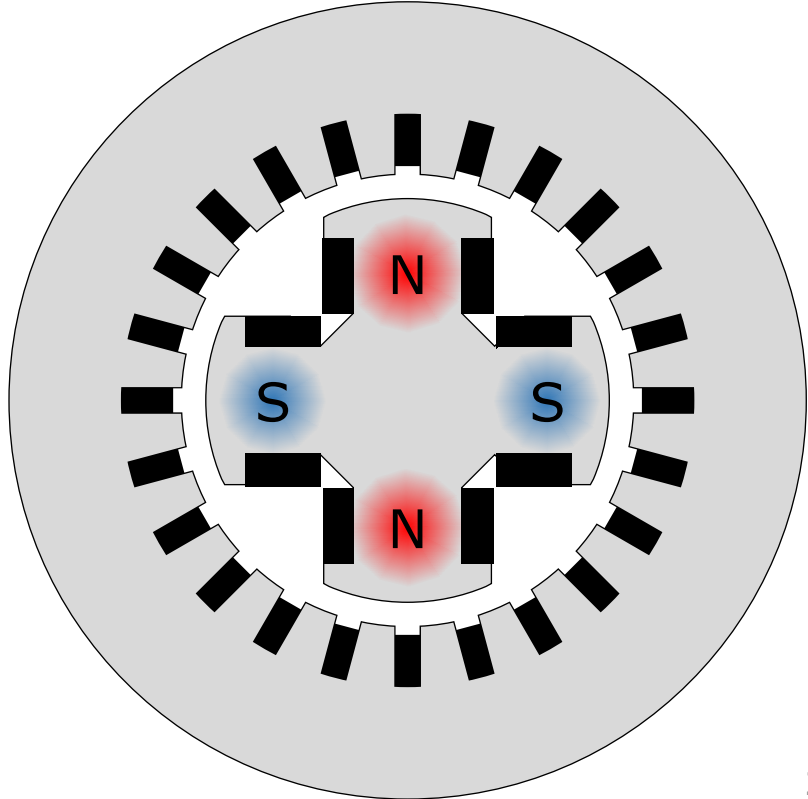
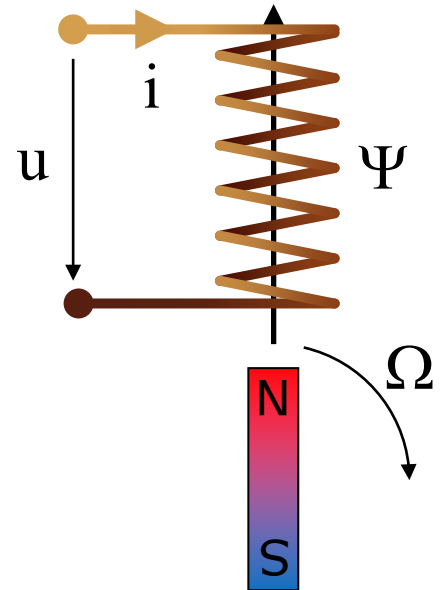
Tension induite généralisée

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

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

Tension induite de transformation

Tension induite de mouvement



Tension induite de mouvement

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

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

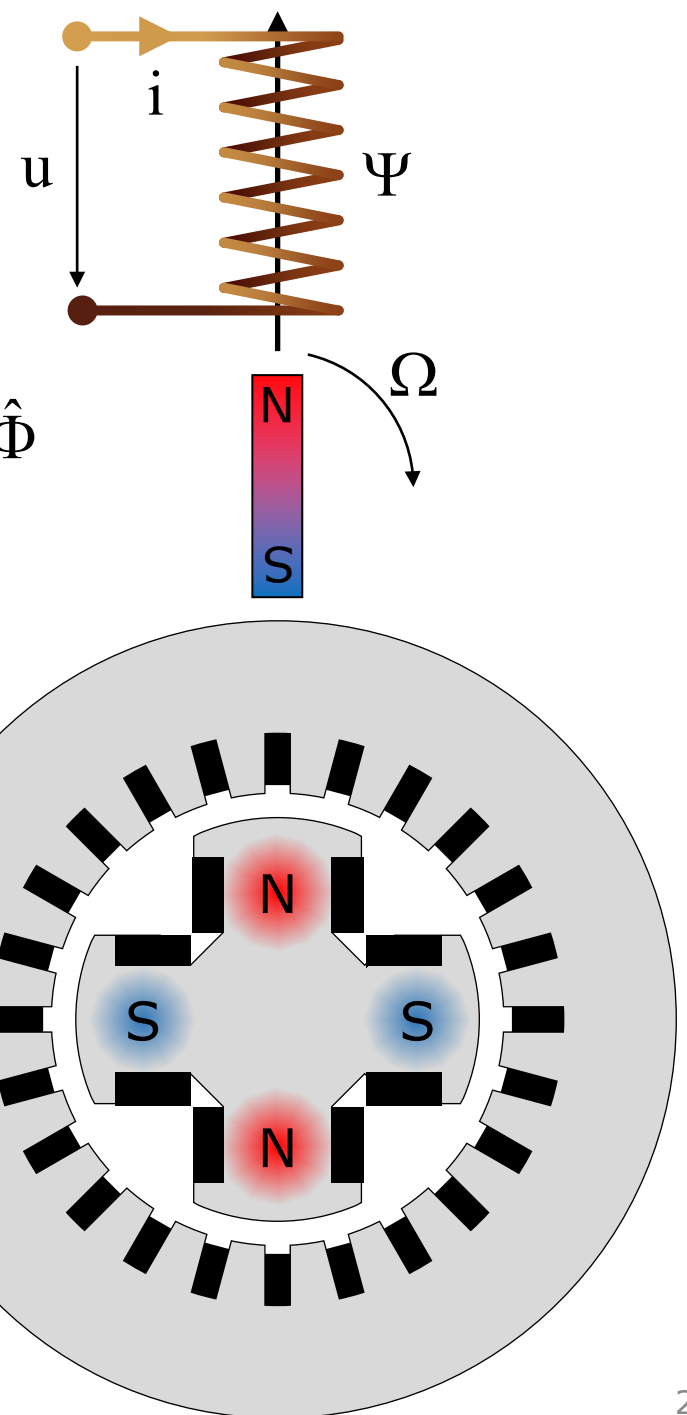
$$\Omega = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p} \text{ [rad / s]}$$

