

Machines électriques

Eléments de base des machines
et rappels

André Hodder

Sommaire

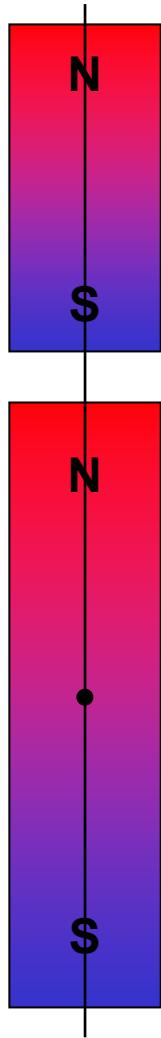
- Introduction
- Circuit magnétique
- Transformateur
- Eléments de base des machines
- Machine asynchrone
- Machine à courant continu
- Machine synchrone
- Moteur synchrone à aimants permanents
- Moteur pas à pas

Sommaire

- Couple électromagnétique
 - Couple en fonction des inductances
- Champ tournant
- Rappels
 - Couplage étoile-triangle
 - Puissances
 - Plaque signalétique triphasée
- Nombre de paires de pôles
- Enroulements répartis

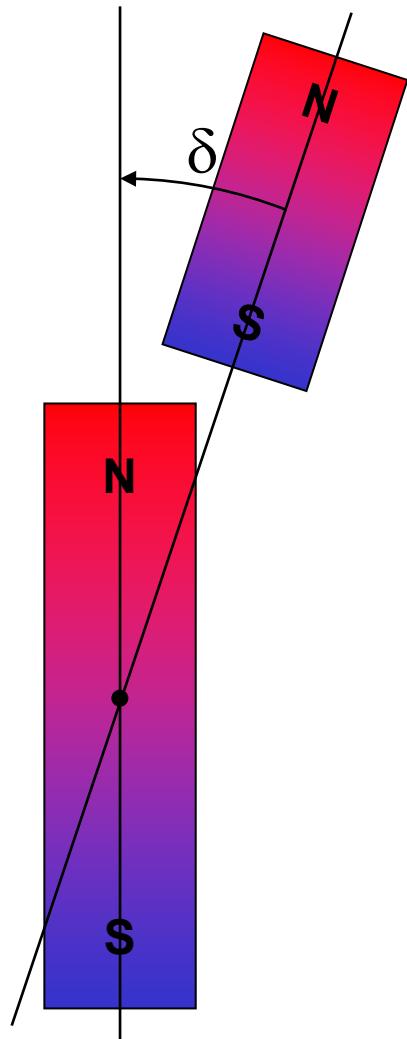
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



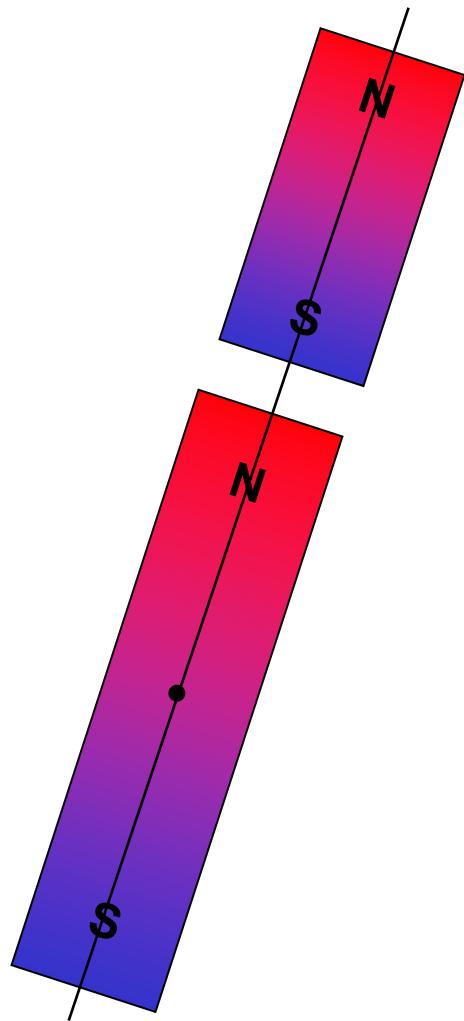
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



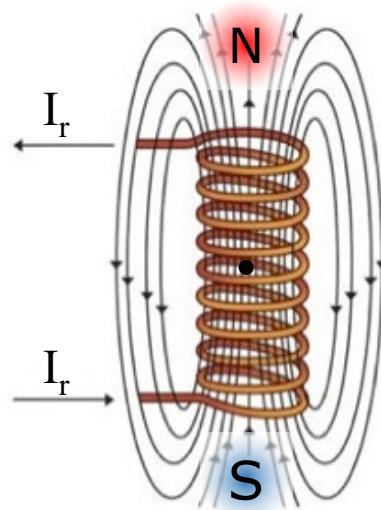
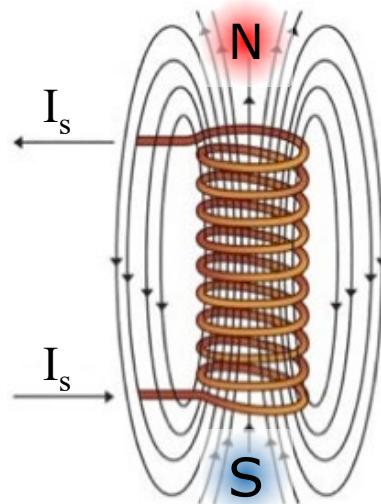
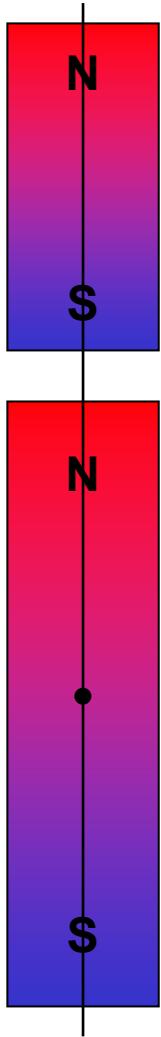
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



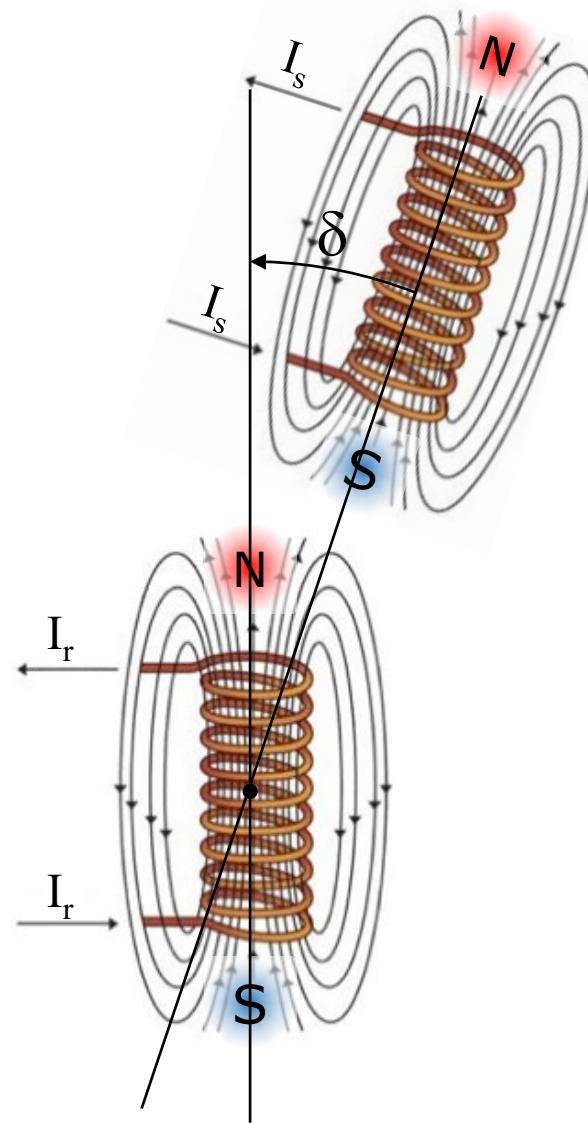
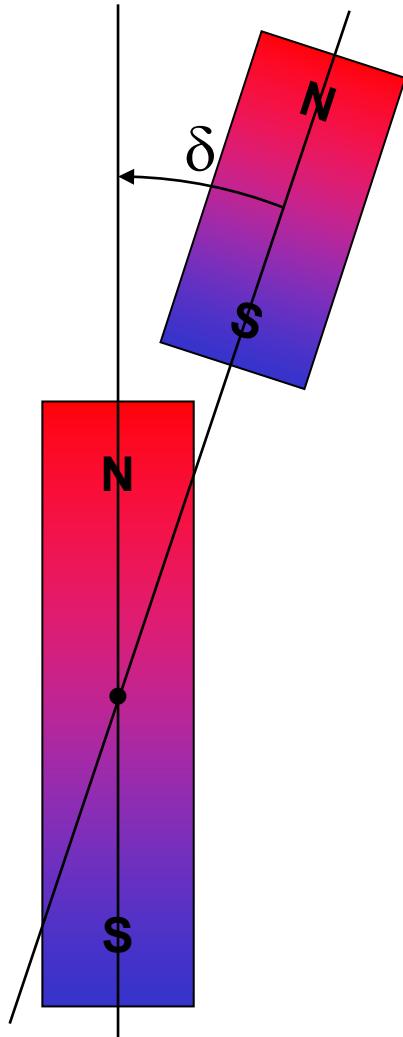
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



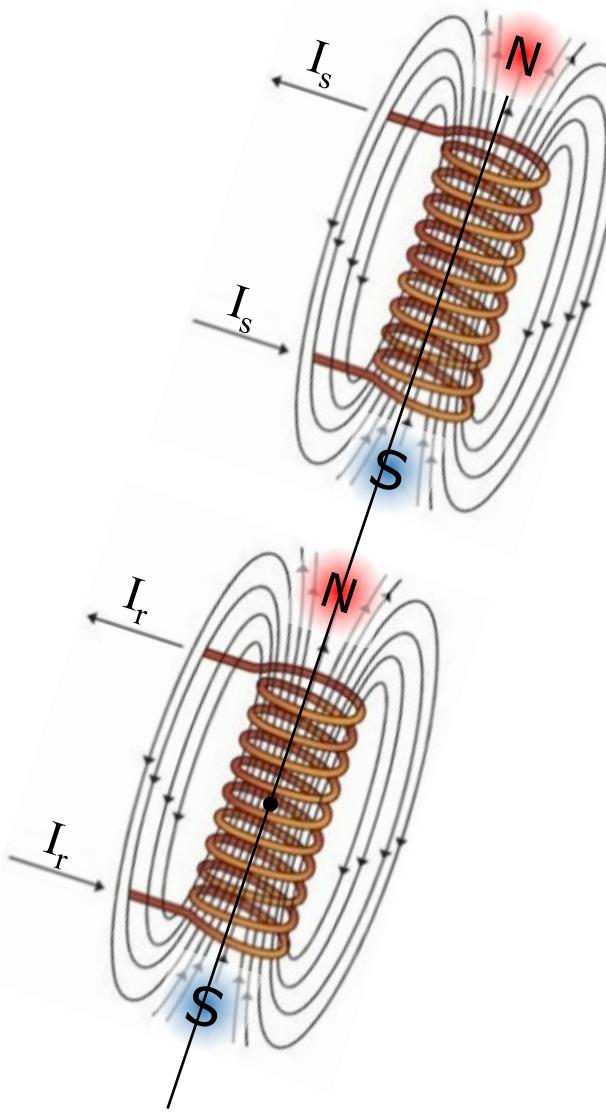
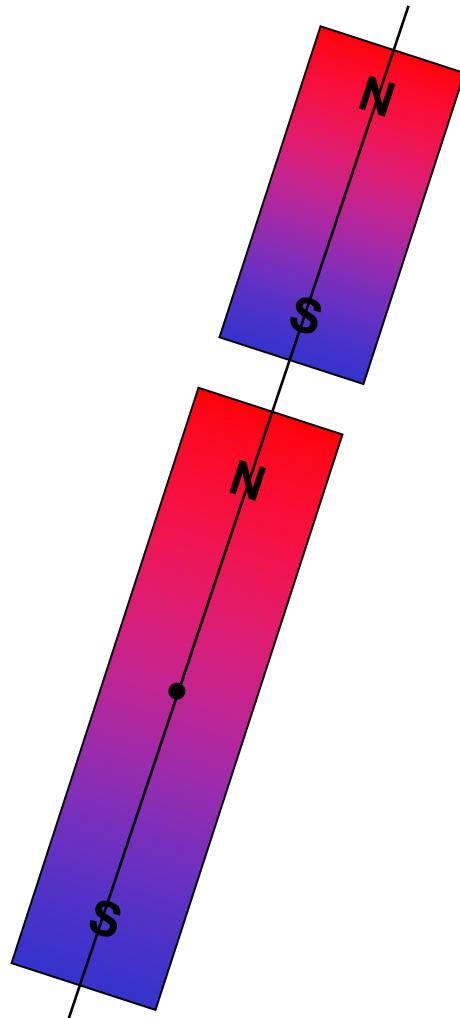
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques

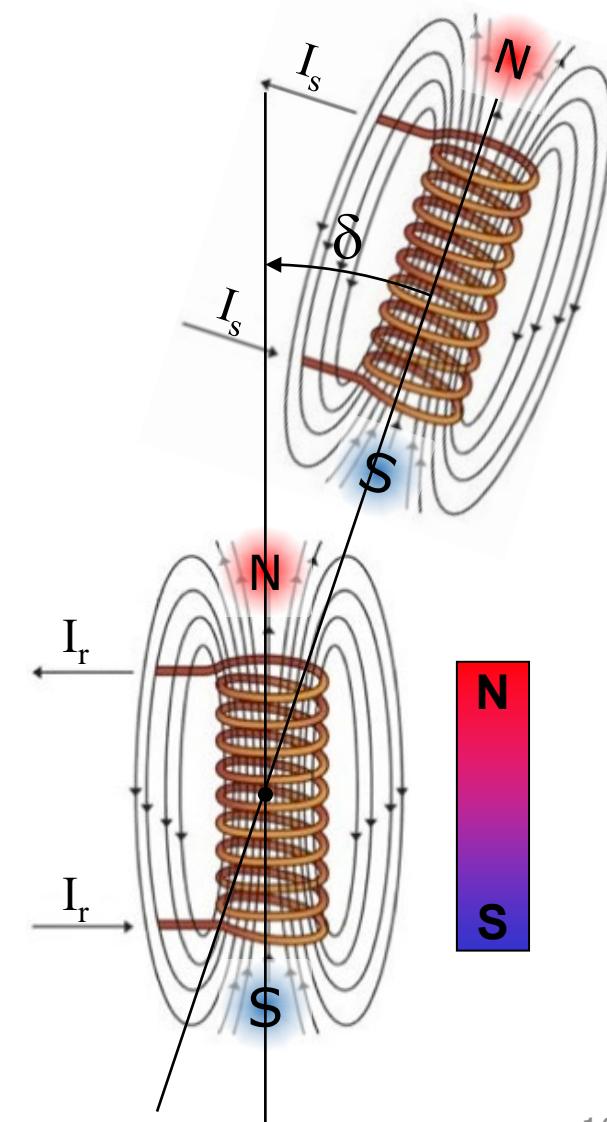
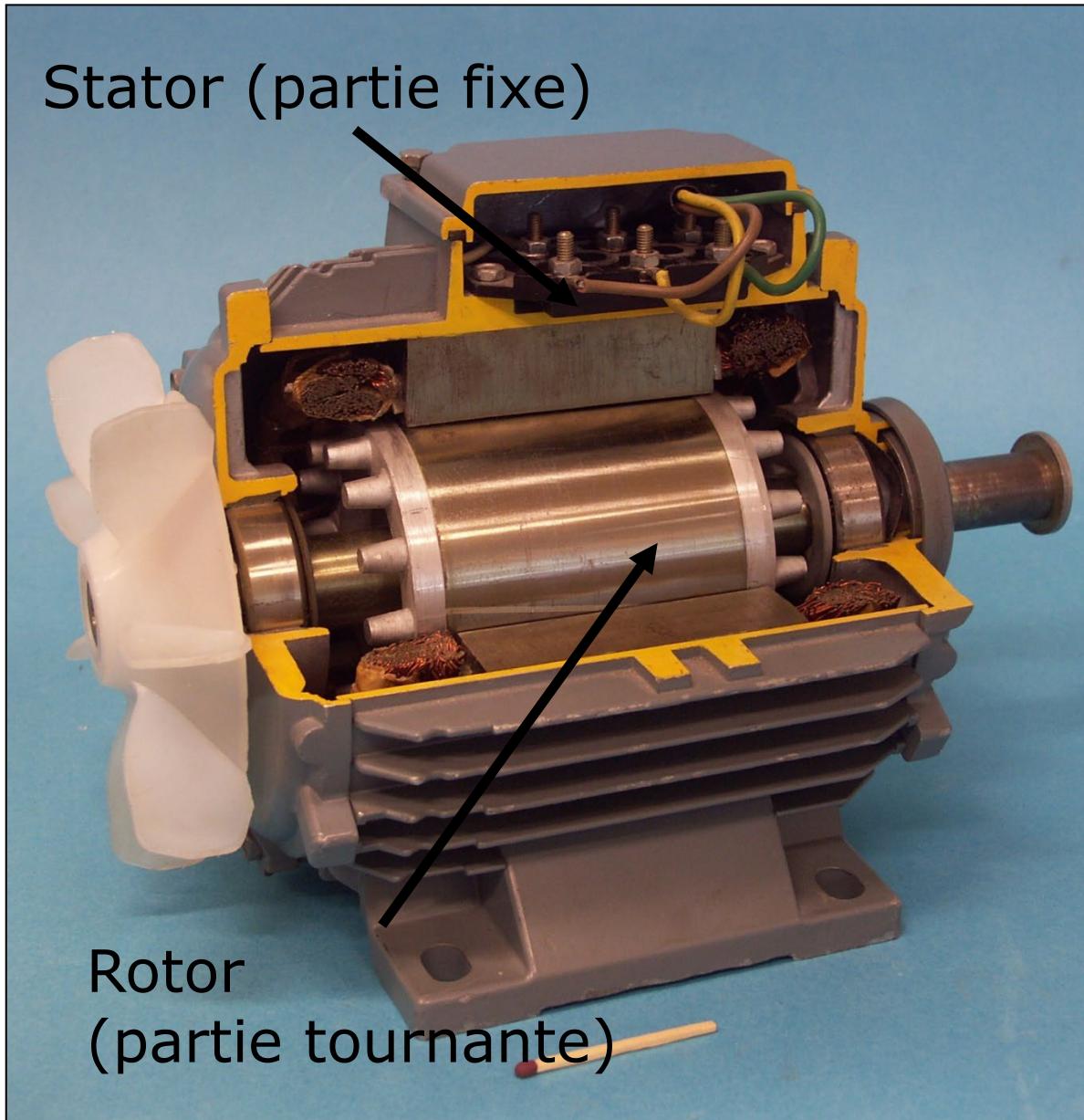


Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



Constitution d'une machine électrique



Constitution d'une machine électrique

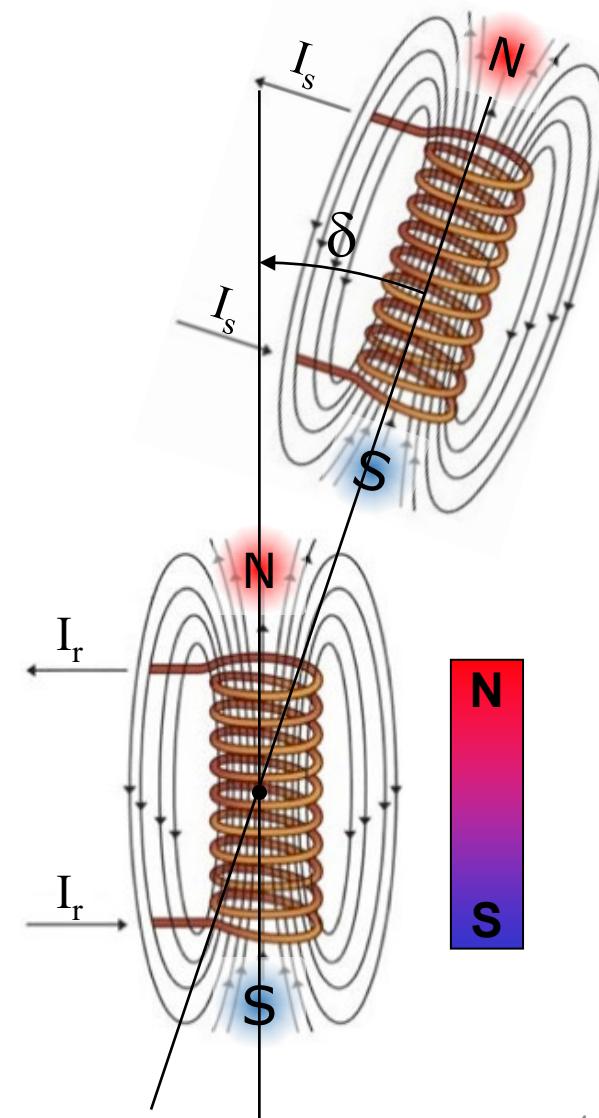
Outrunner

Rotor

(partie tournante)

