

Machines électriques

pour Génie Mécanique

Machine synchrone

André Hodder

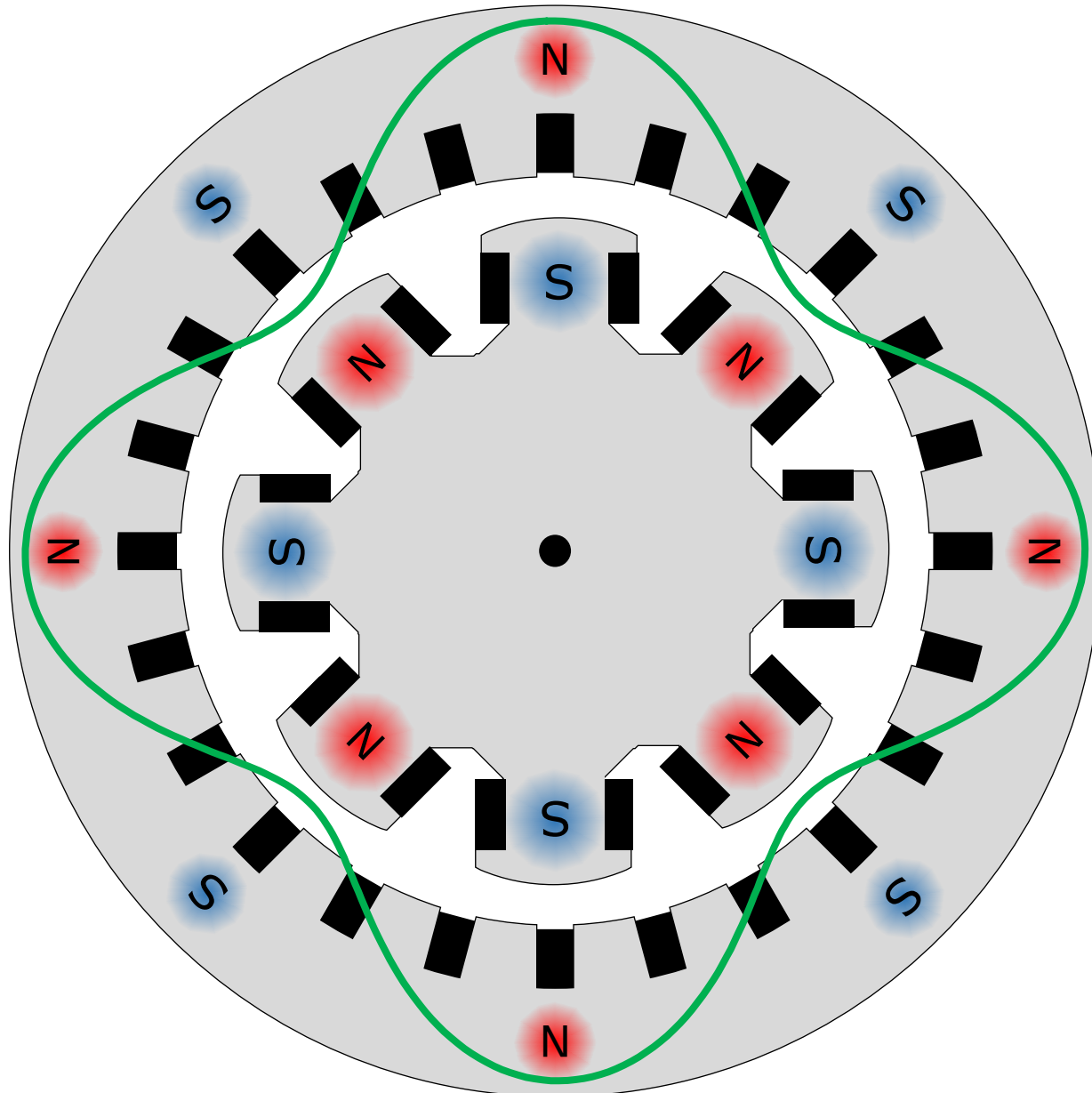
Sommaire

- 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

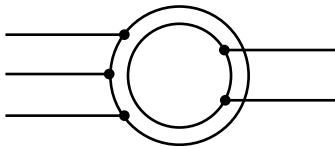
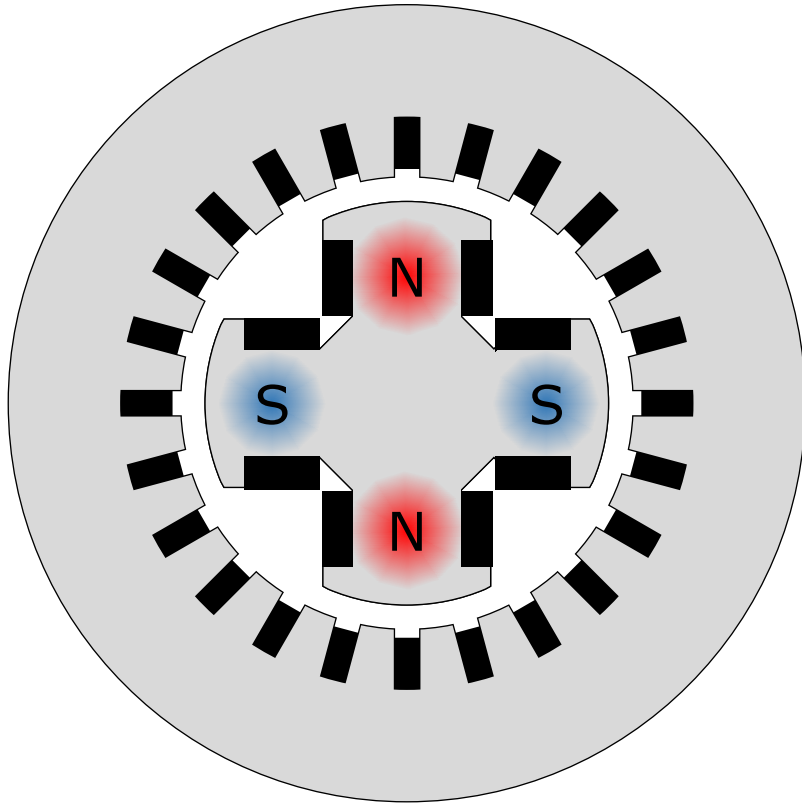
- Principe de fonctionnement et types de machines synchrones
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
 - Equation de tension et schéma équivalent
 - Bilan de puissance et Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
 - Equation de tension
 - Caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau
- Le topogramme (diagramme des puissances)
 - Machine à pôles lisses
 - Machine à pôles saillants

Principe de fonctionnement

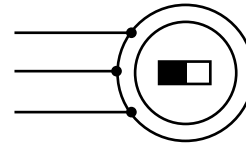
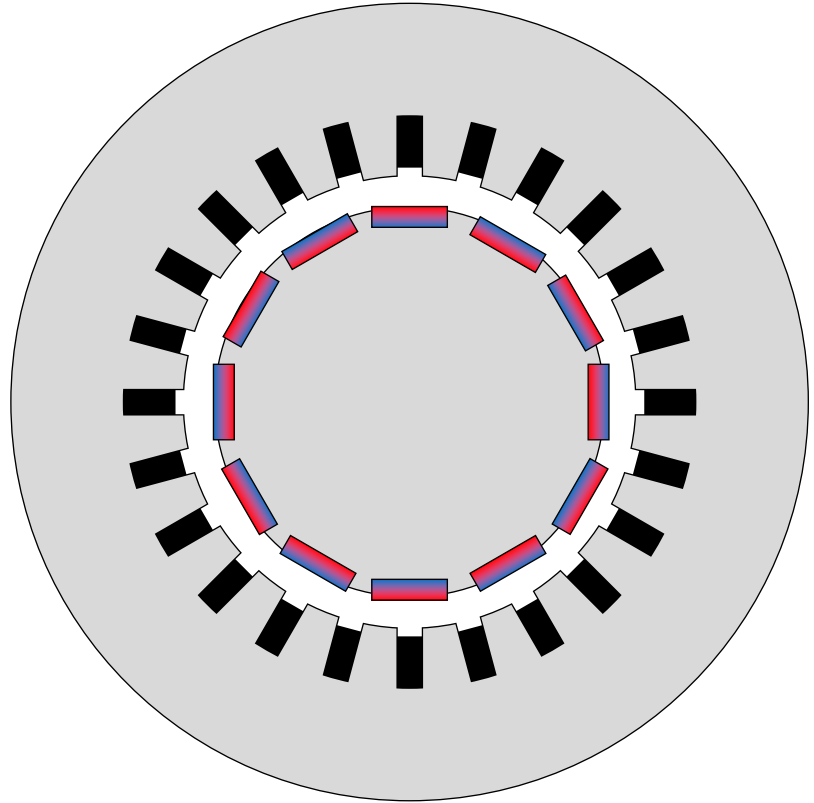


Machine synchrone

excitation



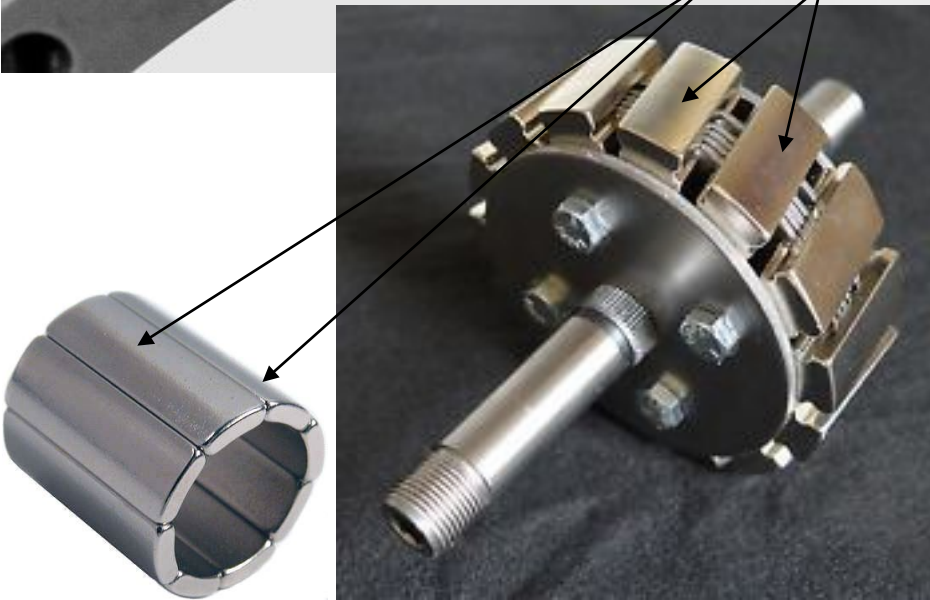
aimants permanents



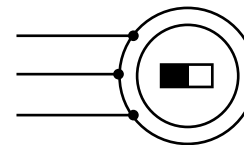
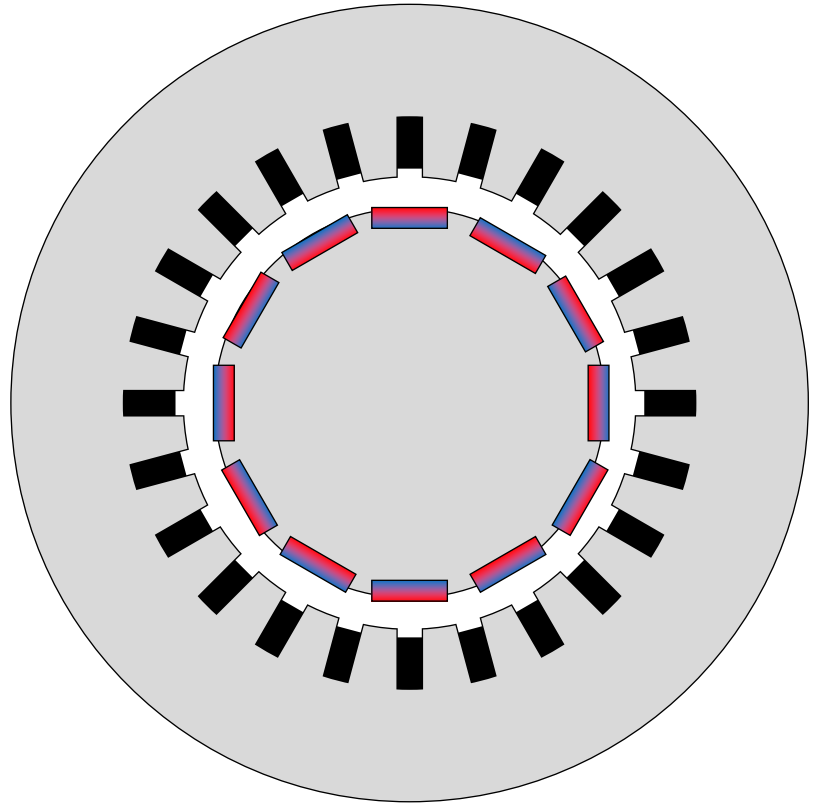
Machine synchrone



aimants

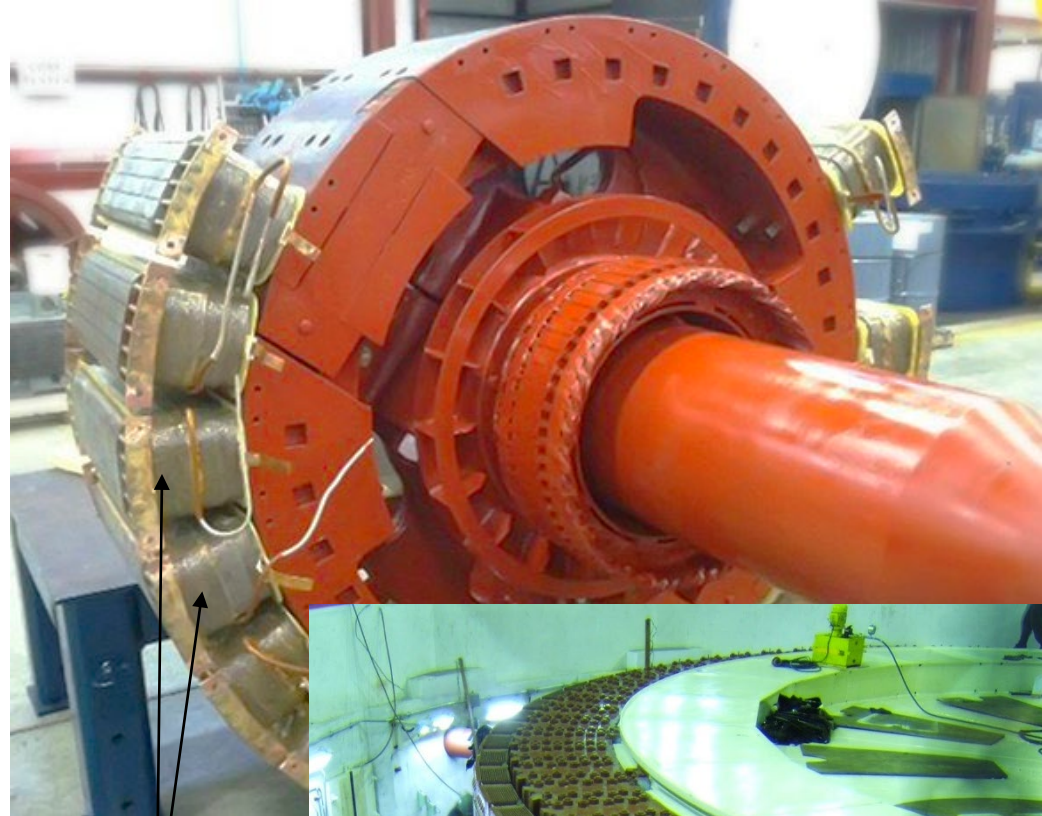
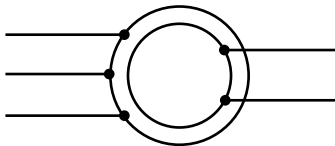
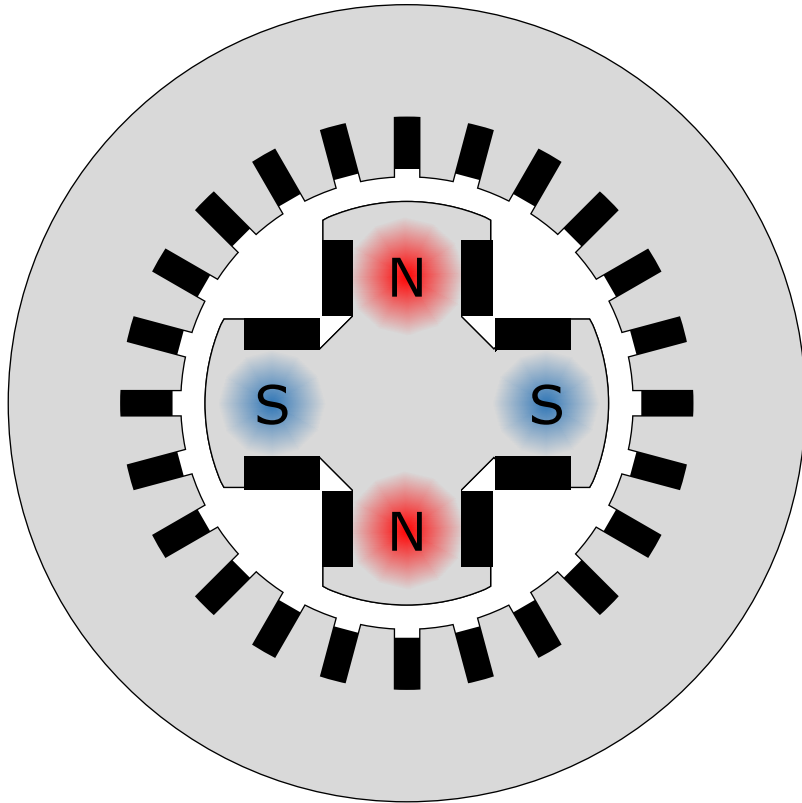


aimants permanents



Machine synchrone

excitation



pôles



Nombre de paires de pôles

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



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

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

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

Nombre de paires de pôles

Rappel :

