

Conversion d'énergie

Éléments de base des machines
et rappels

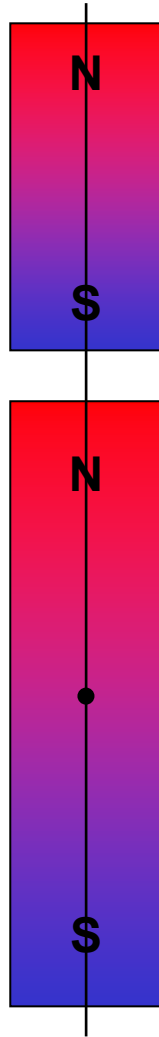
André Hodder

Sommaire

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

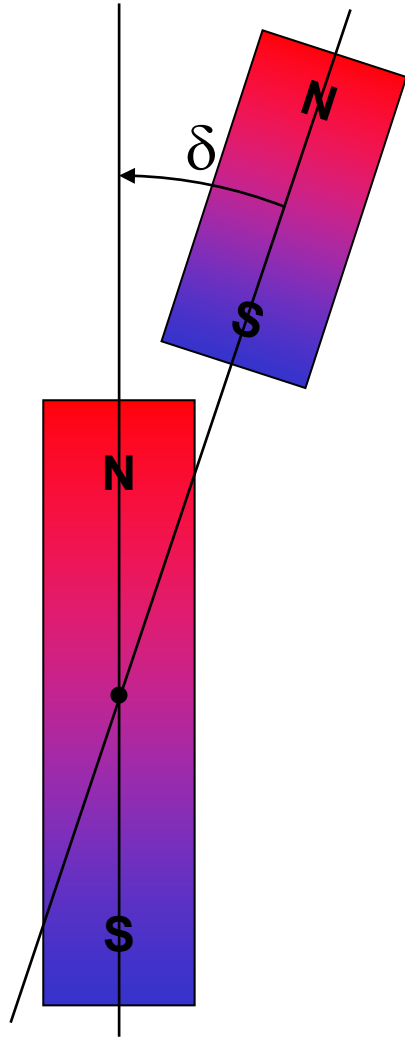
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



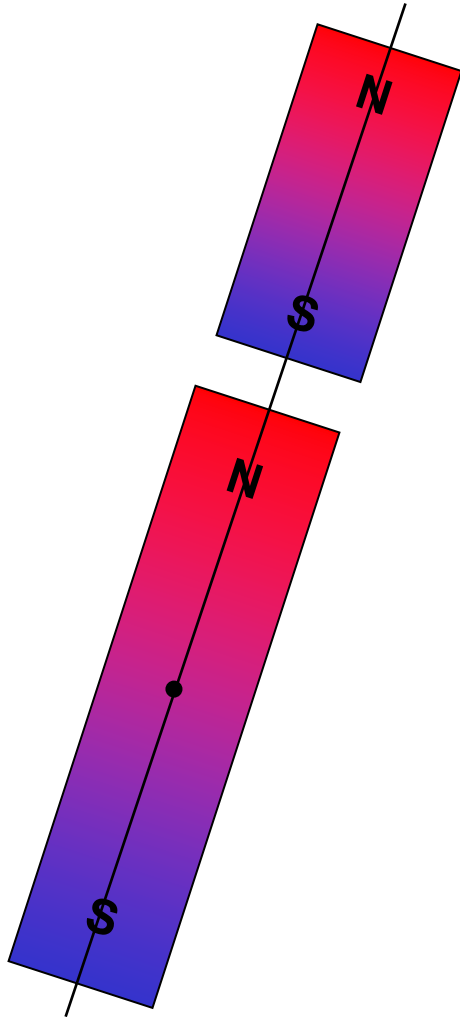
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



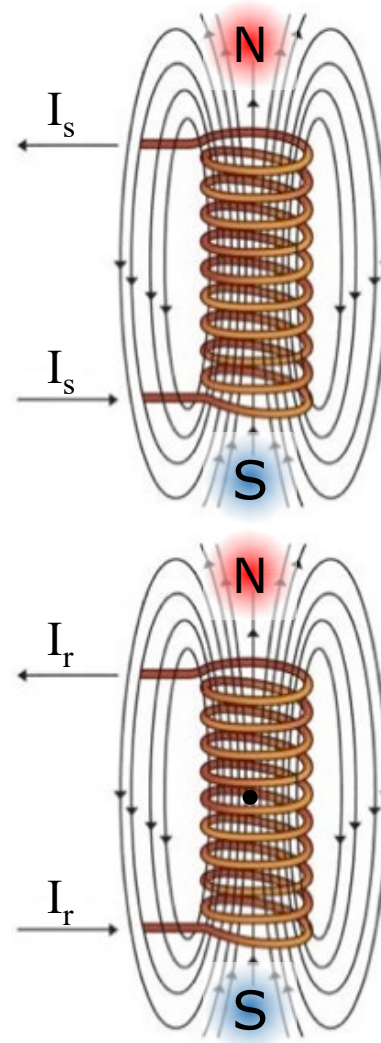
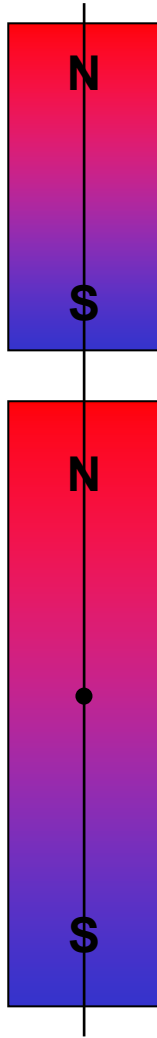
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



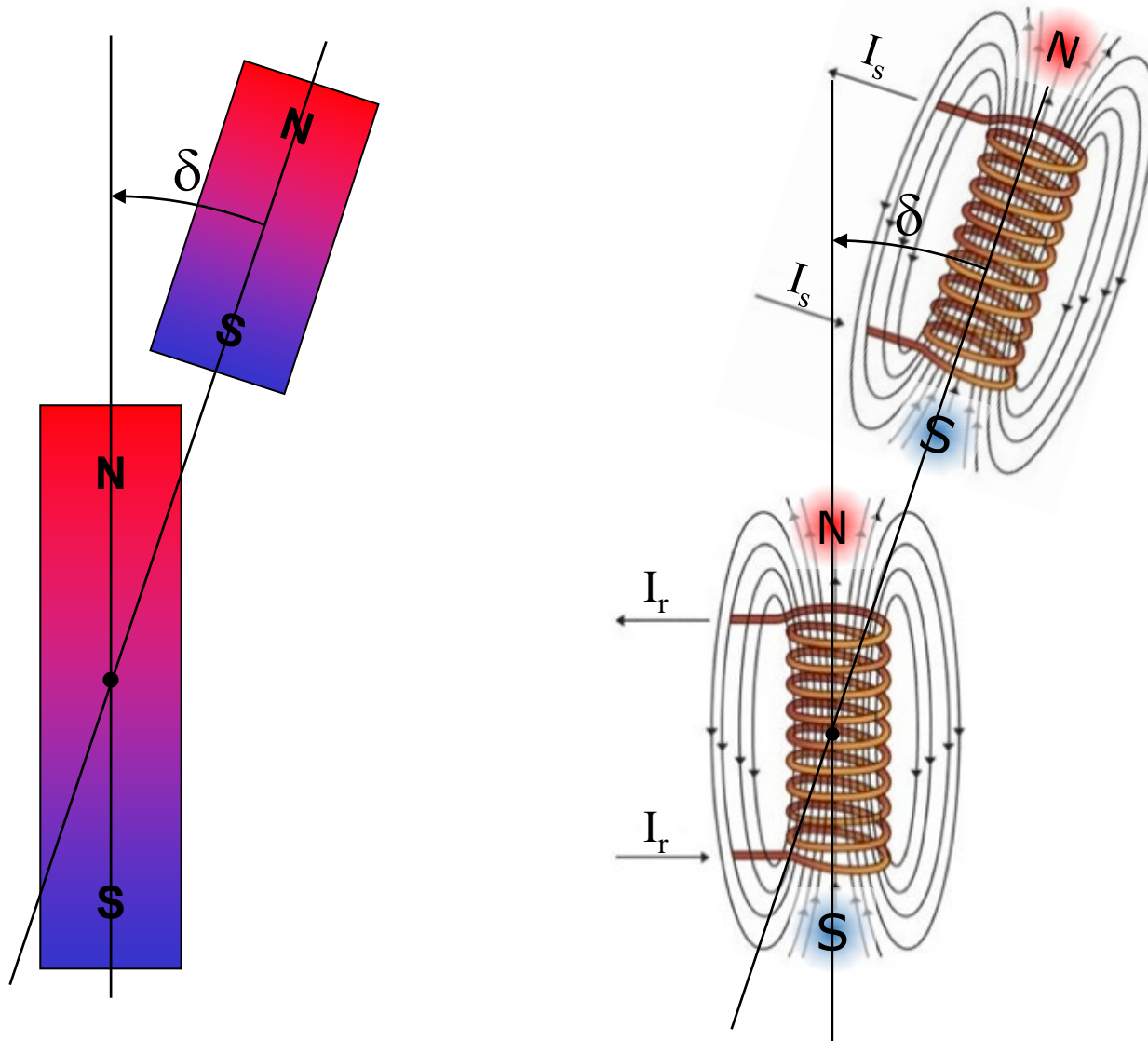
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



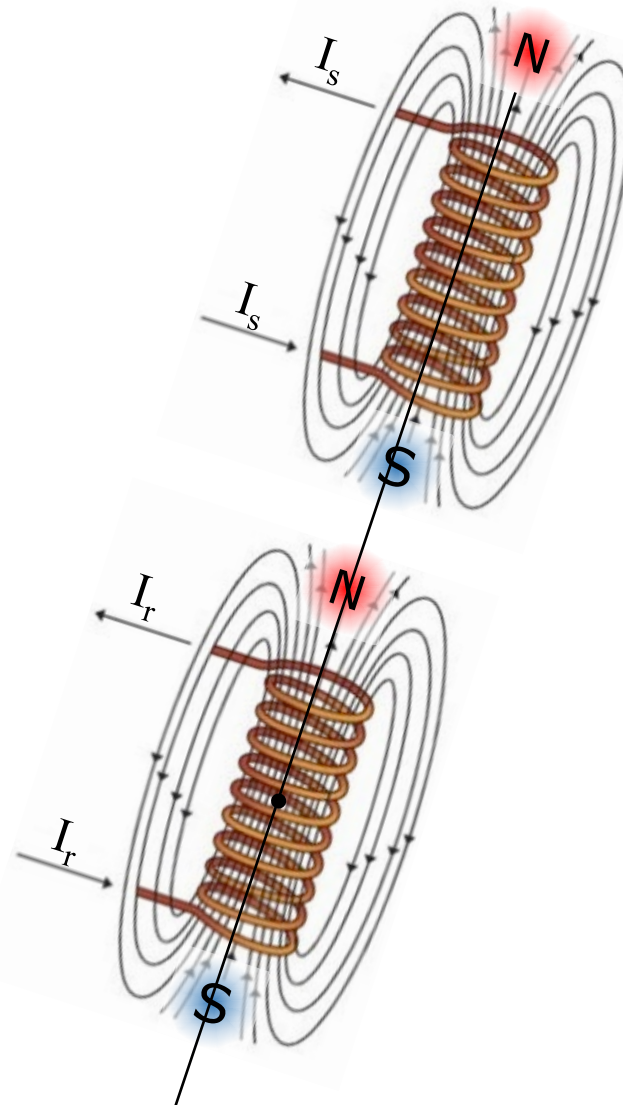
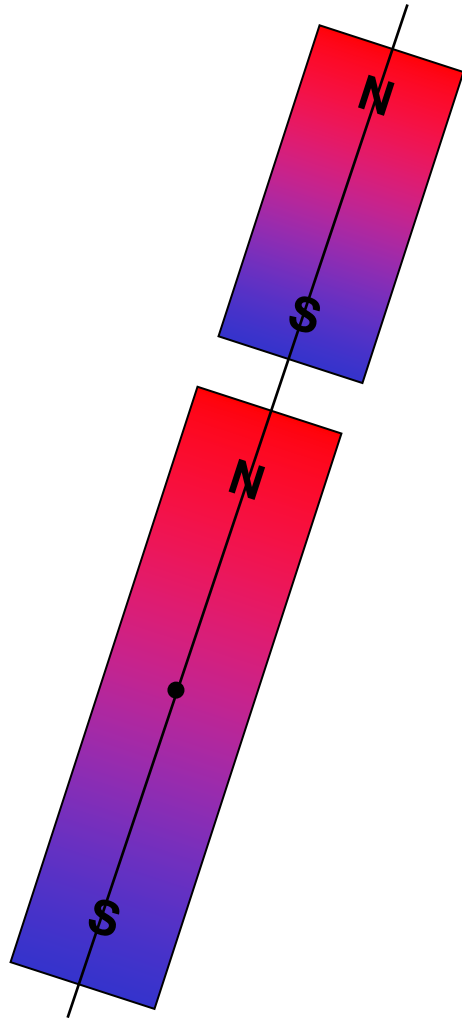
Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques

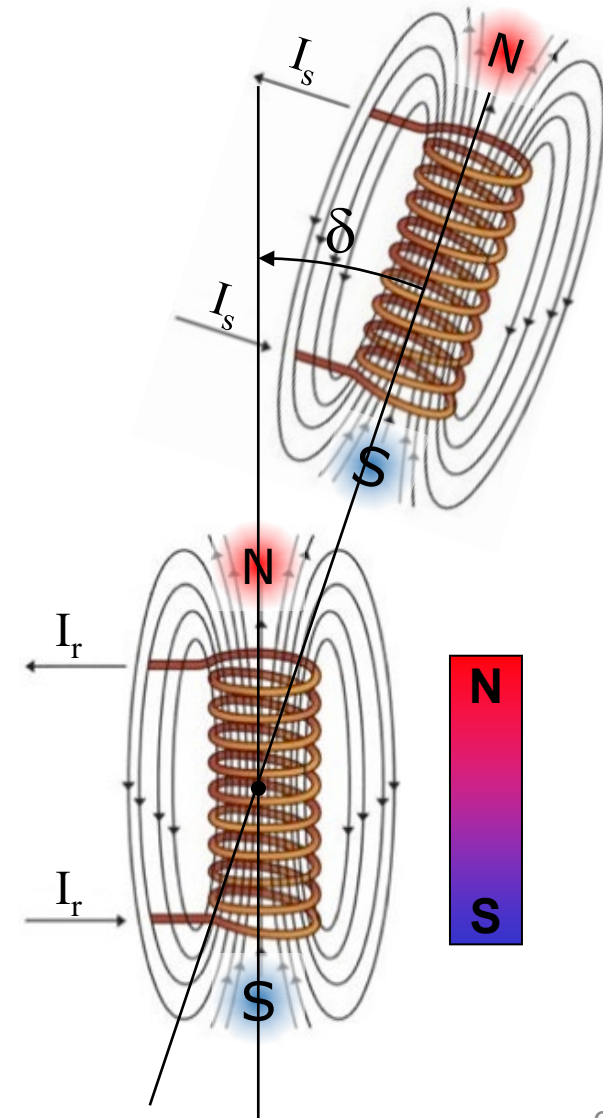
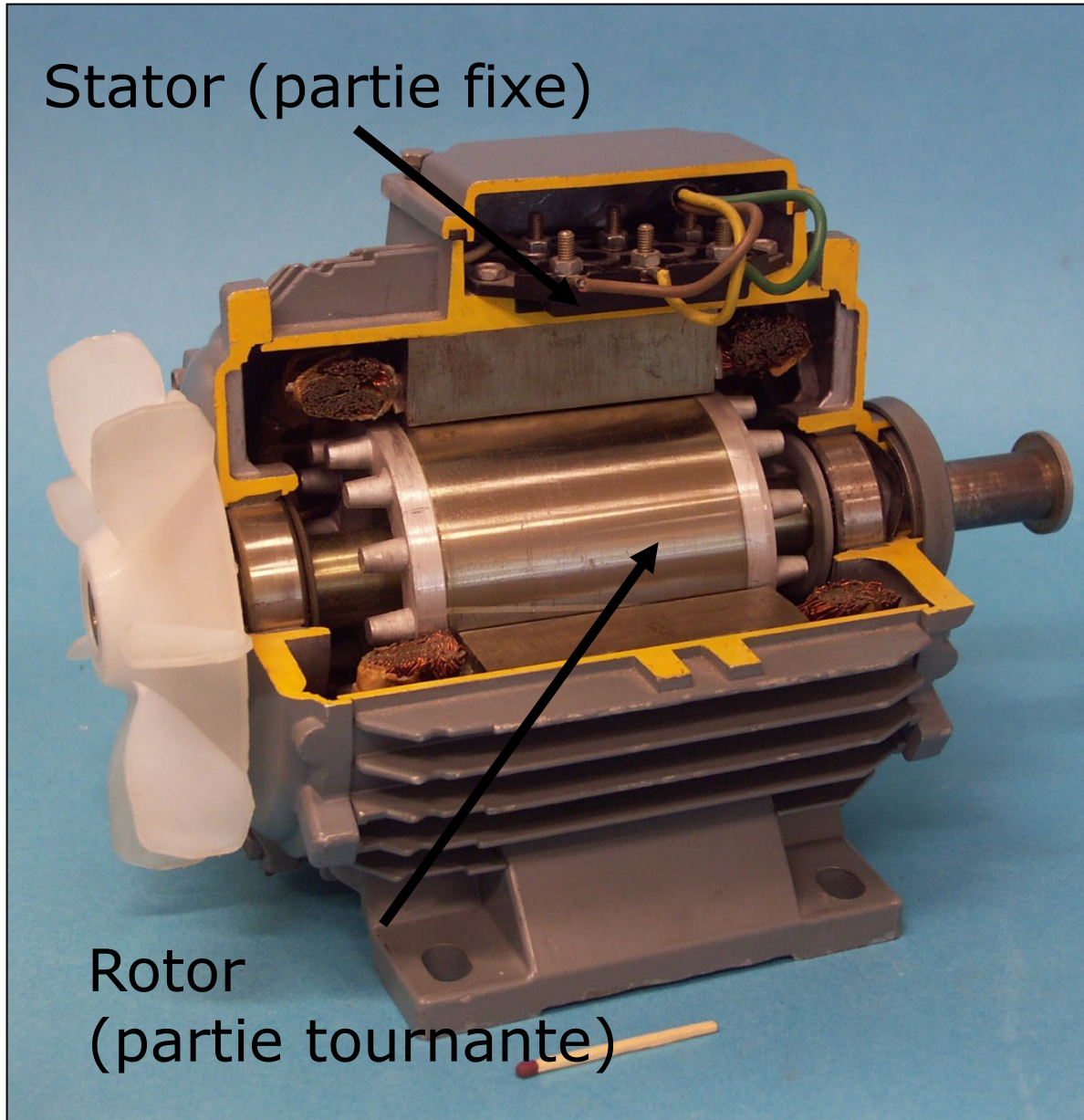


Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques



Constitution d'une machine électrique



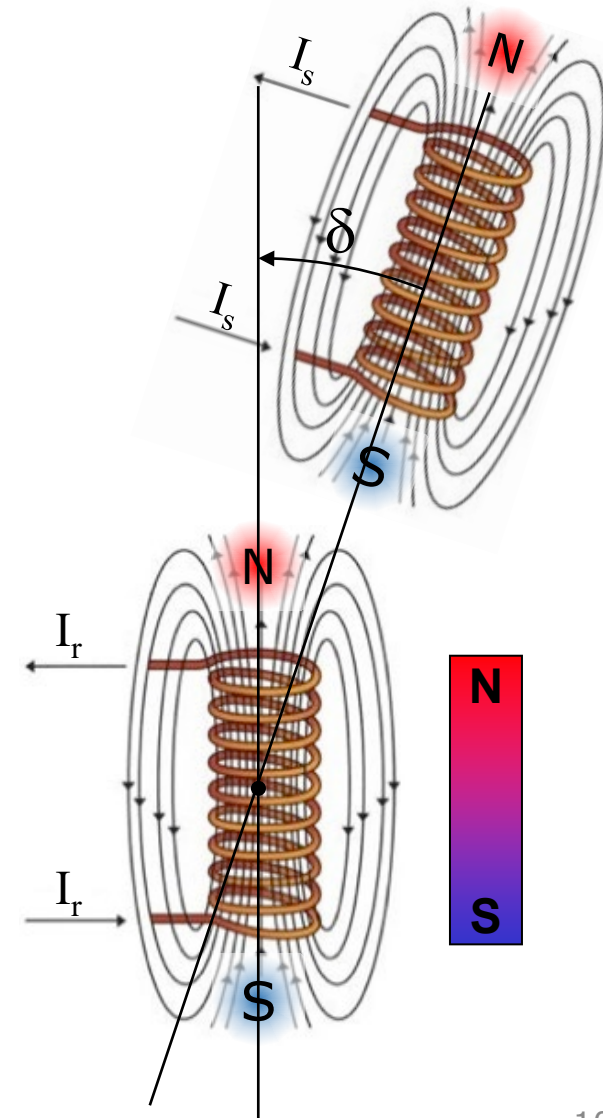
Constitution d'une machine électrique

Outrunner

Rotor
(partie tournante)

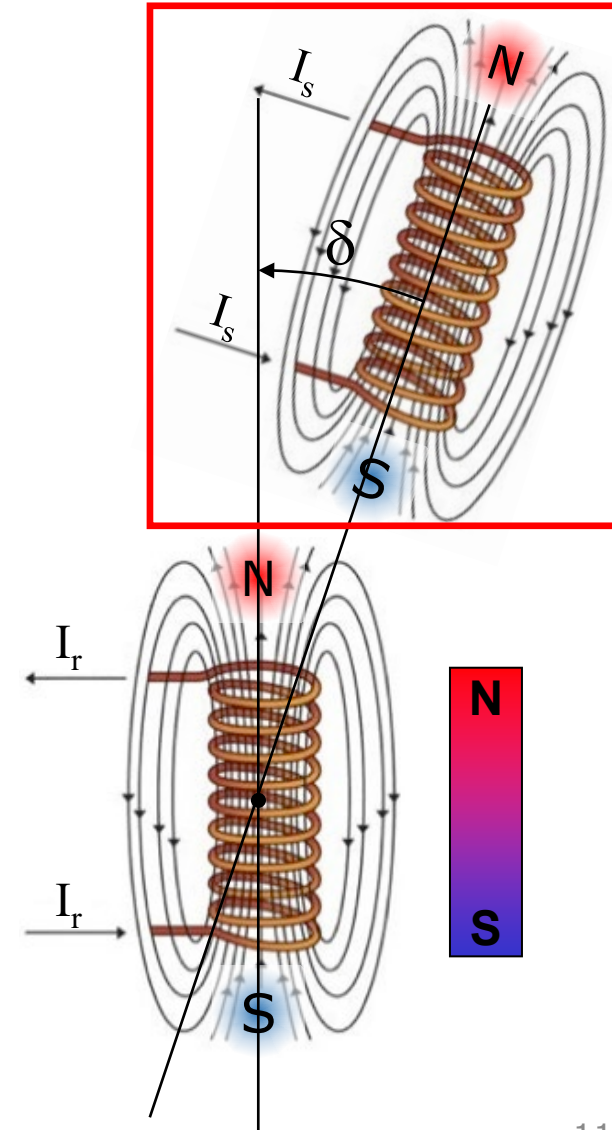
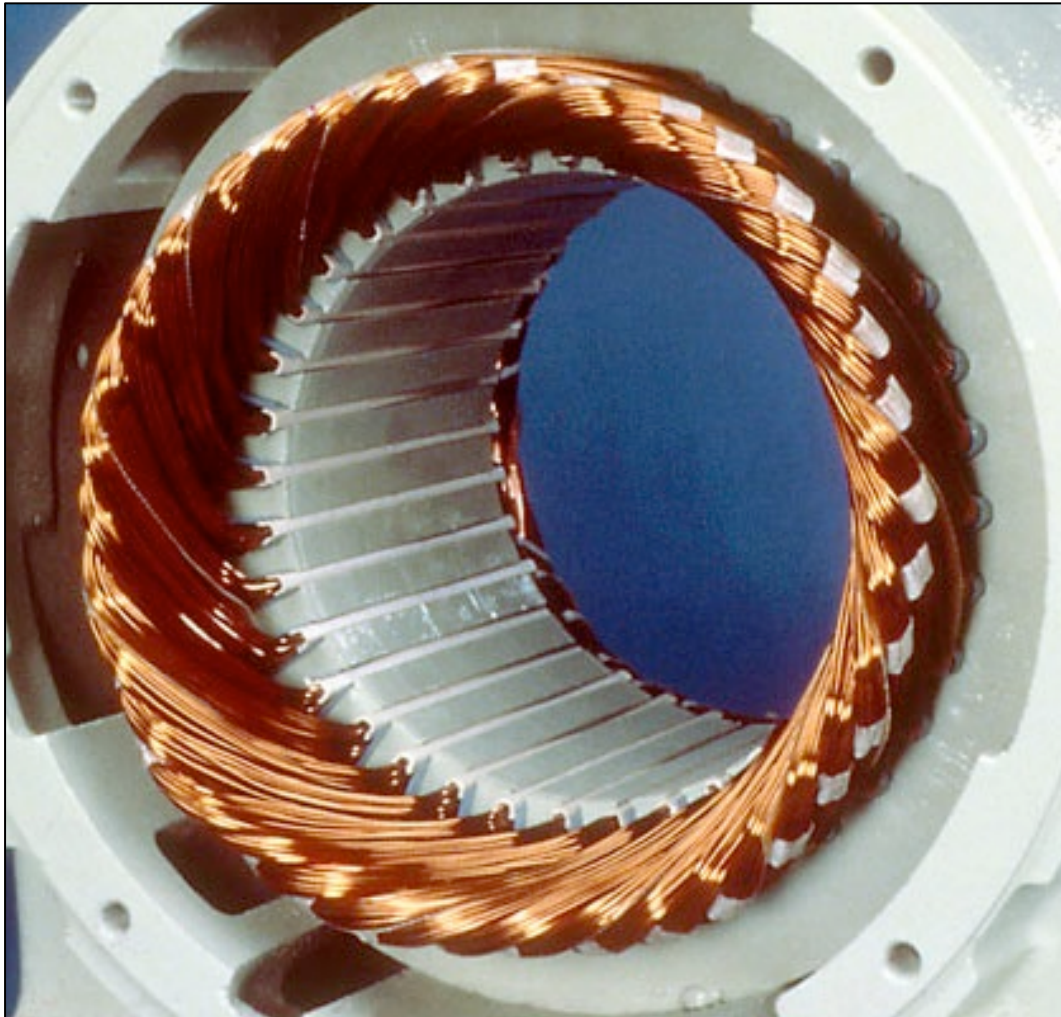


Stator (partie fixe)

