

Machines électriques

pour Génie Mécanique

Éléments de base des machines
et rappels

André Hodder

Sommaire

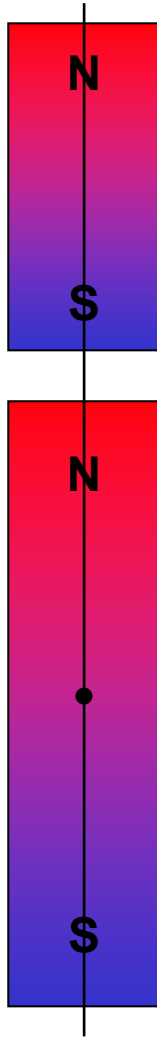
- Introduction
- Circuit magnétique
- Transformateur
- **Éléments de base des machines**
- Machine asynchrone
- Machine à courant continu
- Machine synchrone
- Moteur synchrone à aimants permanents
- Moteur pas à pas

Sommaire

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

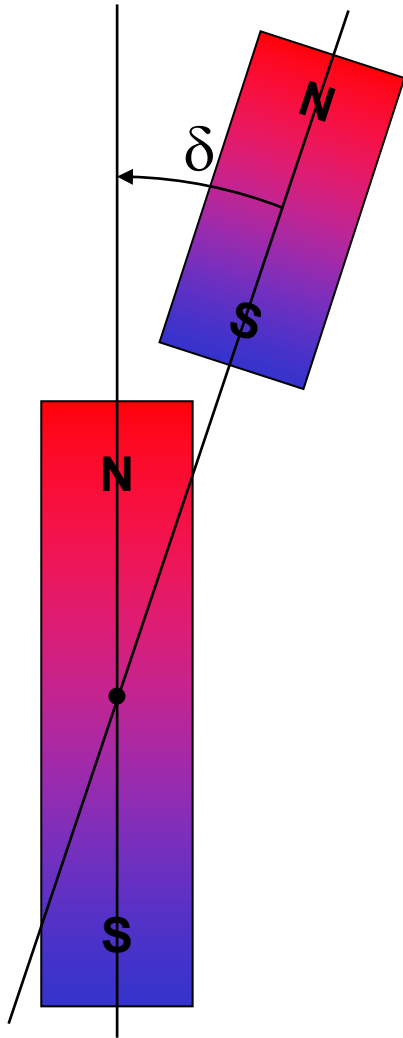
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



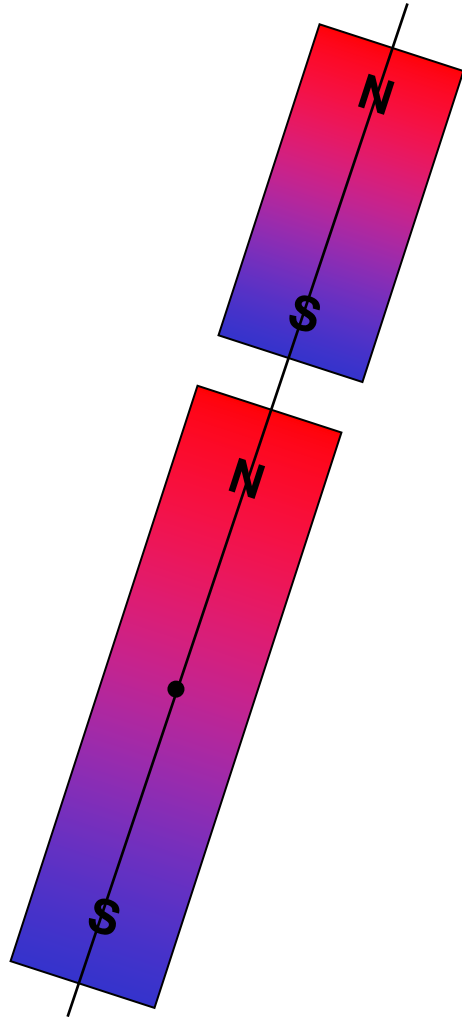
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



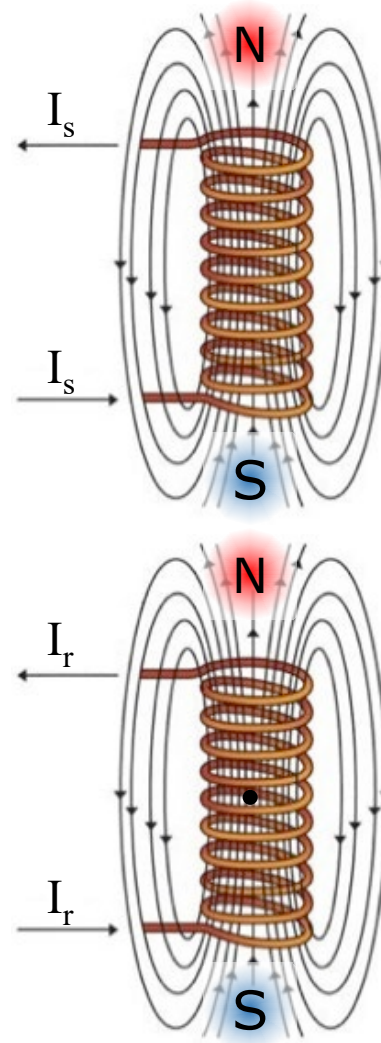
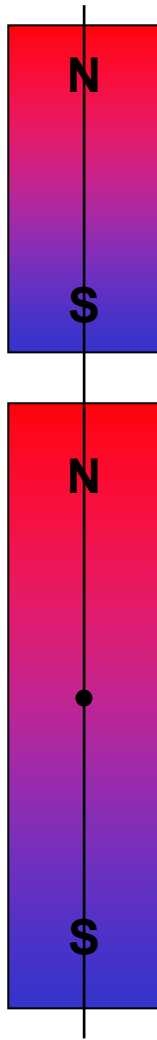
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



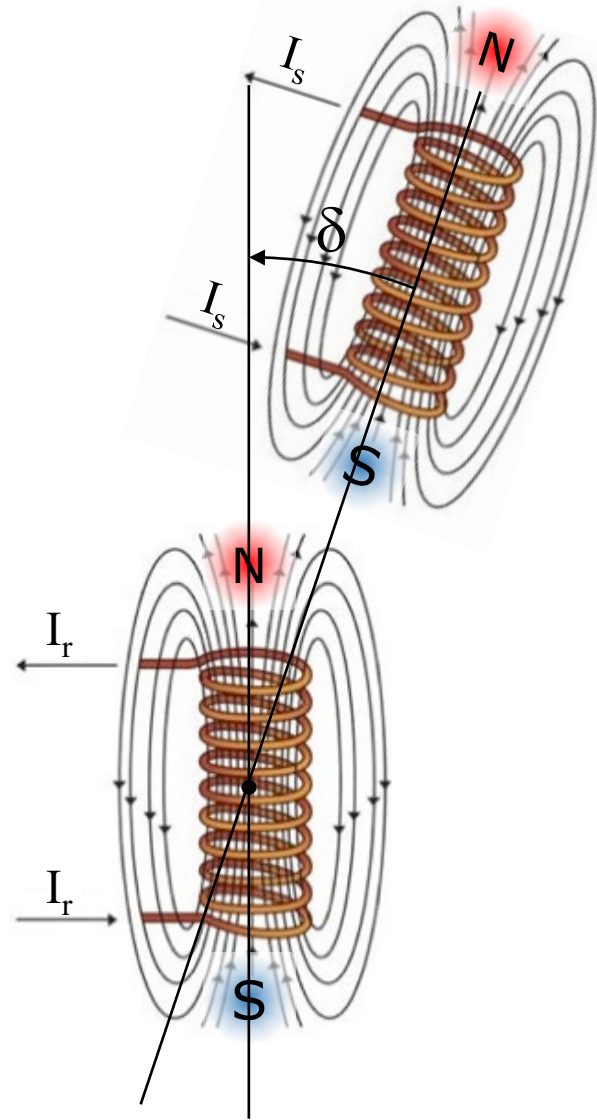
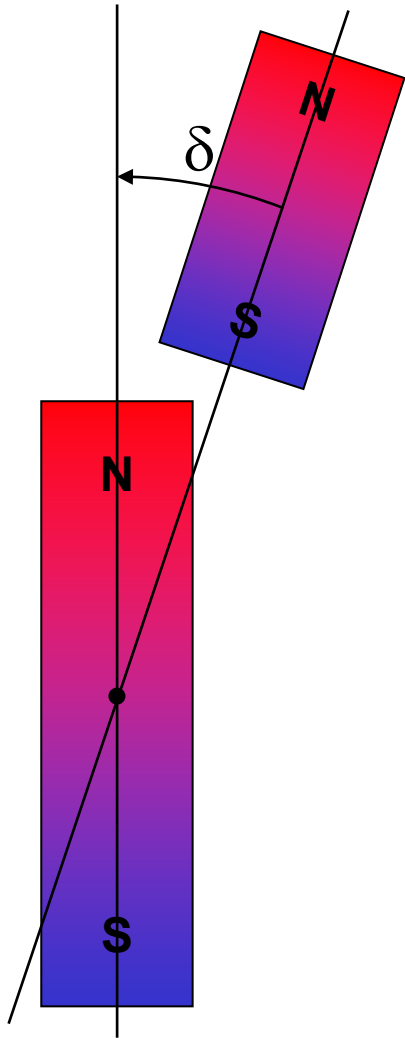
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



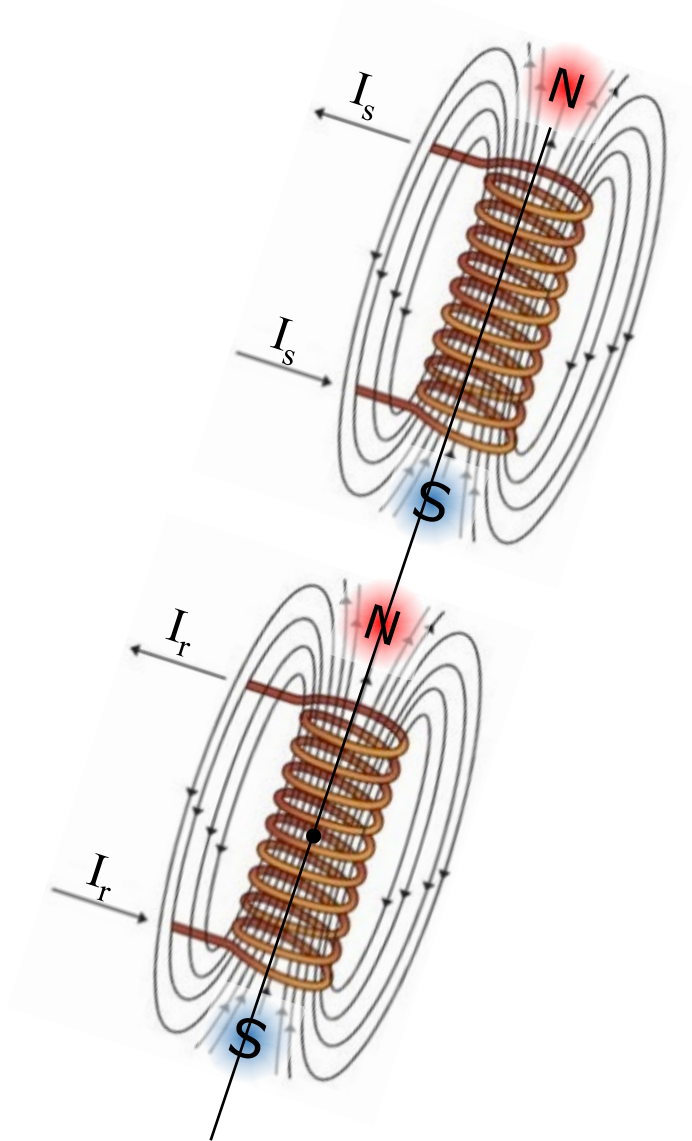
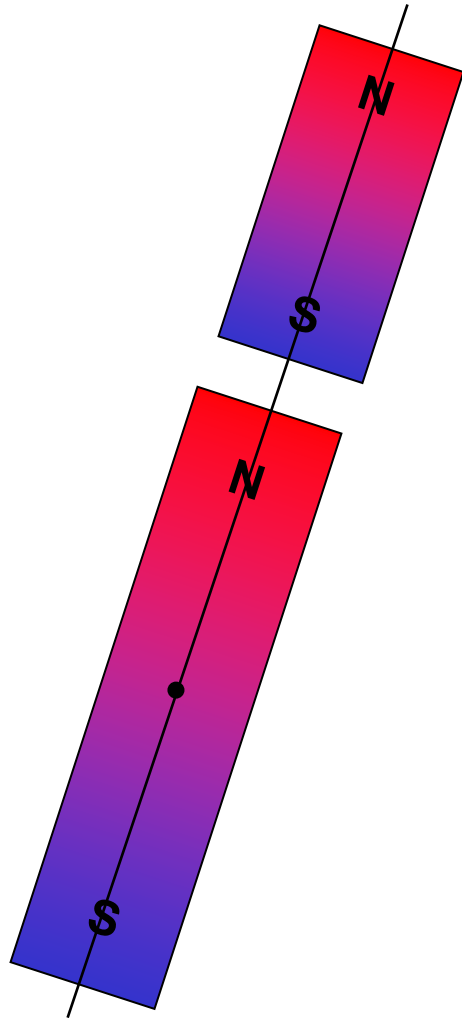
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques

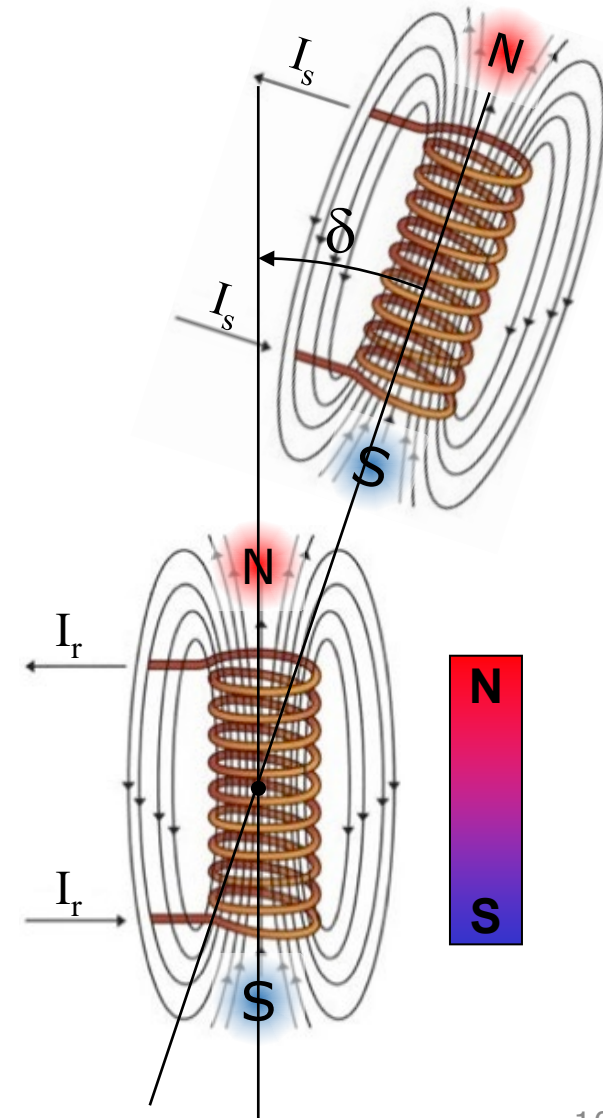
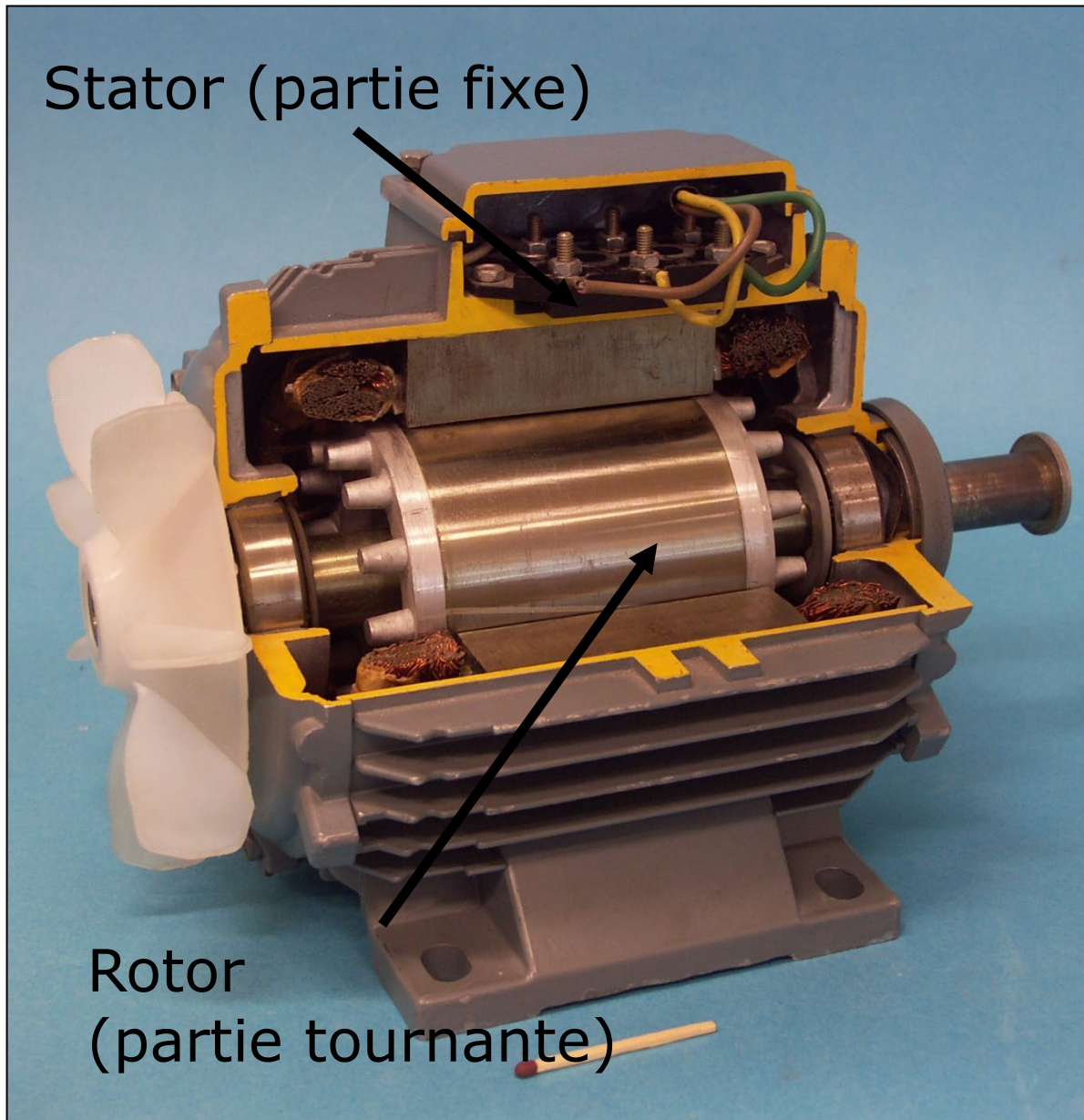


Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



Constitution d'une machine électrique



Constitution d'une machine électrique

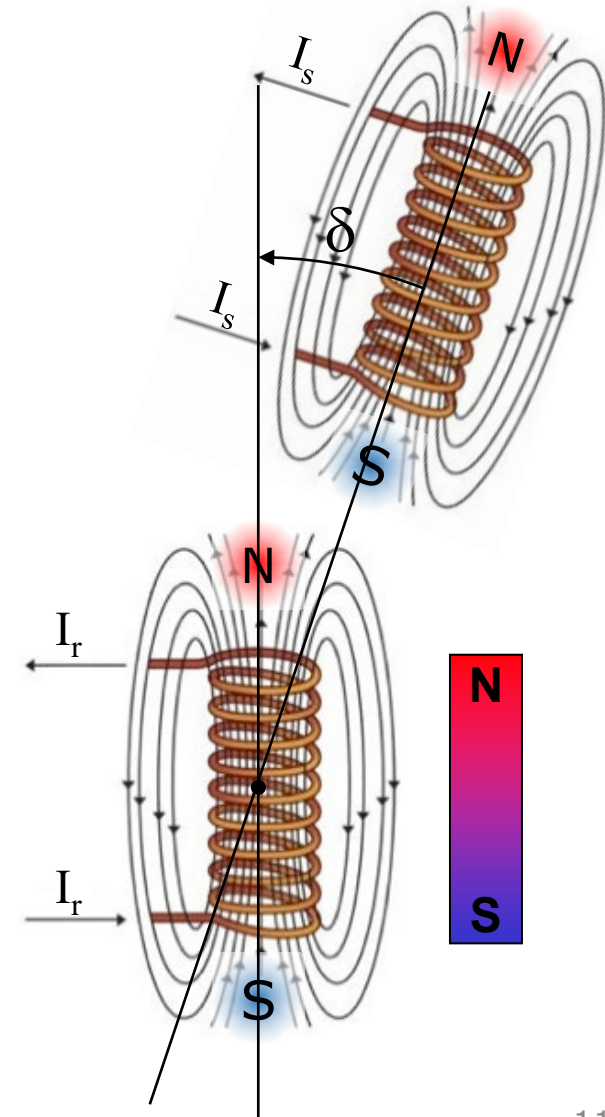
Outrunner

Rotor

(partie tournante)

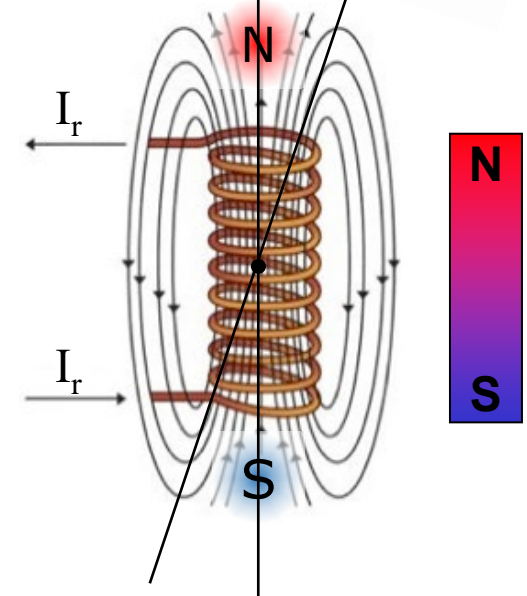
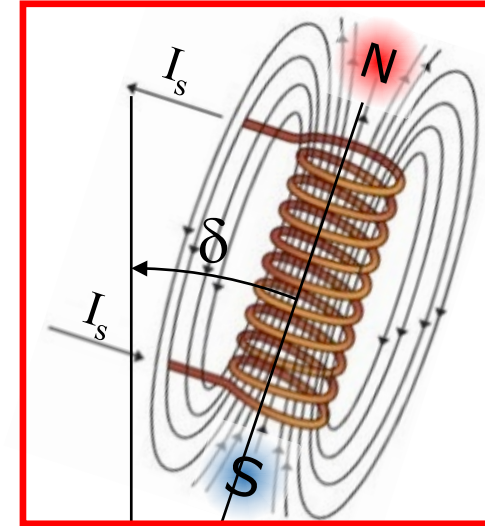
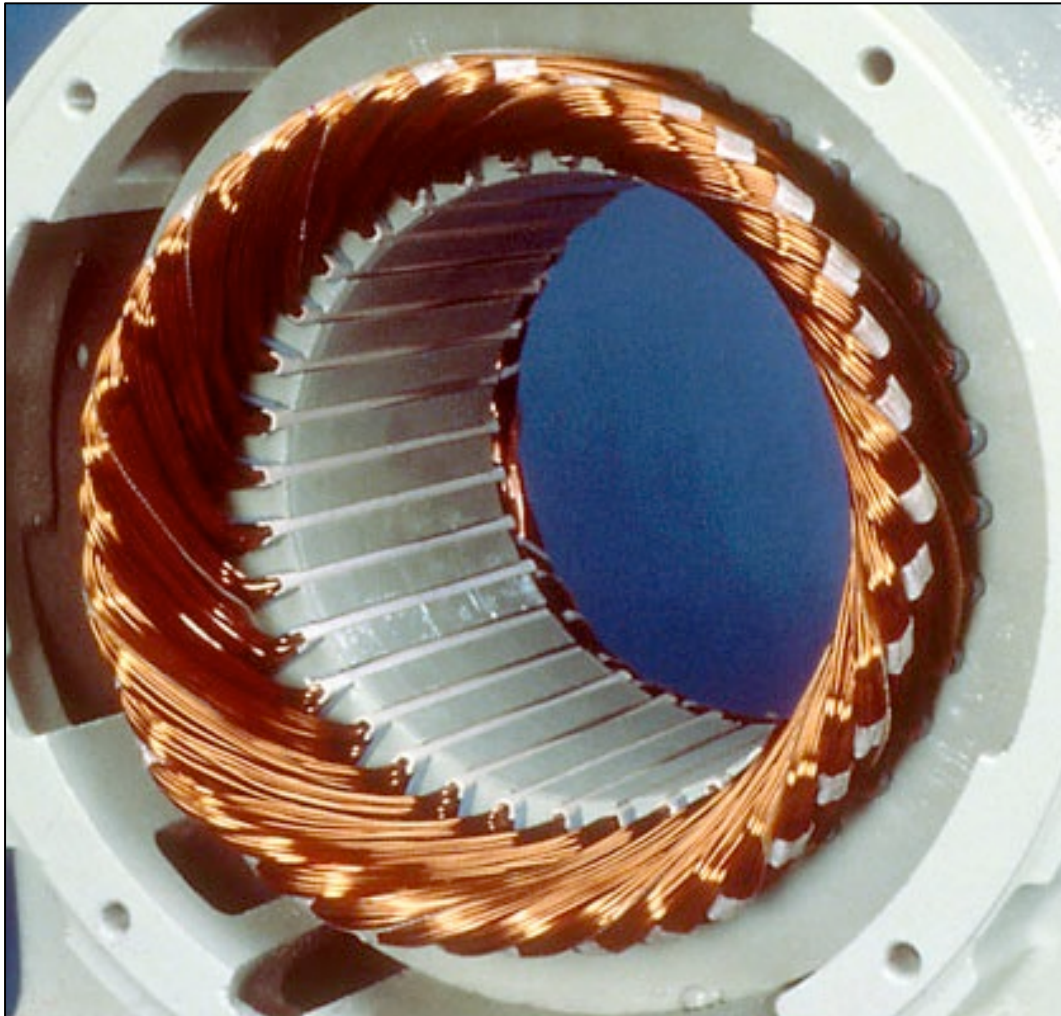


Stator (partie fixe)

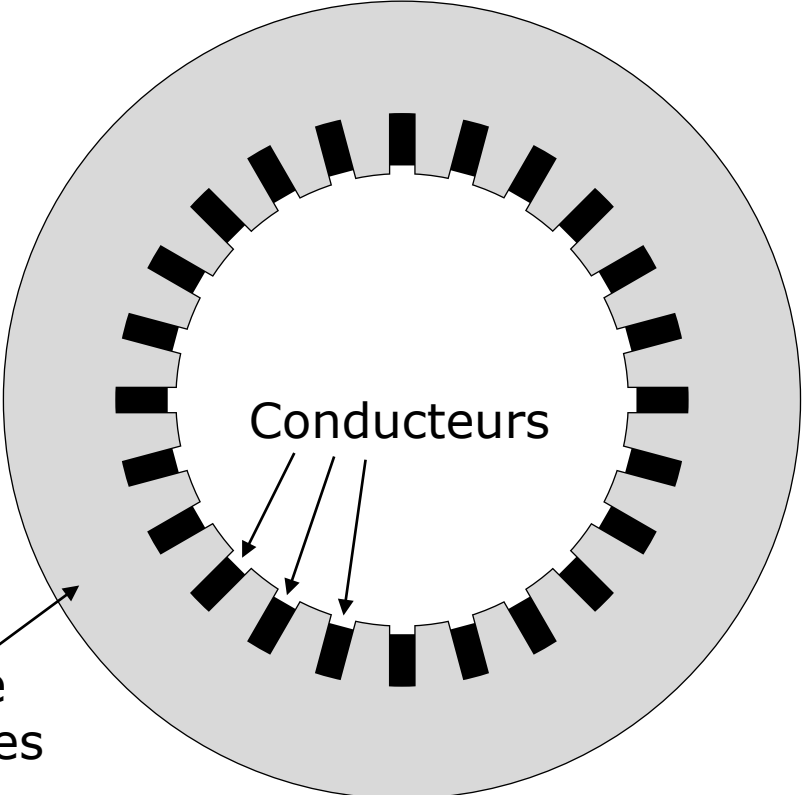
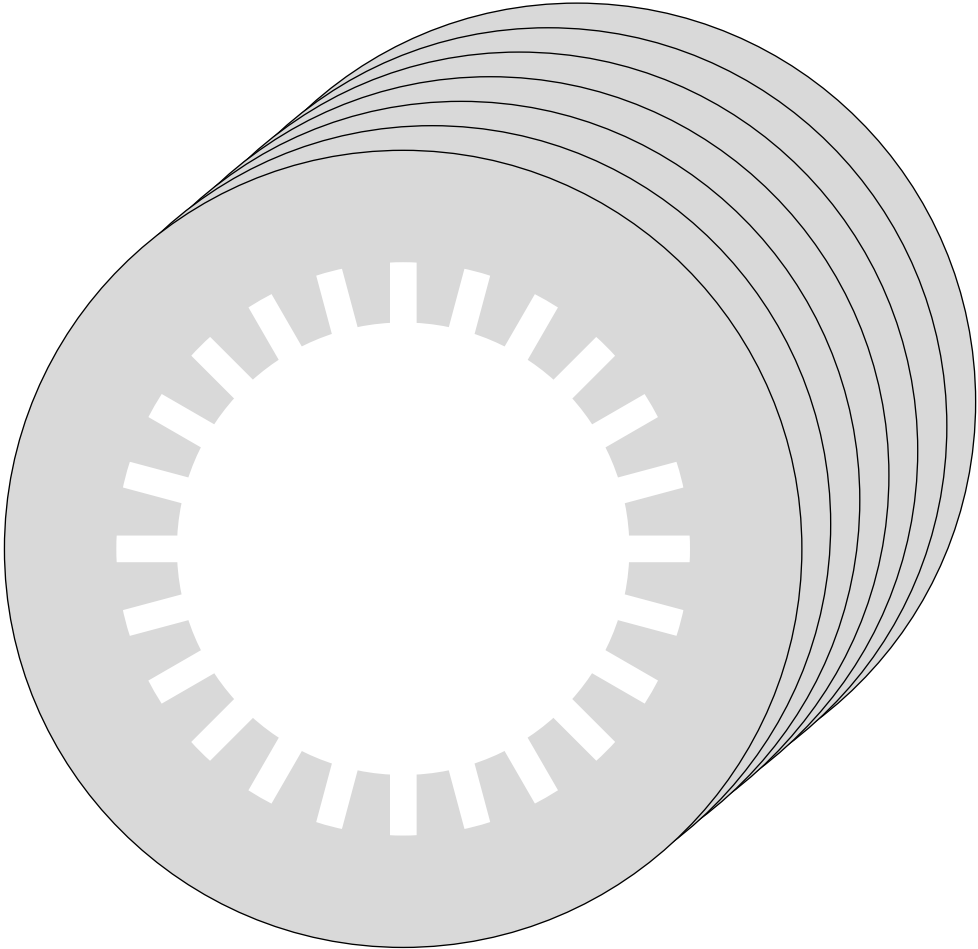
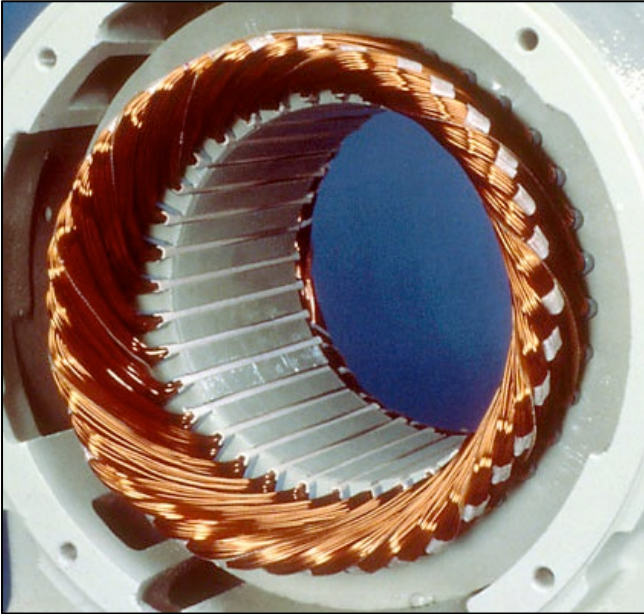


