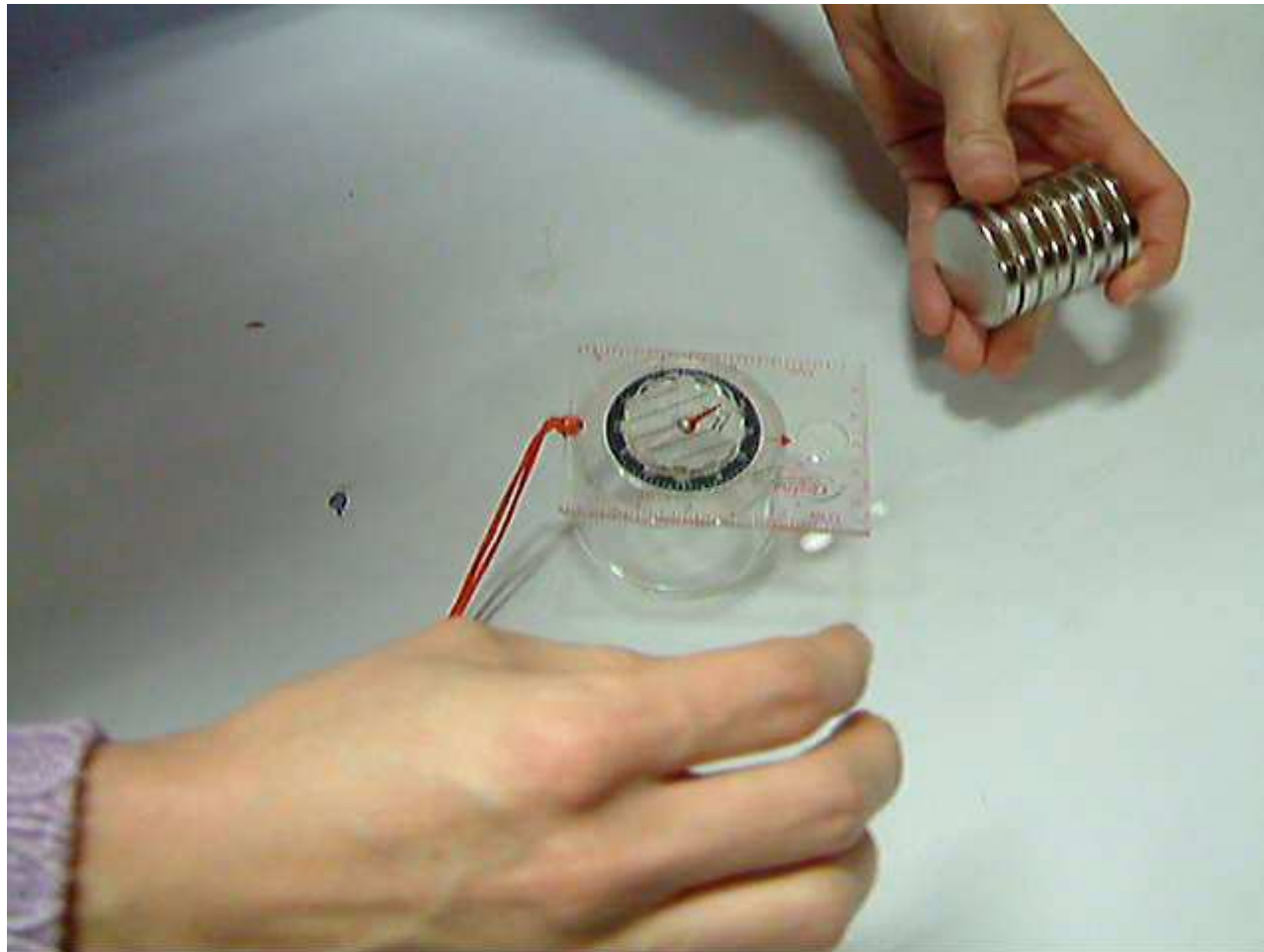
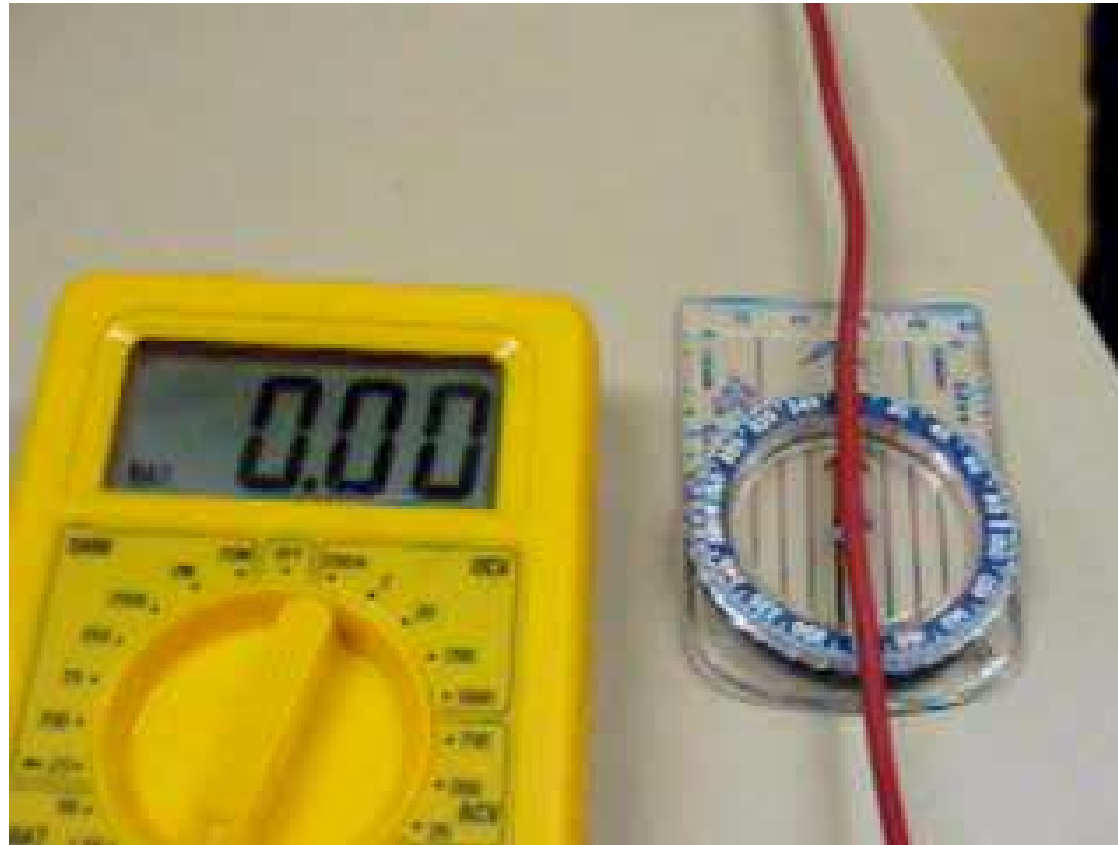