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

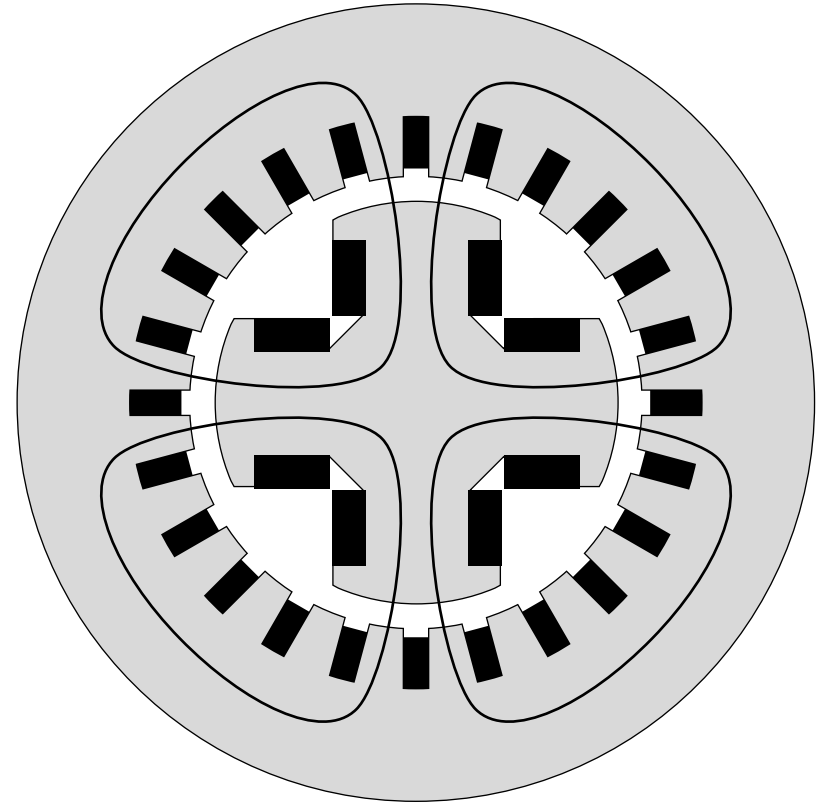
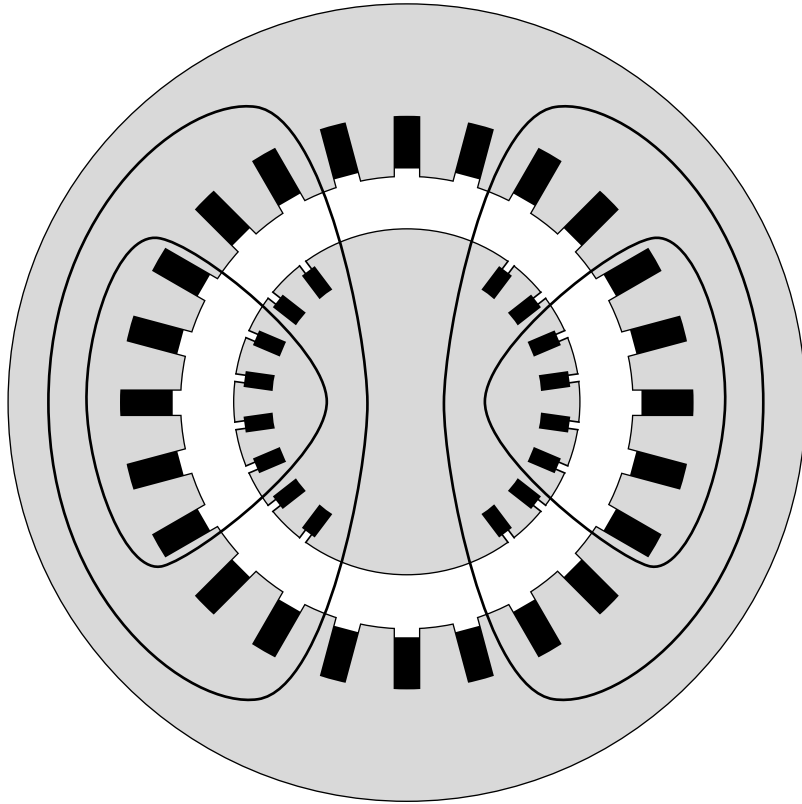
$\omega \rightarrow [\text{rad} / \text{s}] \rightarrow$ Monde électrique

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

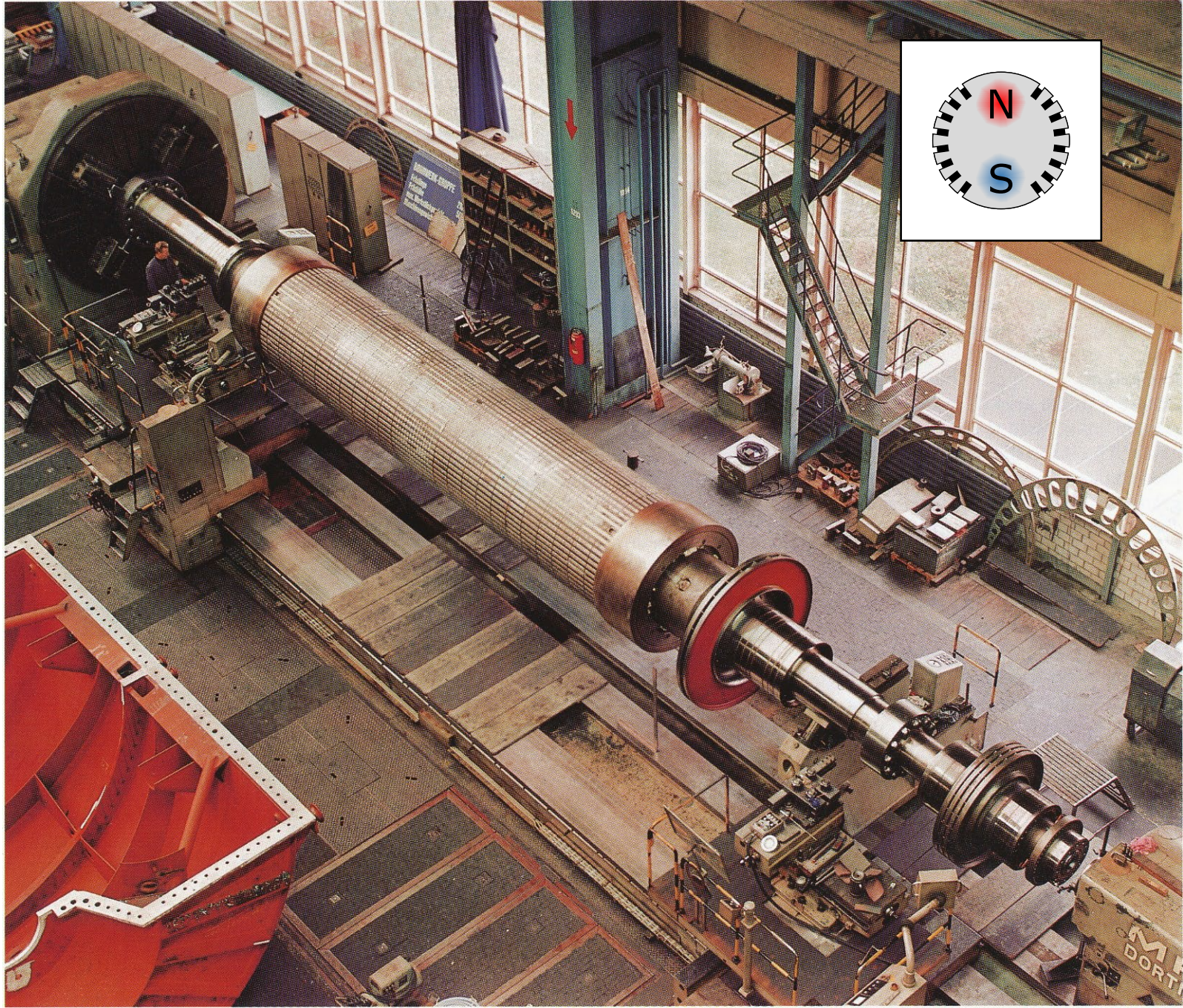
$n \rightarrow [\text{tr} / \text{s}] \rightarrow$ Monde mécanique

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

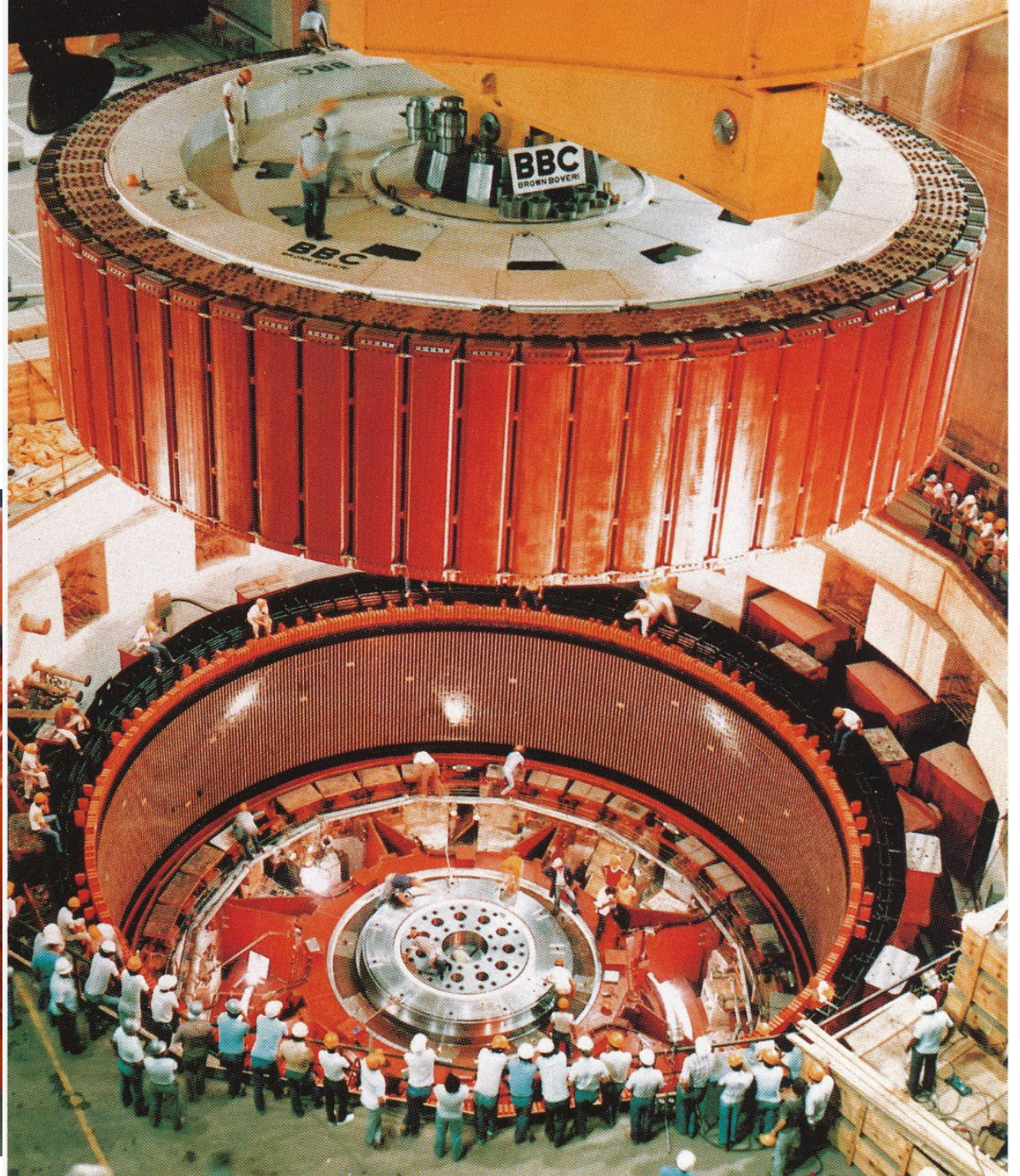
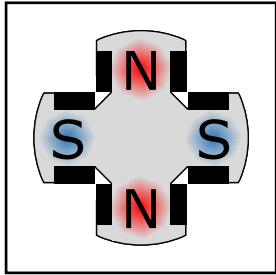
Machines à pôles lisses et à pôles saillants



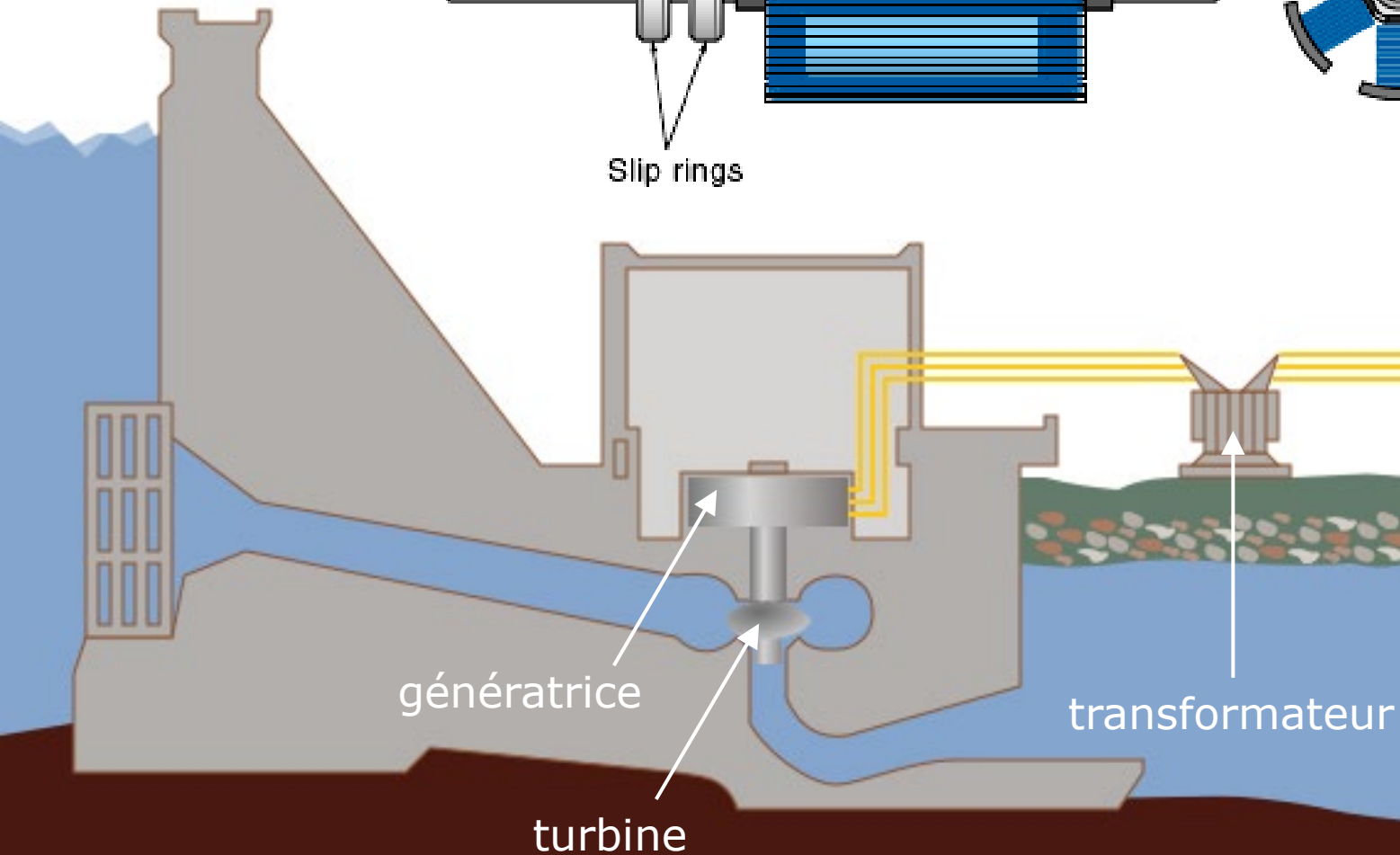
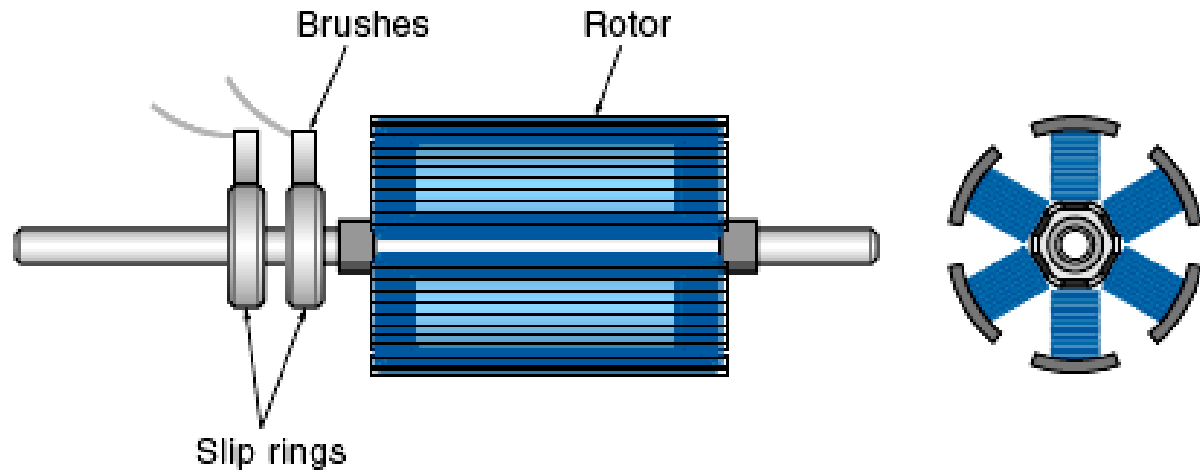
Machine à pôles lisses



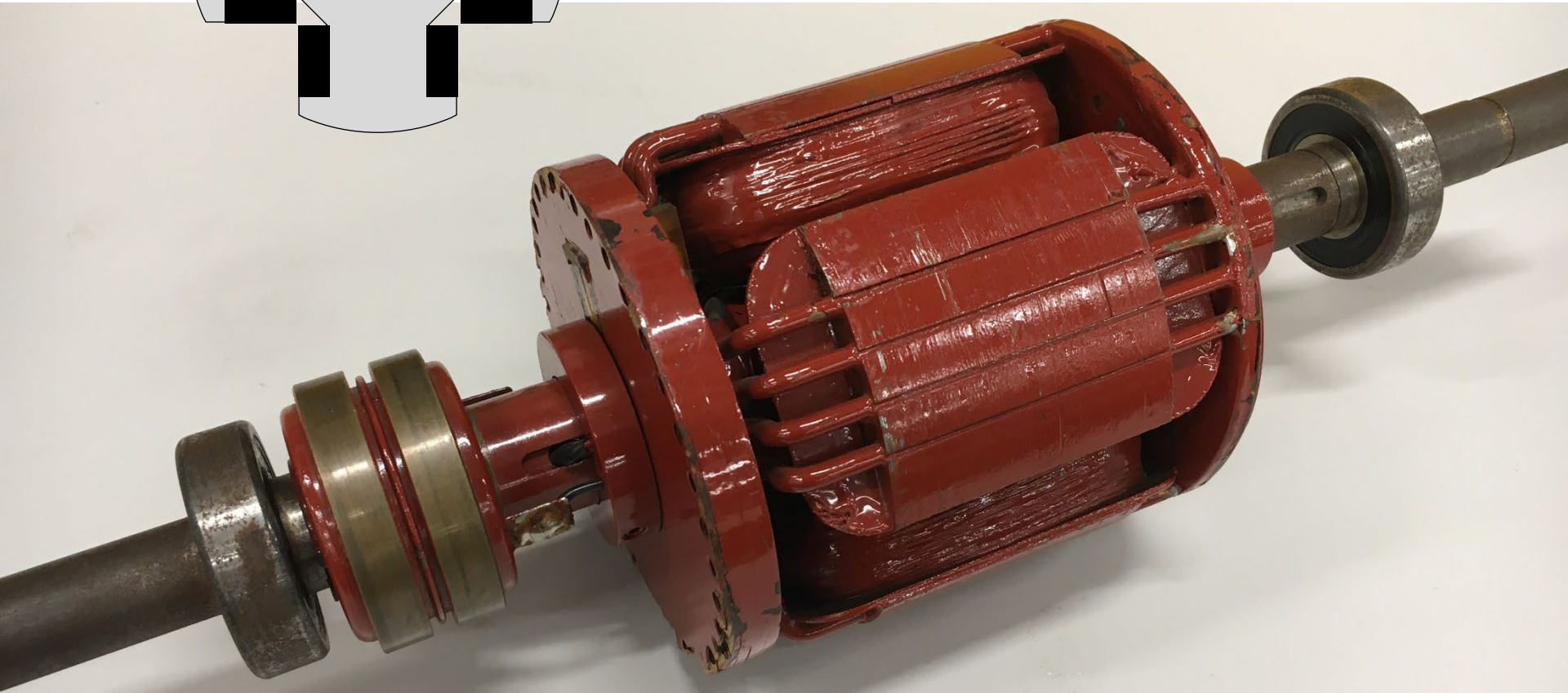
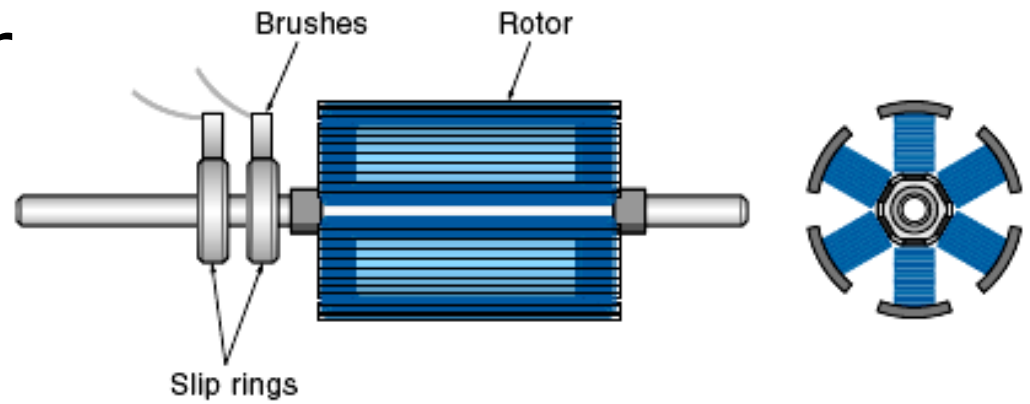
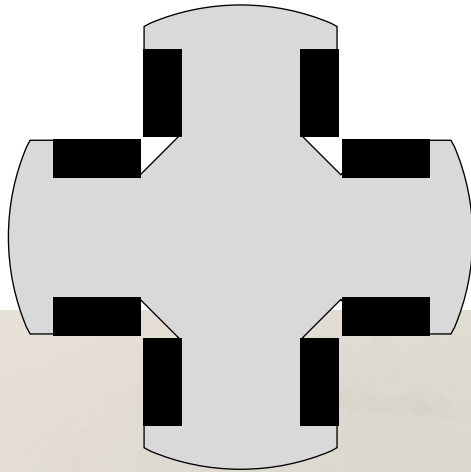
Machine à pôles saillants