Champ d'induction magnétique créé au stator

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



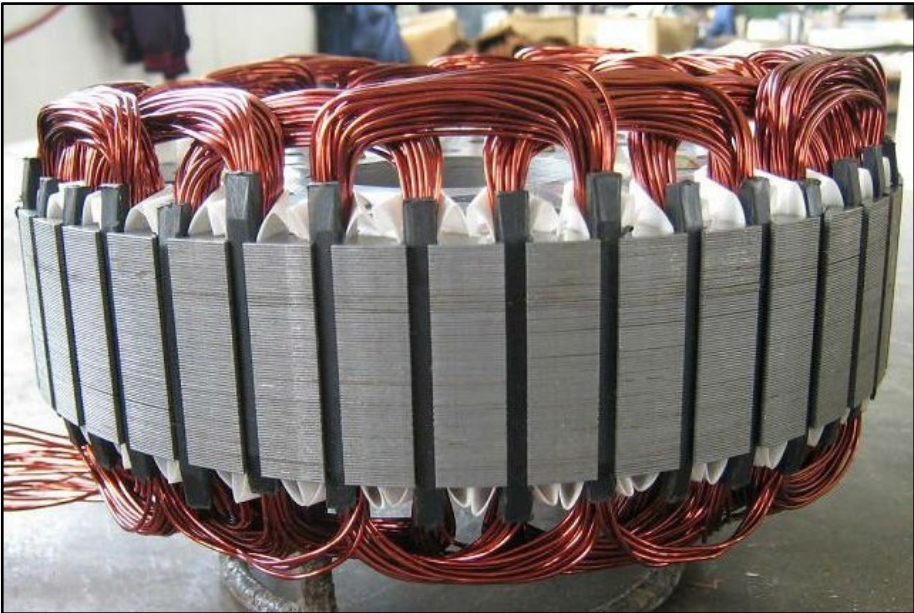
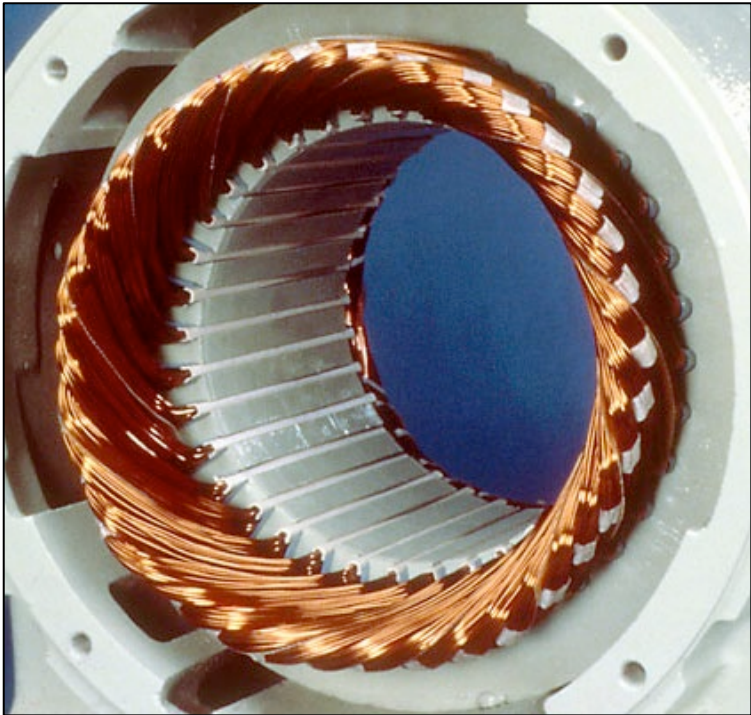
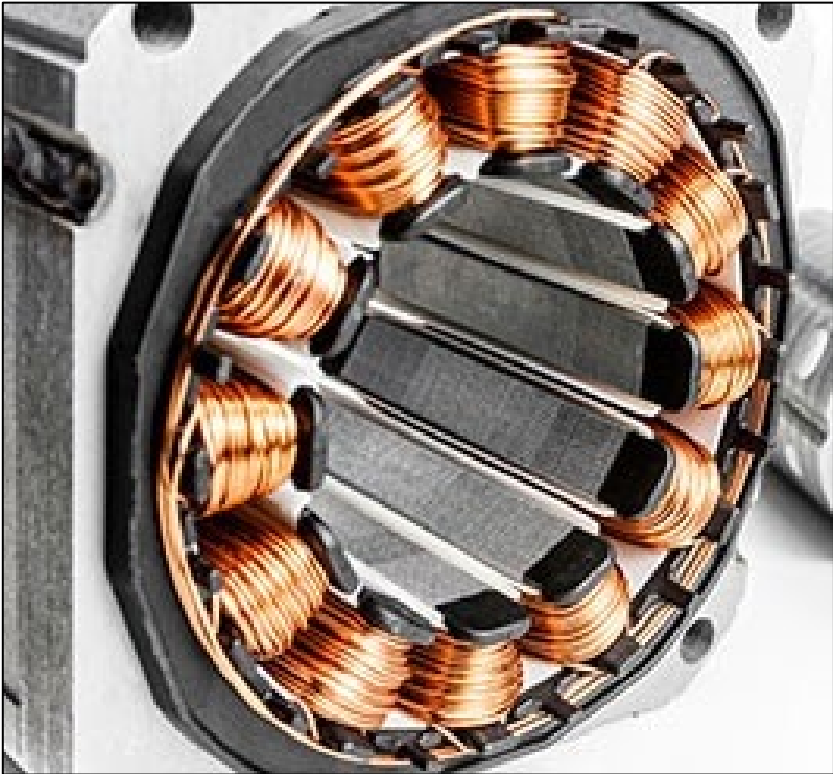
Constitution du stator



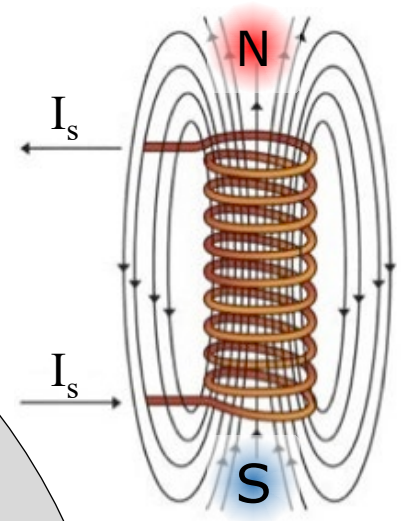
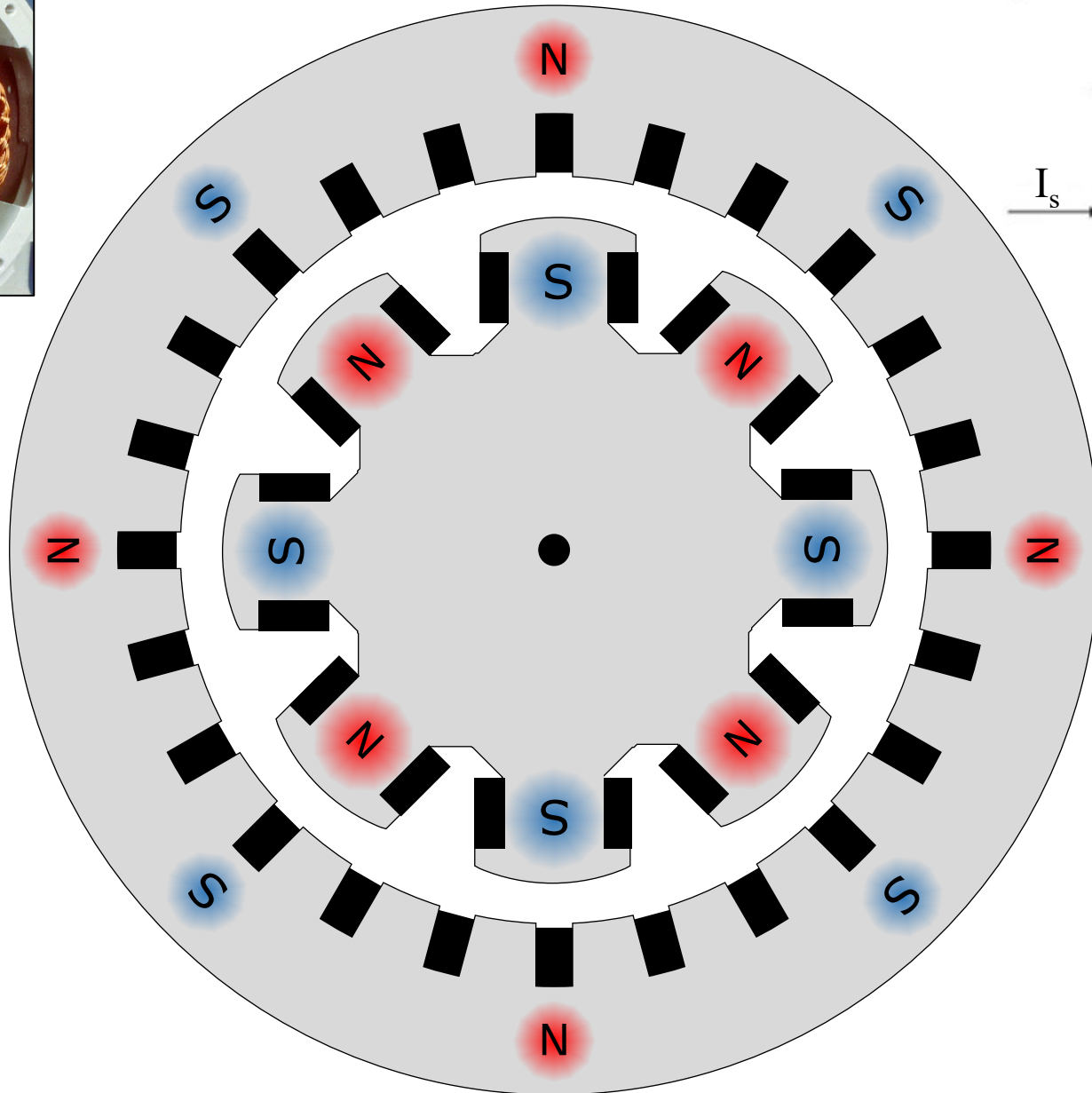
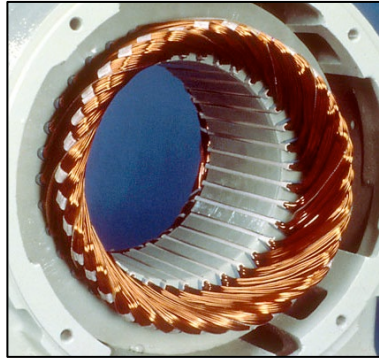
Empilement de tôles statoriques

Conducteurs

Stator



Principe de fonctionnement



Couple électromagnétique

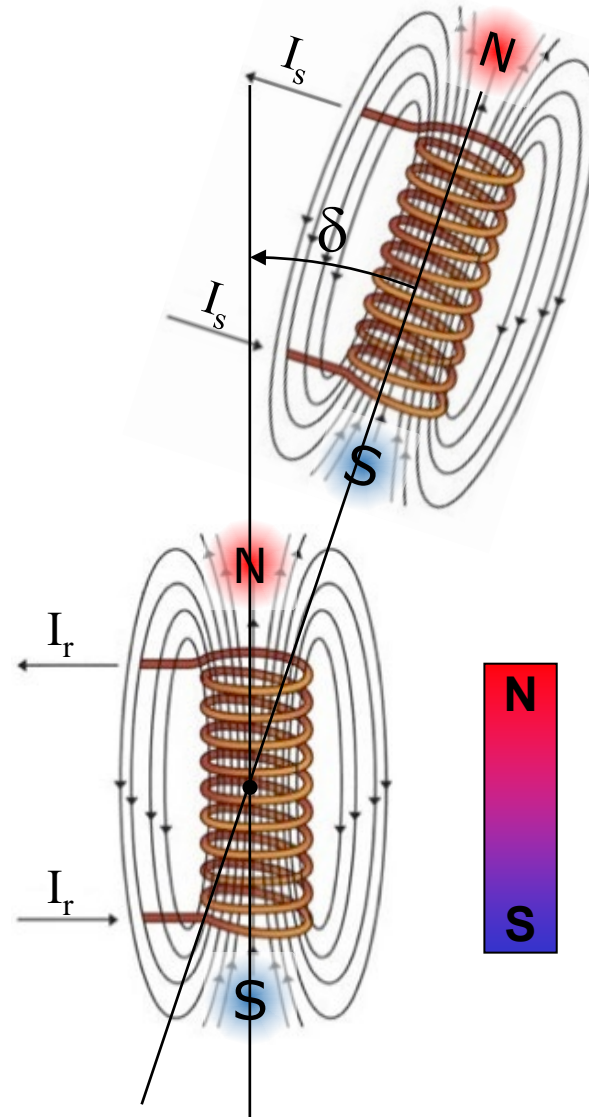
Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques

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

↑
Nombre de paires de pôles

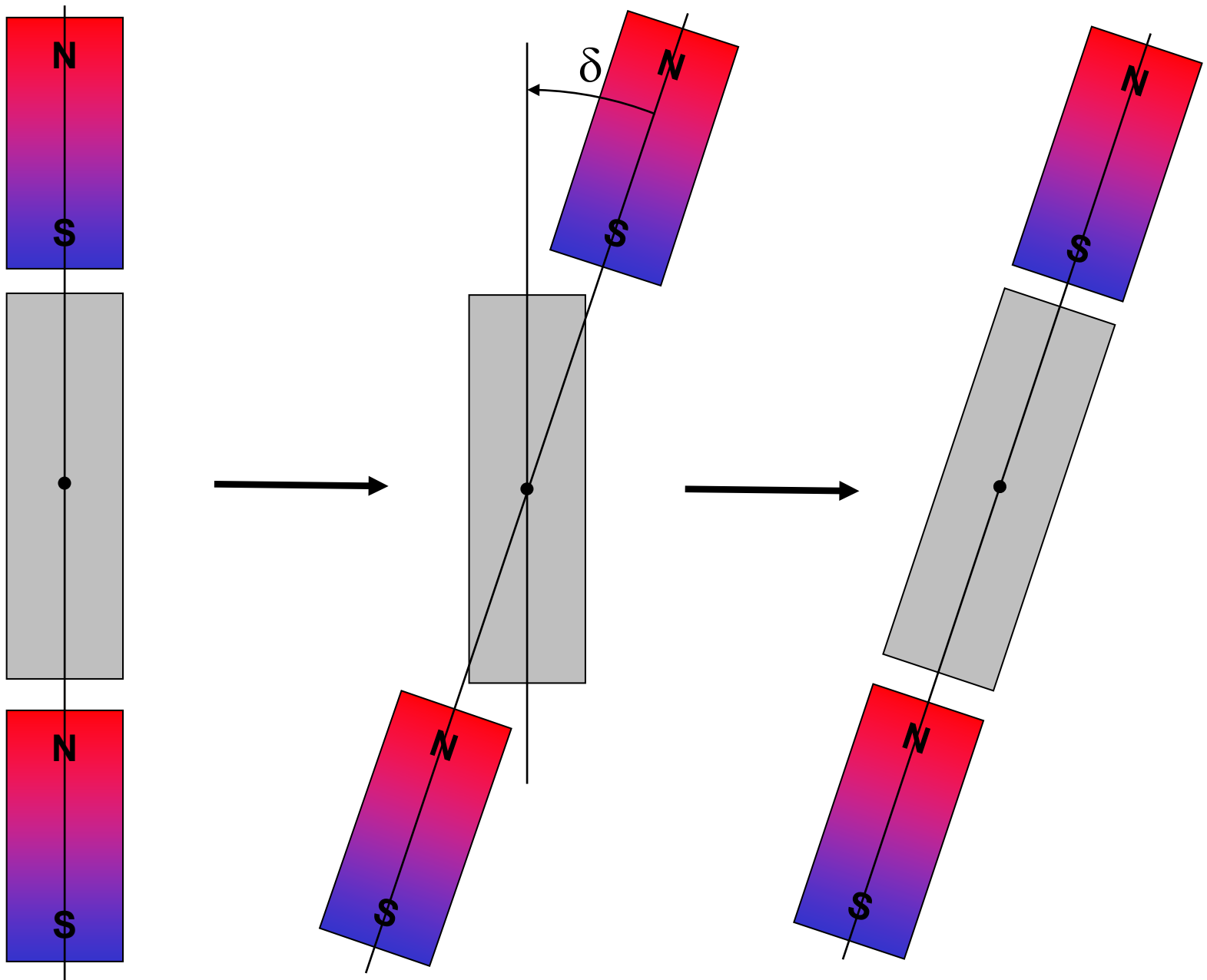
2 conditions :

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



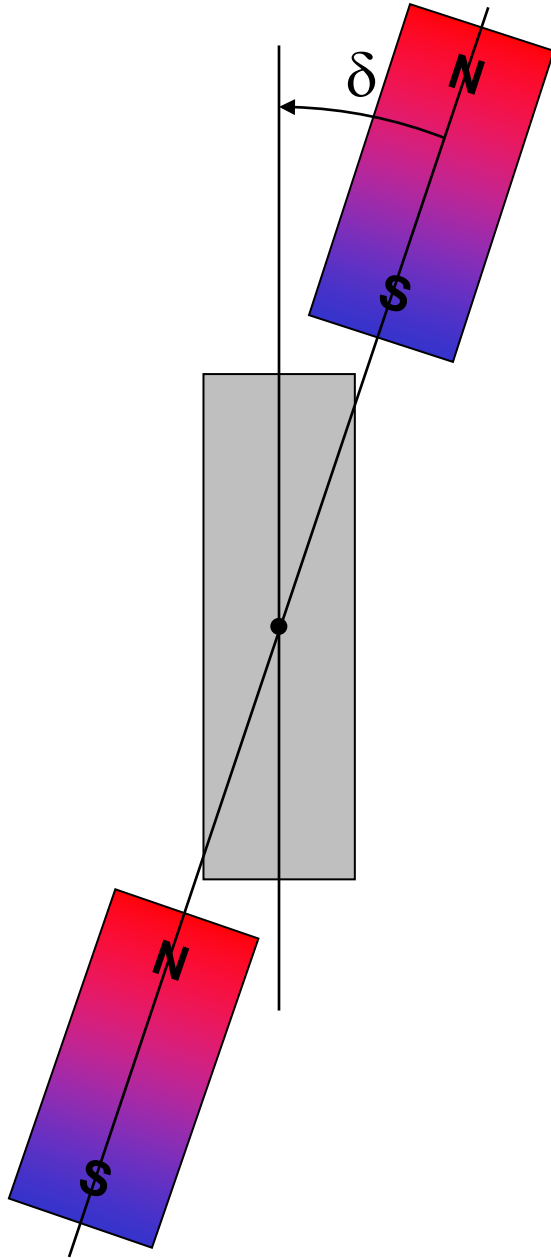
Couple réactant

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



Couple réluctant

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



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

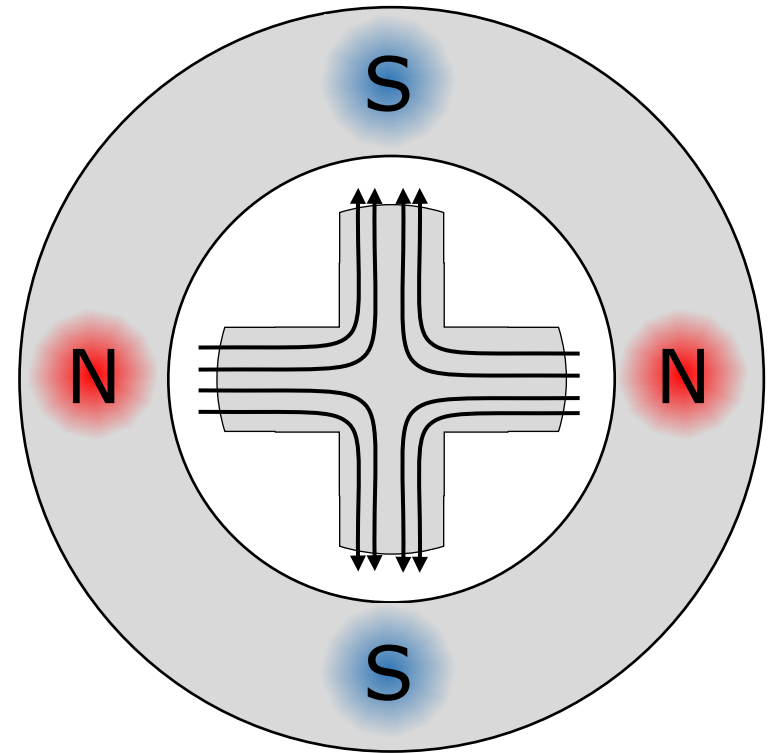
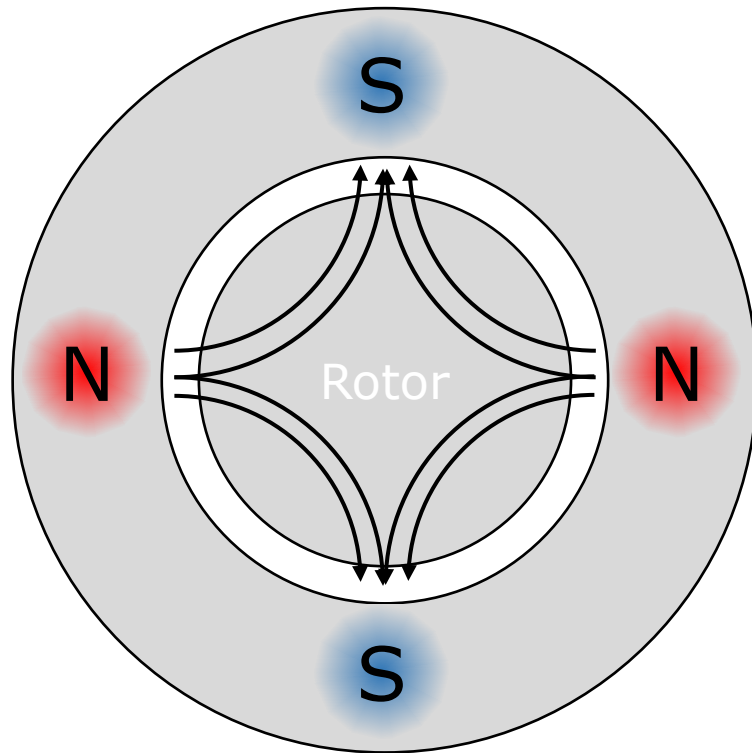
↑
nombre de paires de pôles