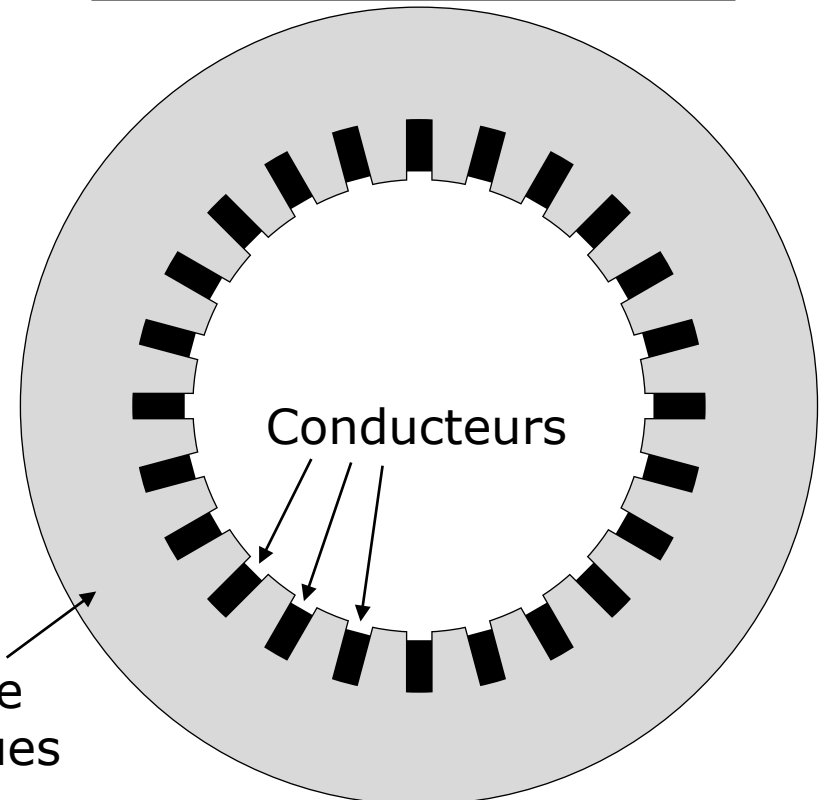
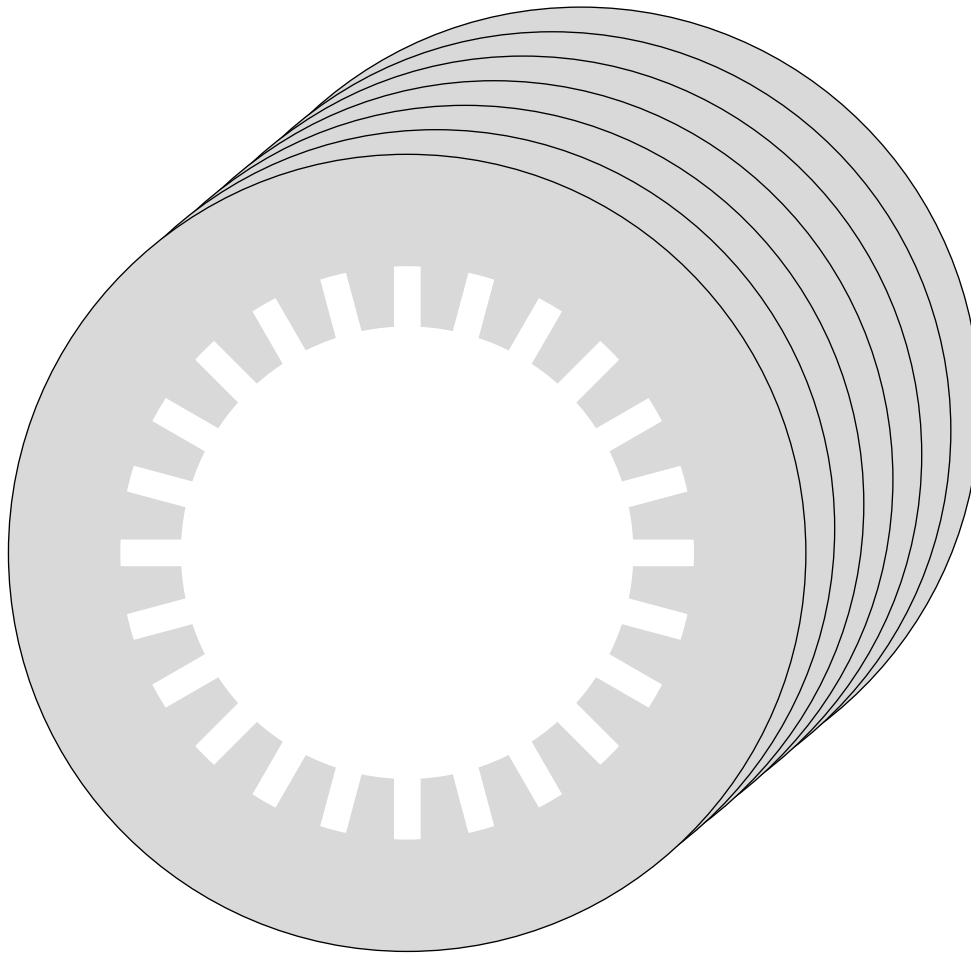
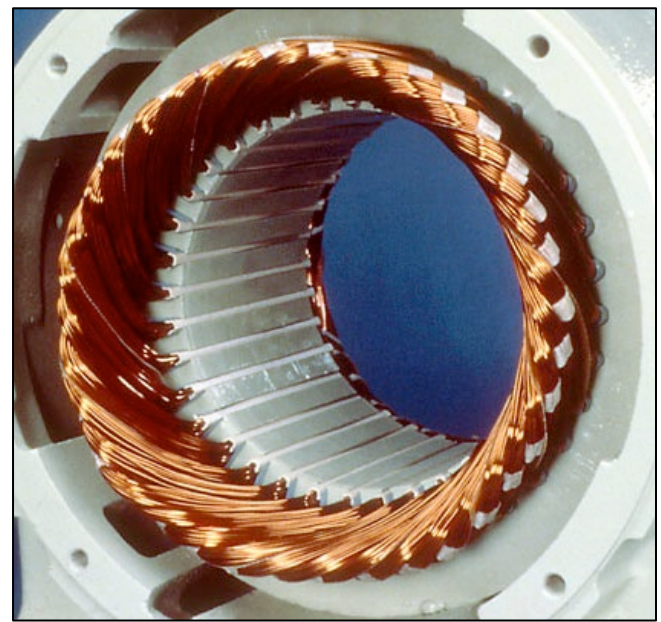


Champ d'induction magnétique créé au stator

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



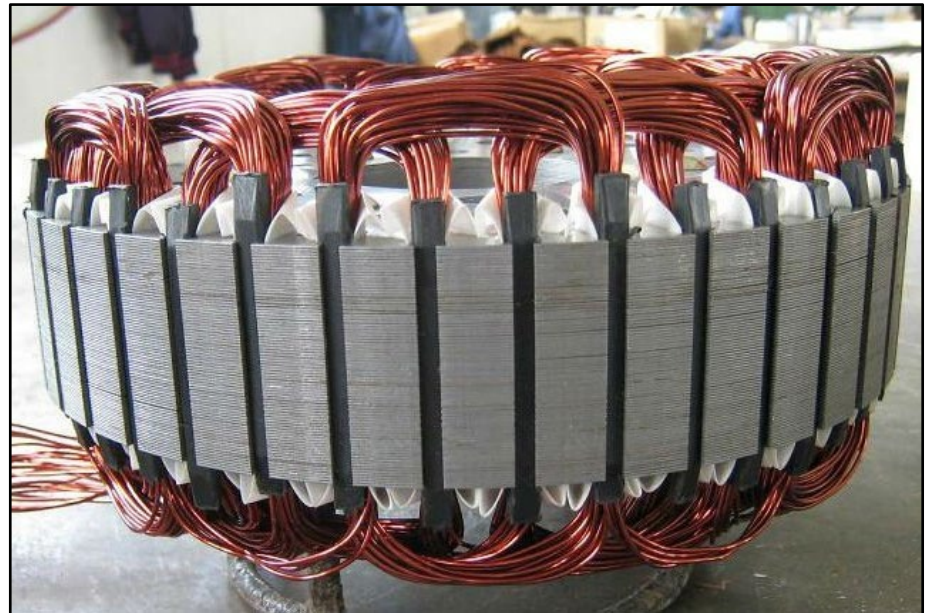
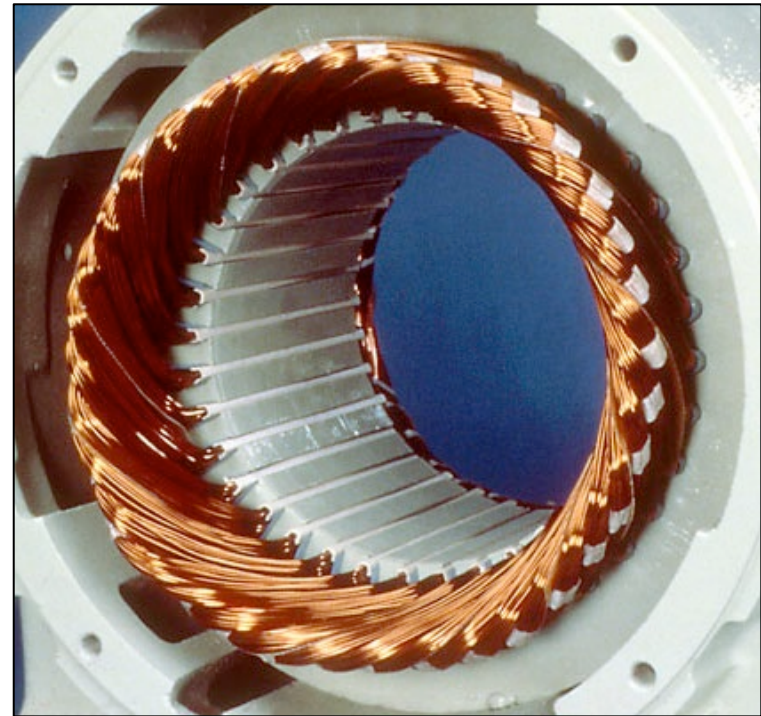
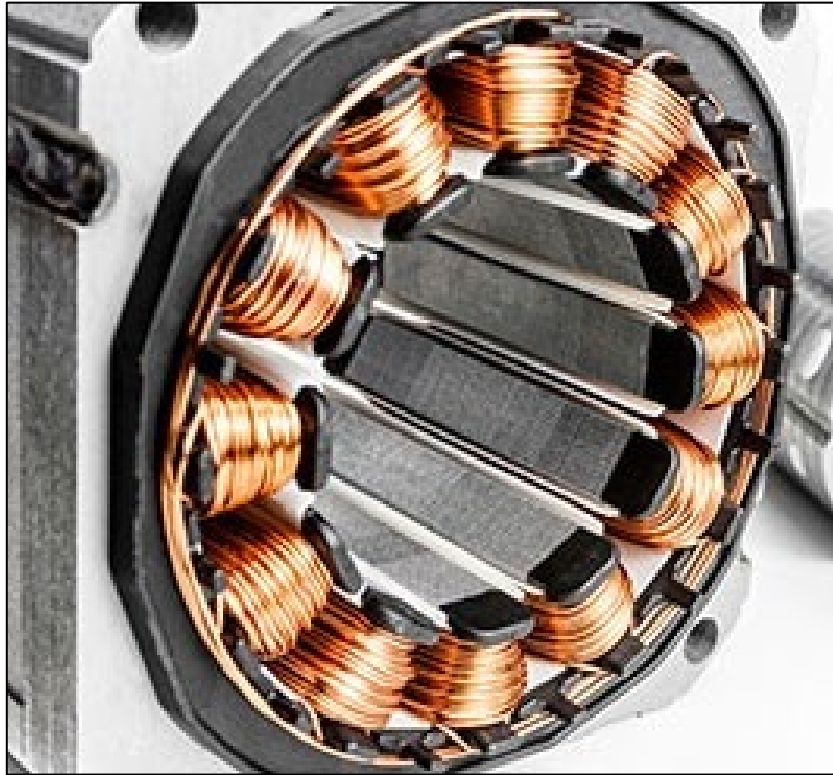
Constitution du stator



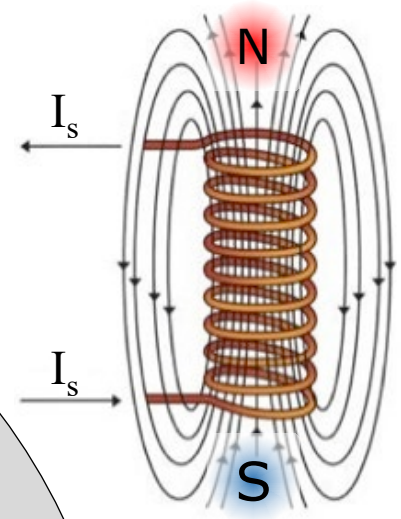
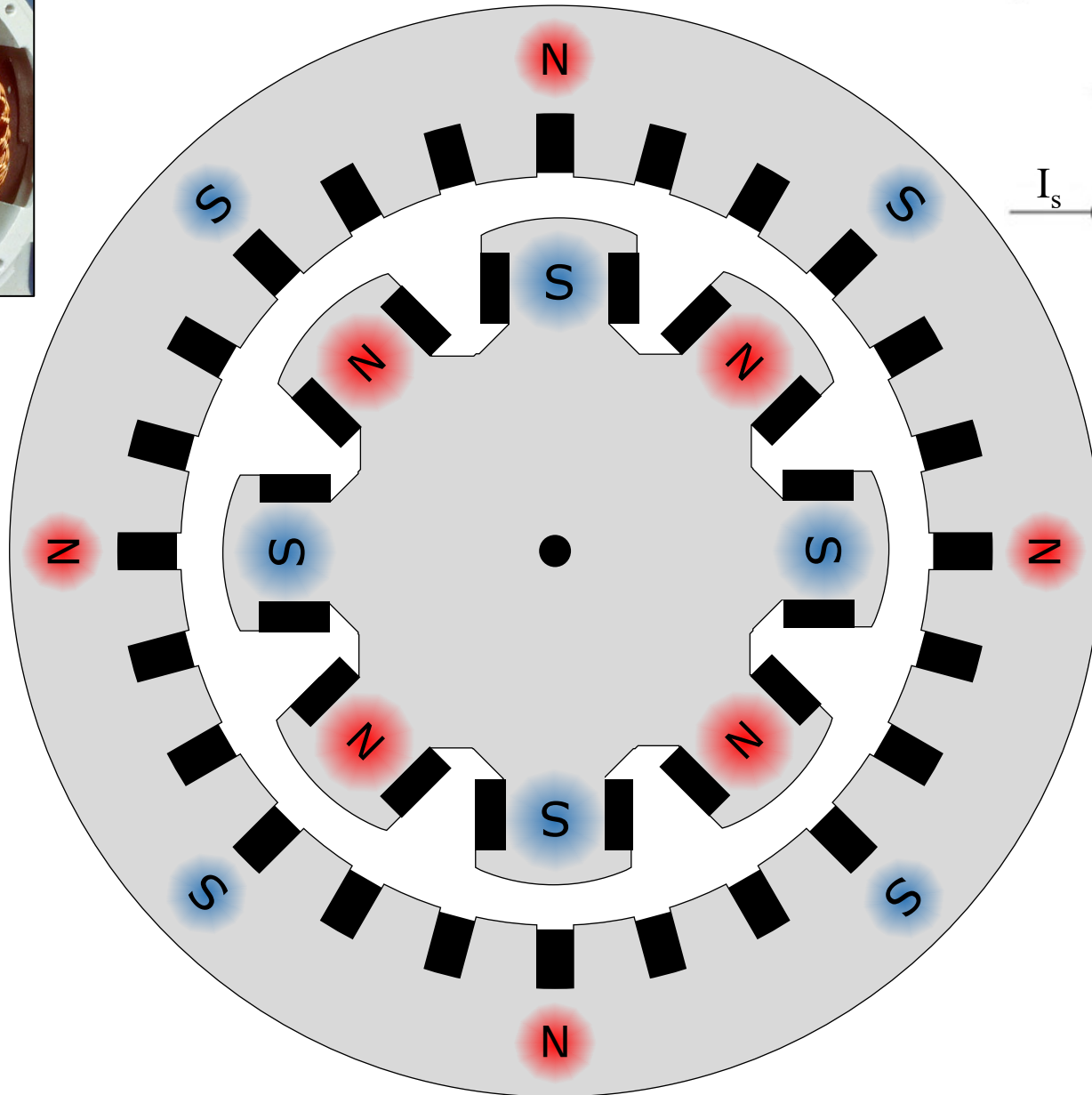
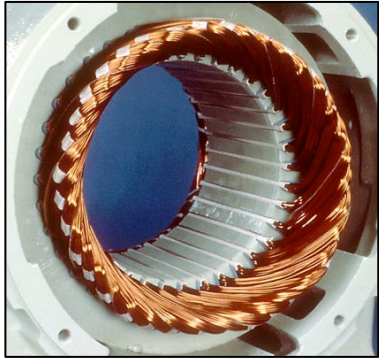
Empilement de
tôles statoriques