I Champs tournants

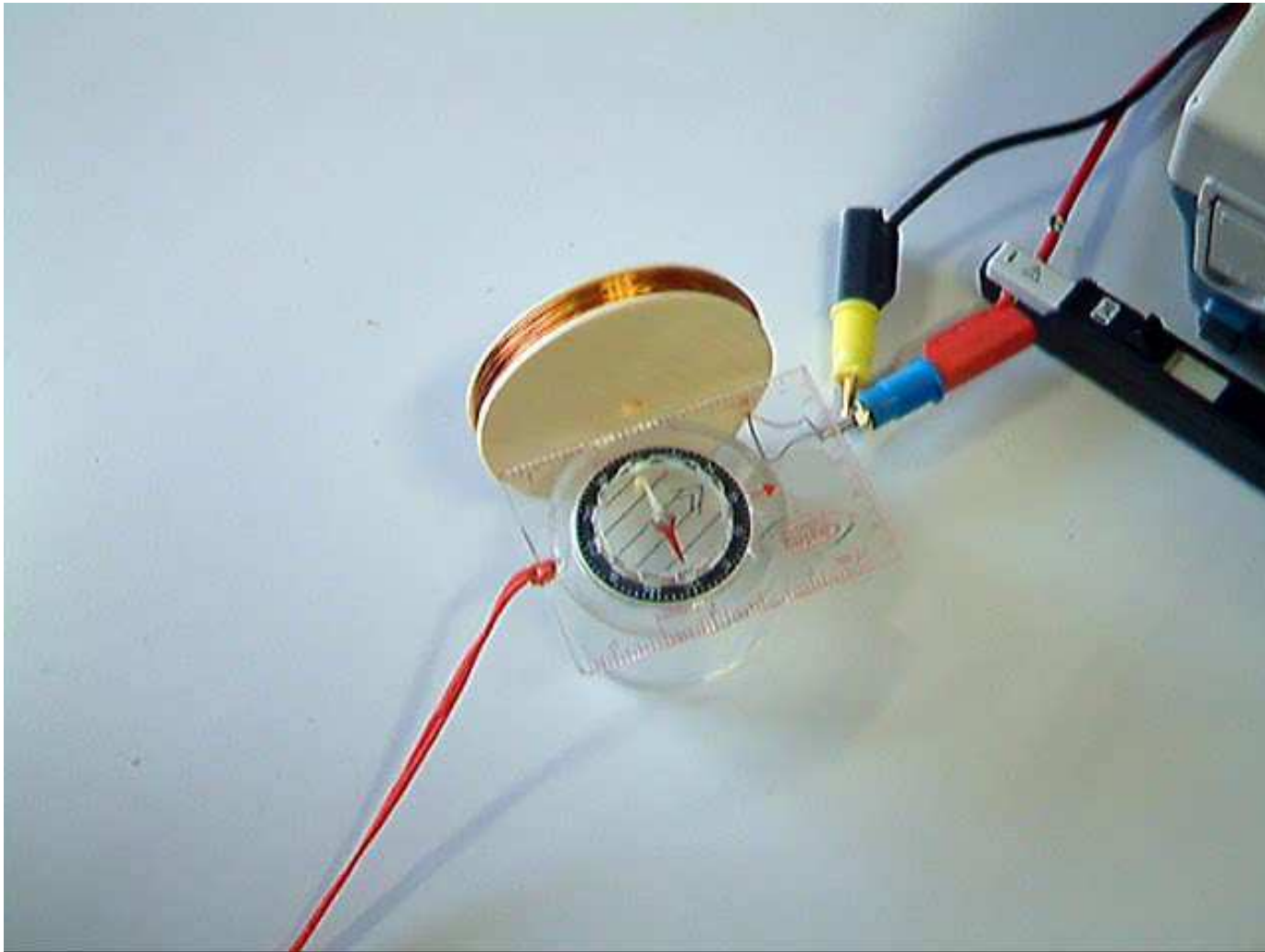


Champ créé par un courant

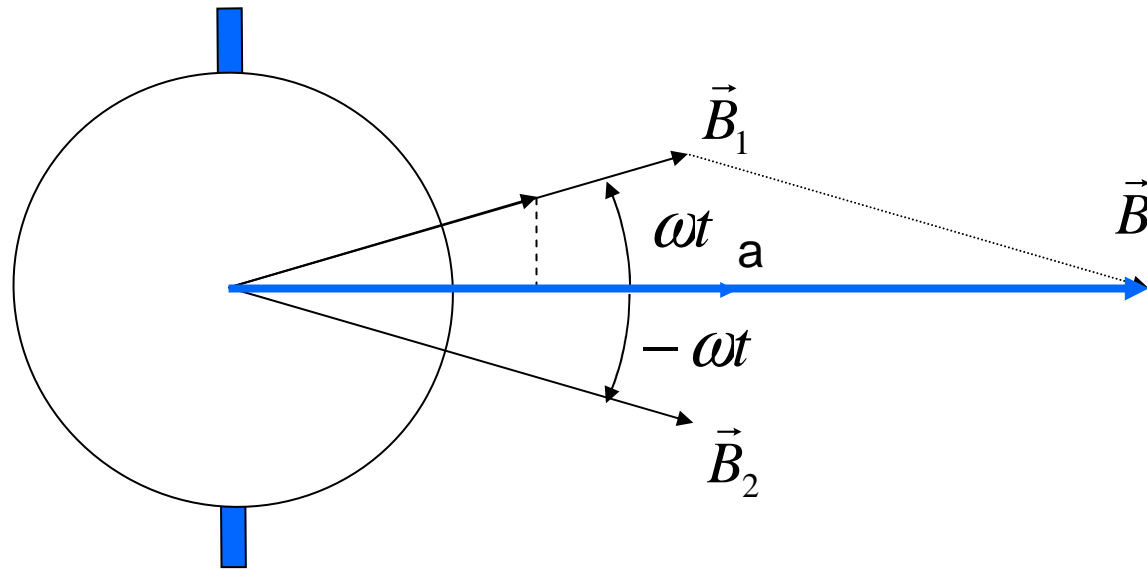


Champ créé par une phase

- Champ pulsant



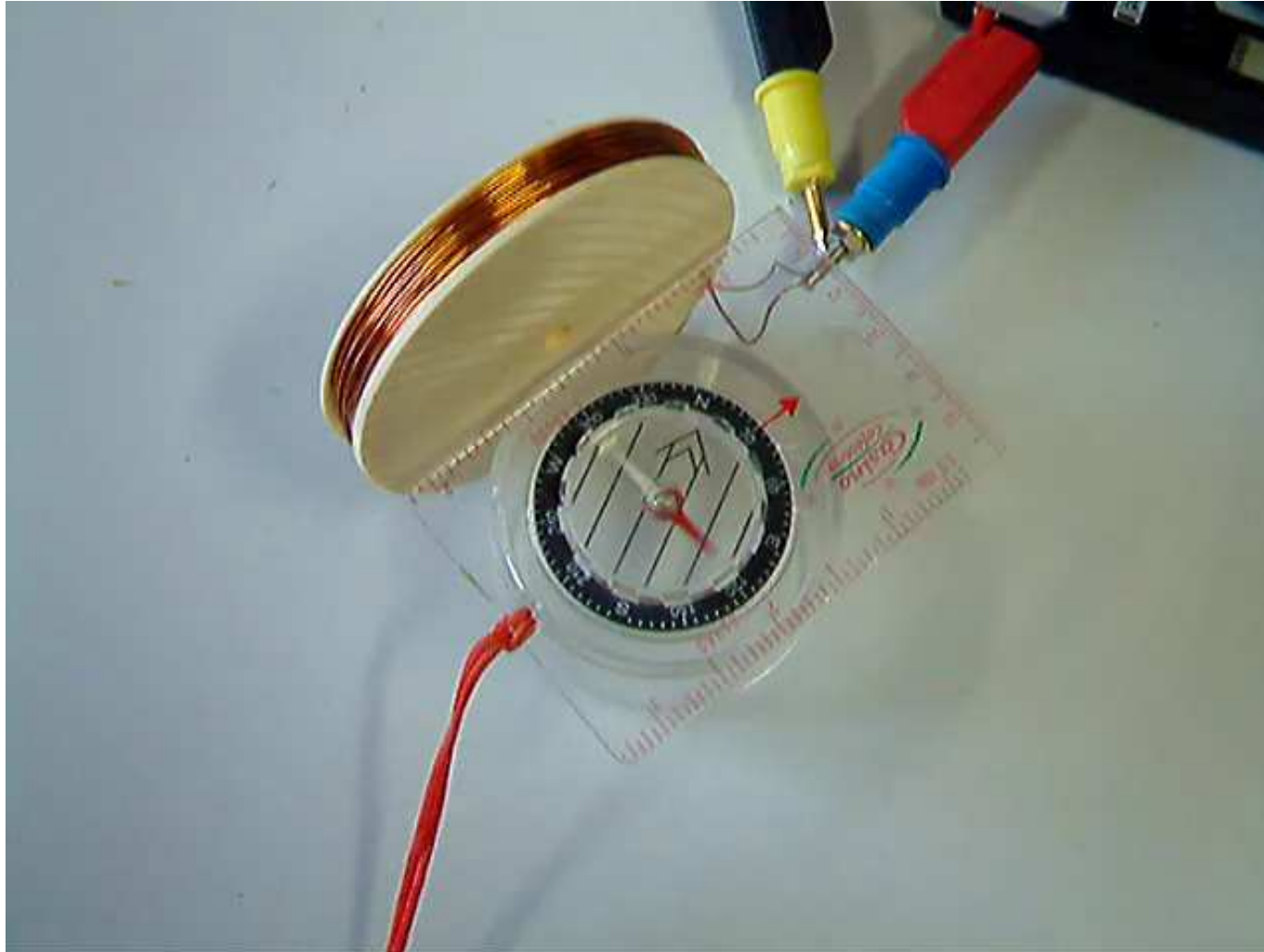
Théorème de Leblanc



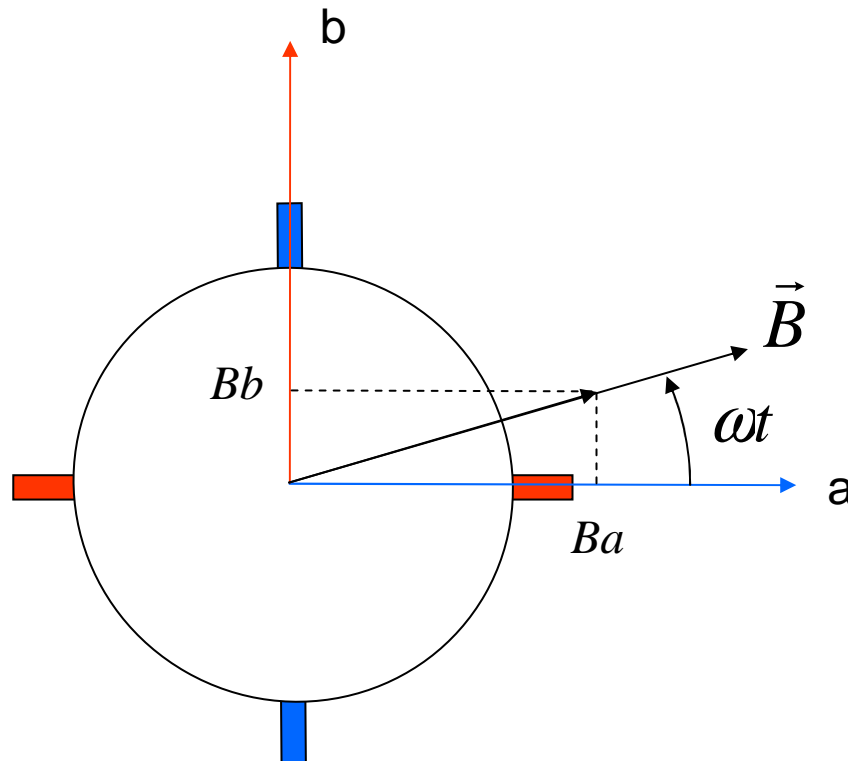
Un champ pulsant peut être décomposé en 2 champs tournant en sens contraires.

Champ créé par une phase

- Théorème de Leblanc



Champ tournant créé par 2 phases



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

$$Ib = I\sqrt{2}.\sin(\omega t)$$



$$Ba = \alpha.I\sqrt{2}.\cos(\omega t)$$

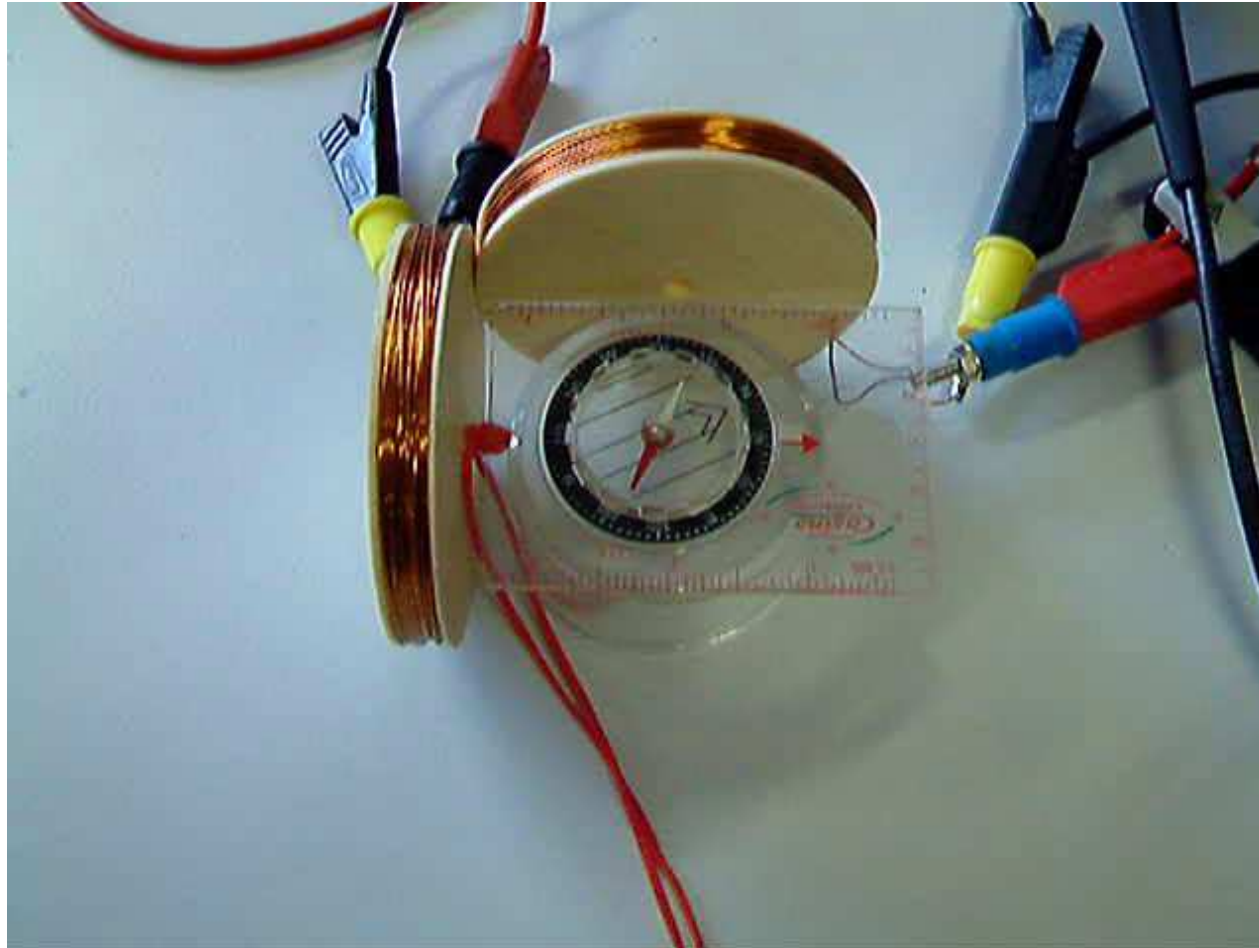
$$Bb = \alpha.I\sqrt{2}.\sin(\omega t)$$

$$\vec{B} = Ba.\vec{a} + Bb.\vec{b}$$

$$= (Ba + j.Bb).\vec{a}$$

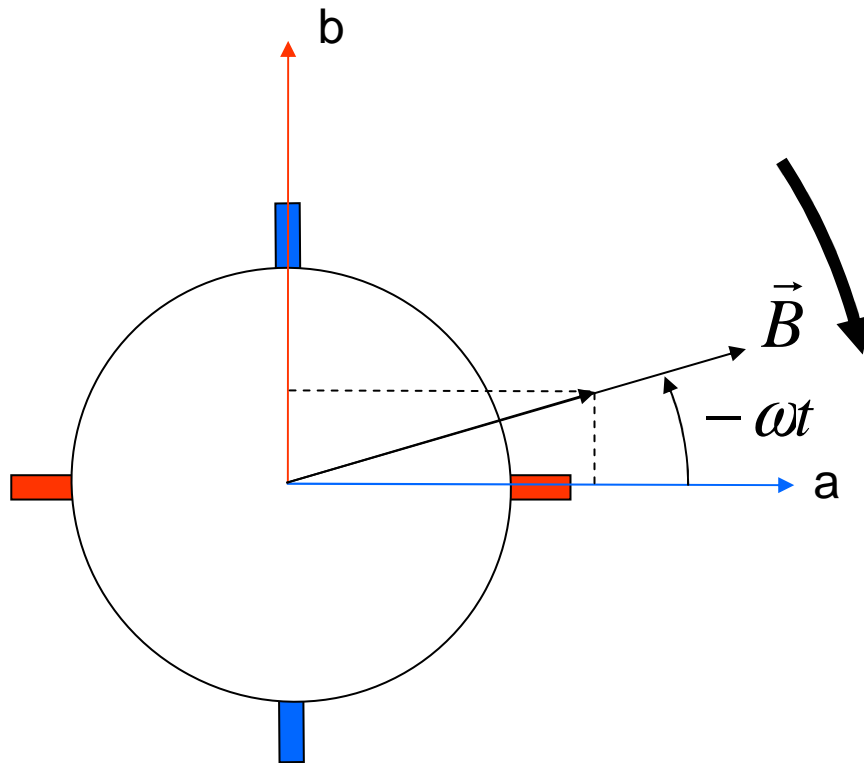
$$= \alpha.I\sqrt{2}.e^{j\omega t}.\vec{a}$$

