

# Machines électriques

Machine synchrone

André Hodder

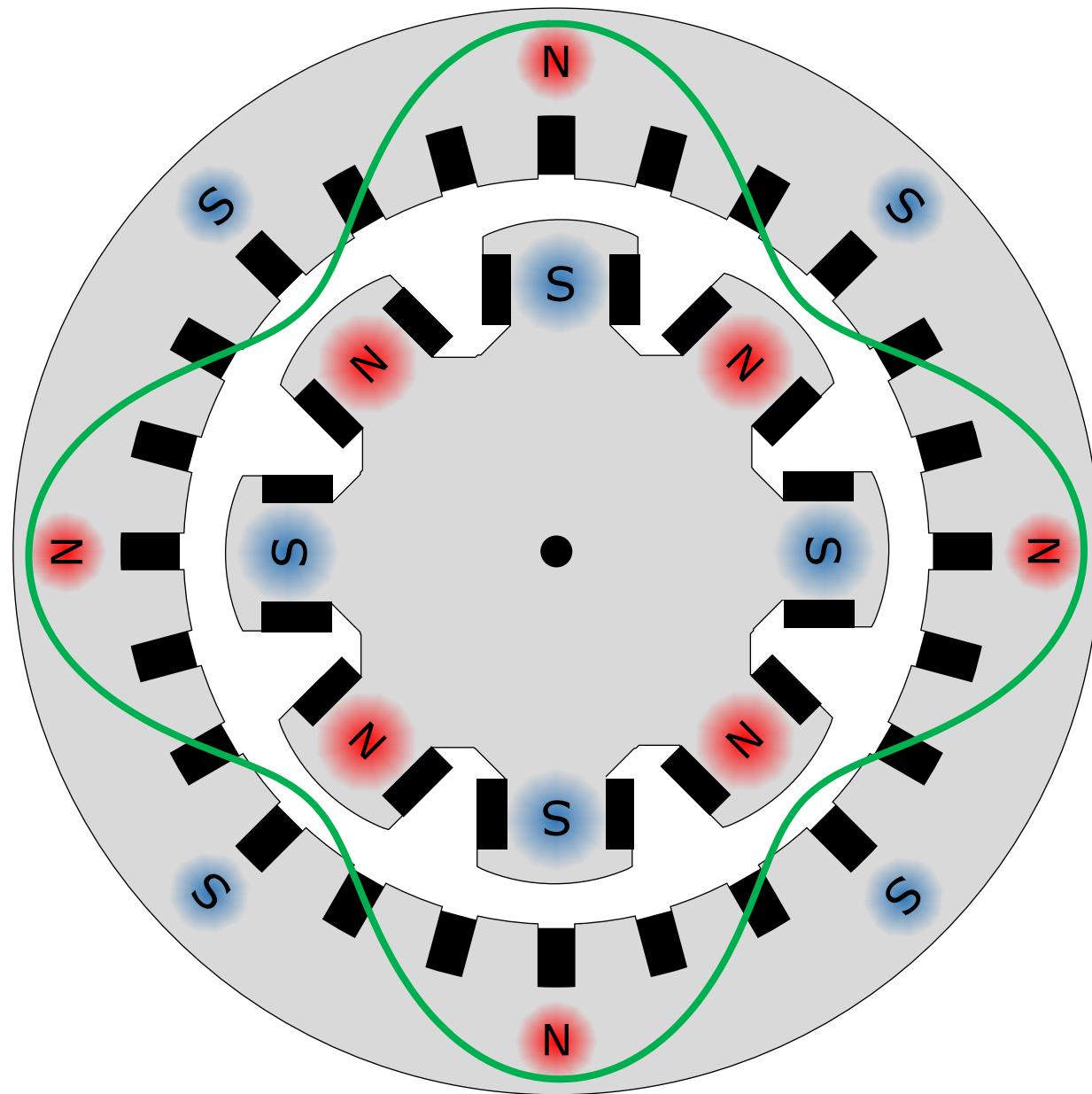
# Sommaire

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

# Sommaire

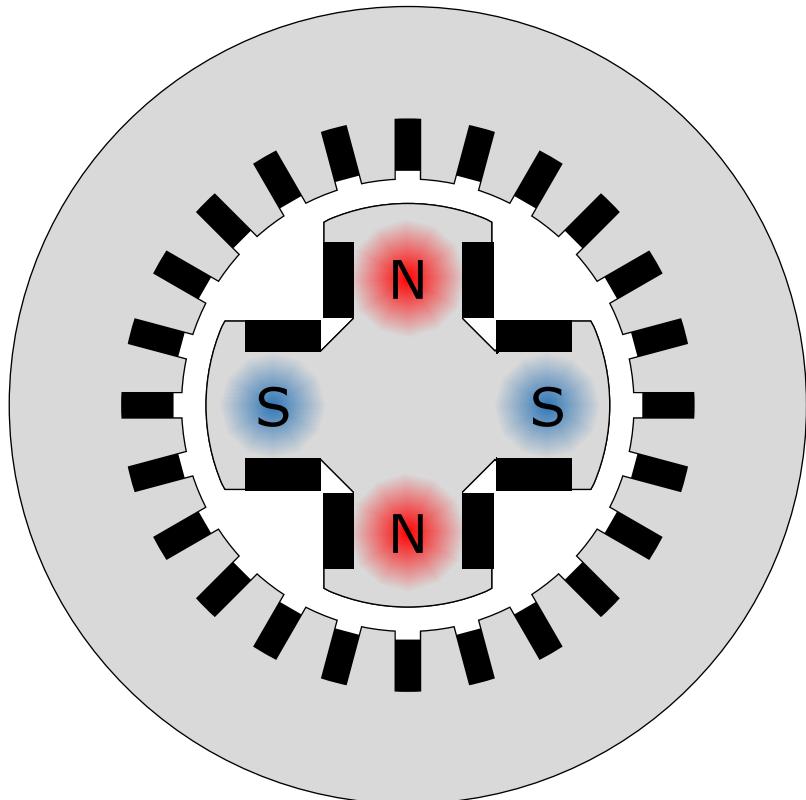
- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
  - Equation de tension et schéma équivalent
  - Bilan de puissance et  
Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
  - Equation de tension
  - Caractéristique de couple
- Exemples
  - Alternateur de voiture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

# Principe de fonctionnement

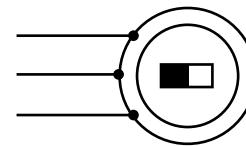
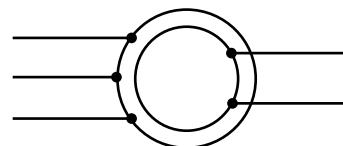
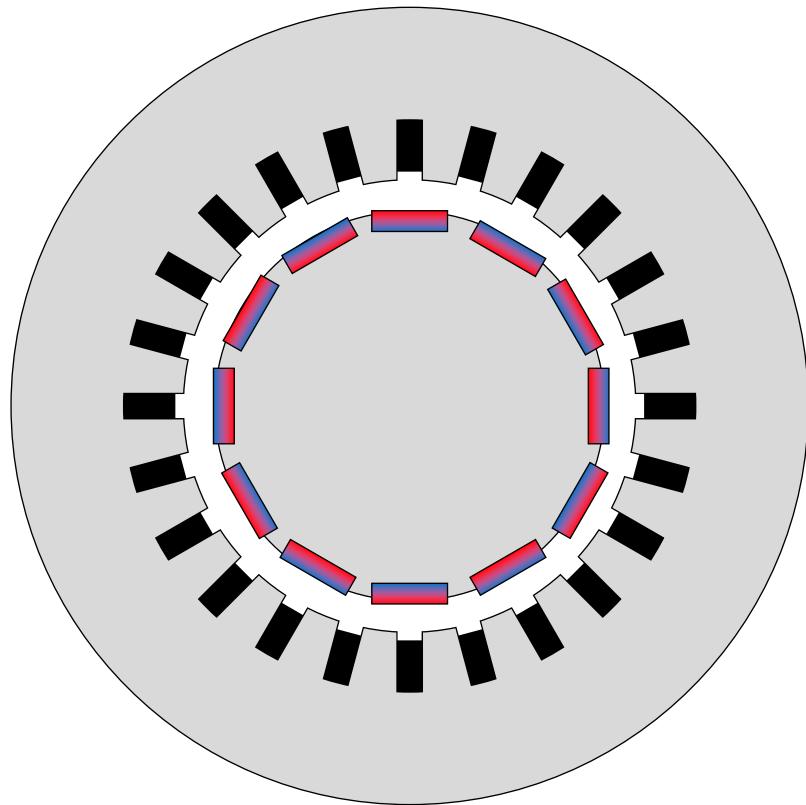


# Machine synchrone

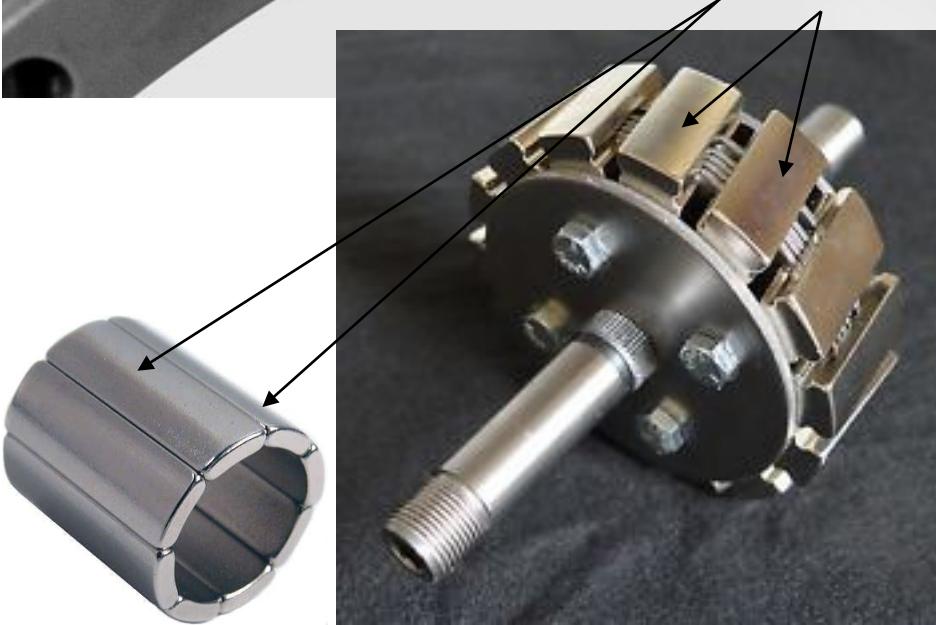
excitation



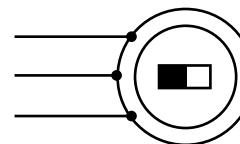
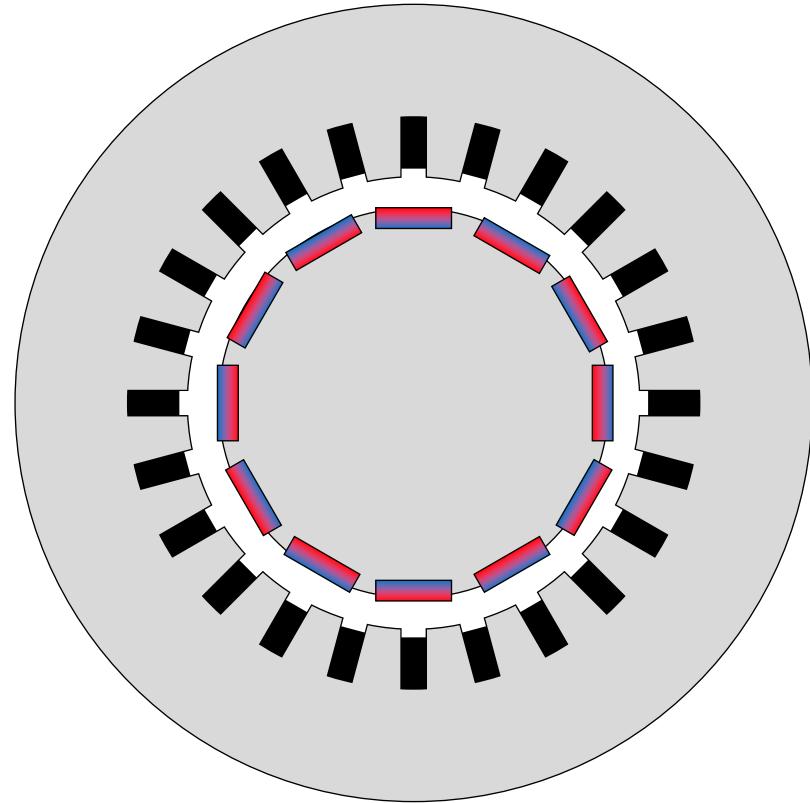
aimants permanents



# Machine synchrone

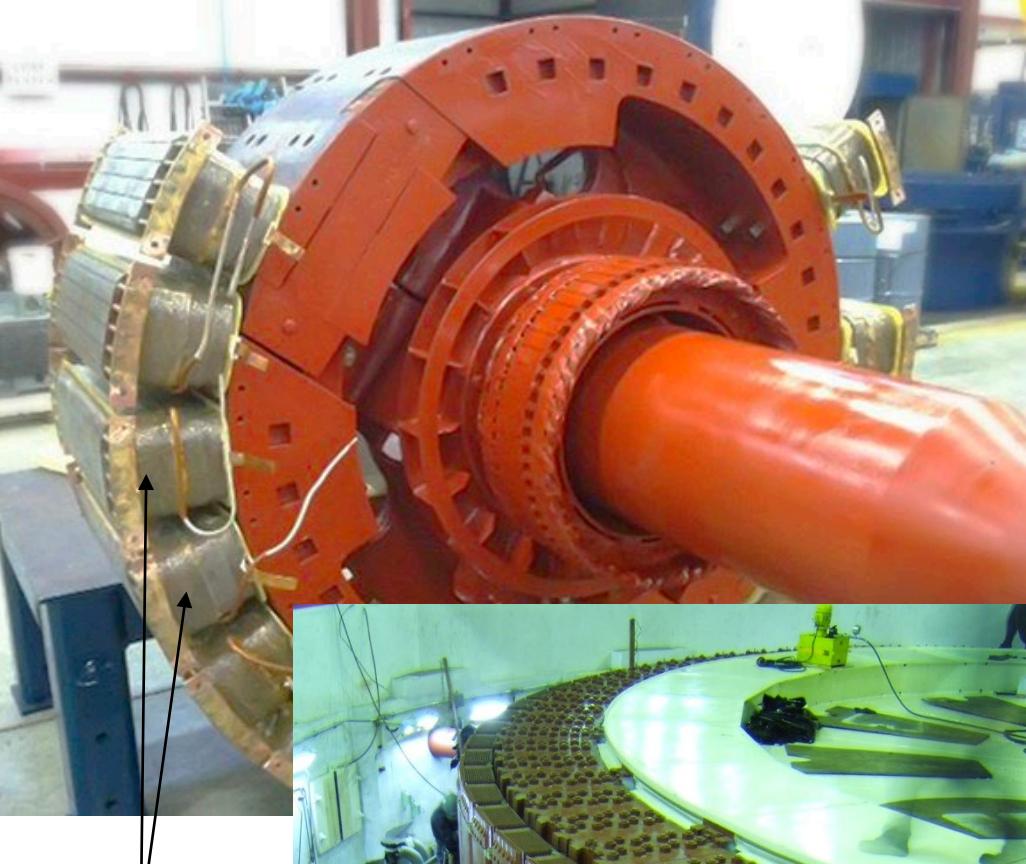
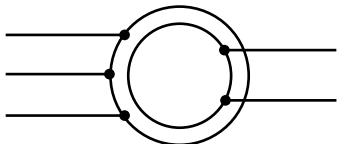
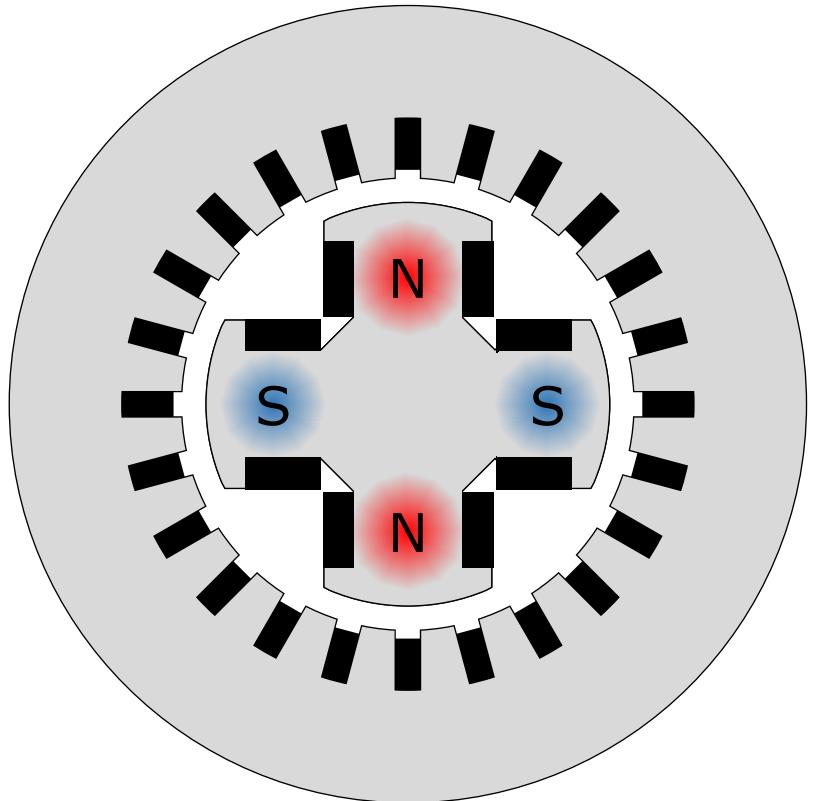


aimants permanents



# Machine synchrone

excitation



## Nombre de paires de pôles

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

↓  
Nombre de paires de pôles

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

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

Rappel :

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

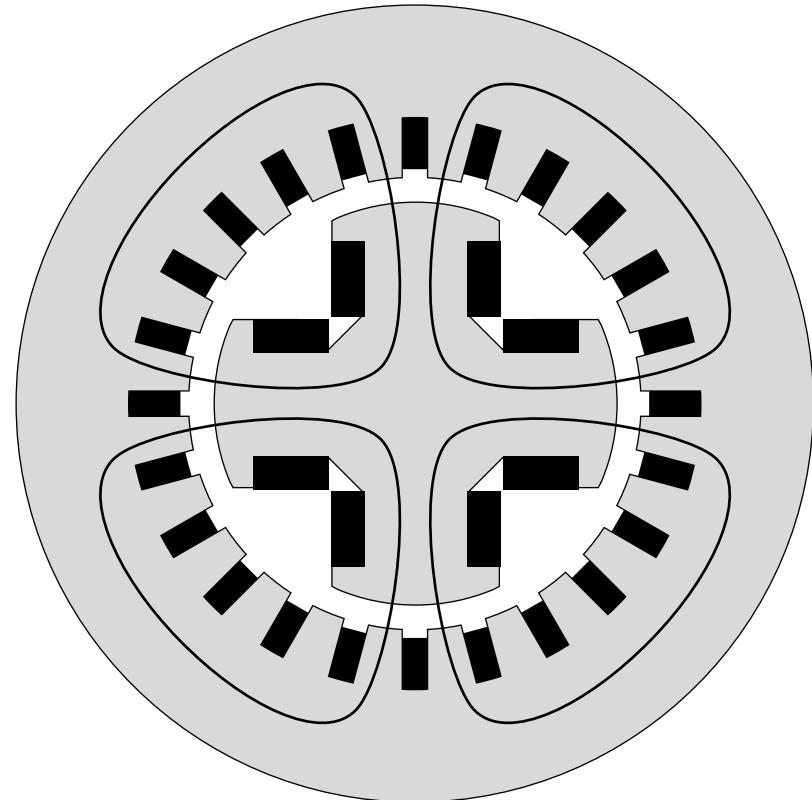
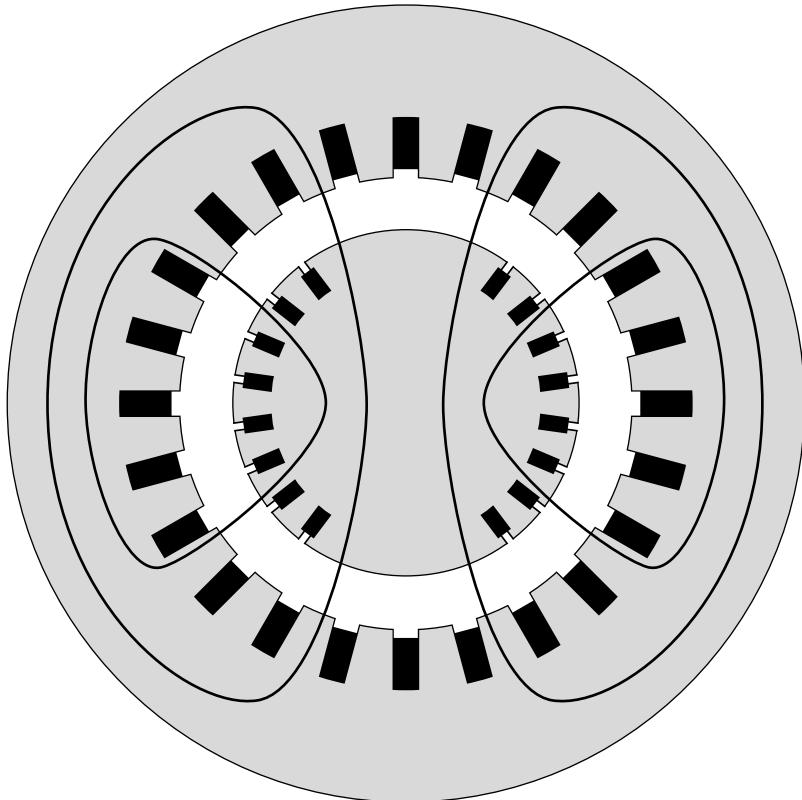
$$\omega \rightarrow [\text{rad} / \text{s}] \rightarrow \text{Monde électrique}$$