Conducteurs

Stator



Principe de fonctionnement



Couple électromagnétique

Génération d'un couple par interaction de champs magnétiques

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

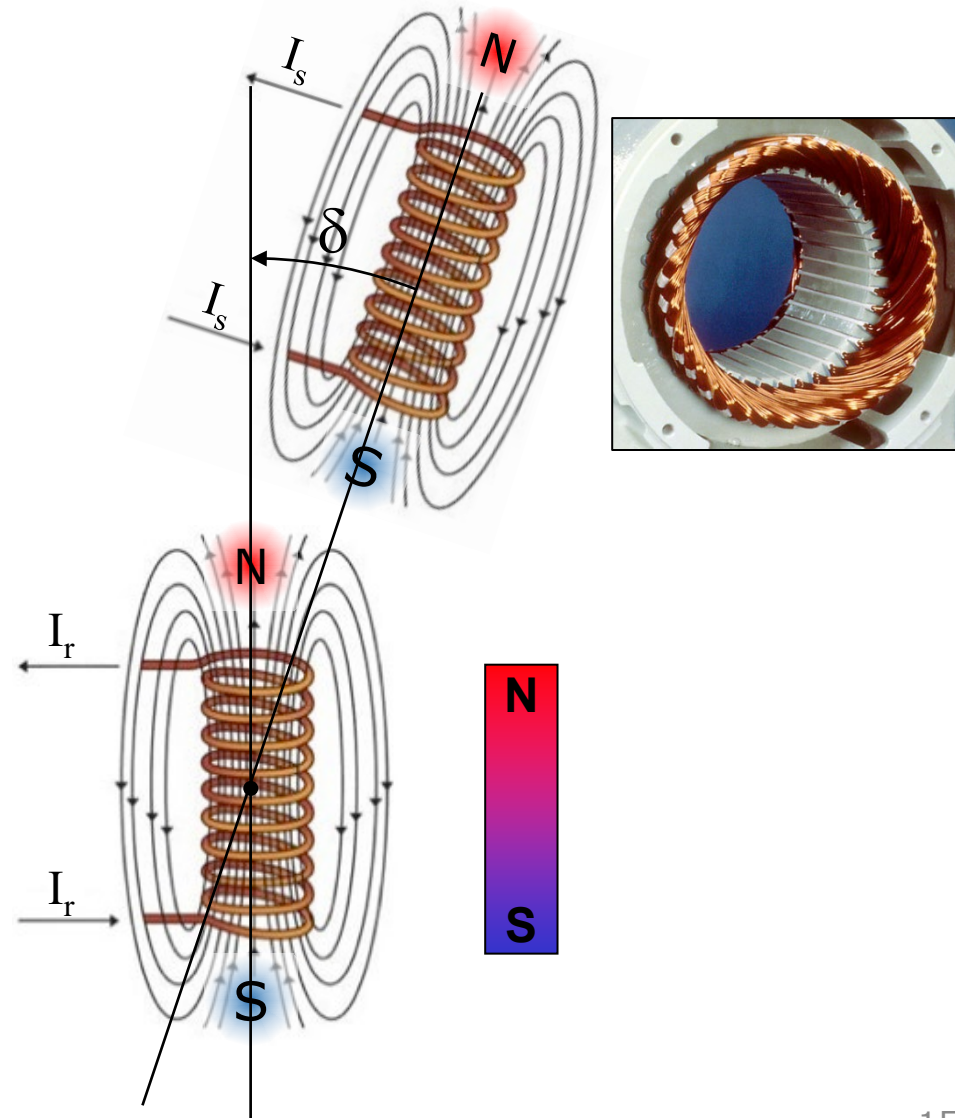
↑
Nombre de paires de pôles

2 conditions :

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

Différents types de machines :

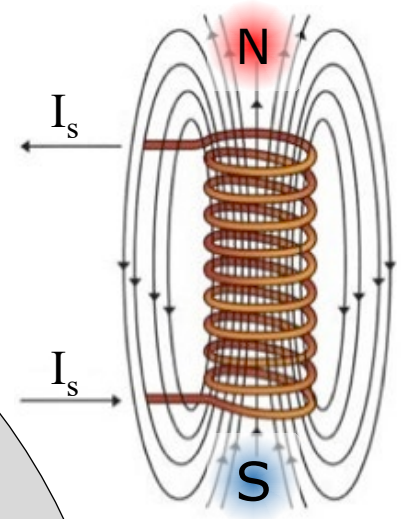
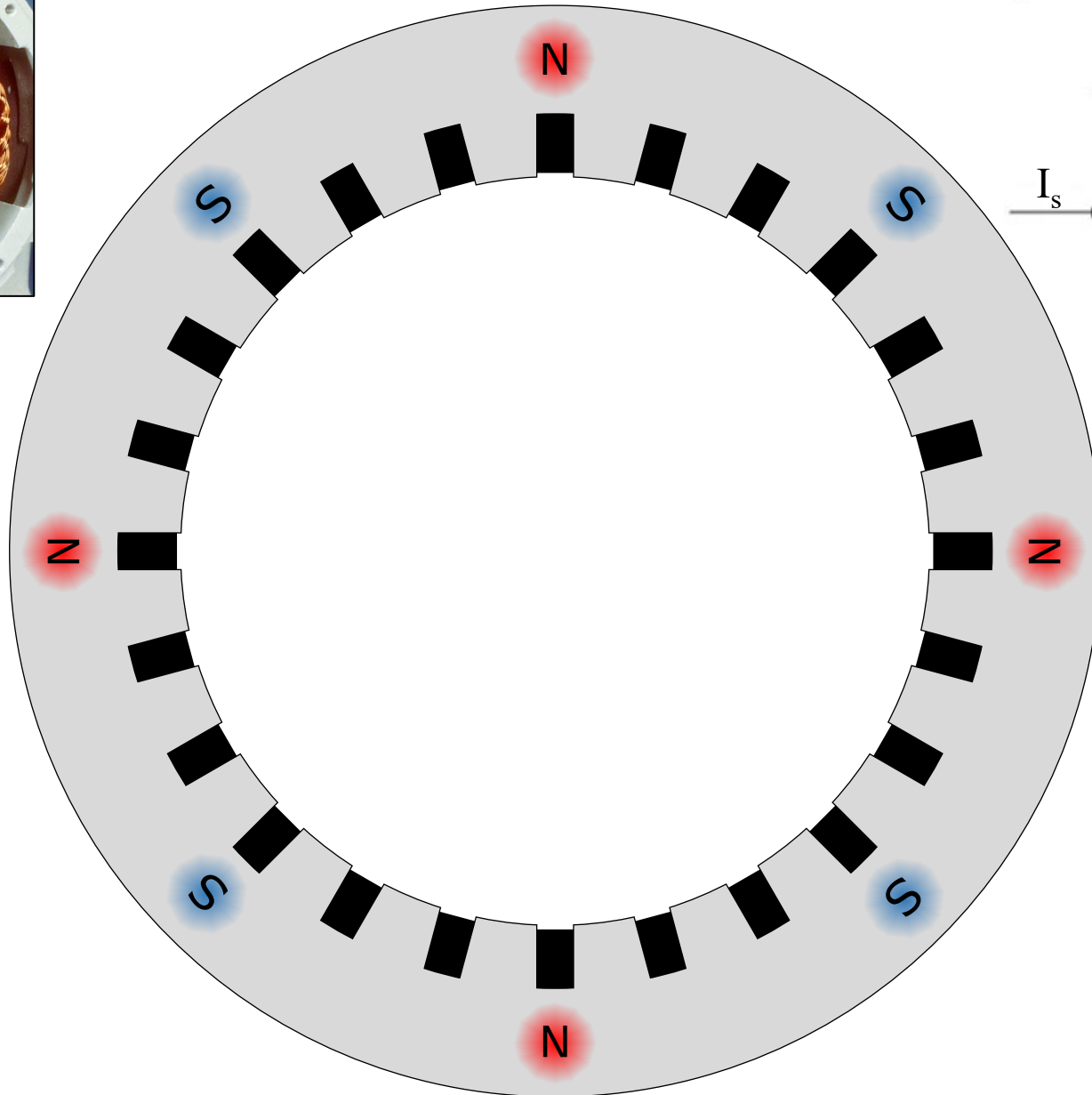
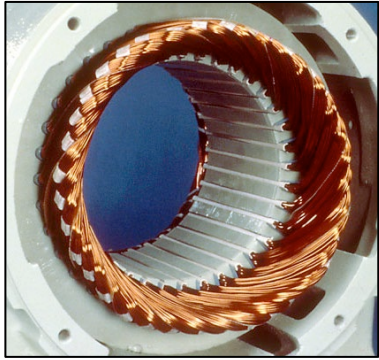
- Machine asynchrone
- Machine synchrone
- Machine à courant continu



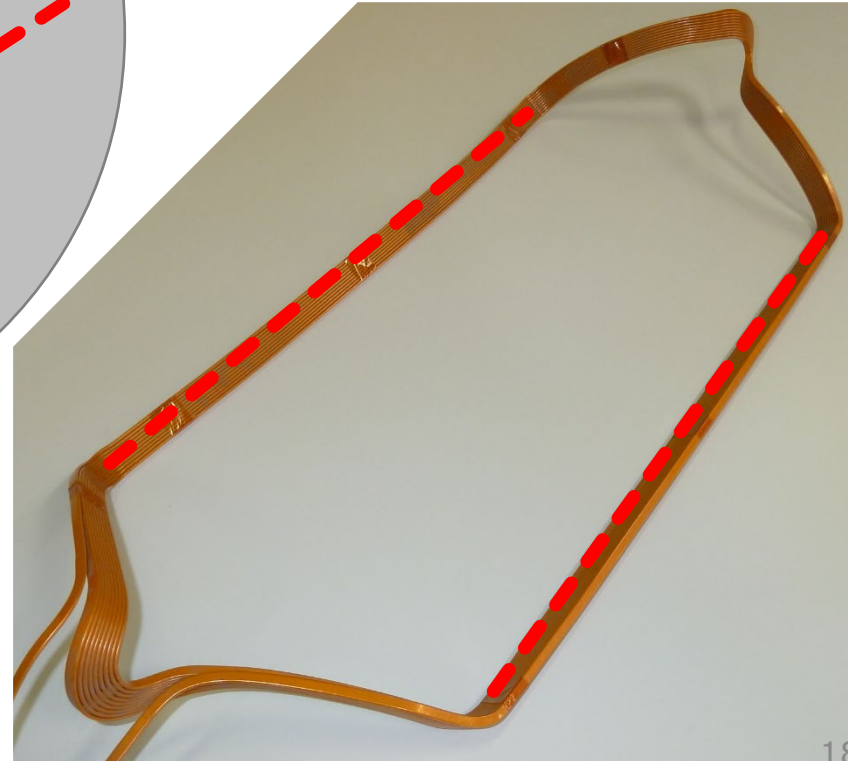
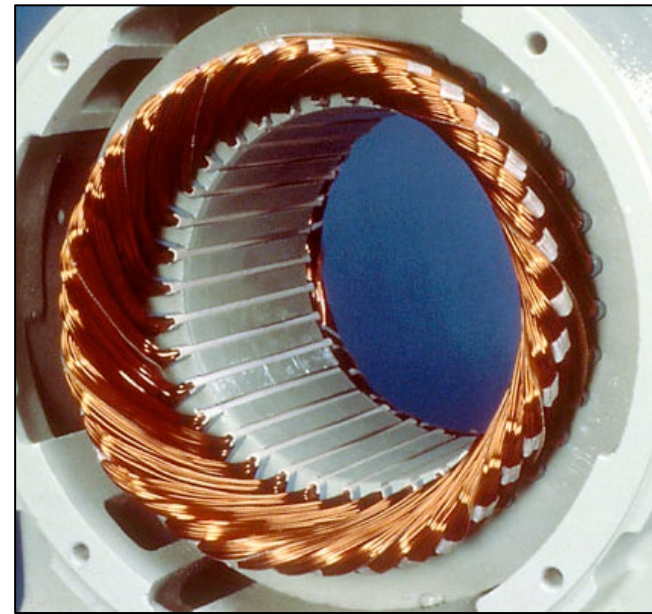
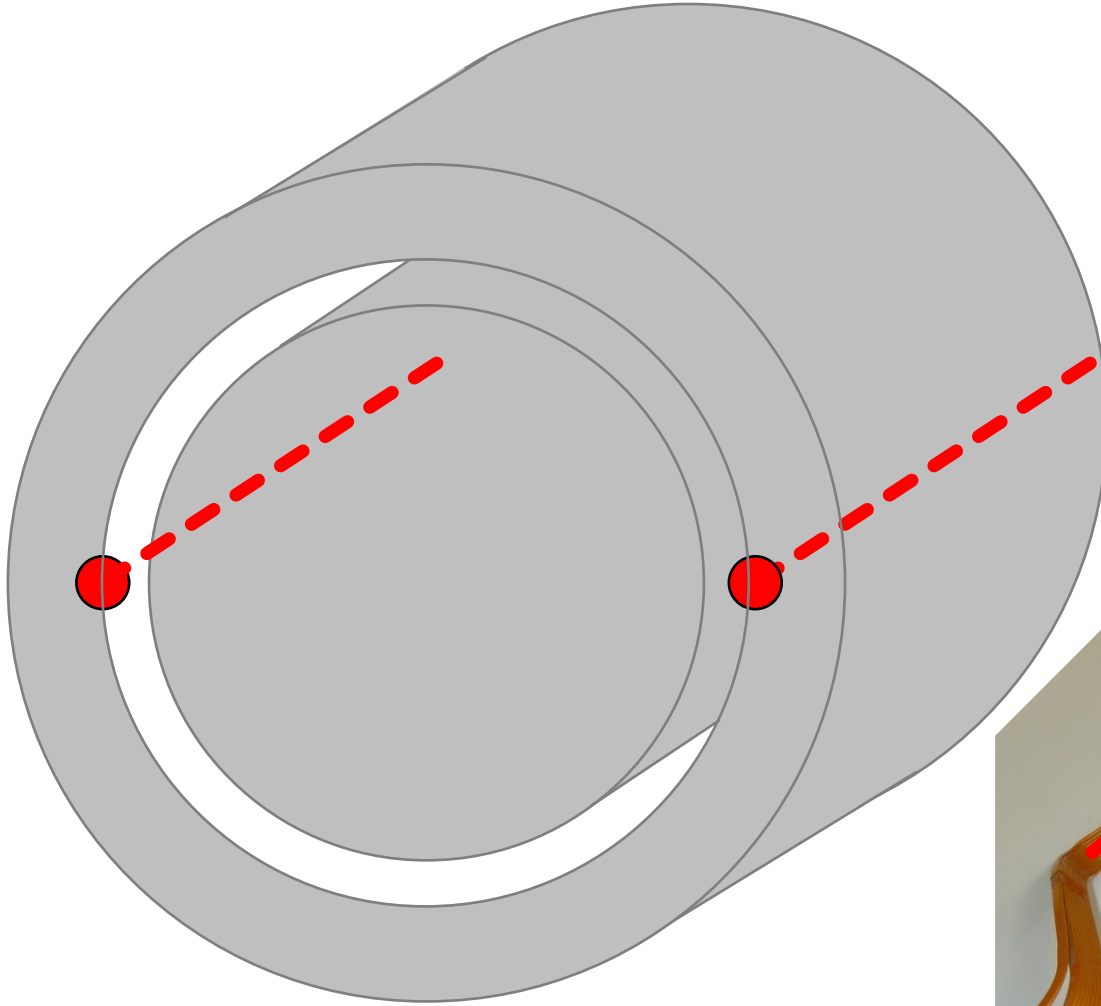
Sommaire