Champ tournant créé deux bobines



Champ tournant créé par 2 phases

- Inversion du sens de rotation



$$I_a = I\sqrt{2}.\cos(-\omega t)$$

$$I_b = I\sqrt{2}.\sin(-\omega t)$$



$$I_a = \alpha.I\sqrt{2}.\cos(\omega t)$$

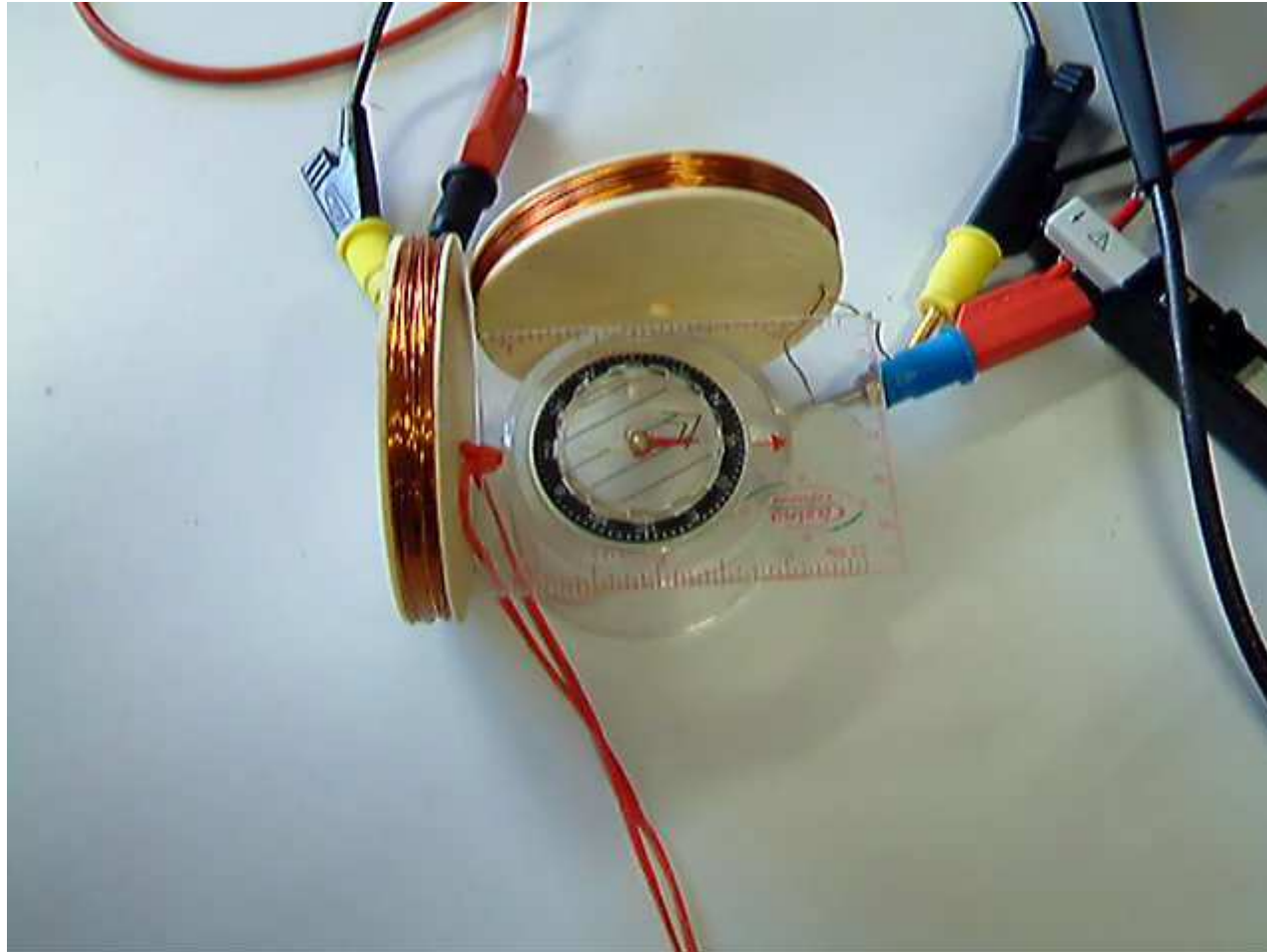
$$I_b = -\alpha.I\sqrt{2}.\sin(\omega t)$$



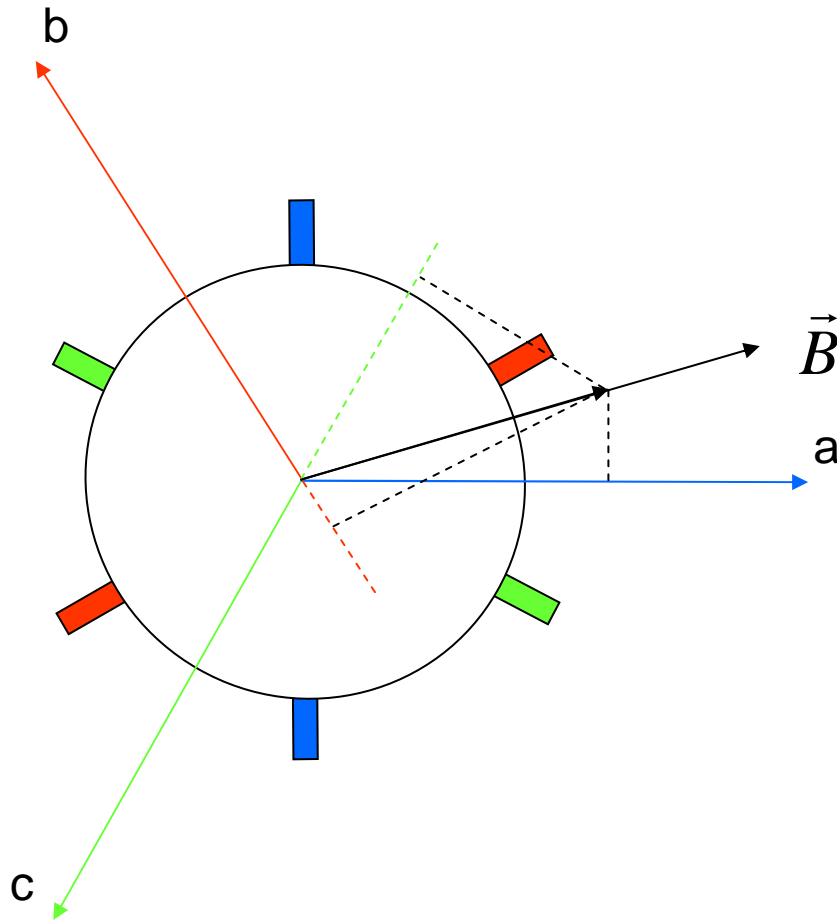
Inversion du courant dans une phase

Champ tournant créé 2 phases

- Inversion du sens de rotation



Champ tournant créé par 3 phases

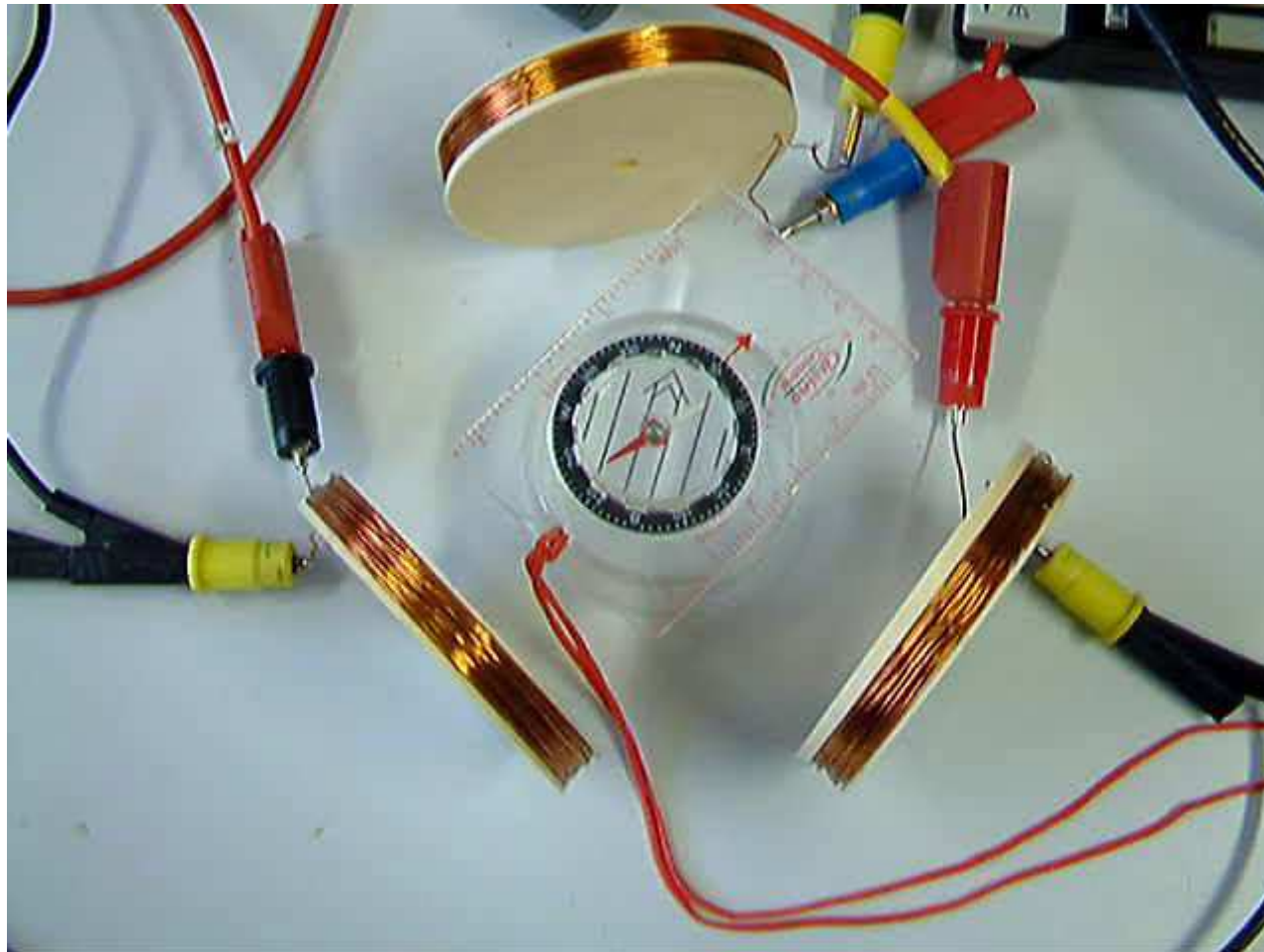


$$I_a = I\sqrt{2}.\cos(\omega t)$$

$$I_b = I\sqrt{2}.\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

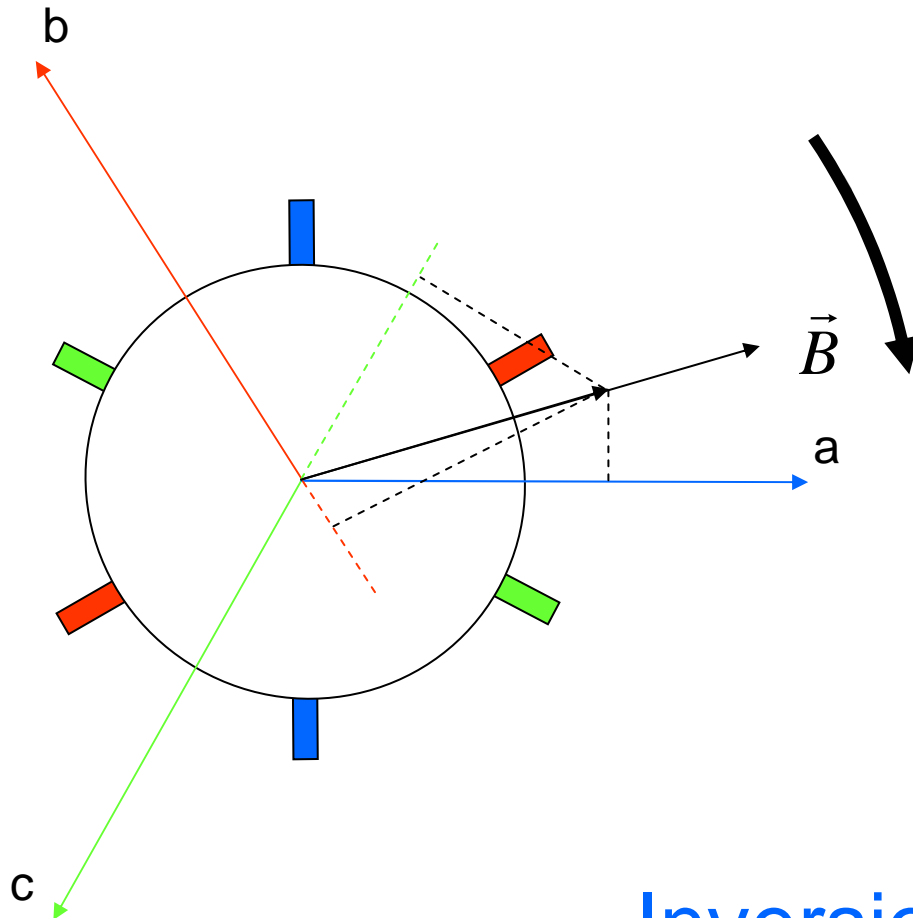
$$I_c = I\sqrt{2}.\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