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

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

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

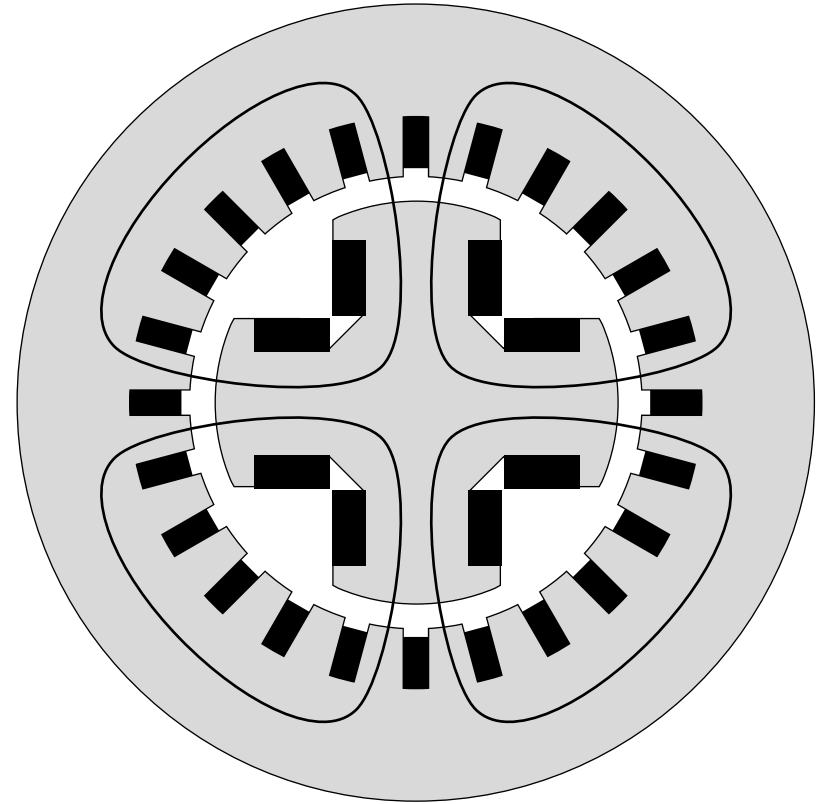
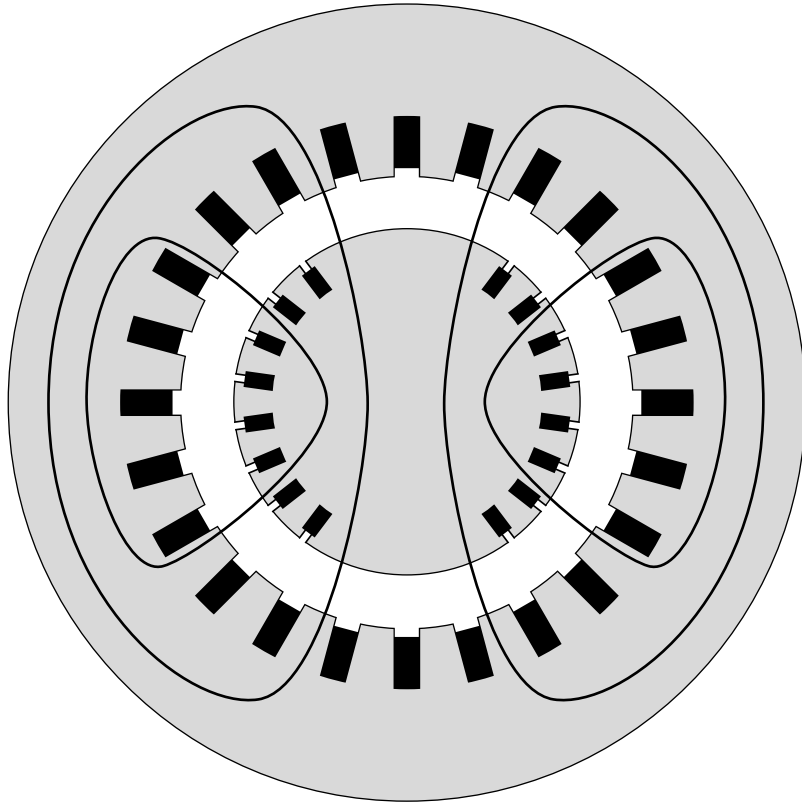
la tension induite de mouvement est proportionnelle à la vitesse de rotation et au courant d'excitation



Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement
- Schéma équivalent
- Bilan de puissance et caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène

Excitation des machines à pôles lisses et à pôles saillants



$$U_f = R_f I_f$$

Equation de tension et schéma équivalent

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

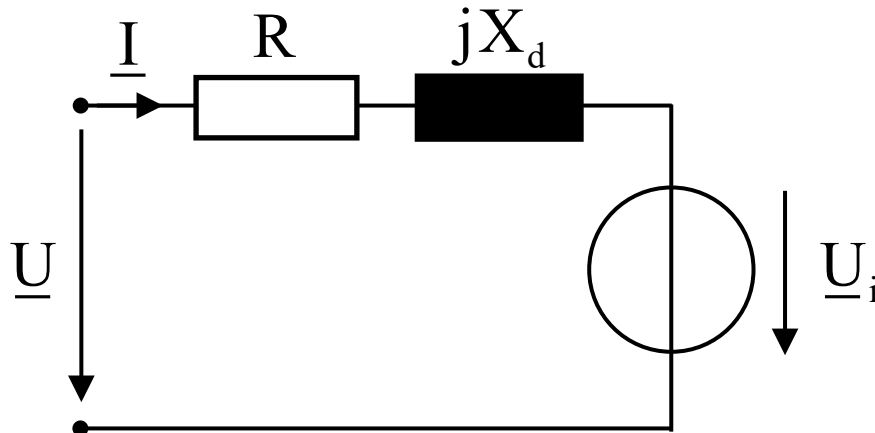
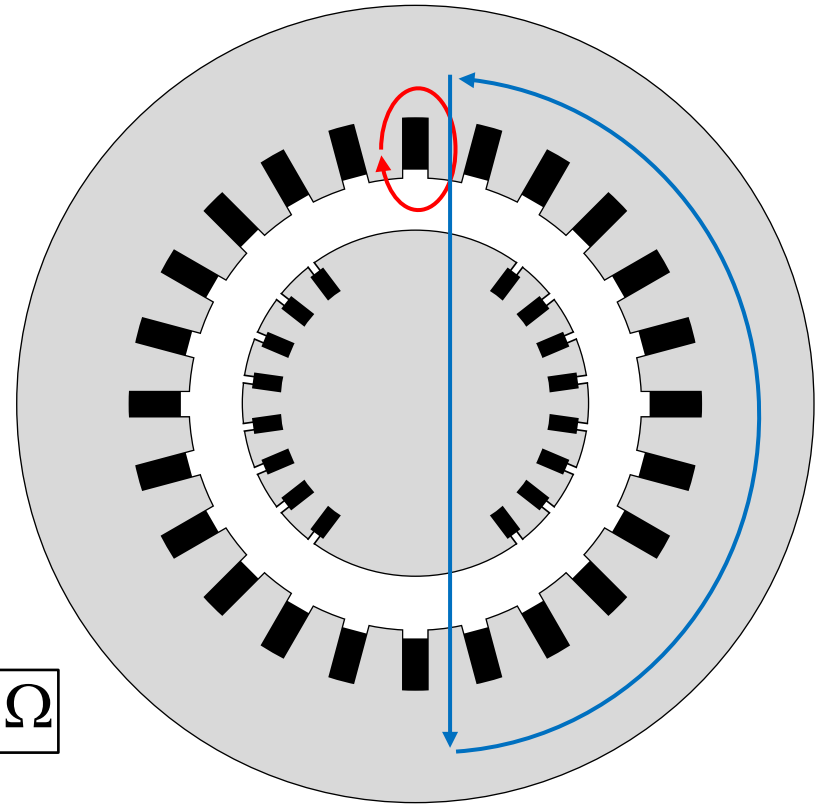
$$\frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + u_i$$