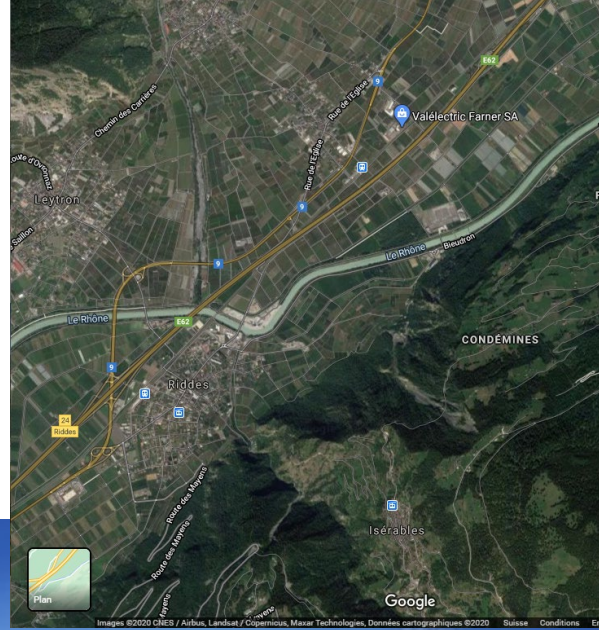
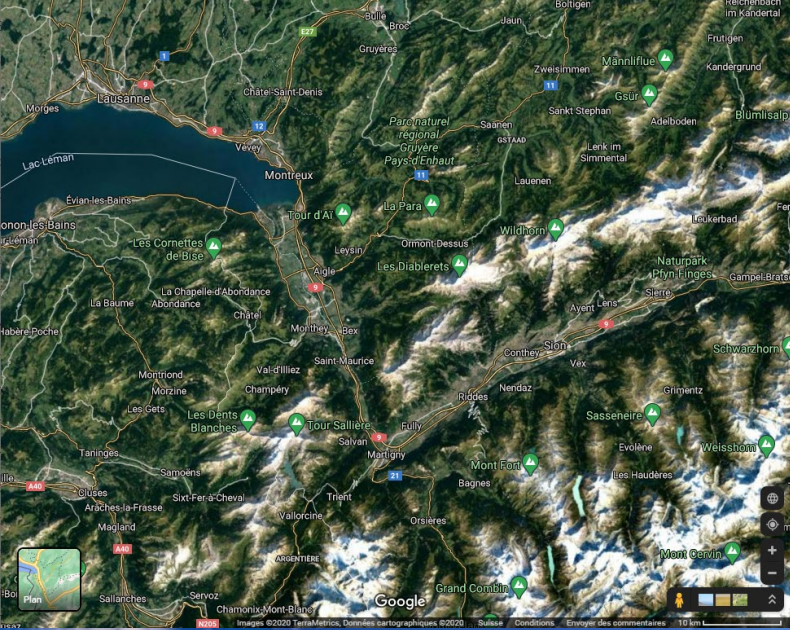


Centrale hydro-électrique



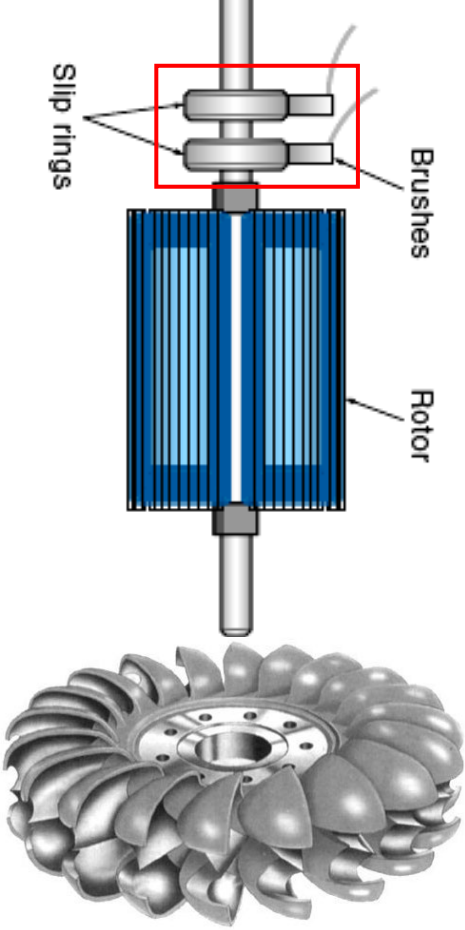
Excitation du rotor



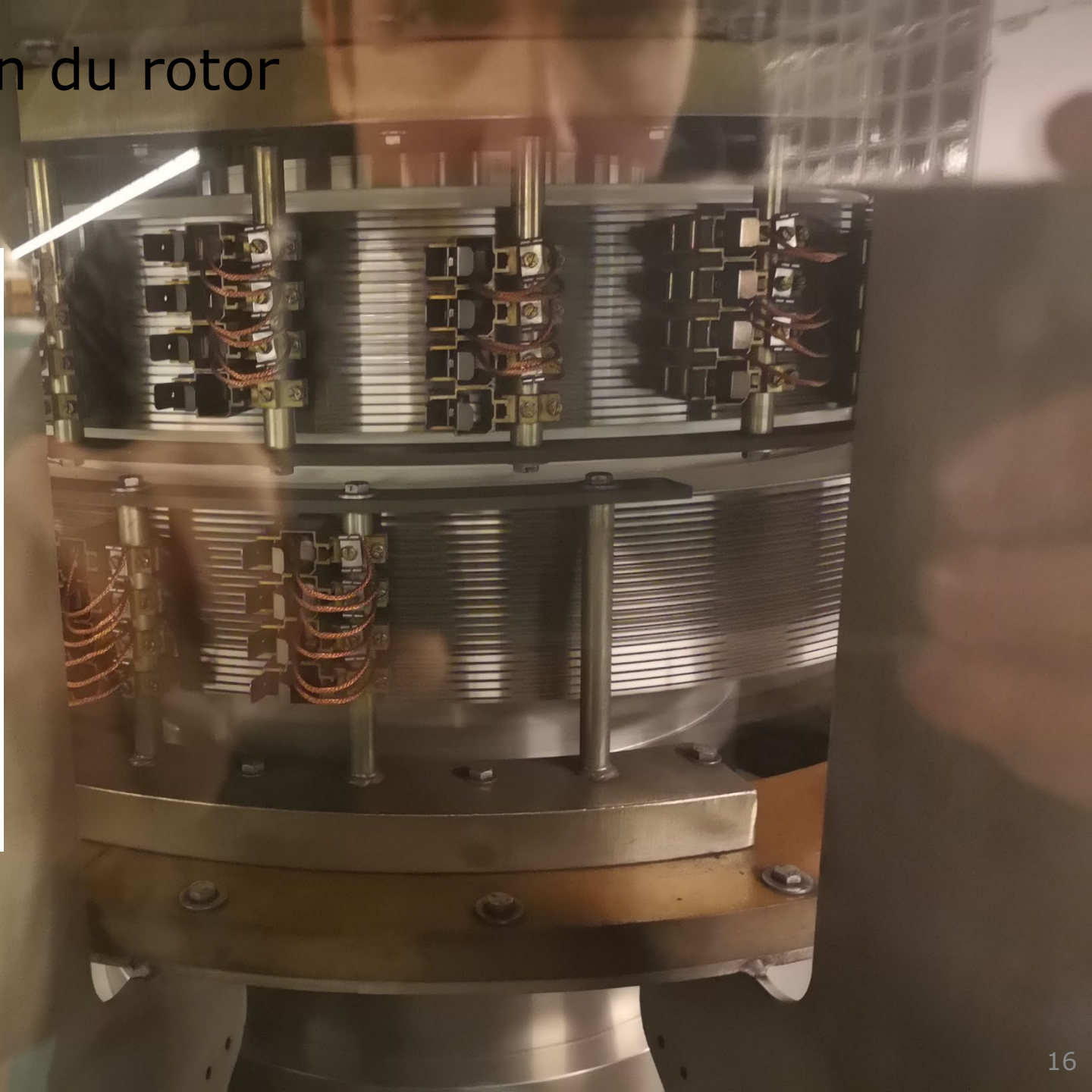
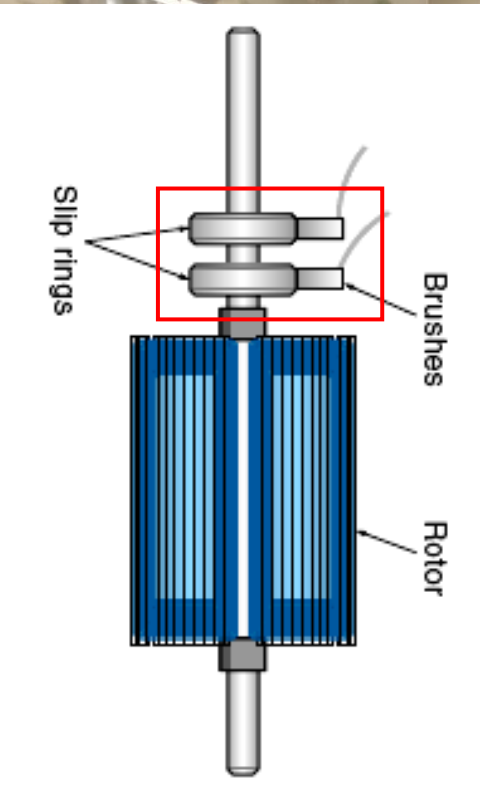


Source :
wikipedia
panoramik.ch⁴

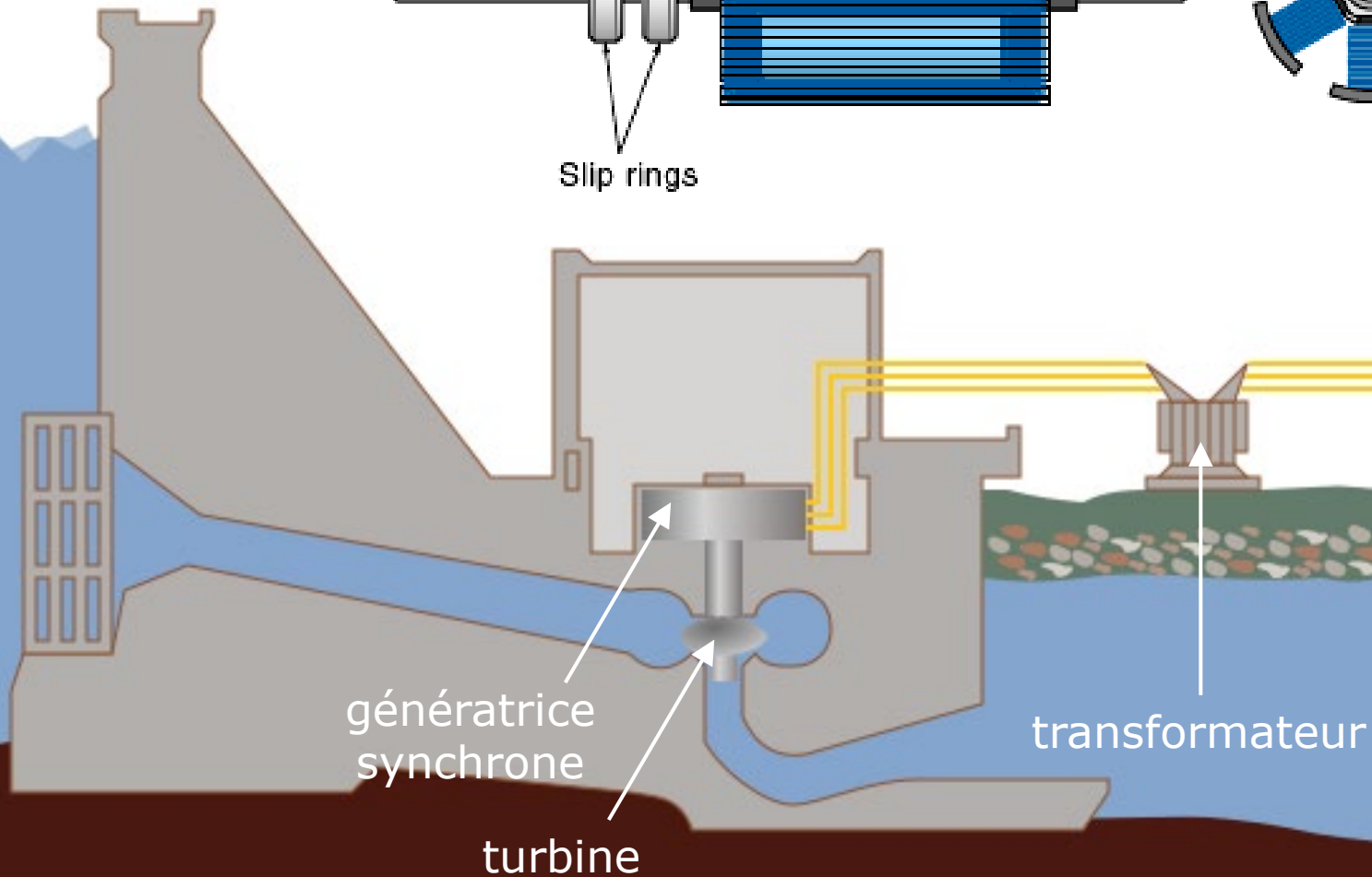
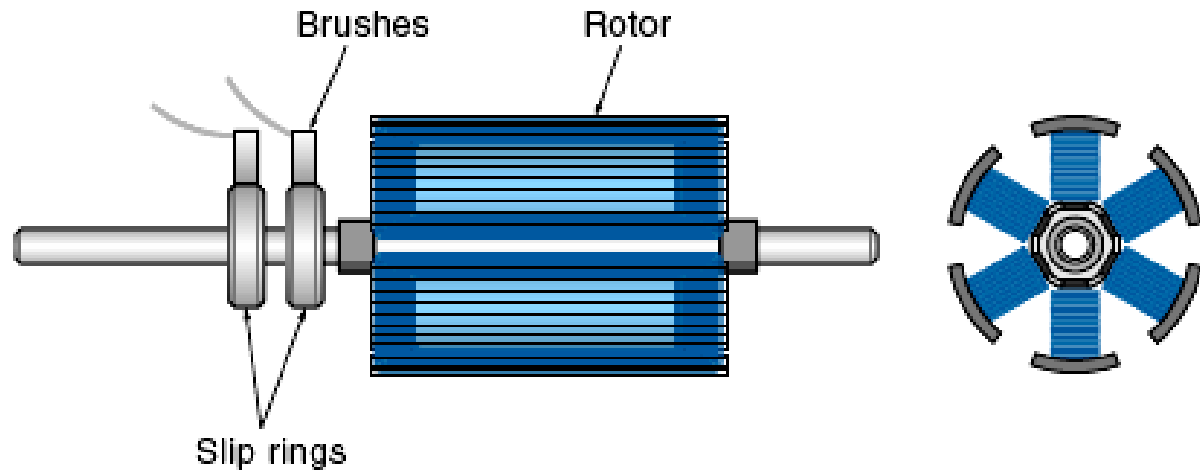
Excitation du rotor