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

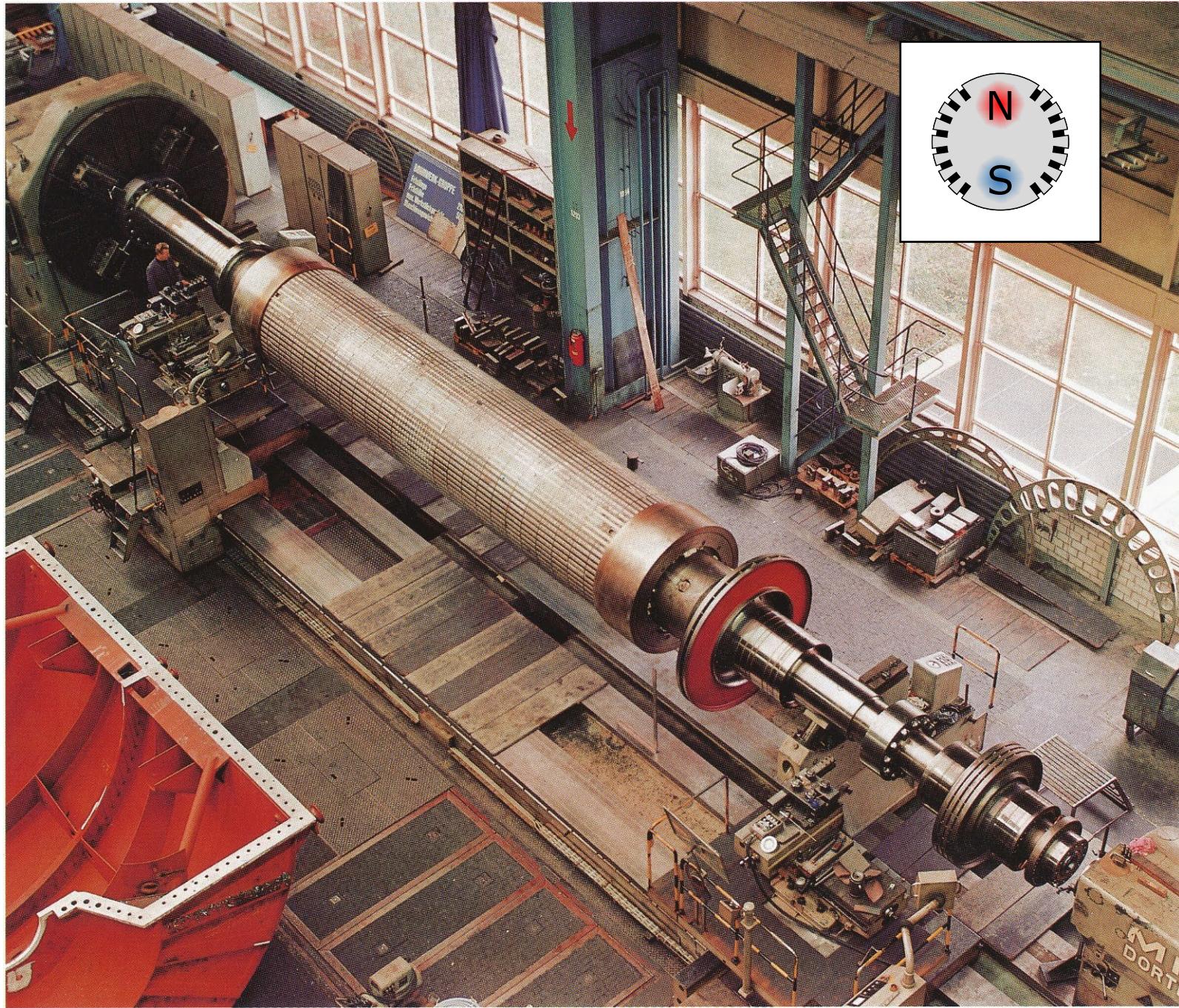
$$n \rightarrow [\text{tr} / \text{s}] \rightarrow \text{Monde mécanique}$$

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

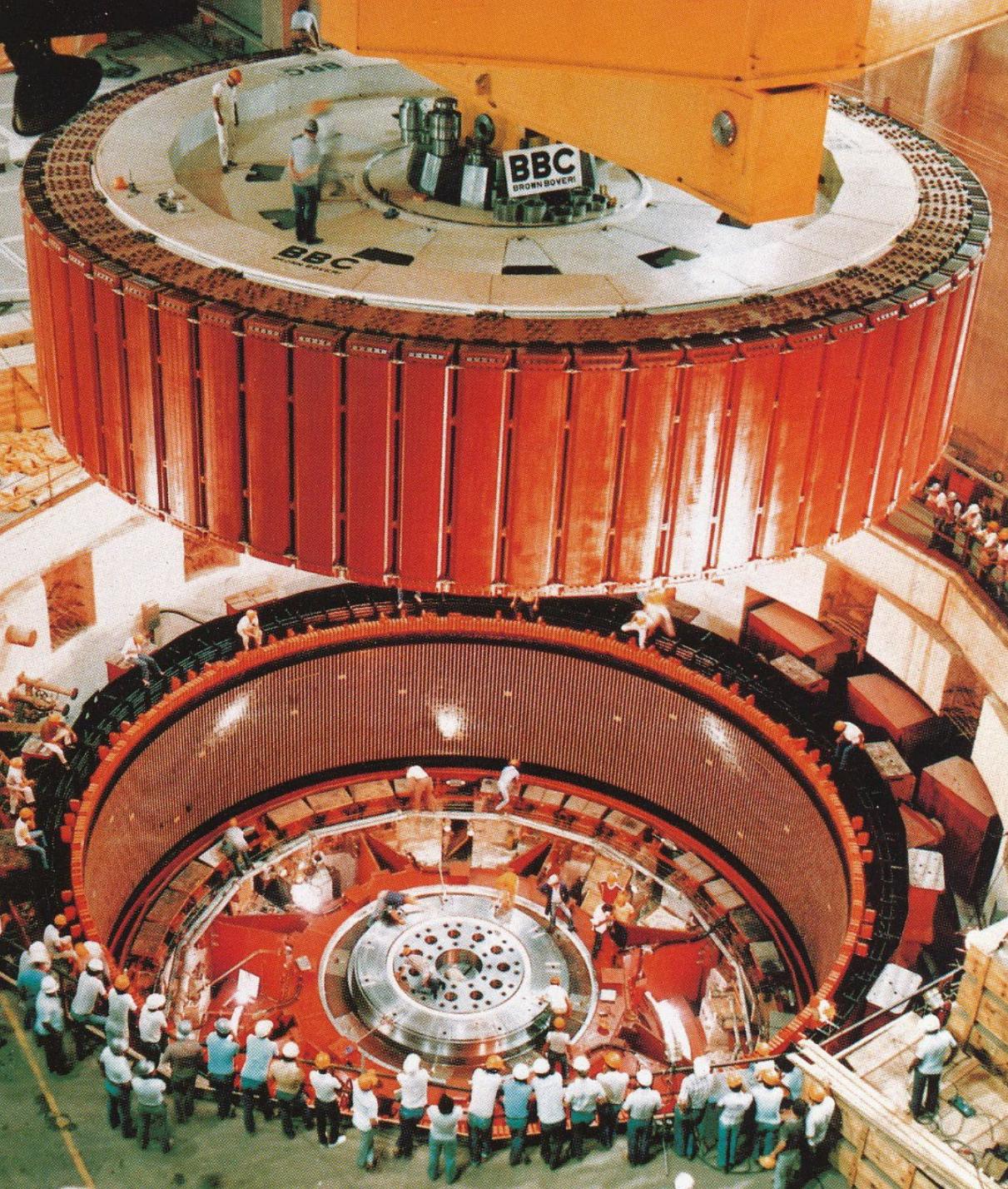
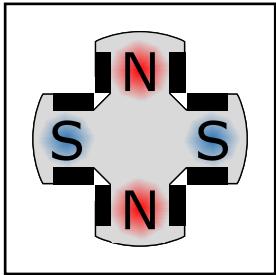
# Machines à pôles lisses et à pôles saillants



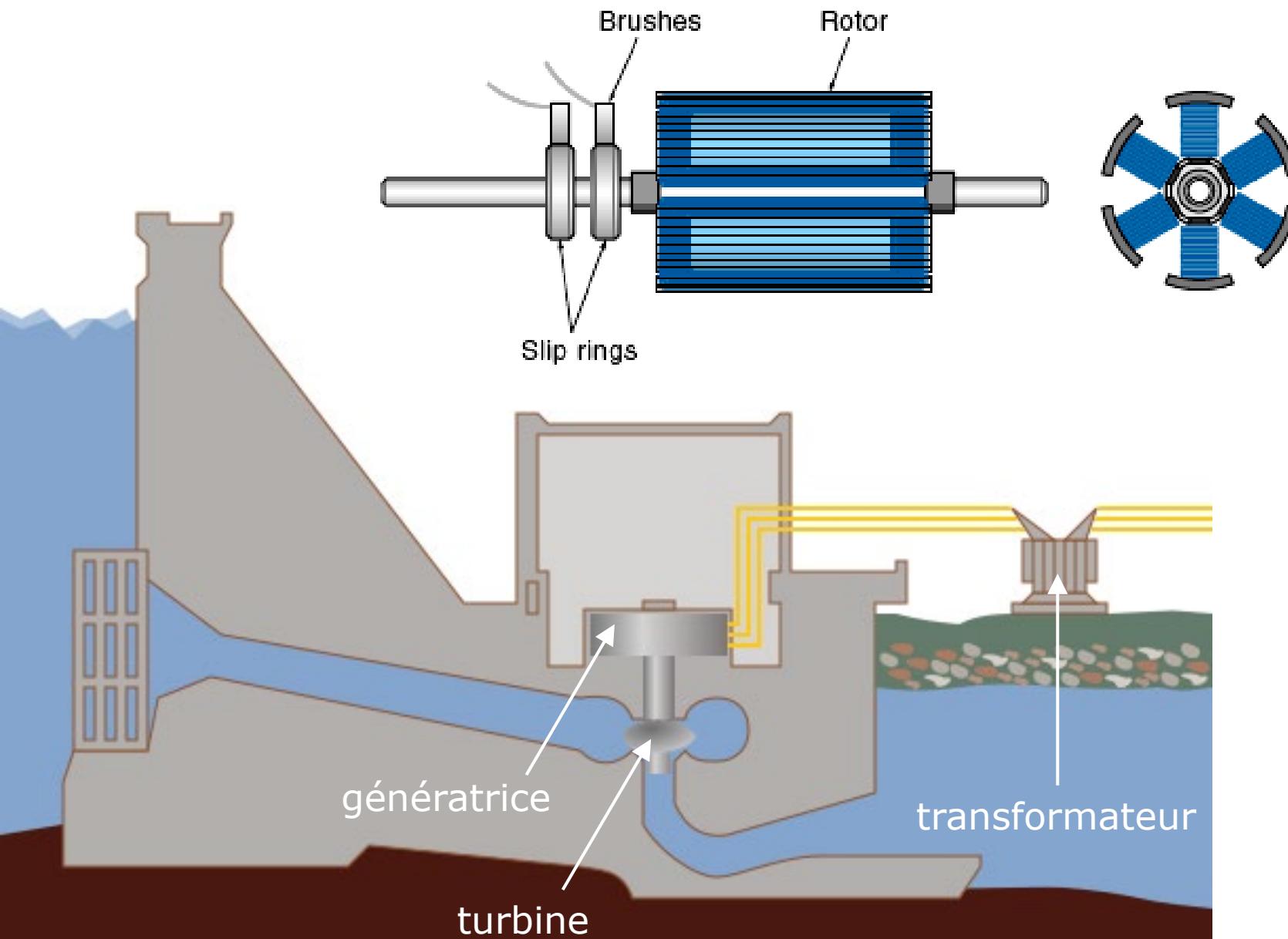
# Machine à pôles lisses



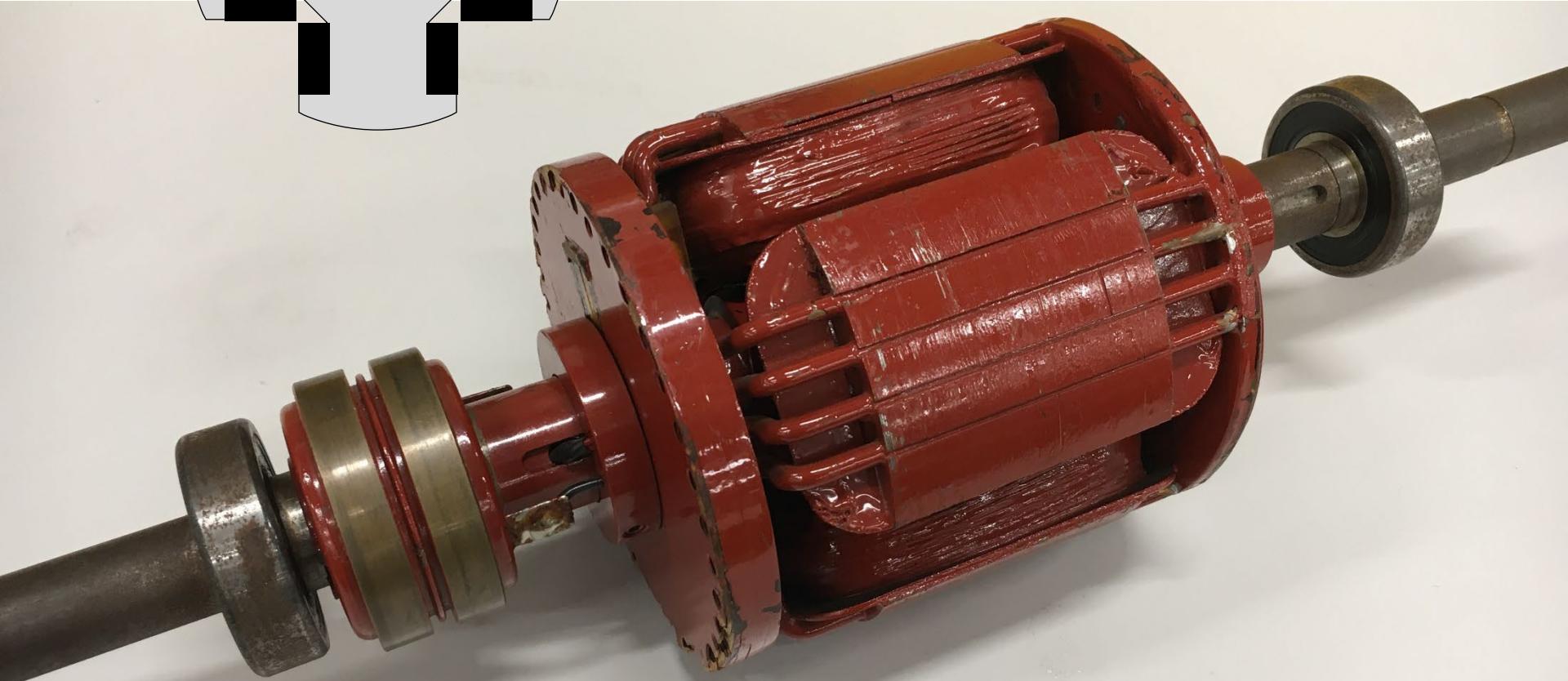
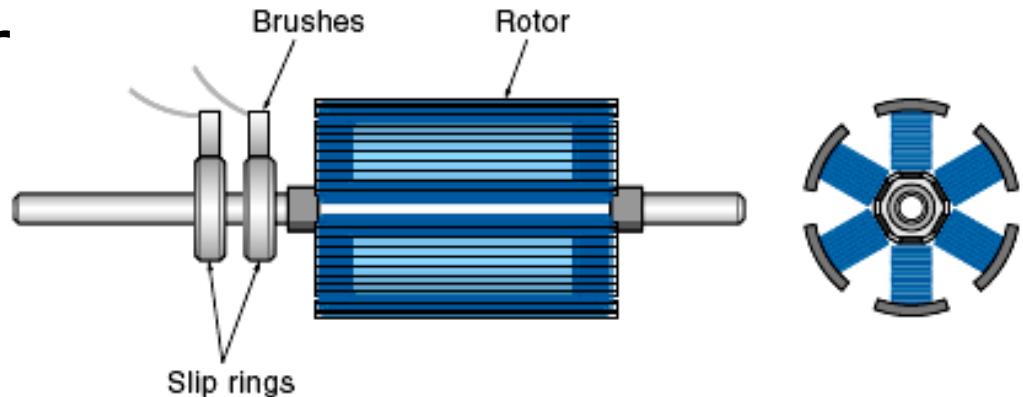
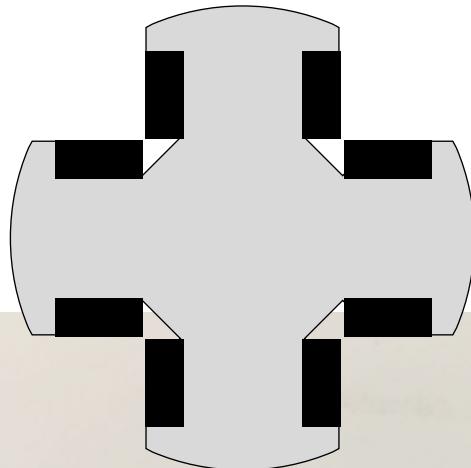
# Machine à pôles saillants