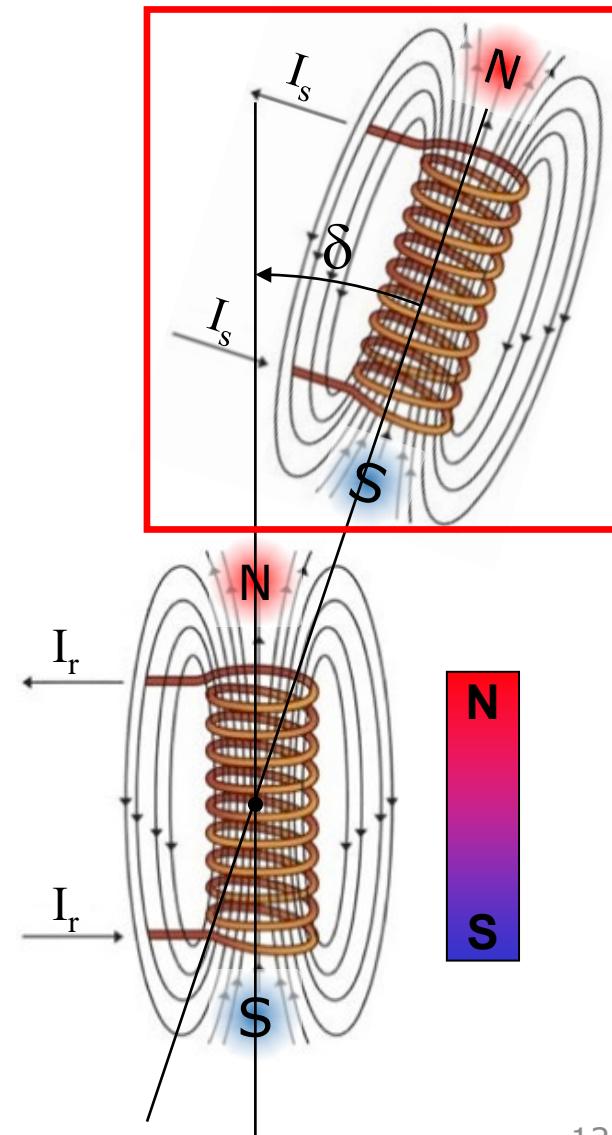
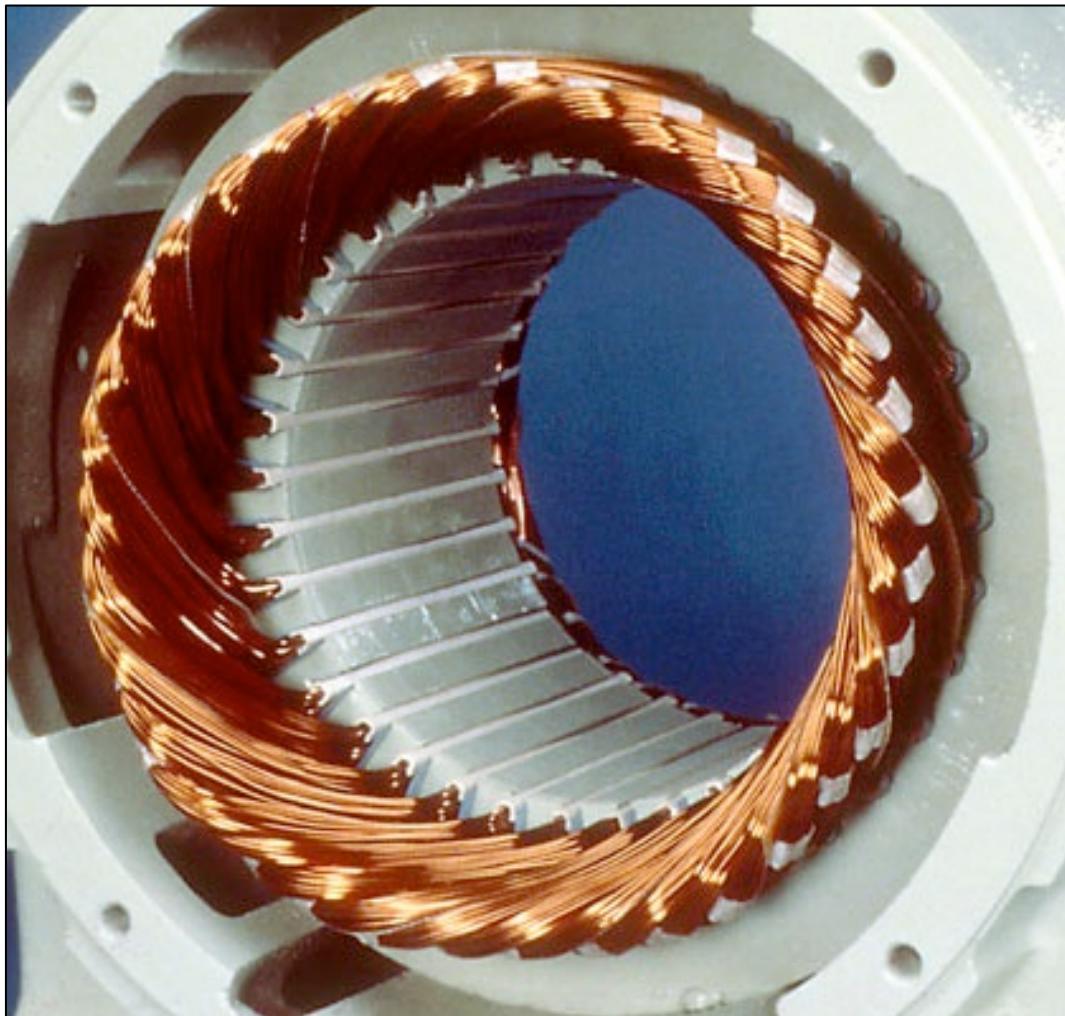


Stator (partie fixe)

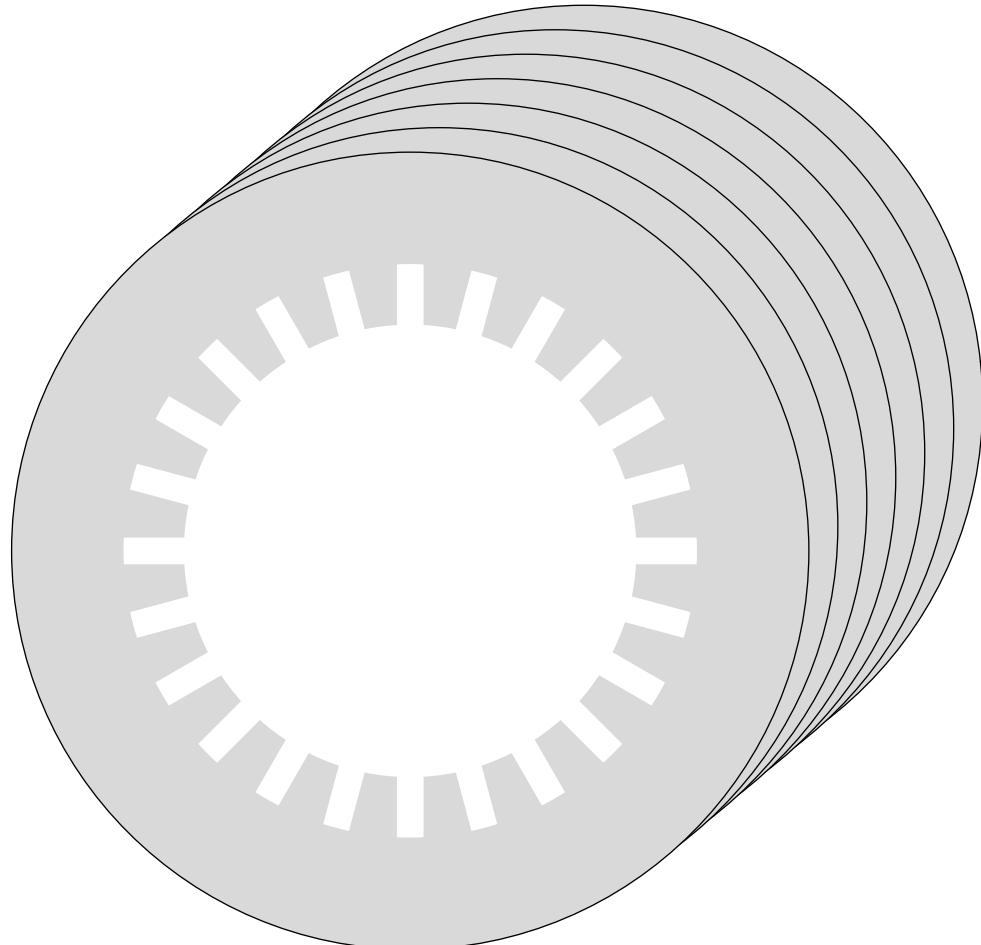


Champ d'induction magnétique créée au stator

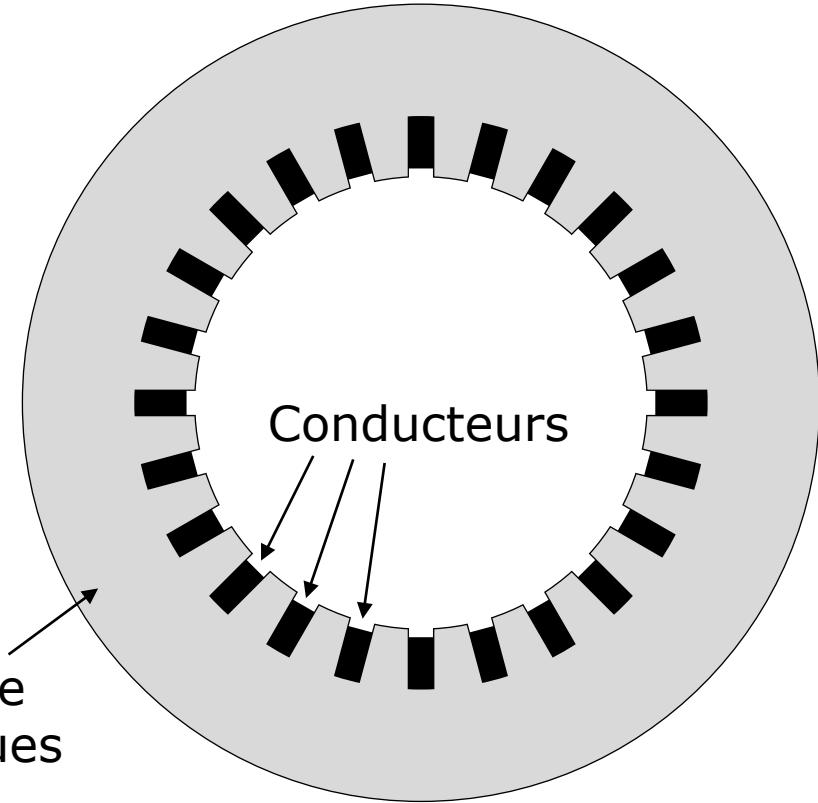
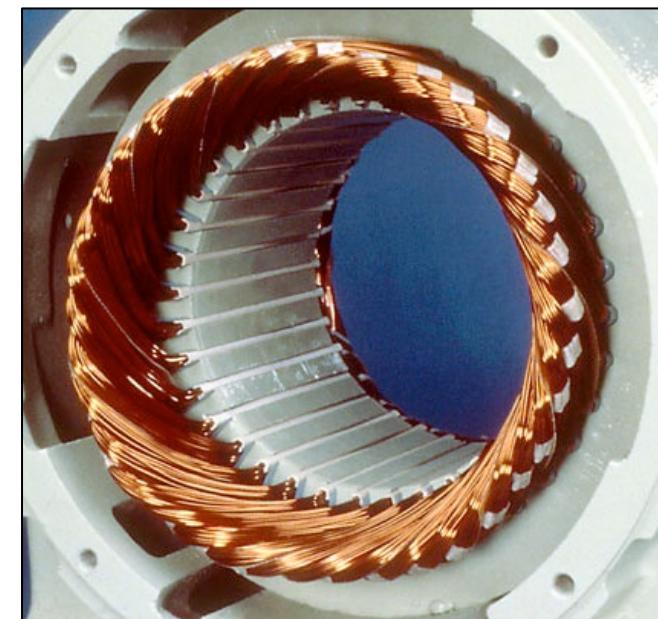
Le champ d'induction magnétique au stator est créé par un courant électrique présent dans un enroulement (bobines).



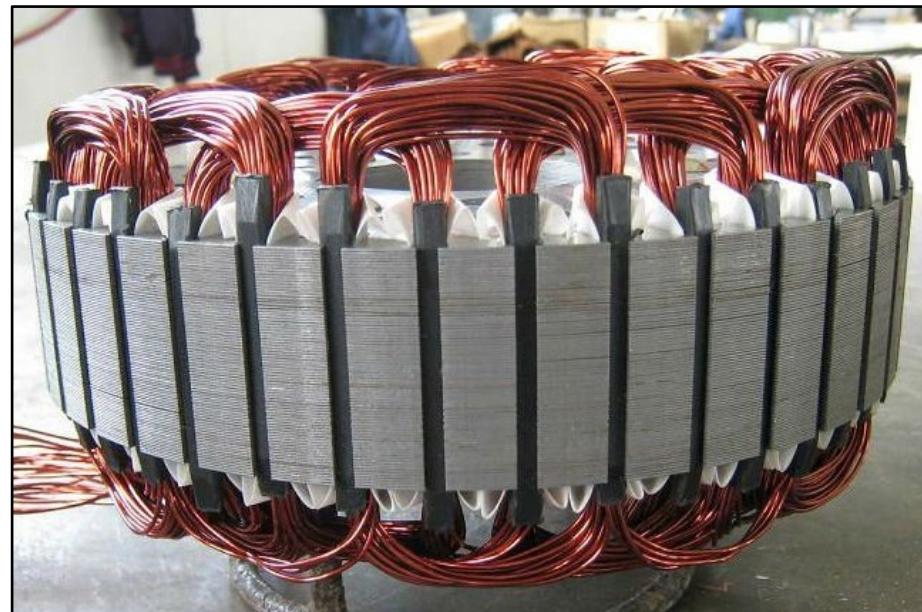
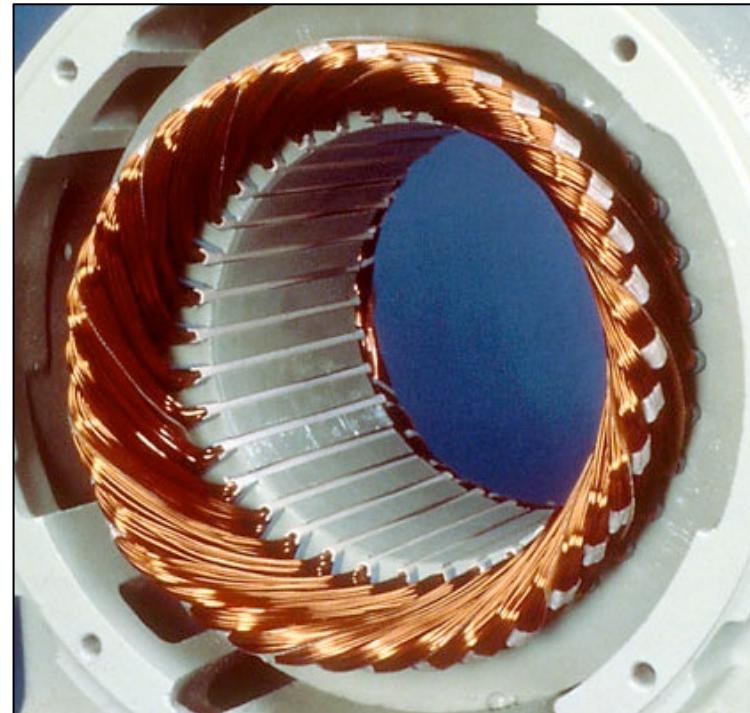
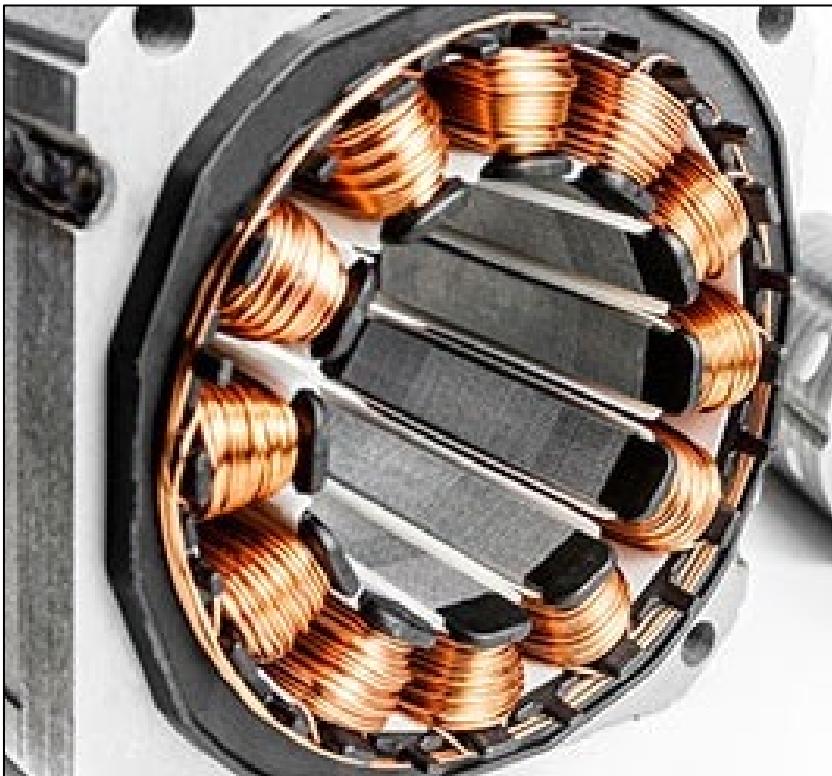
Constitution du stator



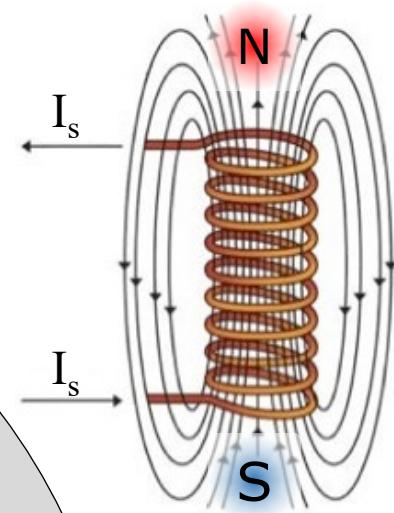
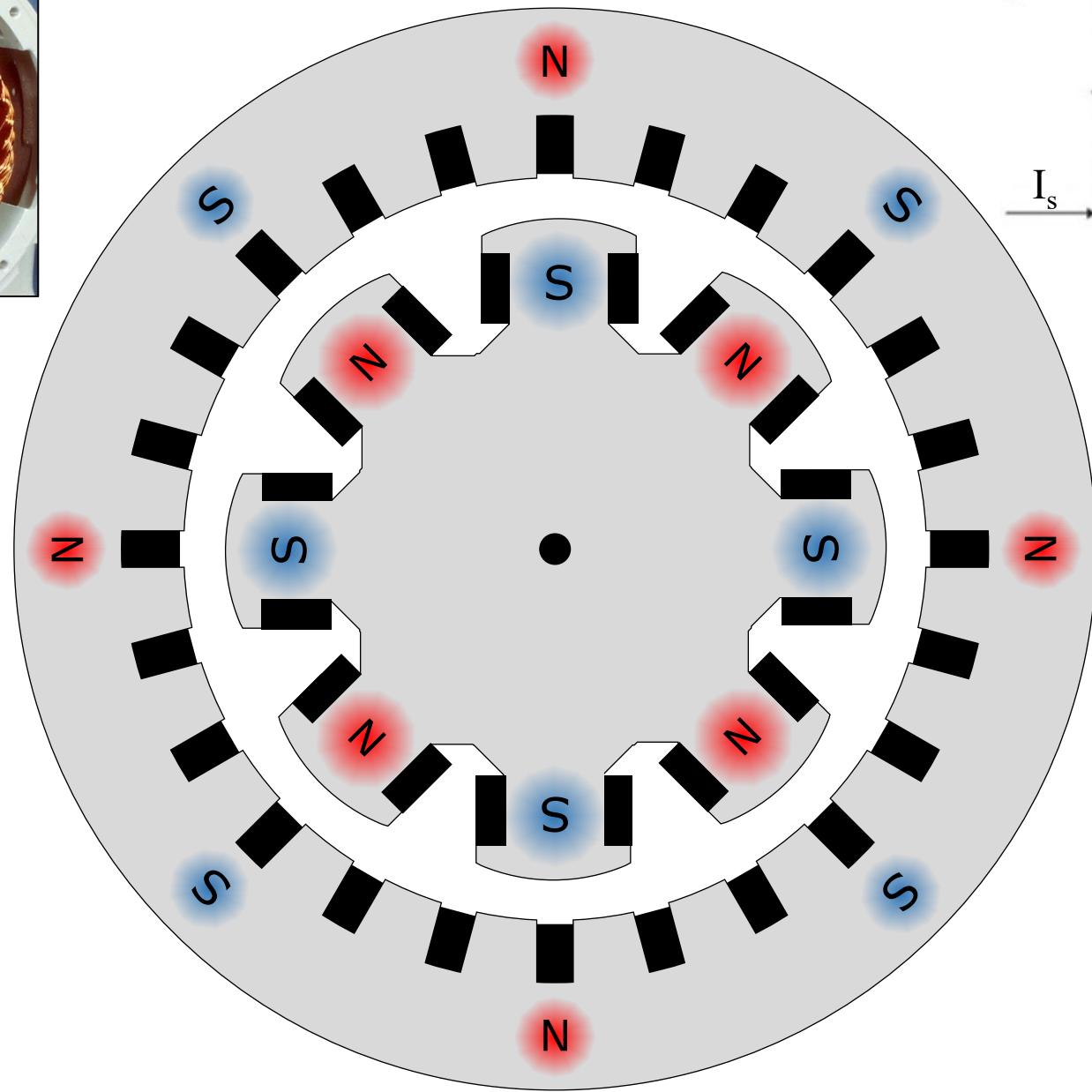
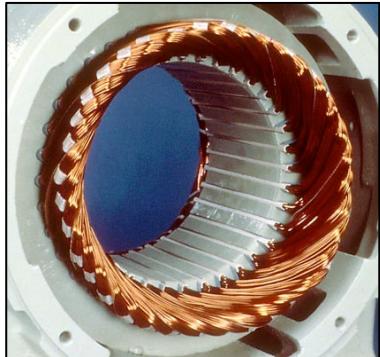
Empilement de tôles statoriques