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

$$X_d = X_\sigma + X_h$$

tension induite
de mouvement

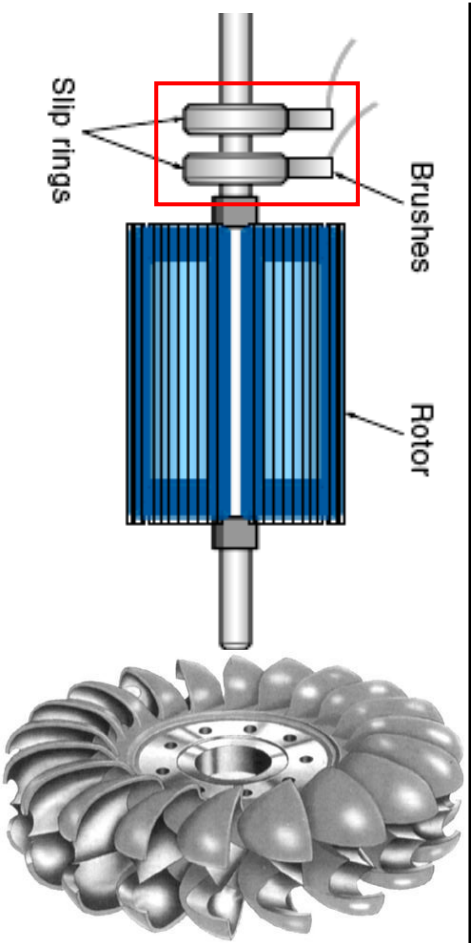
$$\underline{U}_i = k_\Phi \Omega = k_{If} I_f \Omega$$



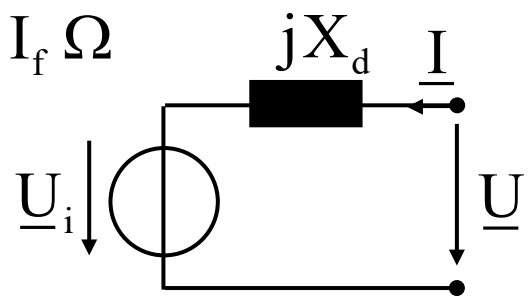
dans la moyenne et
grande puissance R
est souvent négligée

$$R \ll X_d$$

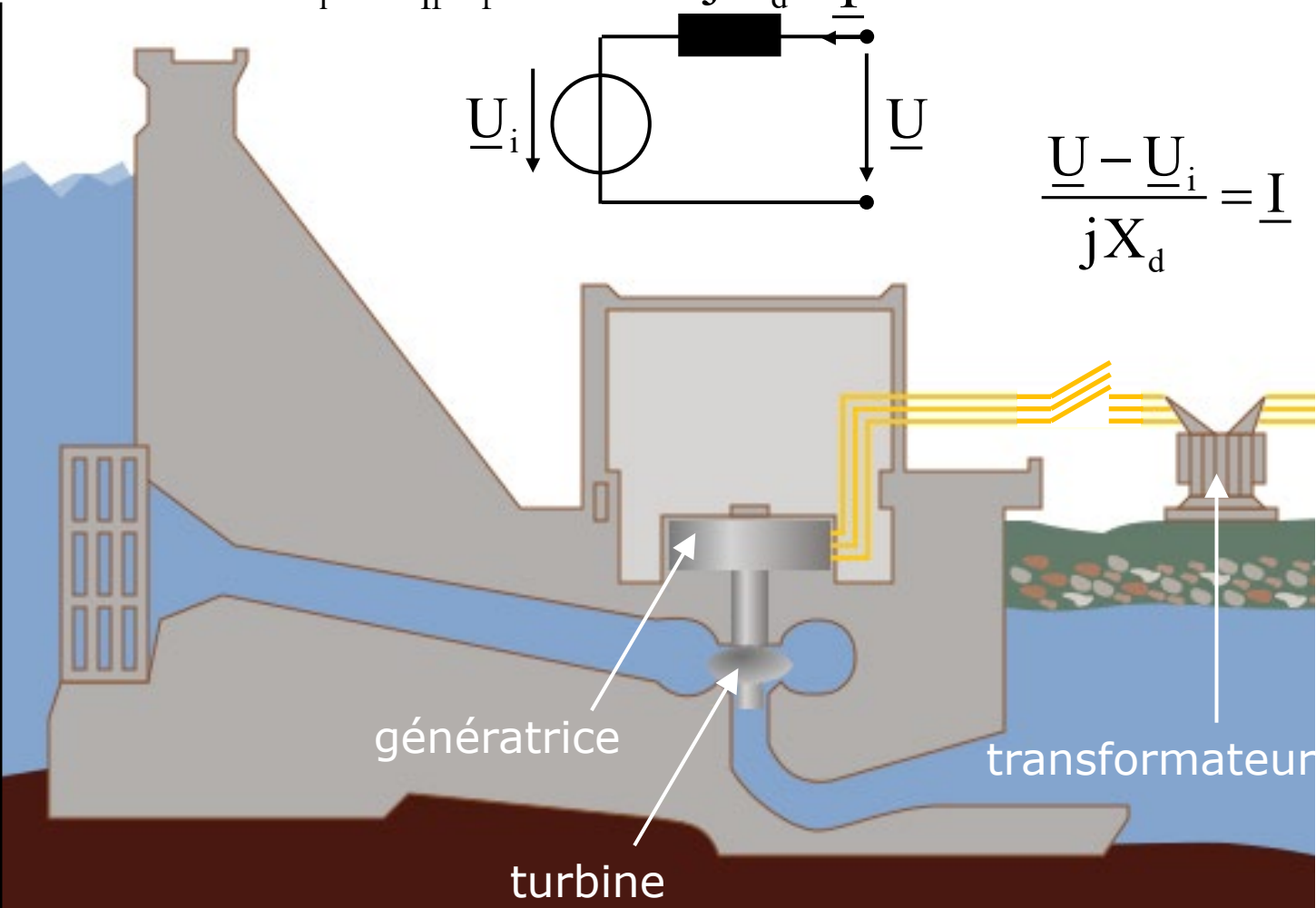
Considérations sur la tension induite de mouvement - Centrale hydro-électrique