Excitation du rotor



Centrale hydro-électrique – Mode génératrice

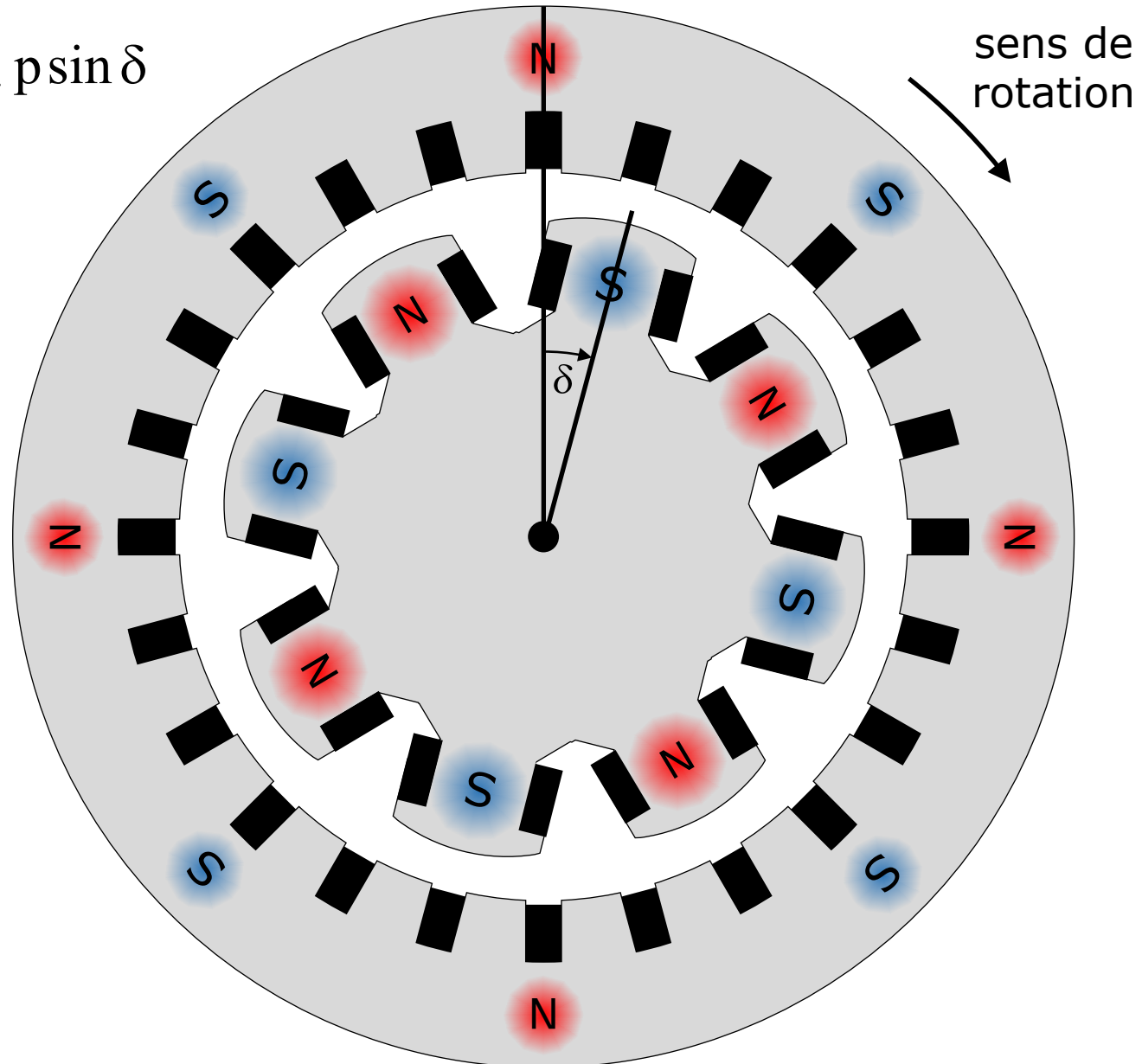


<https://www.swissgrid.ch/en/home/operation/grid-data/current-data.html>

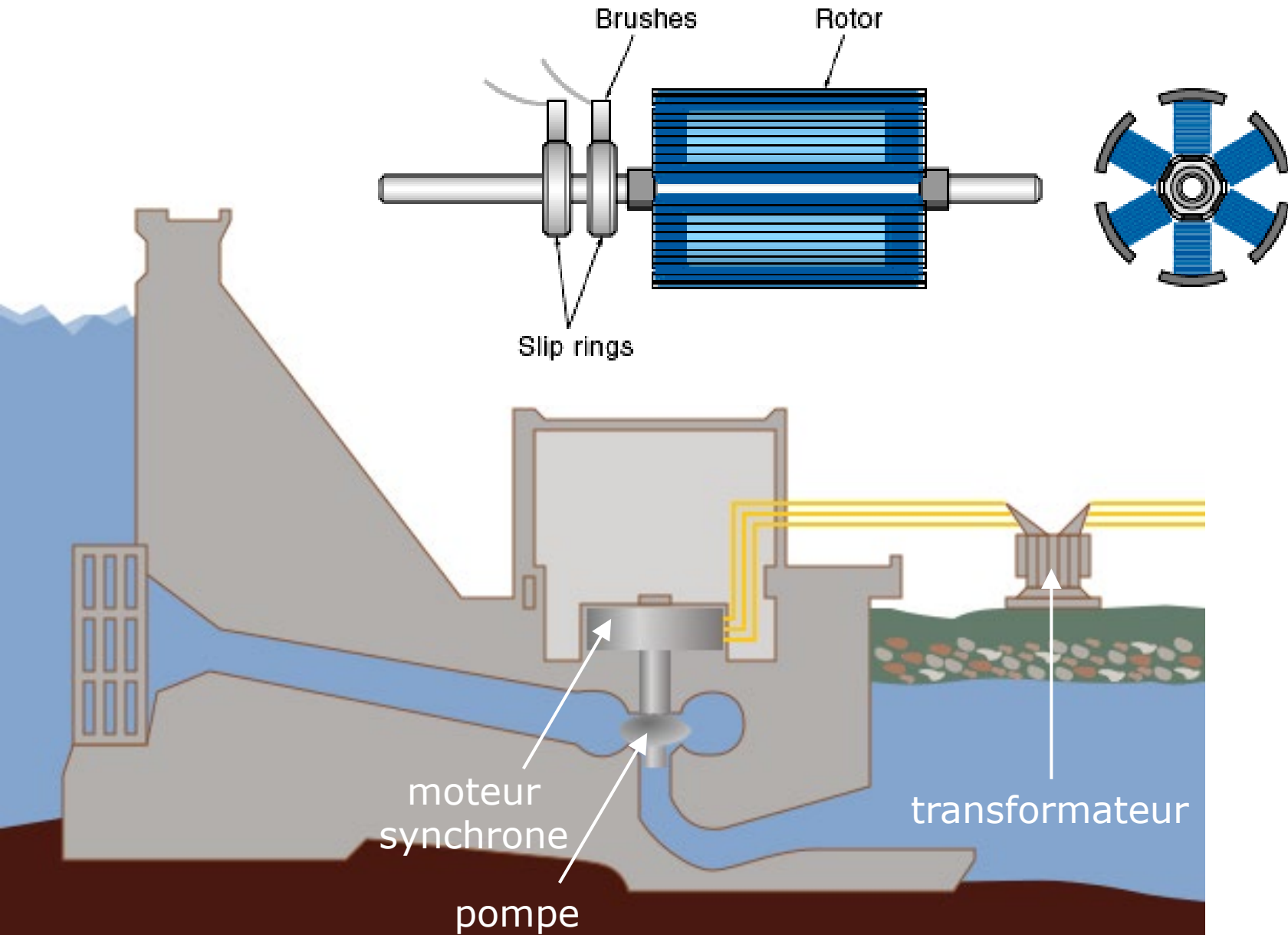
Modes de fonctionnement – Mode génératrice

Angle de charge

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



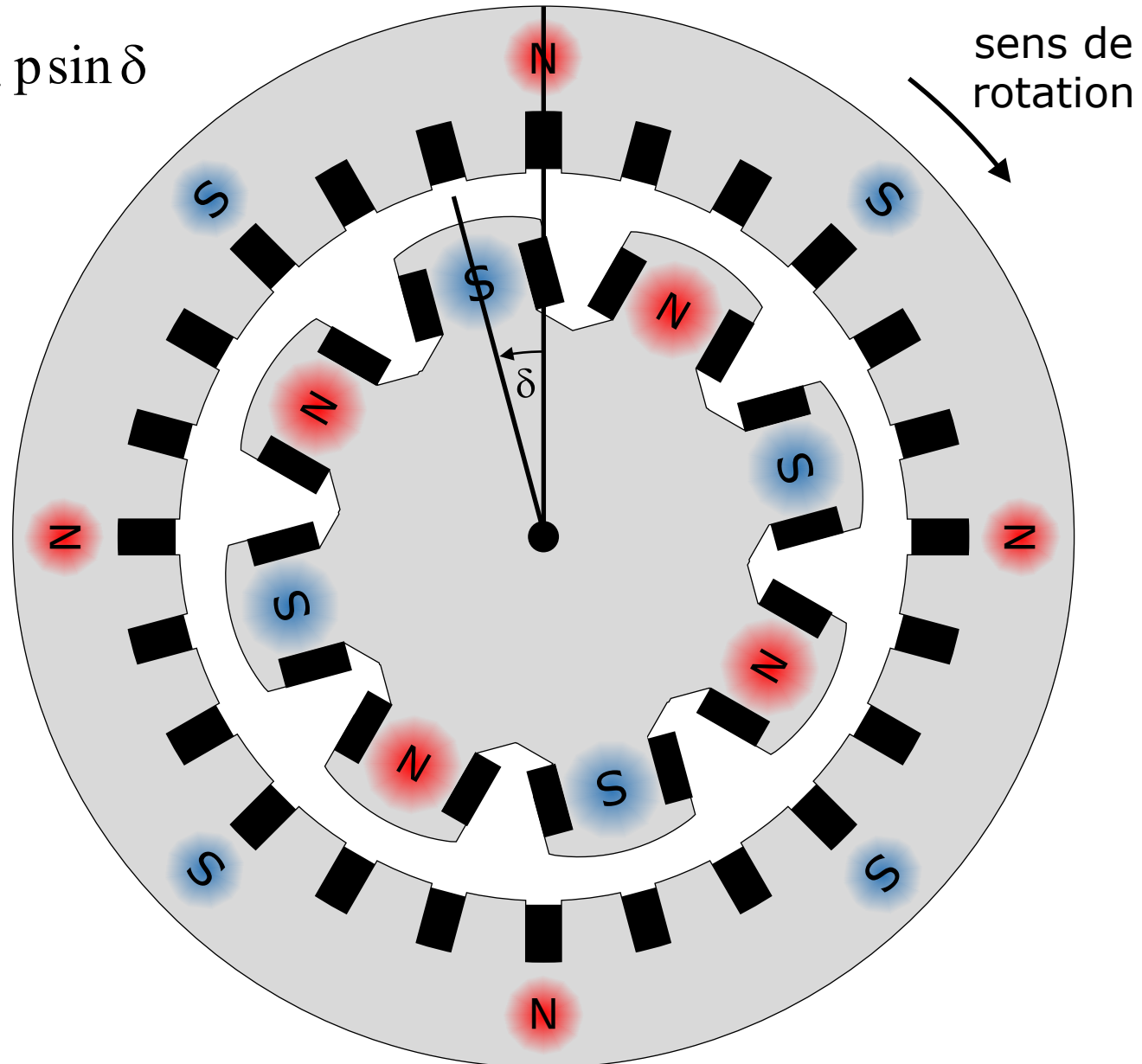
Centrale hydro-électrique – Mode moteur



Modes de fonctionnement – Mode moteur

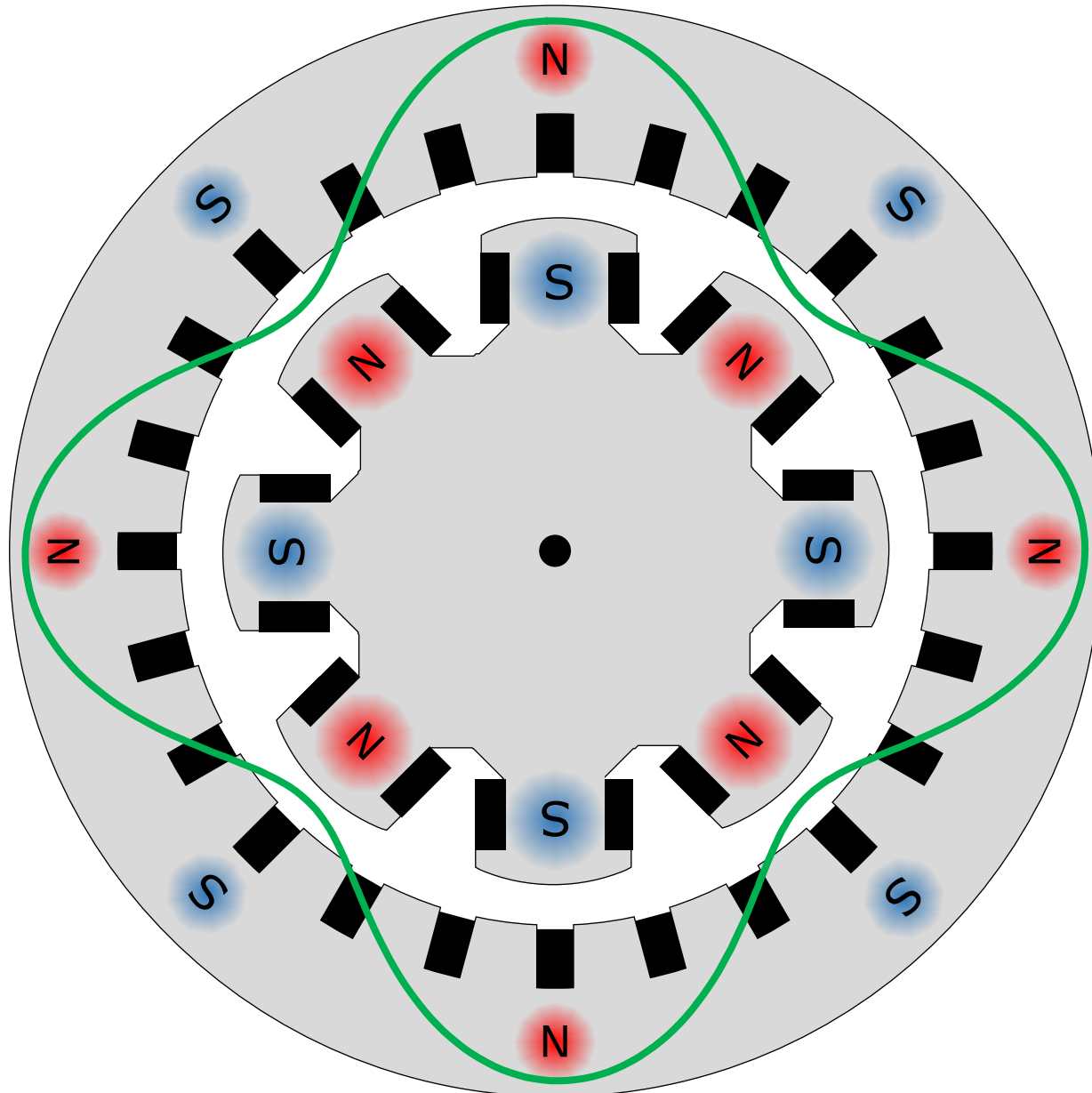
Angle de charge

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



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

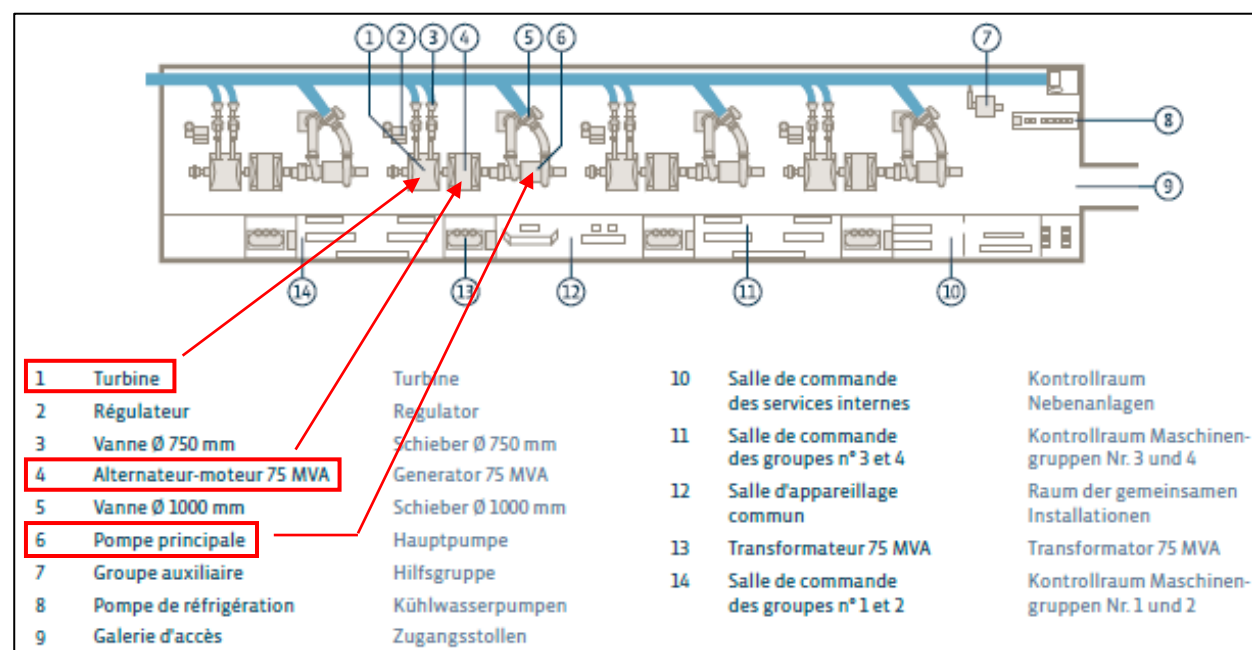
Bassin versant naturel et prises d'eau

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.

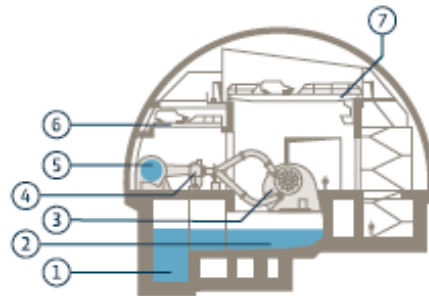
Forces motrices de Hongrin-Léman SA

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

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

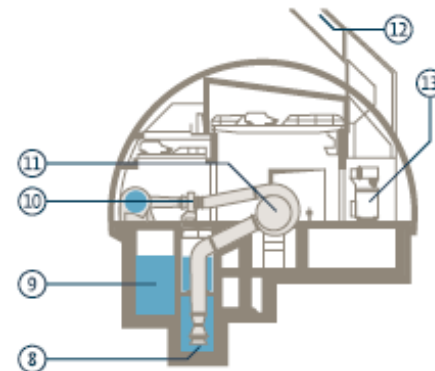


Coupe au droit d'une turbine
Querschnitt einer Turbine



- | | | |
|---|-------------------------|--------------------|
| 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

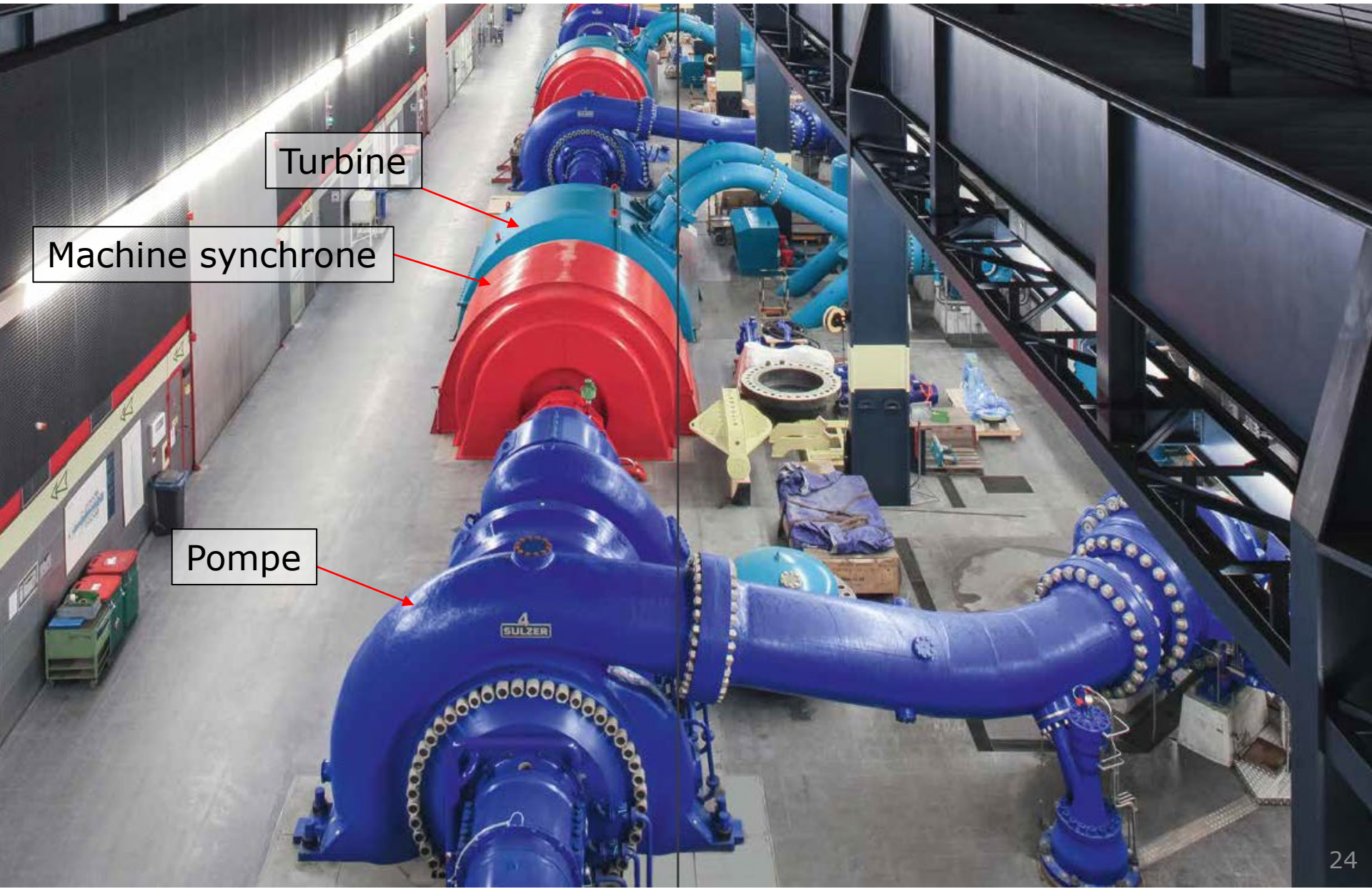


- | | | |
|----|----------------------------------|----------------------------|
| 8 | Fosse et pompe de mise en charge | Schacht mit Zubringerpumpe |
| 9 | Canal de fuite | Unterwasserkanal |
| 10 | Vanne de Ø 1000 mm | Schieber Ø 1000 mm |
| 11 | Pompe principale | Hauptpumpe |
| 12 | Puits des câbles 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 et types de machines synchrones
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
 - Equation de tension et schéma équivalent
 - Bilan de puissance et Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
 - Equation de tension
 - Caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau
- Le topogramme (diagramme des puissances)
 - Machine à pôles lisses
 - Machine à pôles saillants