Stator



Principe de fonctionnement



Couple électromagnétique

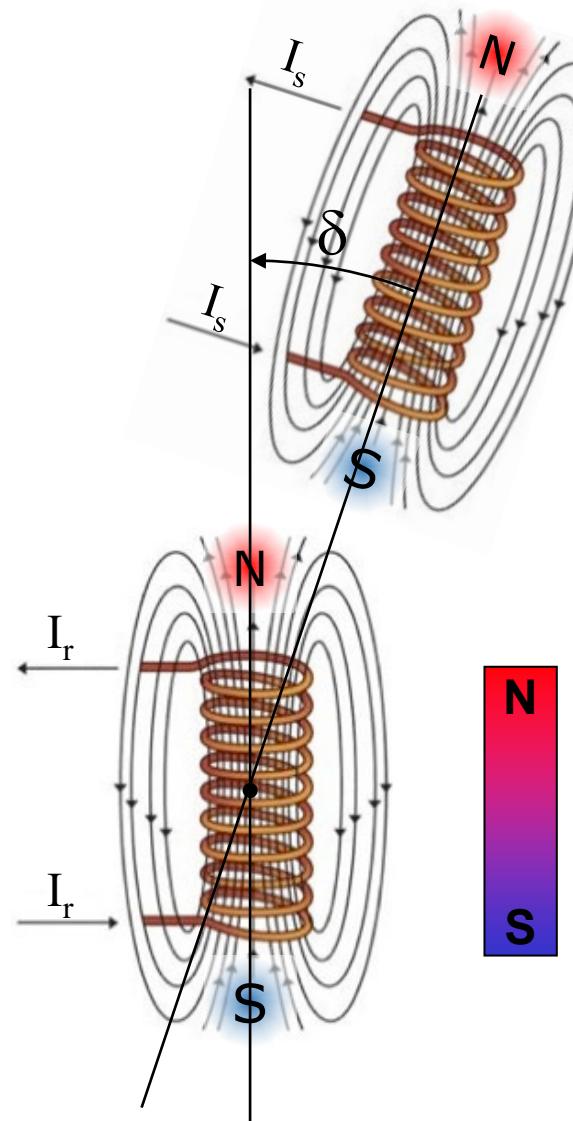
Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques

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

↑
Nombre de paires de pôles

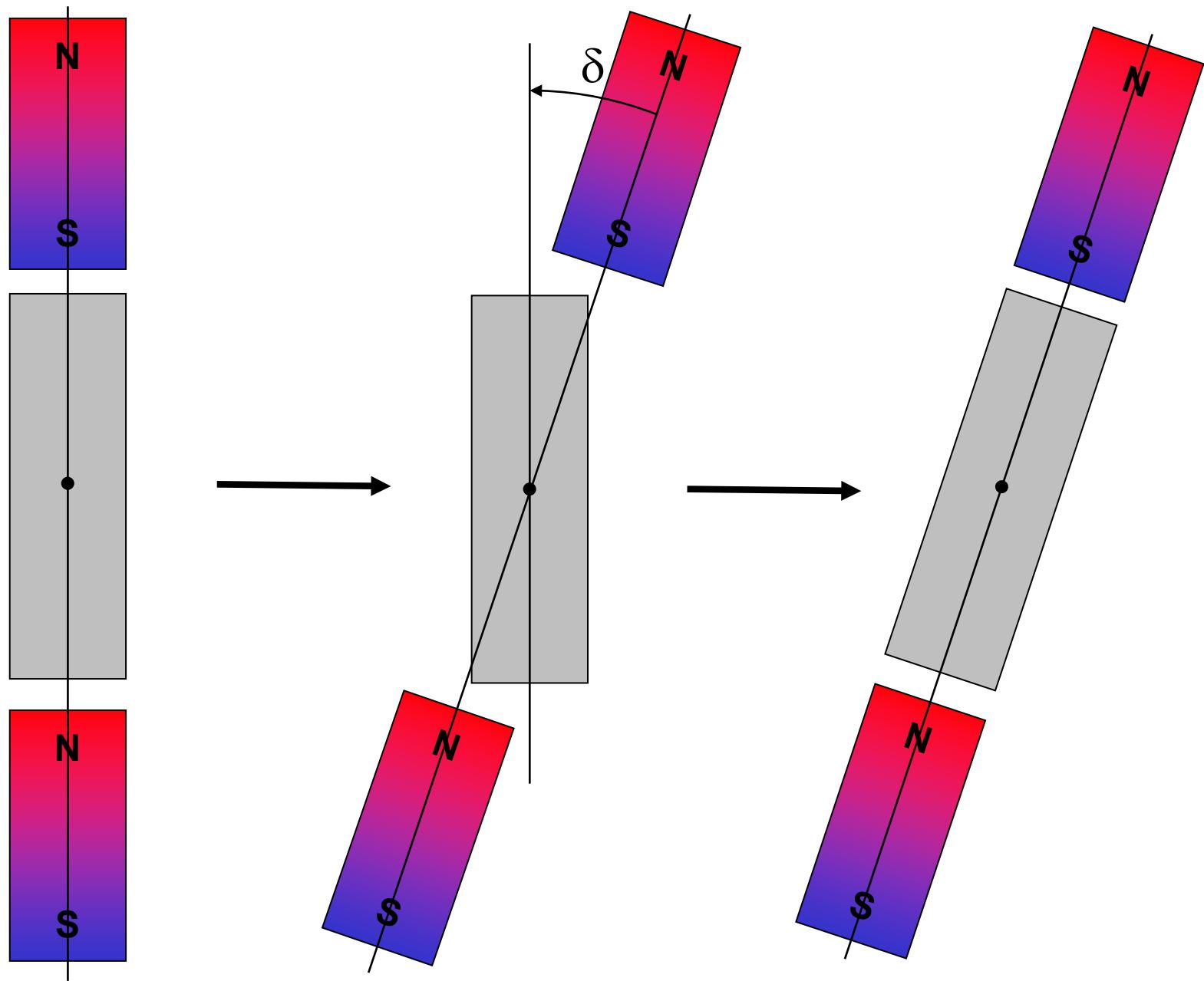
2 conditions :

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



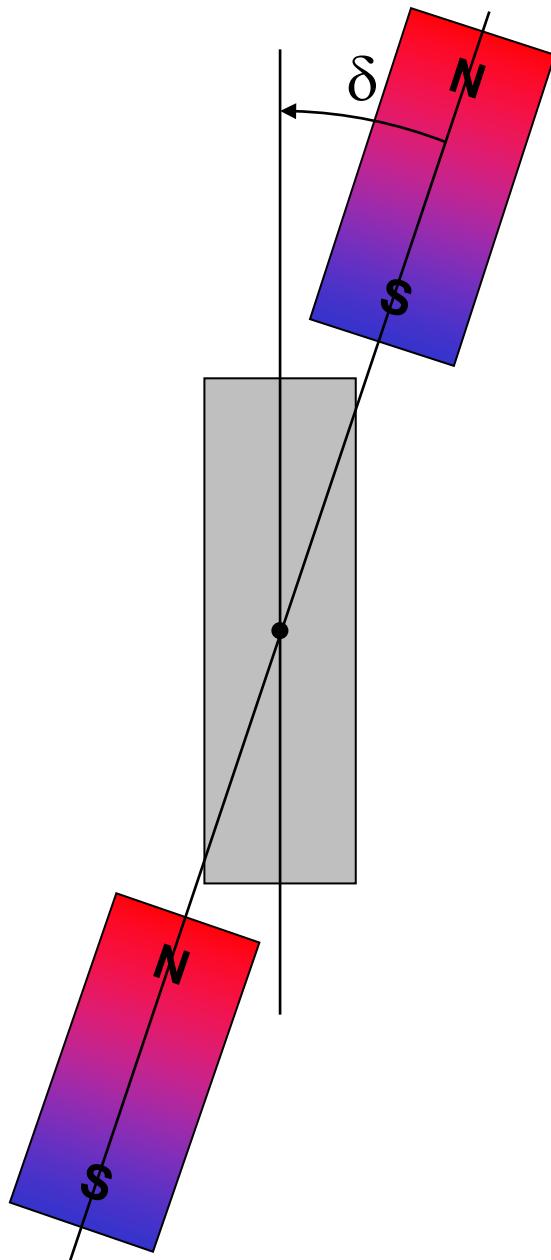
Couple réluctant

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



Couple réluctant

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



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

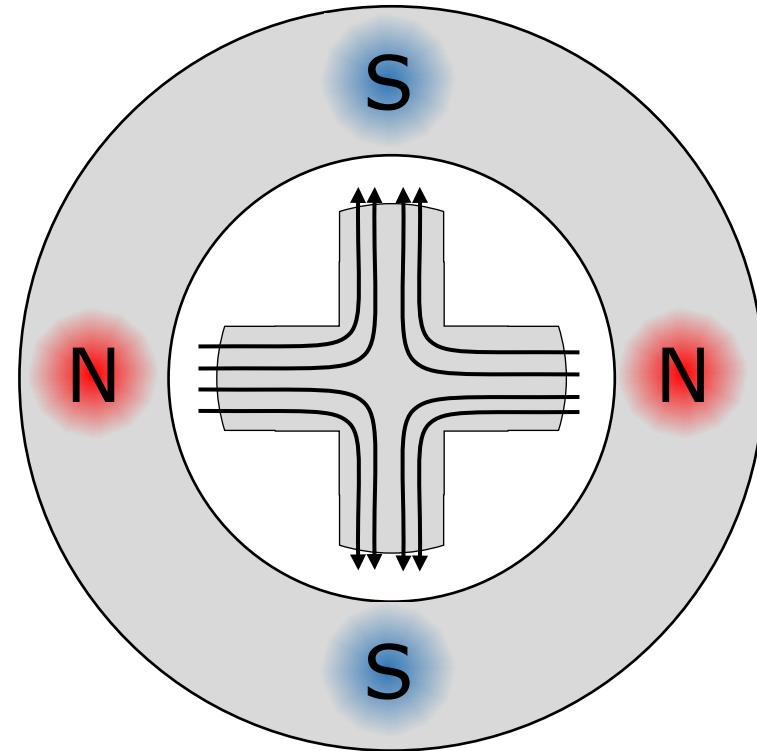
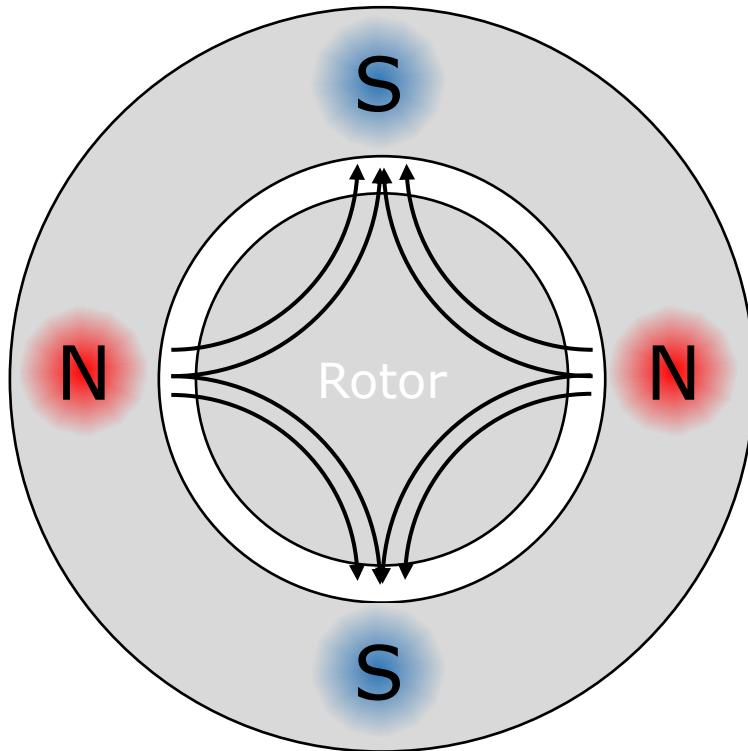
↑
nombre de paires de pôles

2 conditions :

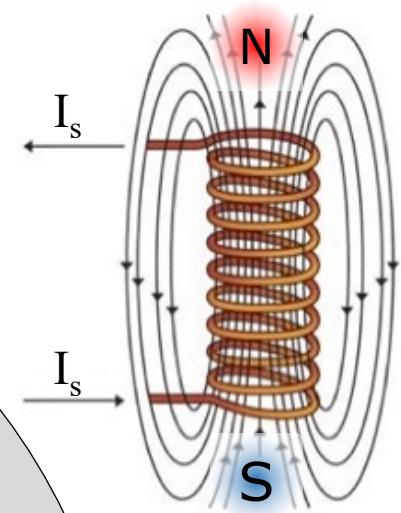
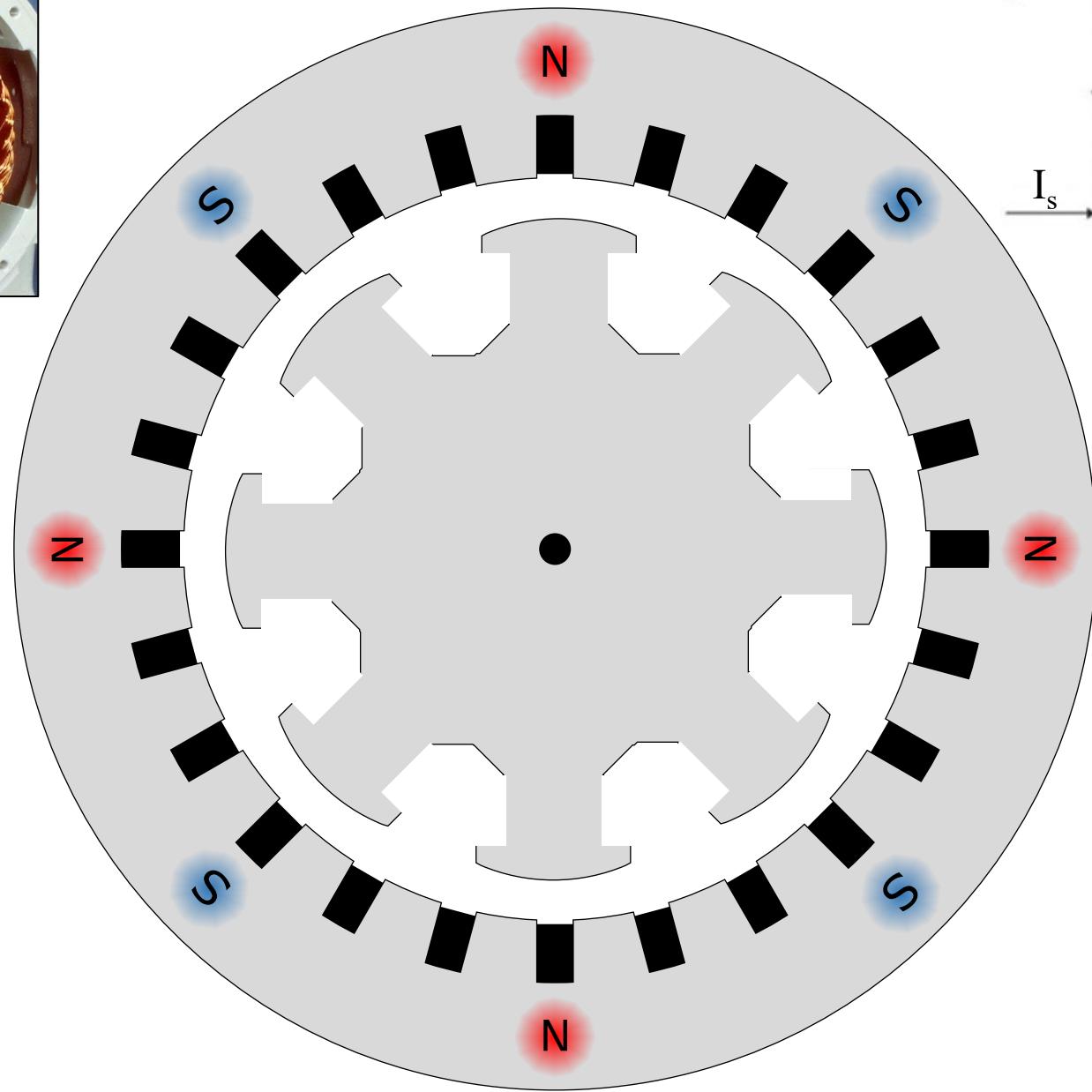
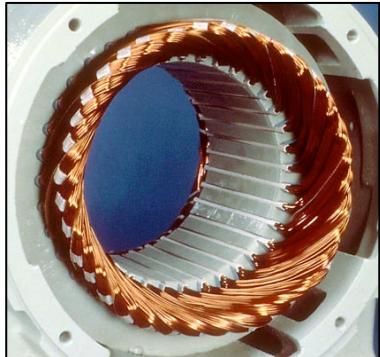
- Même nombre de pièces saillantes que de pôles (ou multiple)
- Même vitesse

Couple réluctant

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



Principe de fonctionnement



Couple électromagnétique

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

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

↑
nombre de paires de pôles

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

↑
nombre de paires de pôles

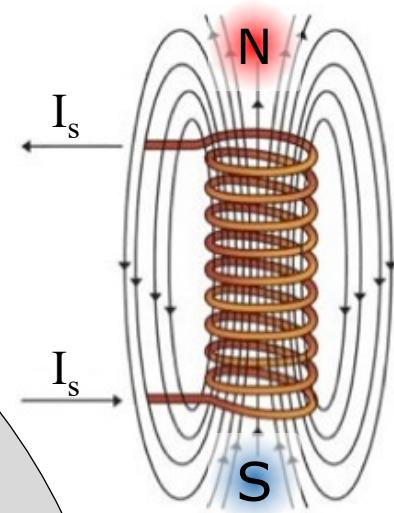
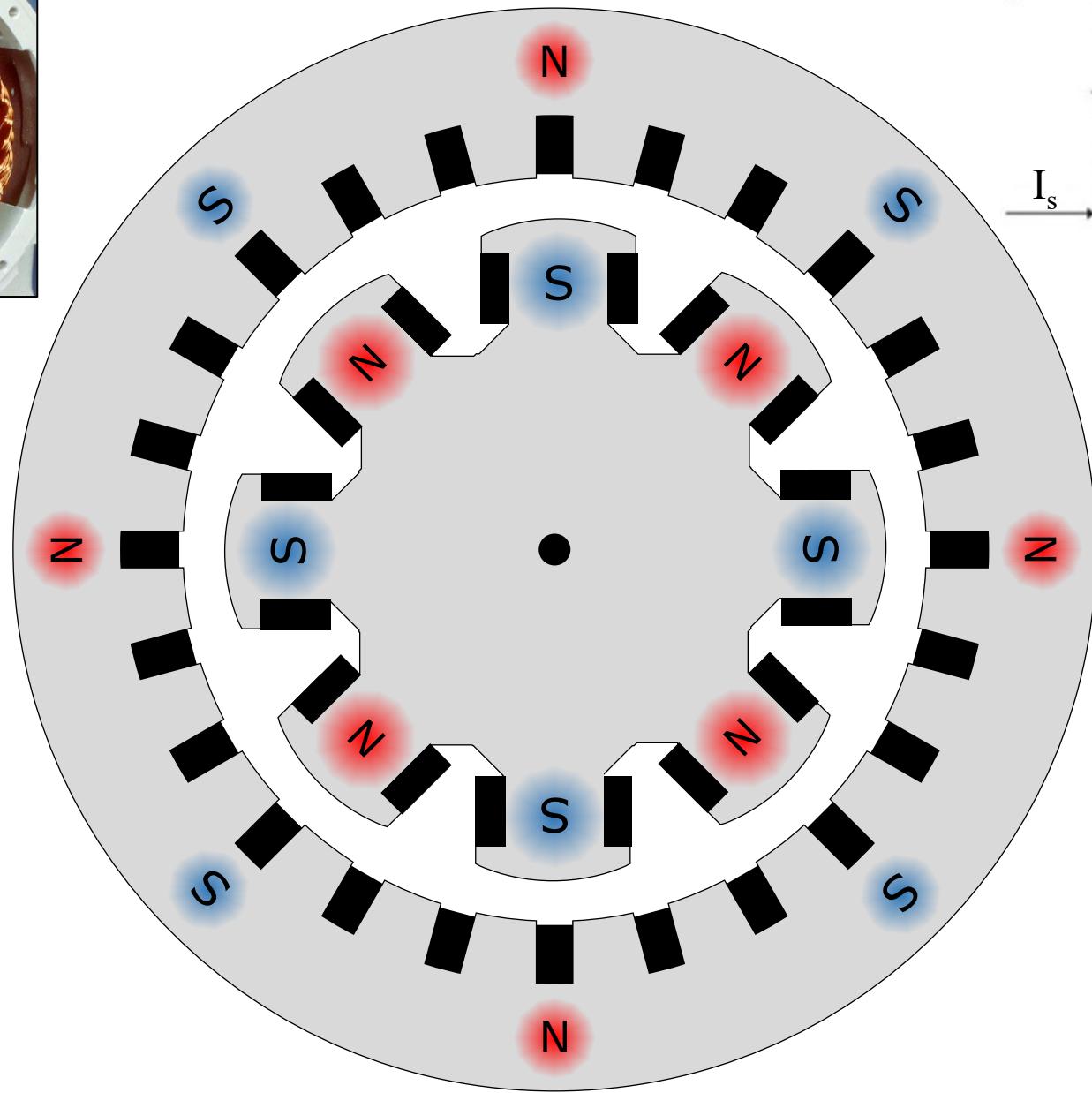
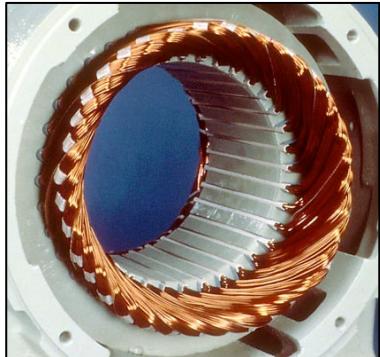
2 conditions :