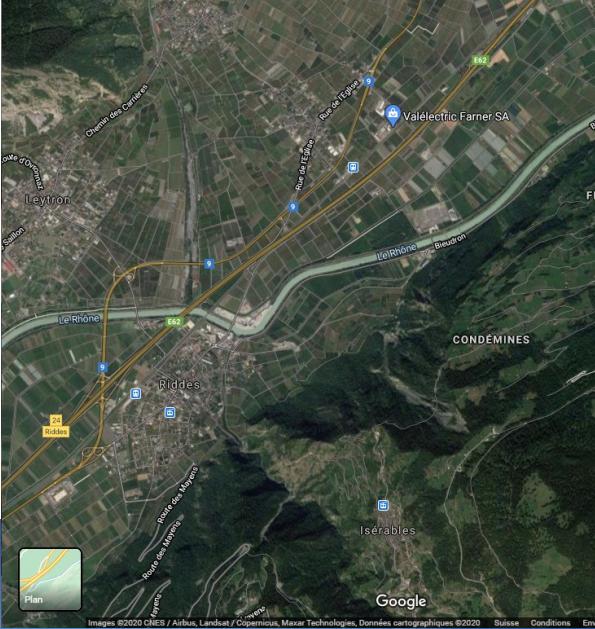
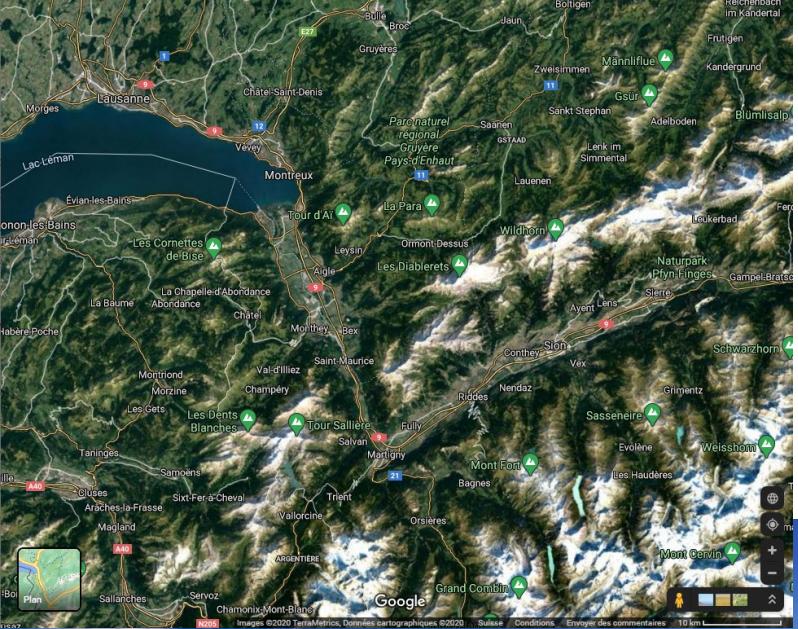


# Centrale hydro-électrique

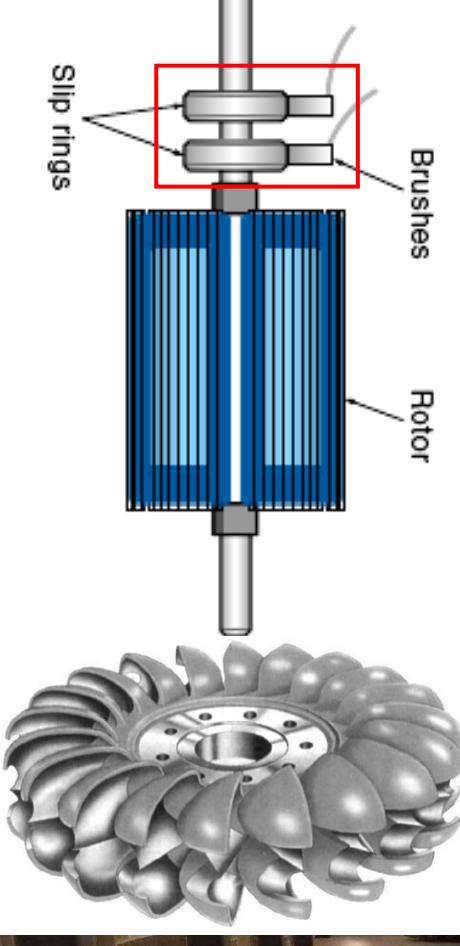


# Excitation du rotor

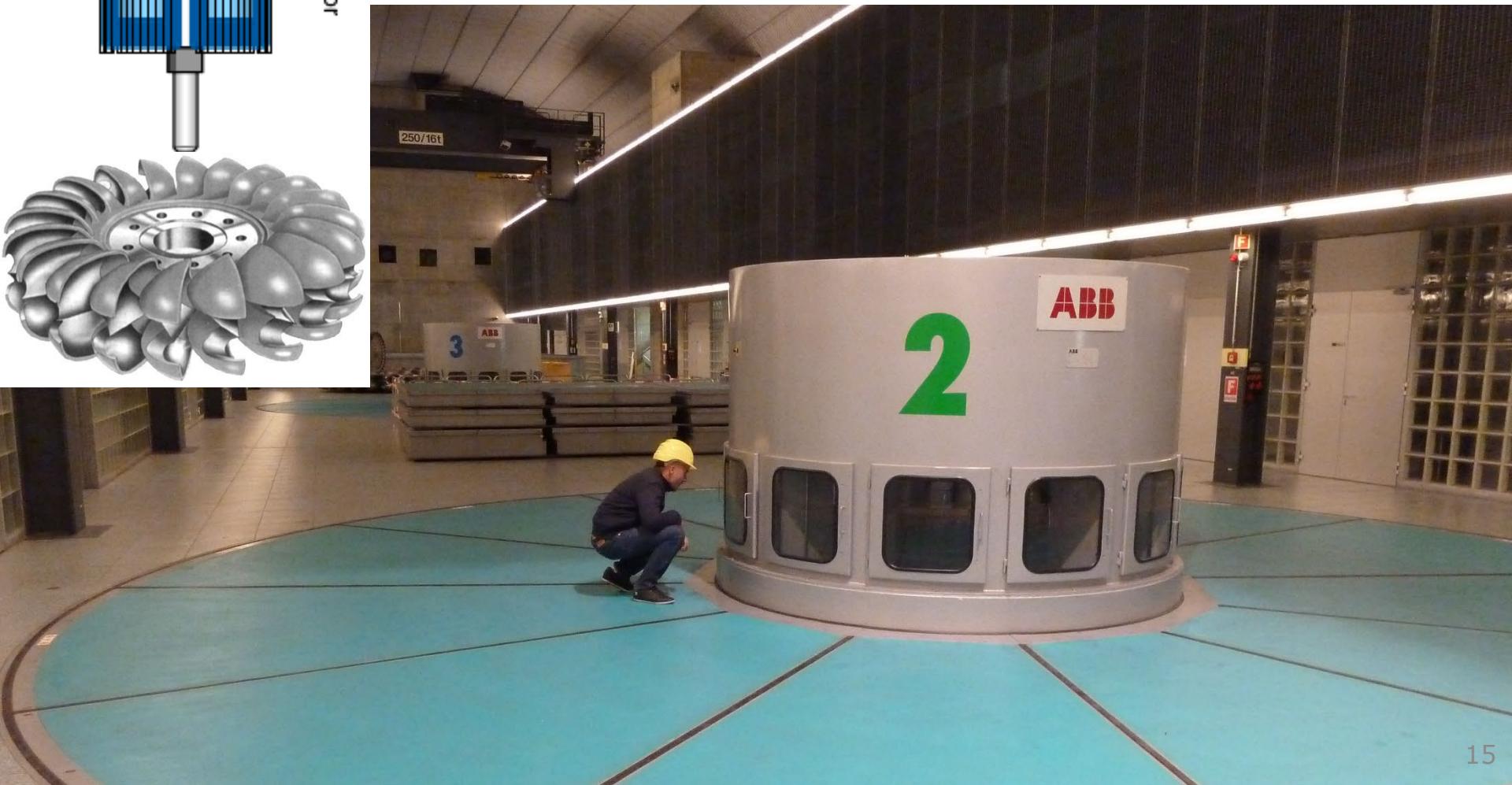




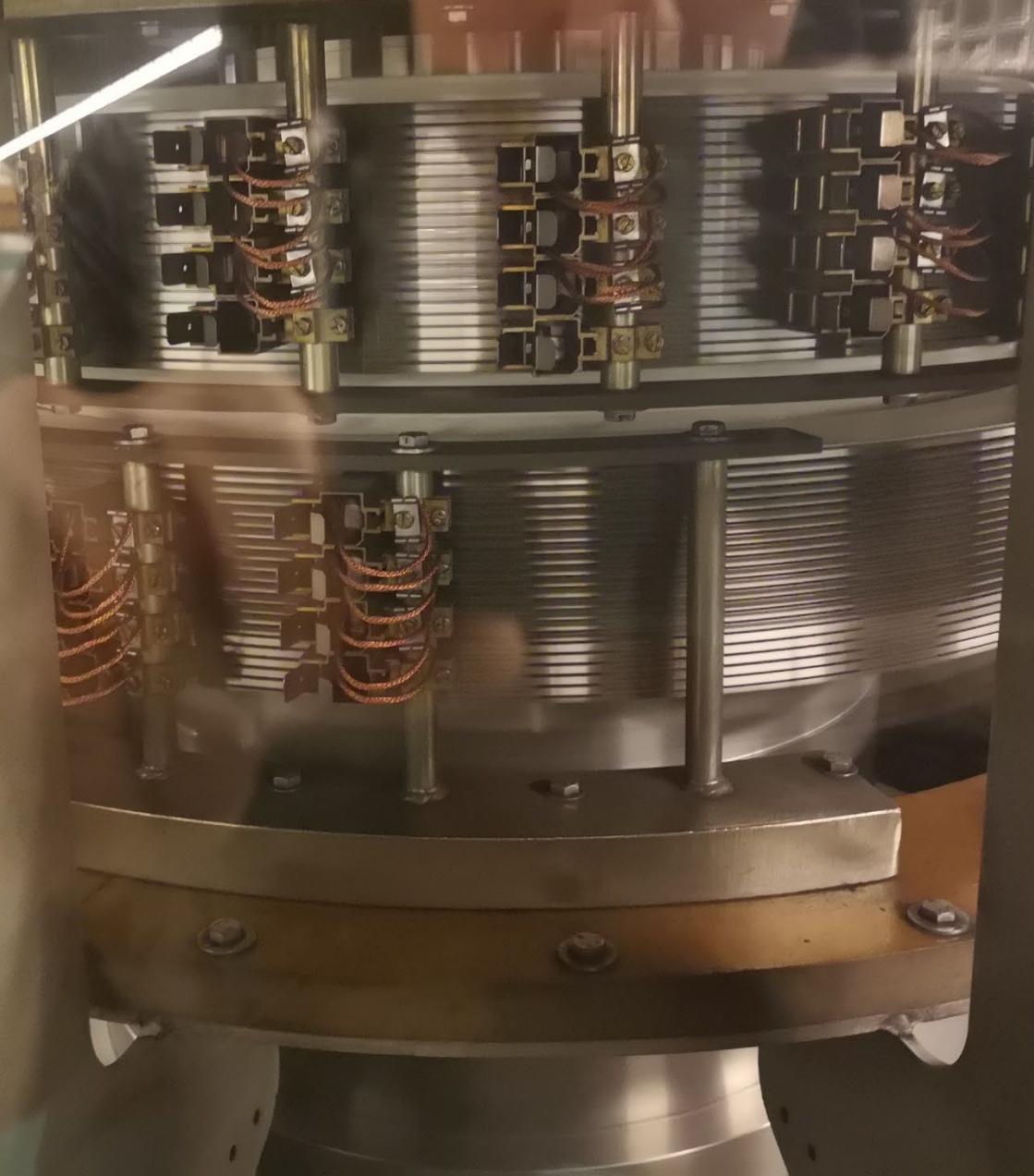
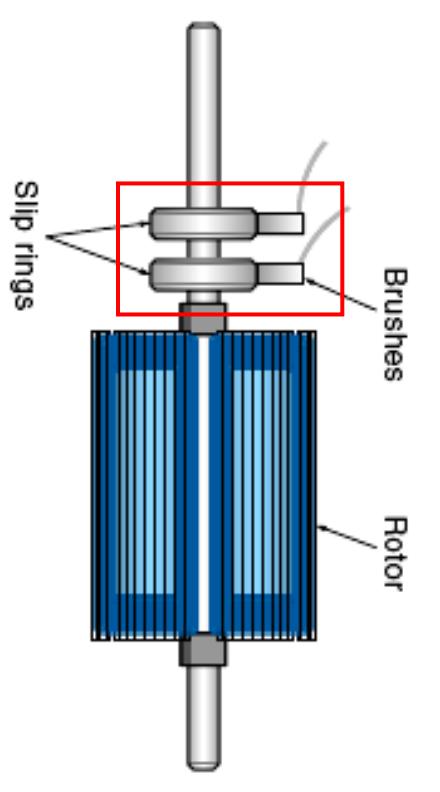
Source :  
wikipedia  
panoramik.ch



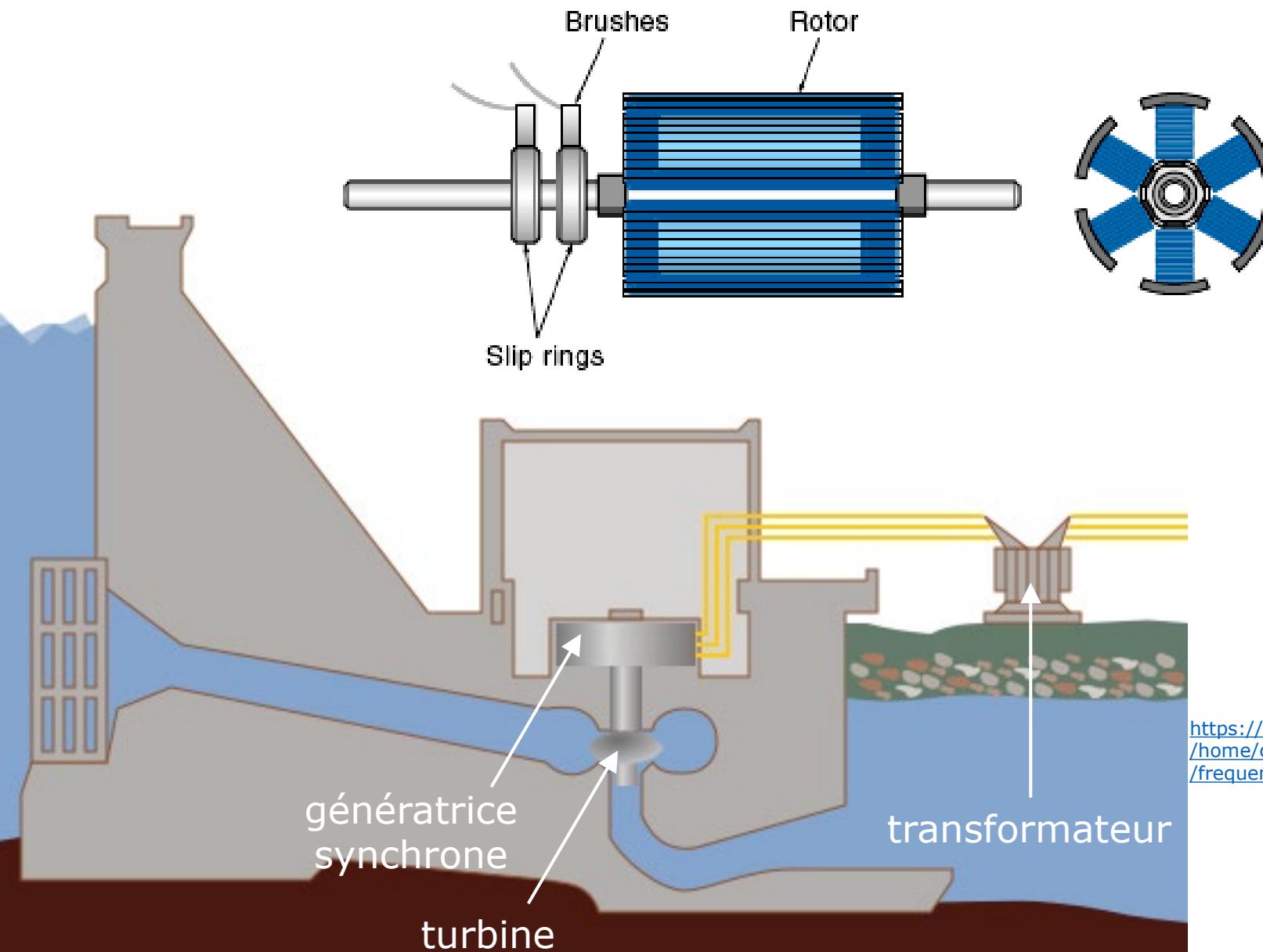
# Excitation du rotor



# Excitation du rotor



# Centrale hydro-électrique – Mode génératrice

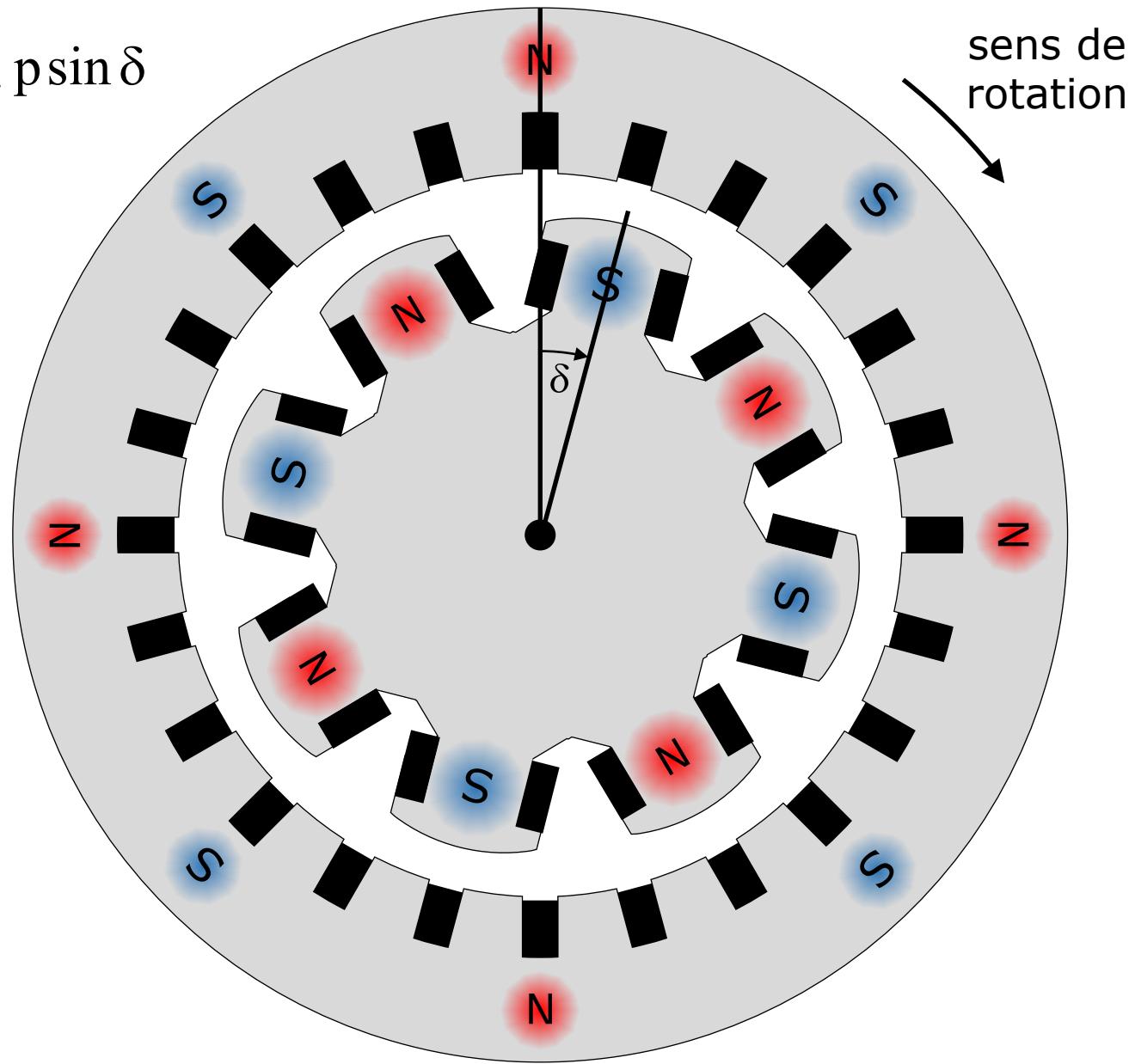


<https://www.swissgrid.ch/fr/home/operation/regulation/frequency.html>

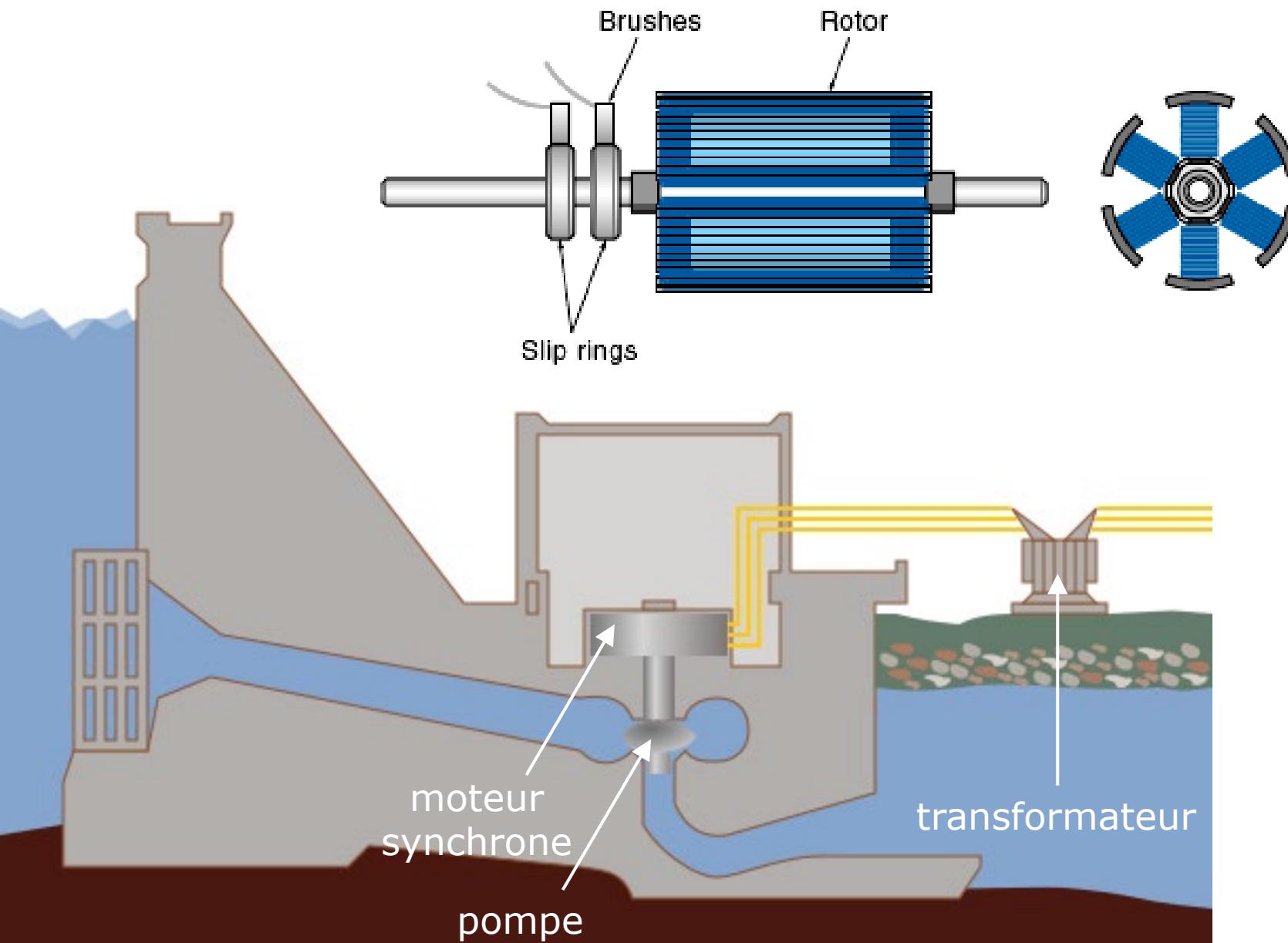
# Modes de fonctionnement – Mode génératrice