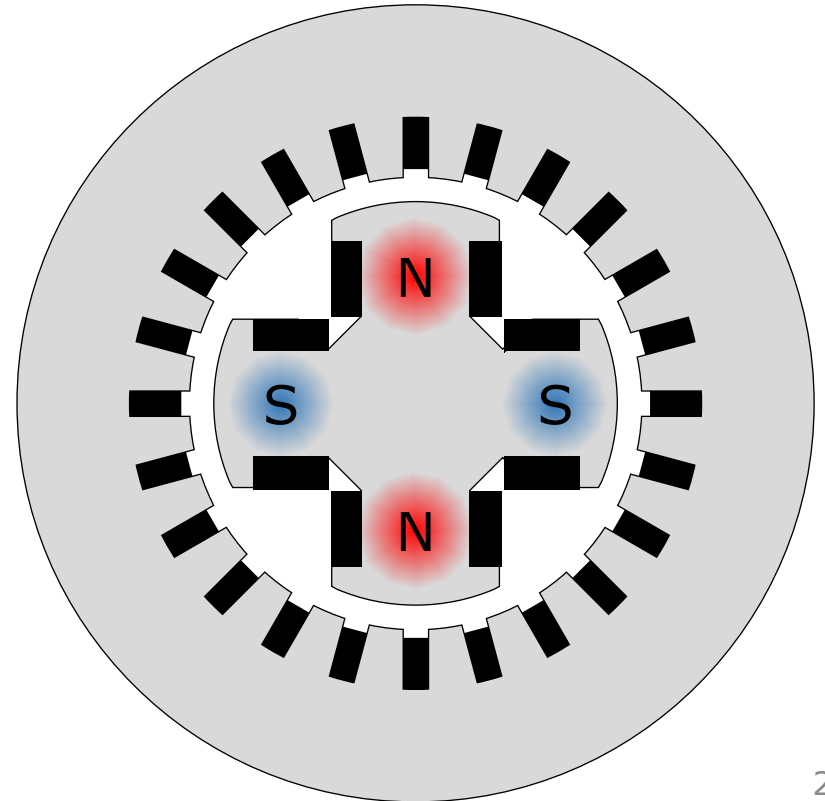
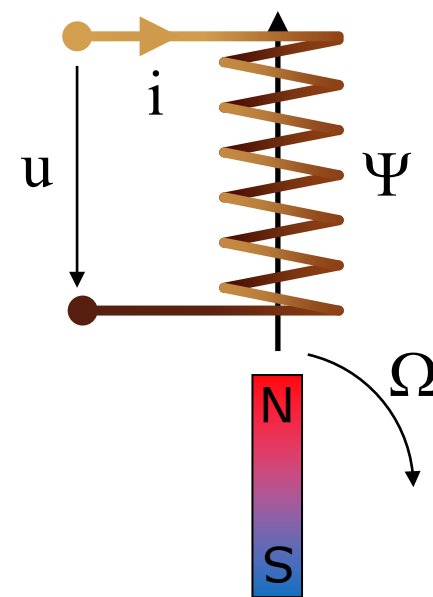
Tension induite généralisée

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

$$u = R i + \underbrace{L \frac{di}{dt}}_{\text{Tension induite de transformation}} + \underbrace{k_{\phi} \Omega}_{\text{Tension induite de mouvement}}$$

Tension induite de transformation

Tension induite de mouvement



Tension induite de mouvement

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

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

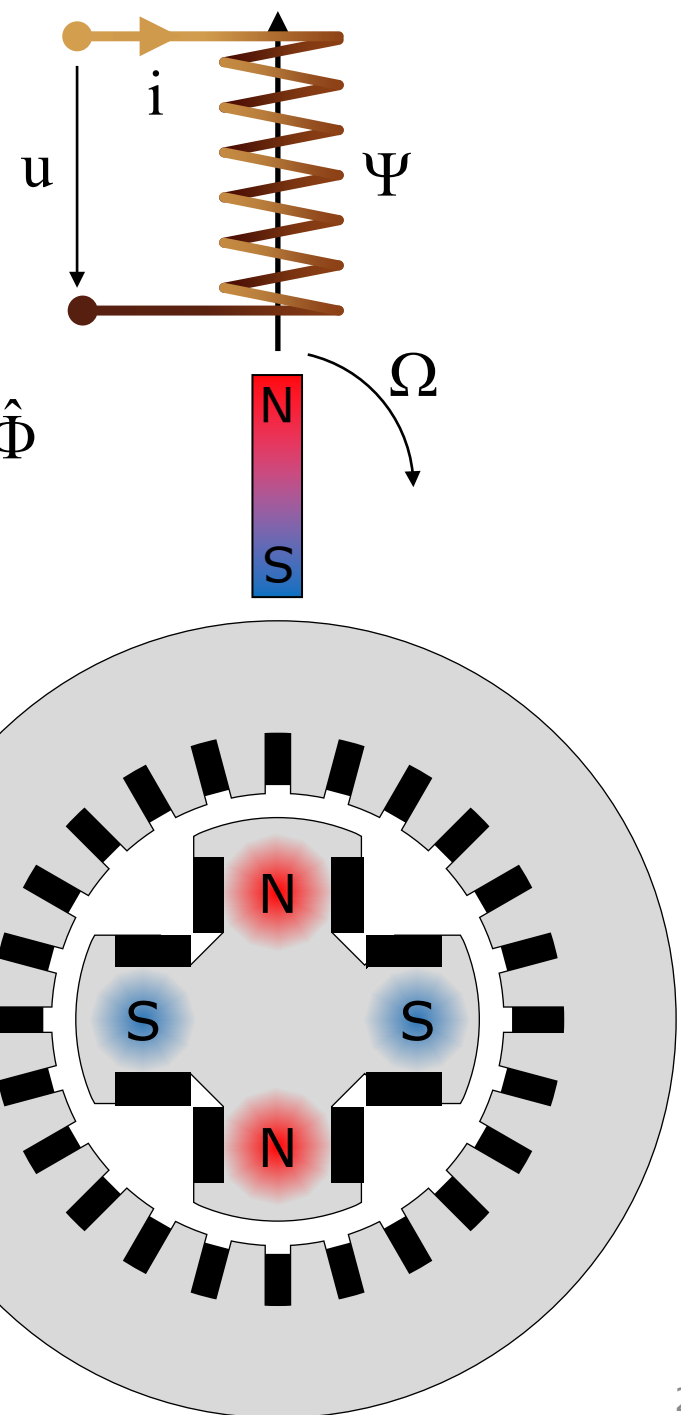
$$\Omega = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p} [\text{rad} / \text{s}]$$

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

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

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

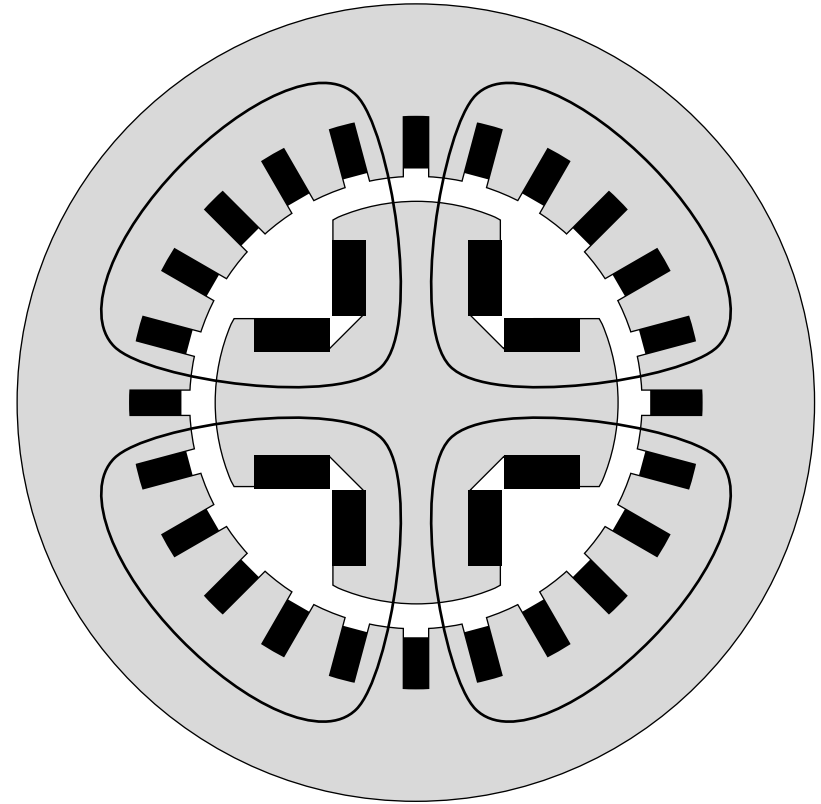
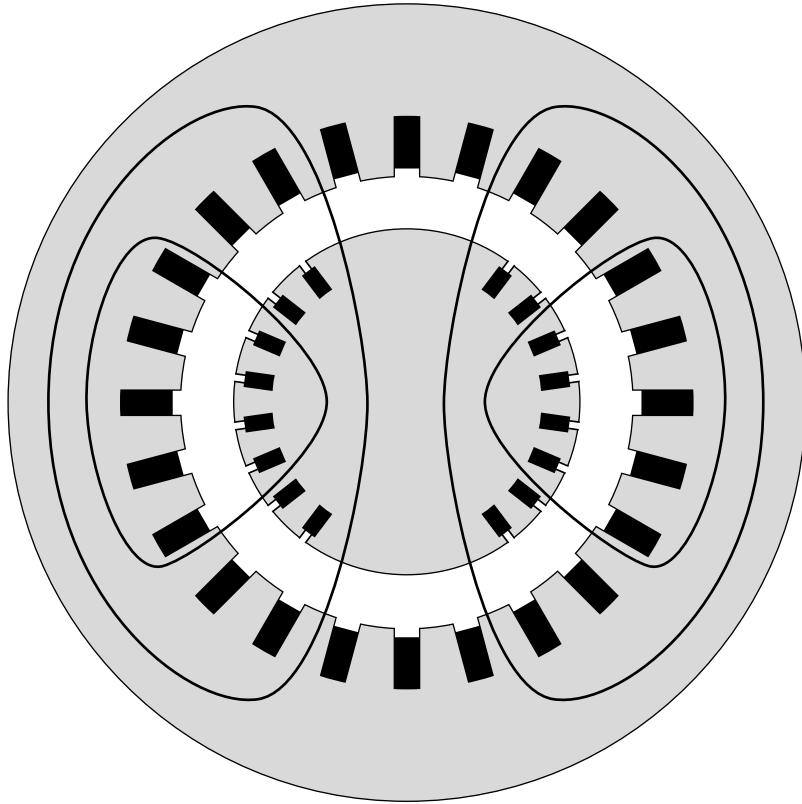
la tension induite de mouvement est proportionnelle à la vitesse de rotation et au courant d'excitation



Sommaire

- Principe de fonctionnement et types de machines synchrones
- Tension induite de mouvement
- **Machine à pôles lisses**
 - Equation de tension et schéma équivalent
 - Bilan de puissance et Caractéristique de couple
- **Machine à pôles saillants**
 - Equation de tension
 - Caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau
- Le topogramme (diagramme des puissances)
 - Machine à pôles lisses
 - Machine à pôles saillants

Excitation des machines à pôles lisses et à pôles saillants



$$U_f = R_f I_f$$

Sommaire

- Principe de fonctionnement et types de machines synchrones
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
 - Equation de tension et schéma équivalent
 - Bilan de puissance et Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
 - Equation de tension
 - Caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau
- Le topogramme (diagramme des puissances)
 - Machine à pôles lisses
 - Machine à pôles saillants

Equation de tension et schéma équivalent

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

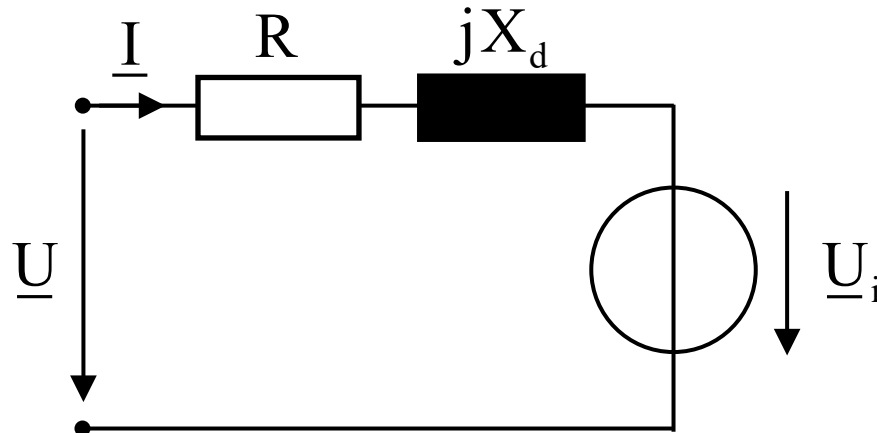
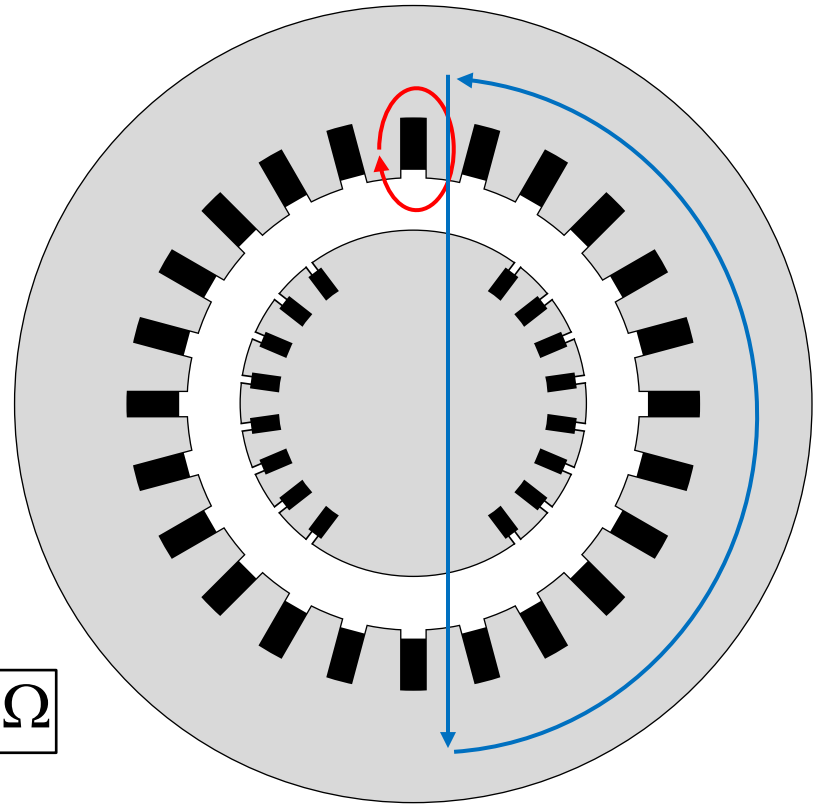
$$\frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + u_i$$

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

$$X_d = X_\sigma + X_h$$

tension induite
de mouvement

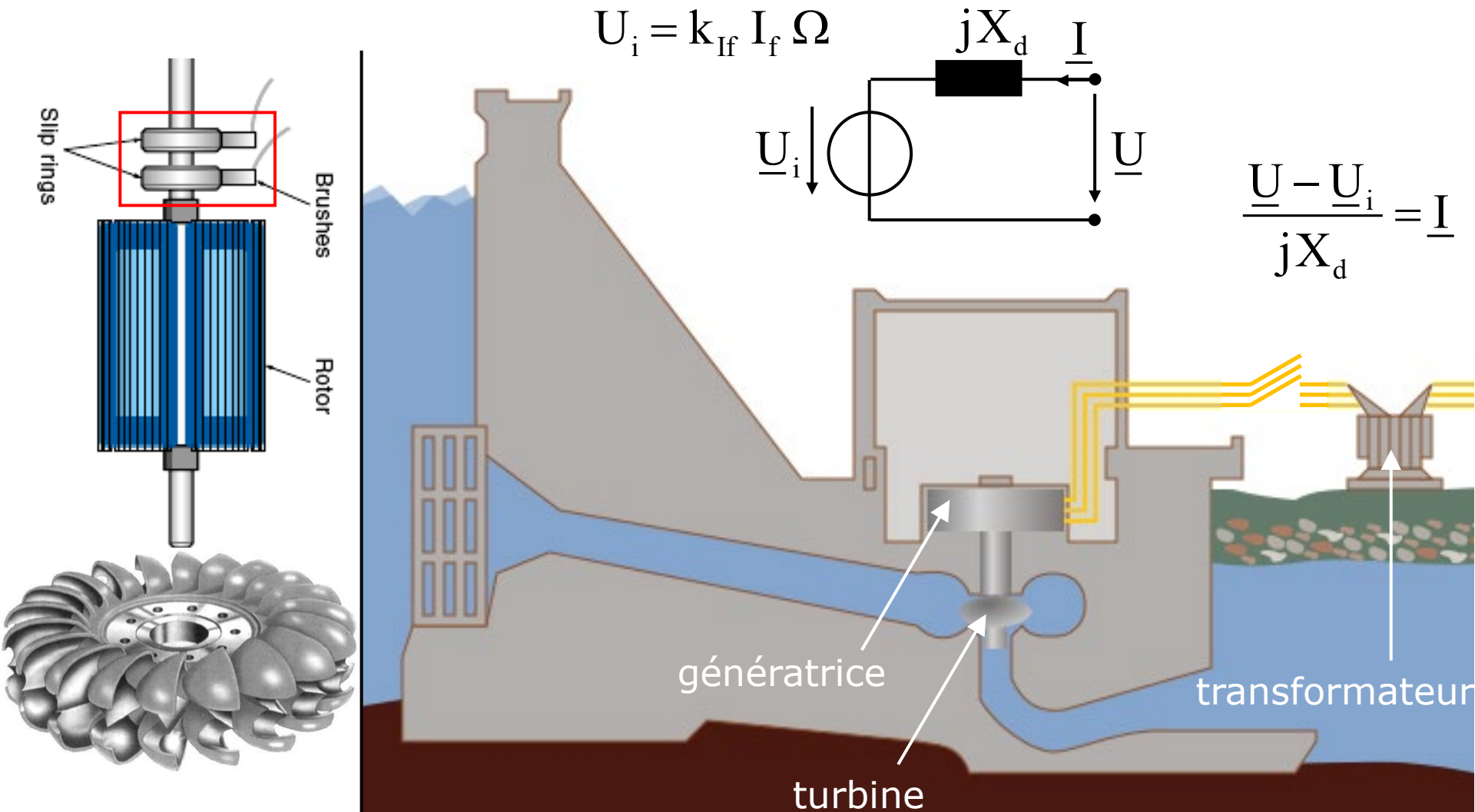
$$U_i = k_\phi \Omega = k_{If} I_f \Omega$$