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

2 conditions :

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

Principe de fonctionnement



Types de machines électriques

- Interaction entre 2 champs magnétiques

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

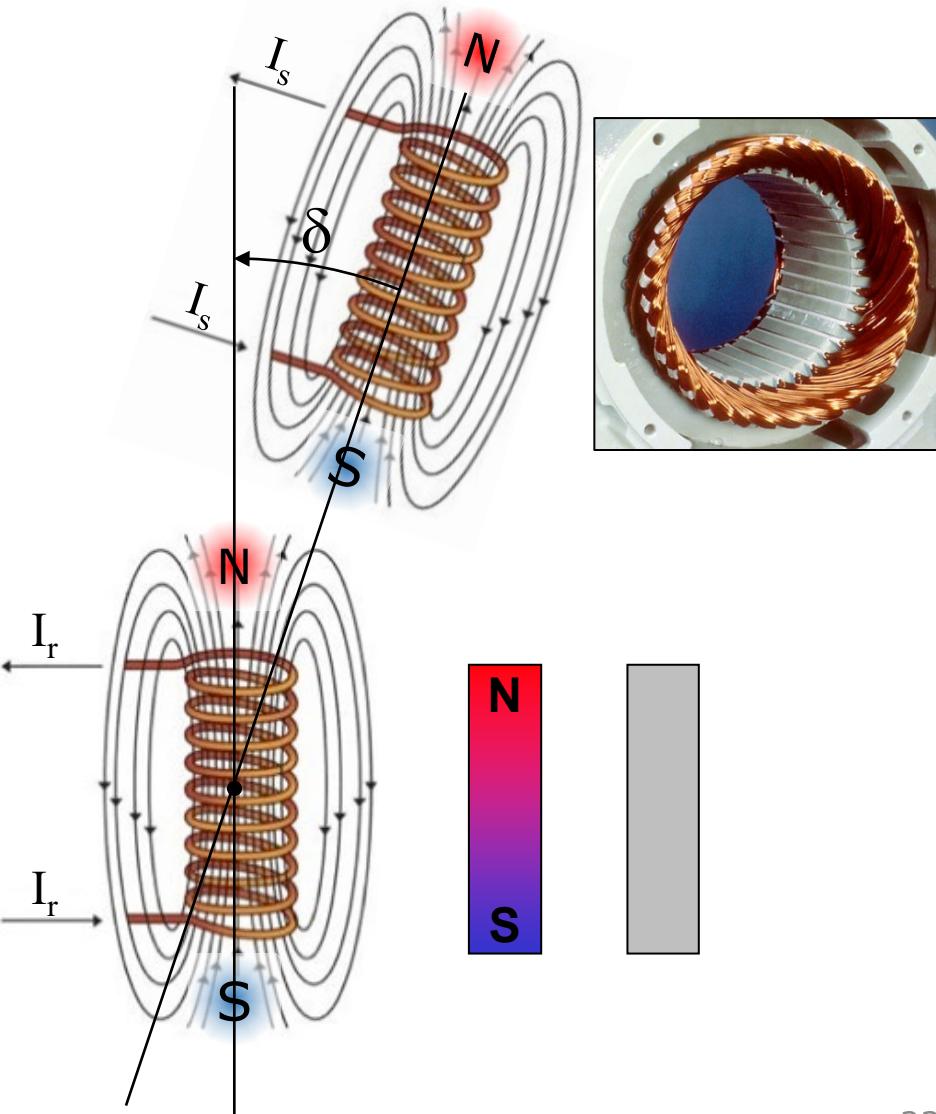
- Couple réluctant

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

p = nombre de paires de pôles

Différents types de machines :

- Machine asynchrone
- Machine à courant continu
- Machine synchrone
- Moteur synchrone à aimants permanents
- Moteur pas à pas



Sommaire

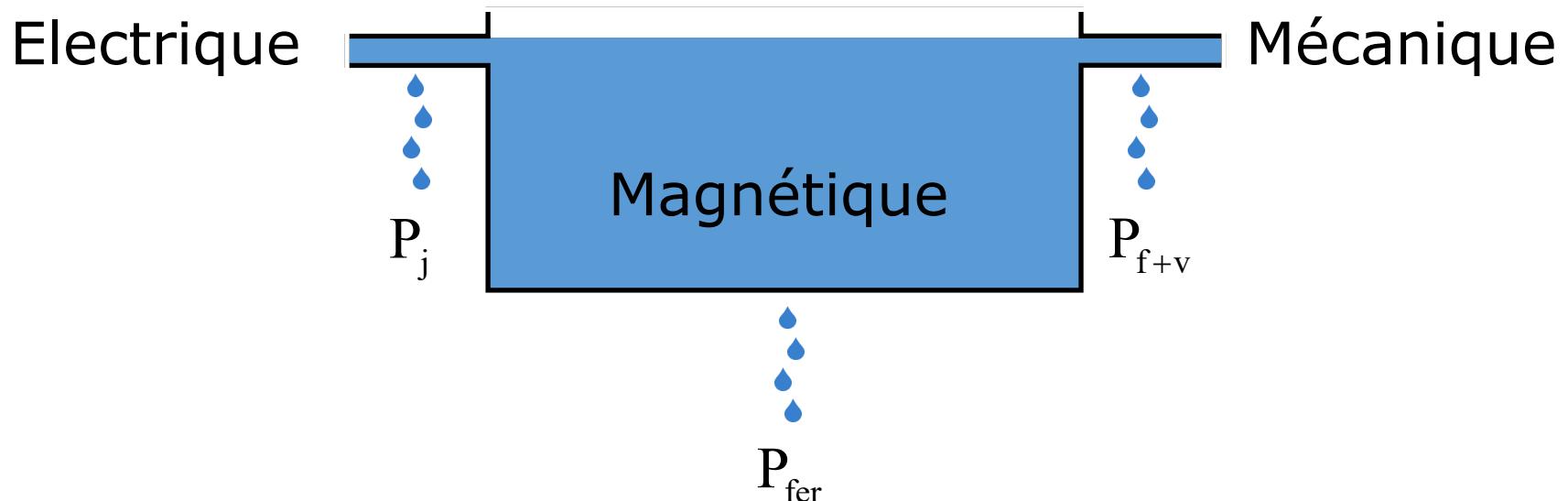
- Couple électromagnétique
 - Couple en fonction des inductances
- Champ tournant
- Rappels
 - Couplage étoile-triangle
 - Puissances
 - Plaque signalétique triphasée
- Nombre de paires de pôles
- Enroulements répartis

Couple électromagnétique

Conversion d'énergie électromécanique (4 formes d'énergie) :

- énergie électrique
- énergie mécanique
- énergie thermique (pertes)
- énergie magnétique (emmagasinée dans le champ de couplage)

$$\frac{\partial W_{\text{mag}}}{\partial \theta_m} = T_{\text{em}}$$



Couple électromagnétique

Couple électromagnétique en fonction des inductances

Energie magnétique dans une inductance

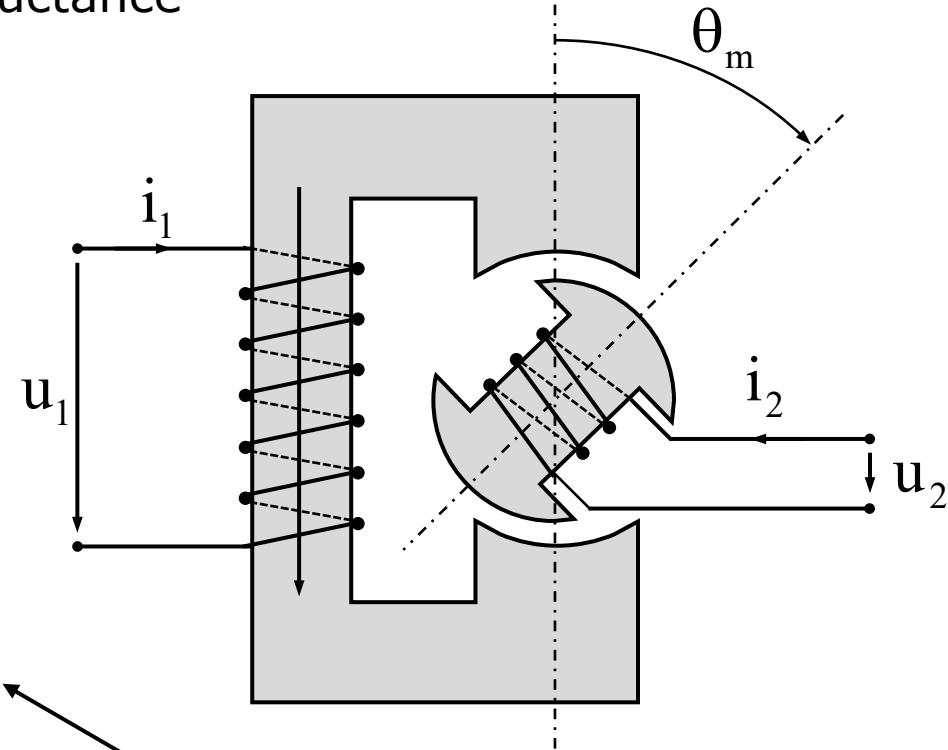
$$W_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L i^2$$

$$\frac{\partial W_{\text{mag}}}{\partial \theta_m} = T_{\text{em}}$$

$$W_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2 + L_{12} i_1 i_2$$

$$T_{\text{em}} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}}{d\theta_m} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_{22}}{d\theta_m} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta_m}$$

$$\frac{1}{2} L_{12} i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_{21} i_2 i_1$$



Couple électromagnétique

Exemple pour le couple mutuel

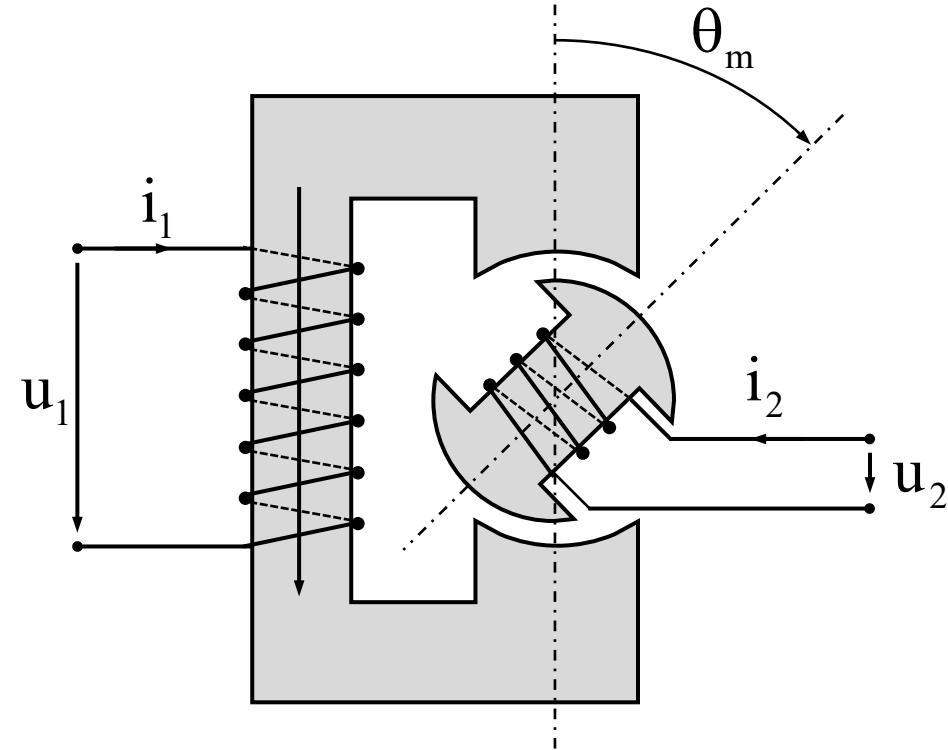
Couple mutuel

$$T_{em} = i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta_m}$$

$$L_{12}(\theta_m) = k_1 \cos(\theta_m) + k_0$$

$$\frac{dL_{12}(\theta_m)}{d\theta_m} = -k_1 \sin(\theta_m)$$

$$T_{em} = -k_1 i_1 i_2 \sin(\theta_m)$$



Couple dû à l'interaction entre champs magnétiques

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

Couple électromagnétique

Couple électromagnétique en fonction des inductances

$$T_{\text{em}} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}}{d\theta_m} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_{22}}{d\theta_m} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta_m}$$

Couple réluctant

$$T_{\text{em}} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}}{d\theta_m}$$

Couple réluctant

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

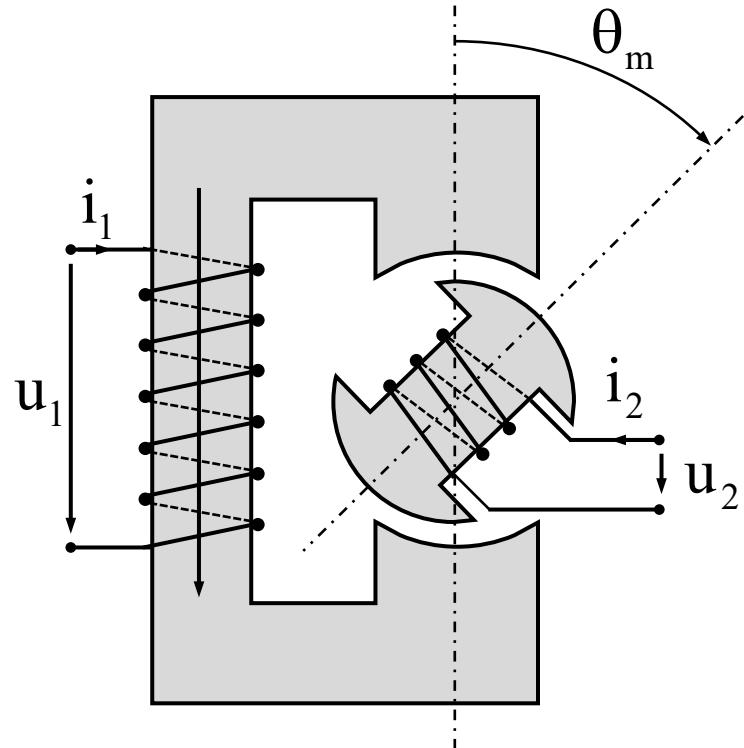
Couple mutuel

$$T_{\text{em}} = i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta_m}$$

Couple mutuel

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

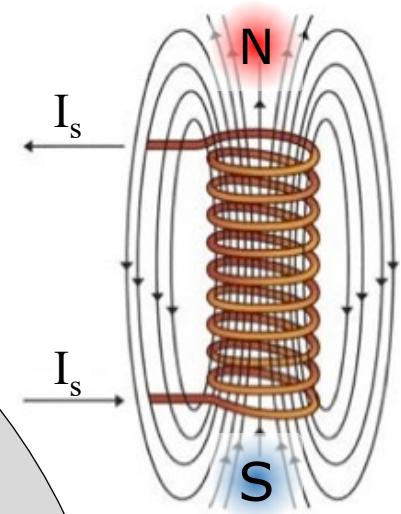
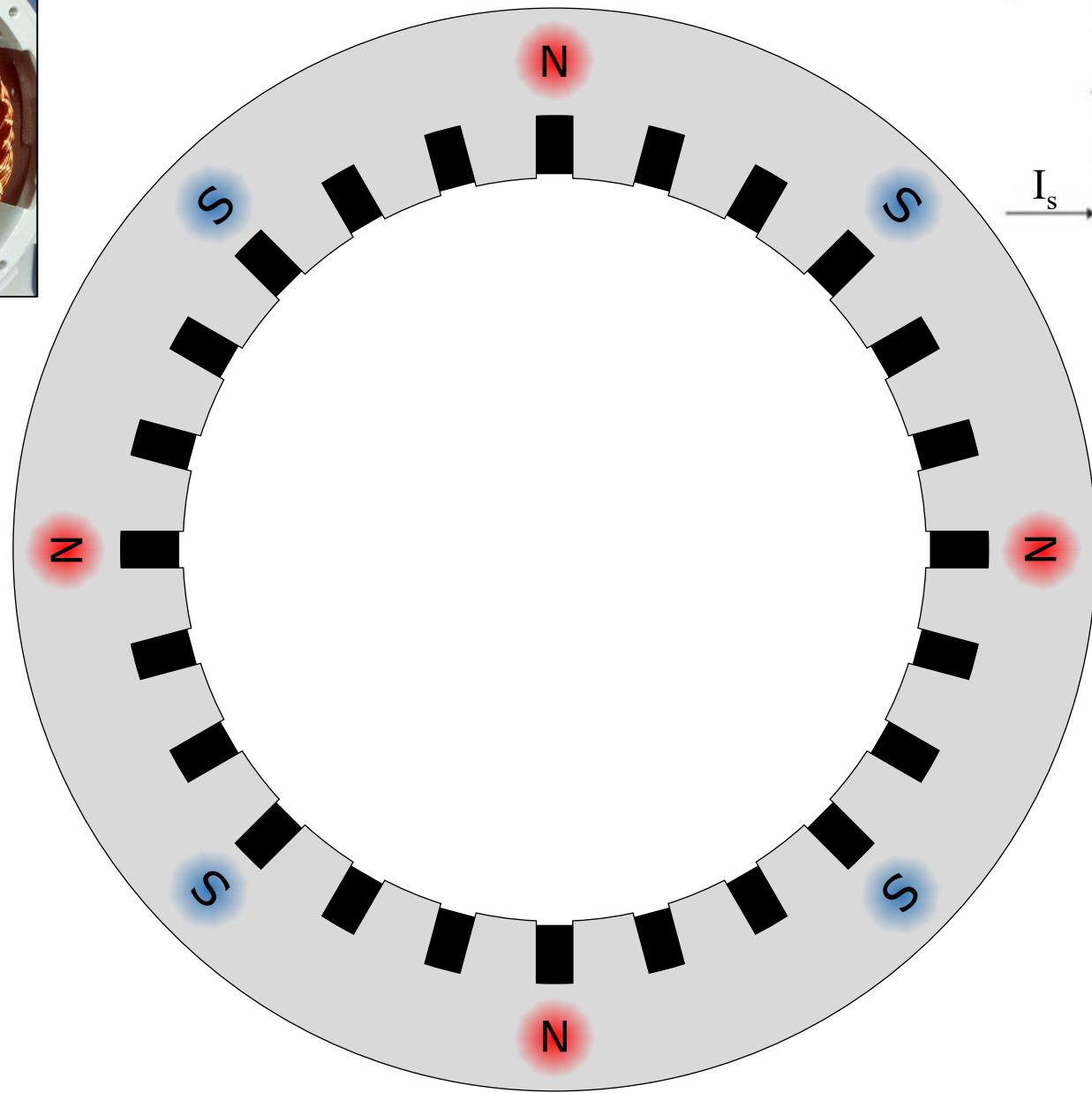
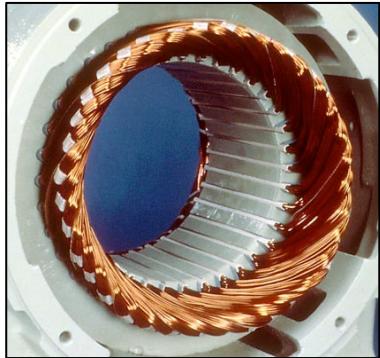
$$T_{\text{em}} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k \sum_{p=1}^k i_j i_p \frac{dL_{jp}}{d\theta_m} = \frac{1}{2} \sum_j \frac{\partial \Psi_j}{\partial \theta_m} i_j$$