## Angle de charge

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



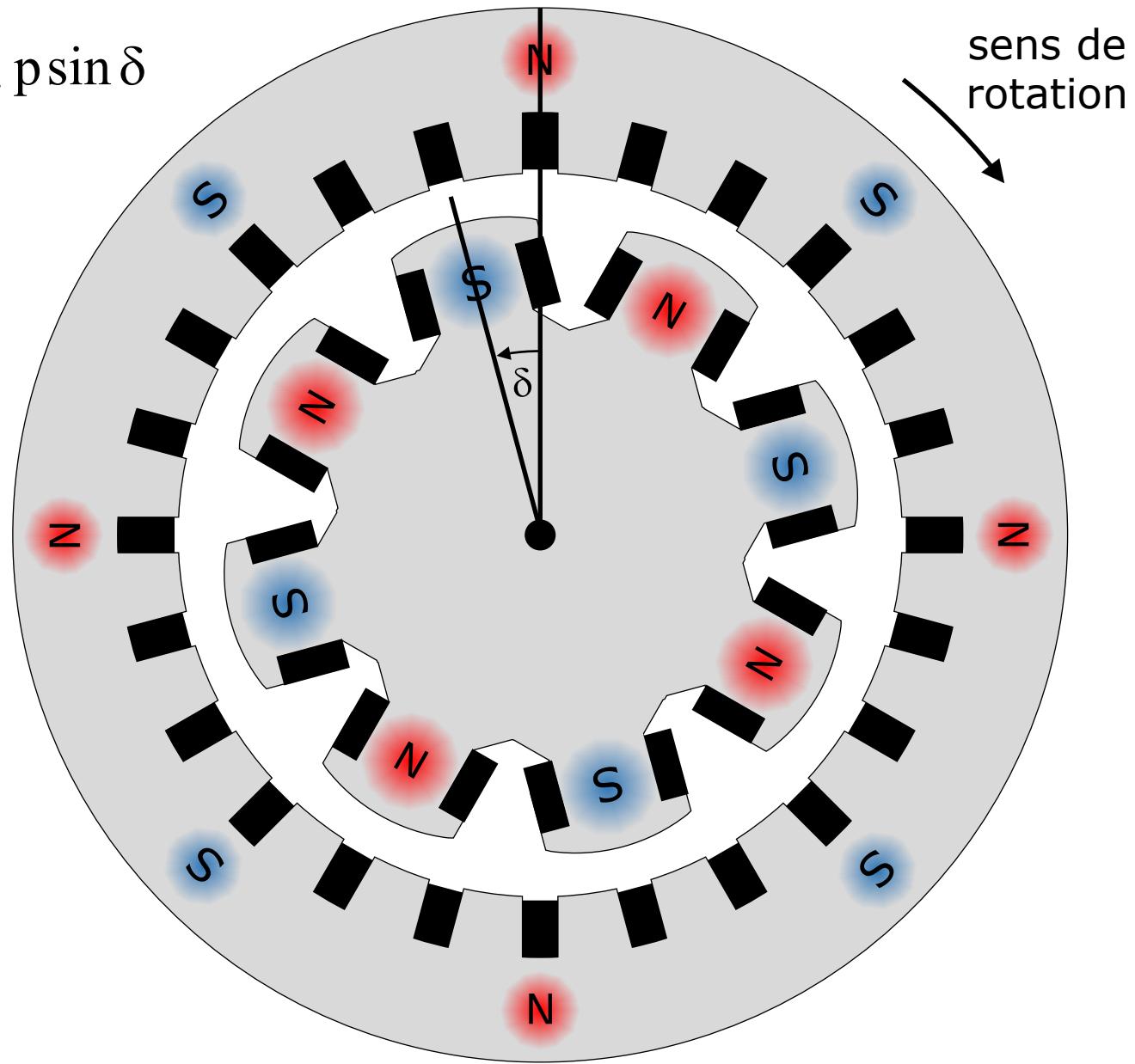
# Centrale hydro-électrique – Mode moteur



# Modes de fonctionnement – Mode moteur

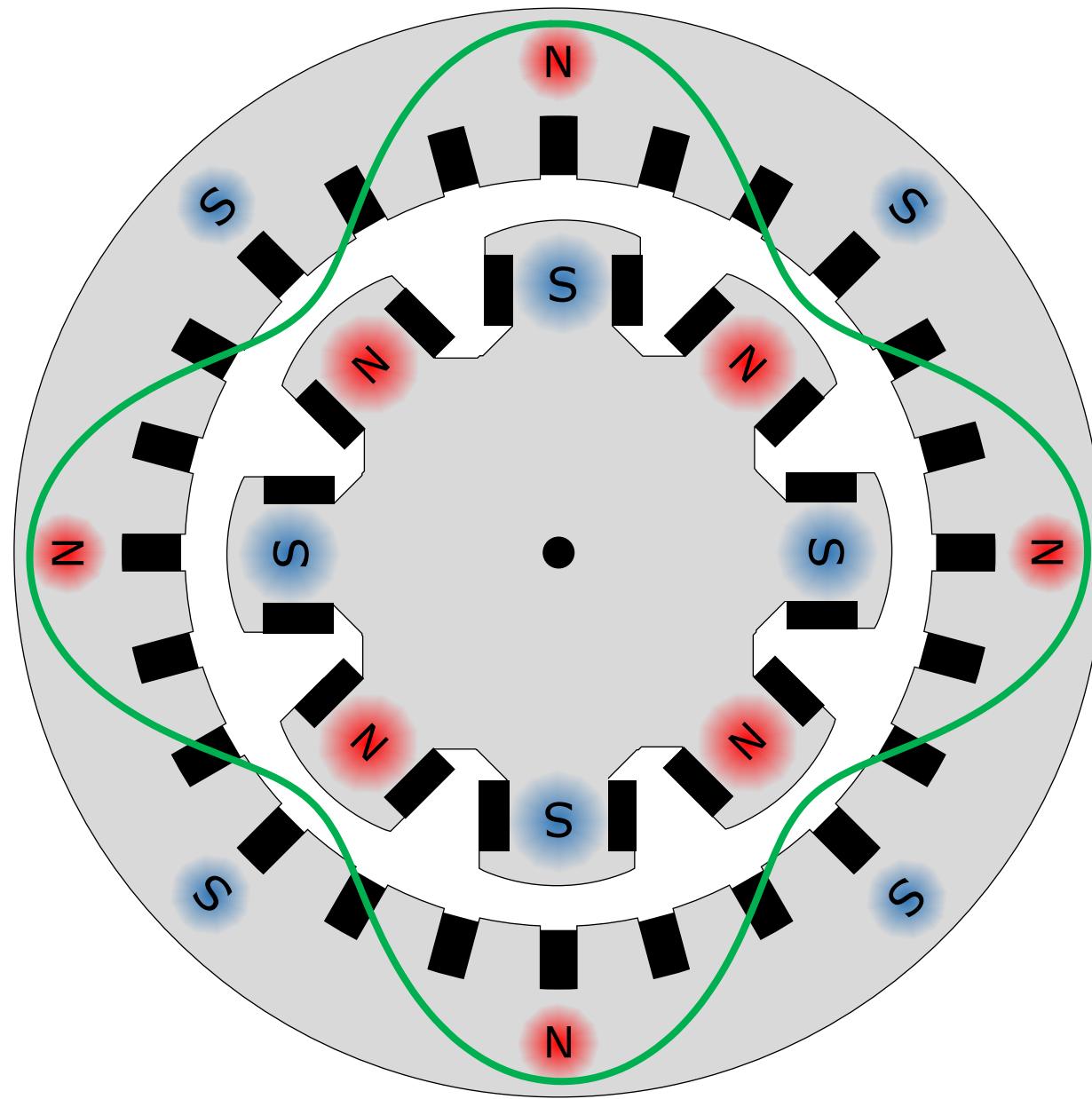
## Angle de charge

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



# Modes de fonctionnement

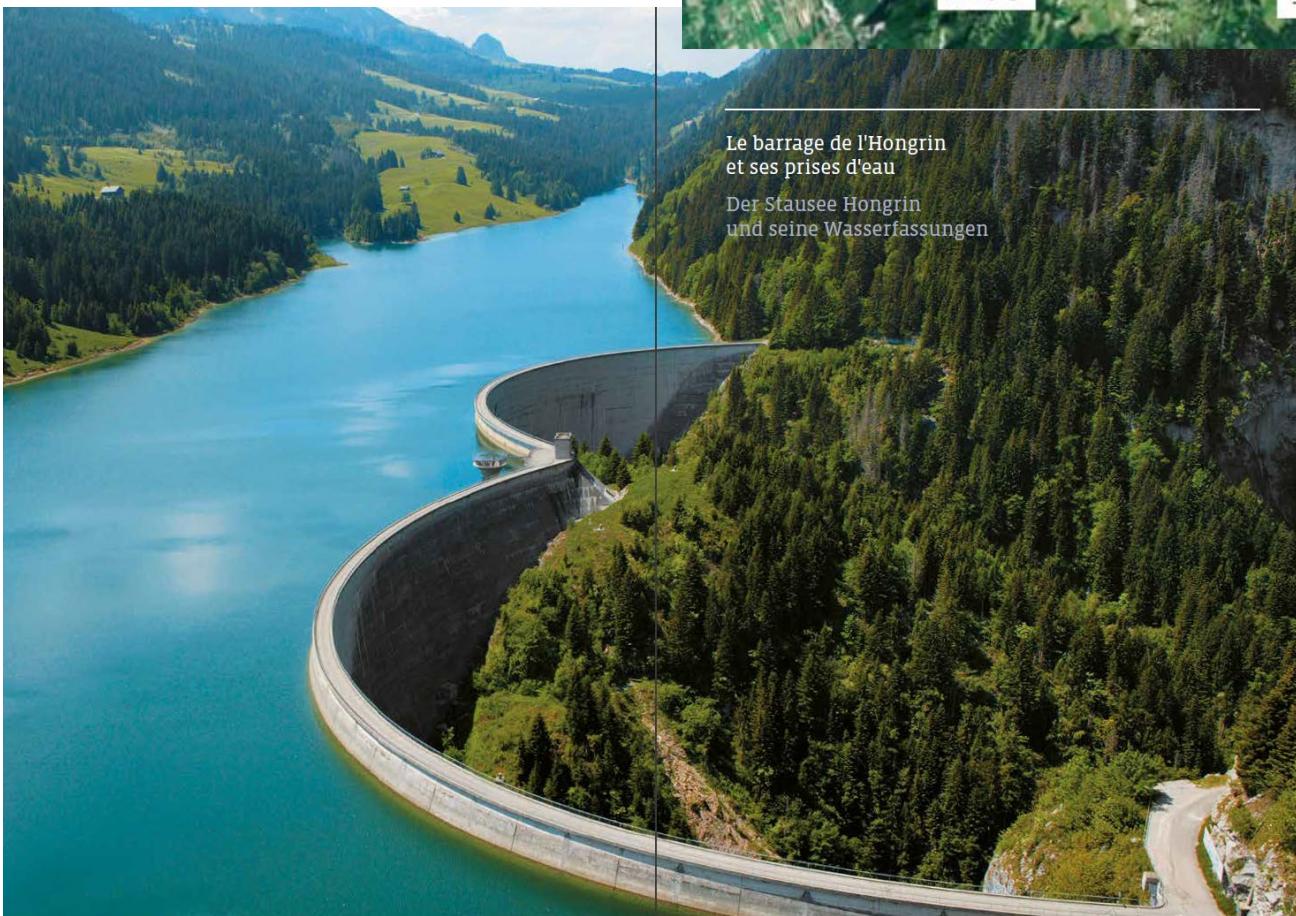
## Angle de charge



# Forces motrices de Hongrin-Léman SA

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

[http://www.fmhl.ch/Images/  
Annexes/Brochure001.pdf](http://www.fmhl.ch/Images/Annexes/Brochure001.pdf)



Le barrage de l'Hongrin et ses prises d'eau

Der Staumauer Hongrin und seine Wasserfassungen

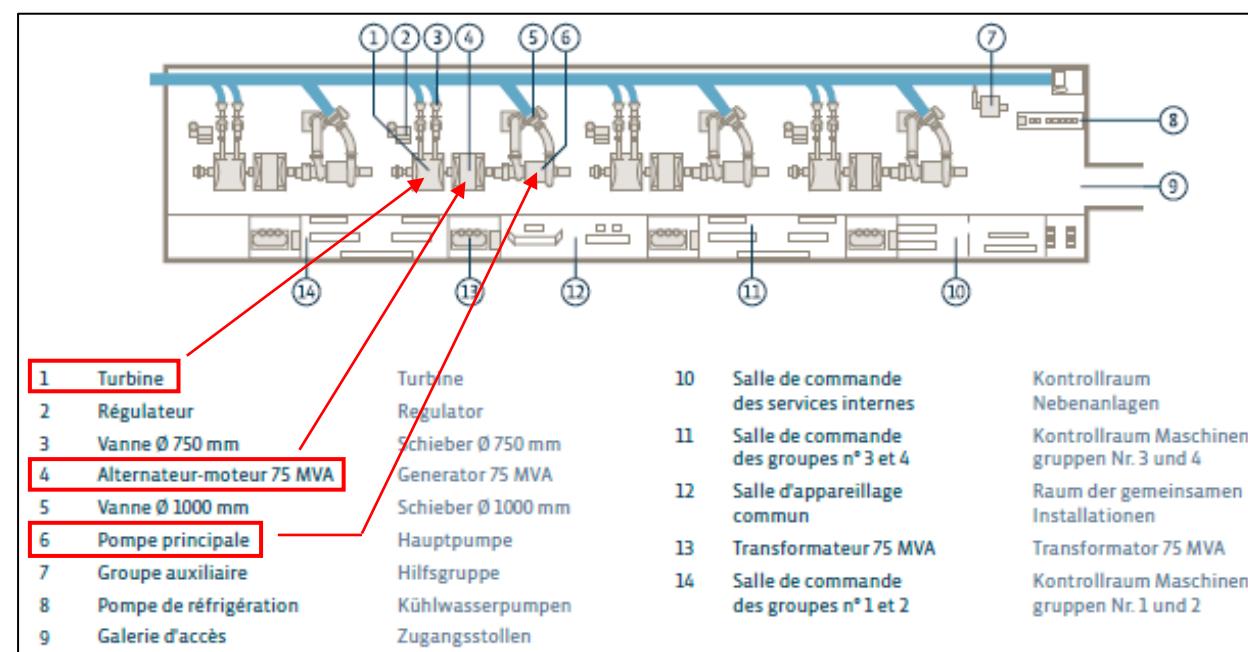
## Bassin versant naturel et prises d'eau

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 km<sup>2</sup> 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 km<sup>2</sup>. 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 m<sup>3</sup>.