2 conditions :

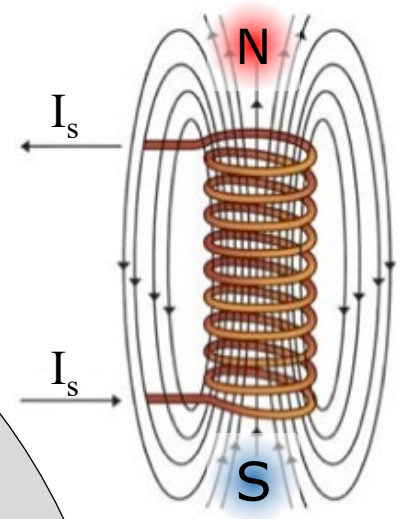
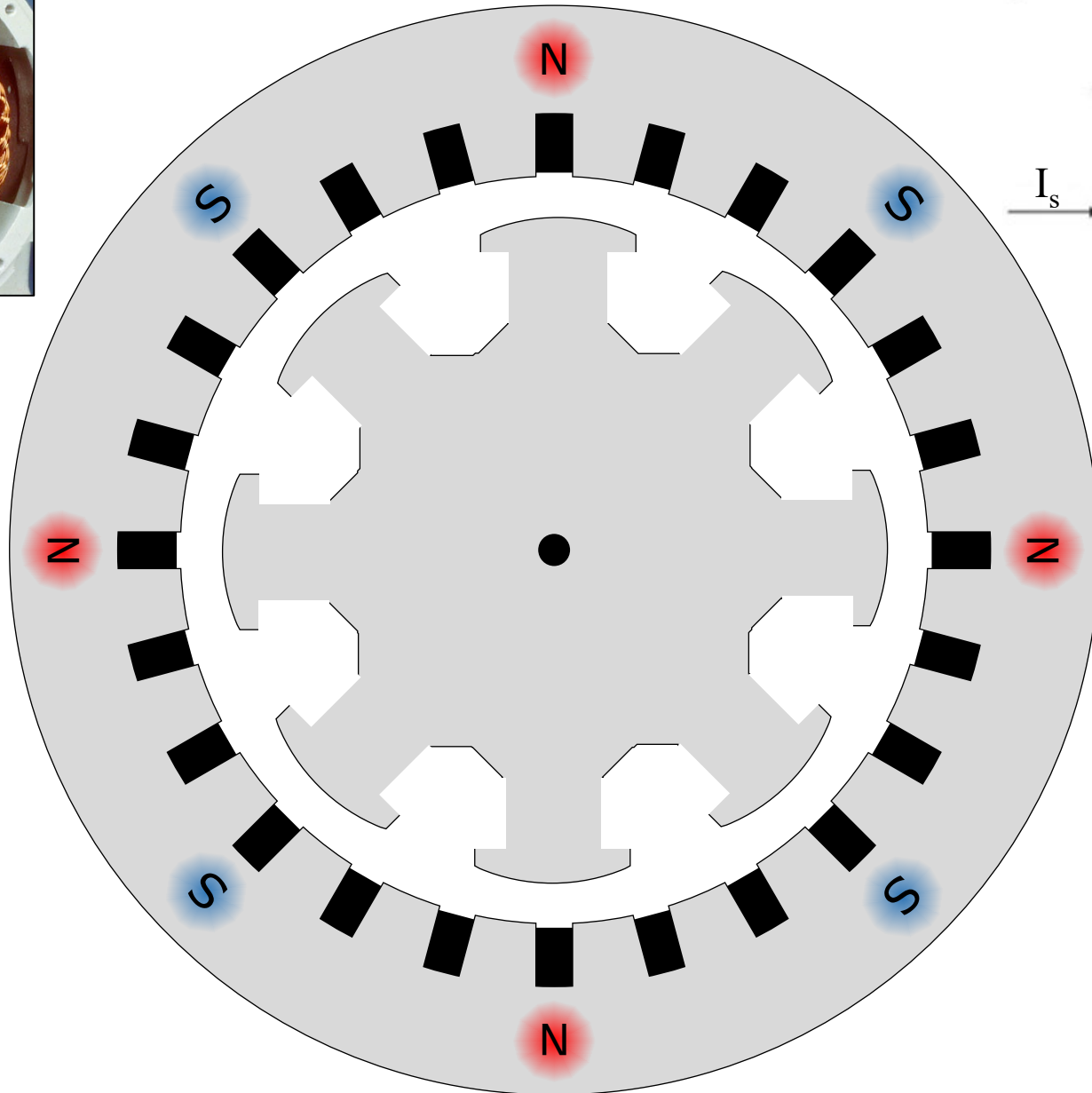
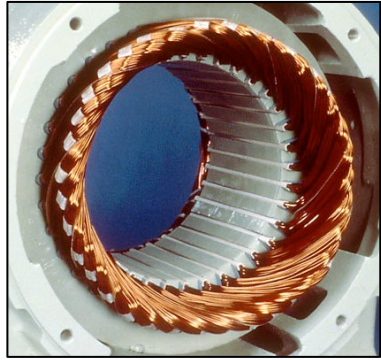
- Même nombre de pièces saillantes que de pôles (ou multiple)
- Même vitesse

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

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

↑
nombre de paires de pôles

2 conditions :

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

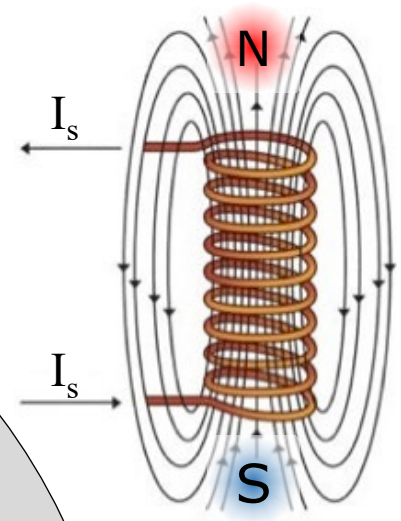
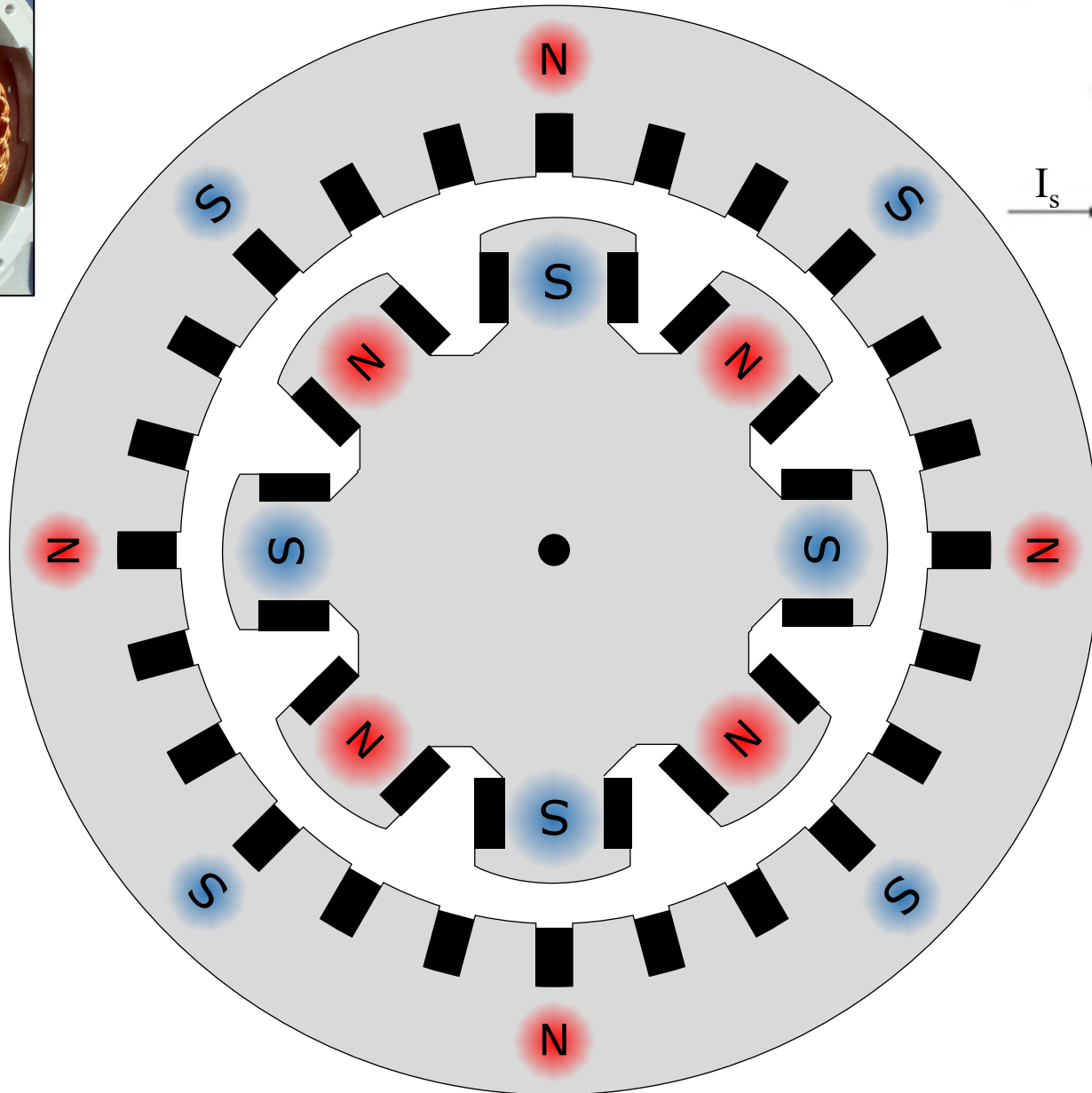
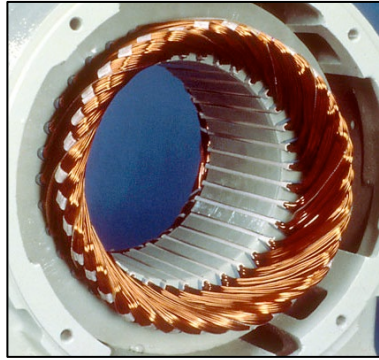
$$T_{em} = k \hat{B}_s^2 p \sin(2 \delta)$$

↑
nombre de paires de pôles

2 conditions :

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

Principe de fonctionnement



Types de machines électriques

- Interaction entre 2 champs magnétiques

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

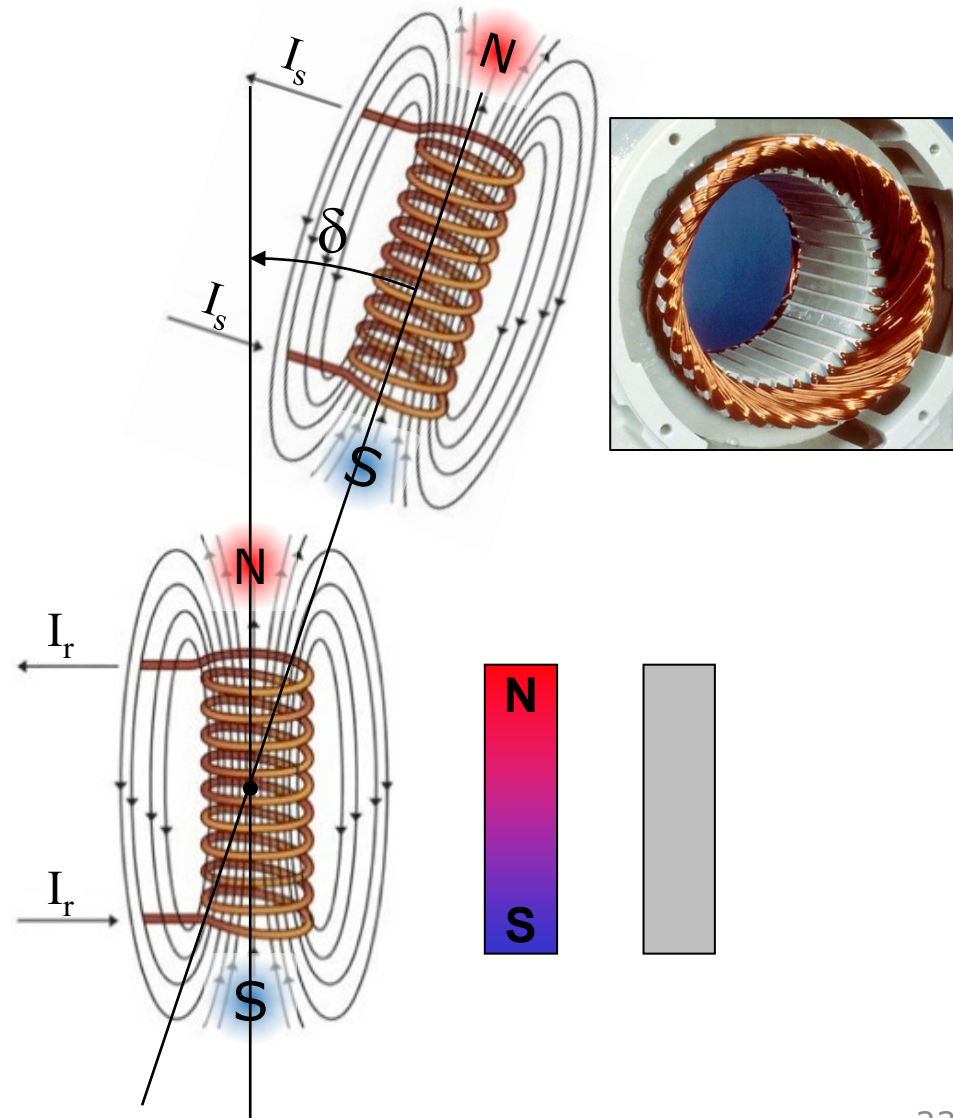
- Couple réactant

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

p = nombre de paires de pôles

Différents types de machines :