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

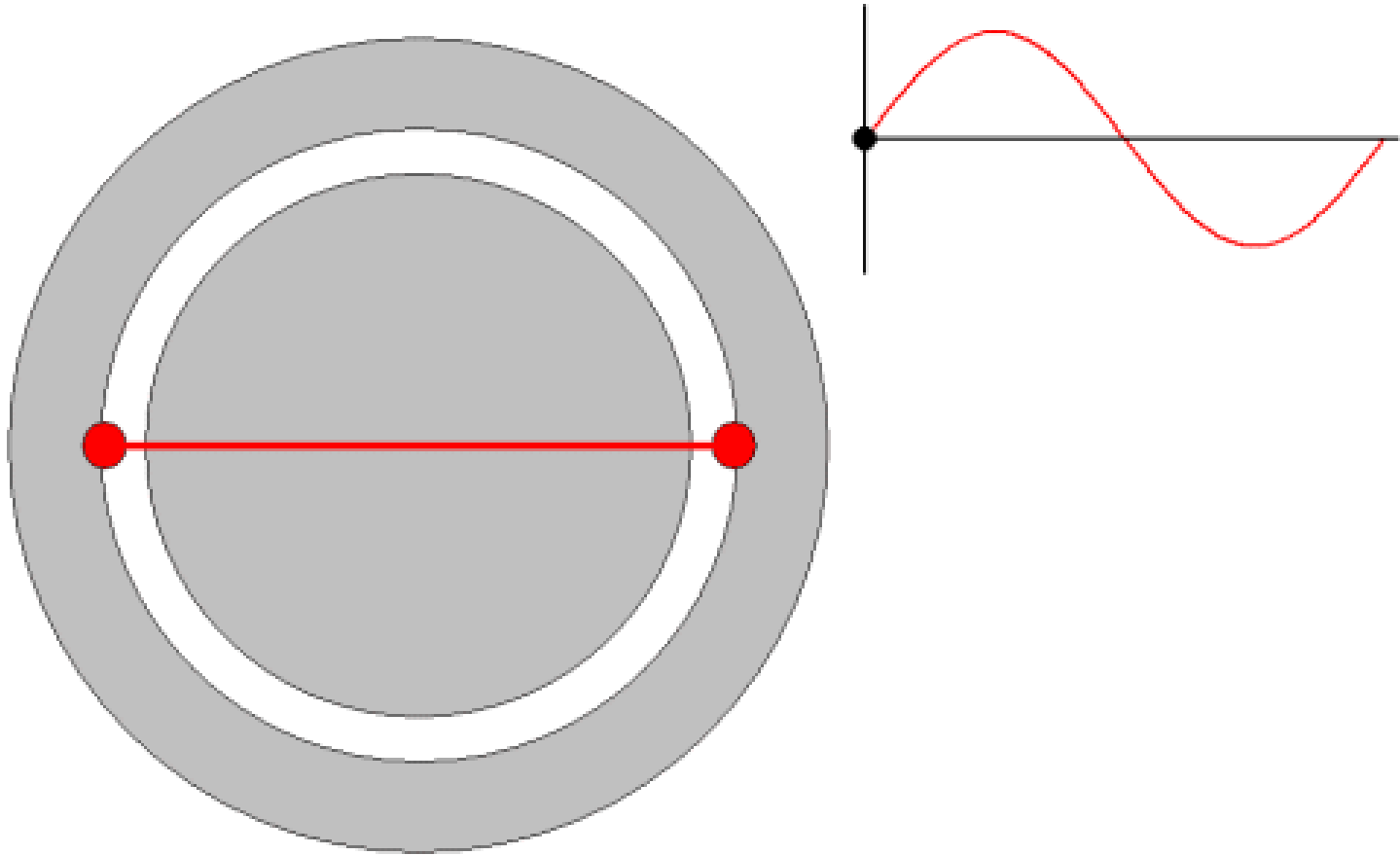
Principe de fonctionnement



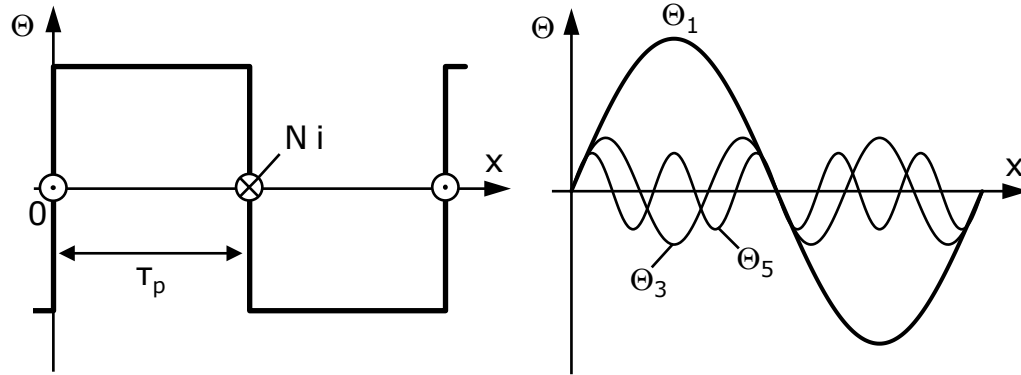
Constitution du stator



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



Champ d'induction dans l'entrefer

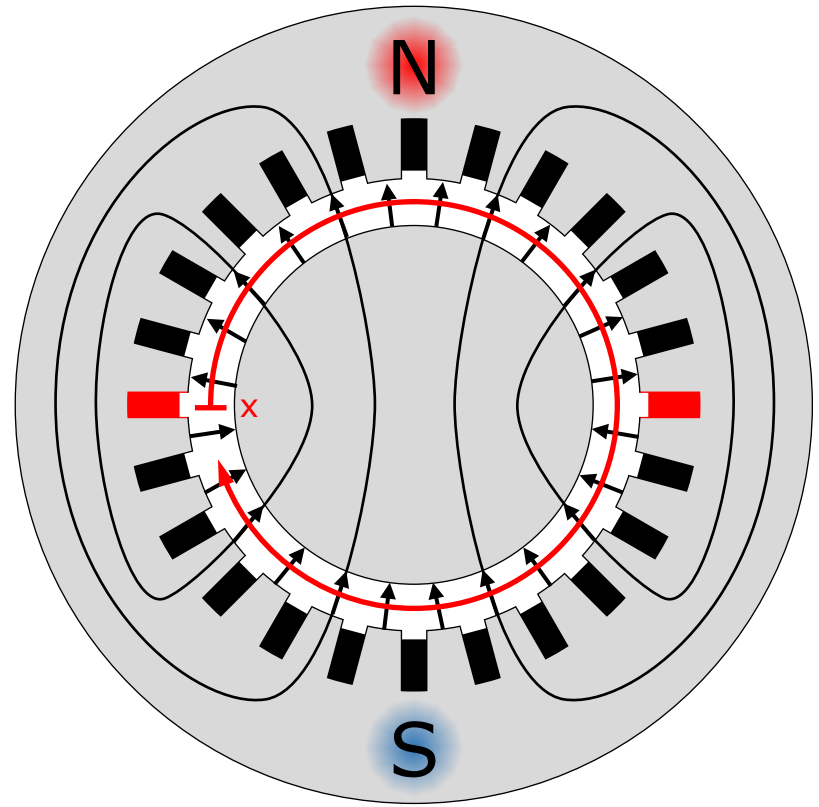


$$i(t) = \sqrt{2} I \cos \omega t$$

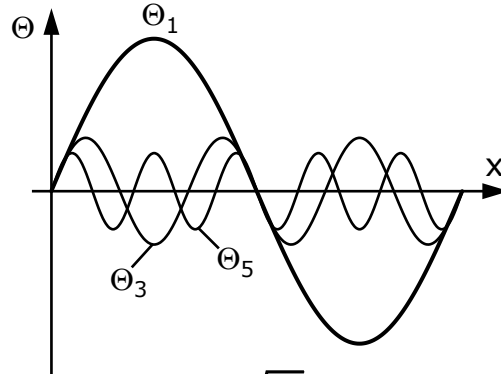
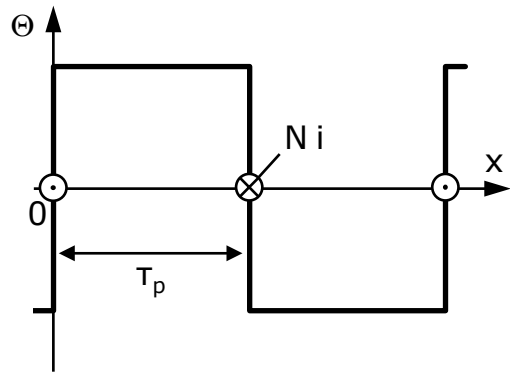
$$\hat{\Theta}_v = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} N I$$

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

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



Champ d'induction dans l'entrefer

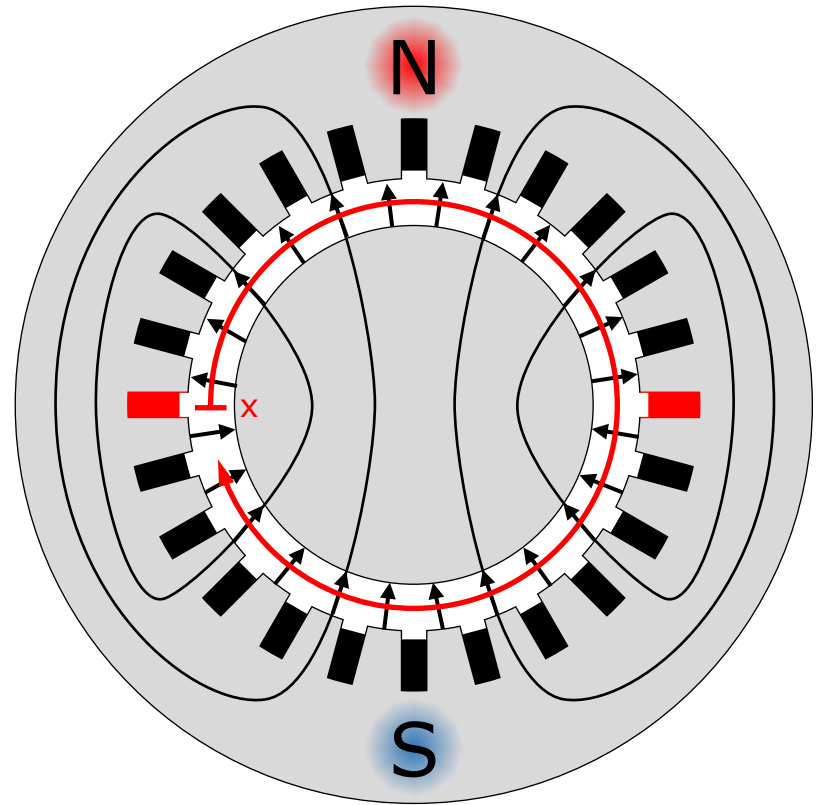


$$i(t) = \sqrt{2} I \cos \omega t \quad \hat{\Theta}_v = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{v} N I$$

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

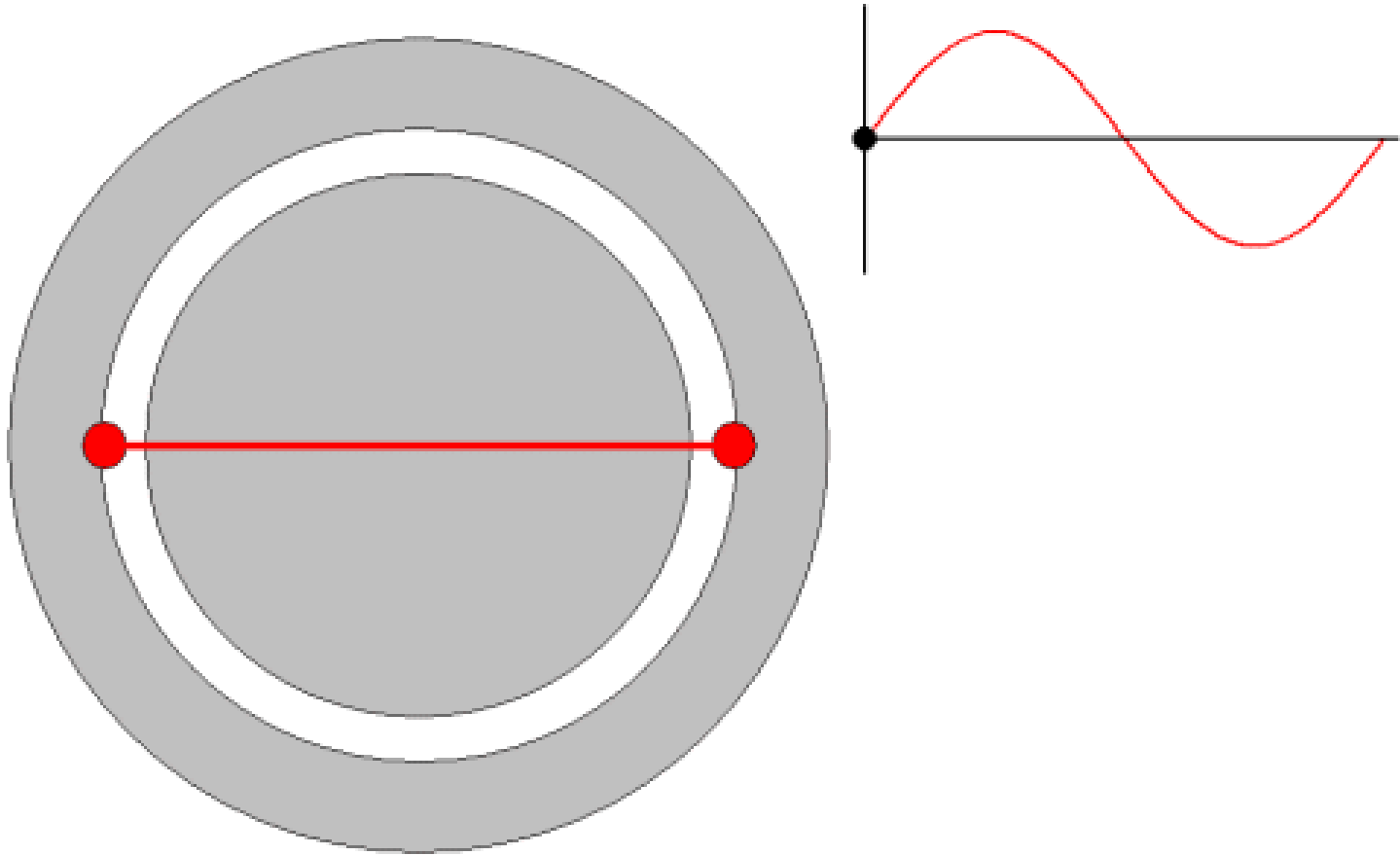
$$\Theta_1(x, t) = \left(\frac{4\sqrt{2}}{\pi} N I \sin \left(\frac{x}{\tau_p} \pi \right) \right) \cos \omega t$$