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



$$\frac{U - U_i}{jX_d} = I$$

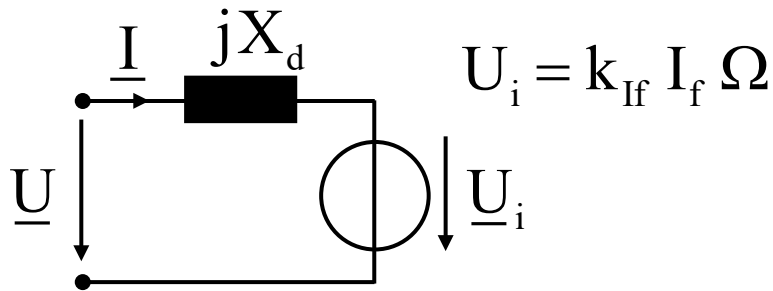


Puissances triphasées

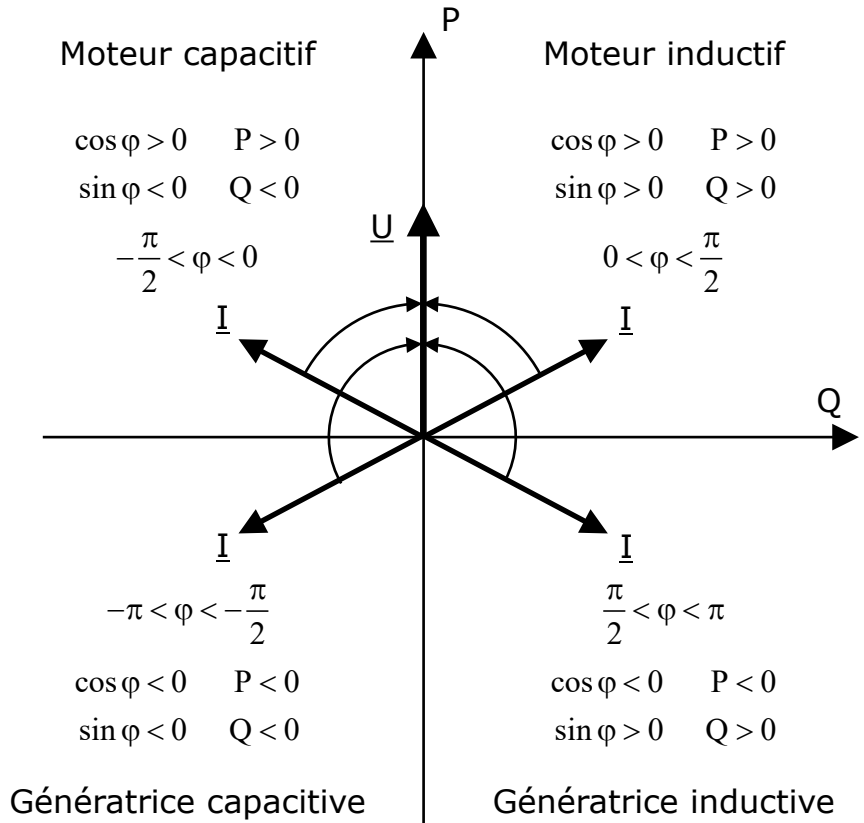
Puissance apparente $S = 3 U_{\text{ph}} I_{\text{ph}} = \sqrt{3} U_{\text{ligne}} I_{\text{ligne}} = \sqrt{P^2 + Q^2}$ [VA]

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

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



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



Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement
- Schéma équivalent
- Bilan de puissance et caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène

Bilan de puissance et Couple électromagnétique

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

$$P_j = 3 R I^2$$

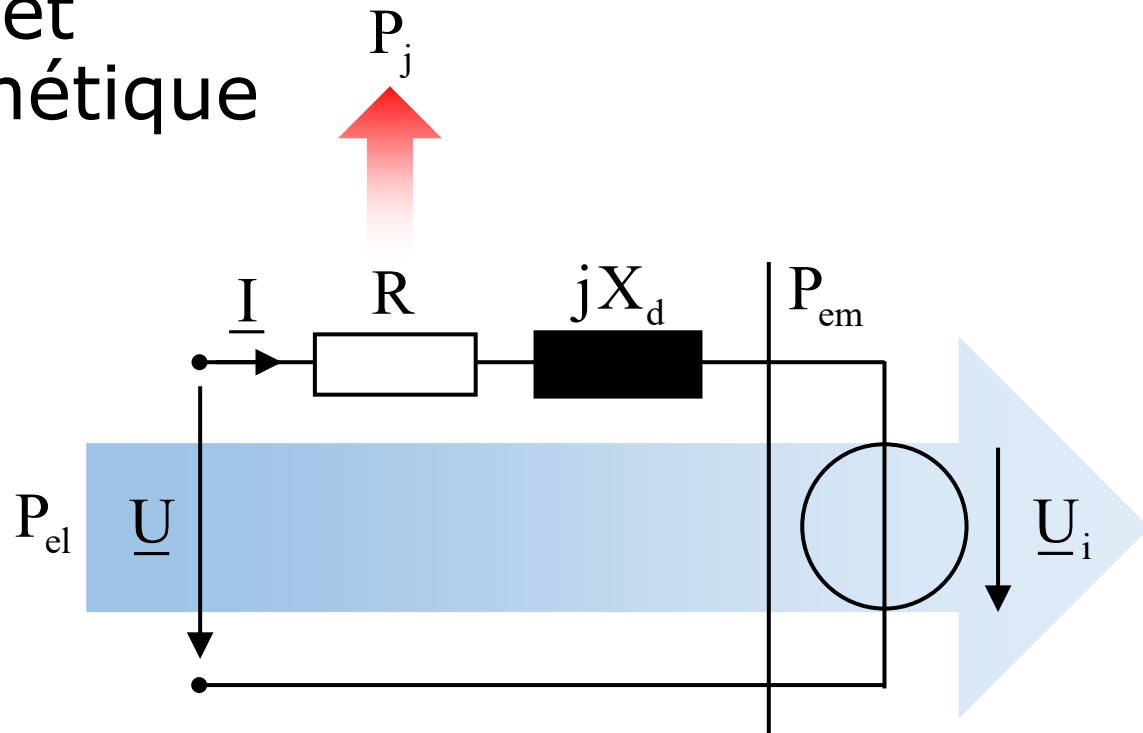
$$P_{em} = T_{em} \Omega_s$$

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

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

$$P_{em} = \Omega_s T_{em} = P_{el} - P_j = 3 U I \cos \varphi - 3 R I^2$$

$$T_{em} = \left(3 U I \cos \varphi - 3 R I^2 \right) \frac{1}{2 \pi n_s} \xrightarrow{R \ll X_d} T_{em} = \frac{3 U I \cos \varphi}{2 \pi n_s}$$



Couple électromagnétique

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

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

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

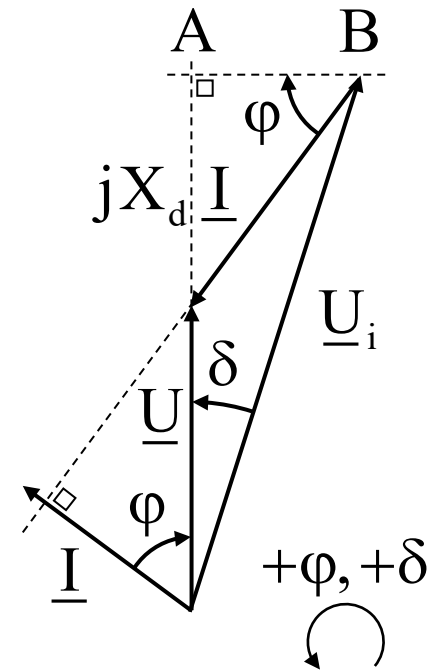
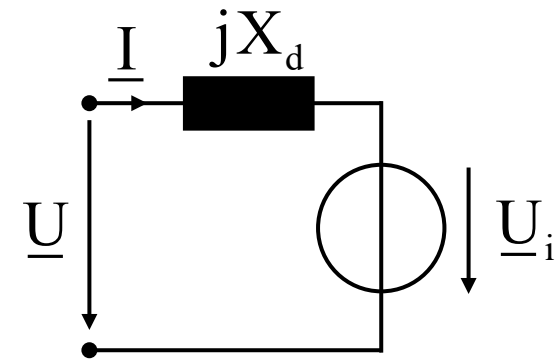
$$U = X_d I (\sin \varphi + j \cos \varphi) + U_i (\cos \delta - j \sin \delta)$$