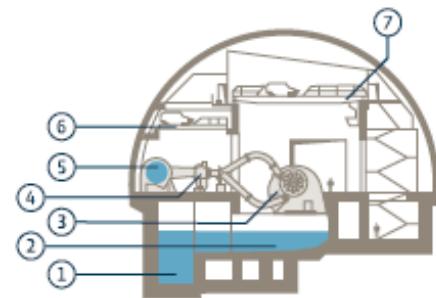
# Forces motrices de Hongrin-Léman SA

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

[http://www.fmhl.ch/Images/  
Annexes/Brochure001.pdf](http://www.fmhl.ch/Images/Annexes/Brochure001.pdf)

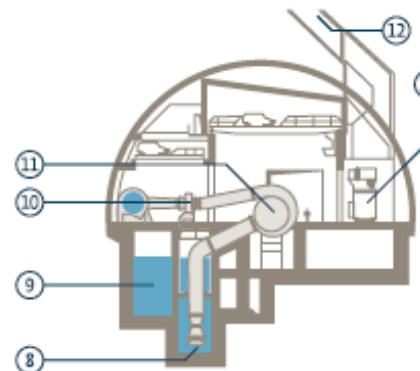


Coupe au droit d'une turbine  
Querschnitt einer Turbine



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

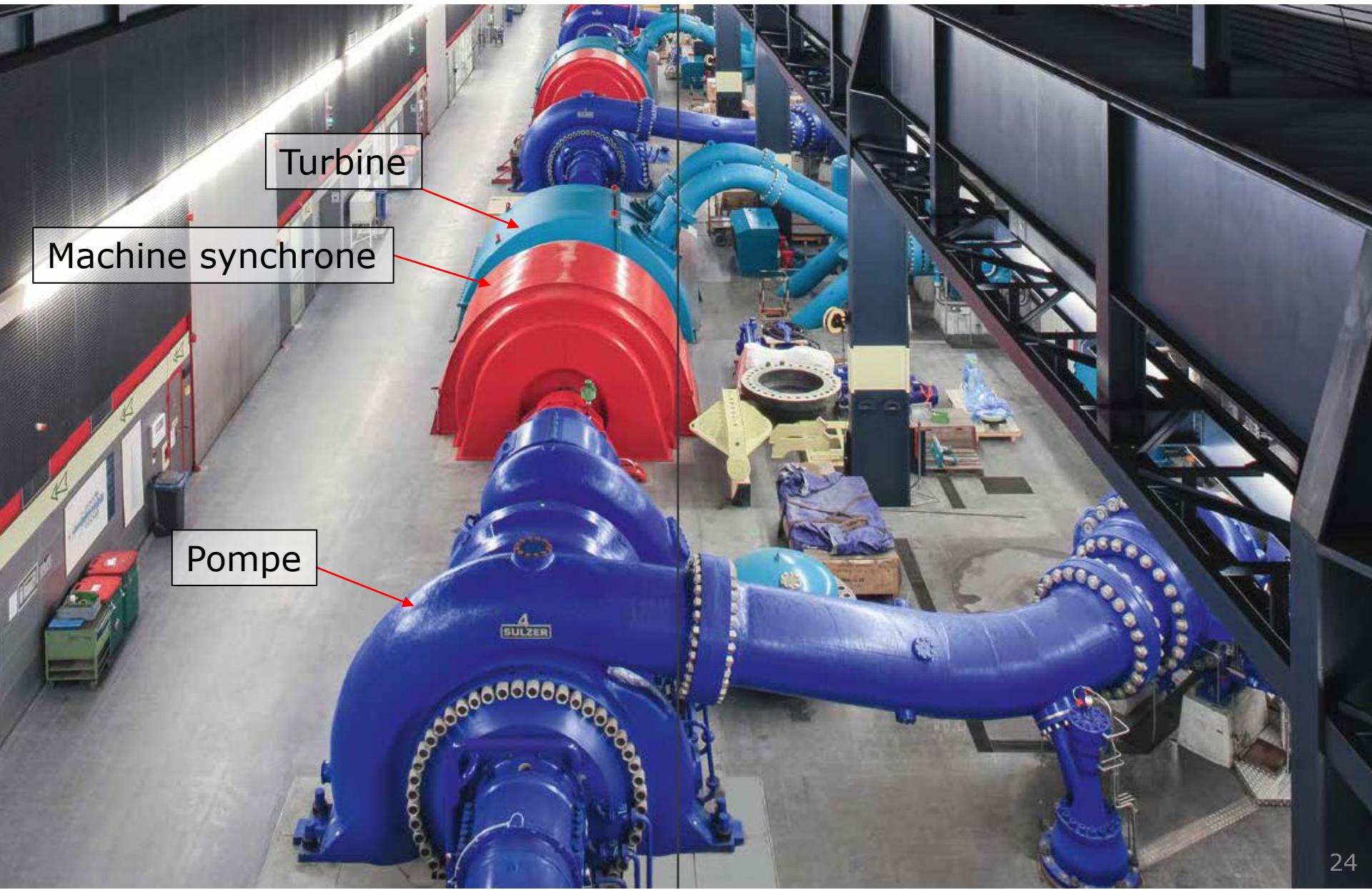
Coupe au droit d'une pompe  
Querschnitt einer Pumpe



- |                                    |                            |
|------------------------------------|----------------------------|
| 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](http://www.fmhl.ch/Images/Annexes/Brochure001.pdf)



# Sommaire

- Principe de fonctionnement
- **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

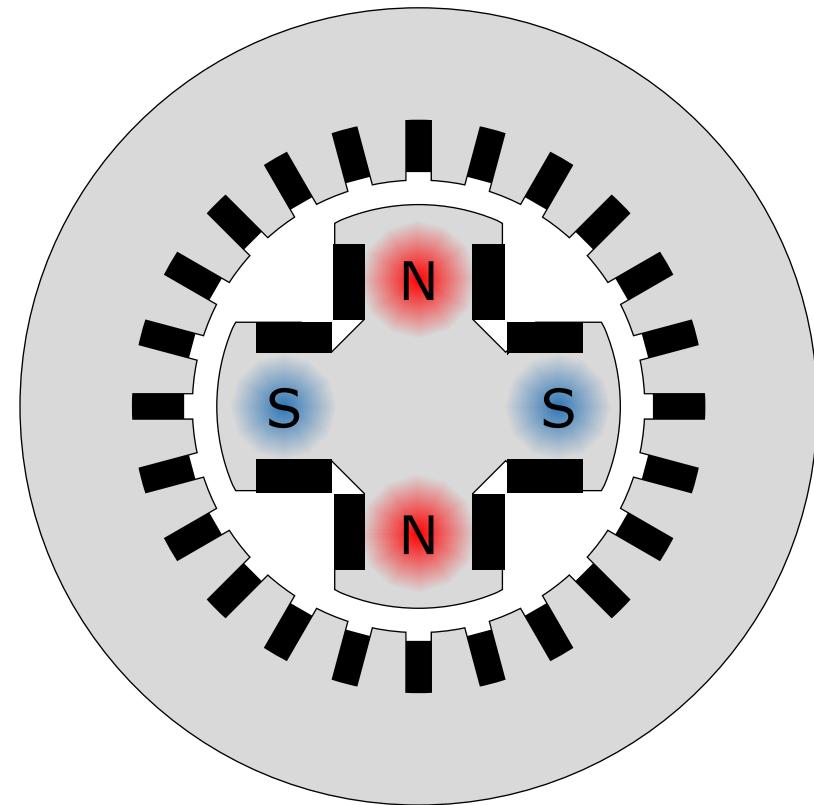
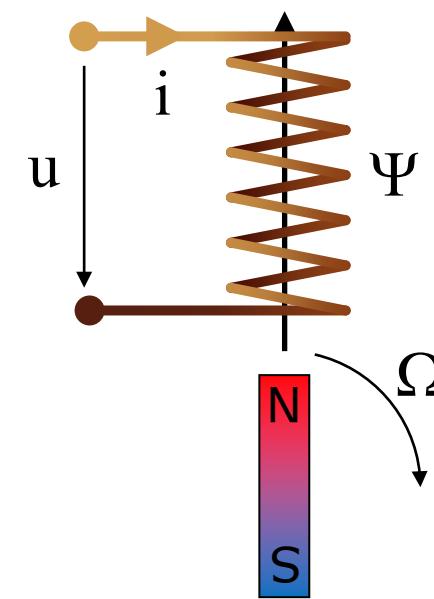
# Tension induite généralisée

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

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

Tension induite de transformation

Tension induite de mouvement



# Tension induite de mouvement

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

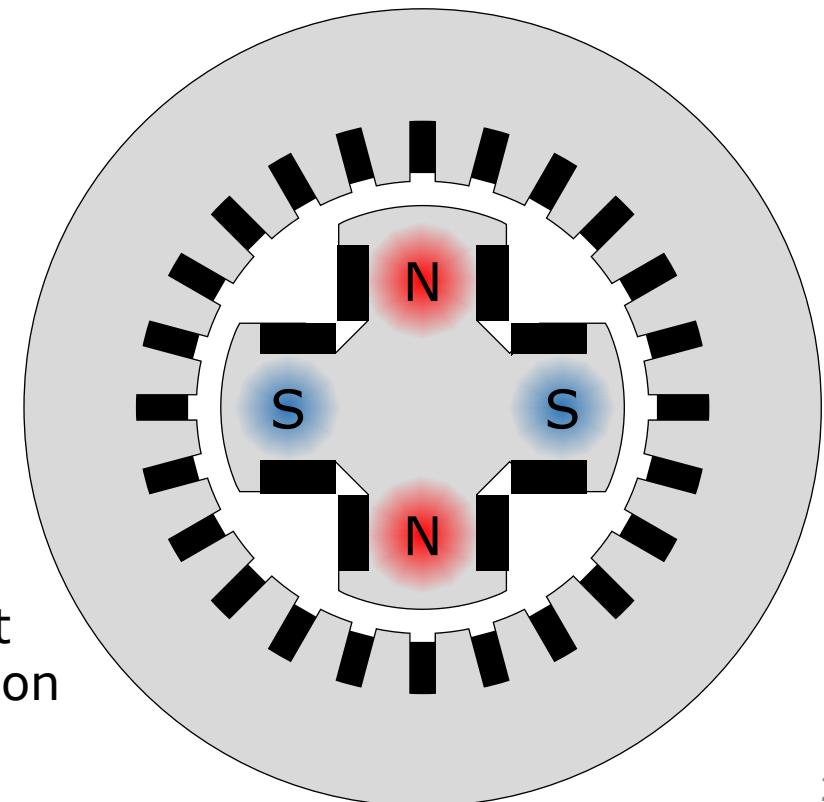
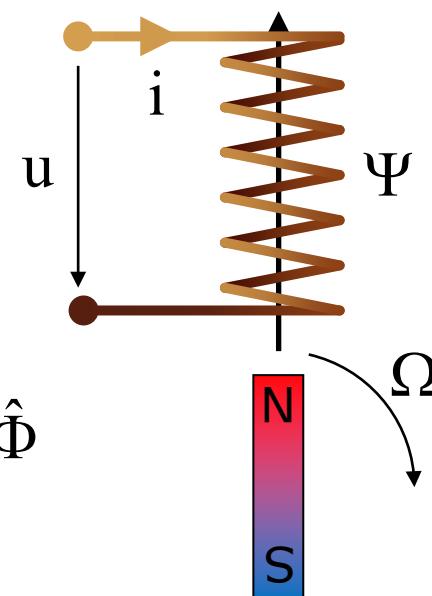
$$U_i = \frac{1}{\sqrt{2}} N \omega \hat{\Phi} = \sqrt{2} \pi N f \hat{\Phi} \approx 4.44 N f \hat{\Phi}$$

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

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

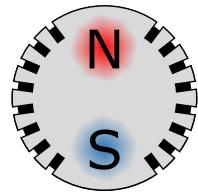
$$U_i = k_\Phi \Omega = k_{If} I_f \Omega$$

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

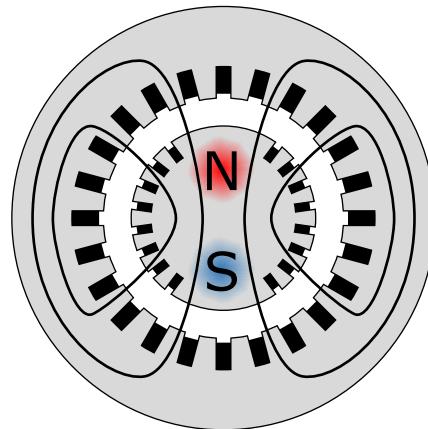


# Types de rotors

Pôles lisses (rotor cylindrique)

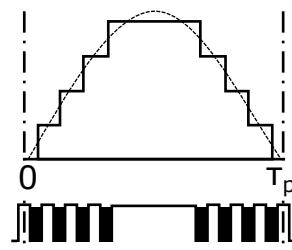
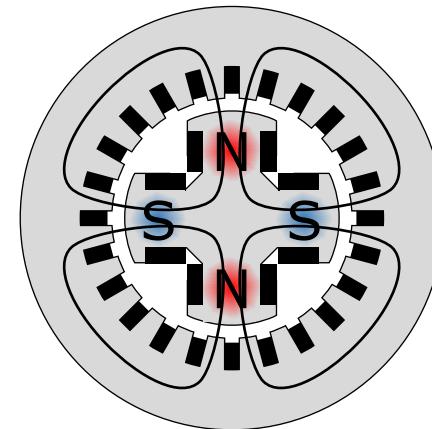
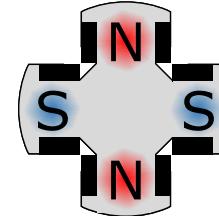


rotor

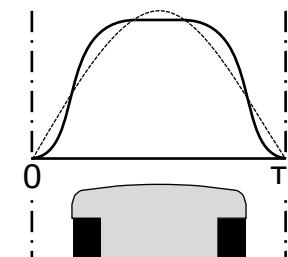


lignes de champ

Pôles saillants



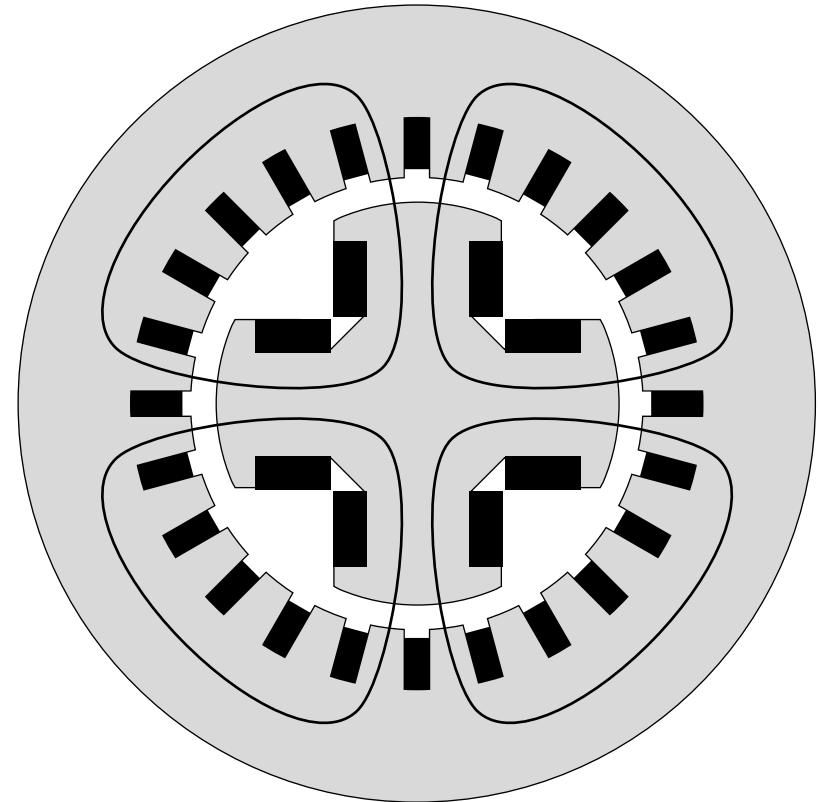
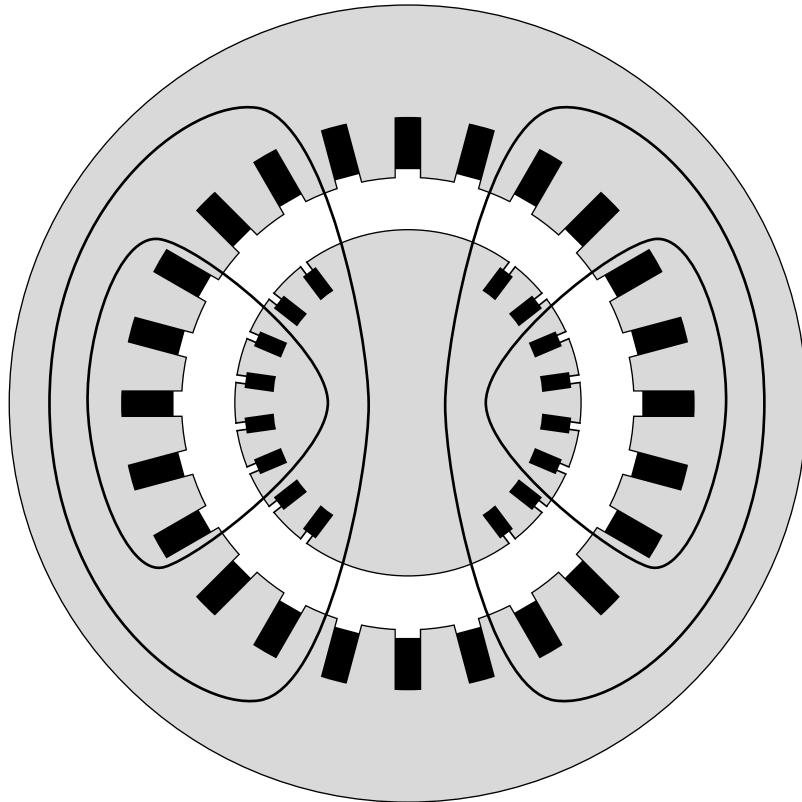
induction dans l'entrefer



# 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
- 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

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

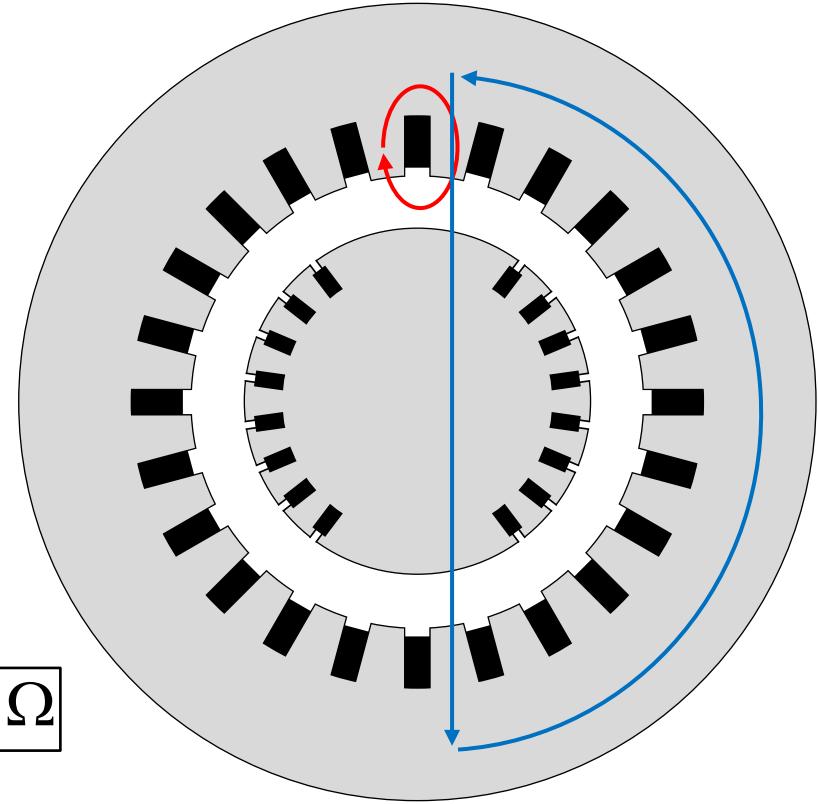
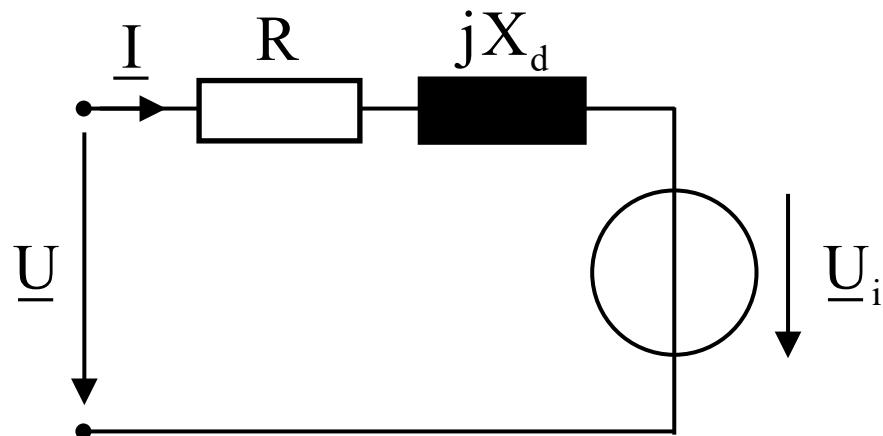
$$\frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + u_i$$