dans la moyenne et
grande puissance R
est souvent négligée

$$R \ll X_d$$

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

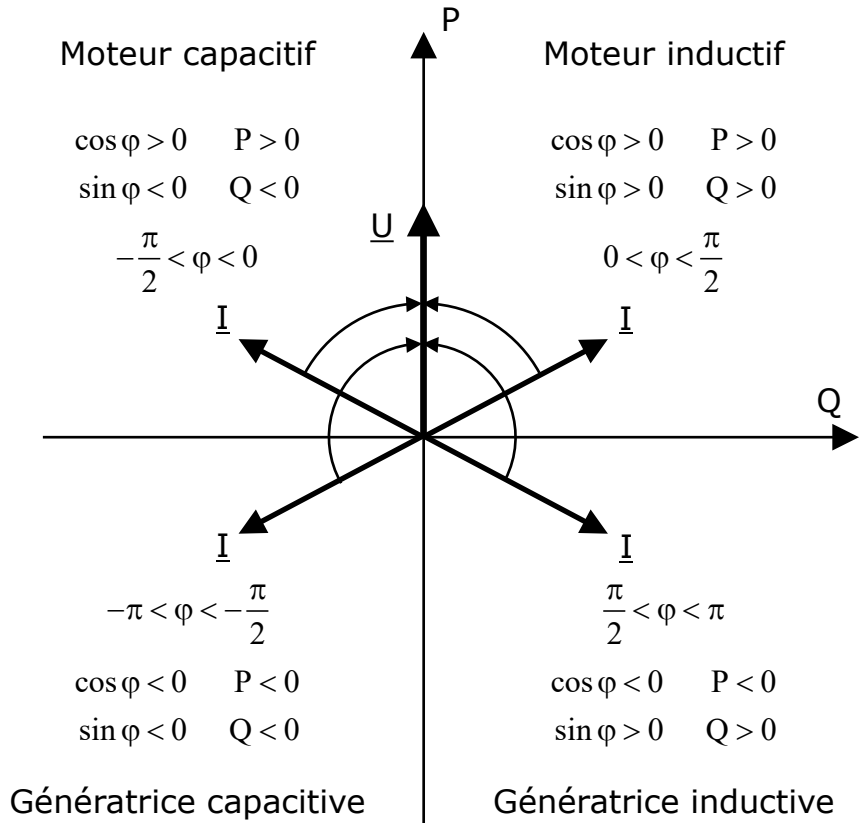
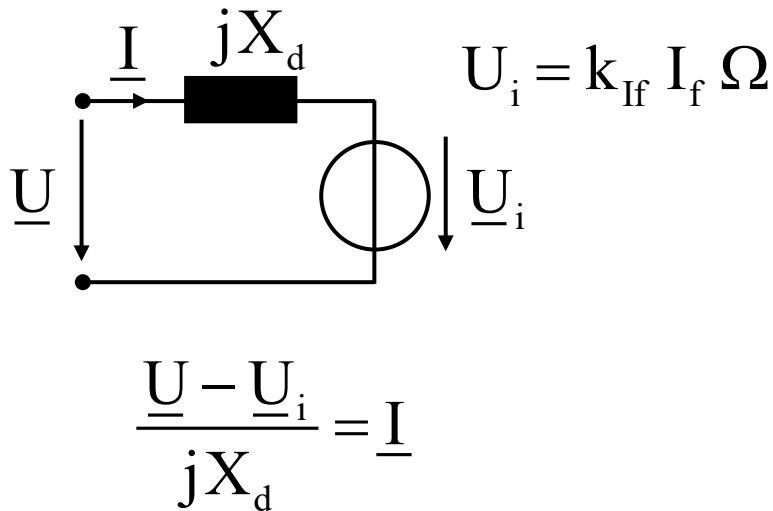


Puissances triphasées

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]



Sommaire

- Principe de fonctionnement et types de machines synchrones
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
 - Equation de tension et schéma équivalent
 - Bilan de puissance et Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
 - Equation de tension
 - Caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau
- Le topogramme (diagramme des puissances)
 - Machine à pôles lisses
 - Machine à pôles saillants

Bilan de puissance et Couple électromagnétique

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

$$P_j = 3 R I^2$$

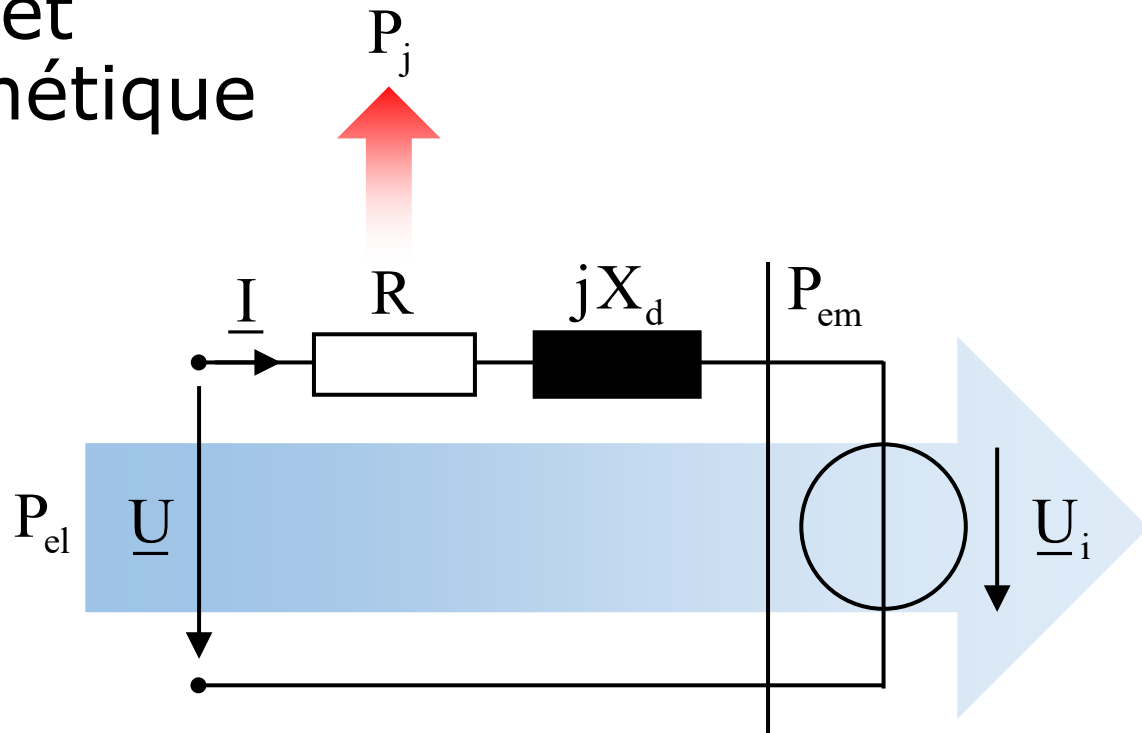
$$P_{em} = T_{em} \Omega_s$$

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

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

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

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

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

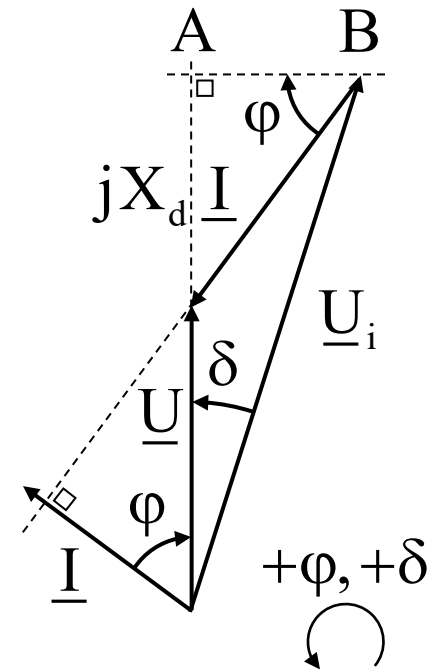
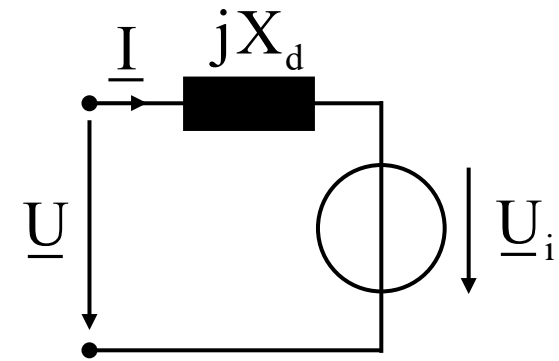
$$U = X_d I (\sin \varphi + j \cos \varphi) + U_i (\cos \delta - j \sin \delta)$$

les parties imaginaires doivent s'annuler car U est réel

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

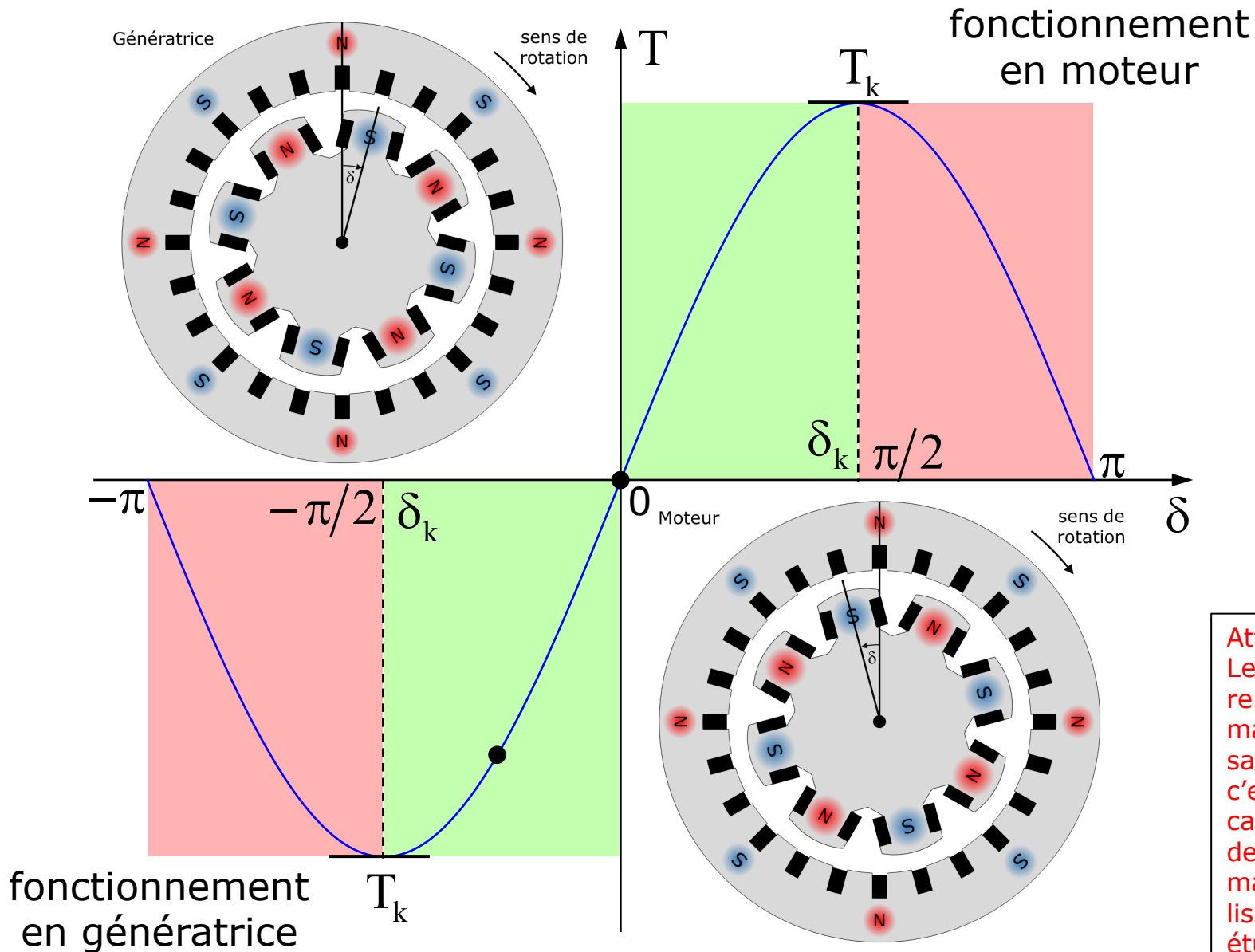
$$P_{em} = T_{em} \Omega_s = 3 U I \cos \varphi = 3 \frac{U U_i}{X_d} \sin \delta$$

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



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 et types de machines synchrones
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
 - Equation de tension et schéma équivalent
 - Bilan de puissance et Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
 - Equation de tension
 - Caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau
- Le topogramme (diagramme des puissances)
 - Machine à pôles lisses
 - Machine à pôles saillants

Equation de tension et schéma équivalent

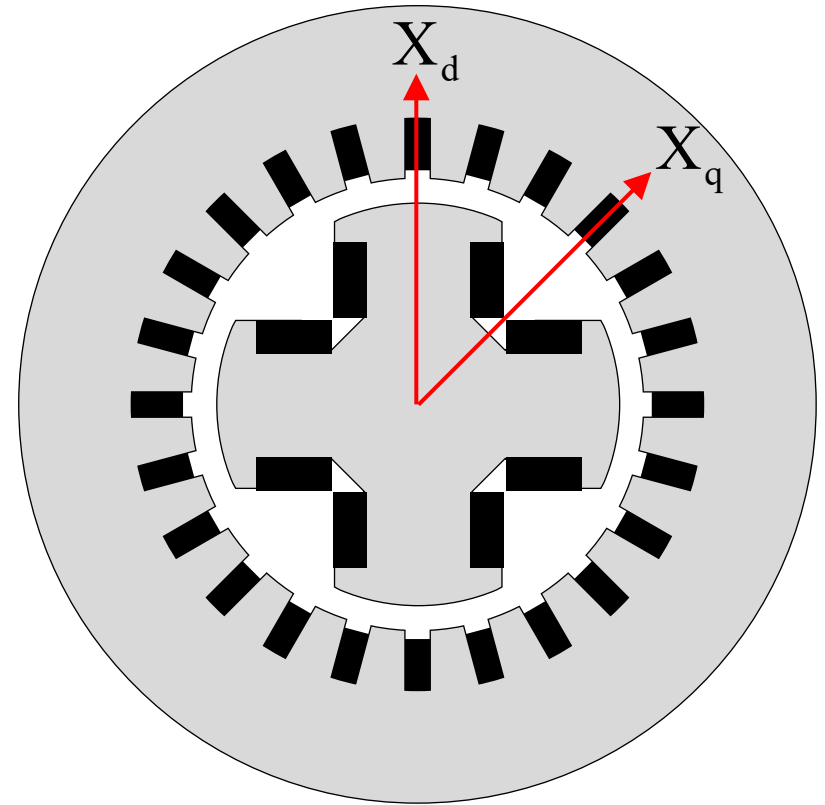
$$\underline{U} = R_s \underline{I} + \frac{d\underline{\Psi}}{dt}$$

Il n'est donc pas possible d'établir un schéma équivalent par phase de la machine synchrone à pôles saillants !

Modèle de Park

$$\begin{cases} U_d = R_s I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_m \Psi_q \\ U_q = R_s I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_m \Psi_d \end{cases}$$

Ici la notation complexe sert à combiner les 2 axes !



$$\underline{U} = R \underline{I} + jX_d I_d - X_q I_q + \underline{U}_i$$

$$X_d = X_\sigma + X_{ad}$$

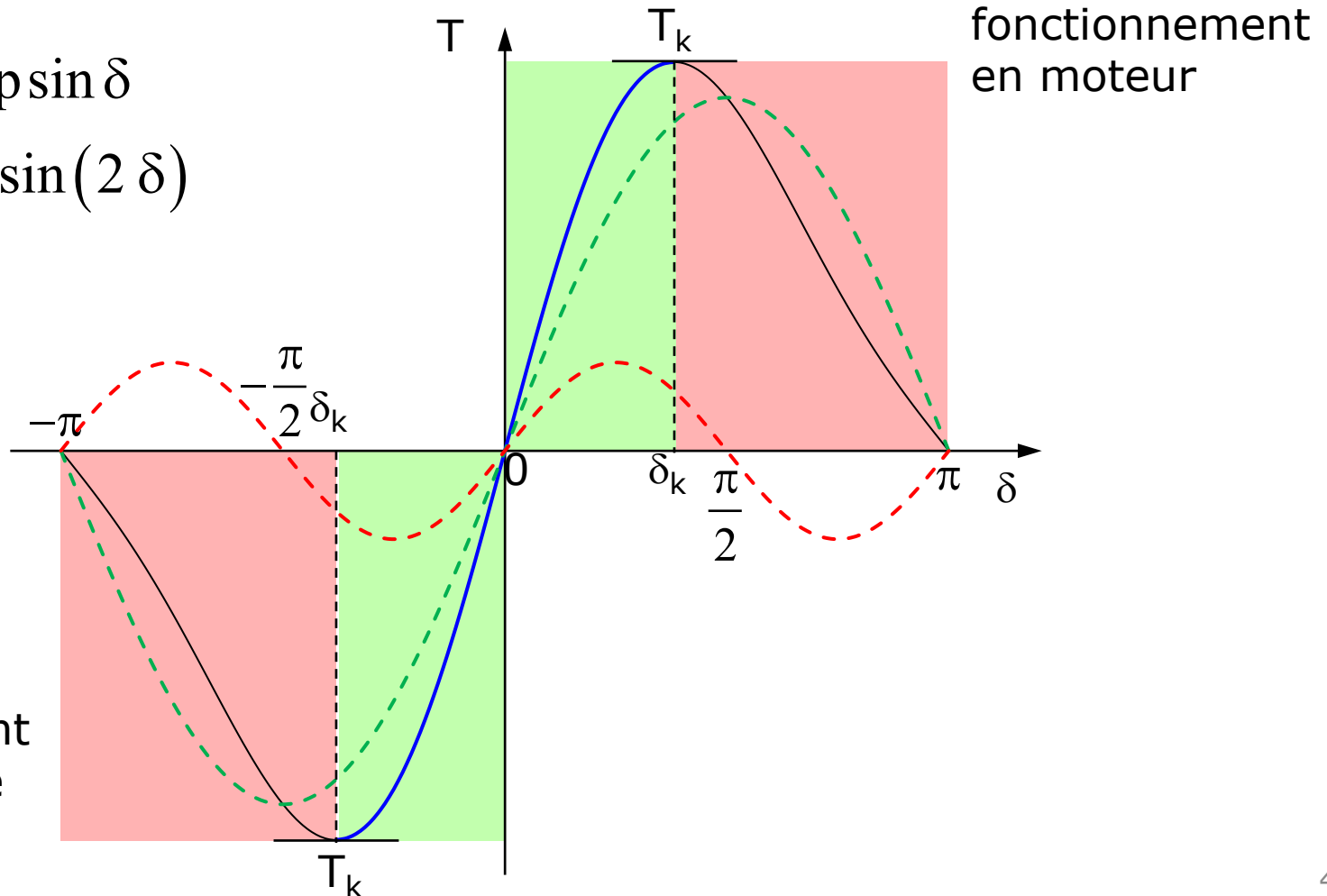
$$X_q = X_\sigma + X_{aq}$$

Caractéristique de couple

$$T_{em} = \frac{3}{2 \pi n_s} \left[\frac{U U_i \sin \delta}{X_d} + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right]$$