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

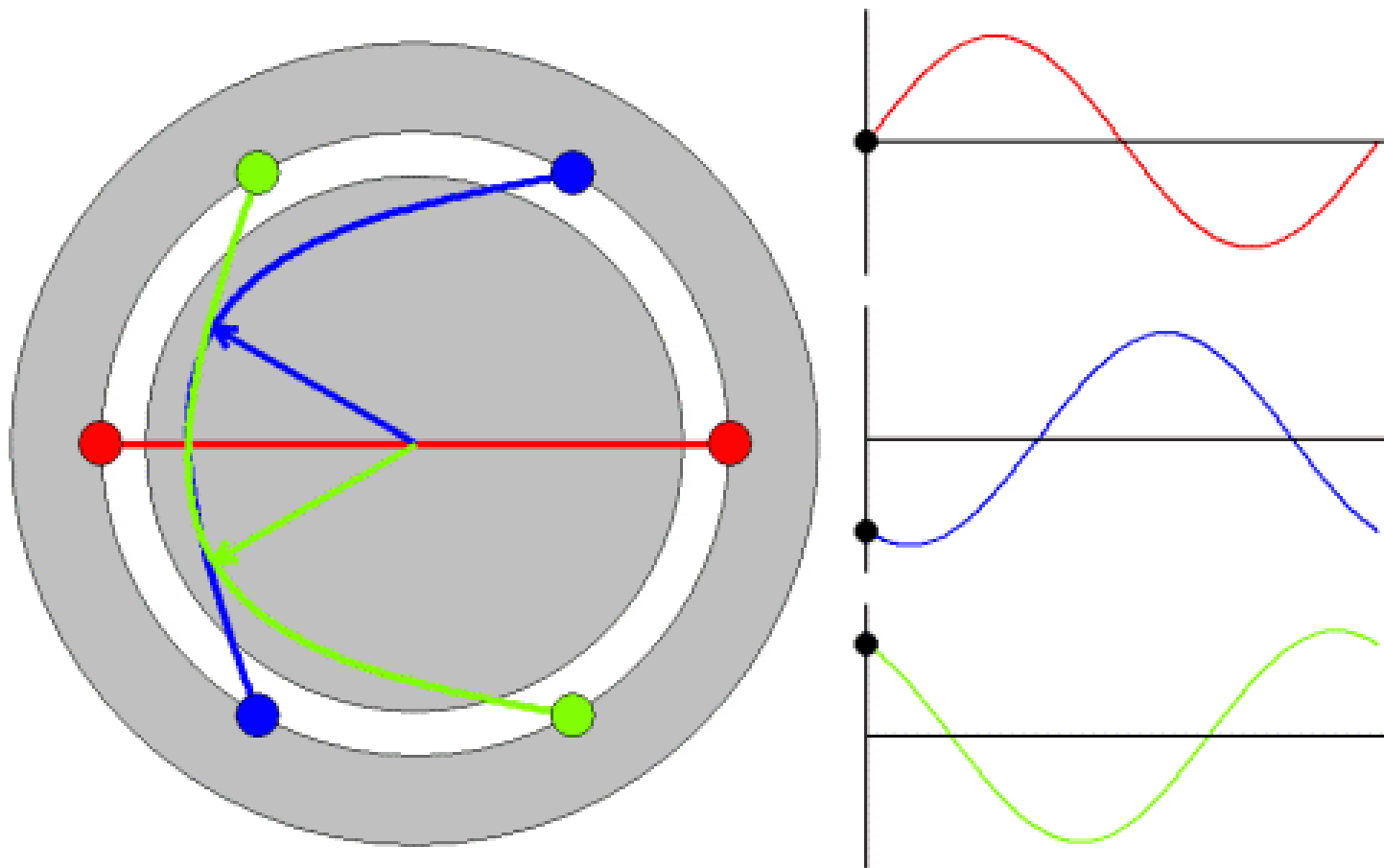


$$B_{\delta}(x, t) = \mu_0 \frac{\Theta(x, t)}{2\delta}$$

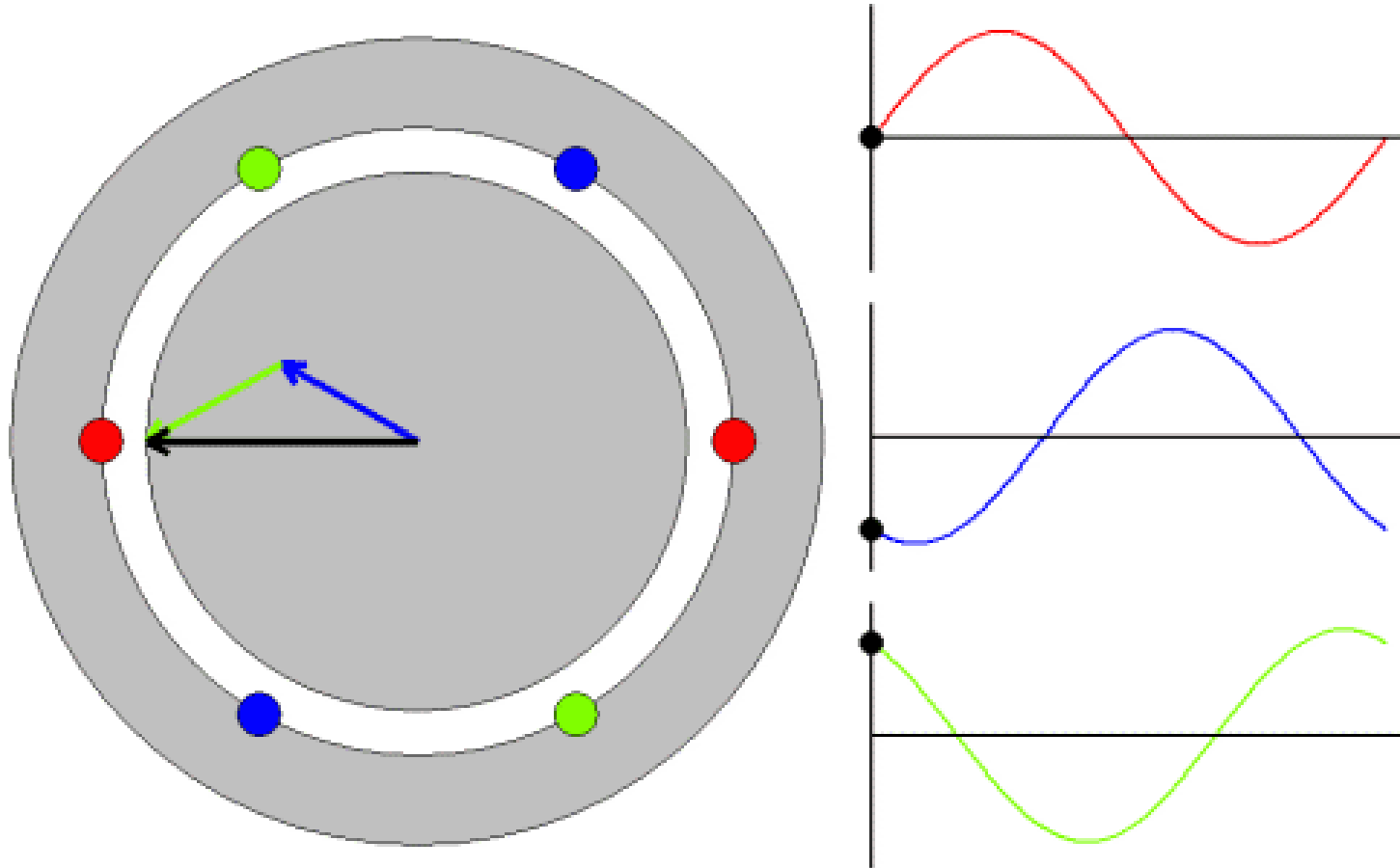
Champ pulsant résultant de l'alimentation d'une spire diamétrale par un courant alternatif



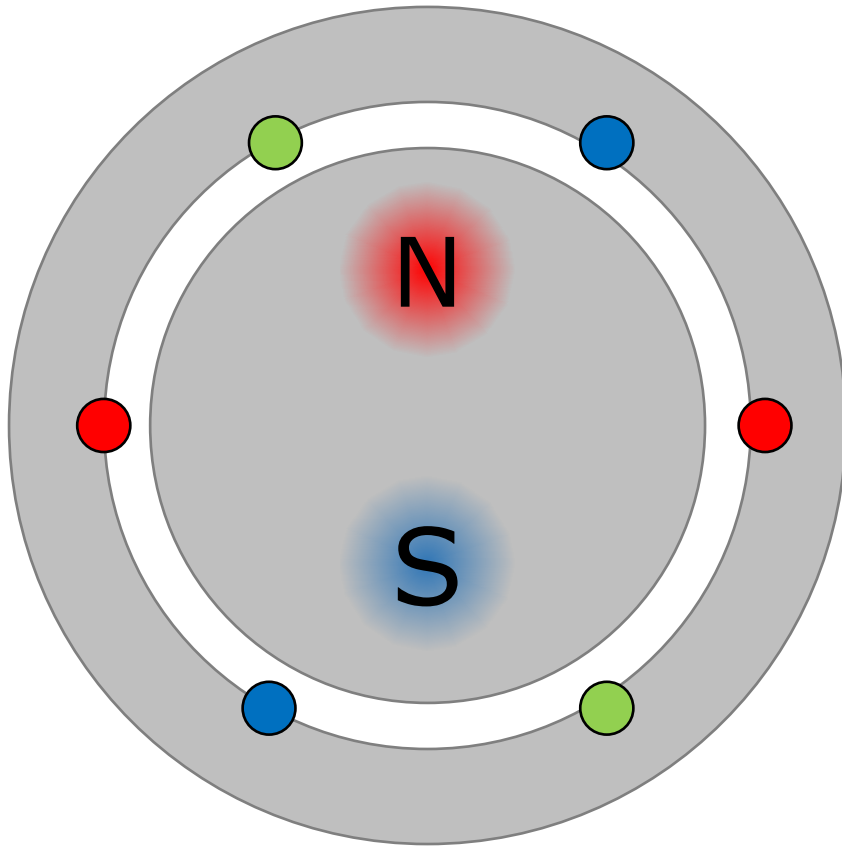
Champs pulsants résultants de l'alimentation de spires diamétrales réparties, par un système de courants alternatifs triphasés symétriques



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

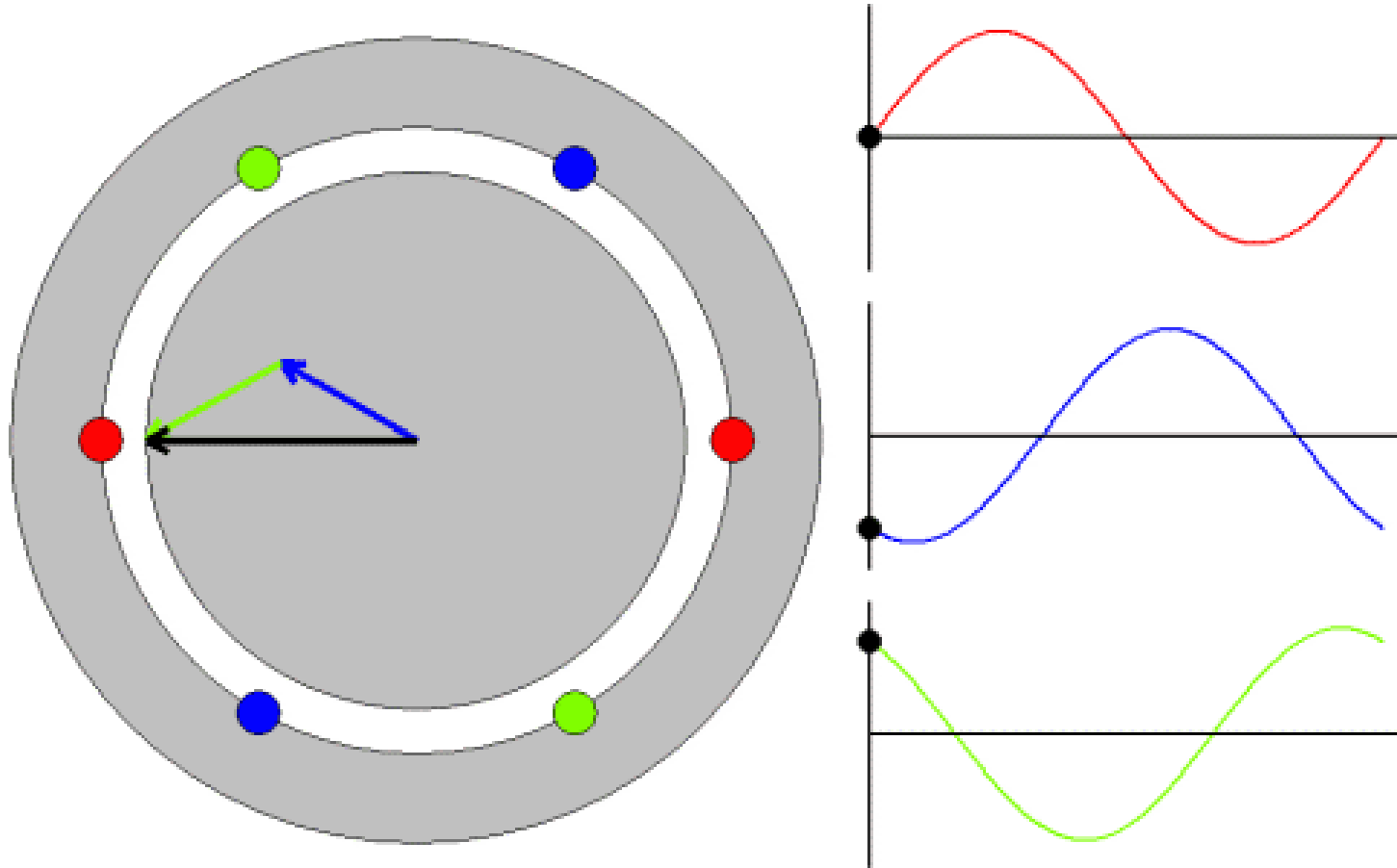
$$\left\{ \begin{array}{l} B_{\delta 1A}(x, t) = \hat{B} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p}\right) \cos(\omega t) \\ B_{\delta 1B}(x, t) = \hat{B} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ B_{\delta 1C}(x, t) = \hat{B} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau_p}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