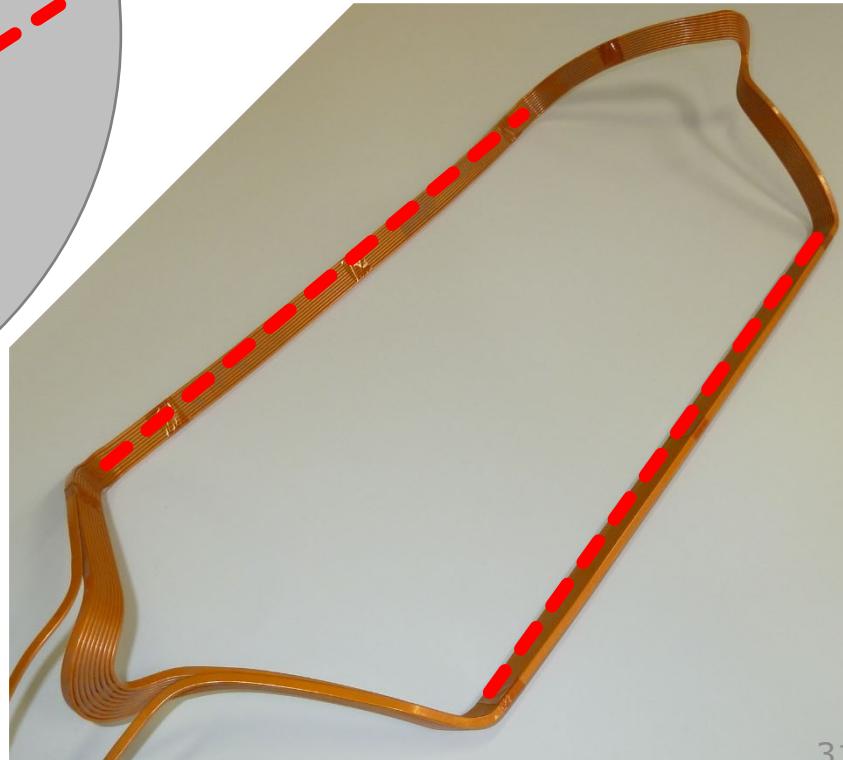
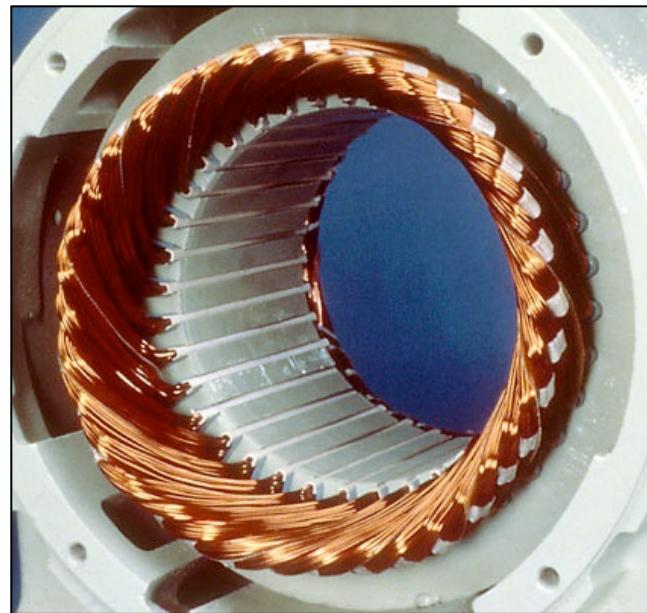
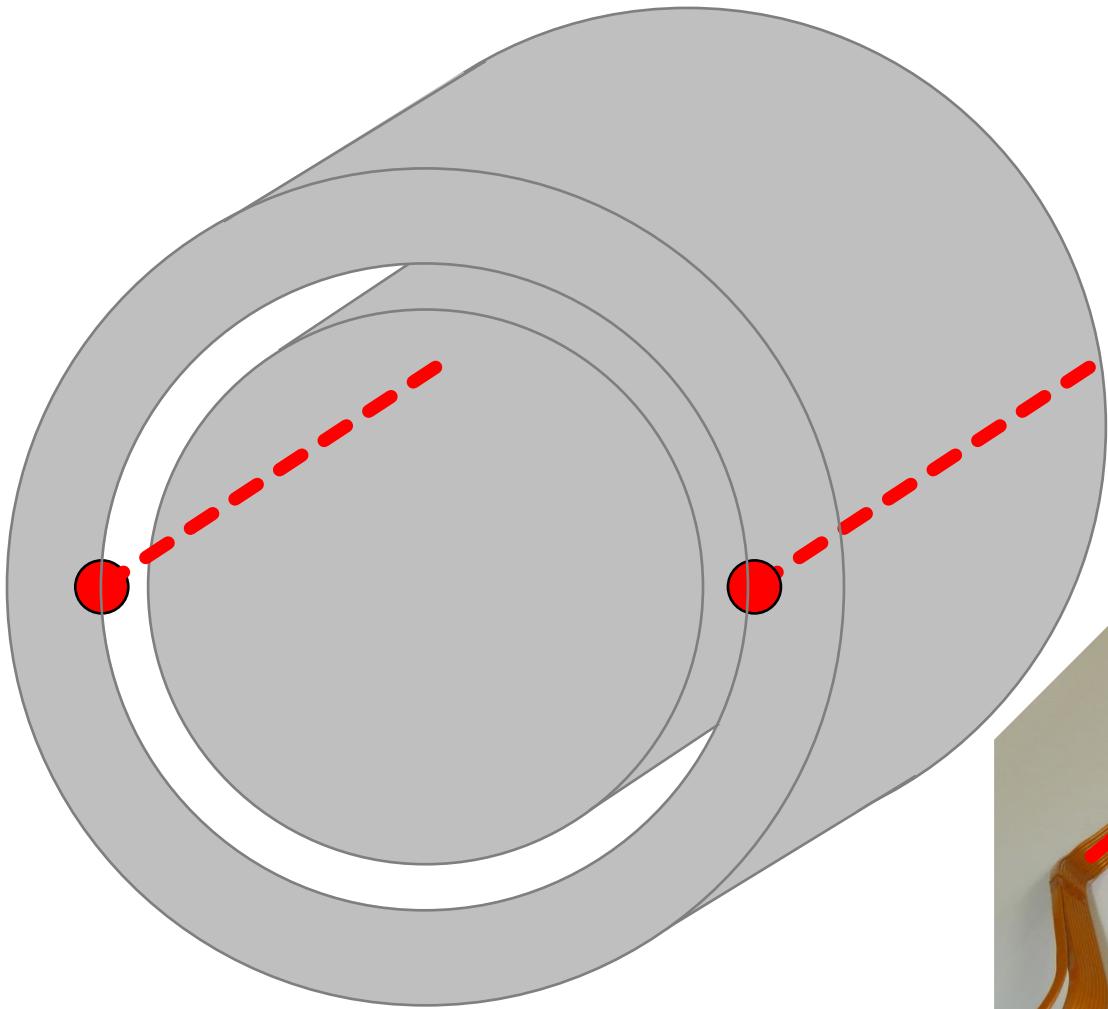
Sommaire

- Couple électromagnétique
 - Couple en fonction des inductances
- Champ tournant
- Rappels
 - Couplage étoile-triangle
 - Puissances
 - Plaque signalétique triphasée
- Nombre de paires de pôles
- Enroulements répartis

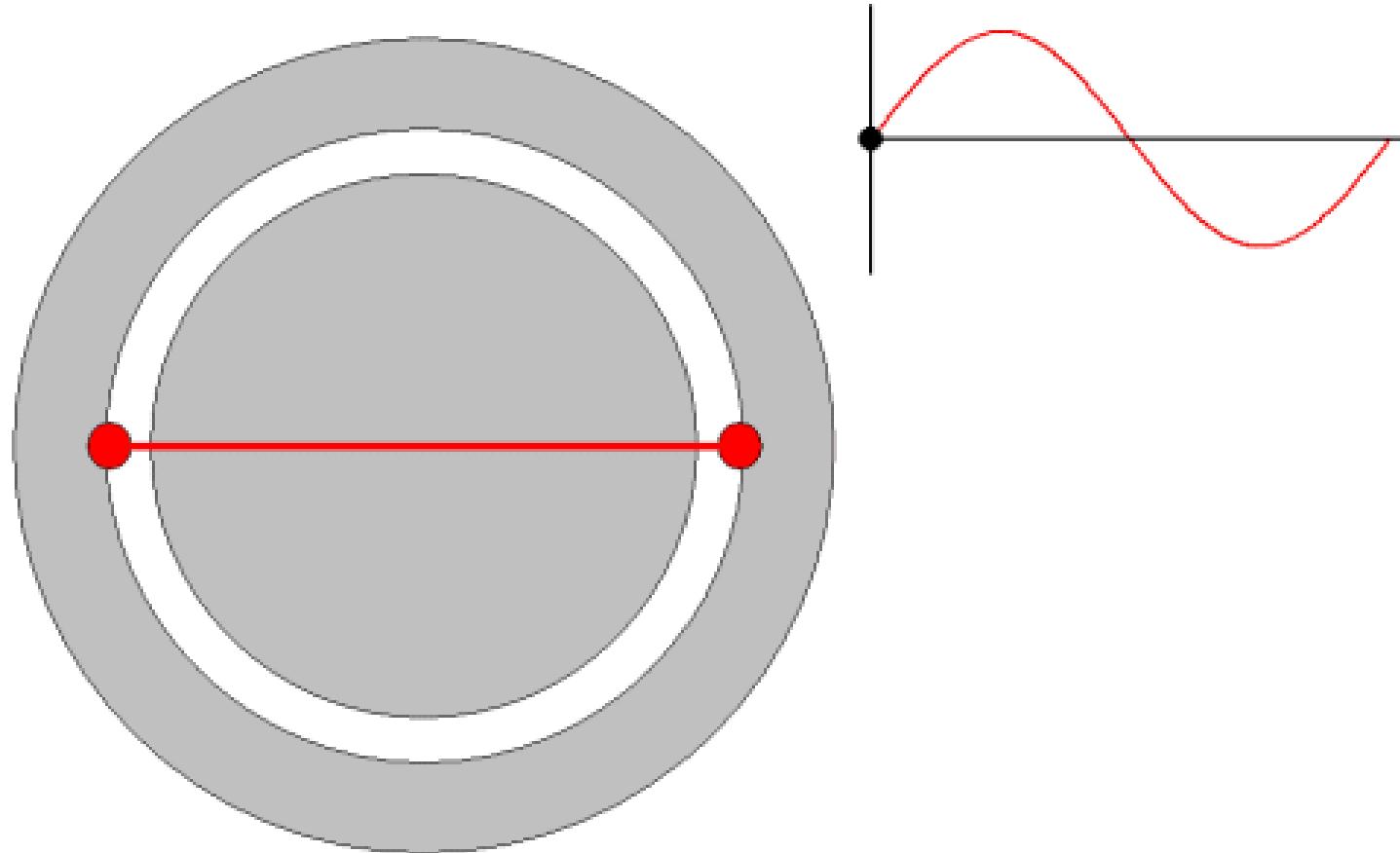
Principe de fonctionnement



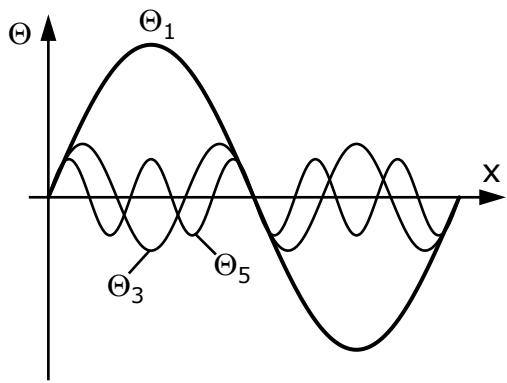
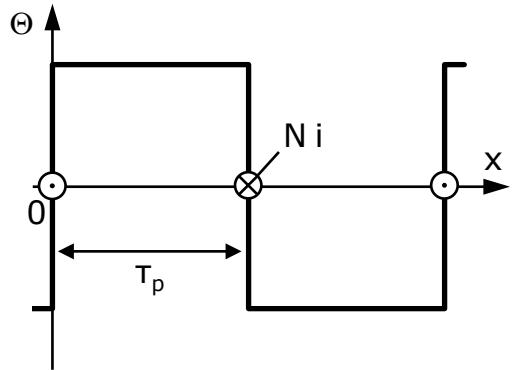
Constitution du stator



Champ pulsant résultant de l'alimentation d'une spire diamétrale par un courant alternatif



Champ d'induction dans l'entrefer

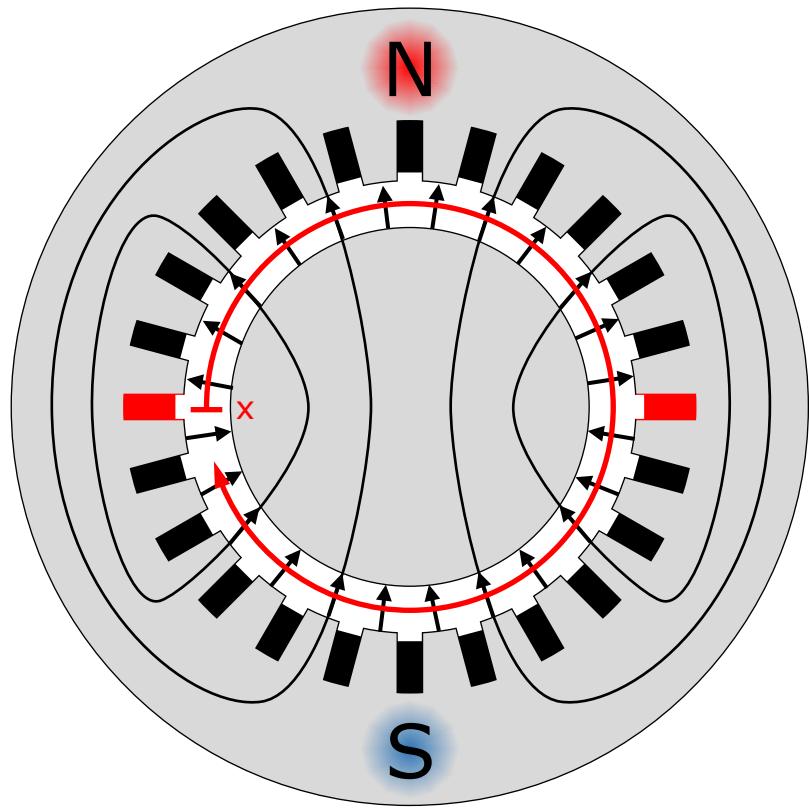


$$i(t) = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

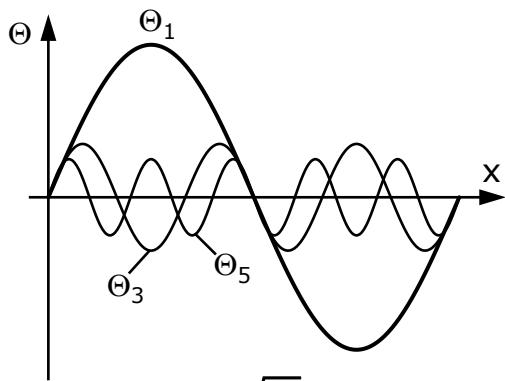
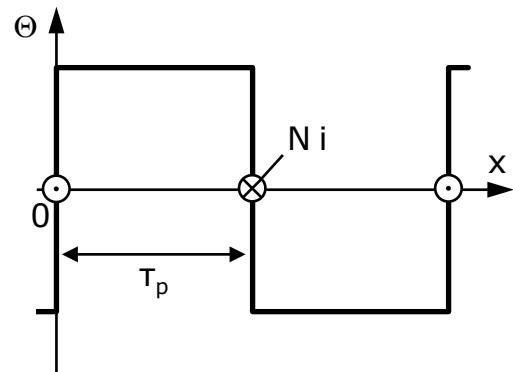
$$\hat{\Theta}_v = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} NI$$

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

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



Champ d'induction dans l'entrefer

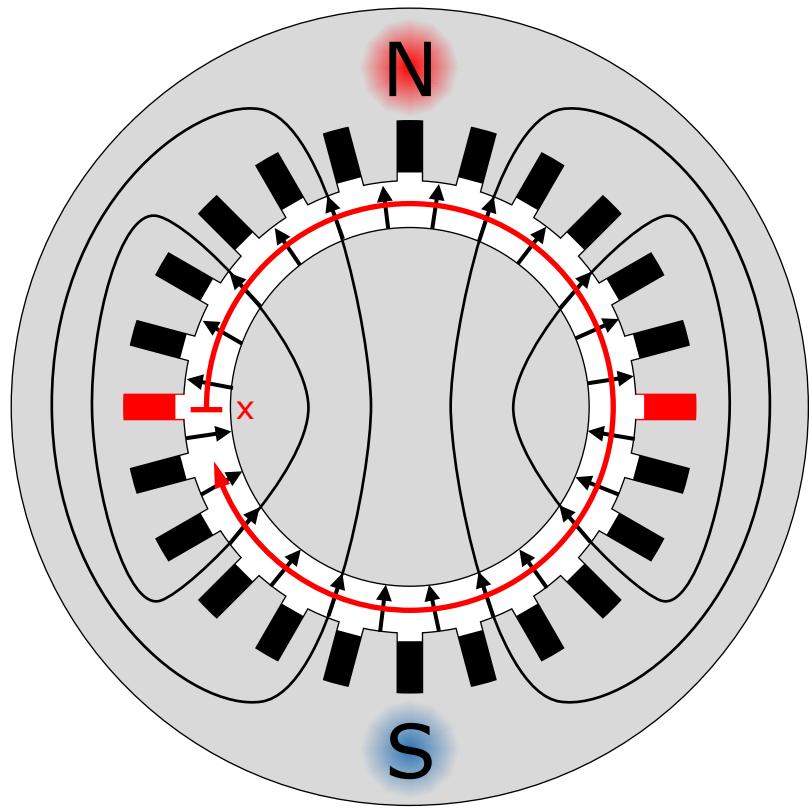


$$i(t) = \sqrt{2} I \cos \omega t \quad \hat{\Theta}_v = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} N I$$

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

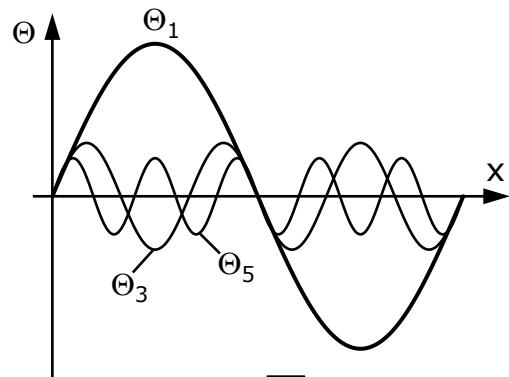
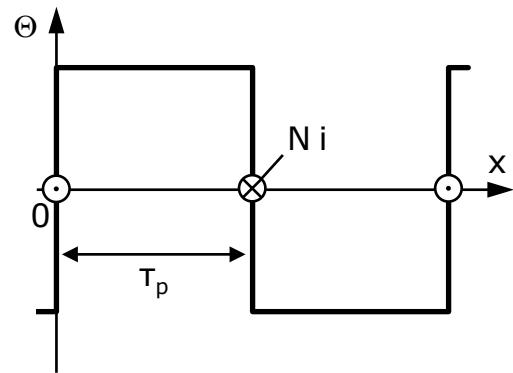
$$\Theta(x, t) = \left(\sum_v \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} N I \sin \left(\frac{v x}{\tau_p} \pi \right) \right) \cos \omega t$$