$$\underline{U} = R \underline{I} + j X_d \underline{I} + \underline{U}_i$$

$$X_d = X_\sigma + X_h$$

tension induite  
de mouvement

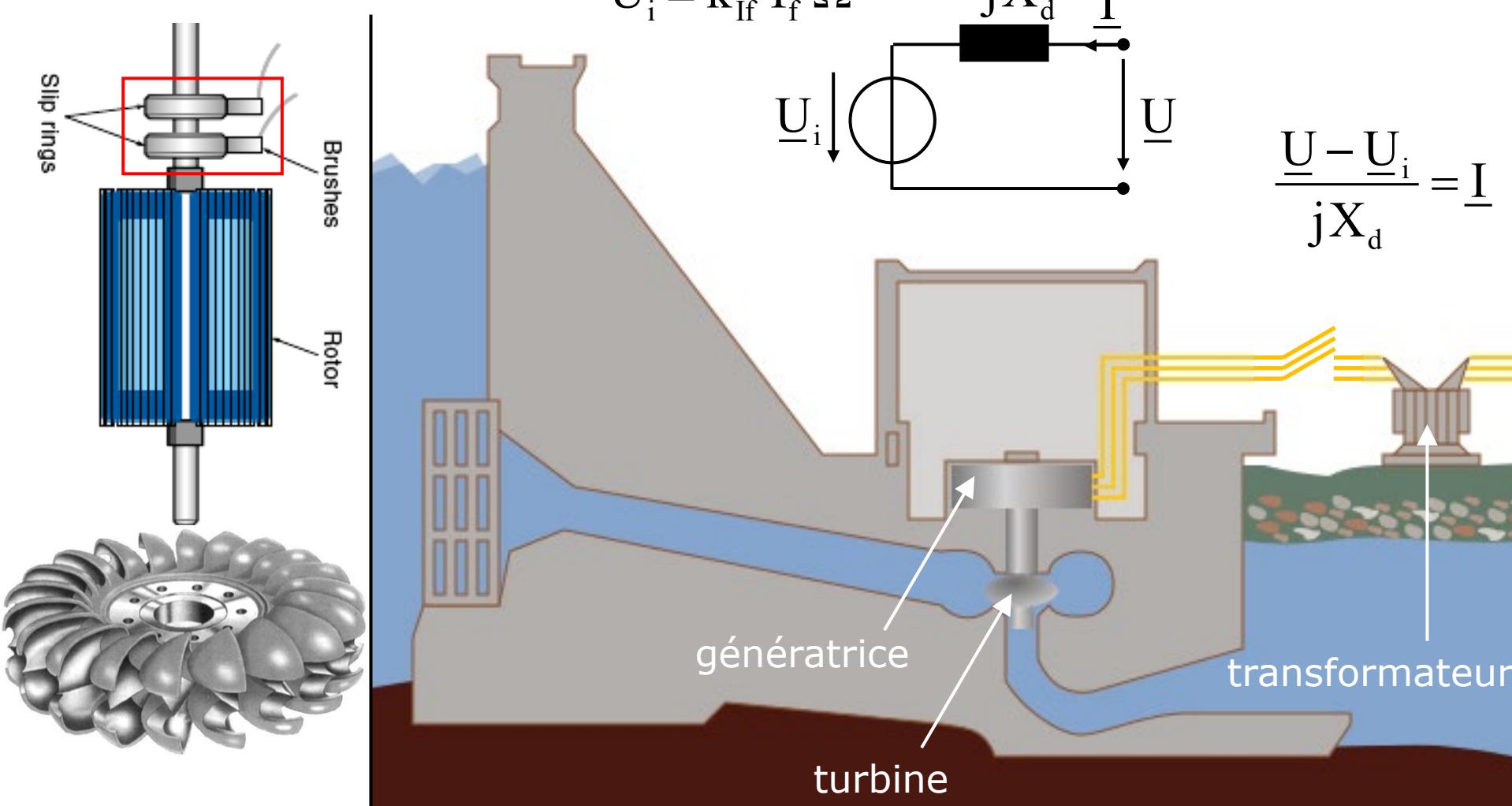
$$U_i = k_\Phi \Omega = k_{If} I_f \Omega$$



dans la moyenne et  
grande puissance  $R$   
est souvent négligée

$$R \ll X_d$$

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

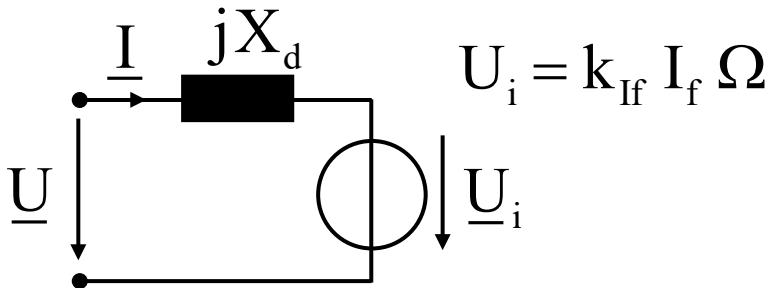


# Puissances triphasées

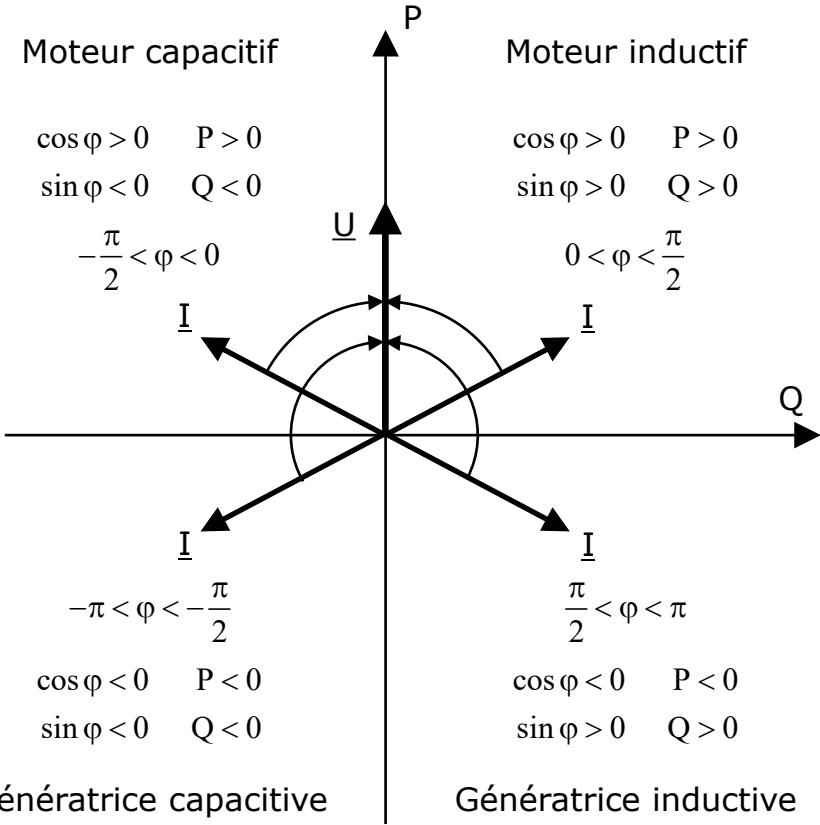
Puissance apparente  $S = 3 U_{\text{ph}} I_{\text{ph}} = \sqrt{3} U_{\text{ligne}} I_{\text{ligne}} = \sqrt{P^2 + Q^2}$  [VA]

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]



$$\frac{\underline{U} - \underline{U}_i}{j X_d} = \underline{I}$$



# Sommaire

- Principe de fonctionnement
- 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

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

$$P_j = 3RI^2$$

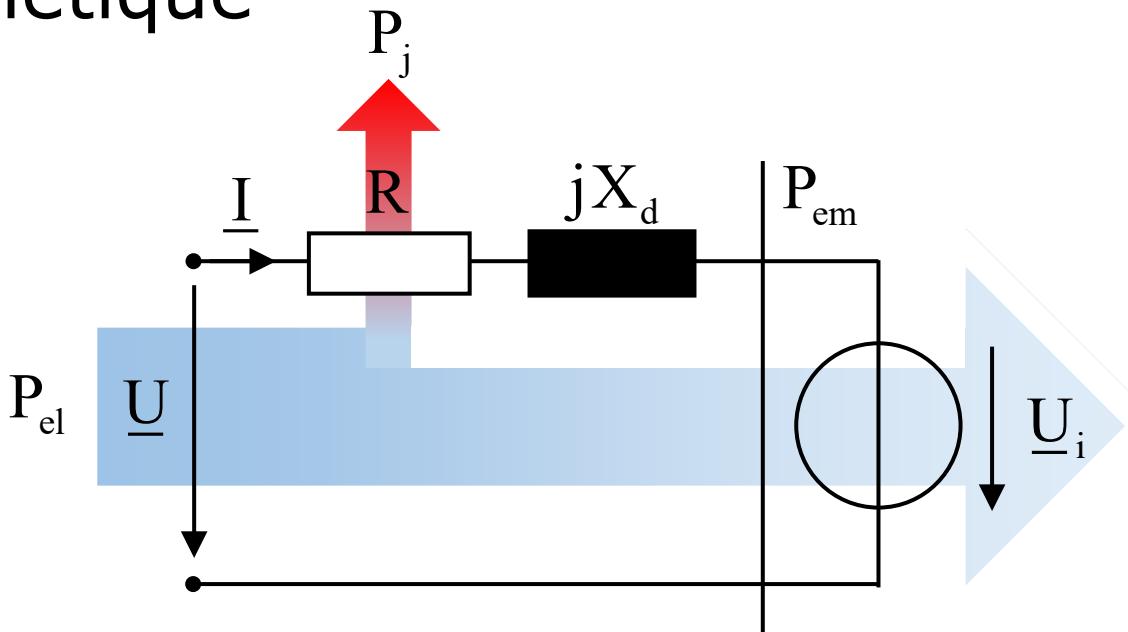
$$P_{\text{em}} = T_{\text{em}} \Omega_s$$

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

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

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

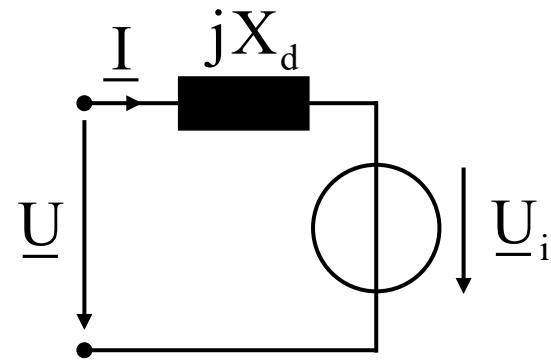
$$T_{\text{em}} = (3UI\cos\varphi - 3RI^2) \frac{1}{2\pi n_s} \xrightarrow{R \ll X_d} T_{\text{em}} = \frac{3UI\cos\varphi}{2\pi n_s}$$



# Couple électromagnétique

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

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



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

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

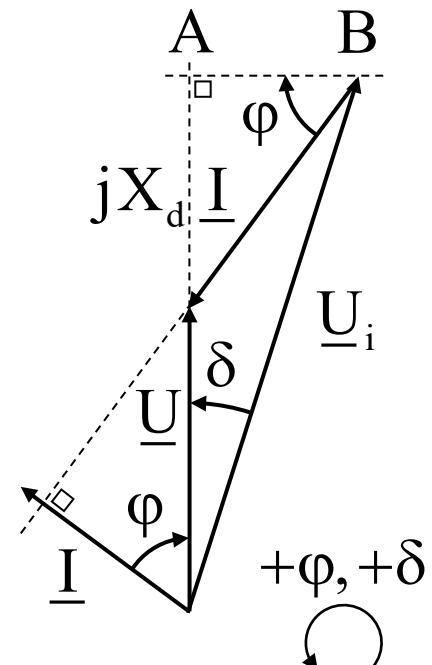
les parties imaginaires doivent s'annuler car  $U$  est réel

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

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

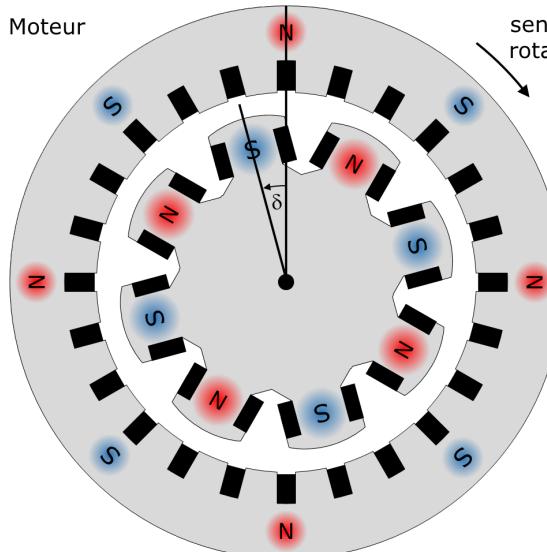
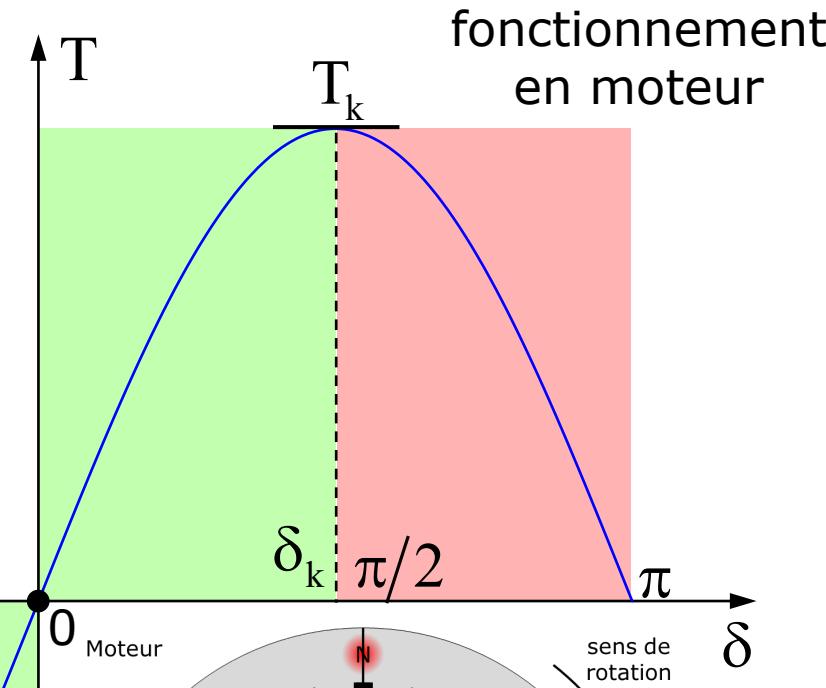
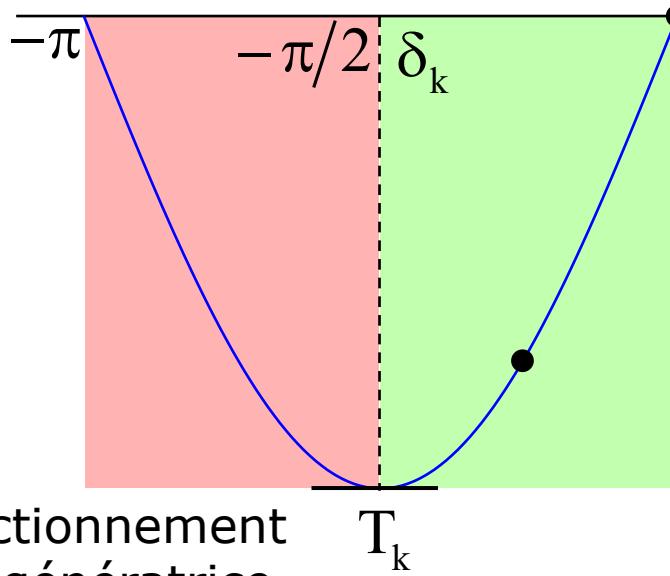
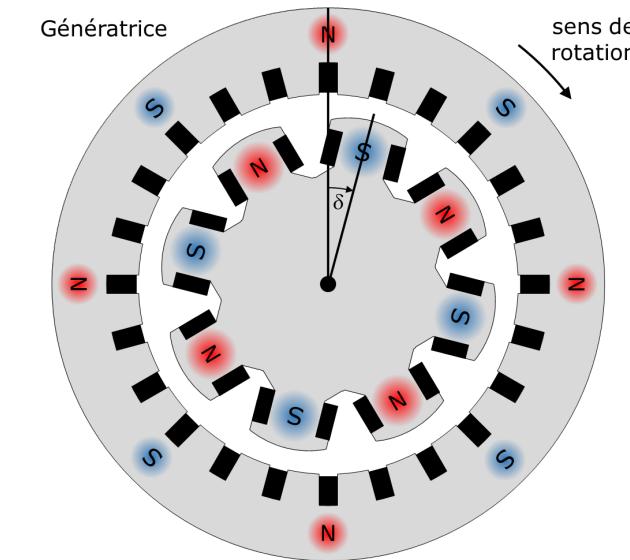
$$\boxed{T_{\text{em}} = 3 \frac{UU_i}{2\pi n_s X_d} \sin \delta}$$

$$\boxed{T_k = 3 \frac{UU_i}{2\pi n_s X_d}}$$



# Caractéristique de couple

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



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

# Sommaire

- Principe de fonctionnement
- 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

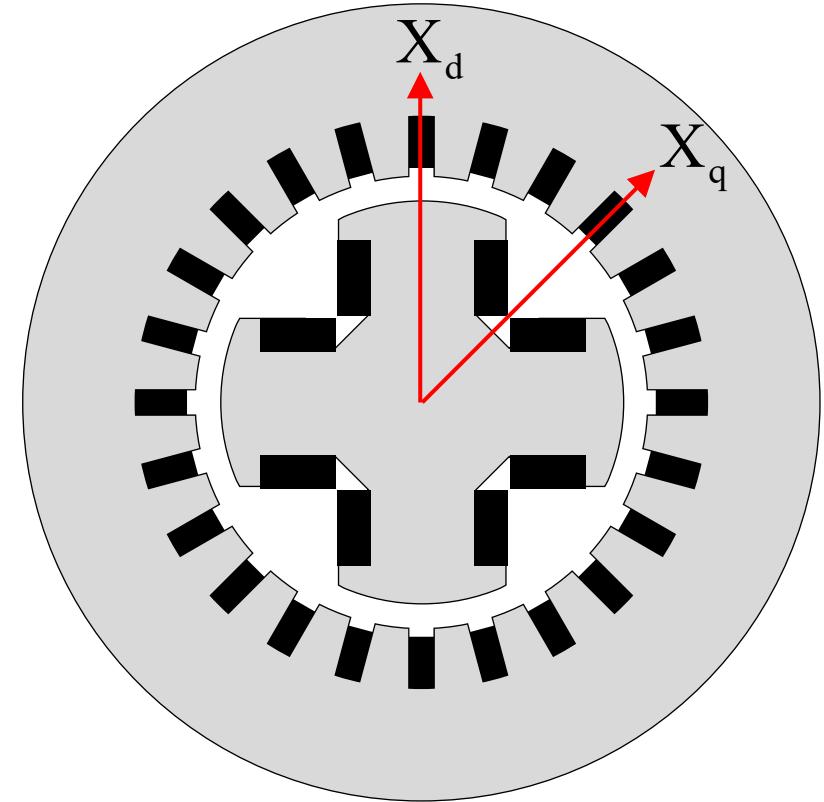
# Equation de tension et schéma équivalent

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

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 !