les parties imaginaires doivent s'annuler car U est réel

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

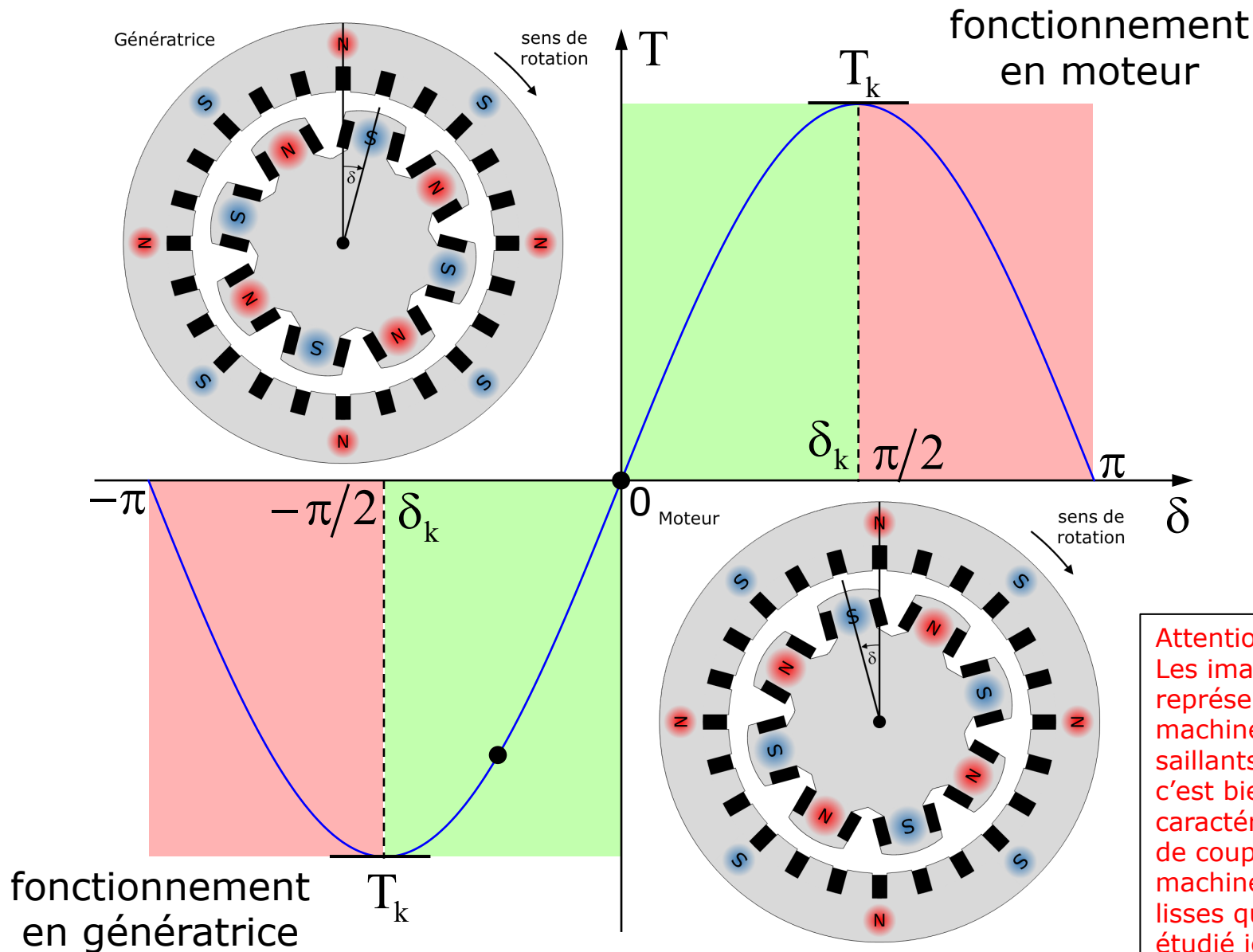
$$P_{em} = T_{em} \Omega_s = 3 U I \cos \varphi = 3 \frac{U U_i}{X_d} \sin \delta$$

$$T_{em} = 3 \frac{U U_i}{2\pi n_s X_d} \sin \delta \longrightarrow T_k = 3 \frac{U U_i}{2\pi n_s X_d}$$



Caractéristique de couple

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



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
étudié ici.

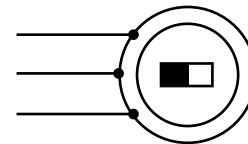
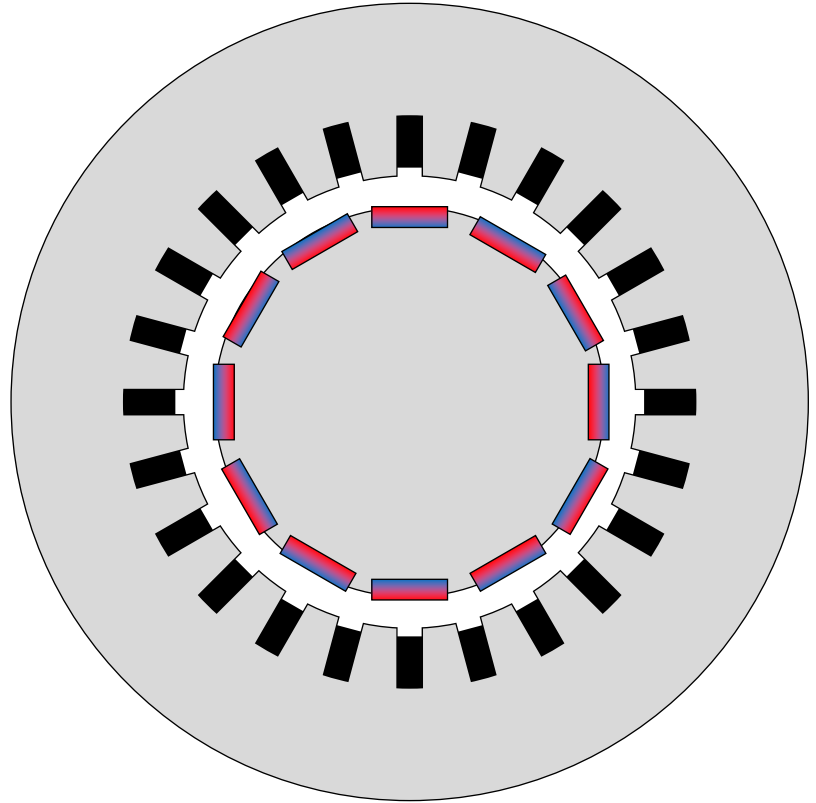
Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement
- Schéma équivalent
- Bilan de puissance et caractéristique de couple
- Parenthèse sur le moteur synchrone à aimants permanents
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène