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

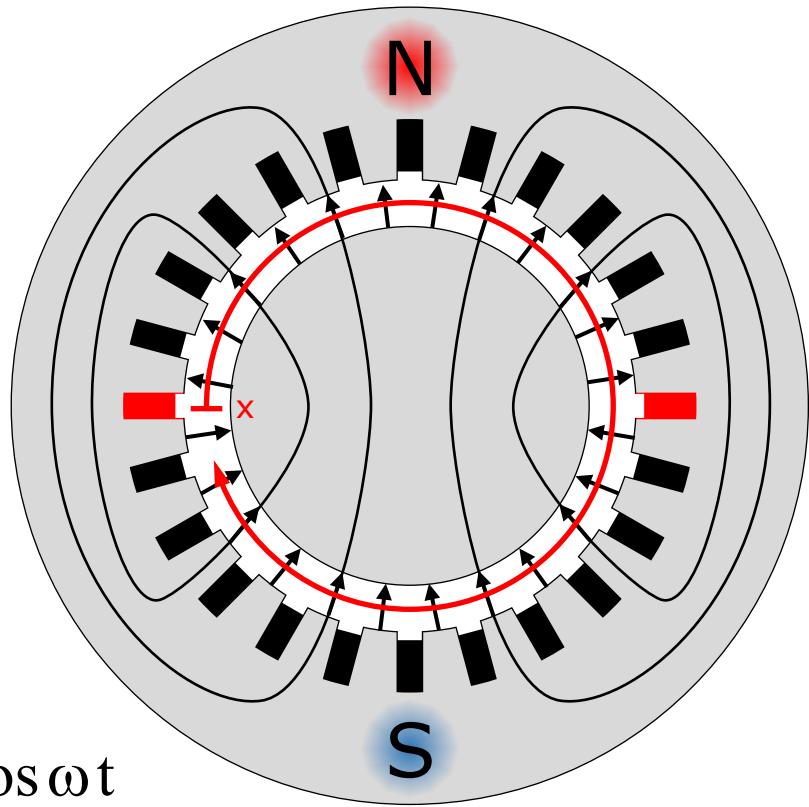


$$B_\delta(x, t) = \mu_0 \frac{\Theta(x, t)}{2\delta}$$

Champ d'induction dans l'entrefer



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



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

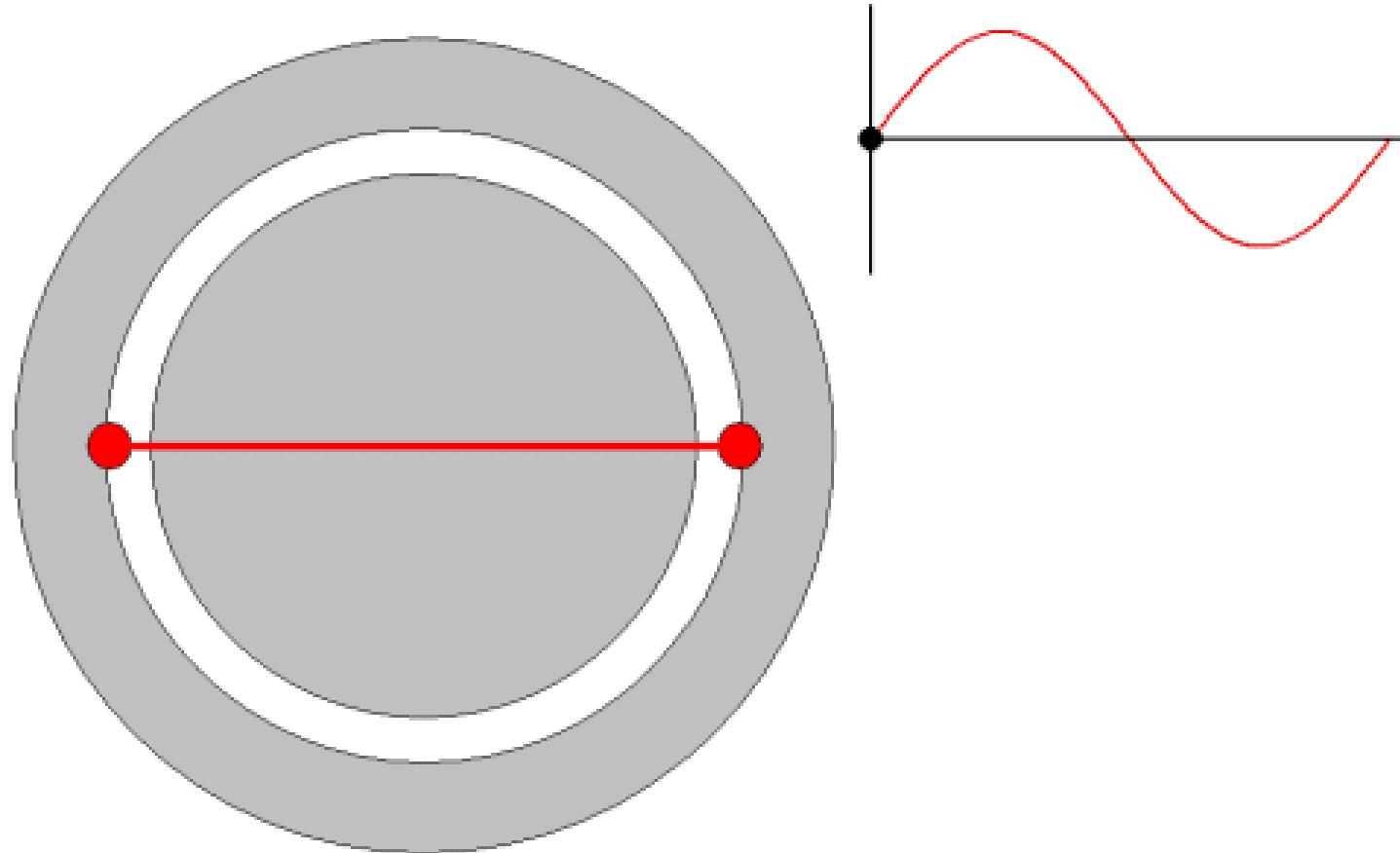
pour le fondamental

\uparrow

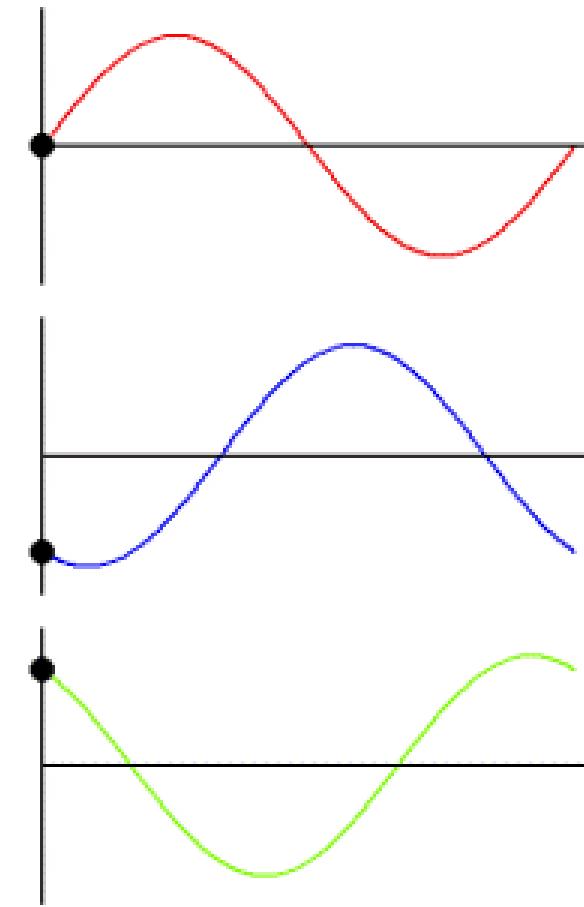
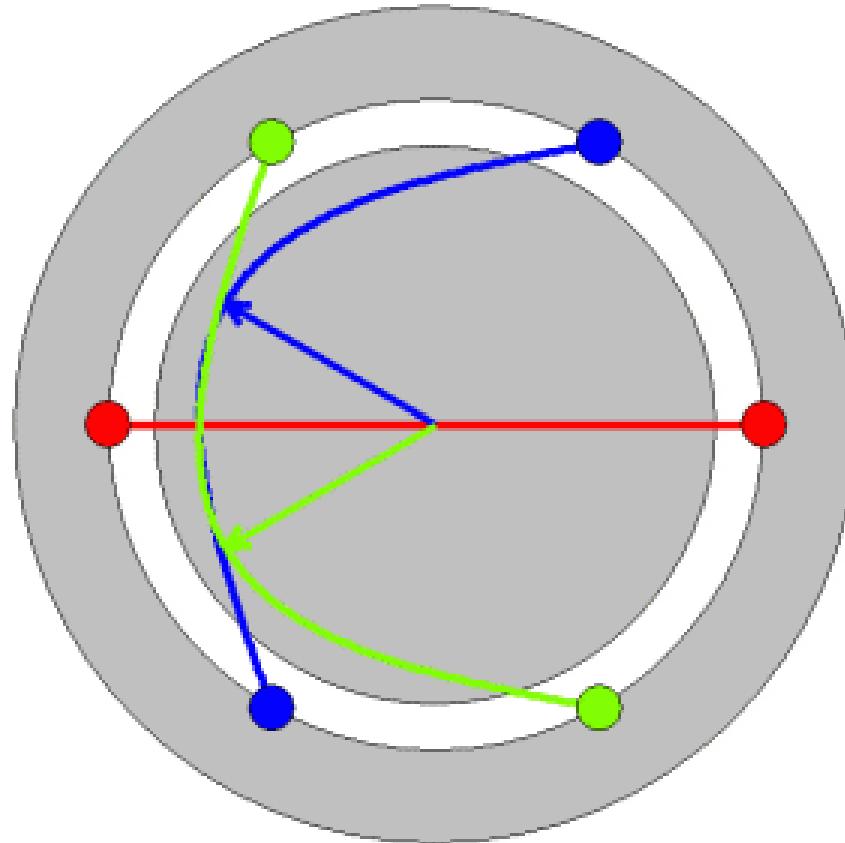
$$B_\delta(x, t) = \sum_v \frac{\mu_0}{\delta} \frac{4}{\pi \sqrt{2}} \frac{1}{v} N I \left(\sin \left(\frac{v x}{\tau_p} \pi \right) \right) \cos \omega t$$

35

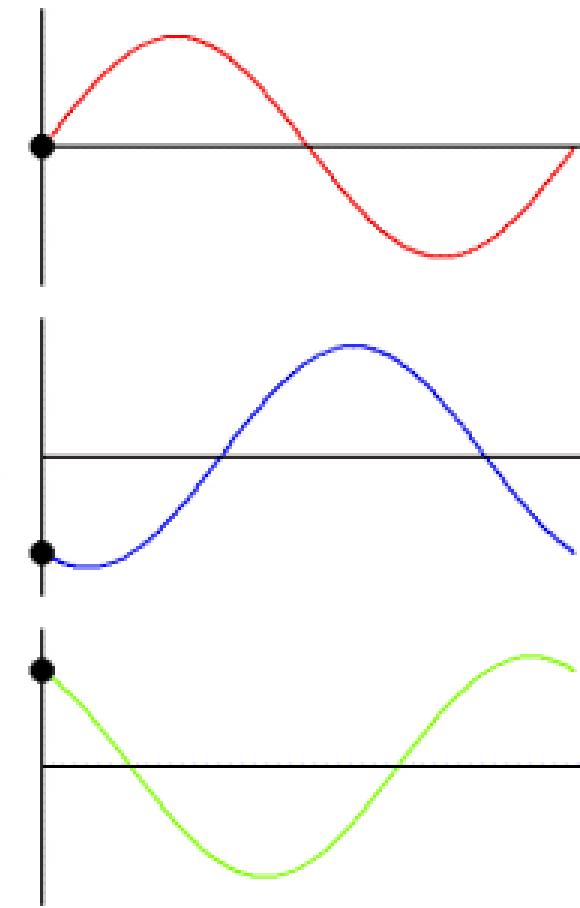
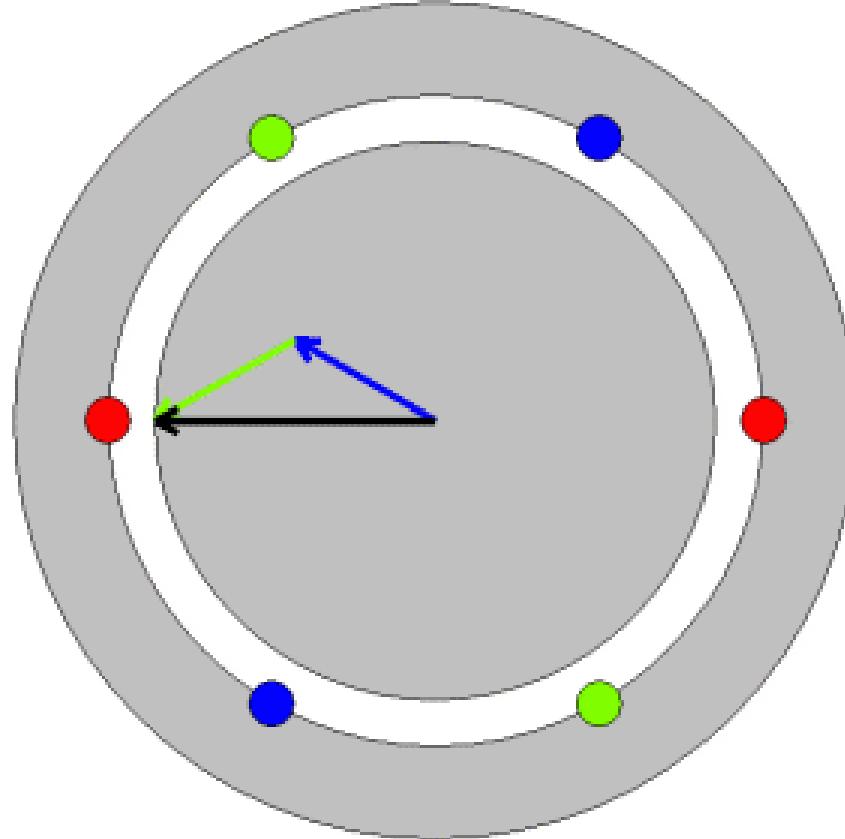
Champ pulsant résultant de l'alimentation d'une spire diamétrale par un courant alternatif



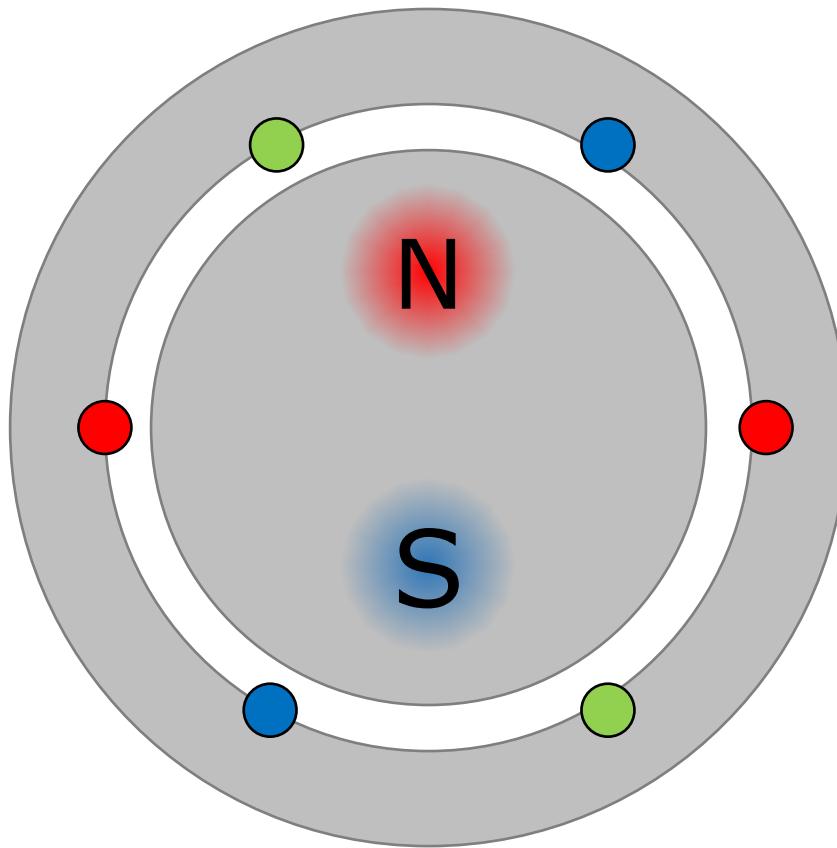
Champs pulsants résultants de l'alimentation de spires diamétrales réparties, par un système de courants alternatifs triphasés symétriques



Champ tourant résultant de la somme vectorielle des trois champs pulsants



Champ tourant résultant de la somme vectorielle des trois champs pulsants



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

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

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



 1.5 fois plus grand que le fondamental de chaque champ pulsant

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

pour le fondamental

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{\delta 1A}(x,t) = \hat{B} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p}\right) \cos(\omega t) \\ \\ B_{\delta 1B}(x,t) = \hat{B} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \\ B_{\delta 1C}(x,t) = \hat{B} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p} + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \right.$$

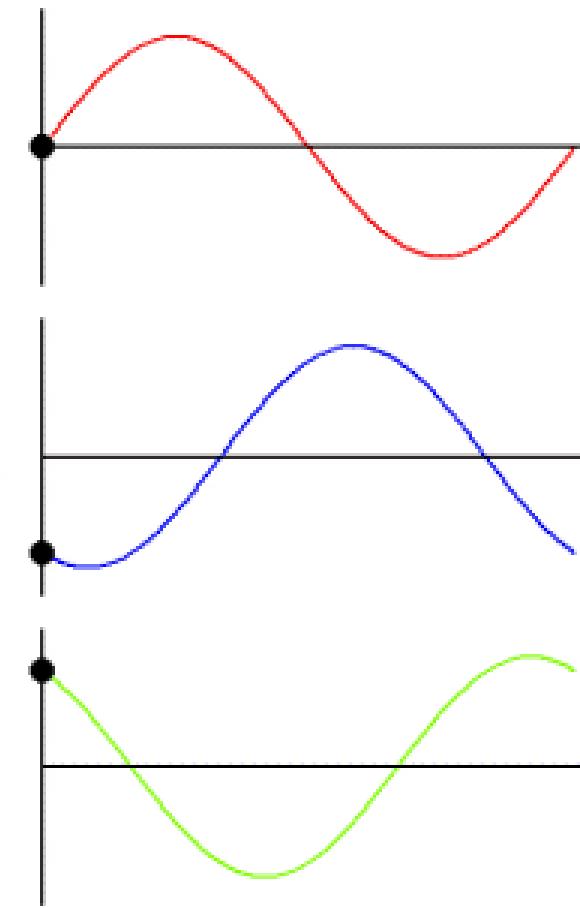
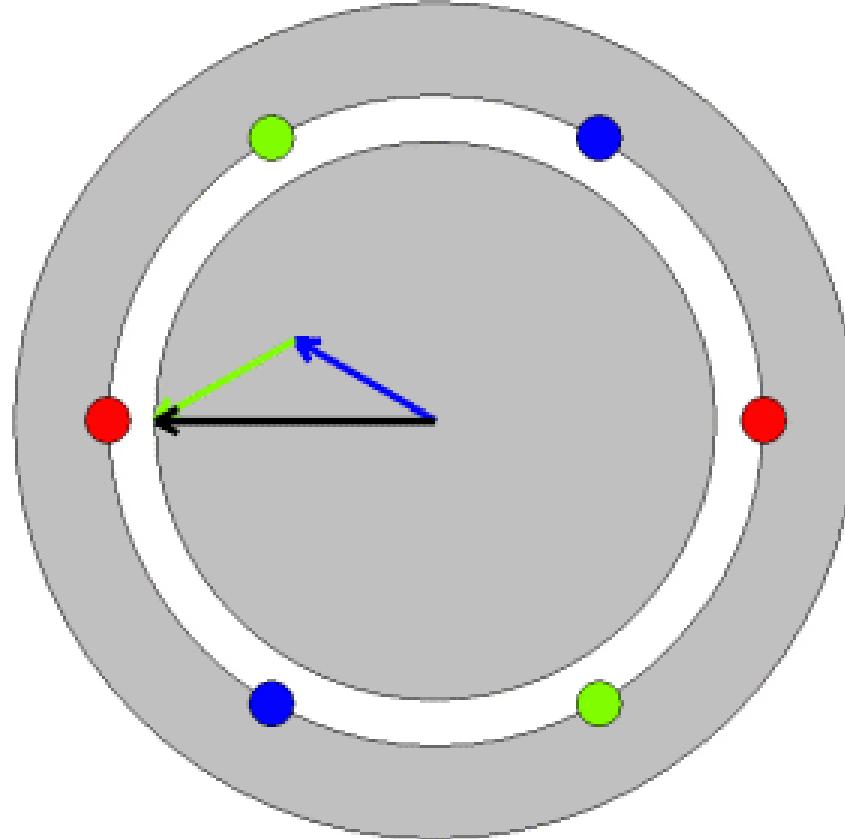
avec $\hat{B} = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{4}{\pi} \frac{NI}{\sqrt{2}}$

$$B_{\delta 1t}(x,t) = B_{\delta 1A}(x,t) + B_{\delta 1B}(x,t) + B_{\delta 1C}(x,t) = \frac{3}{2} \hat{B} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p} \pm \omega t\right)$$