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

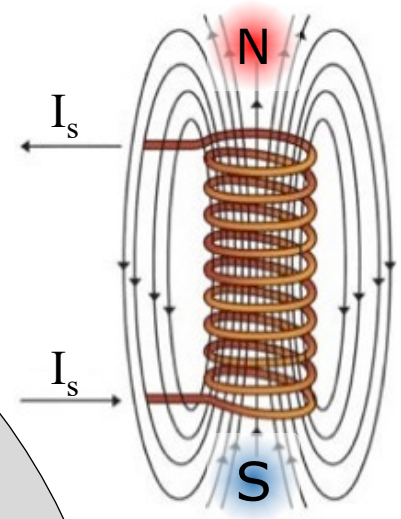
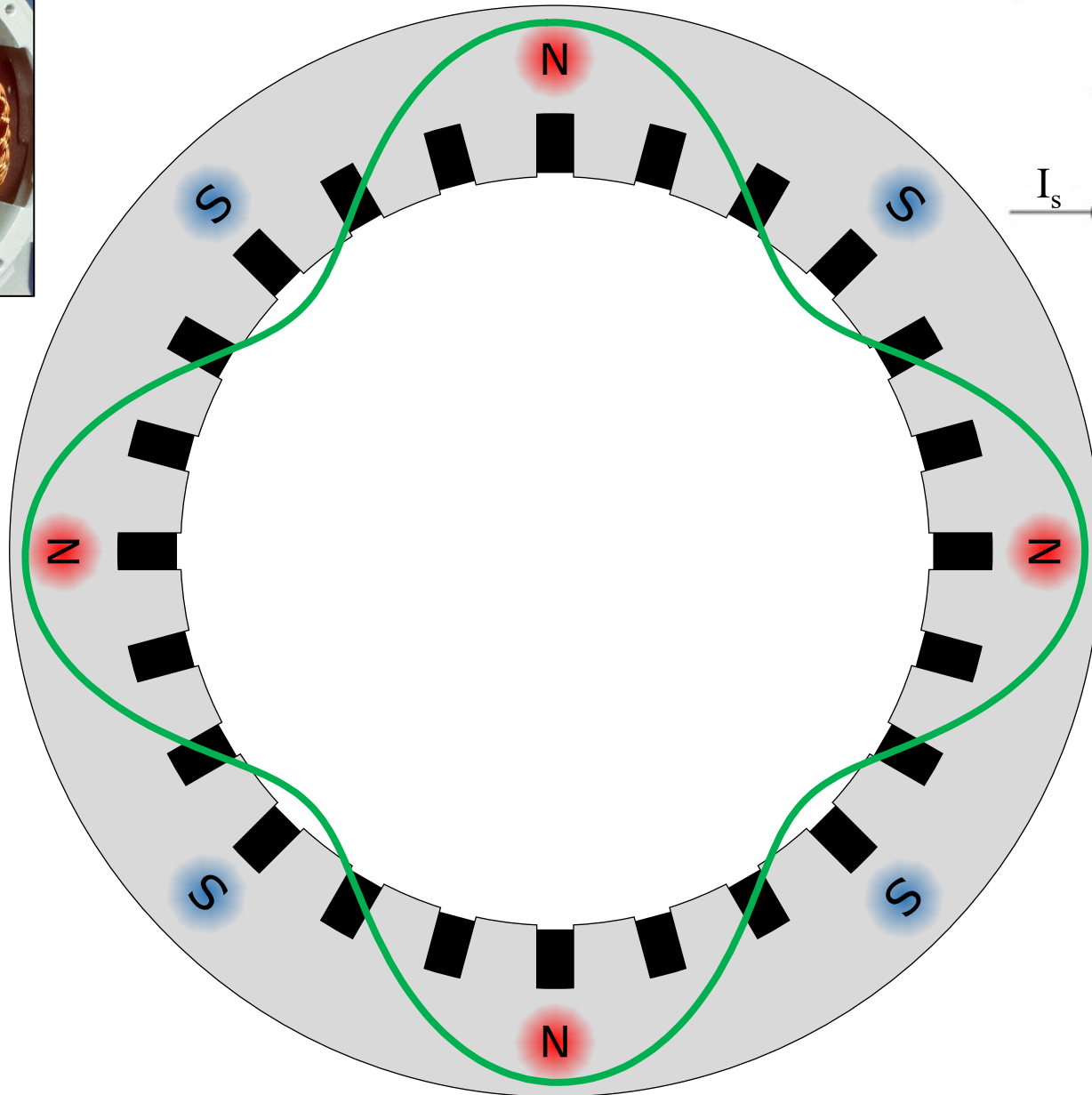
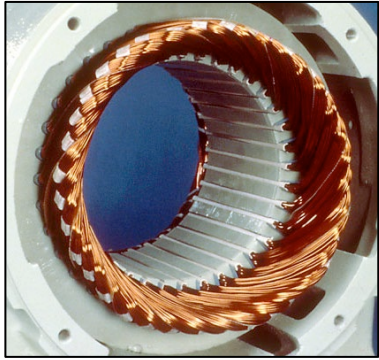
↑

1.5 fois plus grand que le fondamental
de chaque champ pulsant

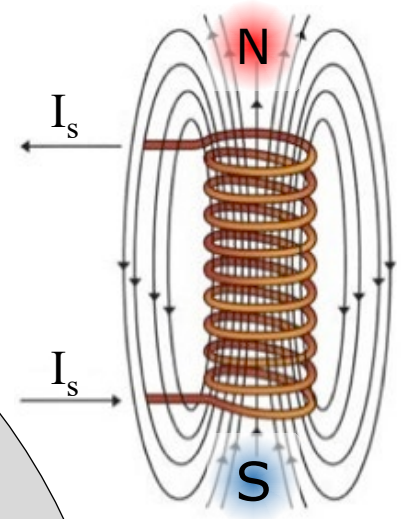
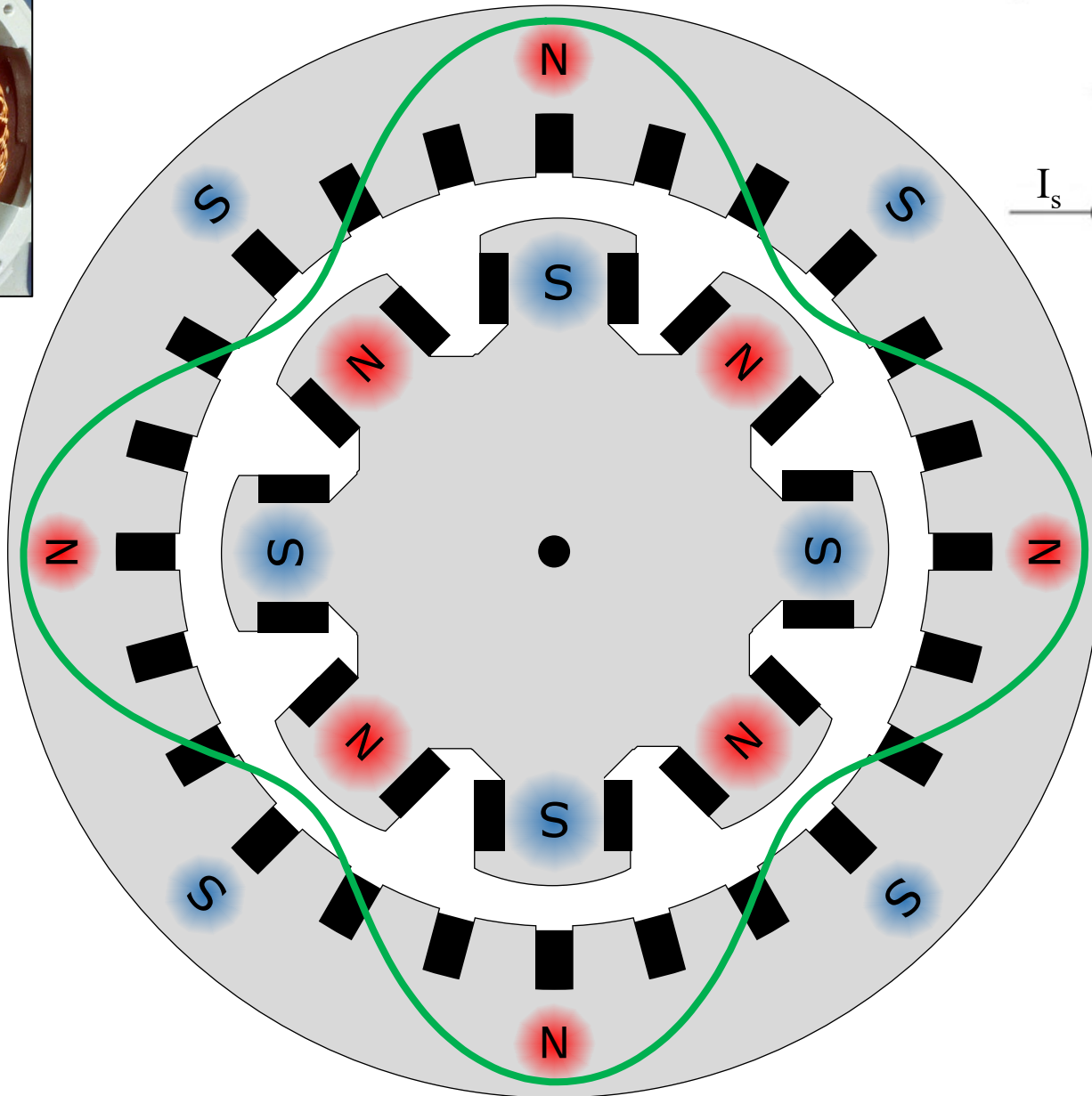
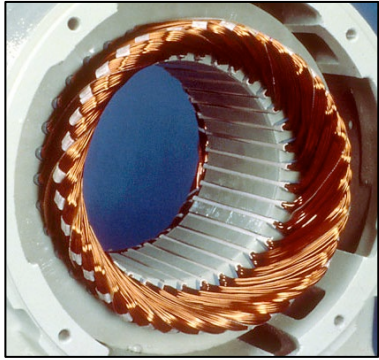
Champ tourant résultant de la somme vectorielle des trois champs pulsants



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
- Grandeurs relatives

Champ d'induction pour enroulement biphasé

pour le fondamental

Décâlé de 90° temporel
et géométrique

$$\begin{cases} B_{\delta A}(x, t) = \left(\hat{B} \sin \left(\frac{\pi x}{\tau_p} \right) \right) \cos(\omega t) \\ B_{\delta B}(x, t) = \left(\hat{B} \sin \left(\frac{\pi x}{\tau_p} \pm \frac{\pi}{2} \right) \right) \cos \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) \end{cases}$$