Champ tournant créé trois par 3 phases



Champ tournant créé par 3 phases

- Inversion du sens de rotation



$$\omega t \Rightarrow -\omega t$$

$$I_a = I\sqrt{2}.\cos(-\omega t)$$

$$I_b = I\sqrt{2}.\cos(-\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$I_c = I\sqrt{2}.\cos(-\omega t + \frac{2\pi}{3})$$



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

$$I_b = I\sqrt{2}.\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

$$I_c = I\sqrt{2}.\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$



Inversion de deux phases

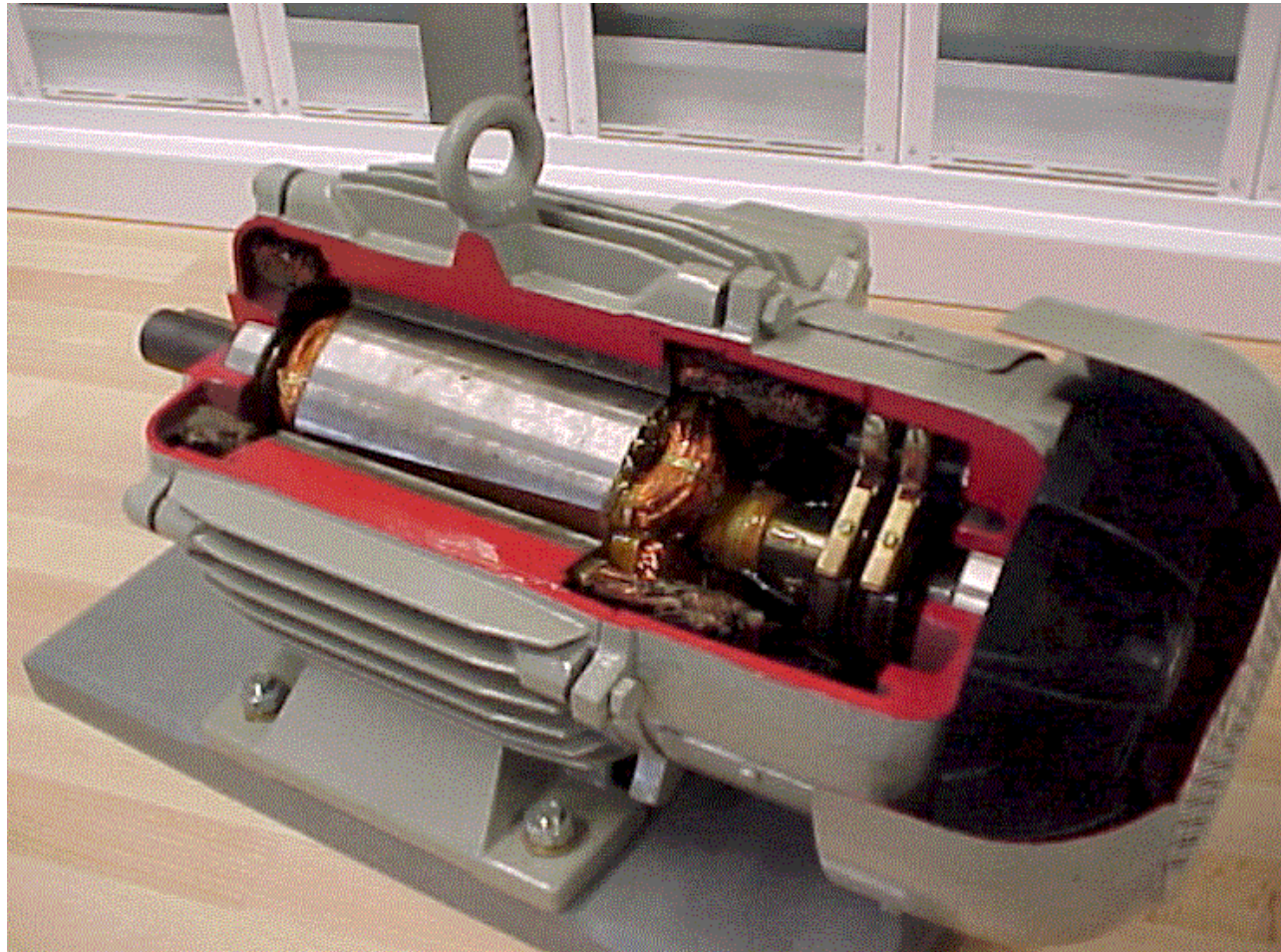
Champ tournant créé par 3 phases

- Inversion du sens de rotation

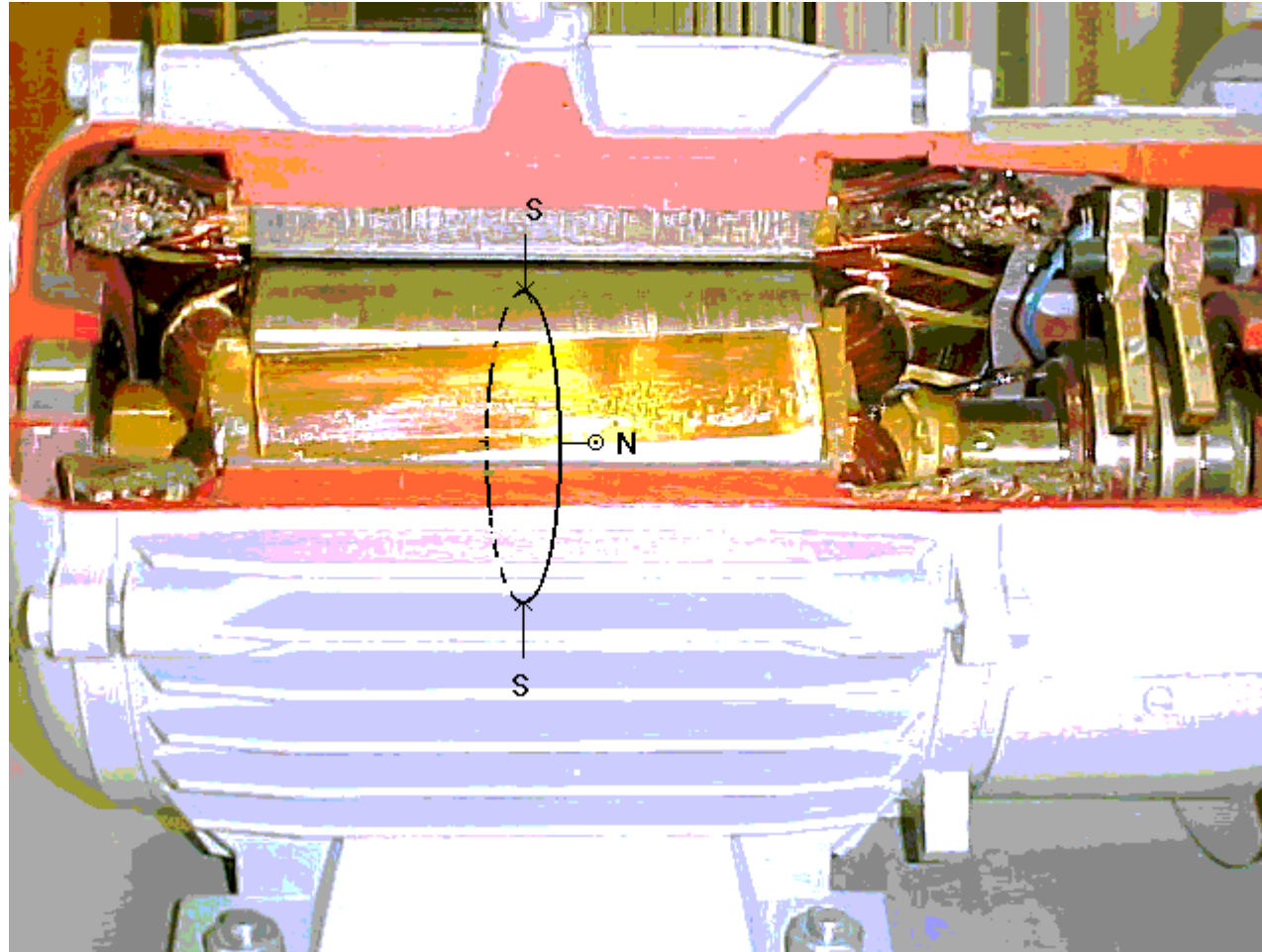


Inversion de deux phases

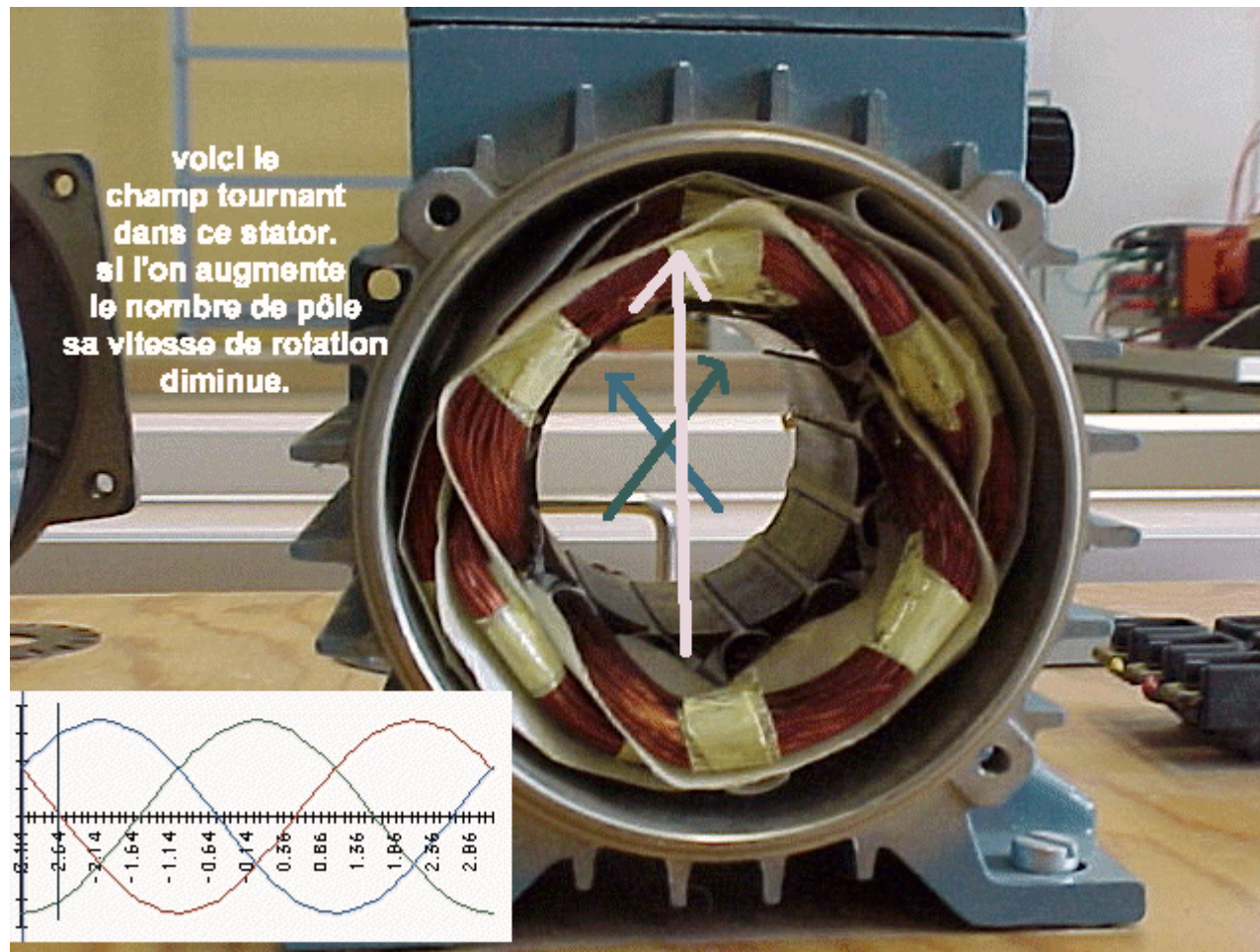