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

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

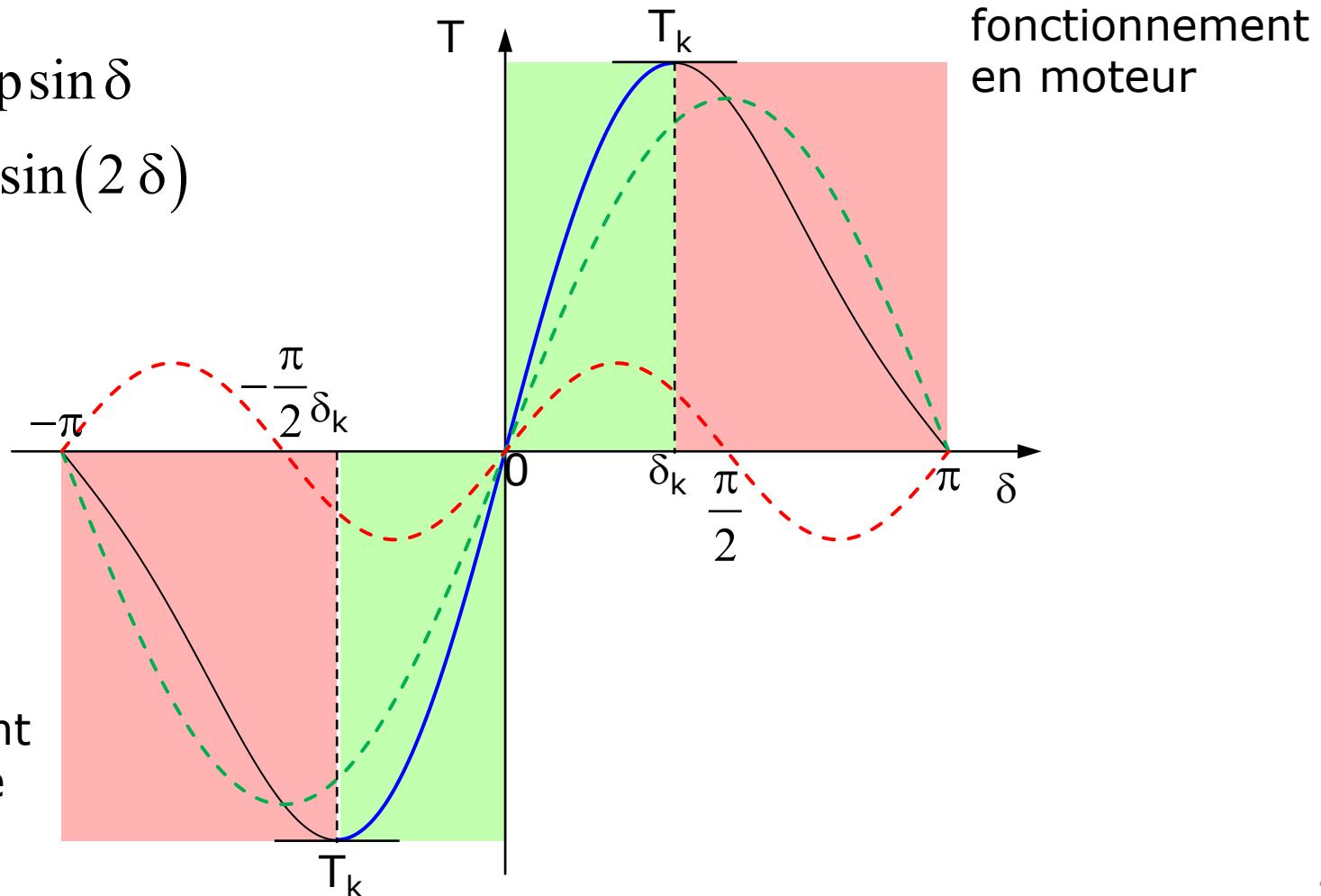
$$X_q = X_\sigma + X_{aq}$$

# Caractéristique de couple

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

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

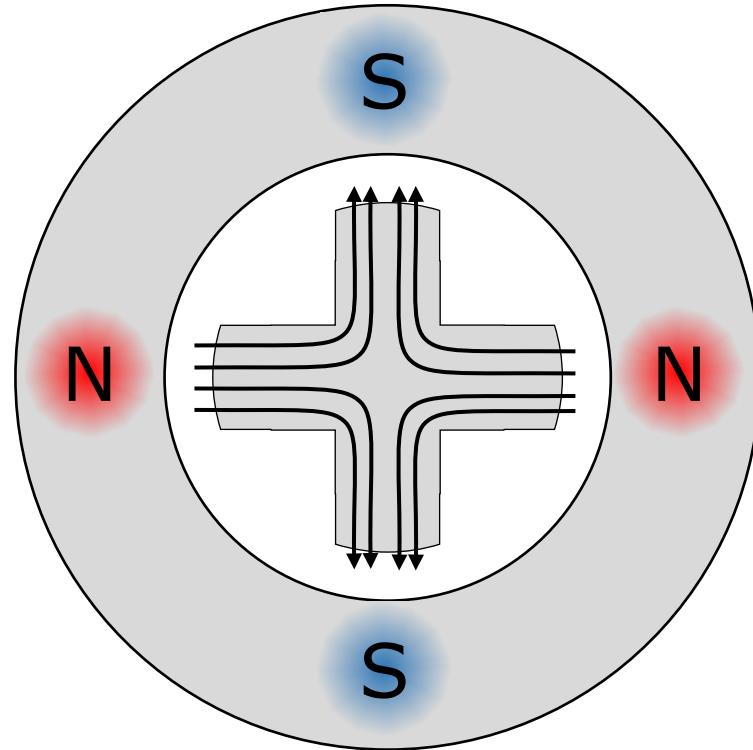
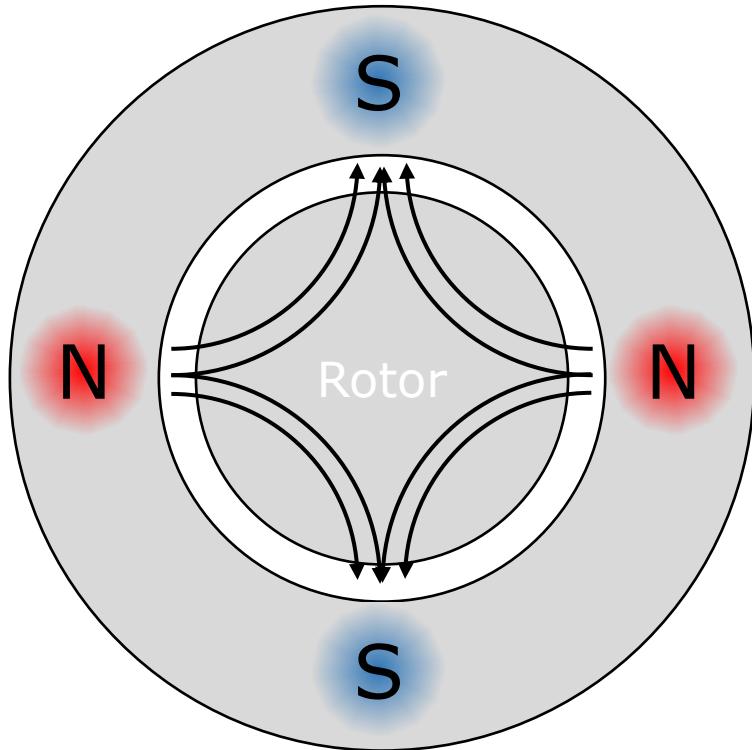
$$T_{\text{em}} = k \hat{B}_s^2 p \sin(2\delta)$$



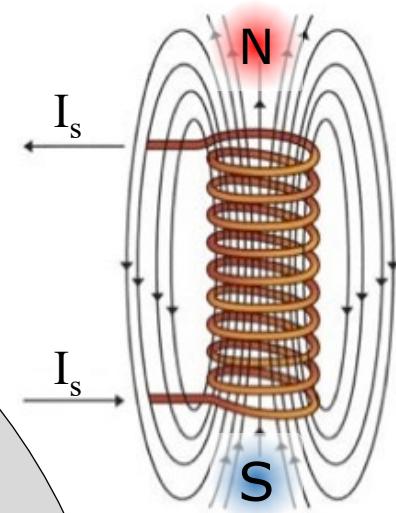
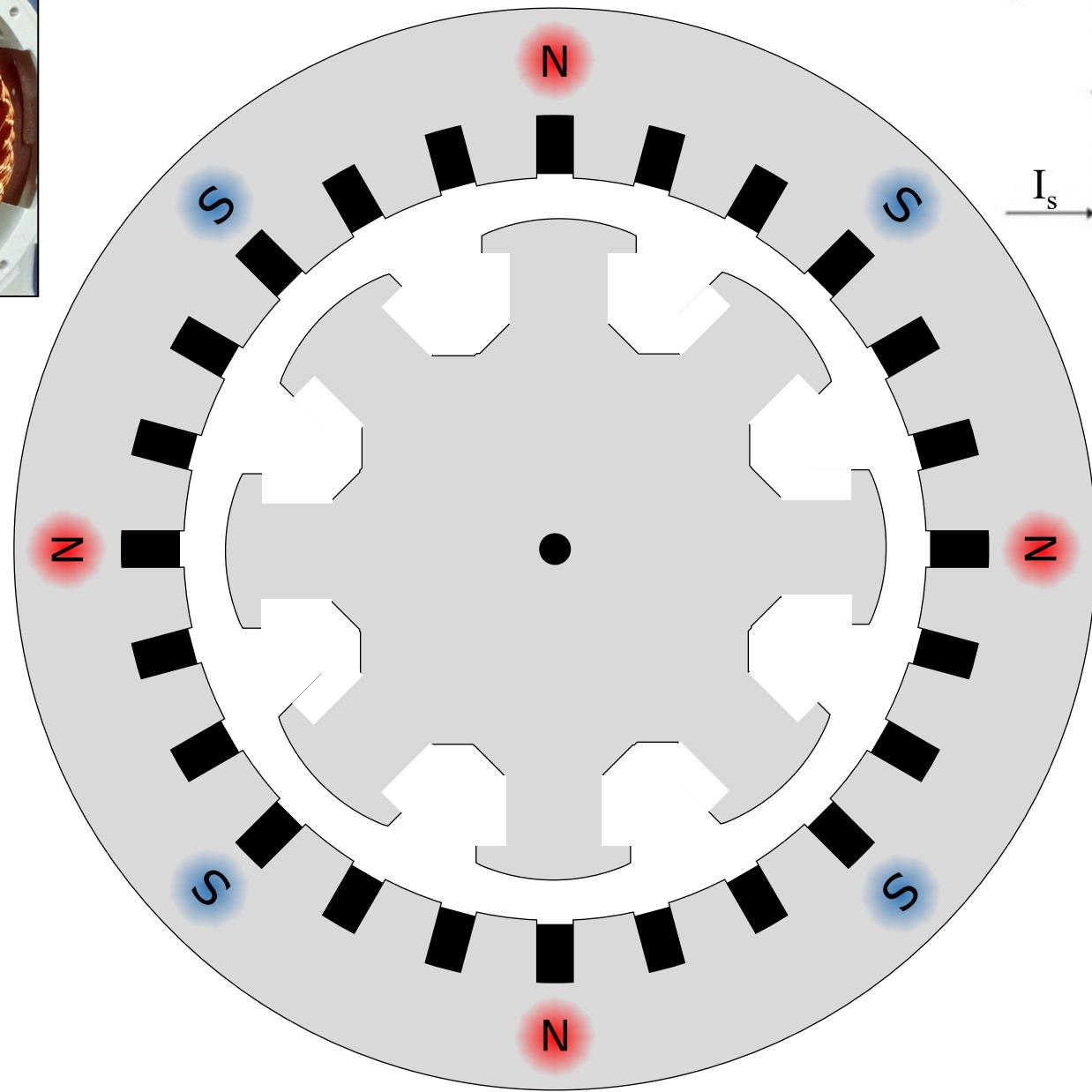
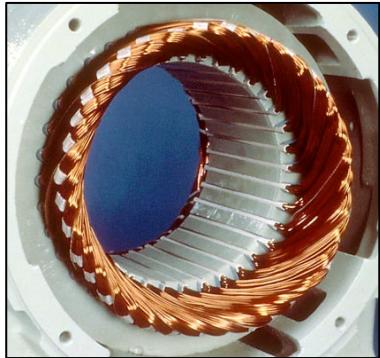
fonctionnement  
en génératrice

# Couple réluctant (éléments de base)

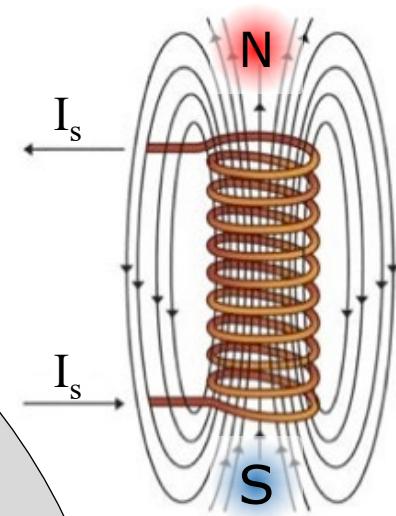
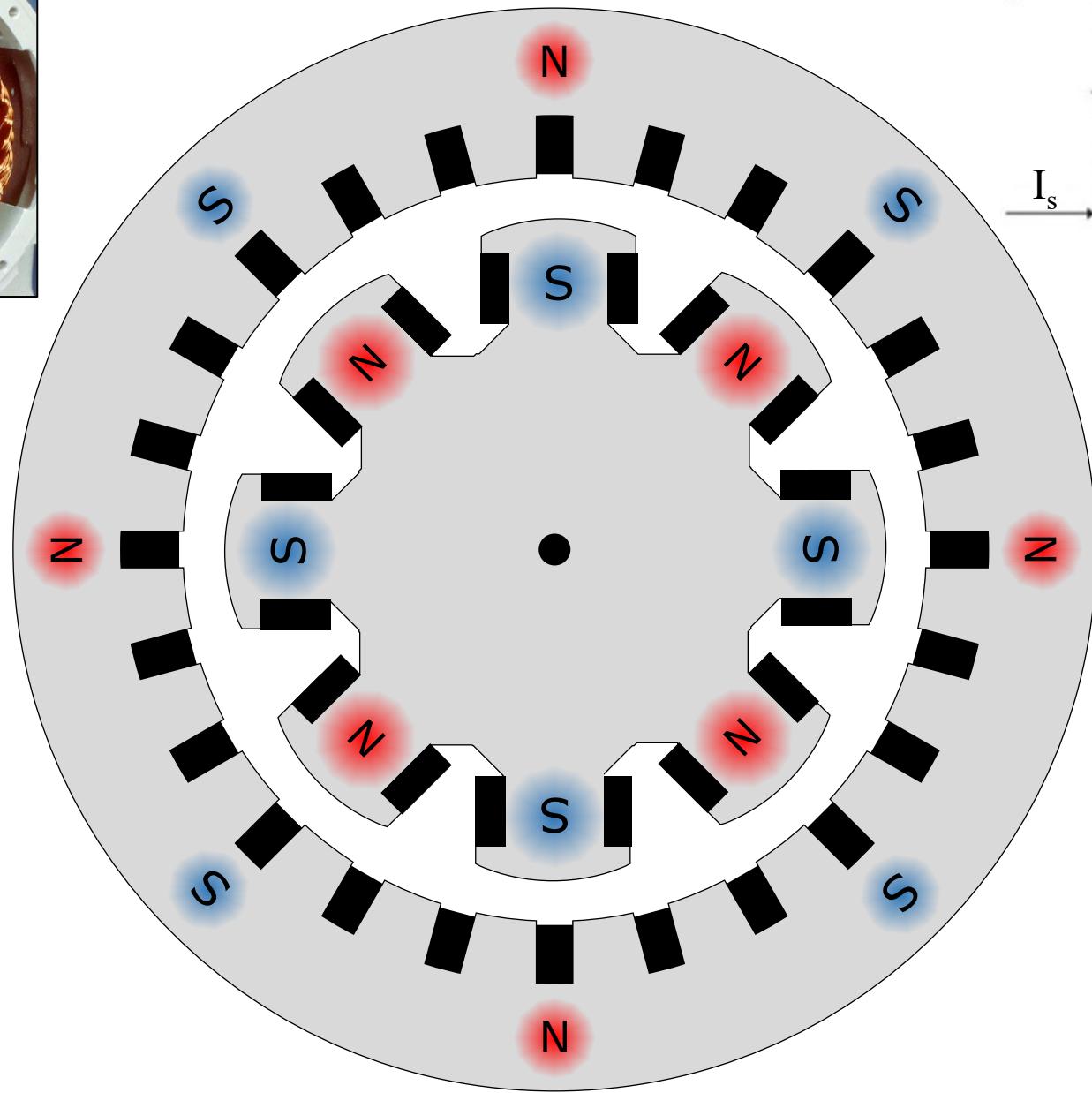
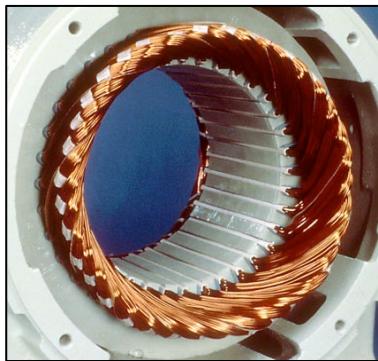
Action d'un champ magnétique sur une structure à réluctance variable



# Couple réluctant (éléments de base)



# Machine synchrone à pôles saillants

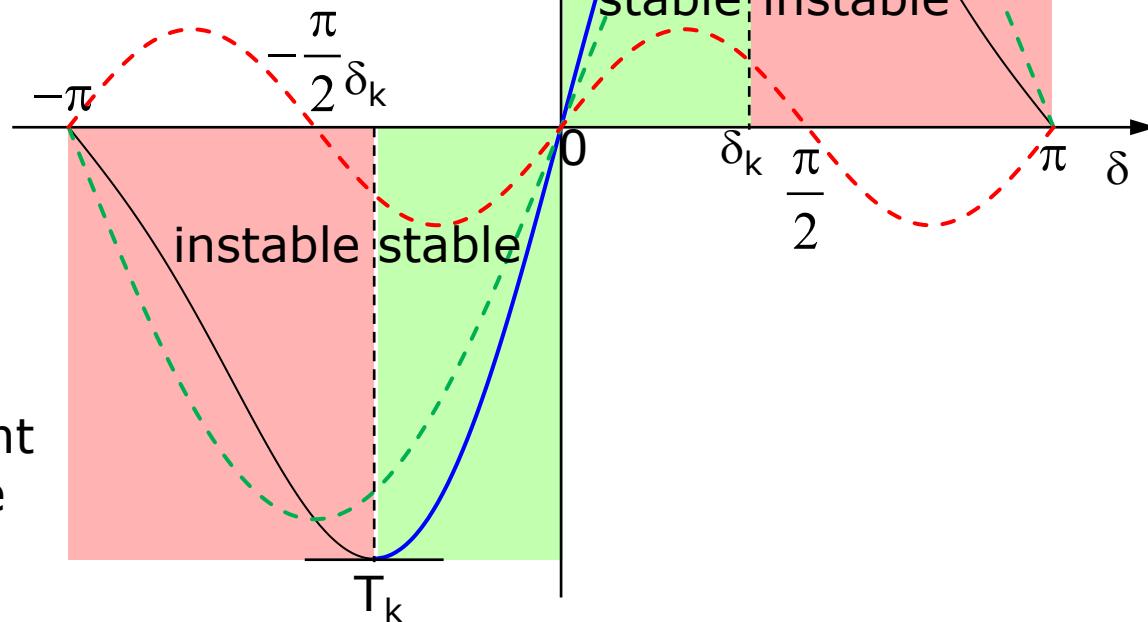


# Caractéristique de couple

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

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

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



fonctionnement  
en génératrice

fonctionnement  
en moteur

# Sommaire

- Principe de fonctionnement
- 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

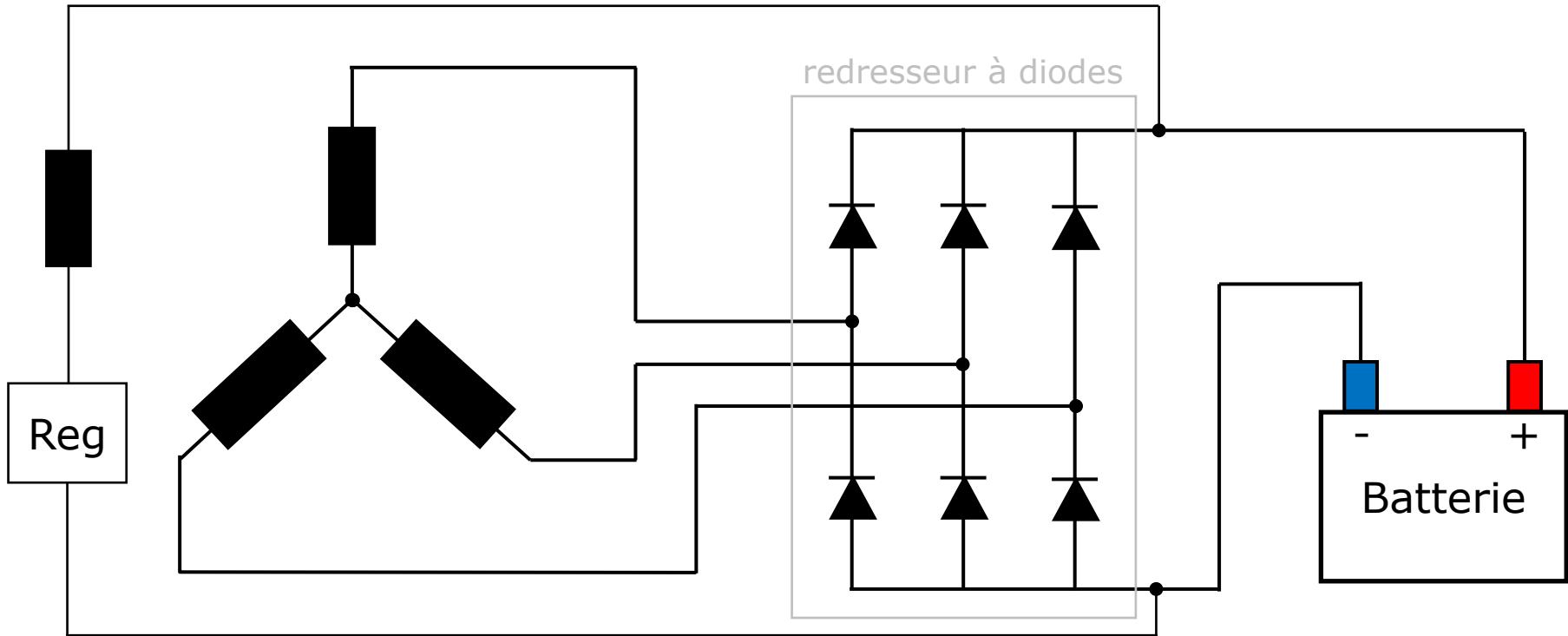
# Alternateur de voiture

14.1 V<sub>DC</sub>

3 ~ → DC

1000 – 6500 tr / min → p = 6 ou 8

$U_i \sim (I_f, \Omega)$  → Régler l'excitation



# Sommaire

- Principe de fonctionnement
- 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



Générateur synchrone



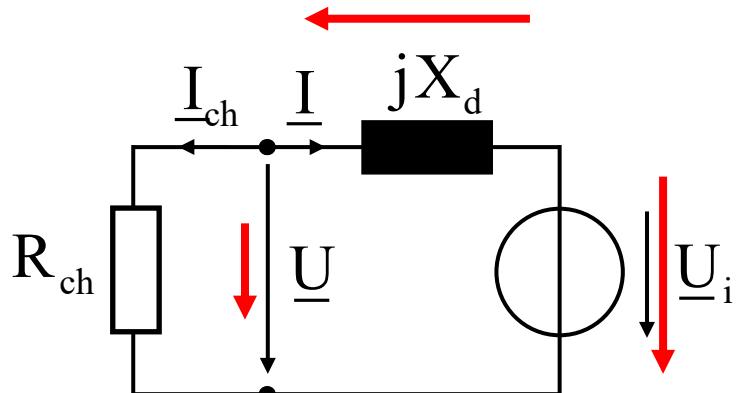
GROUPE ÉLECTROGÈNE TRIPHASÉ  
21KVA MOTEUR DIESEL 1500T/MN

Groupe électrogène super insonorisé  
51 dB(A)

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

# Groupe électrogène

Générateur synchrone



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

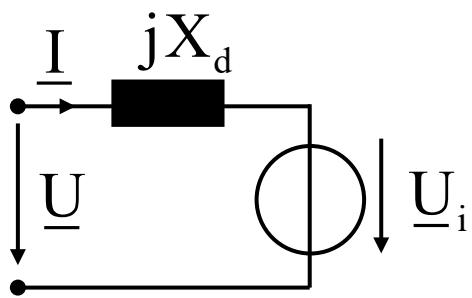
GROUPE ÉLECTROGÈNE TRIPHASÉ  
21KVA MOTEUR DIESEL 1500T/MN

Groupe électrogène super insonorisé  
51 dB(A)

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

# Sommaire

- Principe de fonctionnement
- 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



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

Correspond à la position mécanique du rotor !