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

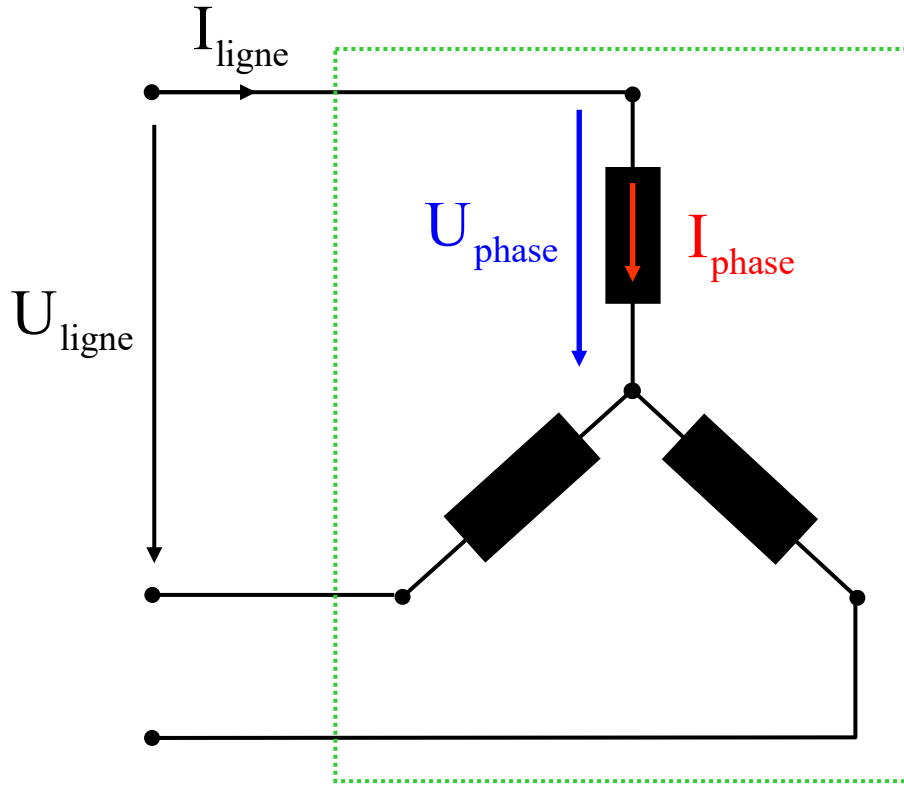
Triphasé

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

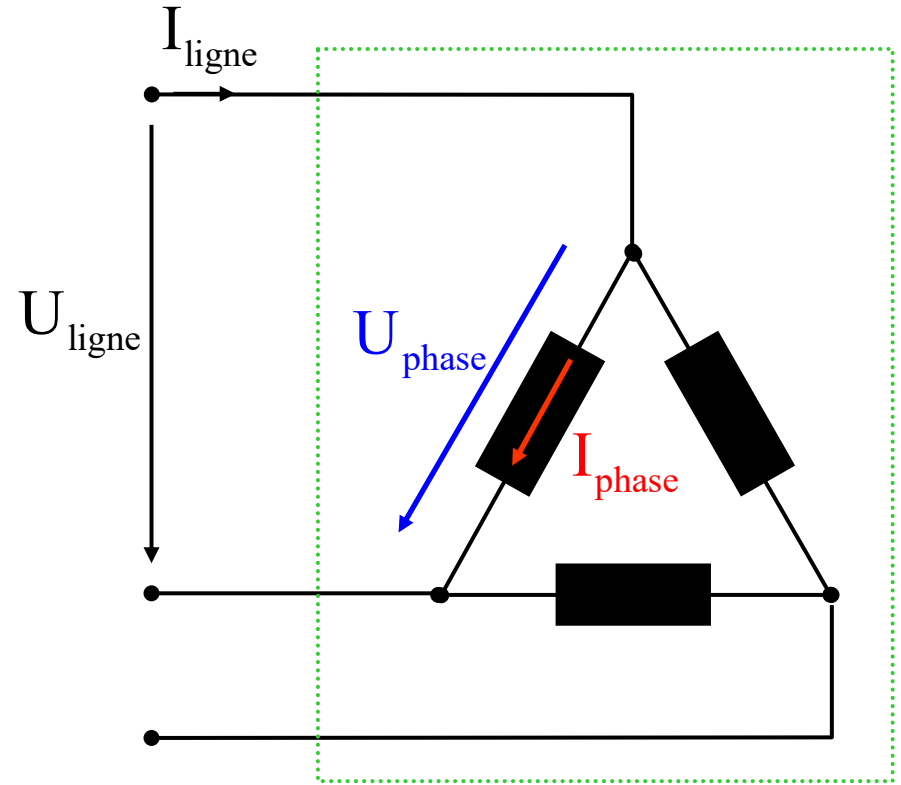
Sommaire

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

Rappel sur les couplages étoile-triangle



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



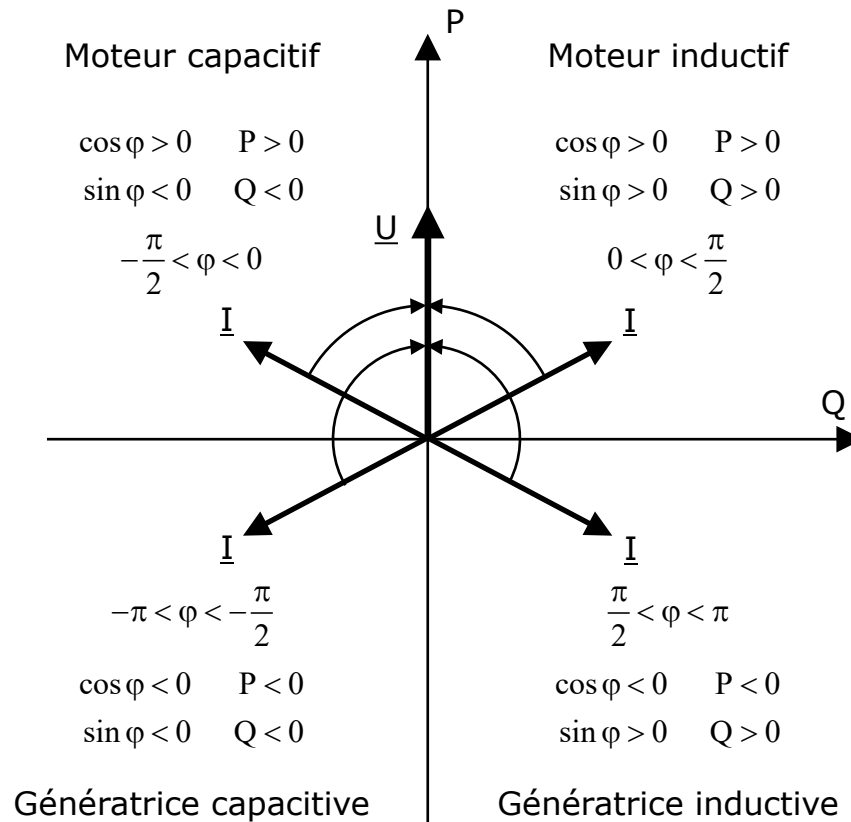
$$\begin{cases} U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}} \\ I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}} / \sqrt{3} \end{cases}$$

Puissances triphasées

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

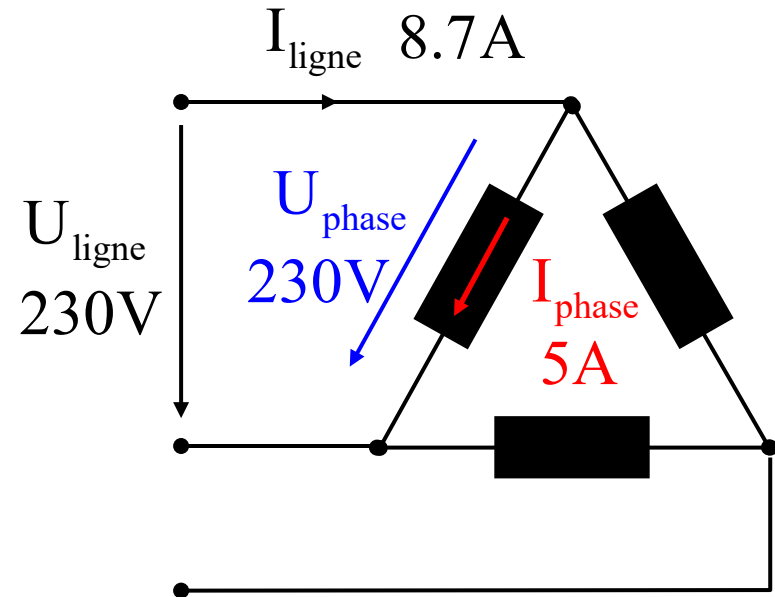
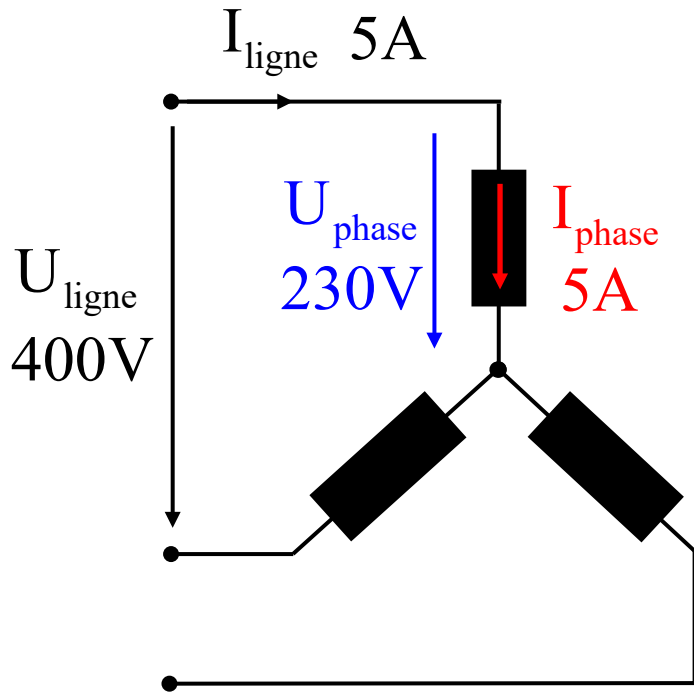
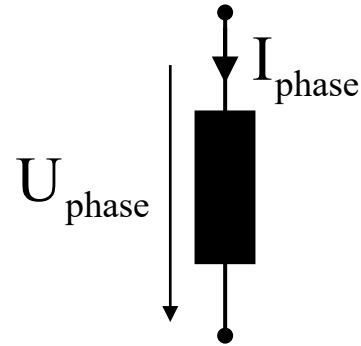
Puissance active $P = 3 U_{ph} I_{ph} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} \cos \varphi$ [W]

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



Plaque signalétique triphasée

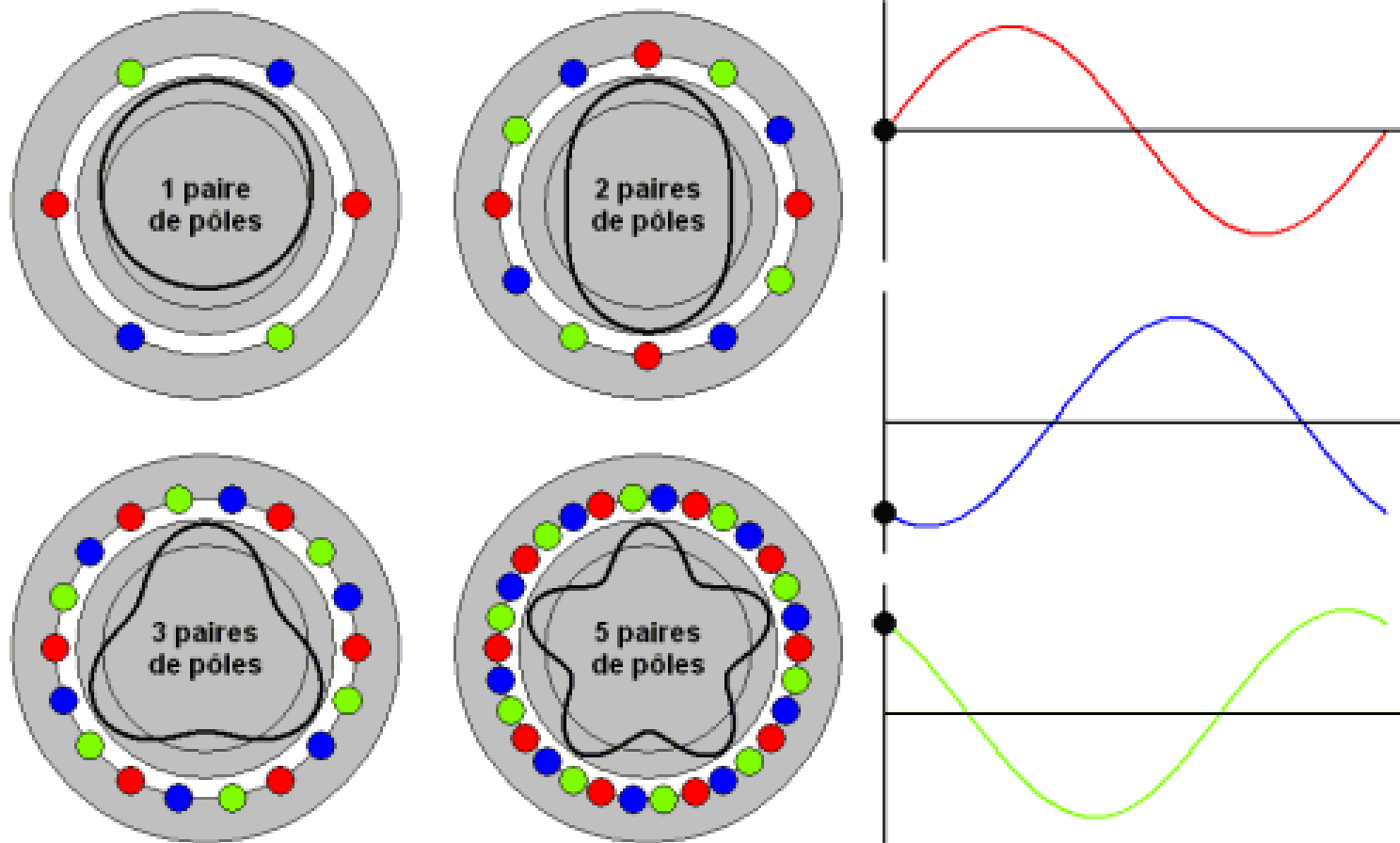
Y 400V / 5A
 Δ 230V / 8.7A



Sommaire

- Couple électromagnétique
- Champ tournant
- Rappels
 - Couplage étoile-triangle
 - Puissances
 - Plaque signalétique triphasée
- Nombre de paires de pôles
- 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



Vitesses et nombre de paires de pôles

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



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

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

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

nombre de paires de pôles

Rappel :

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

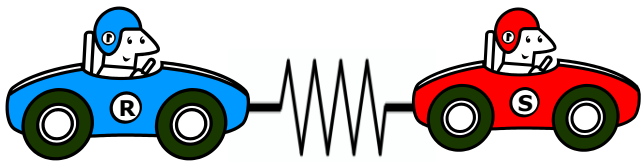
$\omega \rightarrow [\text{rad} / \text{s}] \rightarrow$ Monde électrique

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

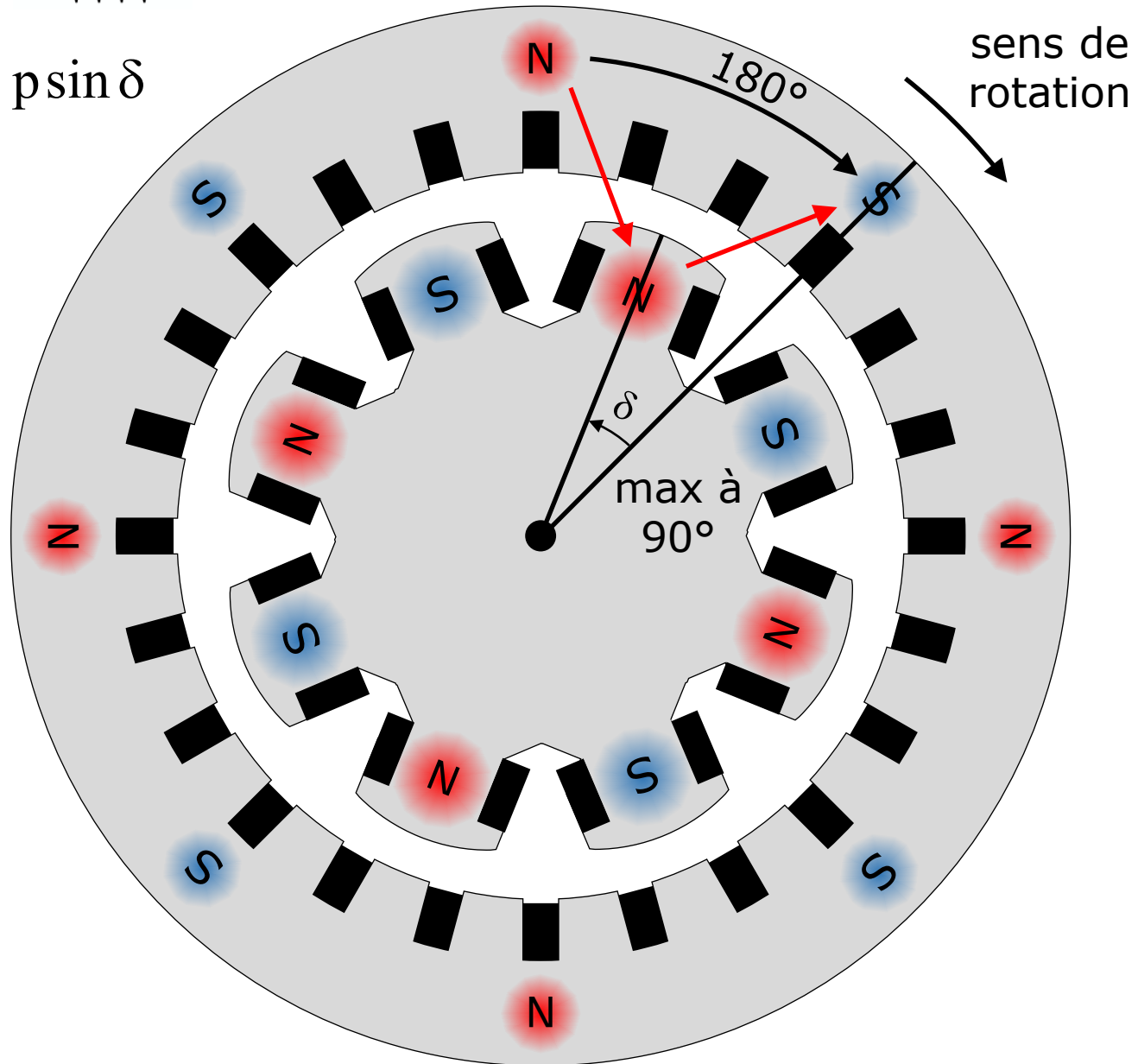
$n \rightarrow [\text{tr} / \text{s}] \rightarrow$ Monde mécanique

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

Vitesses et nombre de paires de pôles



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



Sommaire

- Couple électromagnétique
- Champ tournant
- Rappels
 - Couplage étoile-triangle
 - Puissances
 - Plaque signalétique triphasée
- Nombre de paires de pôles
- 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 ?

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

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

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

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

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

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

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