Machine réelle



Boussole => Rotor



Bobines => Stator

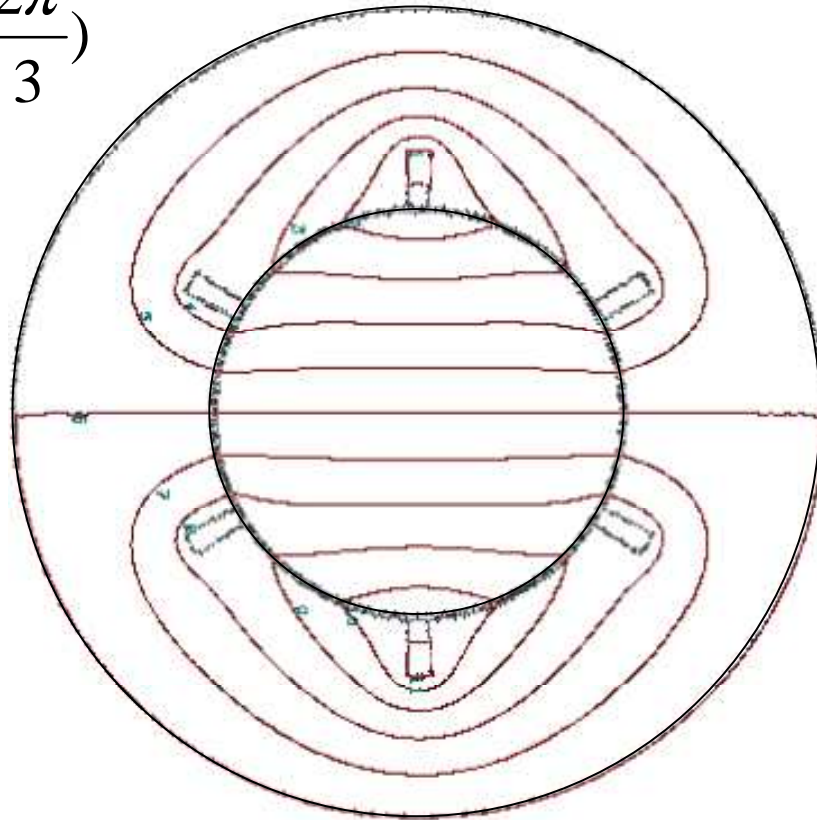


Champ tournant à l'intérieur d'une machine

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

$$I_b = I\sqrt{2}.\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

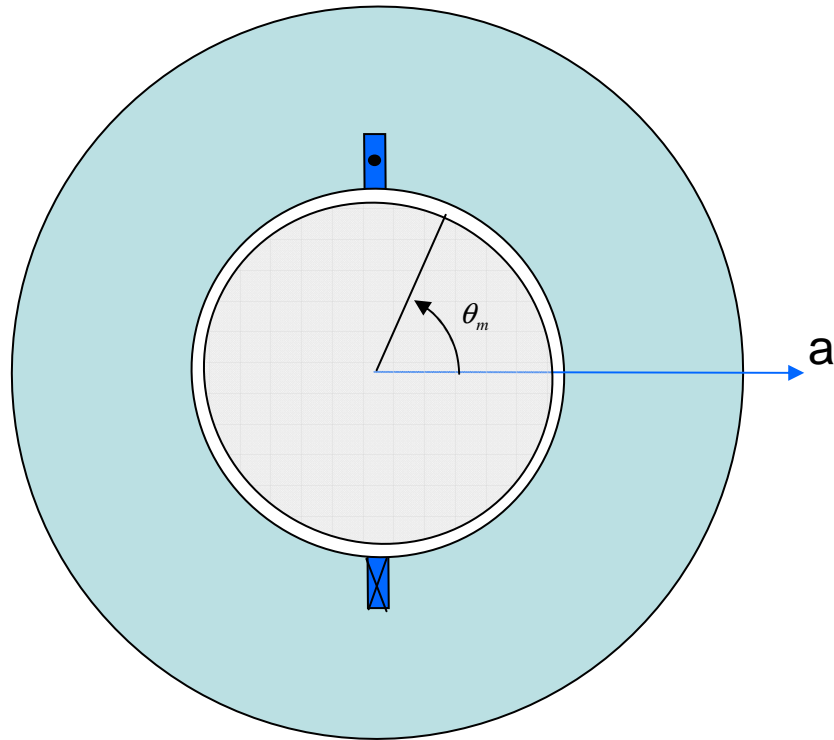
$$I_c = I\sqrt{2}.\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$



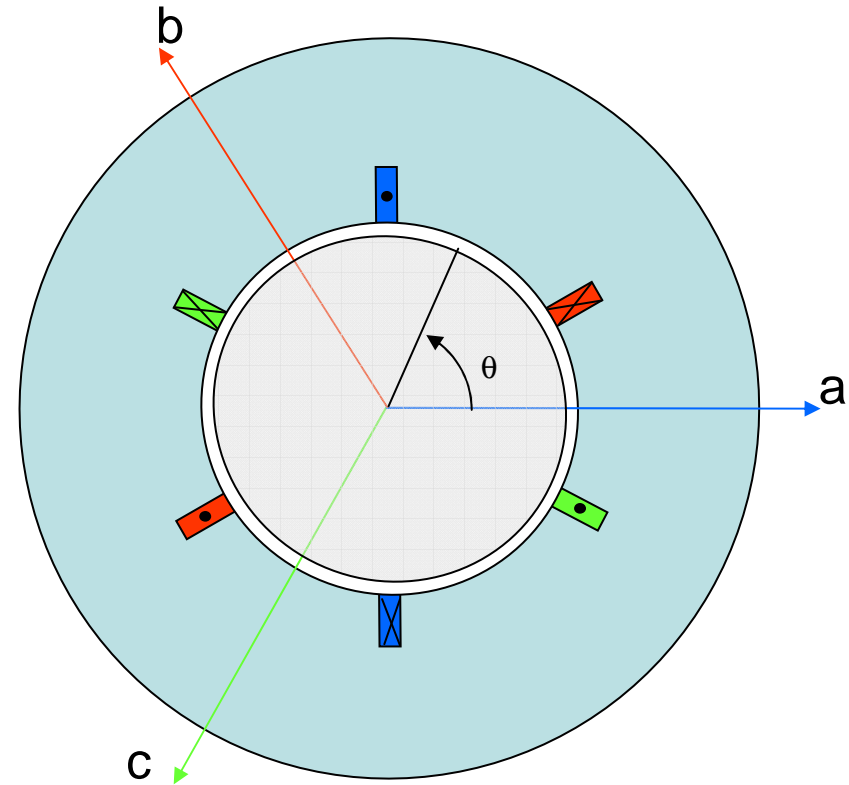
Calcul des forces magnétomotrices :

Calcul du champ créé dans l'entrefer :

1) On calcul le champ créé par une phase

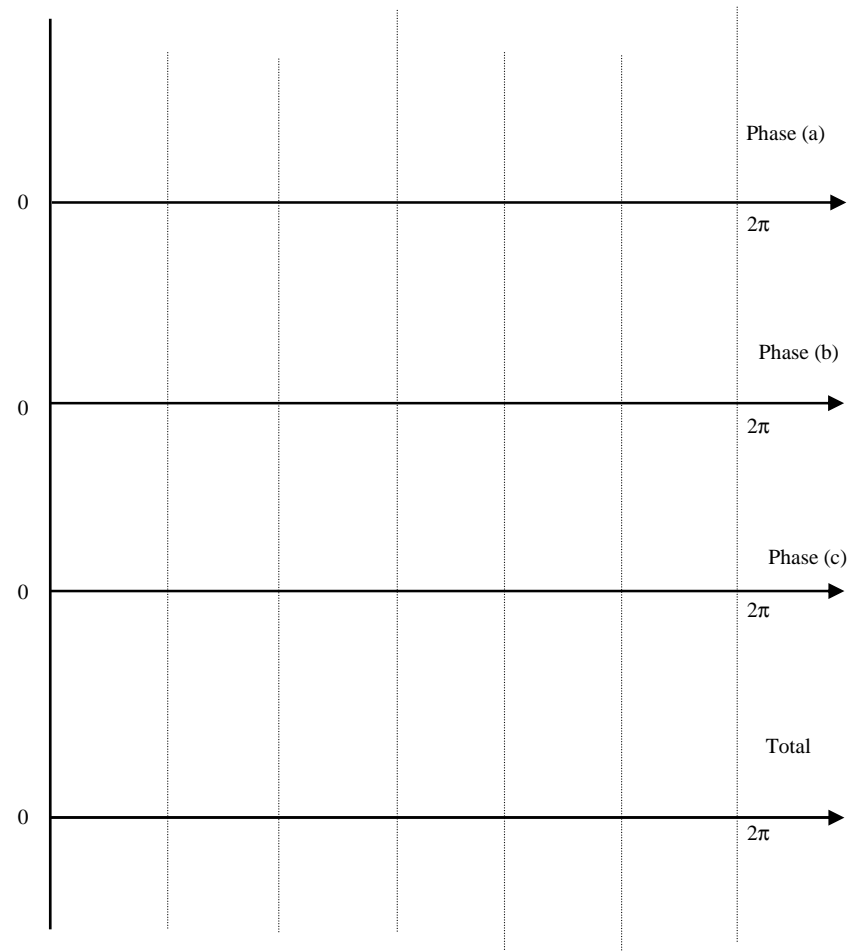


2) On superpose le Champ créé par les 3 phases



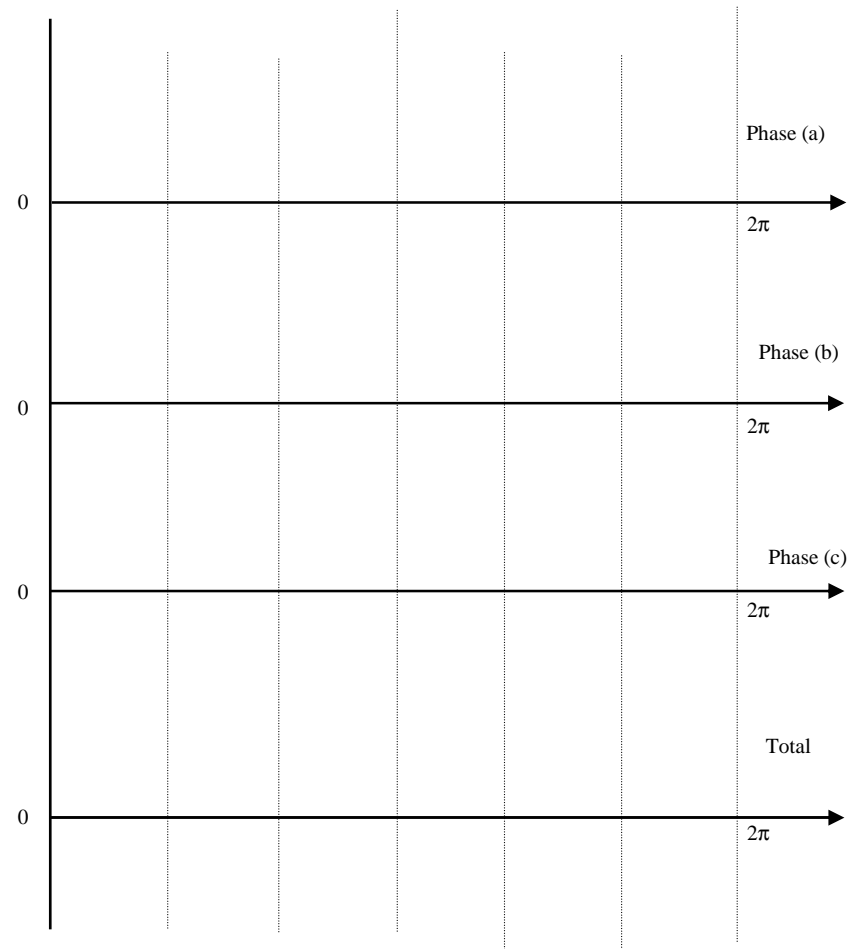
Champ tournant :

Champ créé dans l'entrefer à $t = 0$:



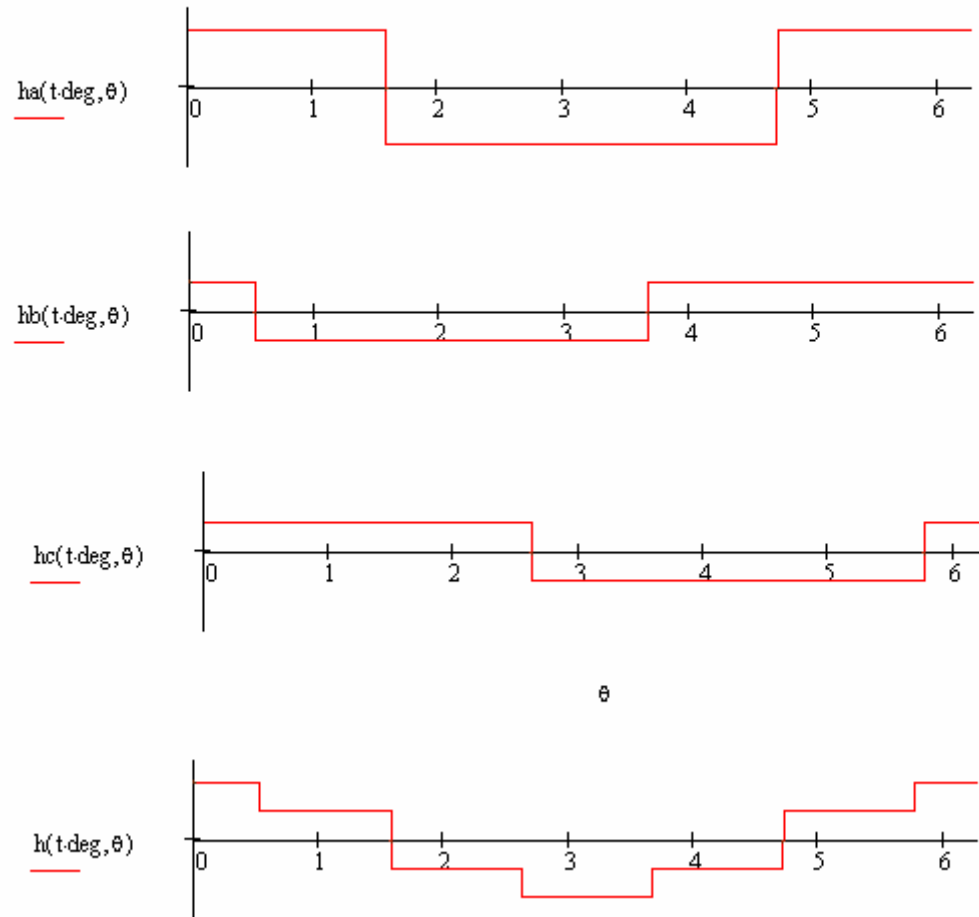
Champ tournant :

Champ créé dans l'entrefer à $\omega t = \pi/2$:

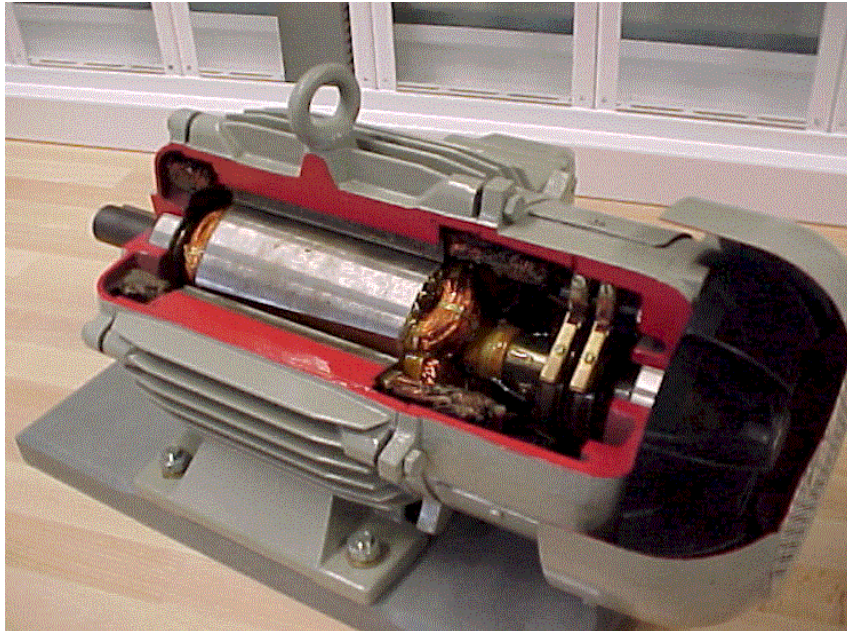


Champ tournant : *Champ créé dans l'entrefer*

$$t := \frac{\text{FRAME} \cdot 10}{\omega} \cdot s$$



Stator d'une machine triphasée



Machine synchrone

Lorsque le champ tournant statorique entraîne le rotor, il lui fournit de l'énergie
=> moteur

Lorsque le stator récupère l'énergie du rotor => générateur

Le stator d'une machine synchrone est identique à celui d'une machine asynchrone. Il permet de créer le champ tournant statorique.

Machine asynchrone



Constitution d'un stator :



Circuit magnétique

Le circuit magnétique permet de canaliser le flux et de concentrer l'énergie magnétique au sein de l'entrefer.
Il est généralement constitué d'un empilage de tôles en fer silicium.

Le bobinage voit une variation de flux magnétique due à la rotation du rotor et aux courants qui parcourent le stator.

Bobinage



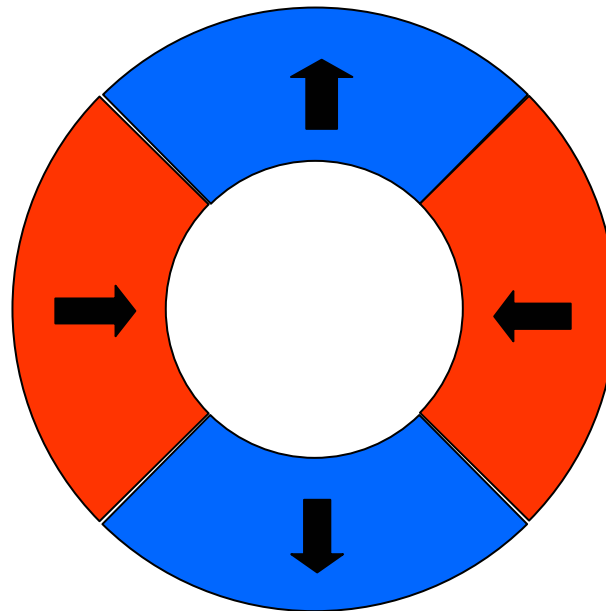
Définitions :

- **Force électromotrice (FEM)** : tension induite aux bornes d'une bobine statorique lorsque le moteur fonctionne à vide (courants statoriques nuls). Cette tension est due à la variation de flux créée par le rotor dans la bobine.
- **Inductance propre** : Inductance propre d'une phase. Inductance créée par le flux d'une phase sur cette même phase. Inductance obtenue en pratique quand les autres phases ne sont pas alimentées. Cette inductance est peu utilisée car en pratique, une phase voit à la fois son propre flux et celui des autres phases.
- **Inductance cyclique** : Inductance d'une phase due à son propre flux et au flux des autres phases. C'est cette inductance qui est généralement employée.
- **Résistance statorique** : Résistance d'une phase du stator. Dans les machines « conventionnelles » cette résistance est généralement faible devant l'impédance de l'inductance cyclique.

Nombre de paires de pôles :

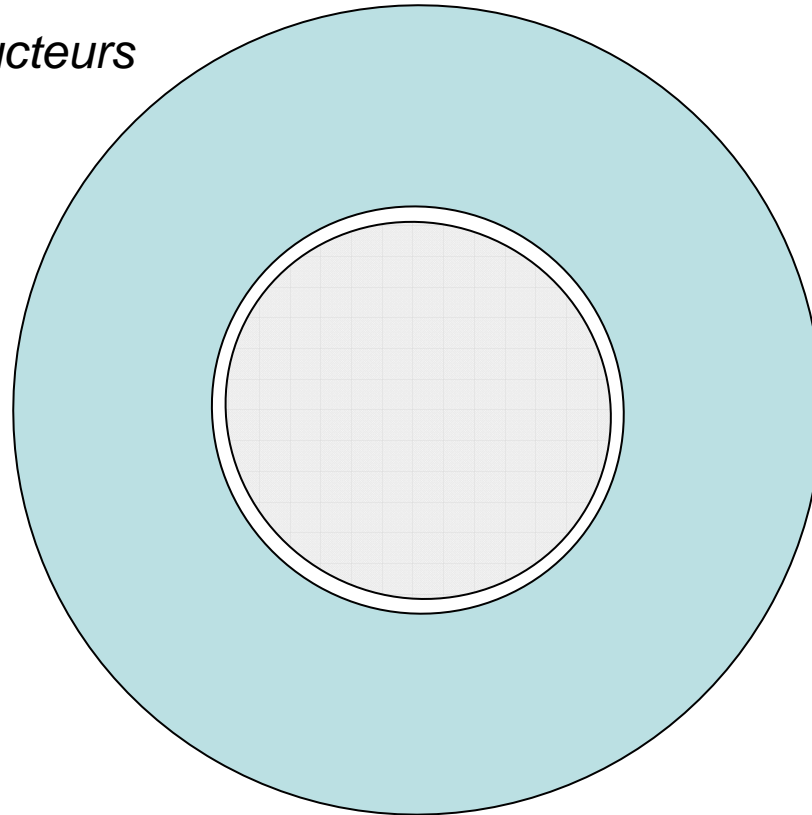
Le champ créé par le rotor ou par le stator peut contenir plus d'une paire de pôles.

Exemple : *rotor à 2 paires de pôles* => Tracer les lignes de champ



Exemple : Stator créant un champ tournant à deux paires de pôles

=> Placer les conducteurs



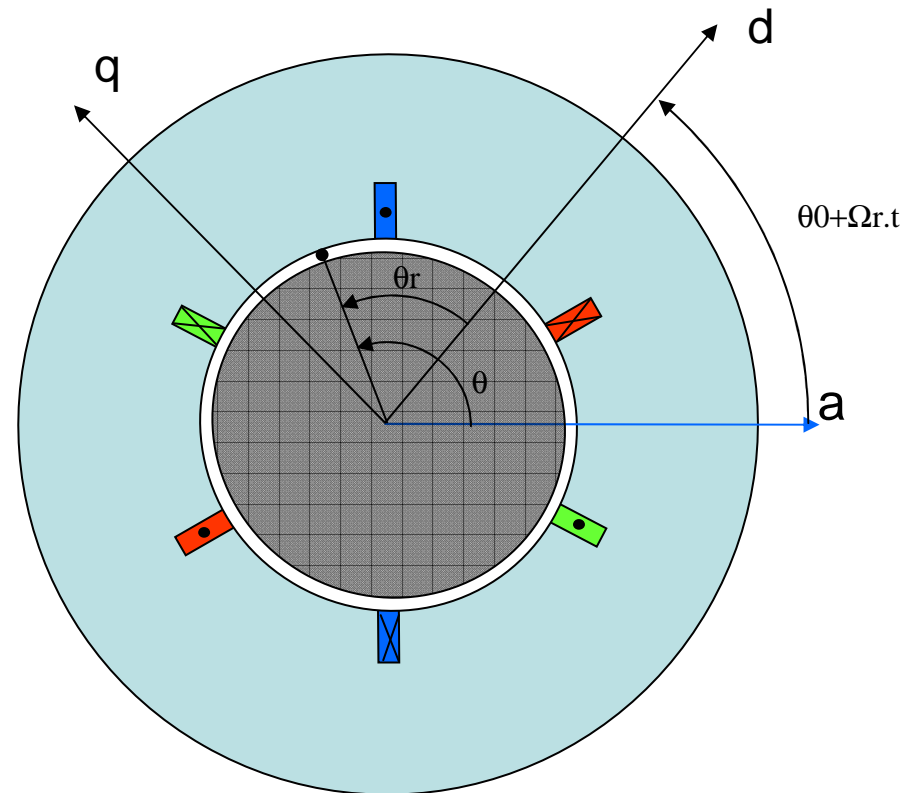
Attention : en une période, le champ se déplace d'une paire de pôles. Si le stator créé p paires de pôles, il faut donc p périodes pour que le champ effectue un tour.