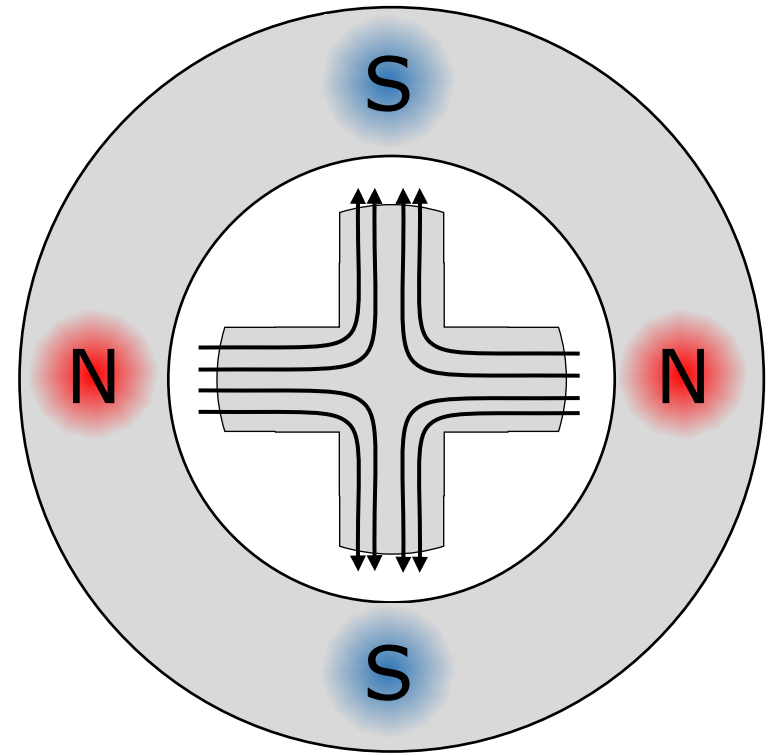
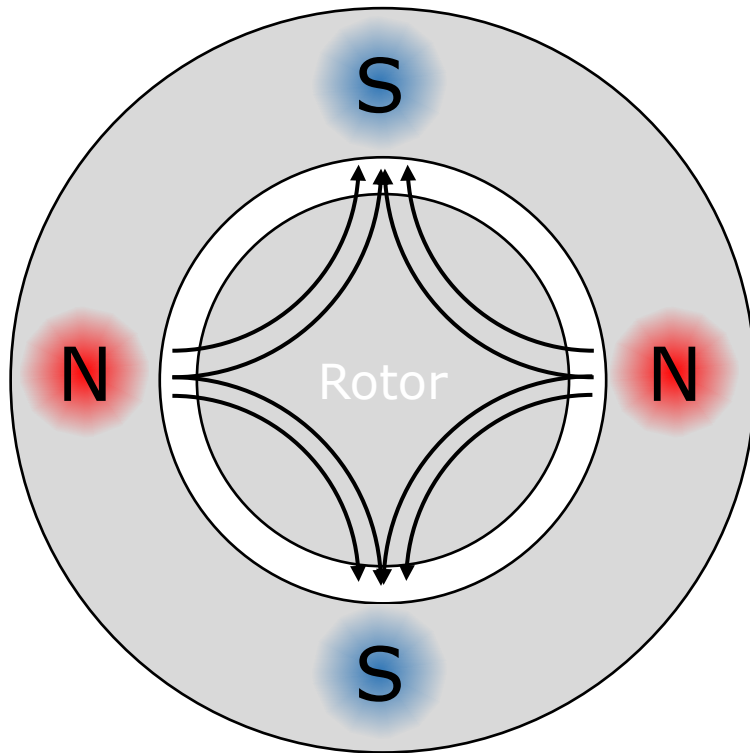
$$T_{em} = k \hat{B}_s \hat{B}_r p \sin \delta$$

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

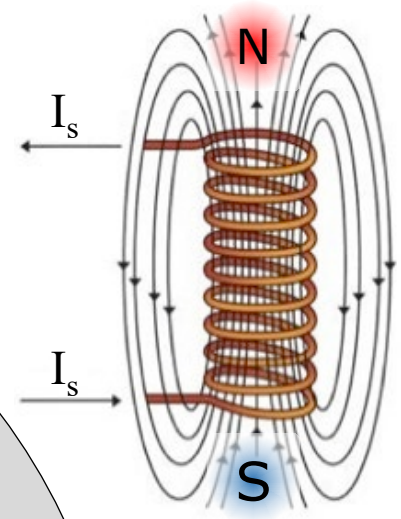
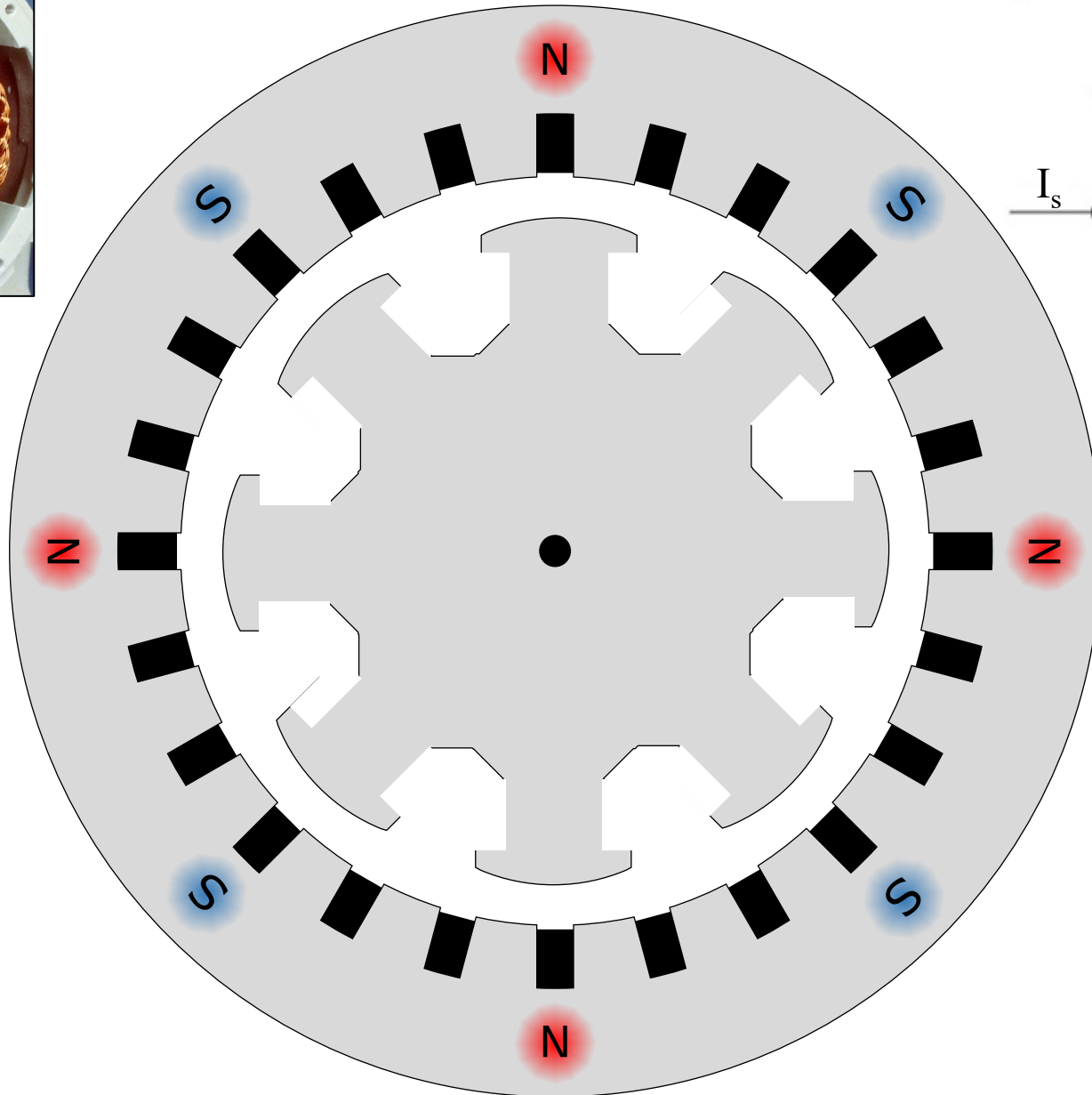
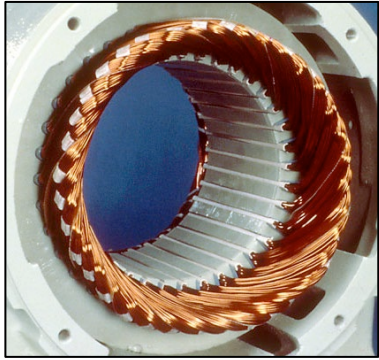


Couple réluctant (éléments de base)

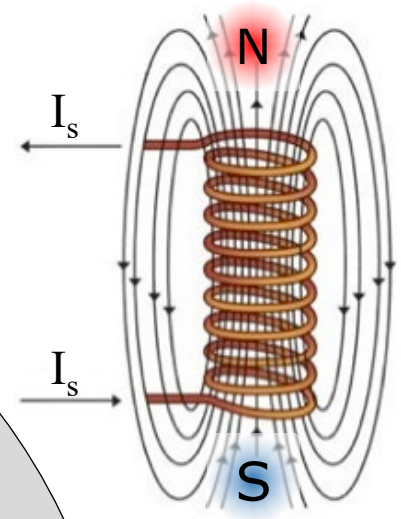
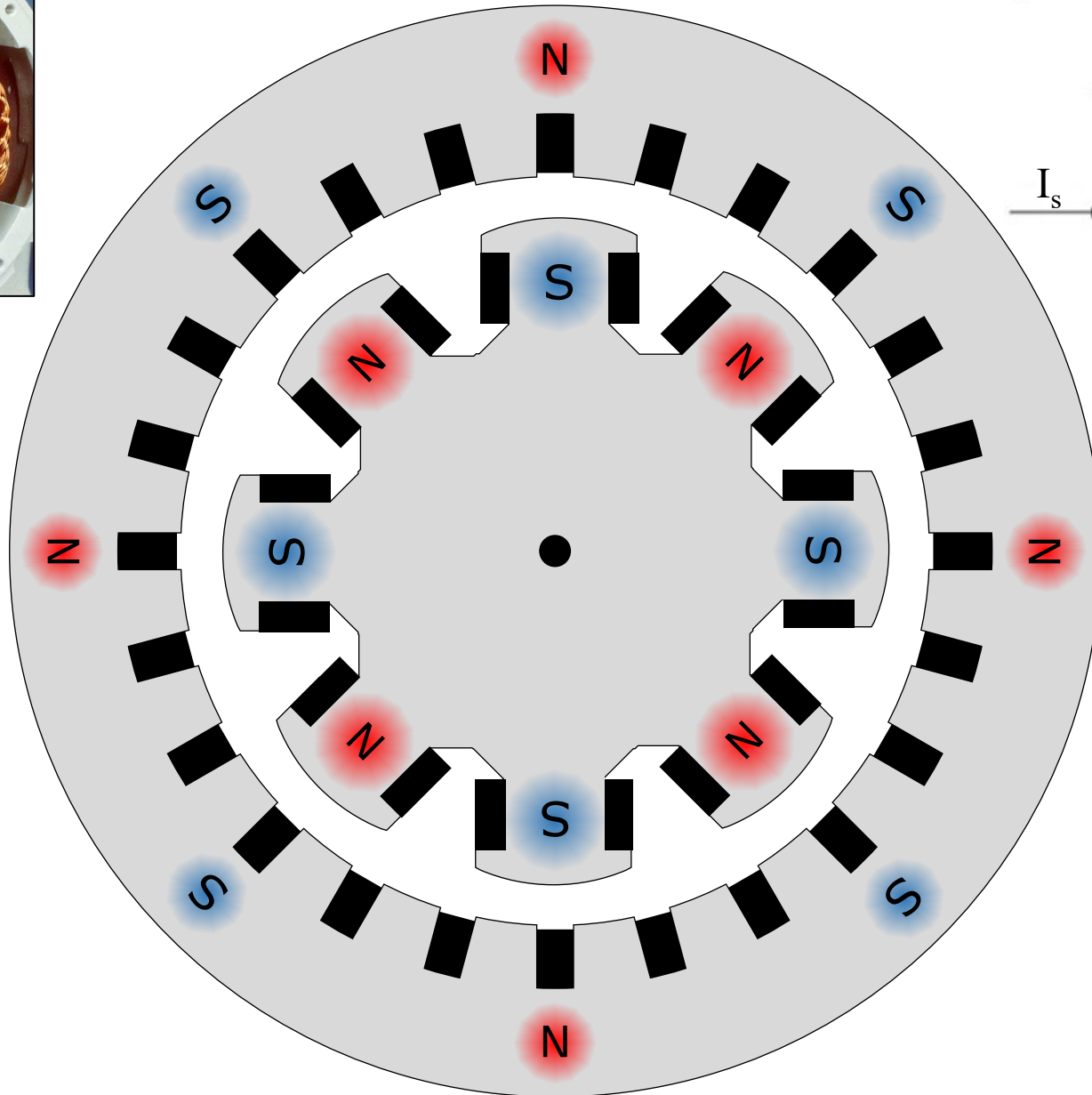
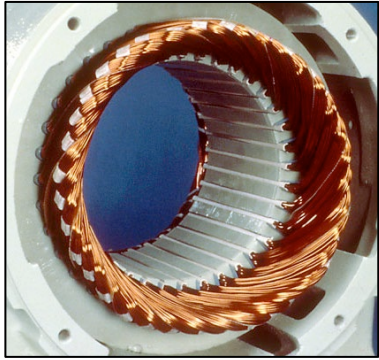
Action d'un champ magnétique sur une structure à réluctance variable



Couple réluctant (éléments de base)



Machine synchrone à pôles saillants

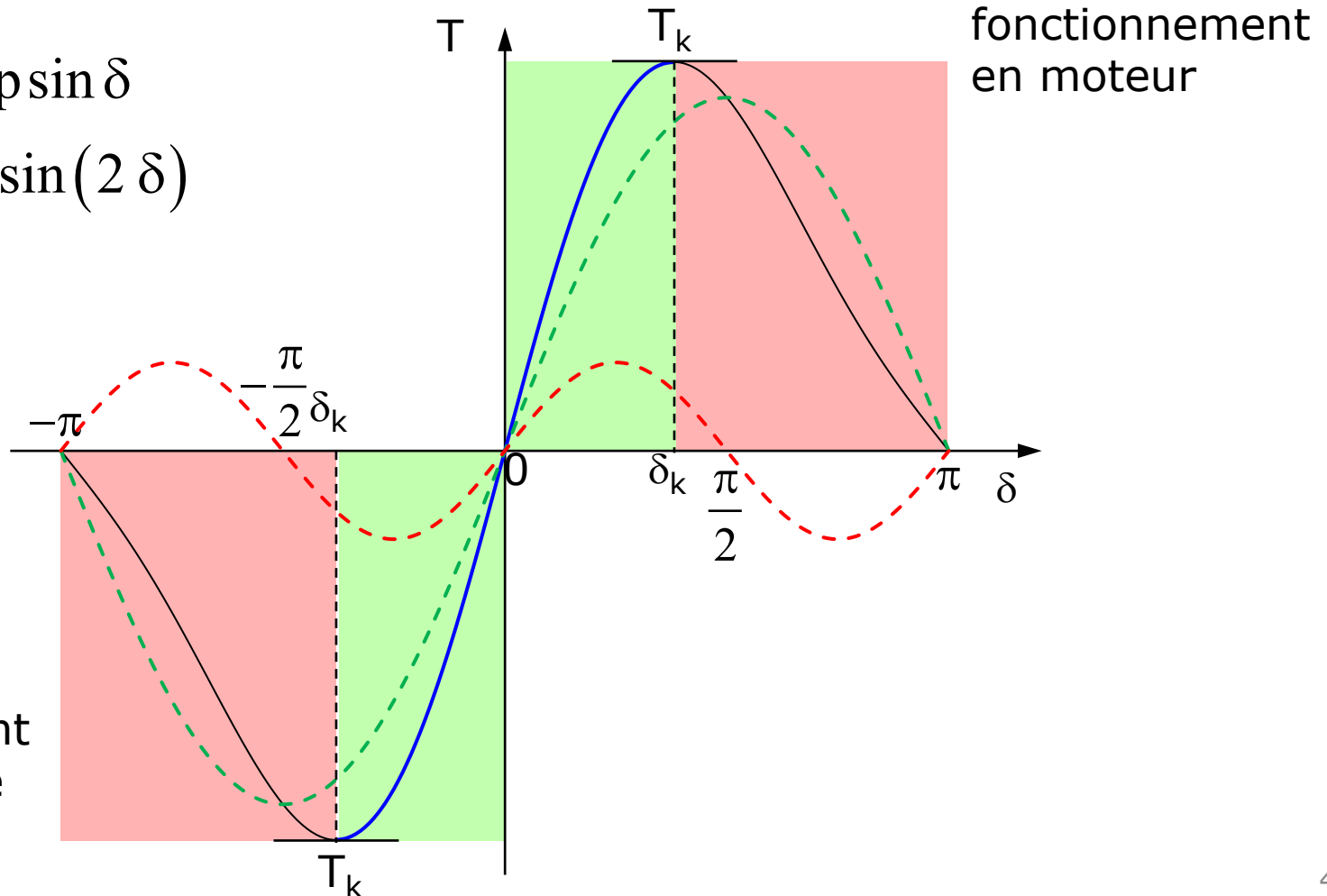


Caractéristique de couple

$$T_{\text{em}} = \frac{3}{2 \pi n_s} \left[\frac{U U_i \sin \delta}{X_d} + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right]$$

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

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



Sommaire

- Principe de fonctionnement et types de machines synchrones
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
 - Equation de tension et schéma équivalent
 - Bilan de puissance et Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
 - Equation de tension
 - Caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau
- Le topogramme (diagramme des puissances)
 - Machine à pôles lisses
 - Machine à pôles saillants