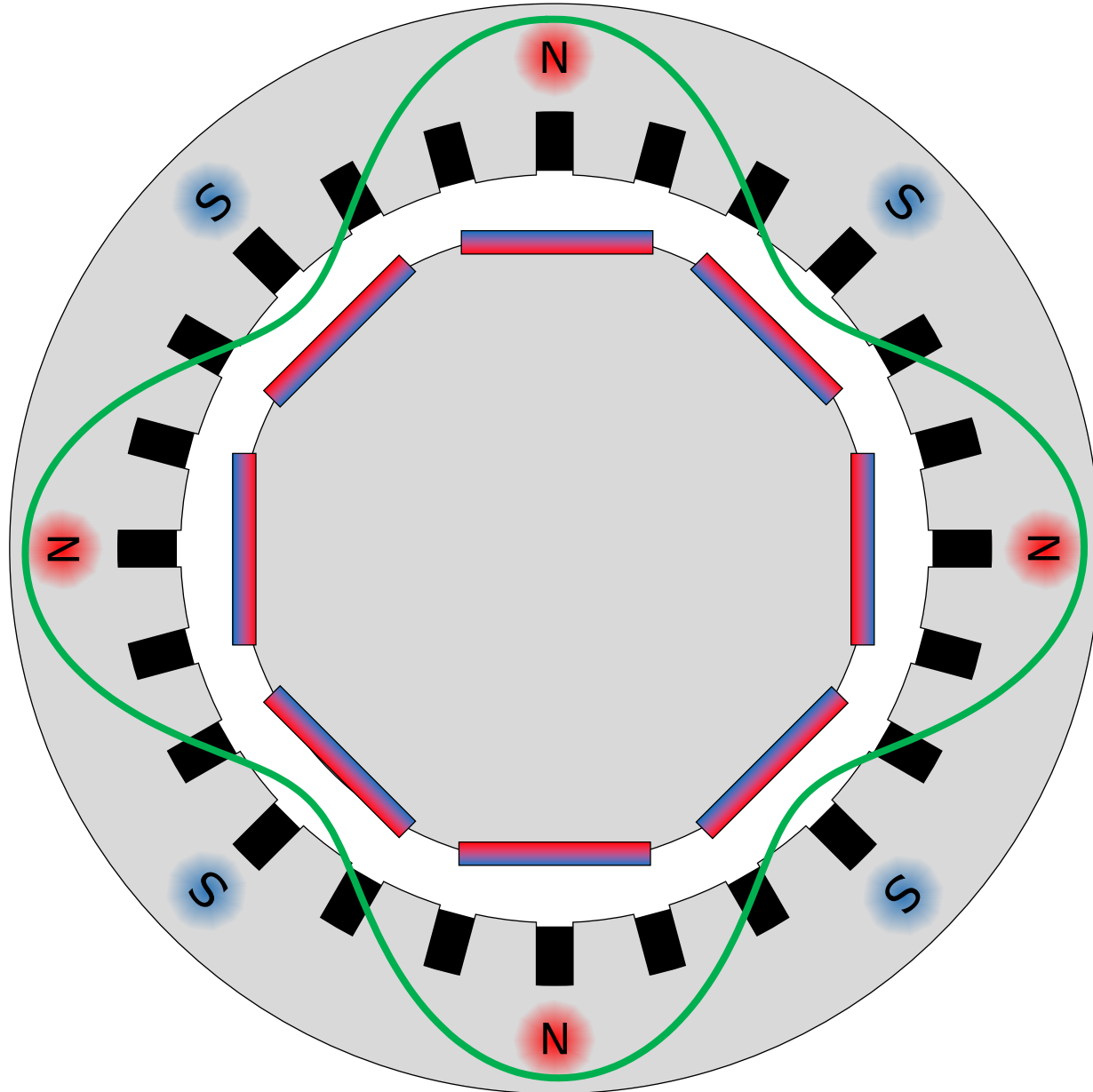
Parenthèse sur le Moteur synchrone à aimants permanents