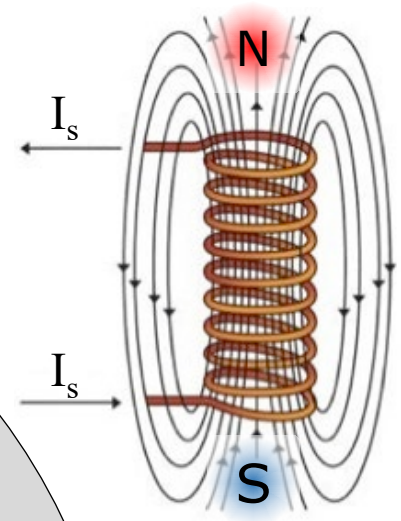
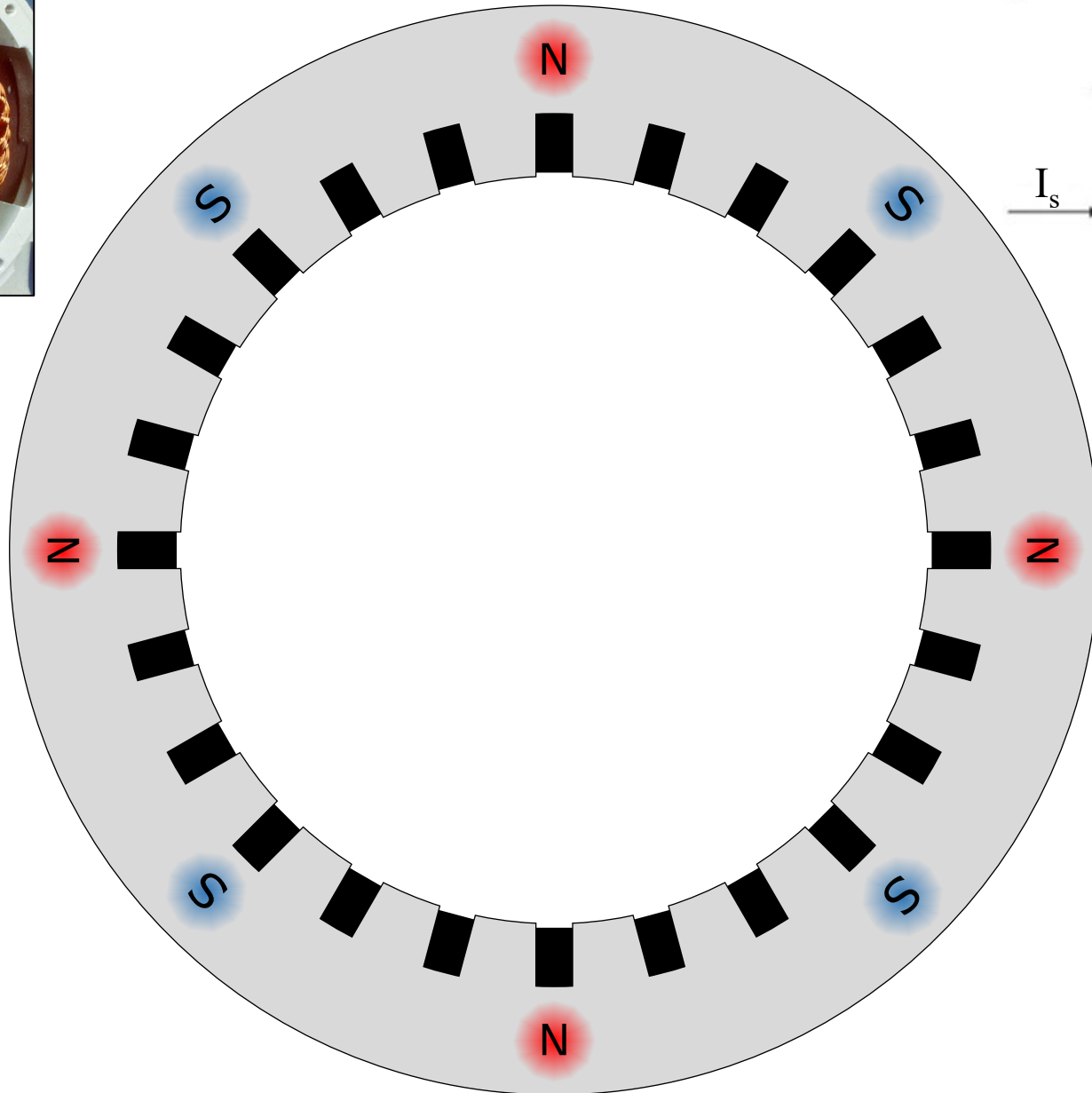
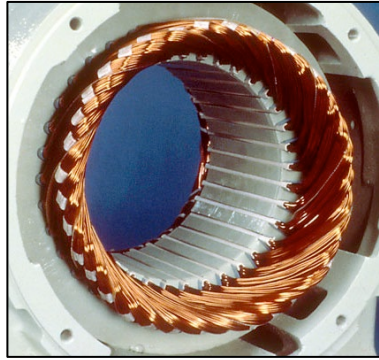
- Machine asynchrone
- Machine à courant continu
- Machine synchrone
- Moteur synchrone à aimants permanents
- Moteur pas à pas



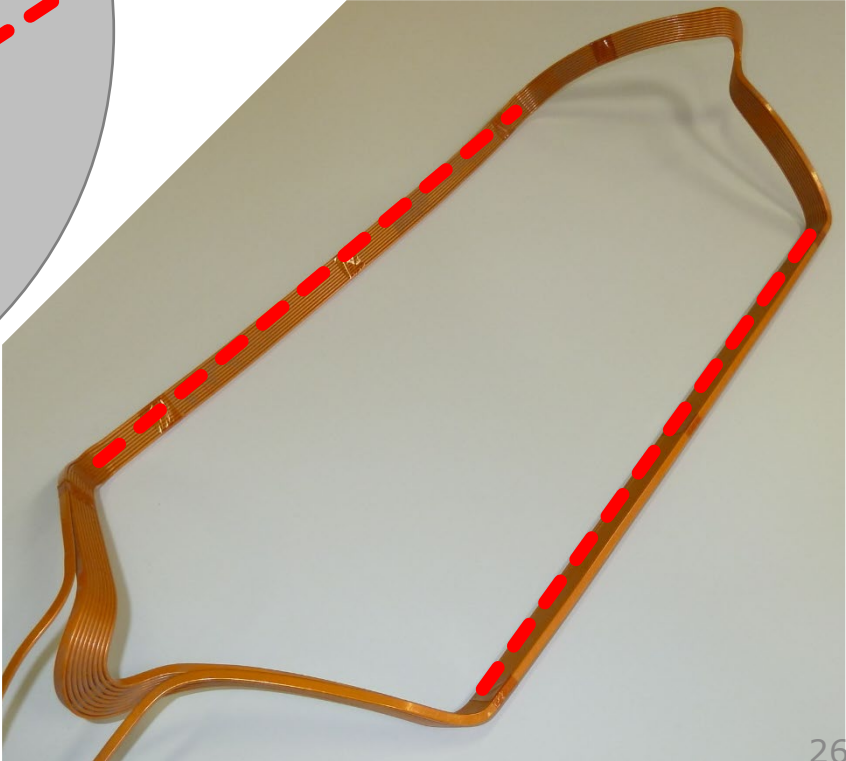
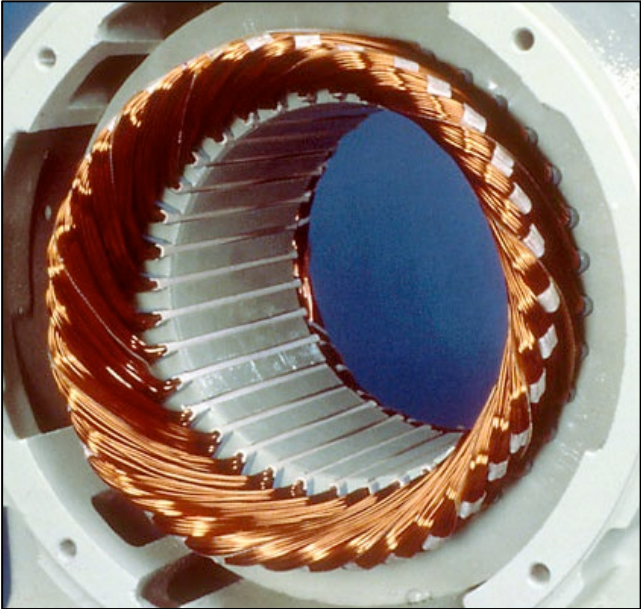
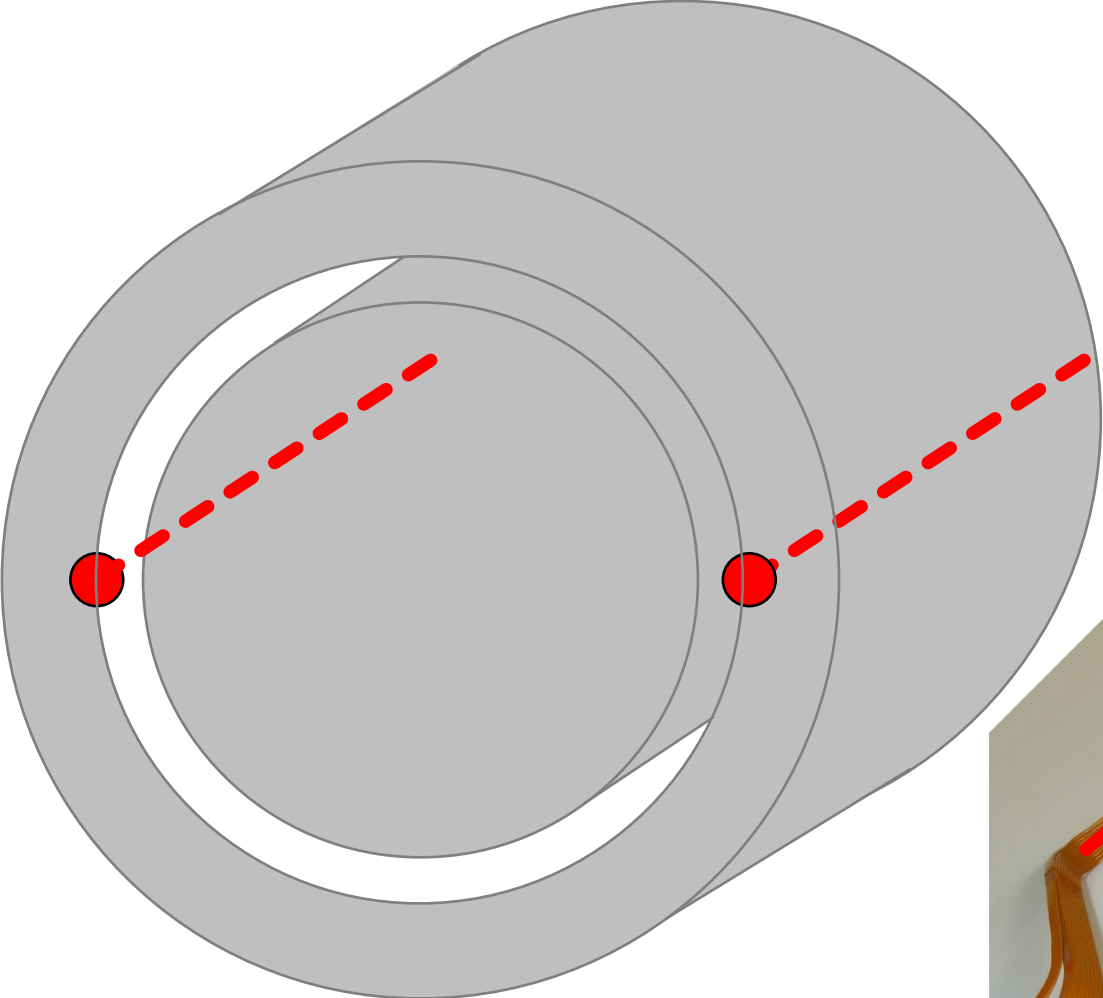
Sommaire