$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

II Couple d'une machine tournante

Hypothèses :

- Machines à entrefer lisse (entrefer e constant)
- Champs dans l'entrefer considérés à répartitions sinusoïdales
- Longueur l



Calcul du couple d'une machine tournante

couple d'une machine tournante

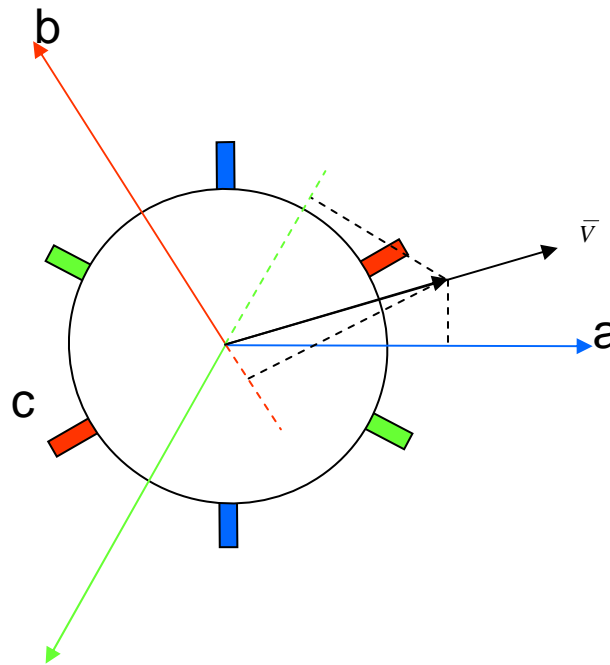
Exemple maquette

III Vecteur tournant

Le vecteur tournant \bar{V} est défini par :

$$\bar{V}(t) = k.(Va(t) + a.Vb(t) + a^2.Vc(t))$$

avec : $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$



Vecteur tournant

Propriétés du vecteur tournant :

Puissance

$$\bar{p}(t) = \bar{v}(t) \cdot \bar{i}(t)^*$$
$$p(t) = 3 \cdot \text{Re}(\bar{p}(t)) \quad \text{pour} \quad k = \frac{\sqrt{2}}{3}$$

En régime sinusoïdal pour $k = \frac{\sqrt{2}}{3}$

$$\bar{V} = V \cdot e^{j\omega t} \quad \bar{I} = I \cdot e^{j(\omega t - \varphi)}$$

$$\bar{P} = \bar{V} \cdot \bar{I}^*$$

$$P = 3 \cdot \text{Re}(\bar{P})$$

$$Q = 3 \cdot \text{Im}(\bar{P})$$

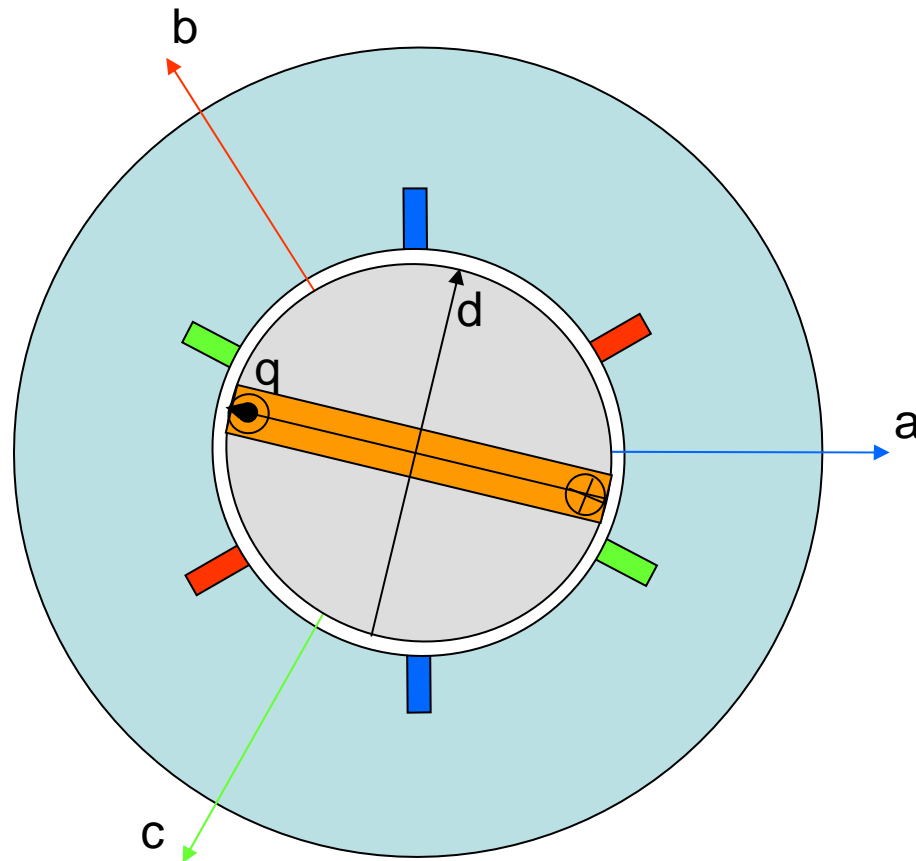
Machine synchrone

Principe : Un rotor aimanté tourne dans un champ tournant créé par un stator.

- Le rotor peut être aimanté par des aimants (machine à aimants permanents) ou par un courant continu (machine à excitation).
- La force électromotrice dépend de l'aimantation du rotor, de la vitesse de rotation de la machine et du nombre de spire d'une phase.
- Le couple dépend de l'intensité du champ magnétique statorique, de l'aimantation du rotor et de l'angle entre l'aimantation du rotor et le champ statorique.

Machine synchrone

Modèle



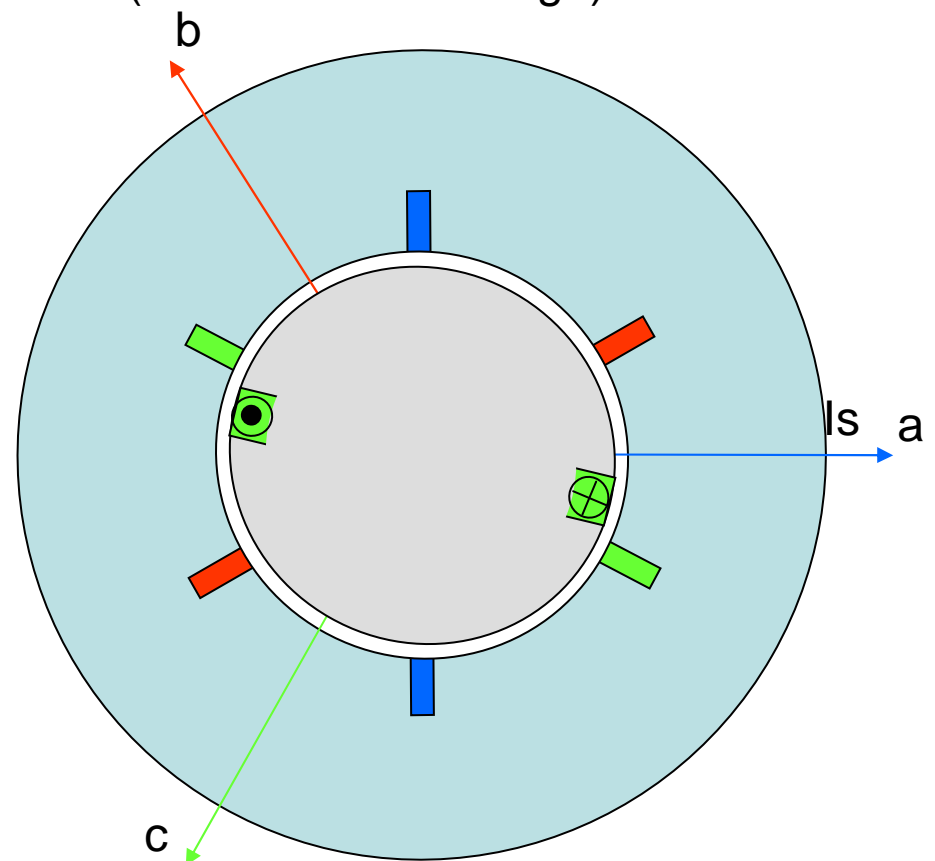
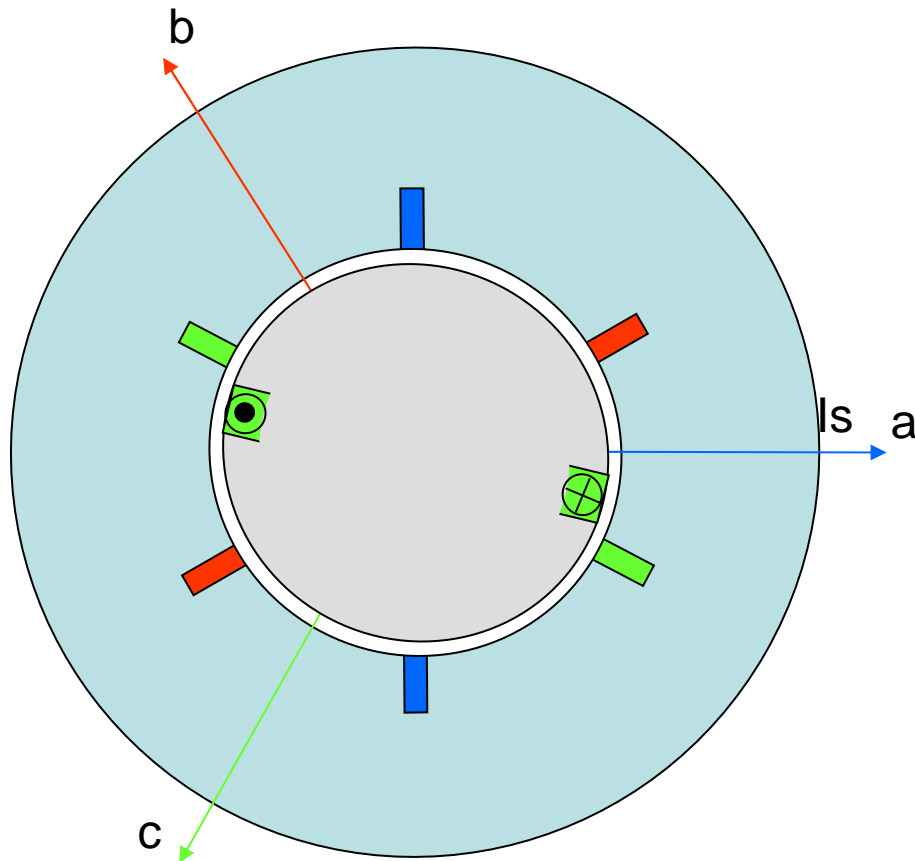
Modélisation vectorielle :

Modélisation vectorielle :

Machine synchrone

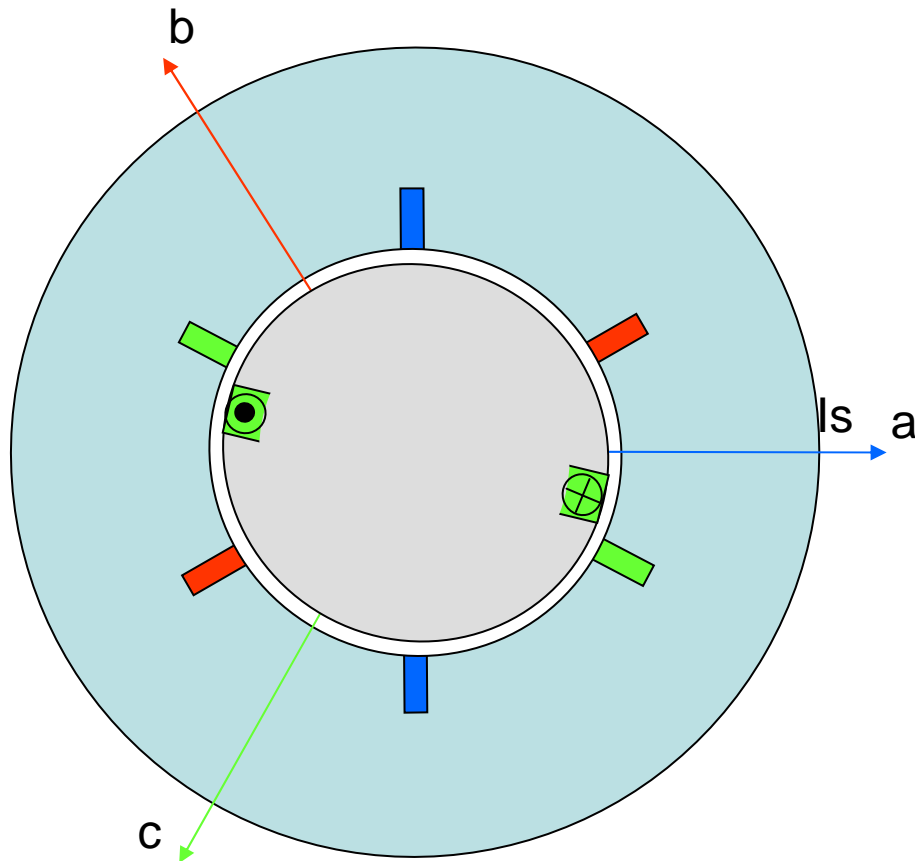
Tracer les axes d et q

Positionner le vecteur tournant I des courants statoriques pour obtenir un fonctionnement moteur (sens de rotation trigo)