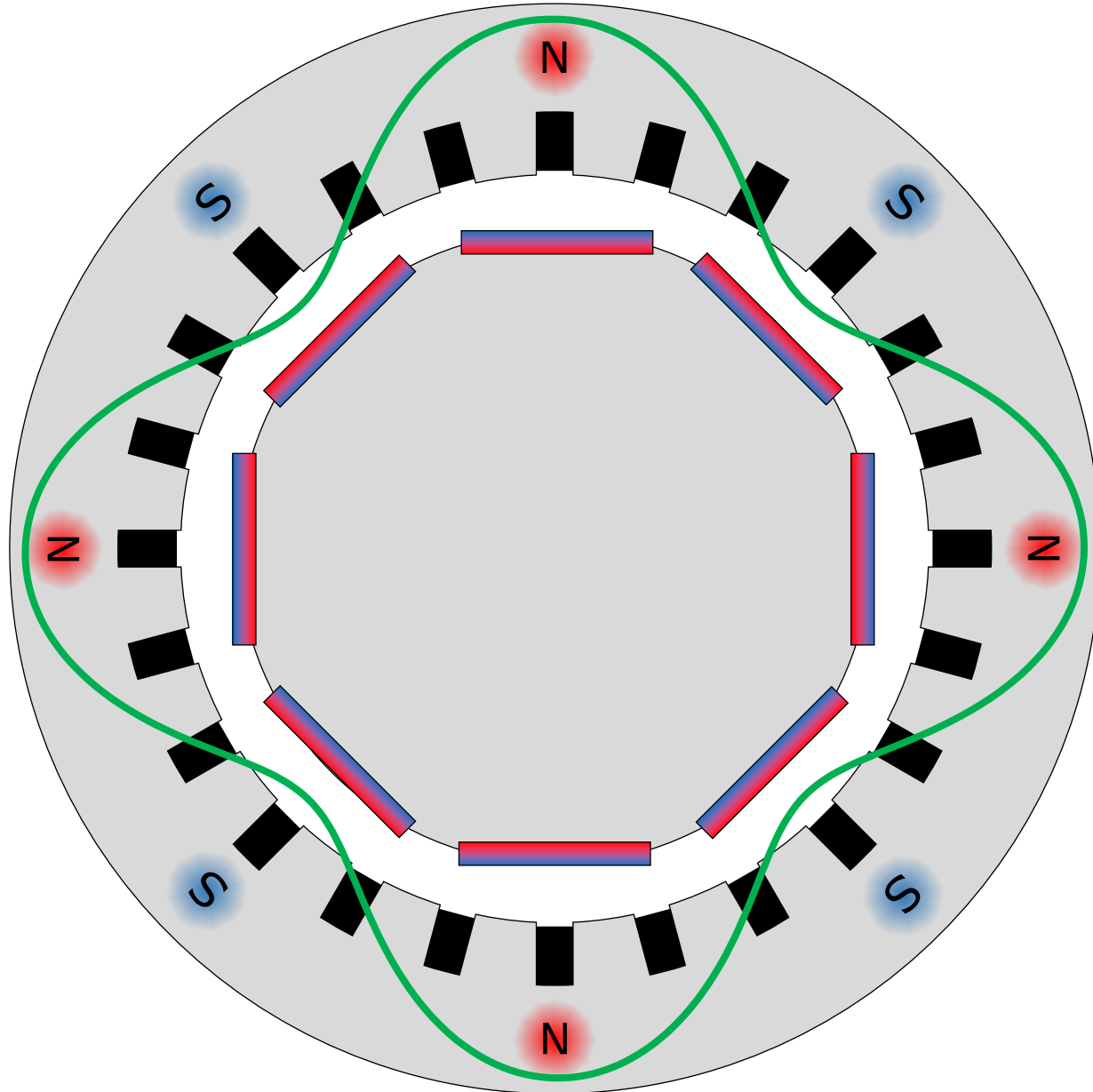
aimants permanents



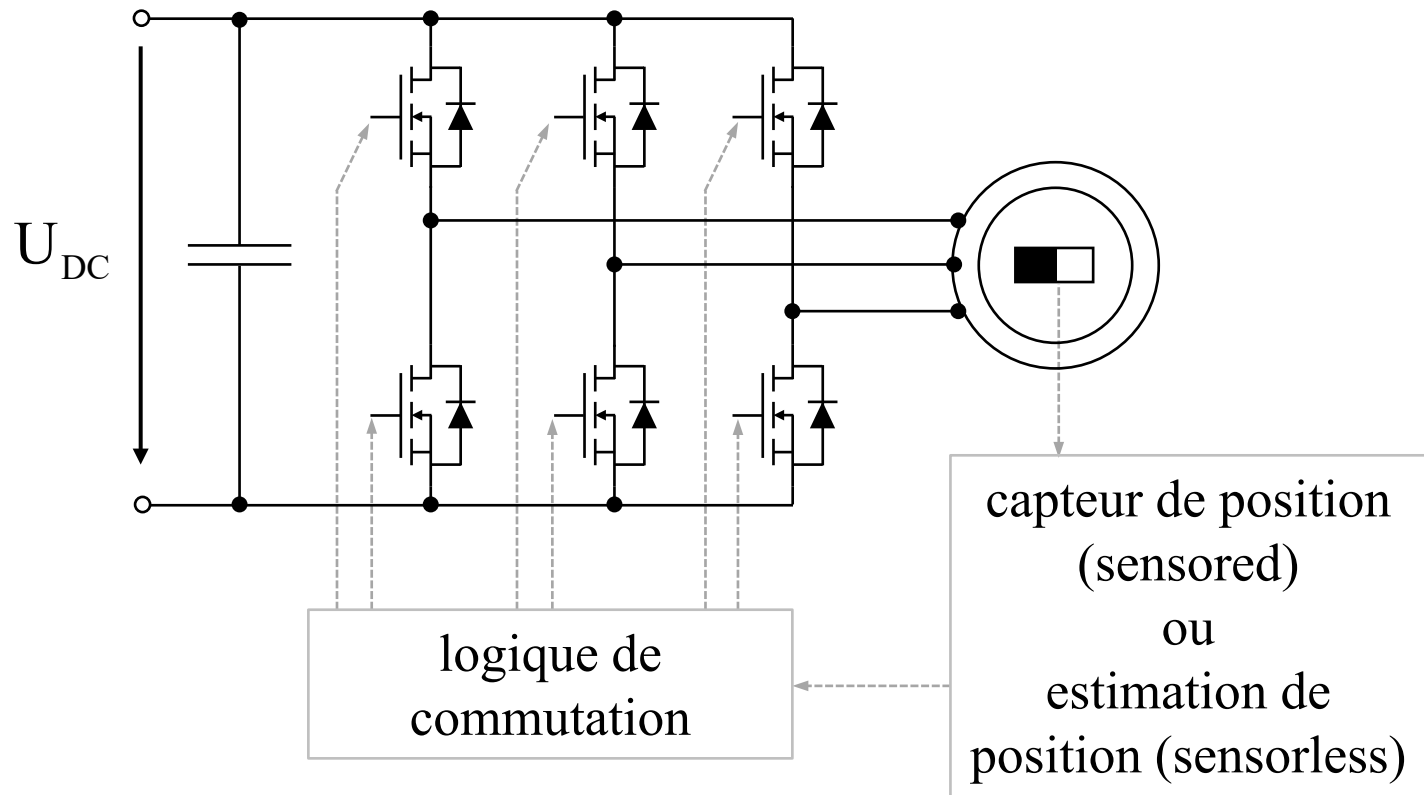
Parenthèse sur le Moteur synchrone à aimants permanents



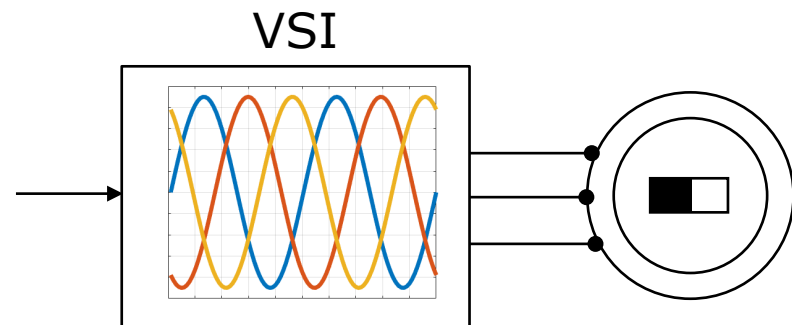
Parenthèse sur le Moteur synchrone à aimants permanents



Parenthèse sur le Moteur synchrone à aimants permanents

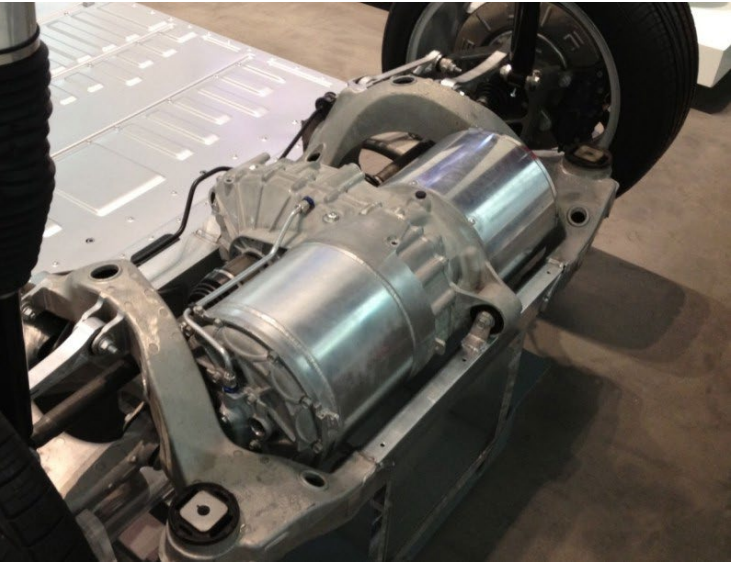
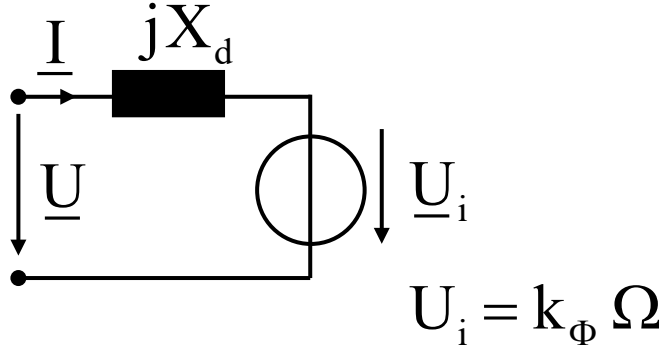
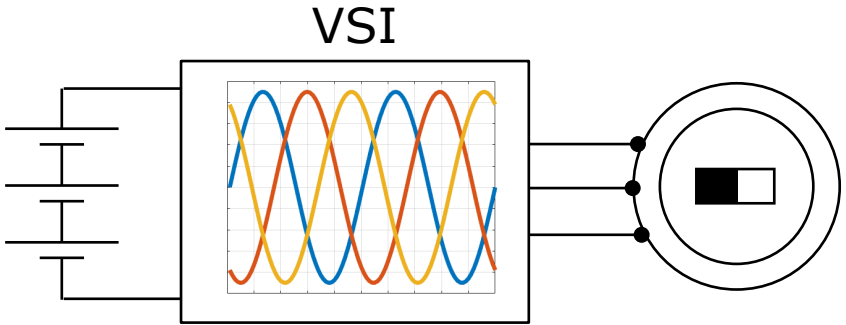