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

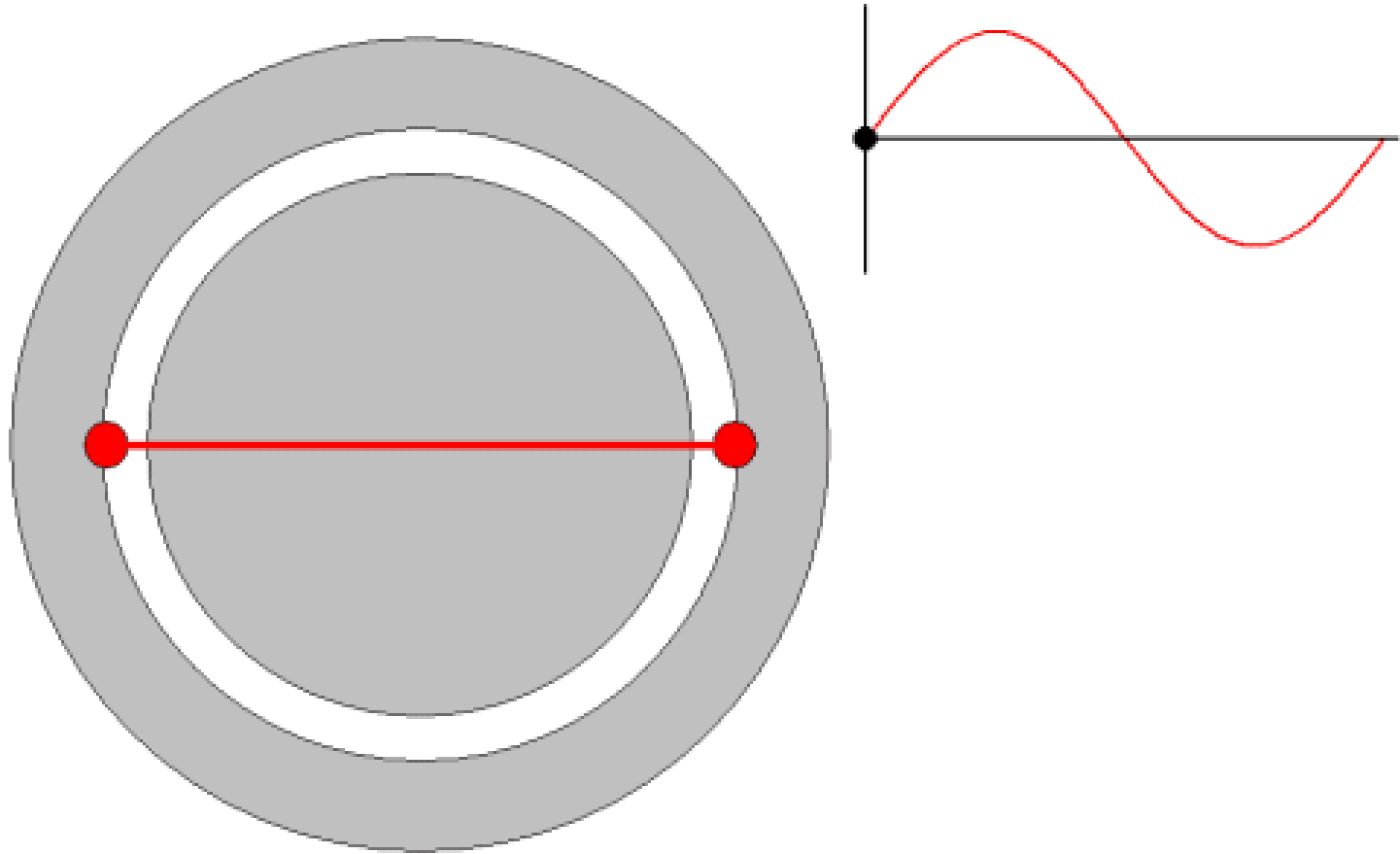
Principe de fonctionnement



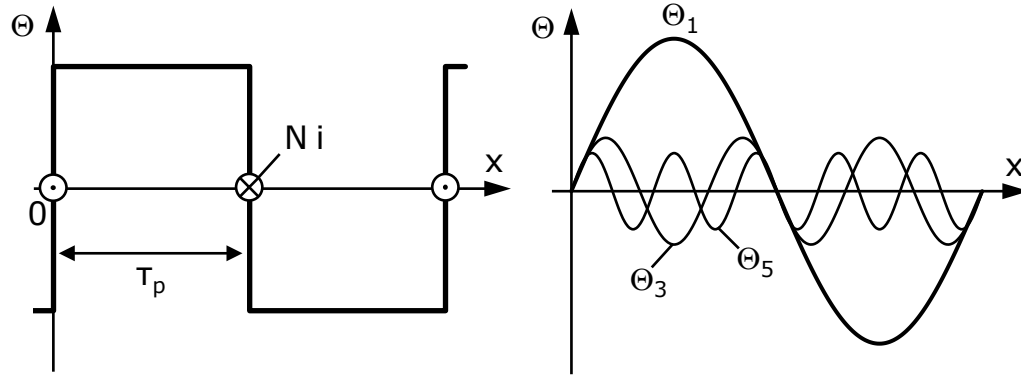
Constitution du stator



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



Champ d'induction dans l'entrefer

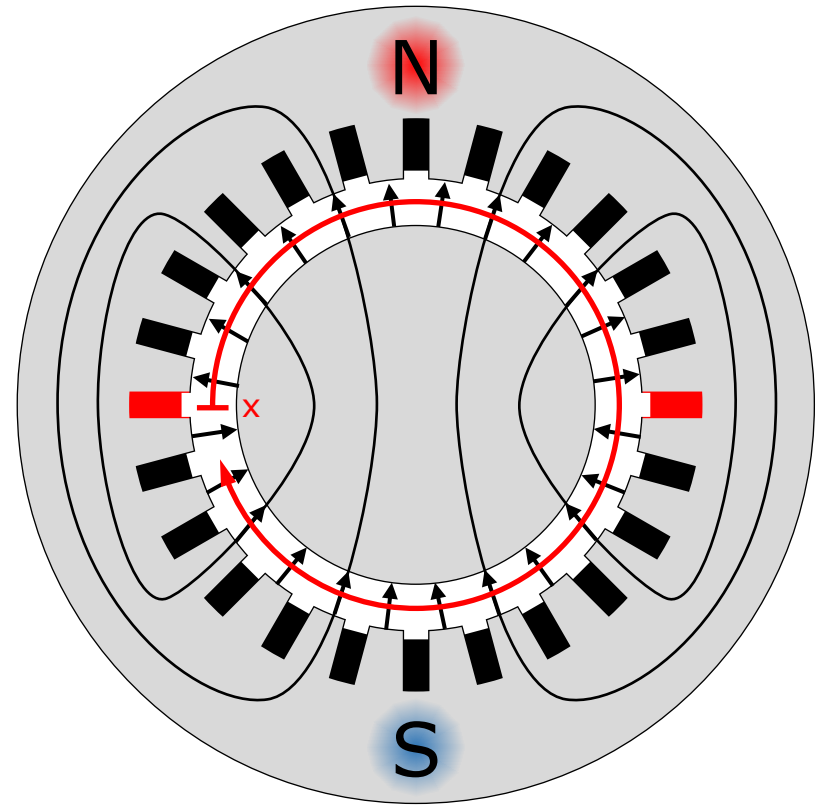


$$i(t) = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

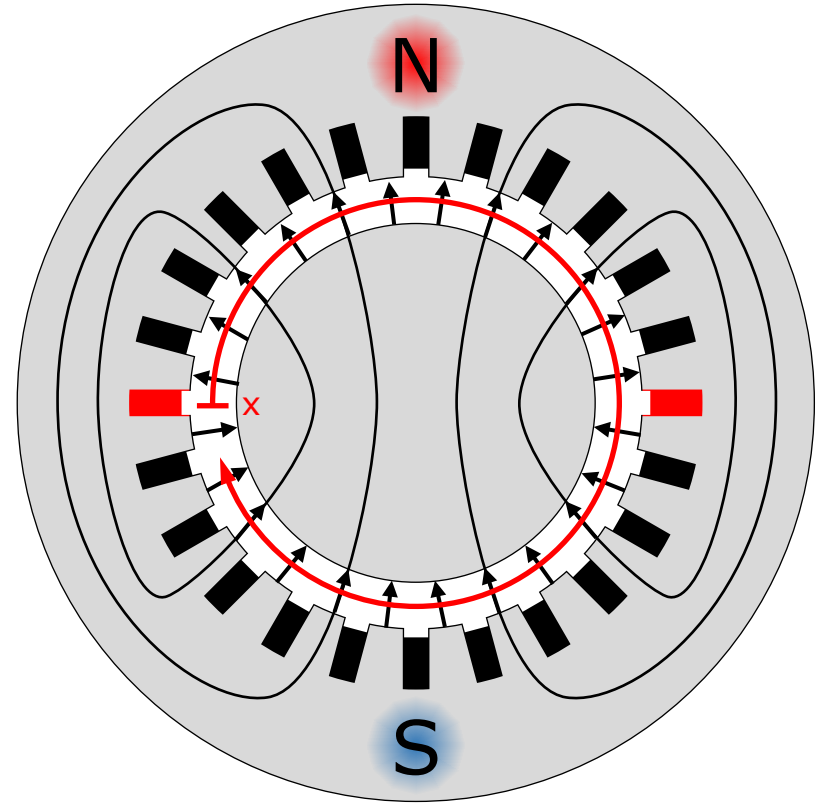
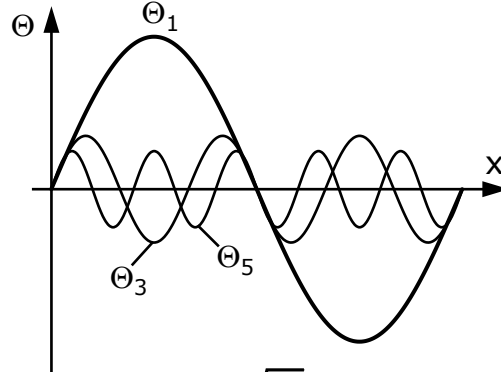
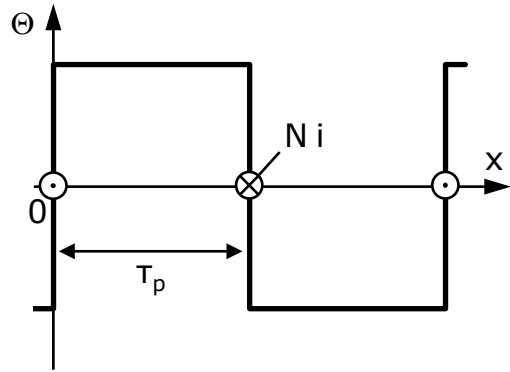
$$\hat{\Theta}_v = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} N I$$

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

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



Champ d'induction dans l'entrefer



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

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

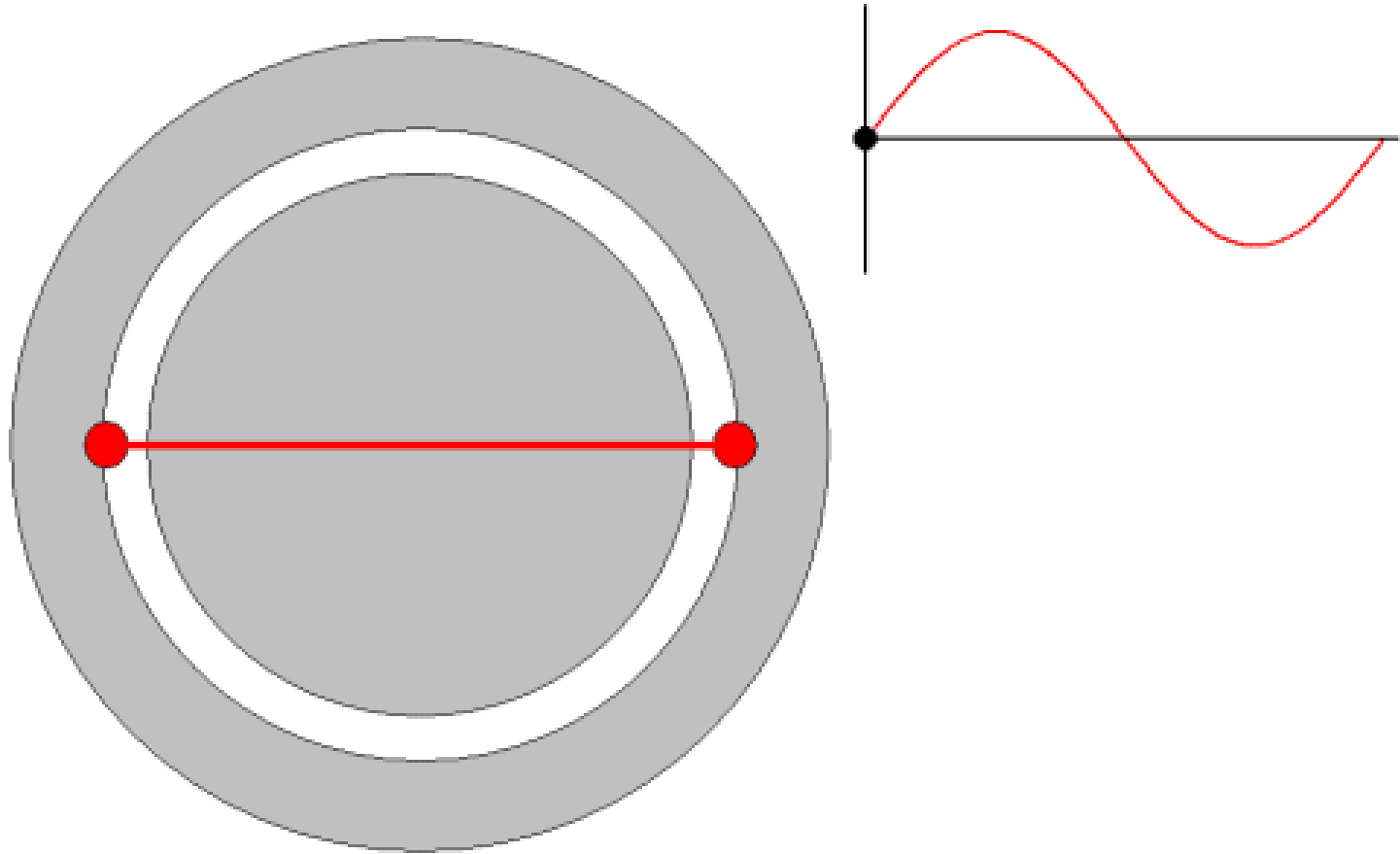
$$\Theta(x, t) = \left(\sum_v \hat{\Theta}_v \sin \left(\frac{v x}{\tau_p} \pi \right) \right) \cos \omega t$$

$$\Theta_1(x, t) = \left(\frac{4\sqrt{2}}{\pi} N I \sin \left(\frac{x}{\tau_p} \pi \right) \right) \cos \omega t$$

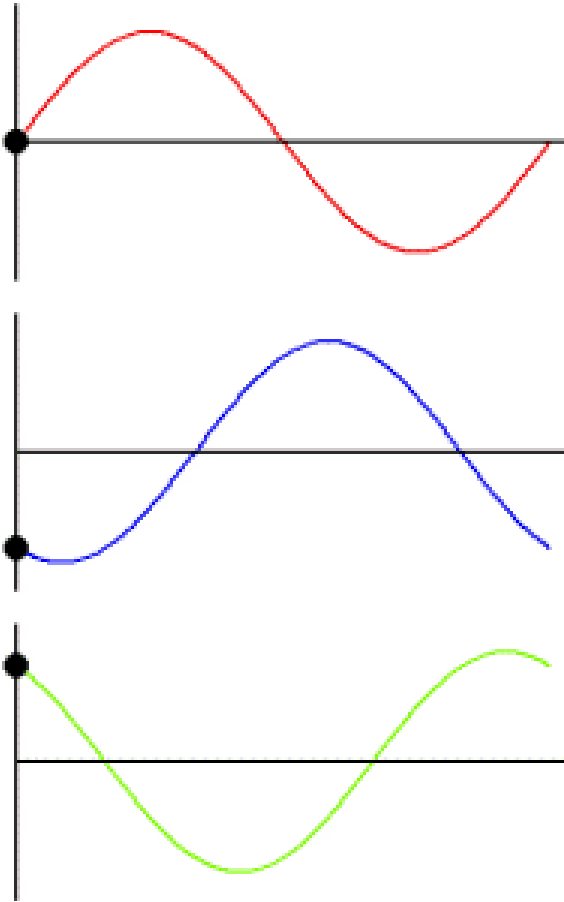
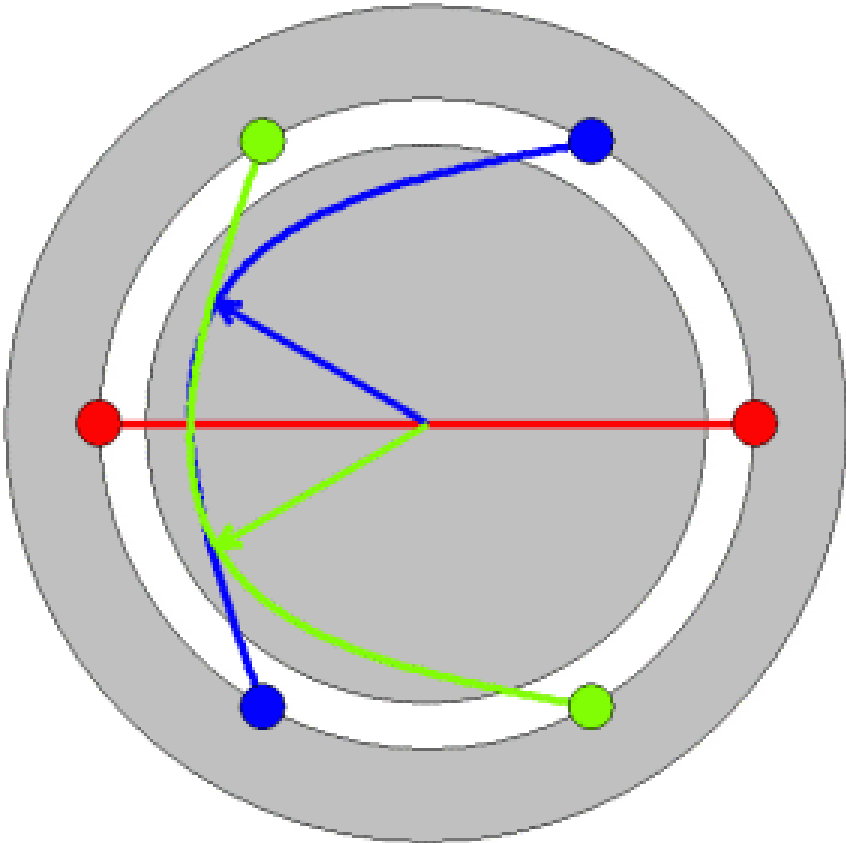
$$B_\delta(x, t) = \mu_0 \frac{\Theta(x, t)}{2\delta}$$

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

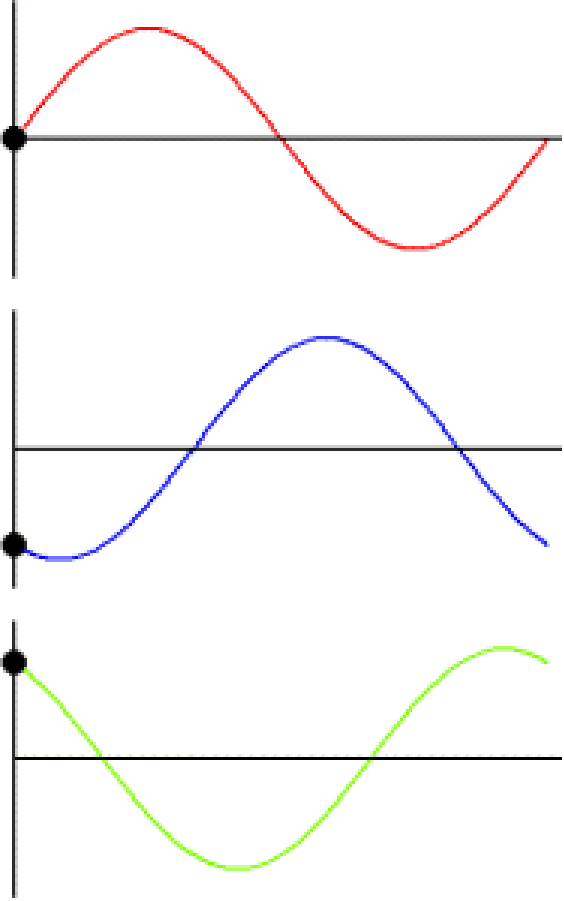
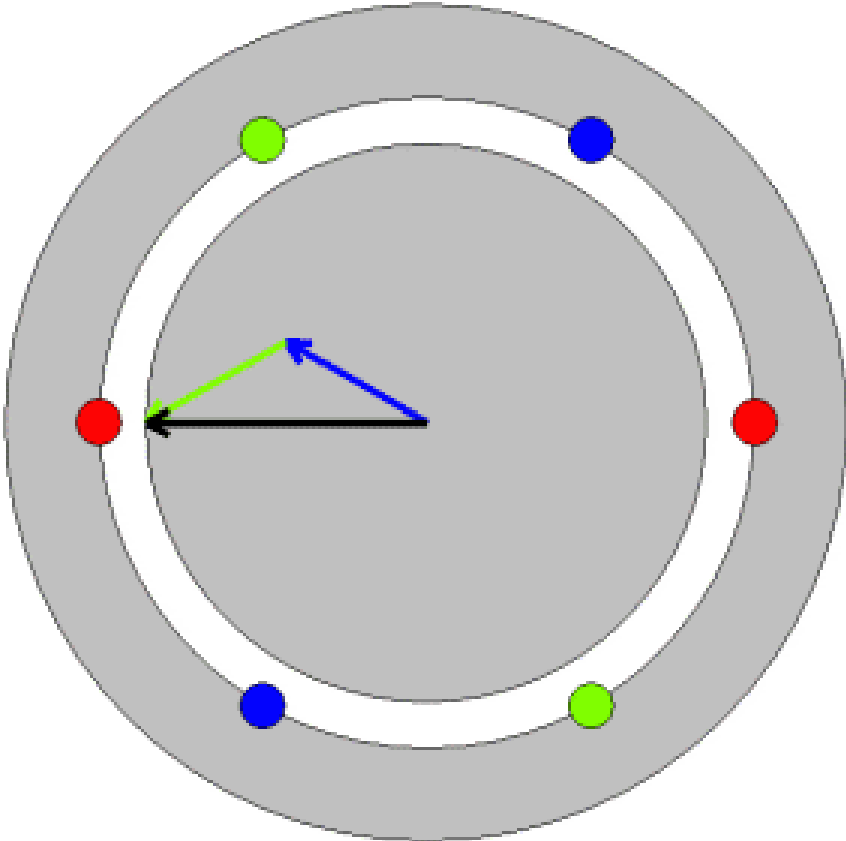
Champ pulsant résultant de l'alimentation d'une spire diamétrale par un courant alternatif



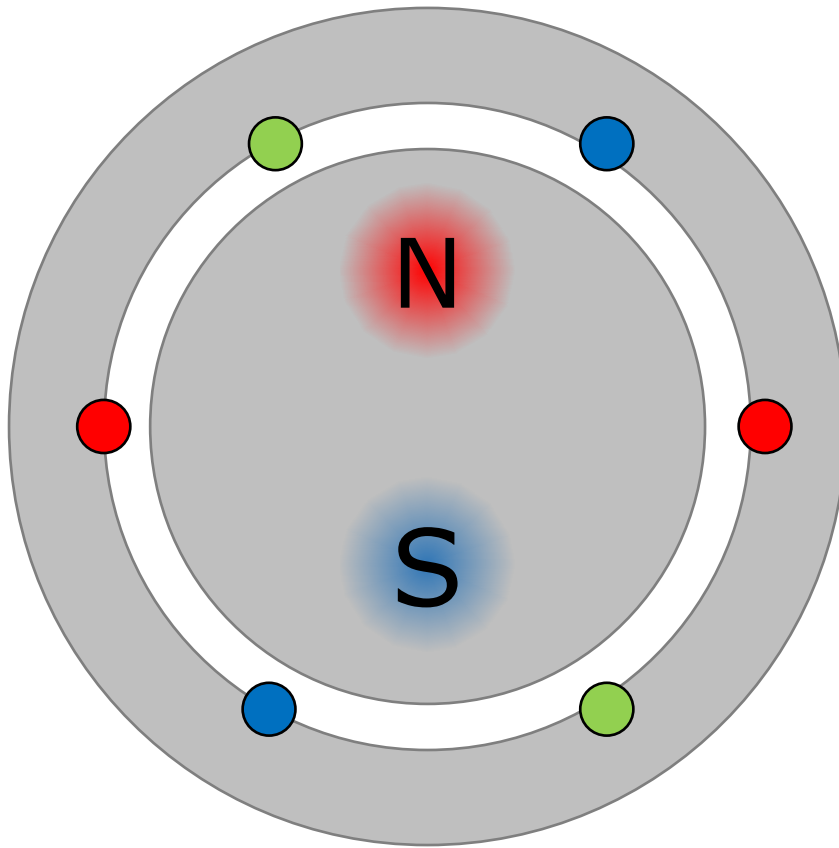
Champs pulsants résultants de l'alimentation de spires diamétrales réparties, par un système de courants alternatifs triphasés symétriques