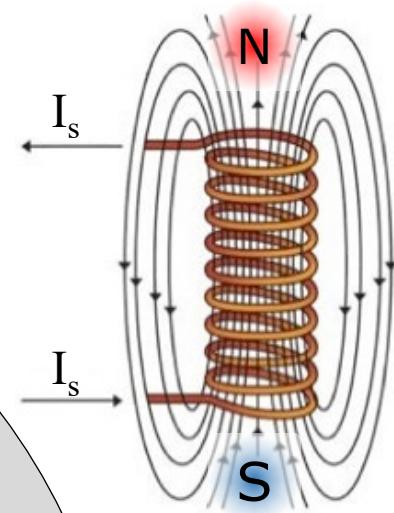
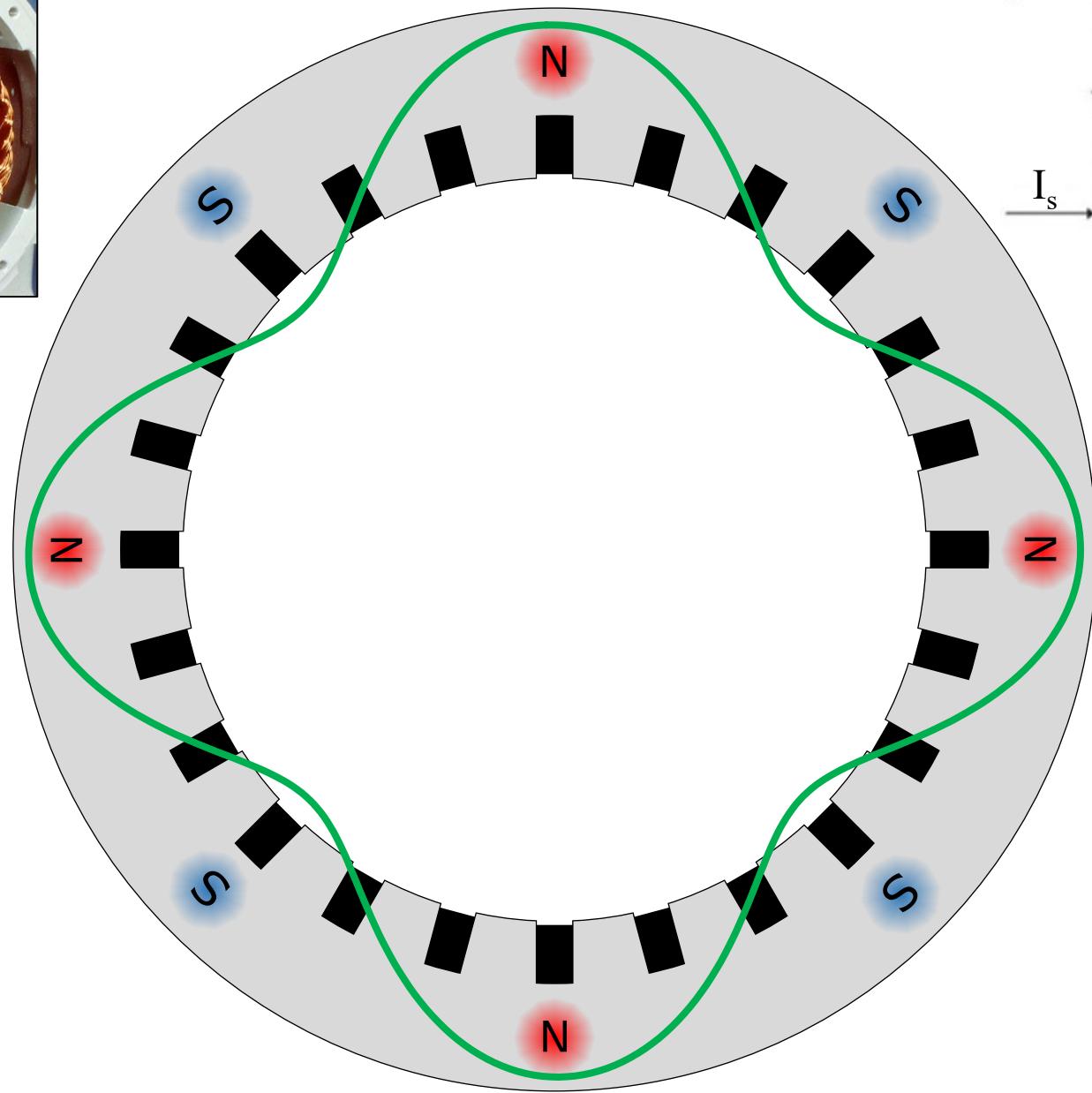
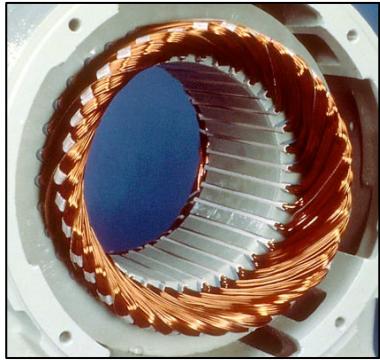
↑

1.5 fois plus grand que le fondamental de chaque champ pulsant

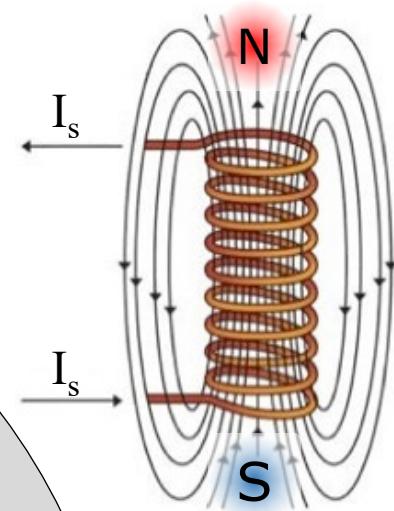
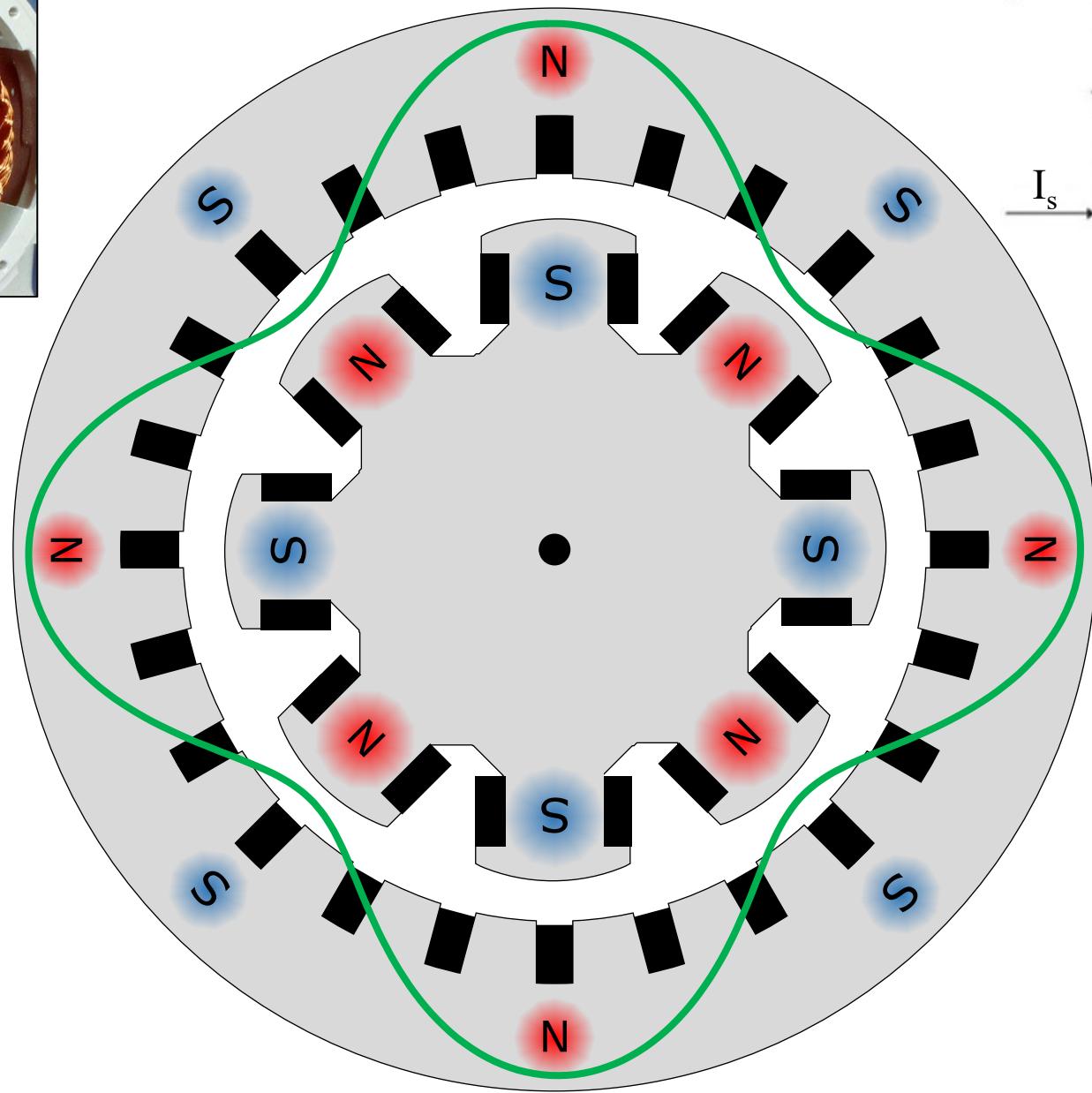
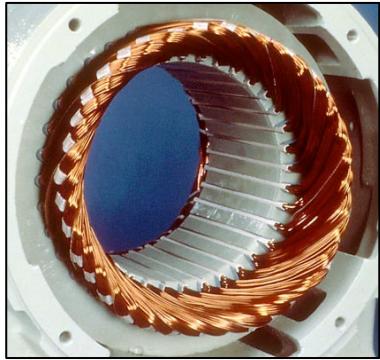
Champ tourant résultant de la somme vectorielle des trois champs pulsants



Principe de fonctionnement



Principe de fonctionnement



Sommaire

- Couple électromagnétique
 - Couple en fonction des inductances
- Champ tournant
 - Biphasé
- Rappels
 - Couplage étoile-triangle
 - Puissances
 - Plaque signalétique triphasée
- Nombre de paires de pôles
- Enroulements répartis

Champ tournant généré avec du biphasé

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

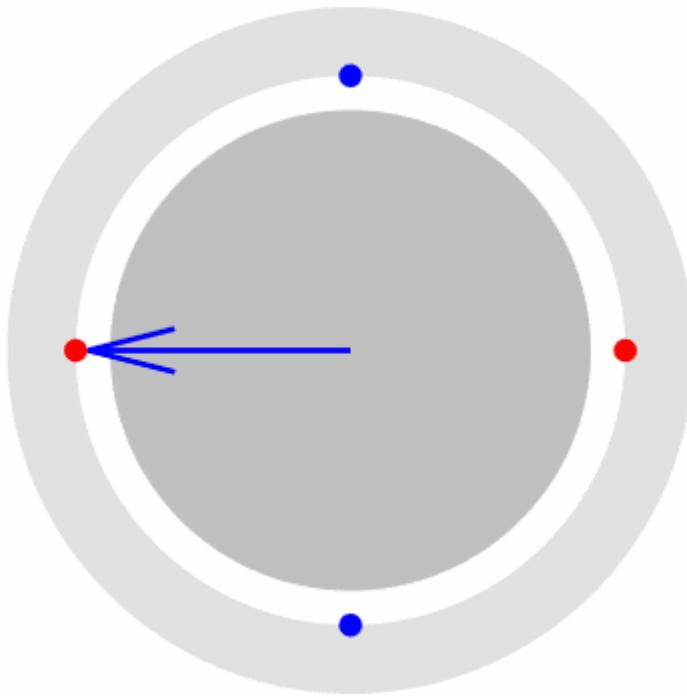
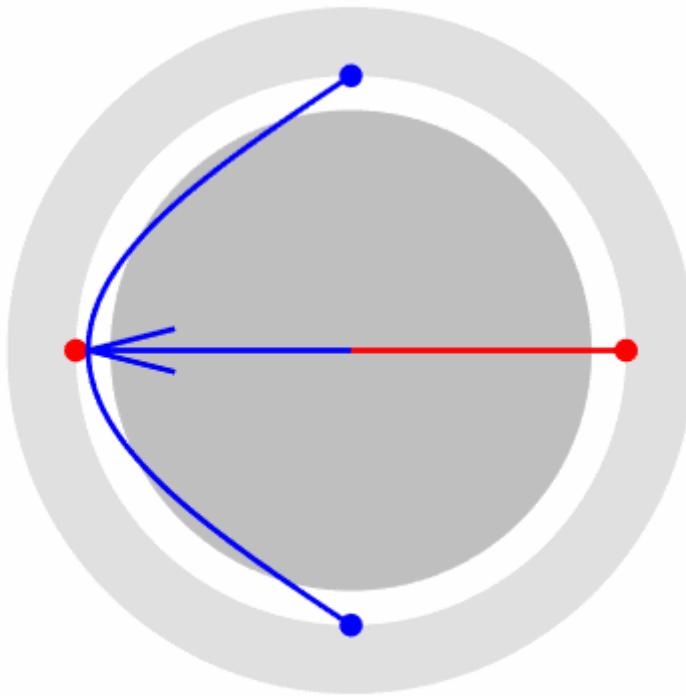
Décalé de 90° temporel et géométrique

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

Triphasé

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

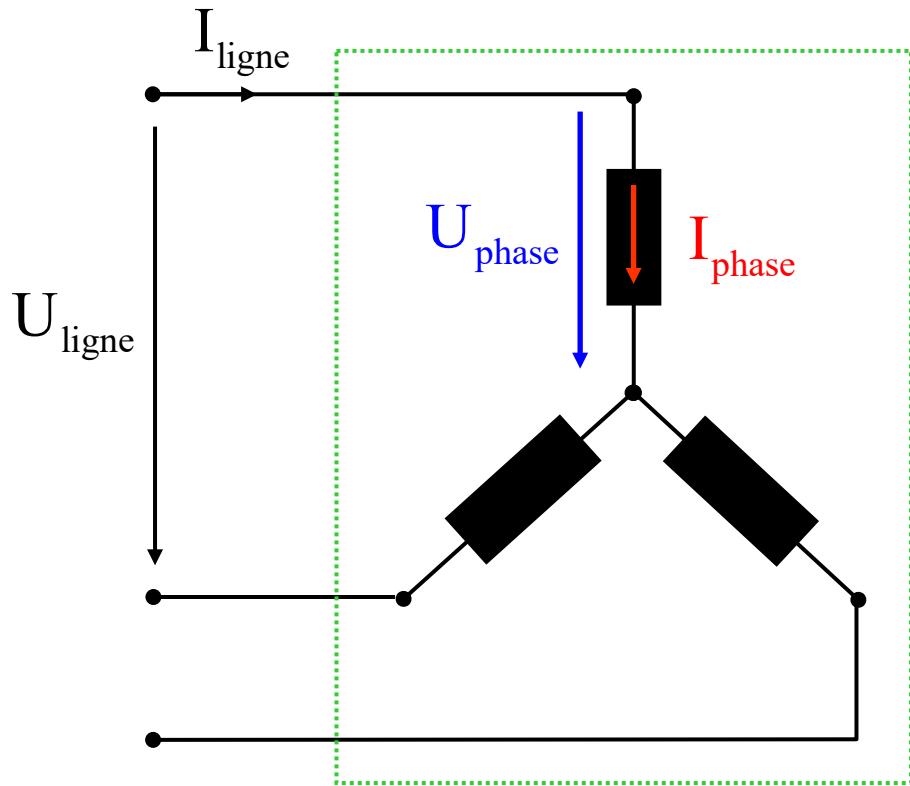
Champ tournant généré avec du biphasé



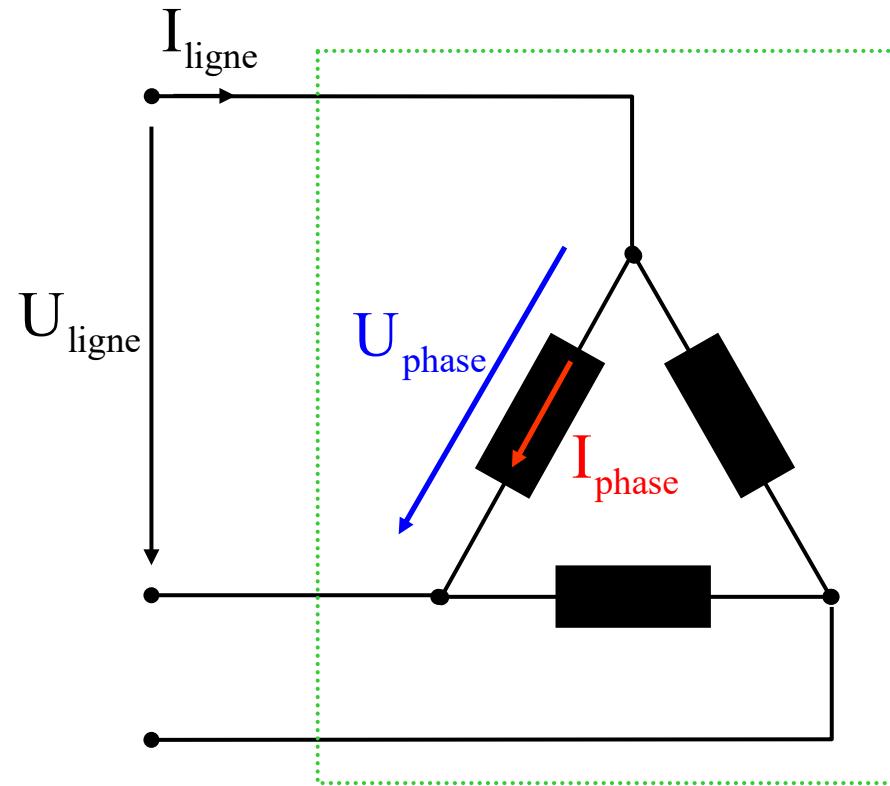
Sommaire

- Couple électromagnétique
 - Couple en fonction des inductances
- Champ tournant
- Rappels
 - Couplage étoile-triangle
 - Puissances
 - Plaque signalétique triphasée
- Nombre de paires de pôles
- Enroulements répartis

Rappel sur les couplages étoile-triangle



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



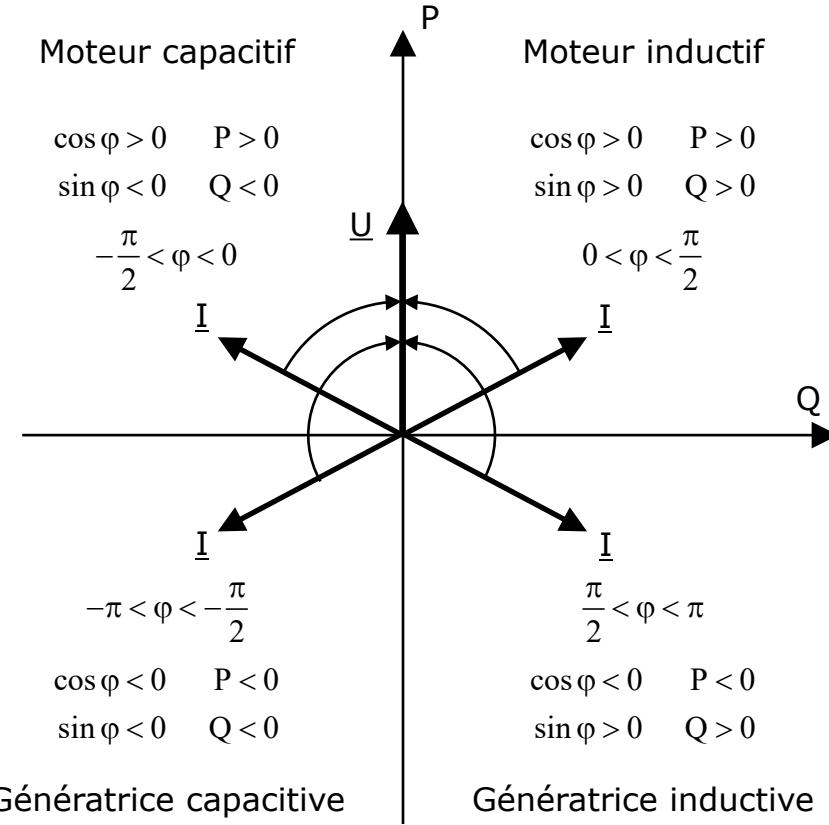
$$\begin{cases} U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}} \\ I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}} / \sqrt{3} \end{cases}$$

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]

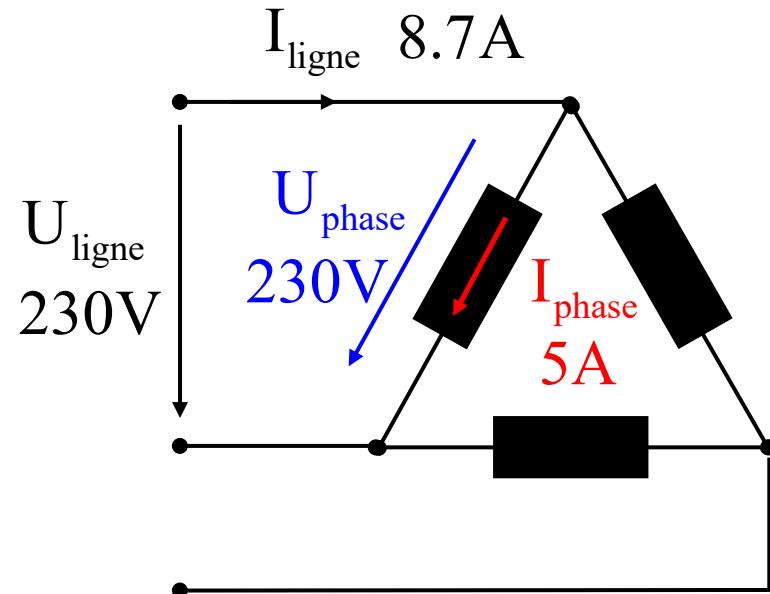
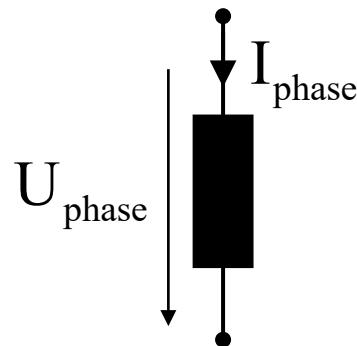
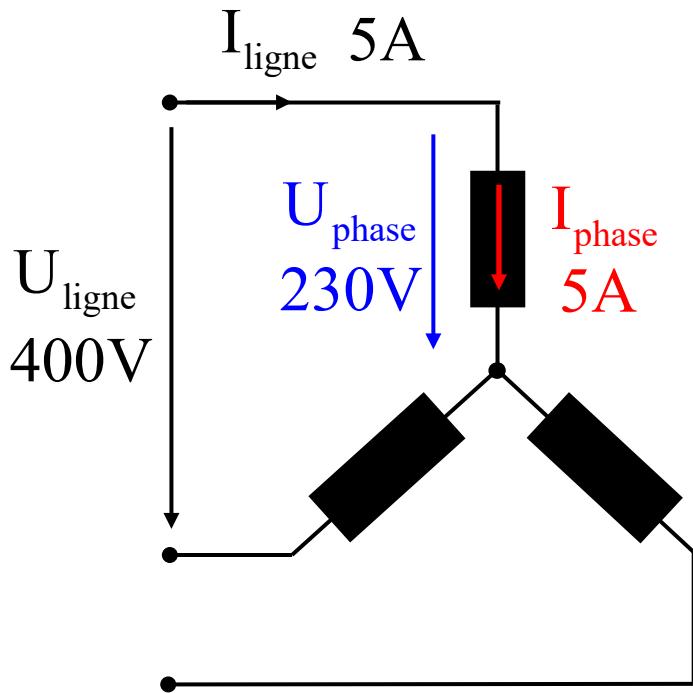
Puissance active $P = 3 U_{\text{ph}} I_{\text{ph}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{ligne}} I_{\text{ligne}} \cos \varphi$ [W]