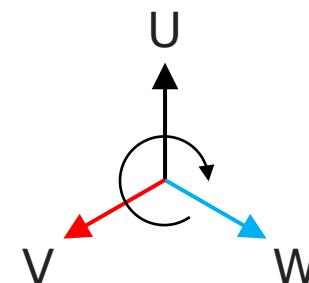
$I_{f0}$  = courant d'excitation à vide.

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

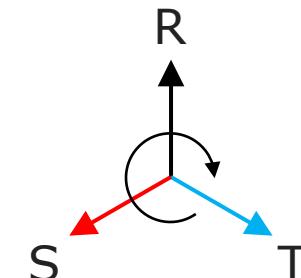
# Synchronisation au réseau

## Exemple : centrale hydro-électrique

générateur

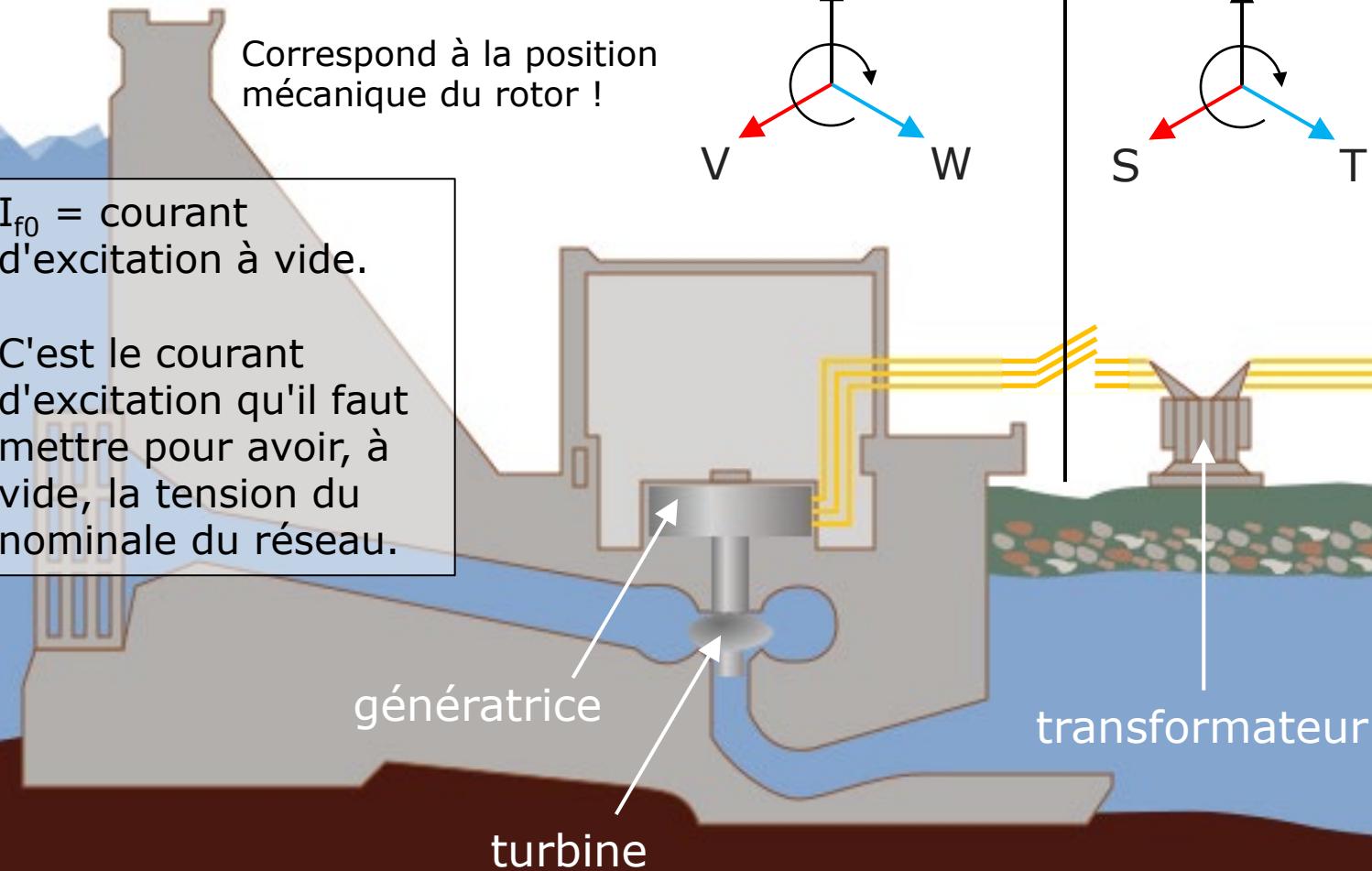


réseau



Conditions

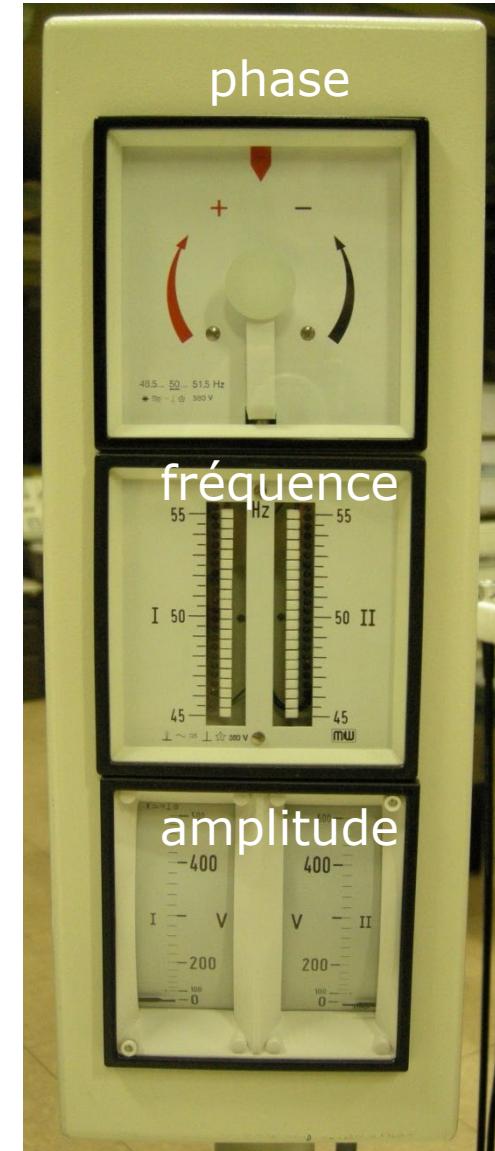
- Vitesse
- Amplitude
- Phase
- Sens



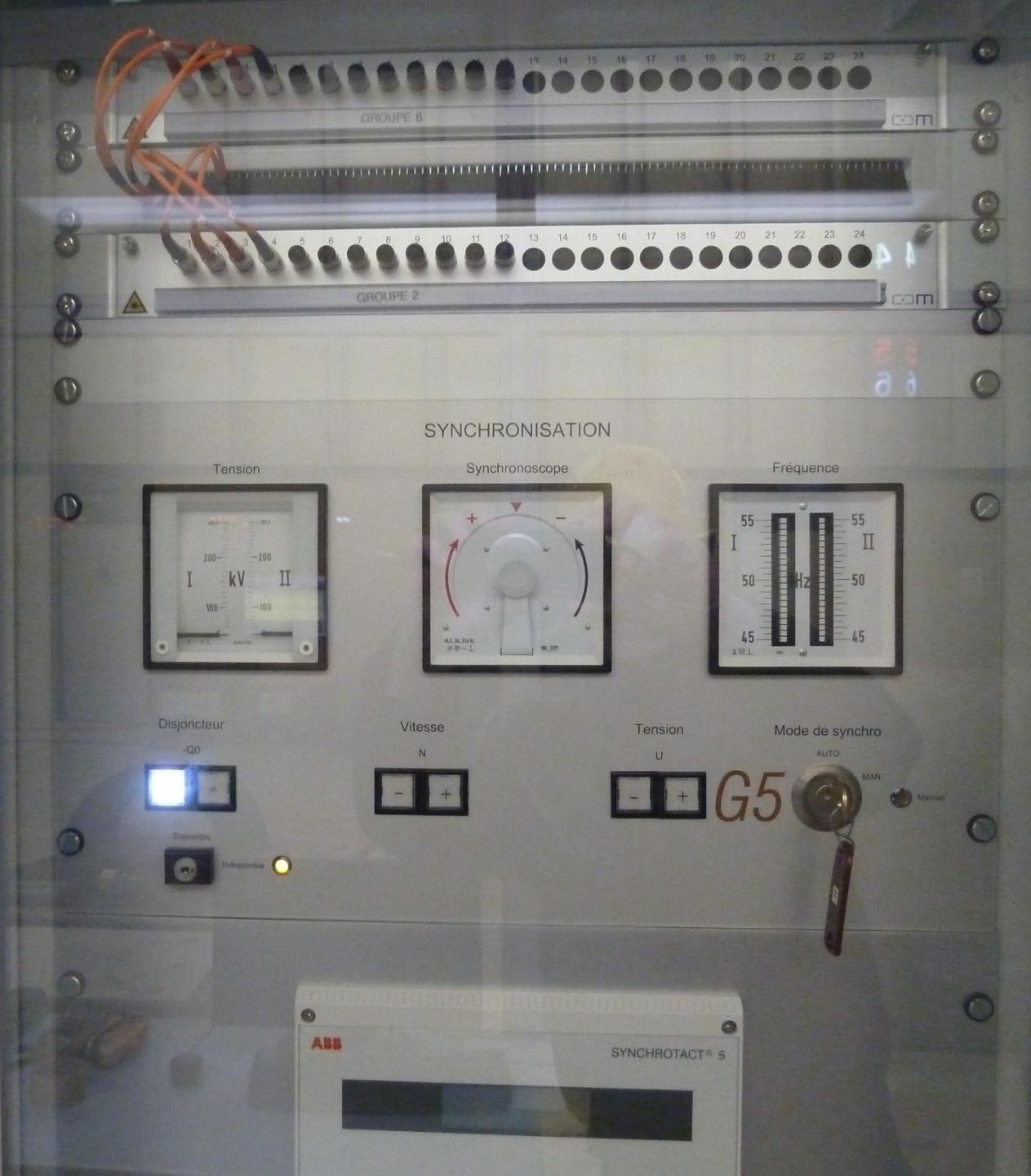
# Synchronisation au réseau

Conditions :

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



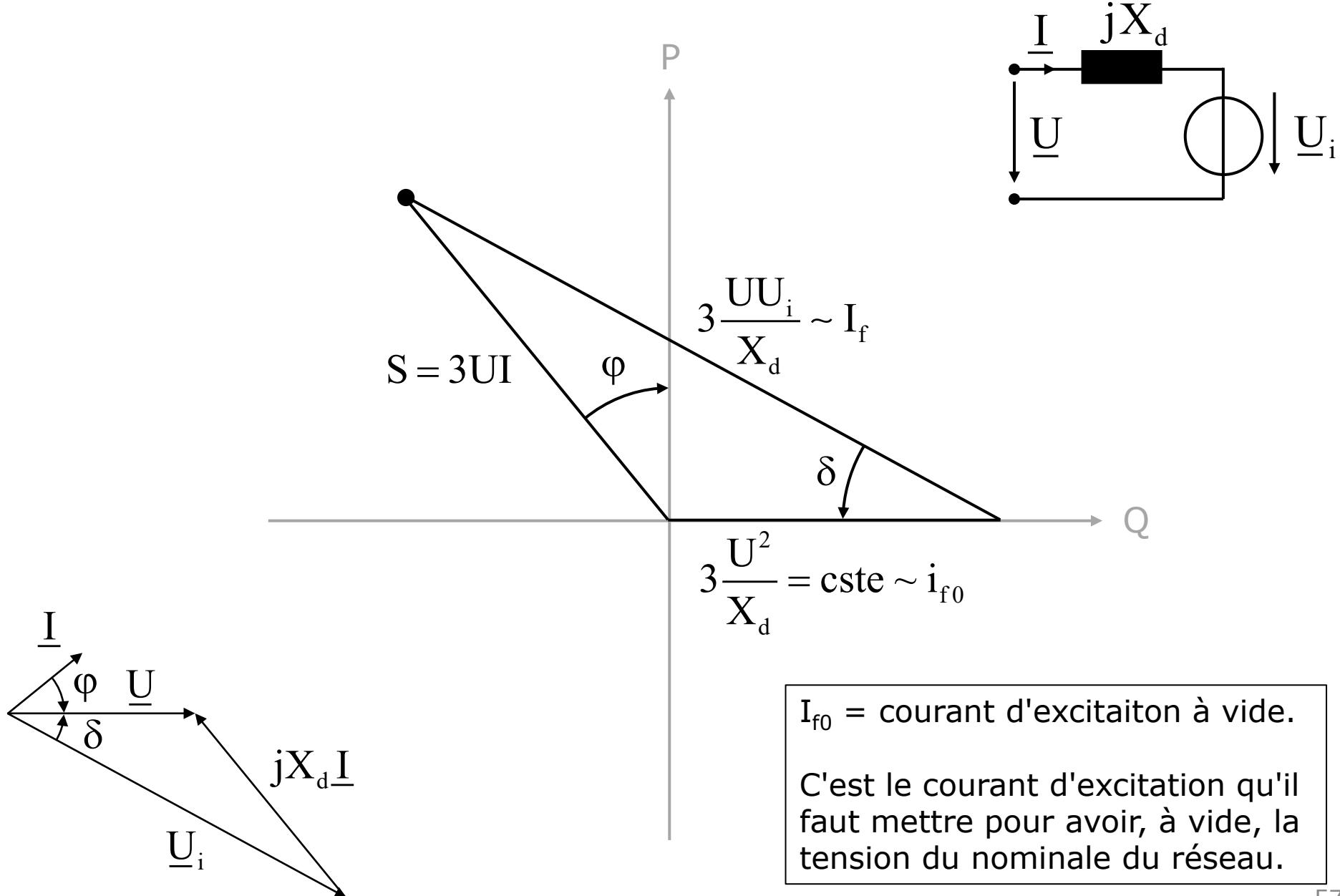




# Sommaire

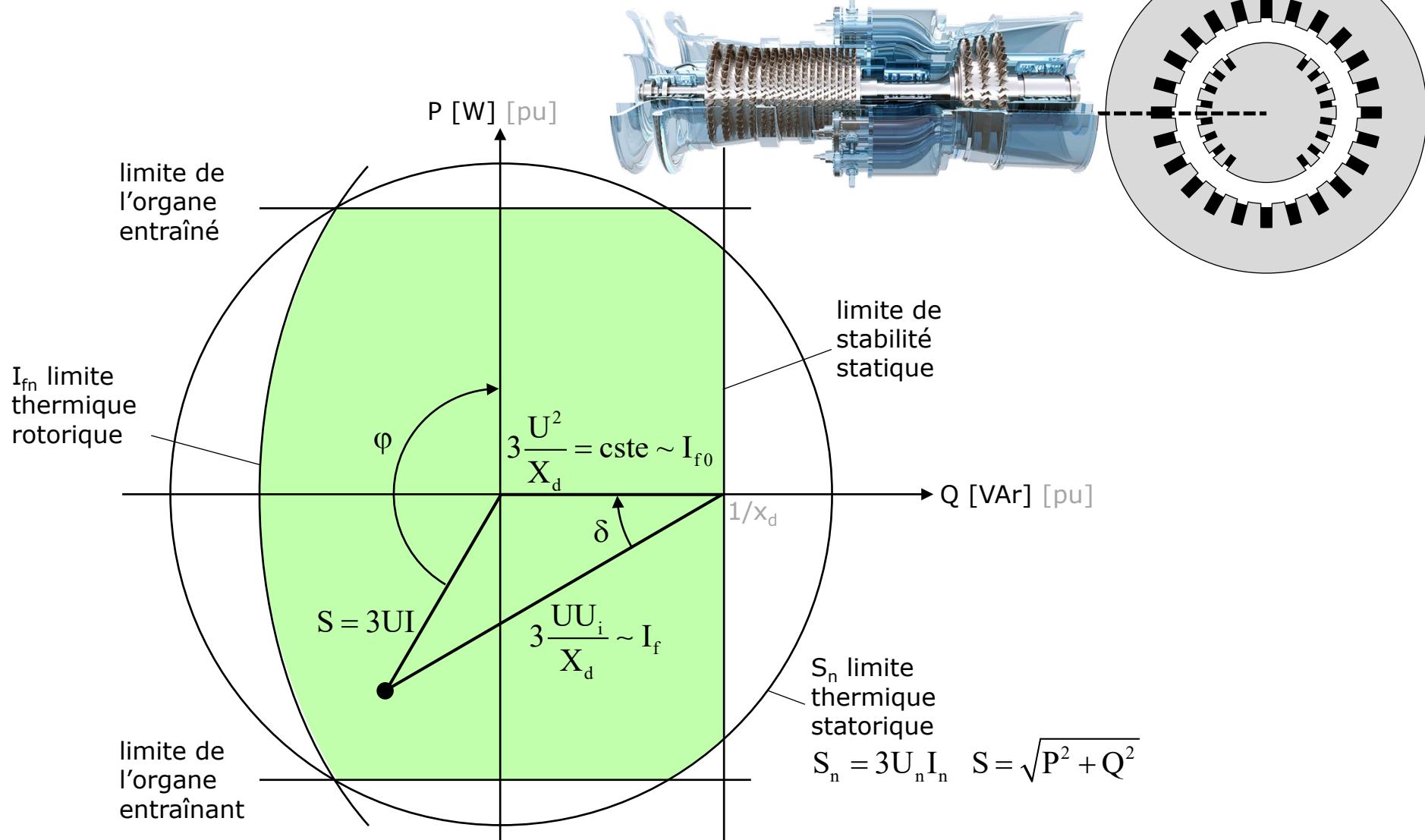
- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement
- Machine à pôles lisses
  - Equation de tension et schéma équivalent
  - Bilan de puissance et  
Caractéristique de couple
- Machine à pôles saillants
  - Equation de tension
  - Caractéristique de couple
- Exemples
  - Alternateur de voiture
  - 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