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

pour le fondamental

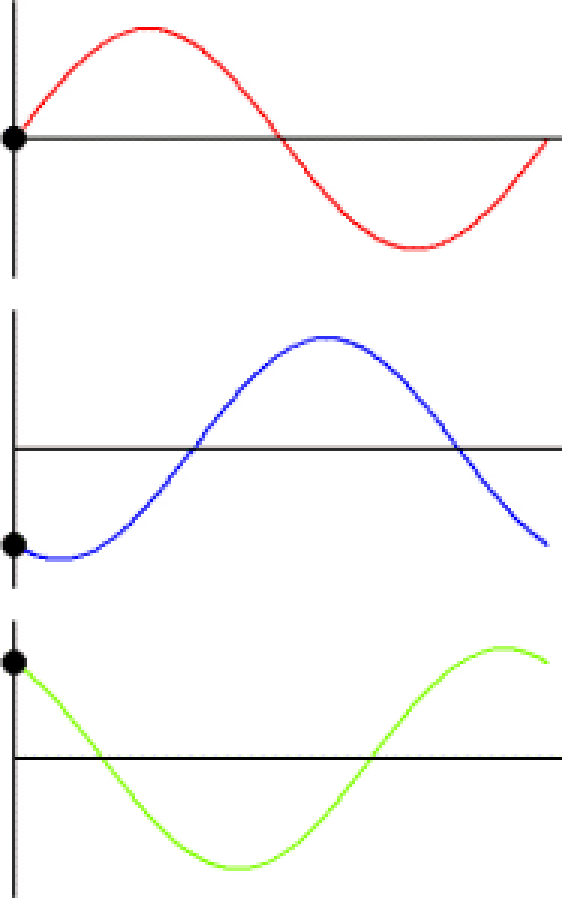
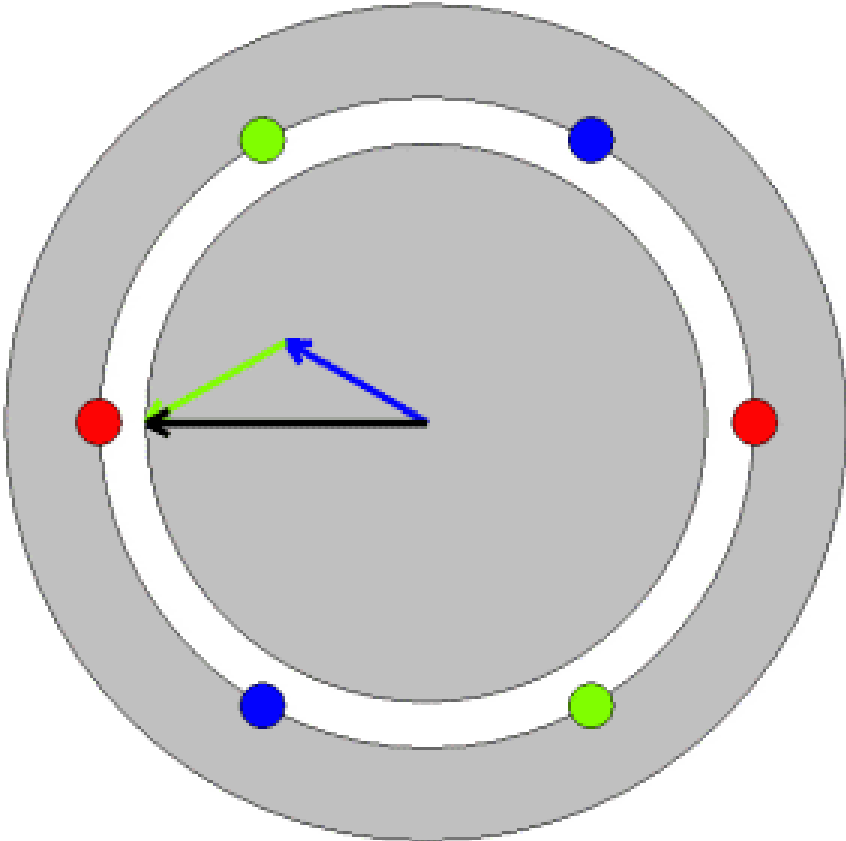
$$\left\{ \begin{array}{l} B_{\delta 1A}(x, t) = \hat{B} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p}\right) \cos(\omega t) \\ B_{\delta 1B}(x, t) = \hat{B} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ B_{\delta 1C}(x, t) = \hat{B} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p}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

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

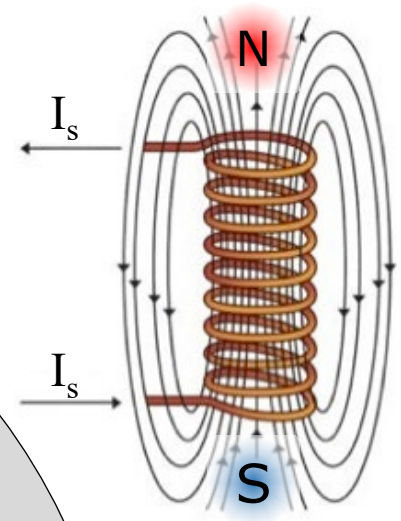
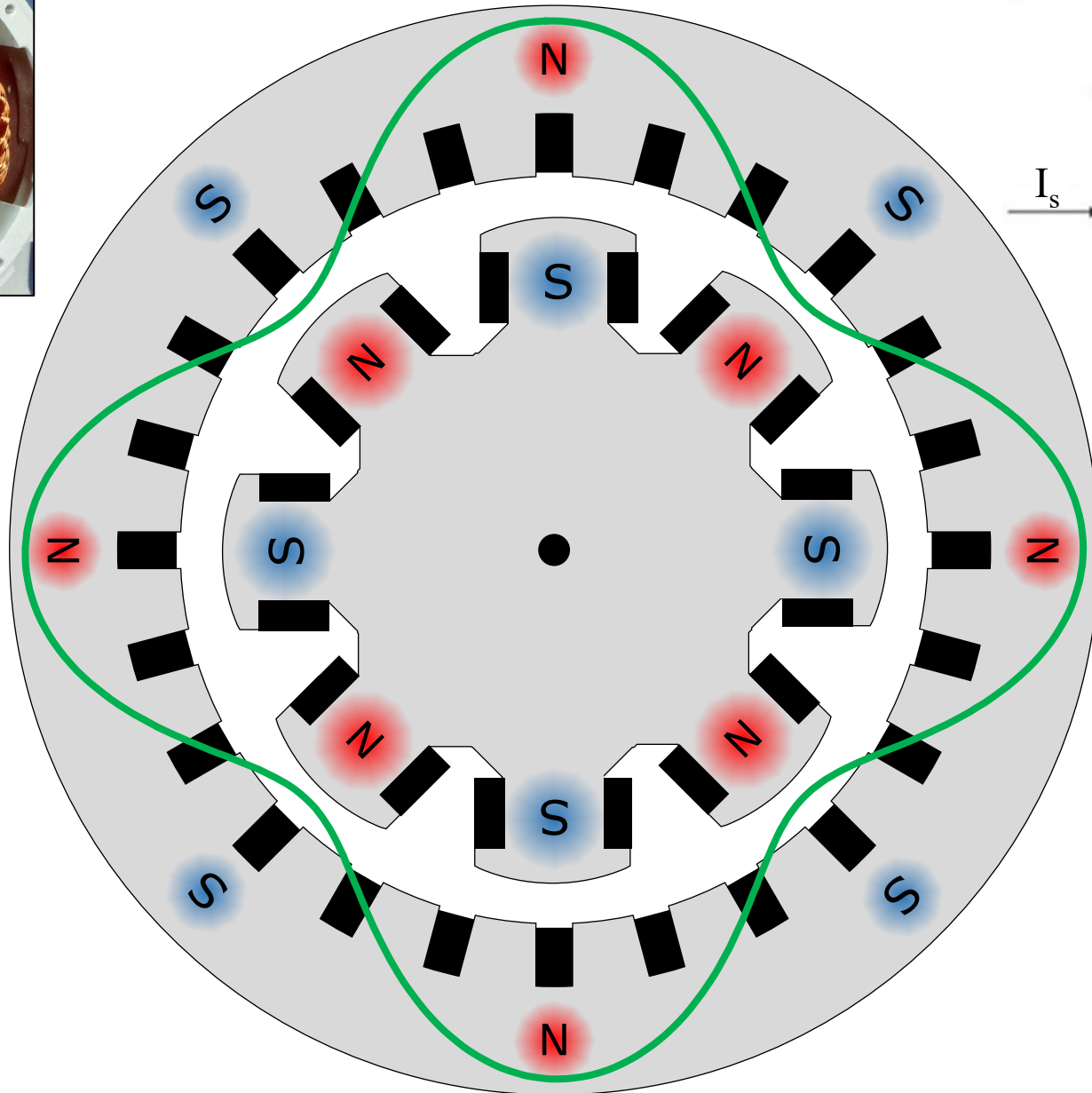
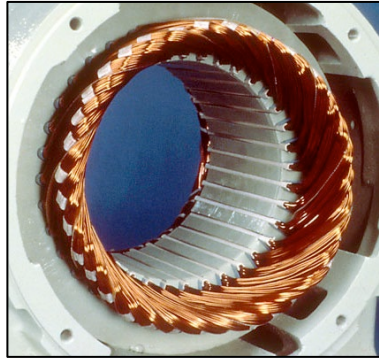
↑

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



Sommaire

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

Champ d'induction pour enroulement biphasé

pour le fondamental

Décâlé de 90° temporel
et géométrique

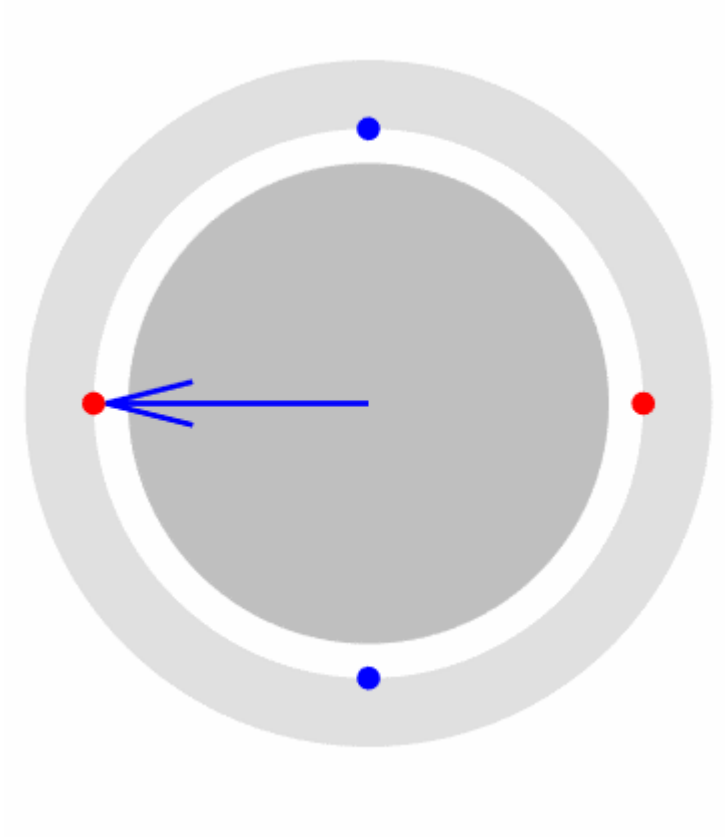
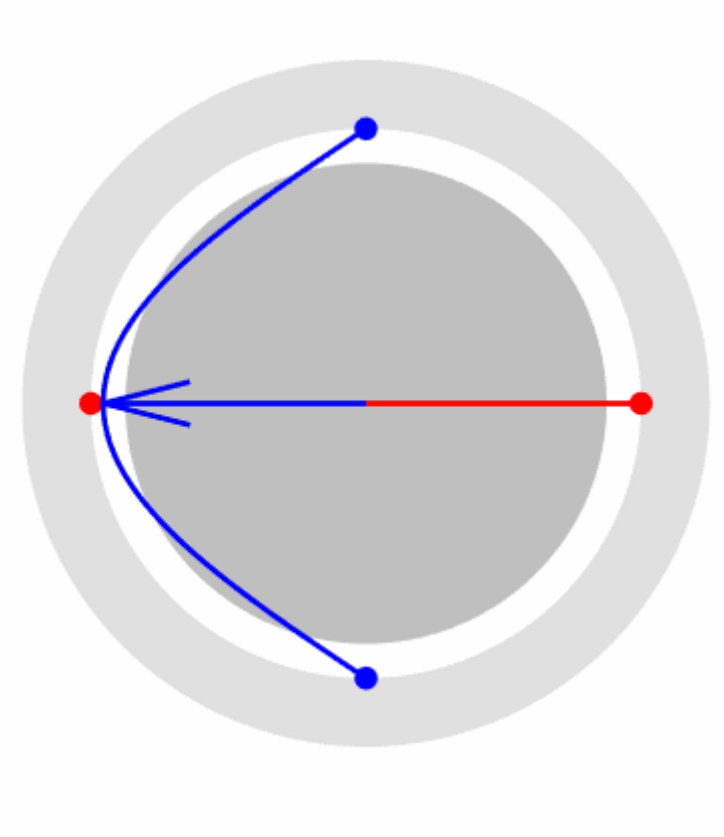
$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{B}_{\delta A}(\mathbf{x}, t) = \left(\hat{\mathbf{B}} \sin\left(\frac{\pi \mathbf{x}}{\tau_p}\right) \right) \cos(\omega t) \\ \mathbf{B}_{\delta B}(\mathbf{x}, t) = \left(\hat{\mathbf{B}} \sin\left(\frac{\pi \mathbf{x}}{\tau_p} \pm \frac{\pi}{2}\right) \right) \cos\left(\omega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

$$\mathbf{B}_{\delta t}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{B}_{\delta A}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{B}_{\delta B}(\mathbf{x}, t) = \hat{\mathbf{B}} \sin\left(\frac{\pi \mathbf{x}}{\tau_p} \pm \omega t\right)$$