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



Plaque signalétique triphasée

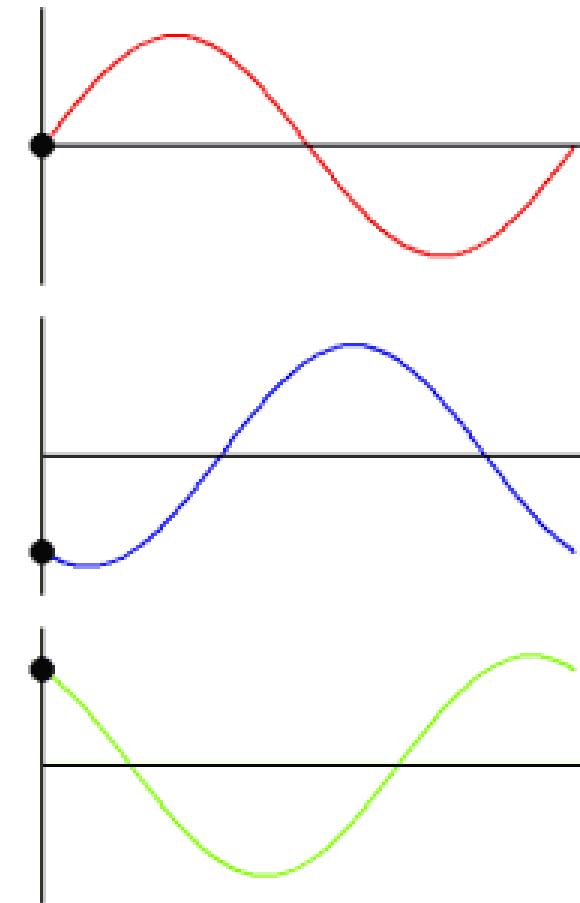
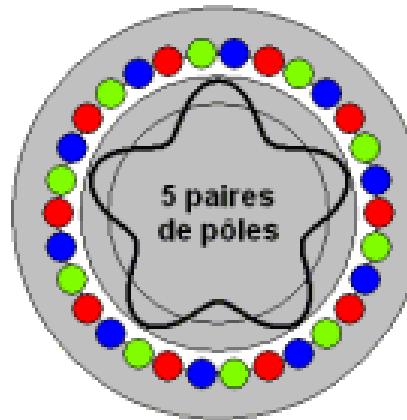
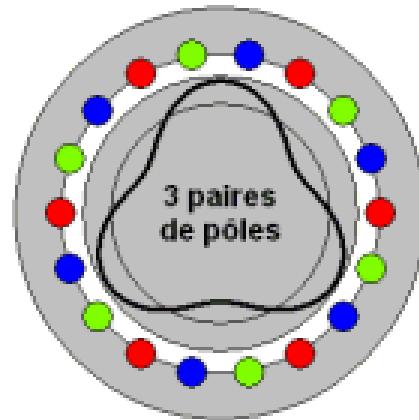
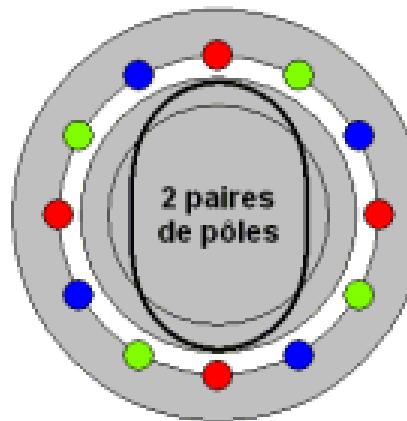
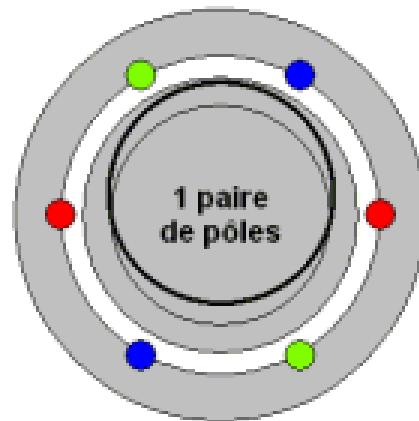
Y 400V / 5A
Δ 230V / 8.7A



Sommaire

- Couple électromagnétique
 - Couple en fonction des inductances
- Champ tournant
- Rappels
 - Couplage étoile-triangle
 - Puissances
 - Plaque signalétique triphasée
- Nombre de paires de pôles
- Enroulements répartis

Illustration du rapport entre le nombre de paires de pôles et la vitesse mécanique, ainsi que la répartition des spires en fonction du nombre de paires de pôles



Vitesses et 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 :

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

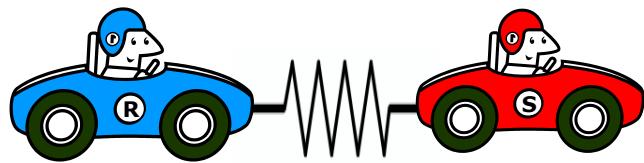
$\omega \rightarrow [\text{rad} / \text{s}] \rightarrow$ Monde électrique

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

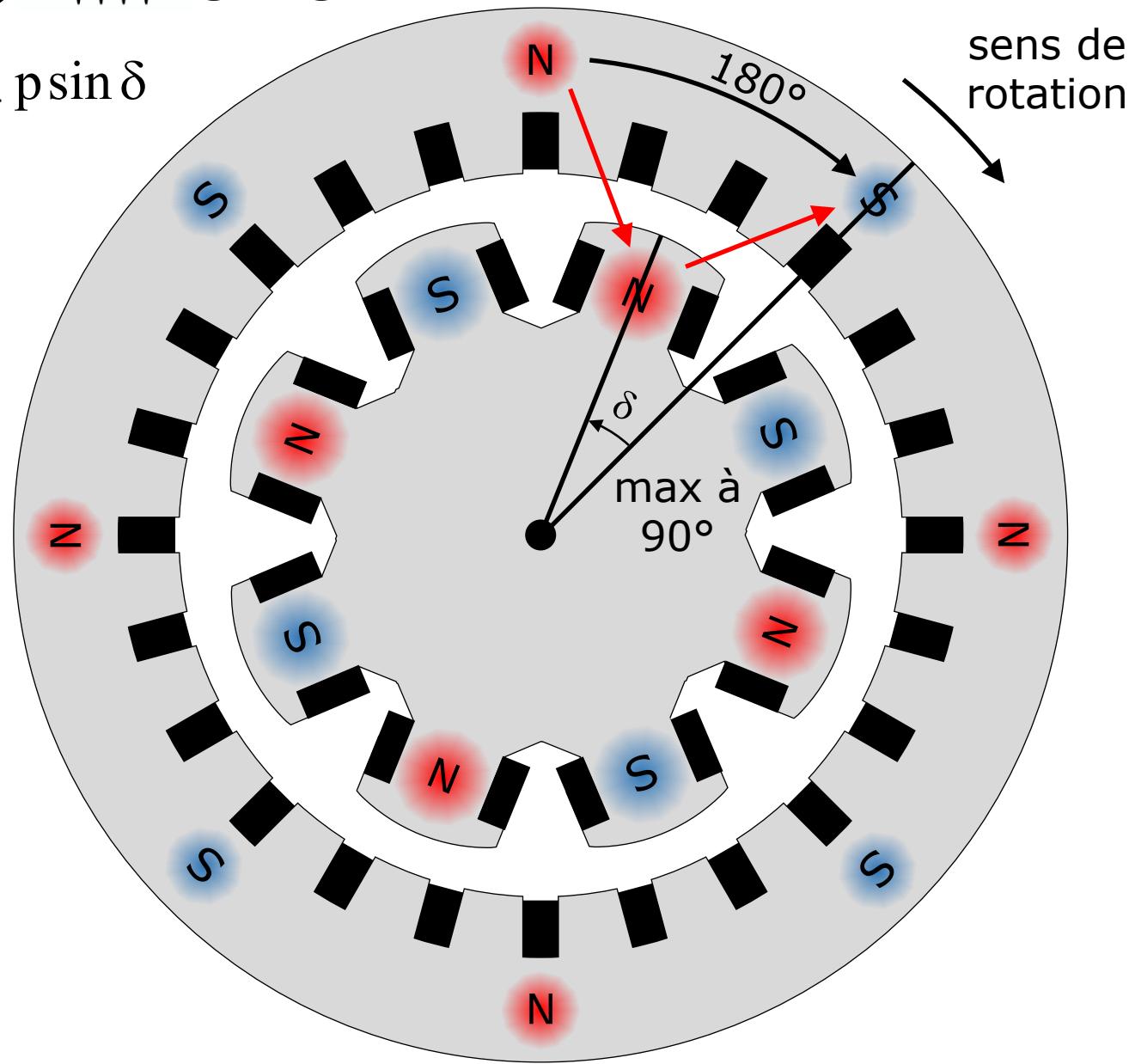
$n \rightarrow [\text{tr} / \text{s}] \rightarrow$ Monde mécanique

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

Vitesses et nombre de paires de pôles



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

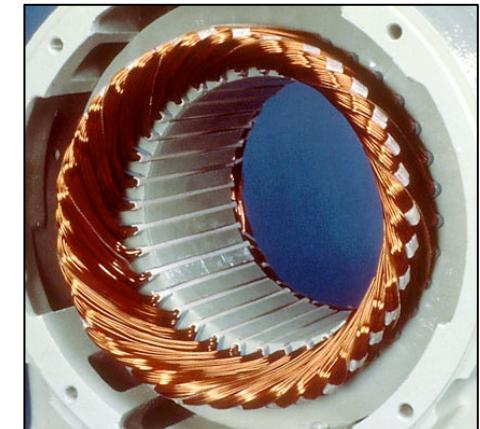
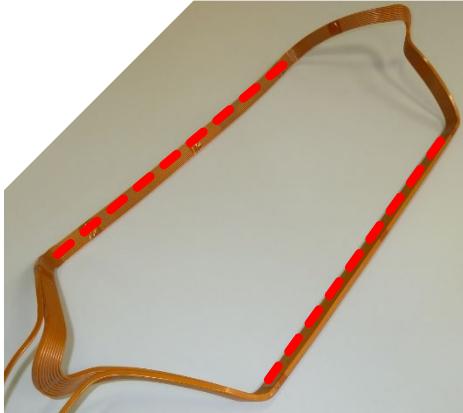
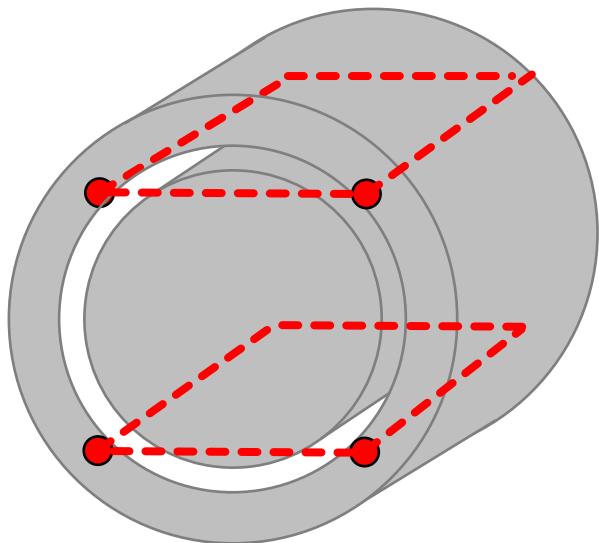
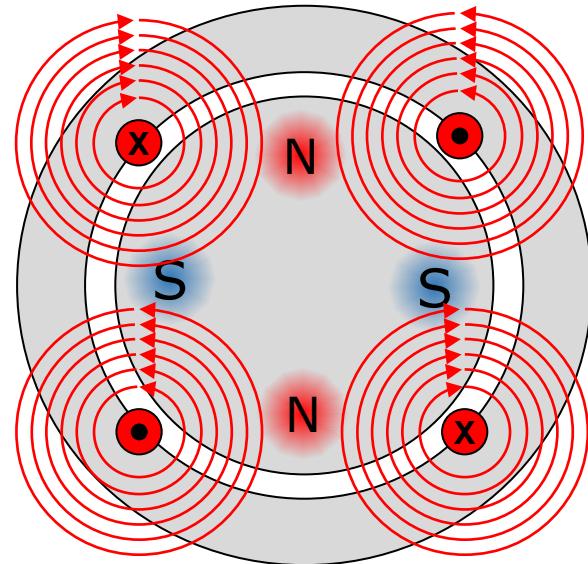
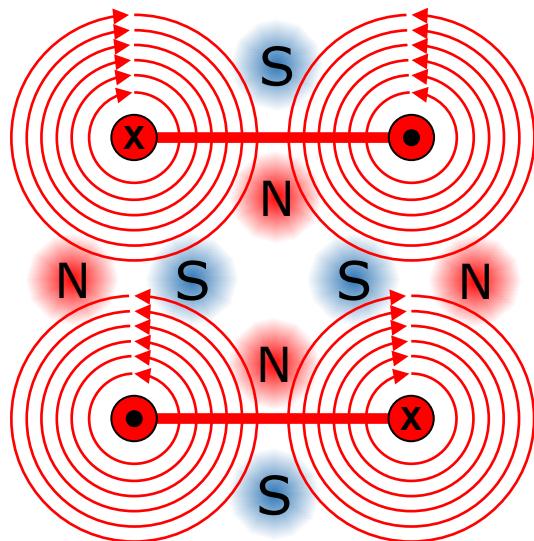


Sommaire

- Couple électromagnétique
 - Couple en fonction des inductances
- Champ tournant
- Rappels
 - Couplage étoile-triangle
 - Puissances
 - Plaque signalétique triphasée
- Nombre de paires de pôles
- Enroulements répartis

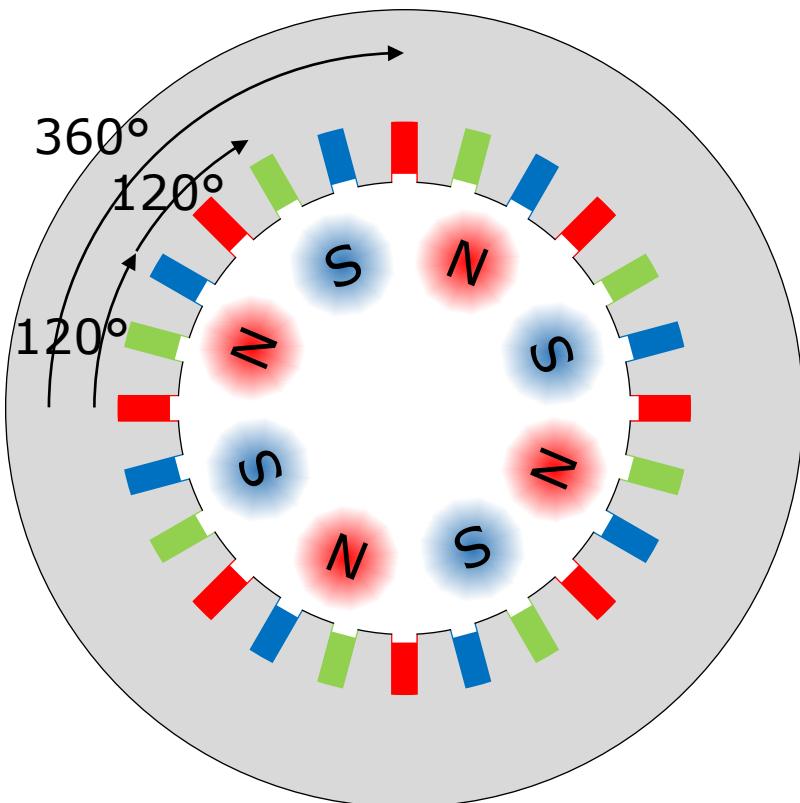
Génération d'un champ d'induction magnétique

Stator avec 4 pôles
(2 paires de pôles)

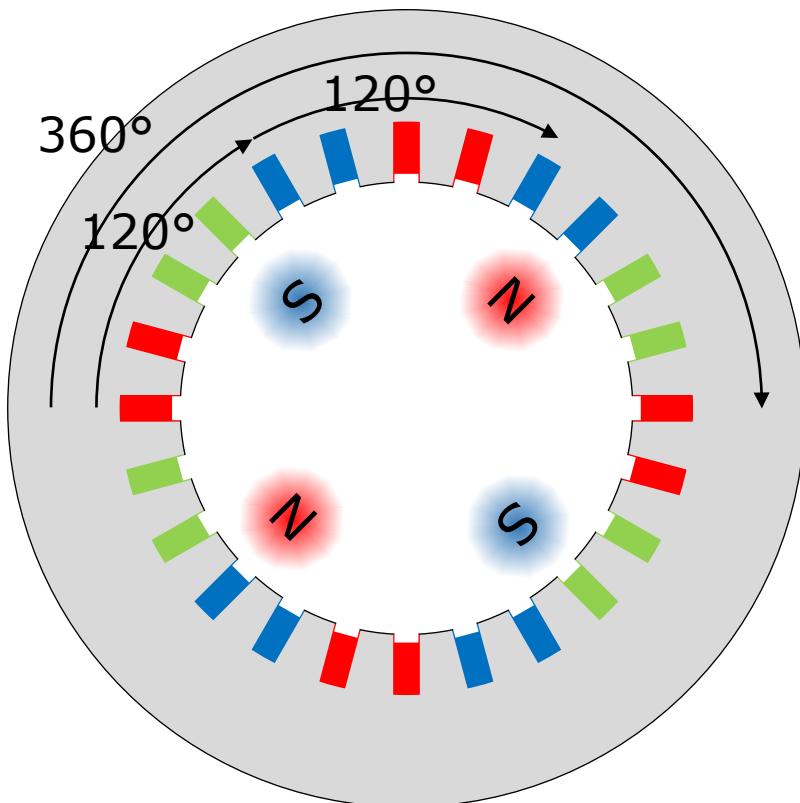


Enroulements répartis

4 paires de pôles
(24 encoches)

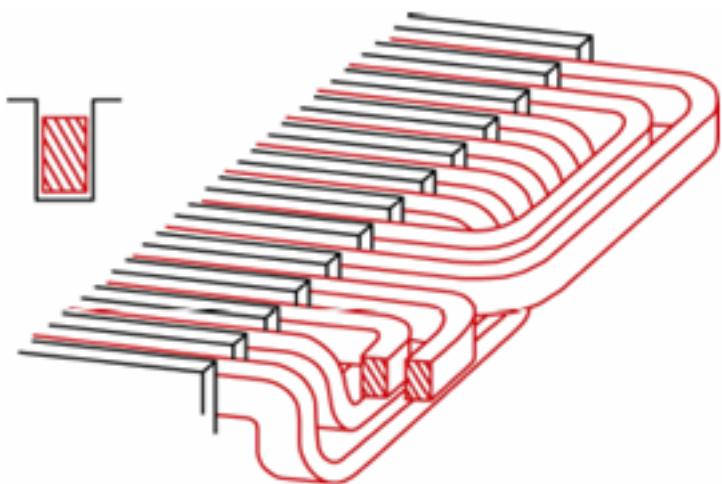


2 paires de pôles
(24 encoches)

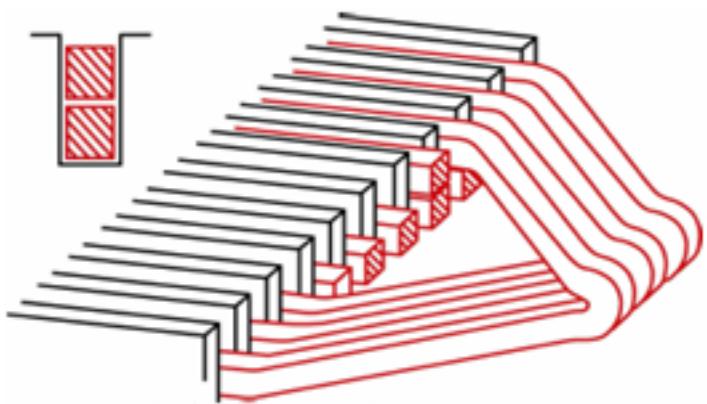


Enroulements répartis

Enroulement à 1 couche



Enroulement à 2 couches



<https://www.youtube.com/watch?v=YYQayMrK4Fo>

<https://www.youtube.com/watch?v=rq6z1hShFcE&t=962s>

Re-450 CFF