- VSI (Voltage Source Inverter)
- Onduleur
- Convertisseur de tension
- Pont à 6 transistors





Considérations sur la tension induite de mouvement – Voiture électrique



Sources :
tesla.com
teslarati.com

Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement
- Schéma équivalent
- Bilan de puissance et caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène

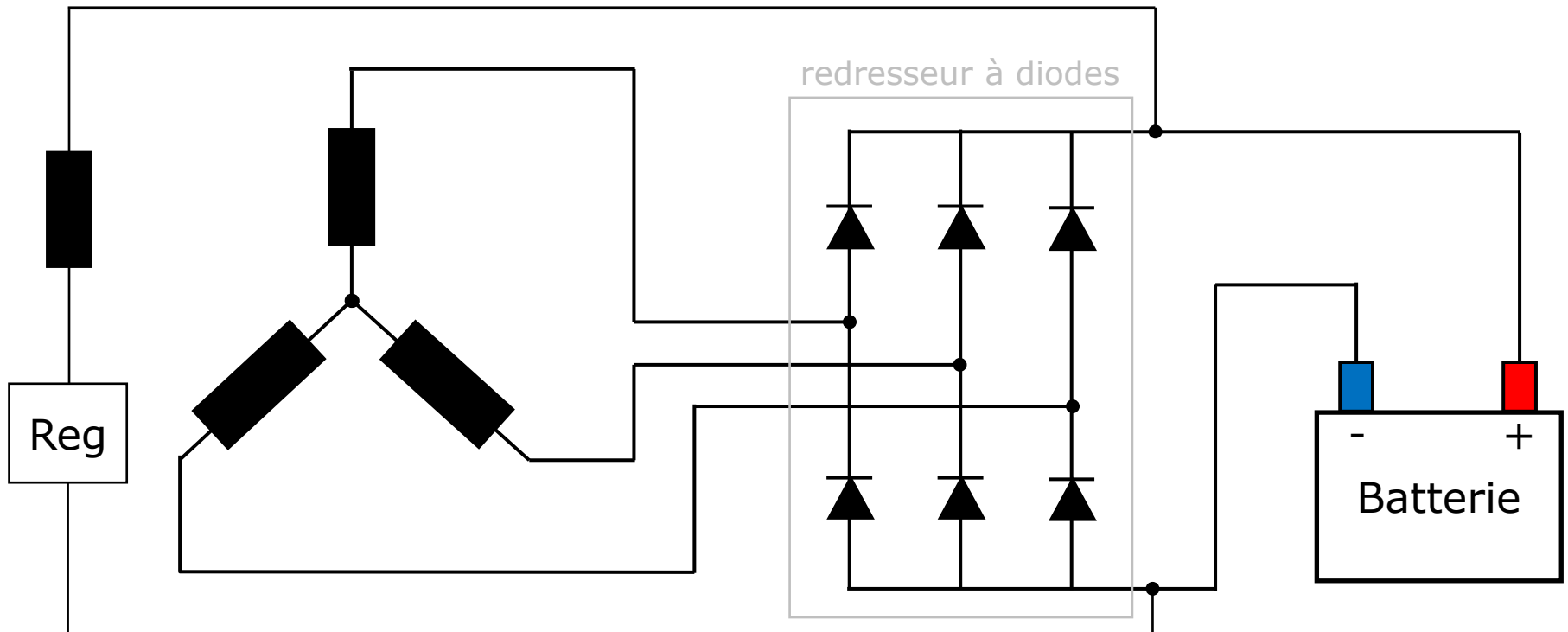
Alternateur de voiture

$14.1V_{DC}$

$3 \sim \rightarrow DC$

$1000 - 6500 \text{ tr / min} \rightarrow p = 6 \text{ ou } 8$

$U_i \sim (I_f, \Omega) \rightarrow \text{Régler l'excitation}$



Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement
- Schéma équivalent
- Bilan de puissance et caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène

Groupe électrogène



Moteur diesel



Génératrice synchrone



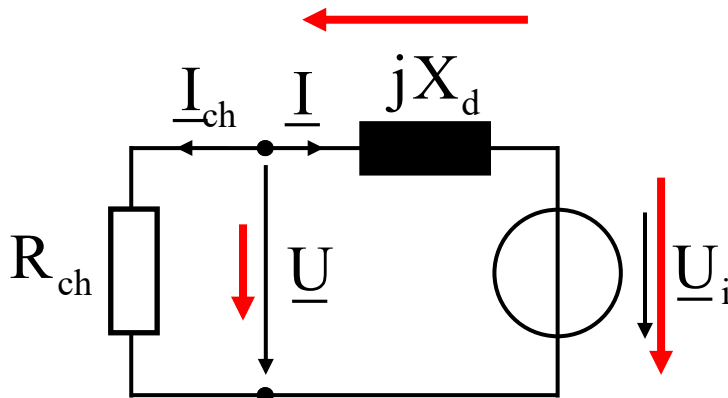
GRUPE ÉLECTROGÈNE TRIPHASÉ
21KVA MOTEUR DIESEL 1500T/MN

Groupe électrogène super insonorisé
51 dB(A)

Moteur diesel 1500 tr/min 4 cylindres,
refroidit par eau

Groupe électrogène

Génératrice synchrone



$$U_i = k_{If} \underline{I}_f \Omega \rightarrow \Omega = cste$$

GRUPE ÉLECTROGÈNE TRIPHASÉ
21KVA MOTEUR DIESEL 1500T/MN

Groupe électrogène super insonorisé
51 dB(A)

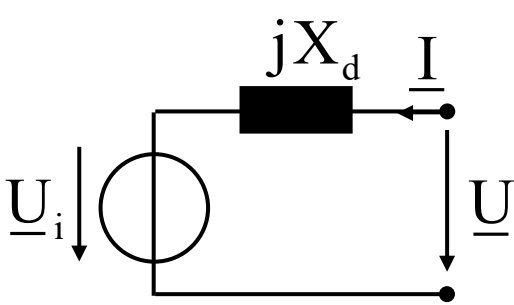
Moteur diesel 1500 tr/min 4 cylindres,
refroidit par eau

Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement
- Schéma équivalent
- Bilan de puissance et caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau

Synchronisation au réseau

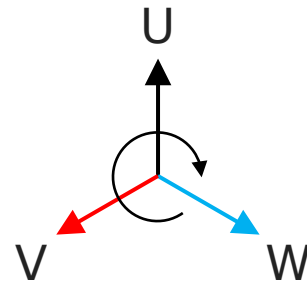
Exemple : centrale hydro-électrique



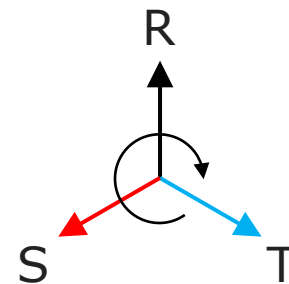
$$U_i = k_{If} I_f \Omega \quad \Omega = \text{cste}$$

Correspond à la position mécanique du rotor !

génératrice



réseau



Conditions

- Vitesse
- Amplitude
- Phase
- Sens

I_{f0} = courant d'excitation à vide.

C'est le courant d'excitation qu'il faut mettre pour avoir, à vide, la tension du nominale du réseau.

génératrice

turbine

transformateur

Synchronisation au réseau

Conditions :

- même fréquence
- même amplitude
- même phase
- même ordre de succession des phases