Triphasé

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

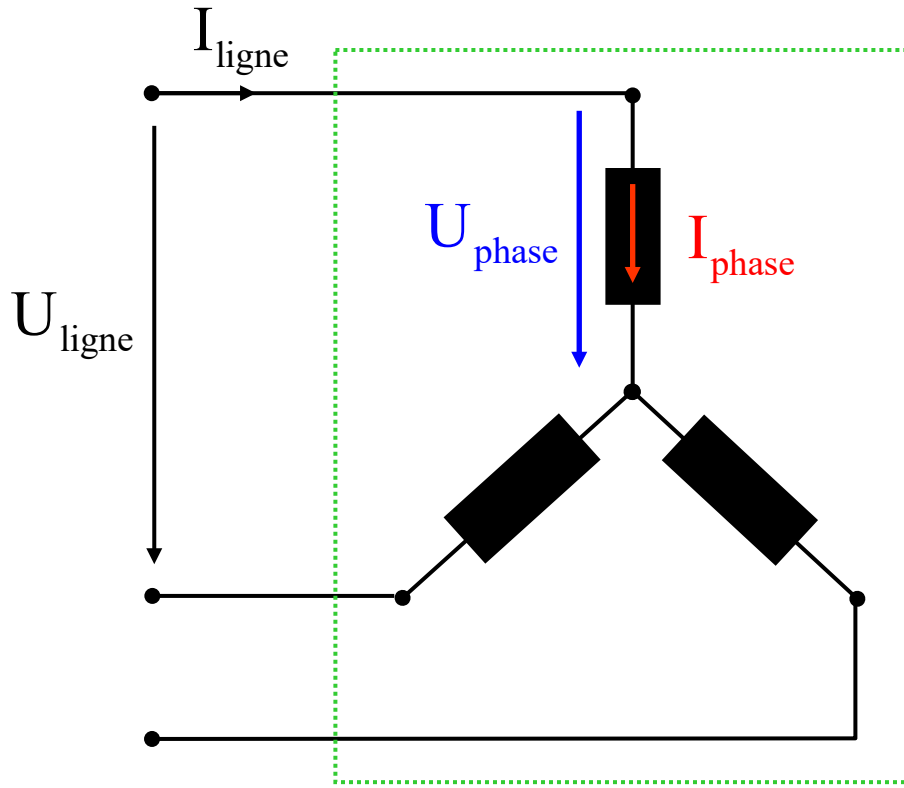
Champ tournant généré avec du biphasé



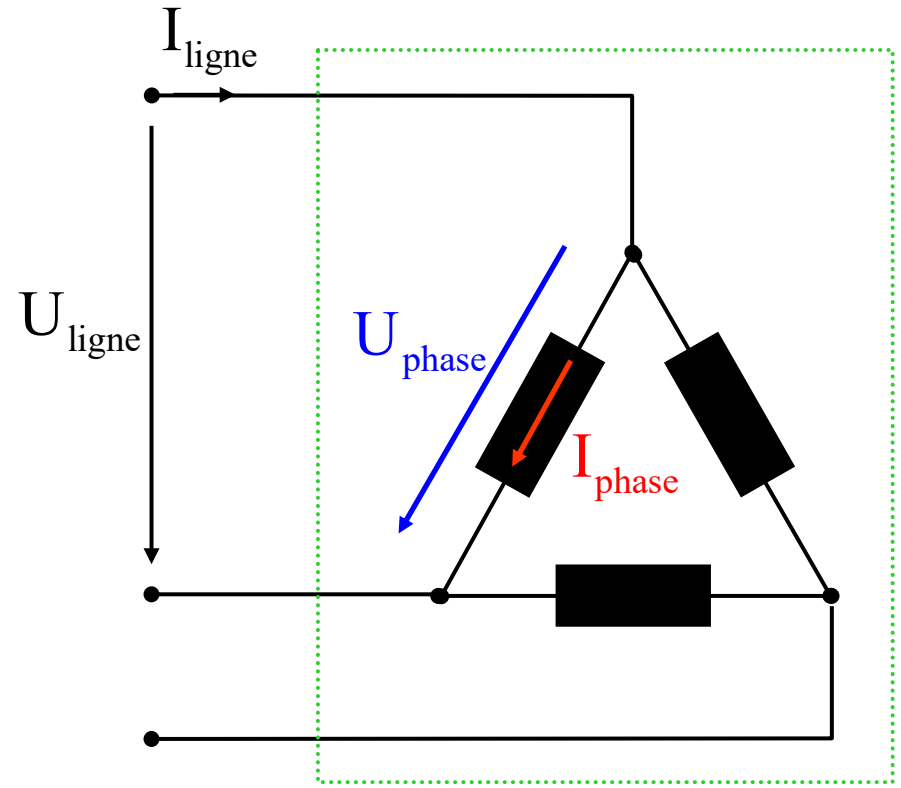
Sommaire

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

Rappel sur les couplages étoile-triangle



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



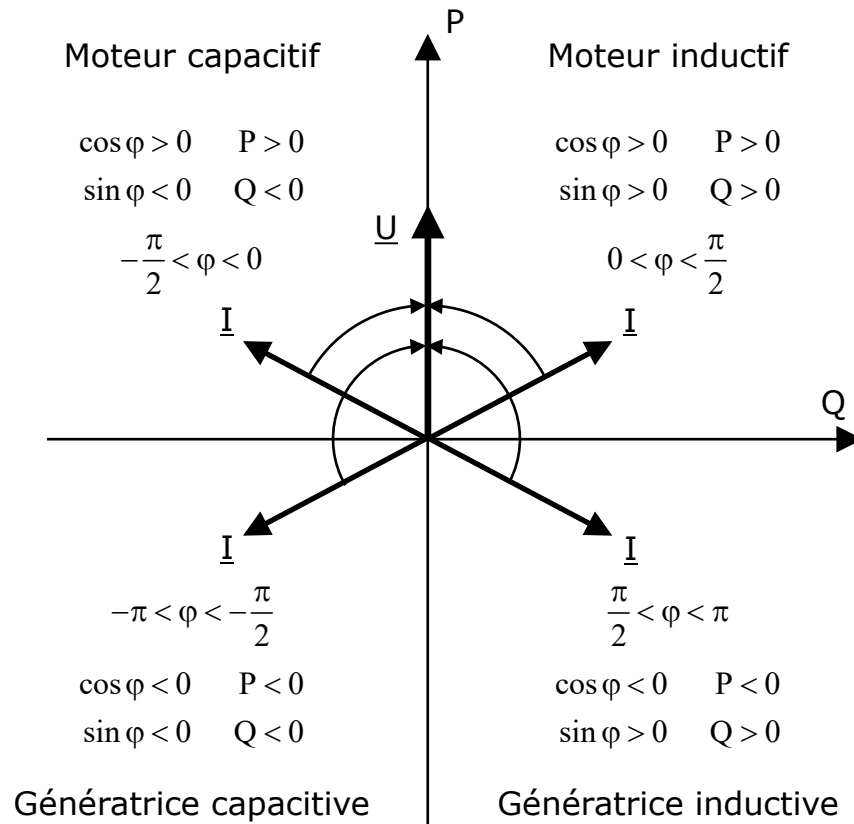
$$\begin{cases} U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}} \\ I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}} / \sqrt{3} \end{cases}$$

Puissances triphasées

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

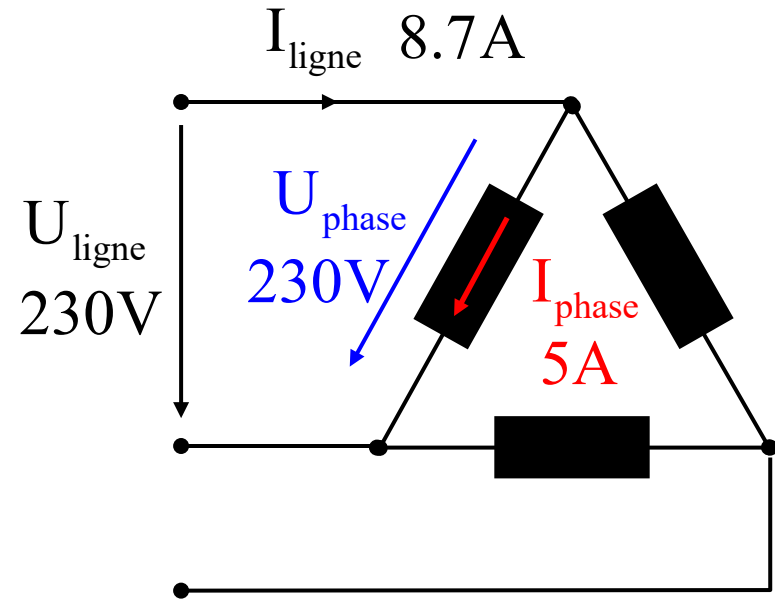
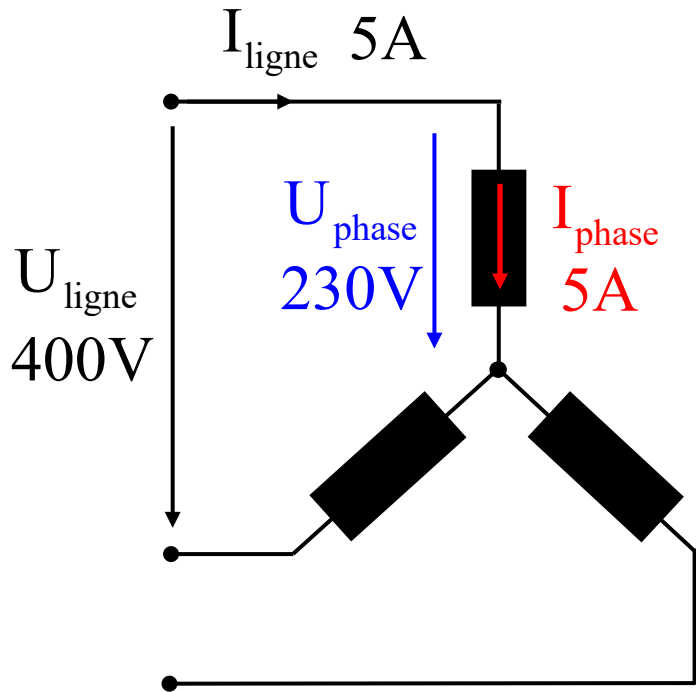
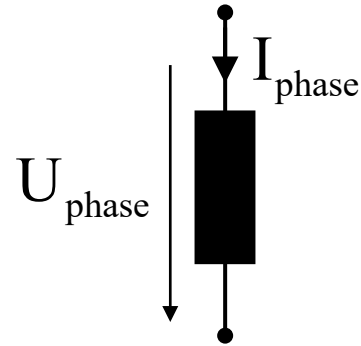
Puissance active $P = 3 U_{ph} I_{ph} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} \cos \varphi$ [W]

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



Plaque signalétique triphasée

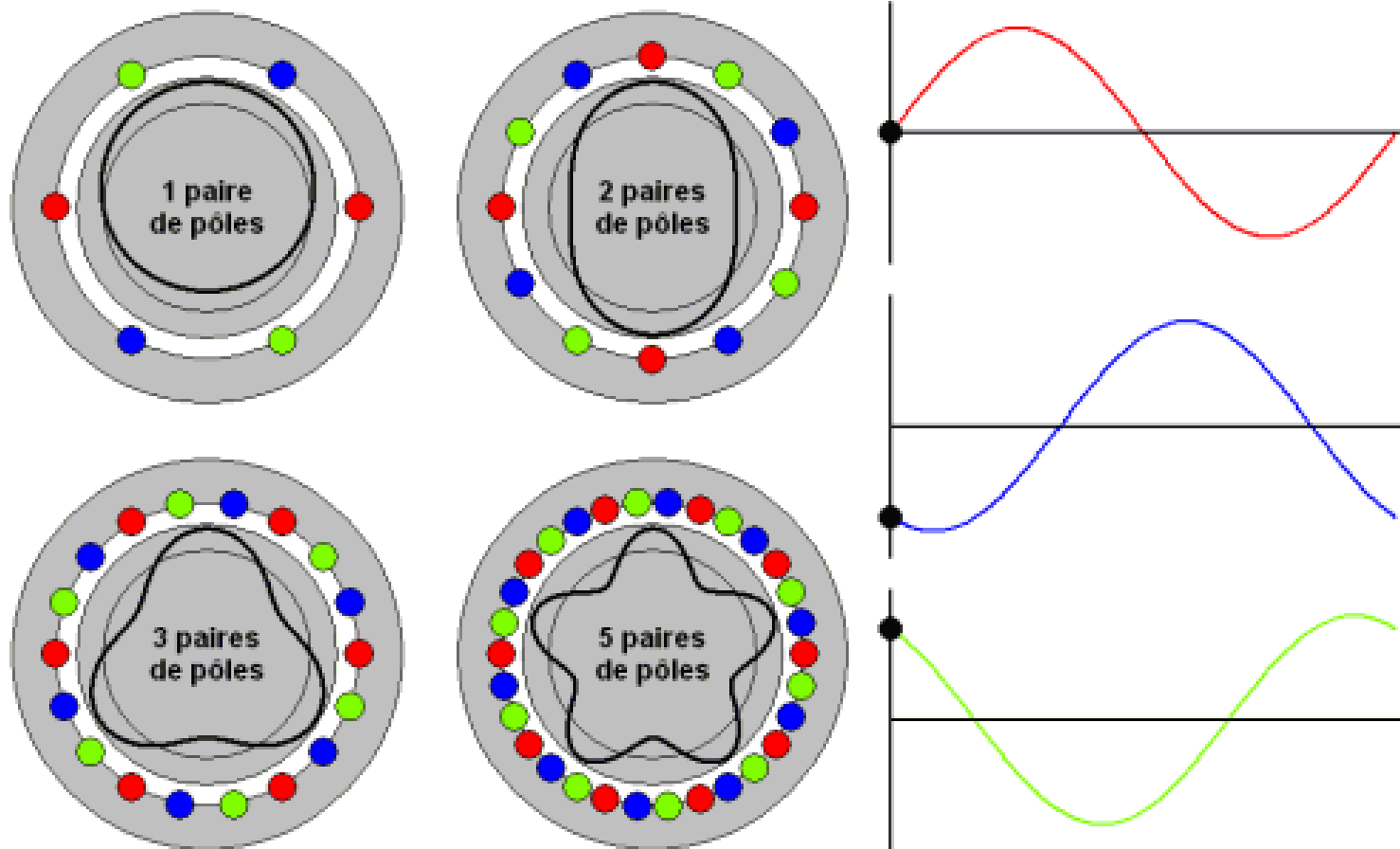
Y 400V / 5A
 Δ 230V / 8.7A



Sommaire

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

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



Vitesse et nombre de paires de pôles

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



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

nombre de paires de pôles

Ω \longrightarrow Vitesse angulaire dans le monde mécanique

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

Rappel :

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

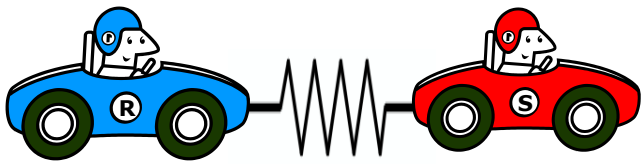
$\omega \rightarrow [\text{rad} / \text{s}] \rightarrow$ Monde électrique

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

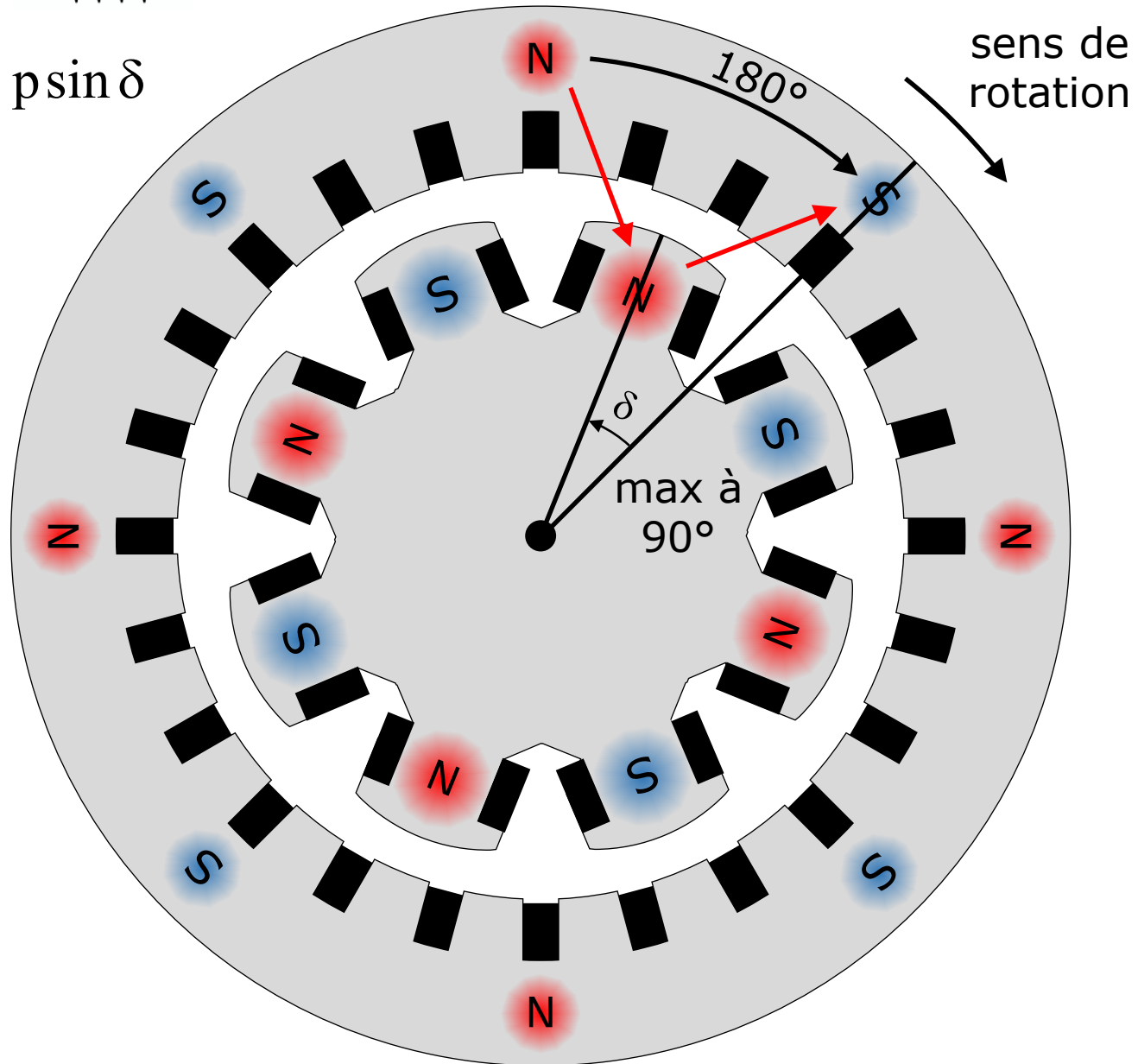
$n \rightarrow [\text{tr} / \text{s}] \rightarrow$ Monde mécanique

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

Vitesse et nombre de paires de pôles



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



Sommaire

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

Grandeurs relatives – Per Unit – [pu]

- Tension
 - Courant
 - Puissance
 - Couple
 - Impédance
 - ...
- S'affranchir des **vraies grandeurs** physiques en établissant des **grandeurs relatives** à des valeurs de références.
- Les valeurs de références sont habituellement les grandeurs nominales.

Grandeurs nominales = ce pour quoi c'est dimensionné pour un fonctionnement « à vie ». Ne pas confondre avec les grandeurs max !

Données dans le datasheet ou déduisibles de la plaque signalétique.

Exemple pour la tension et le courant au primaire d'un transformateur

- tension de référence U_{1n} (valeur efficace)
- courant de référence I_{1n} (valeur efficace)

$$u_1 = \frac{U_1}{U_{1n}} \quad i_1 = \frac{I_1}{I_{1n}}$$

per unit

$$x[\text{pu}] = \frac{X}{X_n}$$

Les « per unit » [pu] sont notés en minuscule et la valeur est comprise entre 0 et 1 pour un fonctionnement normal.

Exercice

La plaque signalétique d'un dispositif triphasé donne :

Y 400V / 5A

Δ 230V / 8.7A

On mesure avec un ampèremètre un courant de ligne 5.5A. Que vaut le courant de phase en p.u en étoile et en triangle ?

On mesure avec un Ohmmètre la résistance d'une des phases à 2Ω . Que vaut cette résistance en p.u ?

$$Y \rightarrow I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}}$$

$$\Delta \rightarrow I_{\text{phase}} = \frac{I_{\text{ligne}}}{\sqrt{3}}$$

$$X = \frac{X}{X_n}$$

$$Y \rightarrow I_{\text{phaseY}} = I_{\text{ligneY}} \rightarrow I_{\text{phaseY}} = 5.5\text{A} \rightarrow i_{\text{phaseY}} = \frac{I_{\text{phaseY}}}{I_n} = \frac{5.5}{5} = 1.1[\text{pu}]$$

$$\Delta \rightarrow I_{\text{phase}\Delta} = \frac{I_{\text{ligne}\Delta}}{\sqrt{3}} \rightarrow I_{\text{phase}\Delta} = 3.2\text{A} \rightarrow i_{\text{phase}\Delta} = \frac{I_{\text{phase}\Delta}}{I_n} = \frac{3.2}{5} = 0.64[\text{pu}]$$

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{230}{5} = 46[\Omega]$$

$$r = \frac{R}{Z_n} = \frac{2}{46} = 0.043[\text{pu}]$$