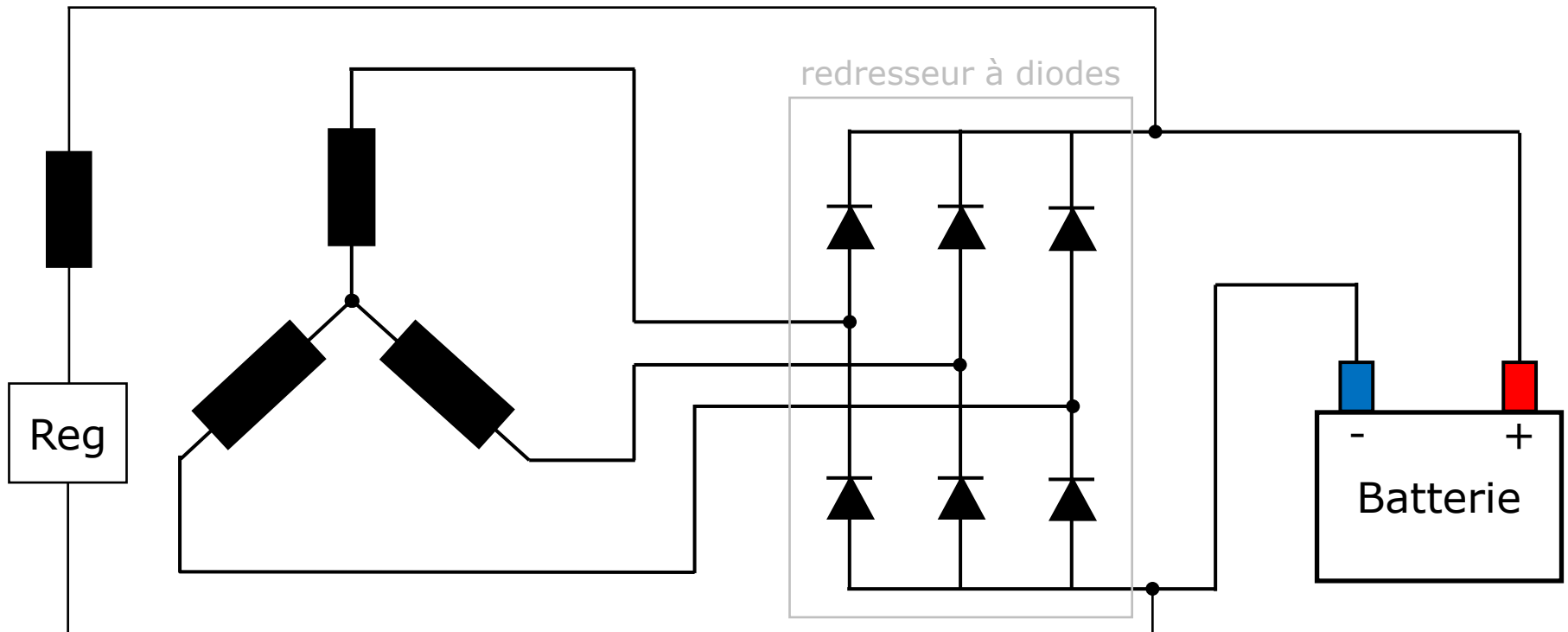
Alternateur de voiture

$$14.1V_{DC}$$

$$3 \sim \rightarrow DC$$

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

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



Sommaire

- Principe de fonctionnement et types de machines synchrones
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
 - Equation de tension et schéma équivalent
 - Bilan de puissance et Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
 - Equation de tension
 - Caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau
- Le topogramme (diagramme des puissances)
 - Machine à pôles lisses
 - Machine à pôles saillants

Groupe électrogène



Moteur diesel



Génératrice synchrone



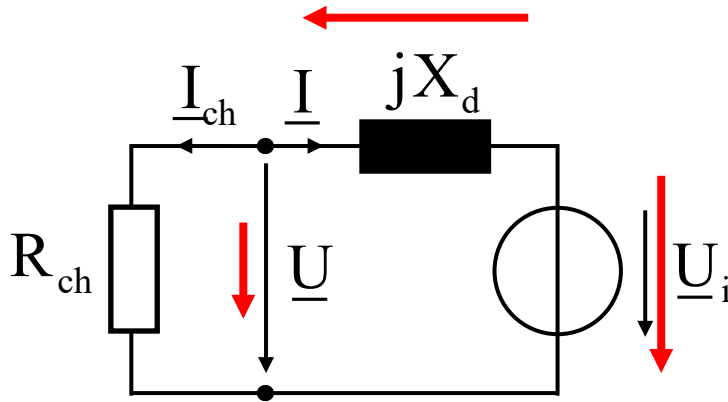
GROUPE ÉLECTROGÈNE TRIPHASÉ
21KVA MOTEUR DIESEL 1500T/MN

Groupe électrogène super insonorisé
51 dB(A)

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

Groupe électrogène

Génératrice synchrone



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

GROUPE ÉLECTROGÈNE TRIPHASÉ
21KVA MOTEUR DIESEL 1500T/MN

Groupe électrogène super insonorisé
51 dB(A)

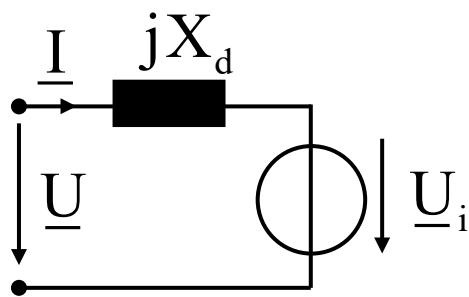
Moteur diesel 1500 tr/min 4 cylindres,
refroidit par eau

Sommaire

- Principe de fonctionnement et types de machines synchrones
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
 - Equation de tension et schéma équivalent
 - Bilan de puissance et Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
 - Equation de tension
 - Caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau
- Le topogramme (diagramme des puissances)
 - Machine à pôles lisses
 - Machine à pôles saillants

Synchronisation au réseau

Exemple : centrale hydro-électrique



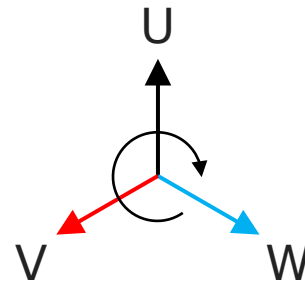
$$\underline{U}_i = k_{If} I_f \Omega \rightarrow \Omega = \text{cste}$$

Correspond à la position mécanique du rotor !

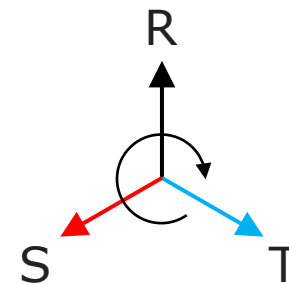
I_{f0} = courant d'excitation à vide.

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

génératrice



réseau



Conditions

- Vitesse
- Amplitude
- Phase
- Sens

génératrice

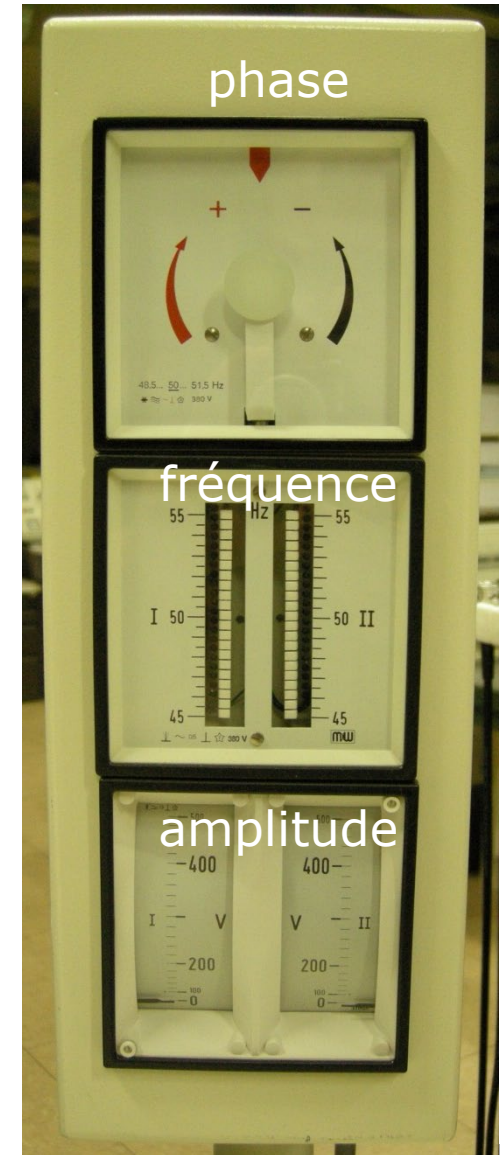
turbine

transformateur

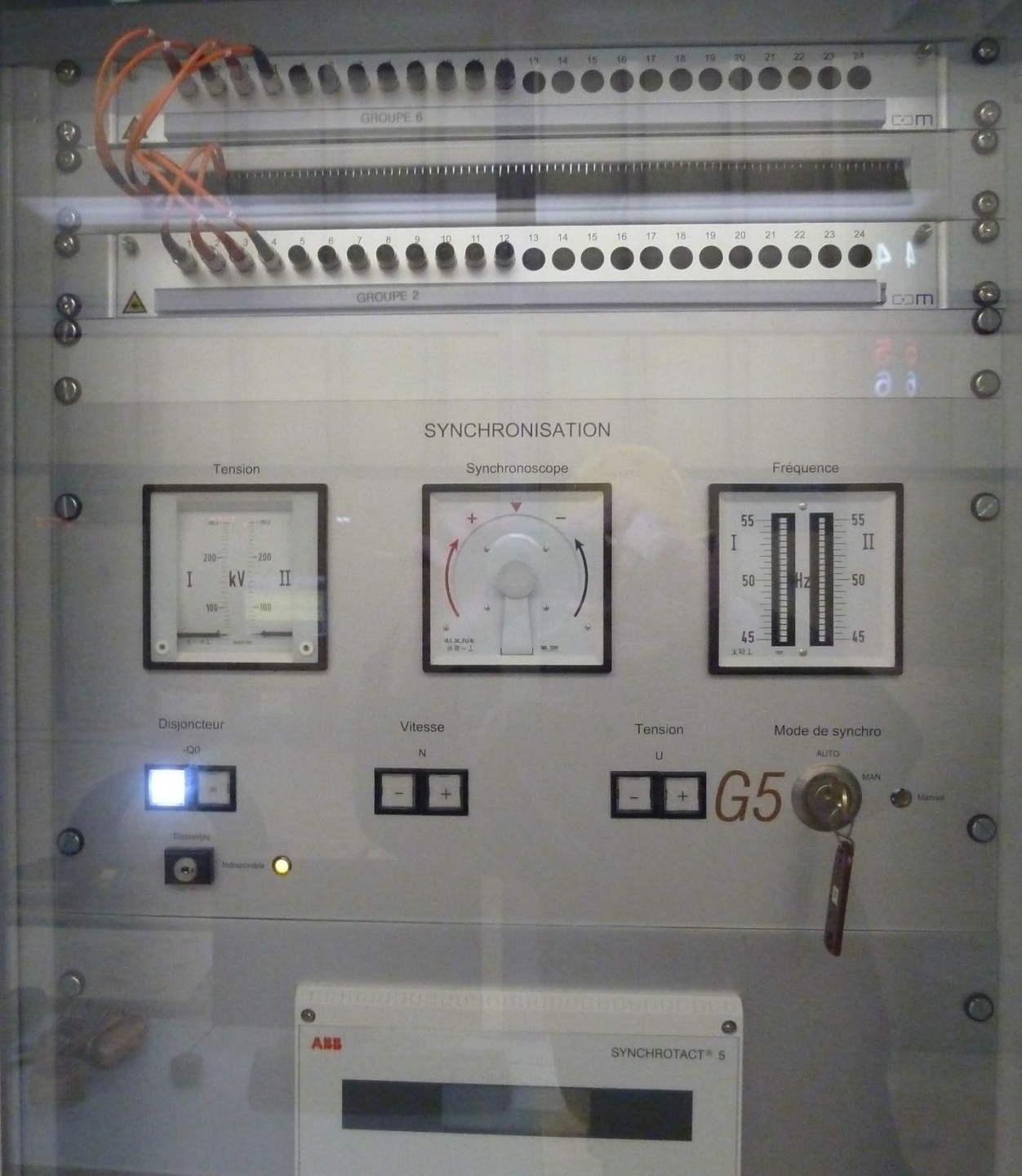
Synchronisation au réseau

Conditions :

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



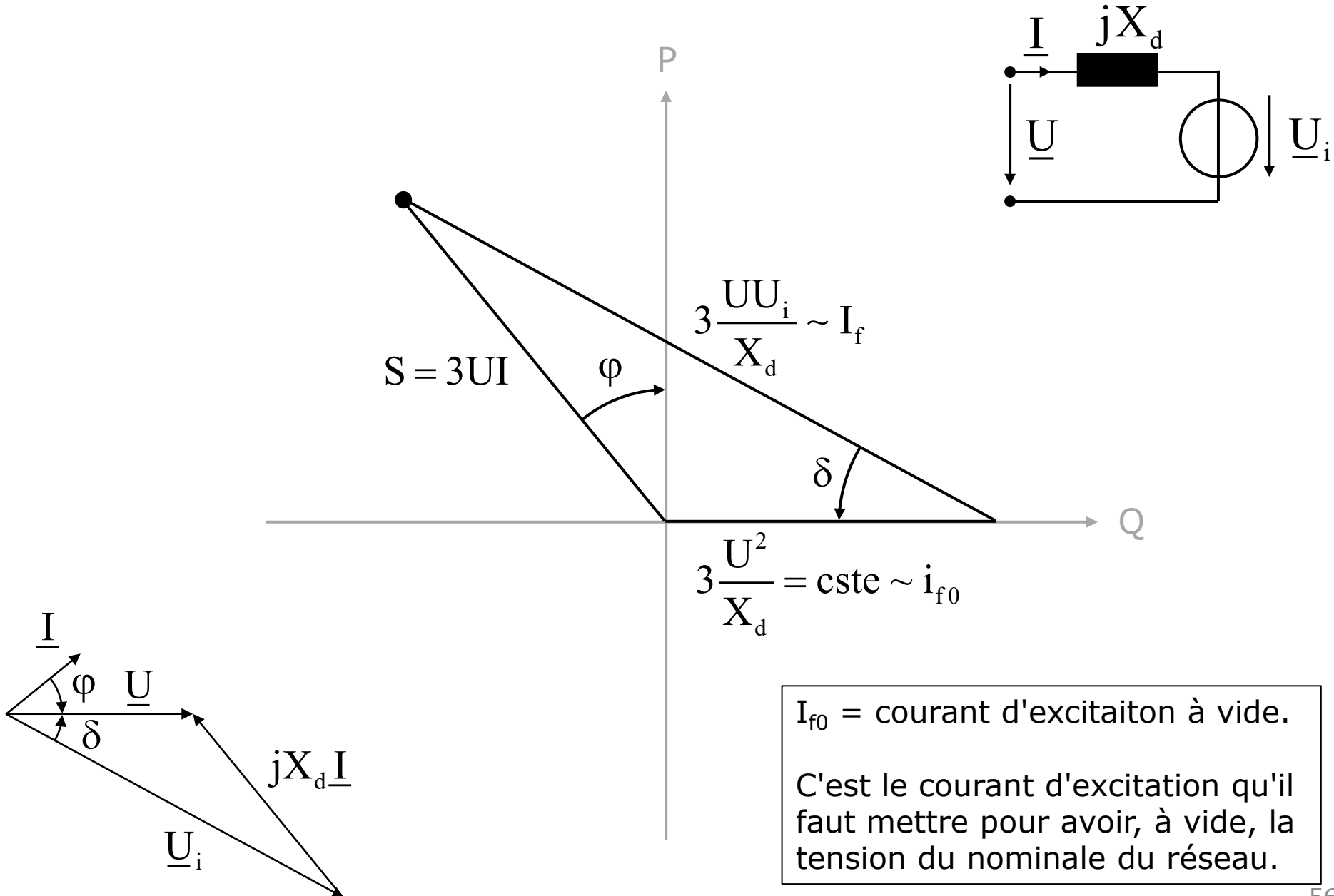




Sommaire

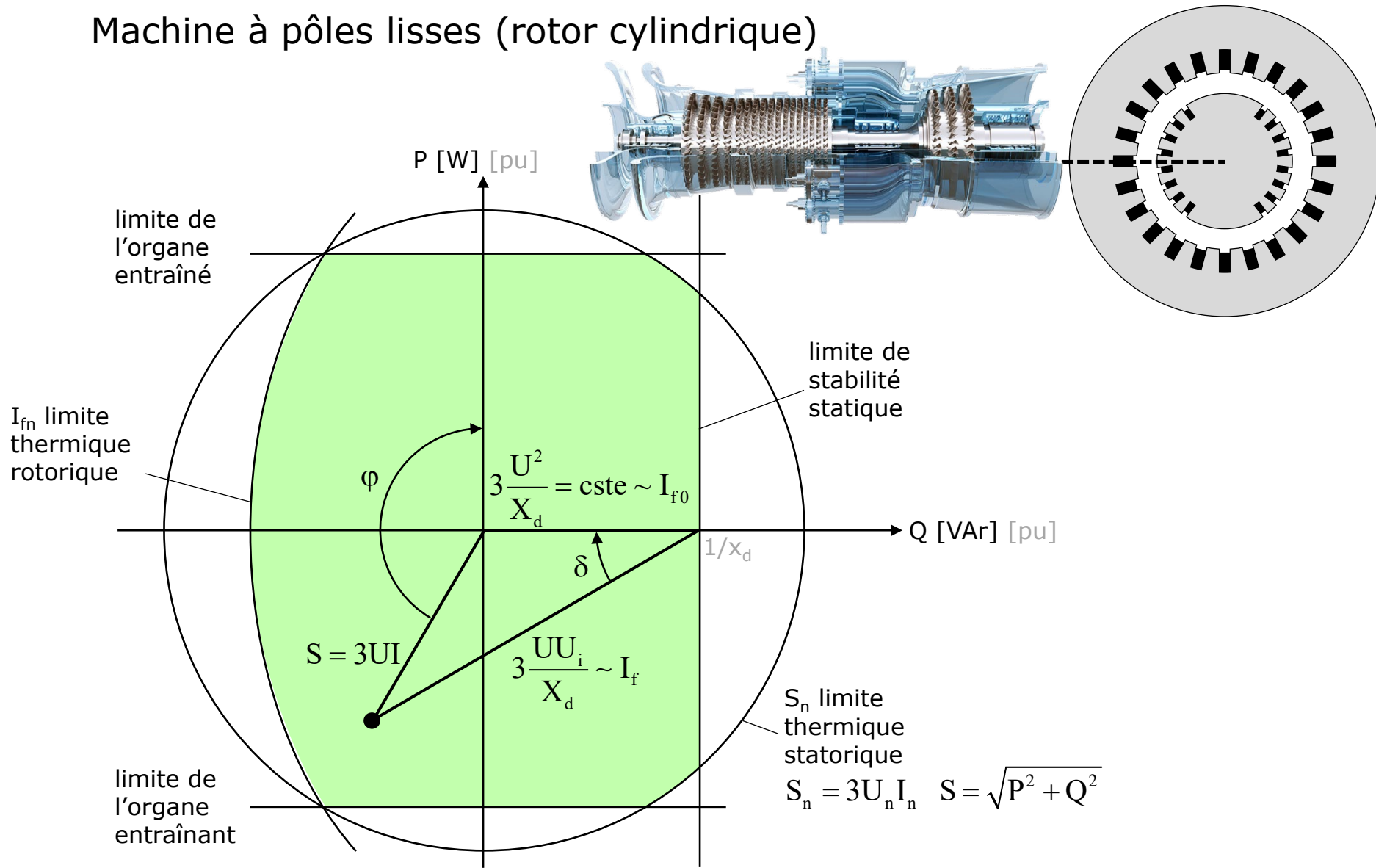
- Principe de fonctionnement et types de machines synchrones
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
 - Equation de tension et schéma équivalent
 - Bilan de puissance et Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
 - Equation de tension
 - Caractéristique de couple
- Exemples
 - Alternateur de voiture
 - Groupe électrogène
- Synchronisation au réseau
- **Le topogramme (diagramme des puissances)**
 - Machine à pôles lisses
 - Machine à pôles saillants

Le topogramme (diagramme des puissances)



Le topogramme (diagramme des puissances)

Machine à pôles lisses (rotor cylindrique)



Le topogramme (diagramme des puissances)

Machine à pôles saillants