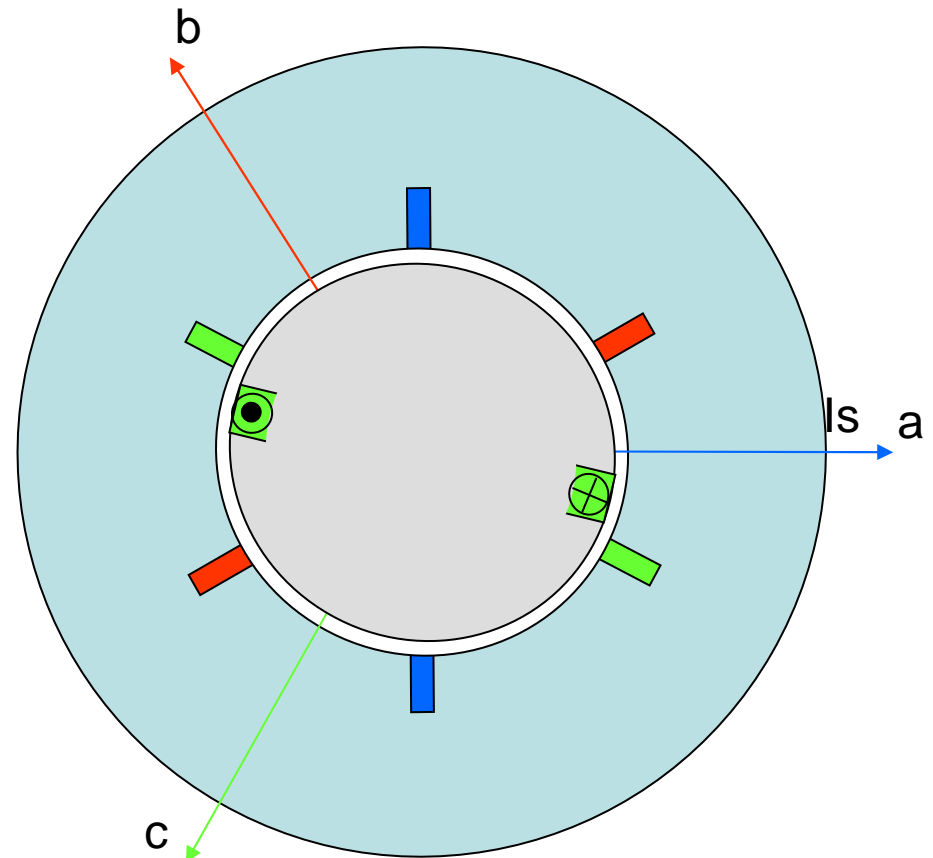


Machine synchrone

Positionner le vecteur tournant E de la force électromotrice

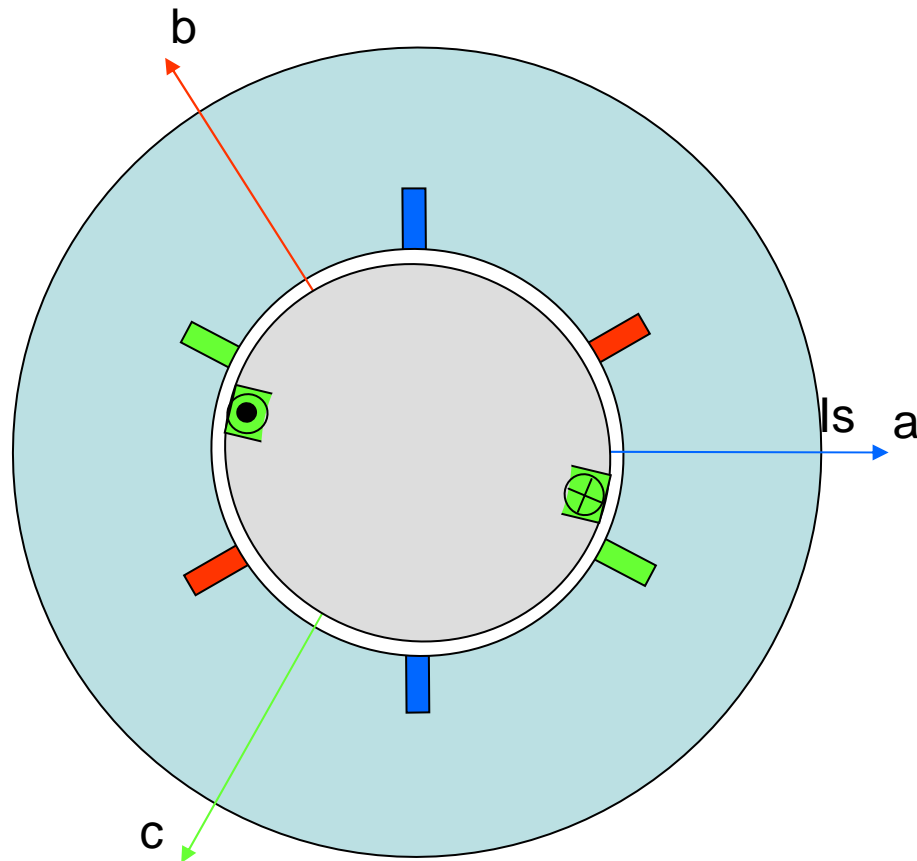


Tracer le diagramme de Ben Eschenburg pour en déduire la tension V au bornes d'une phase

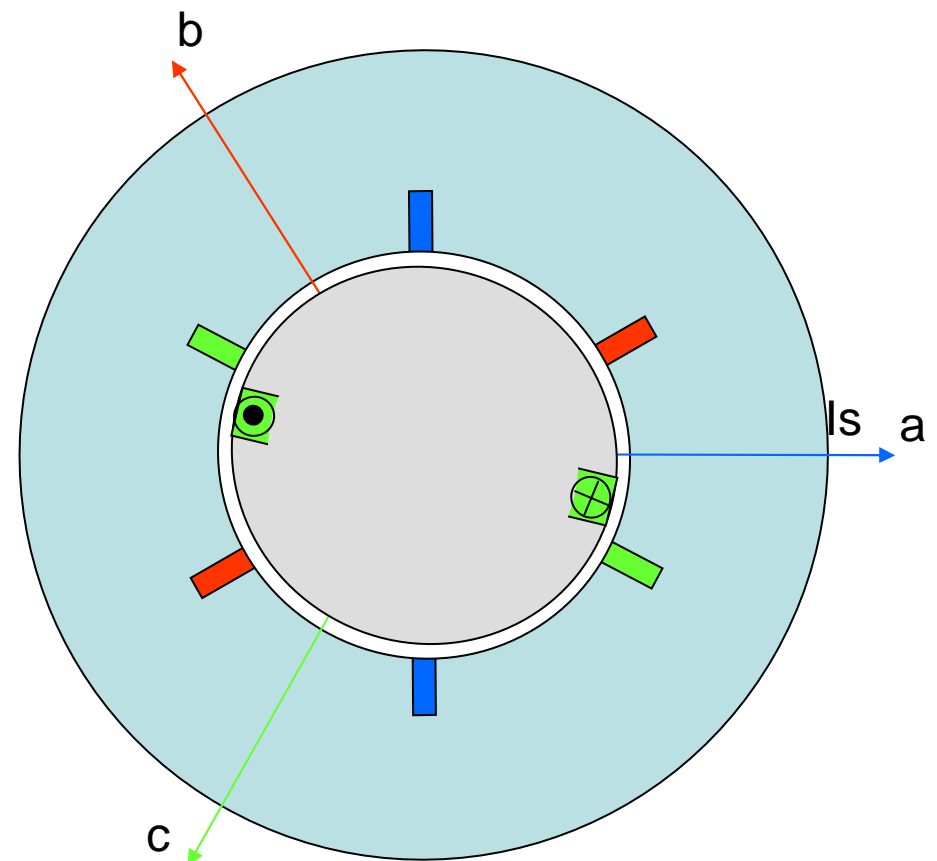


Machine synchrone

Idem à couple maximum
(tout sur la même figure)



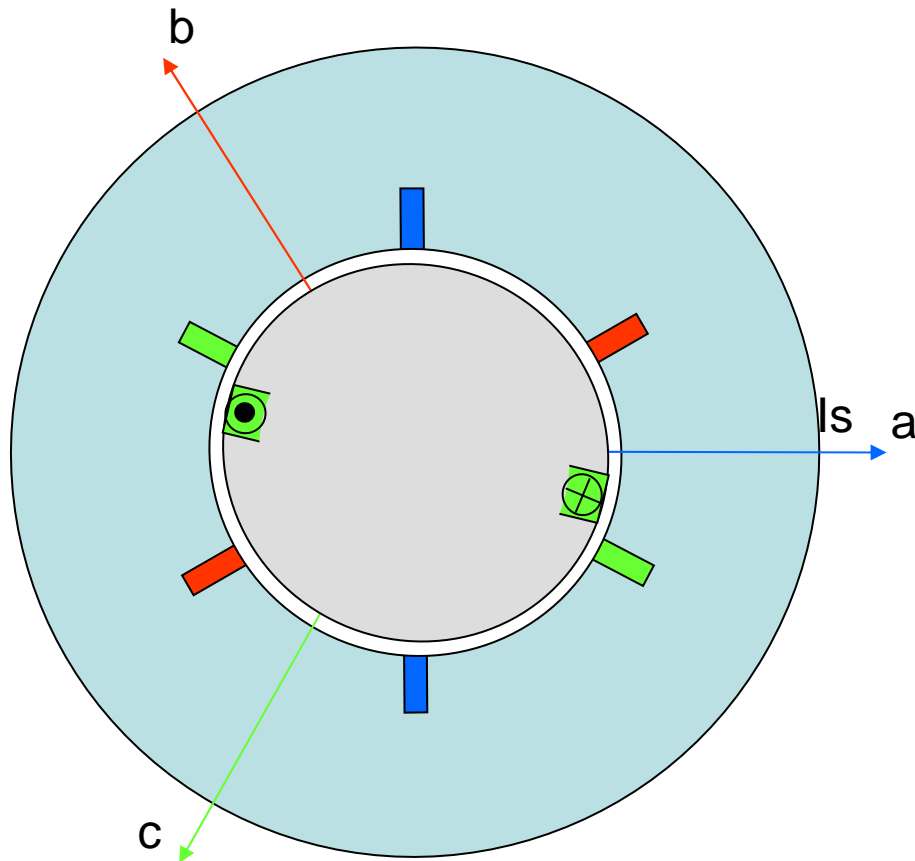
Idem, sens de rotation horaire



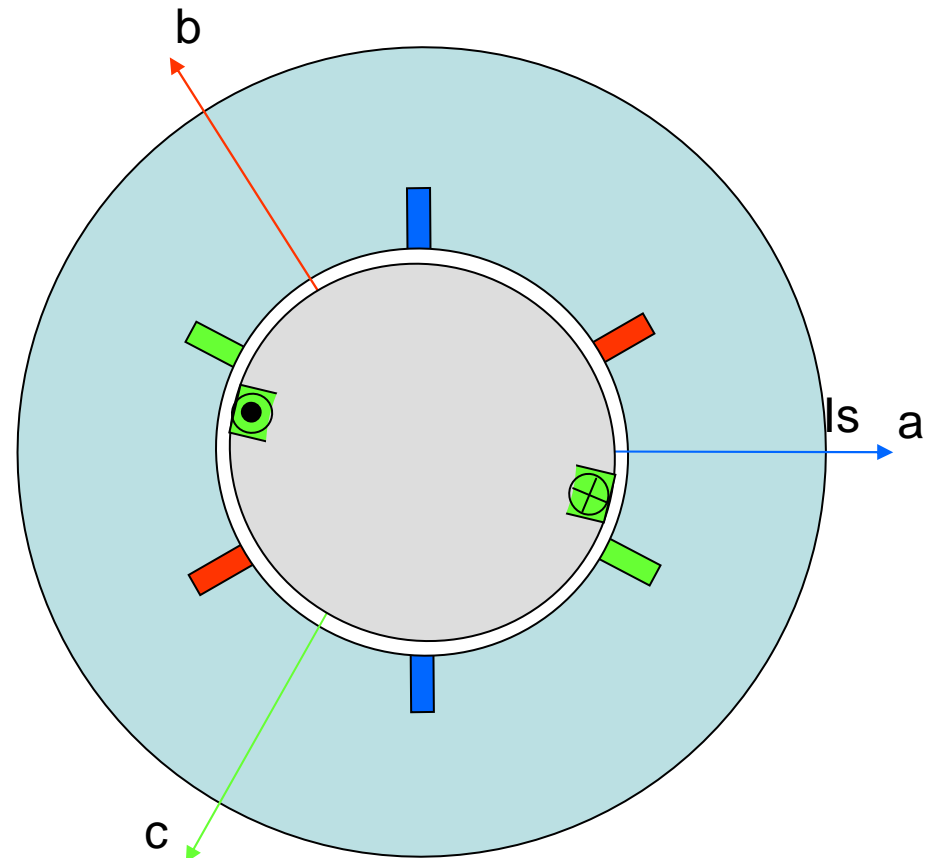
(machine autopilotée, moteur brushless)

Machine synchrone

Générateur, à couple quelconque, rotation en sens trigo
(tout sur la même figure)

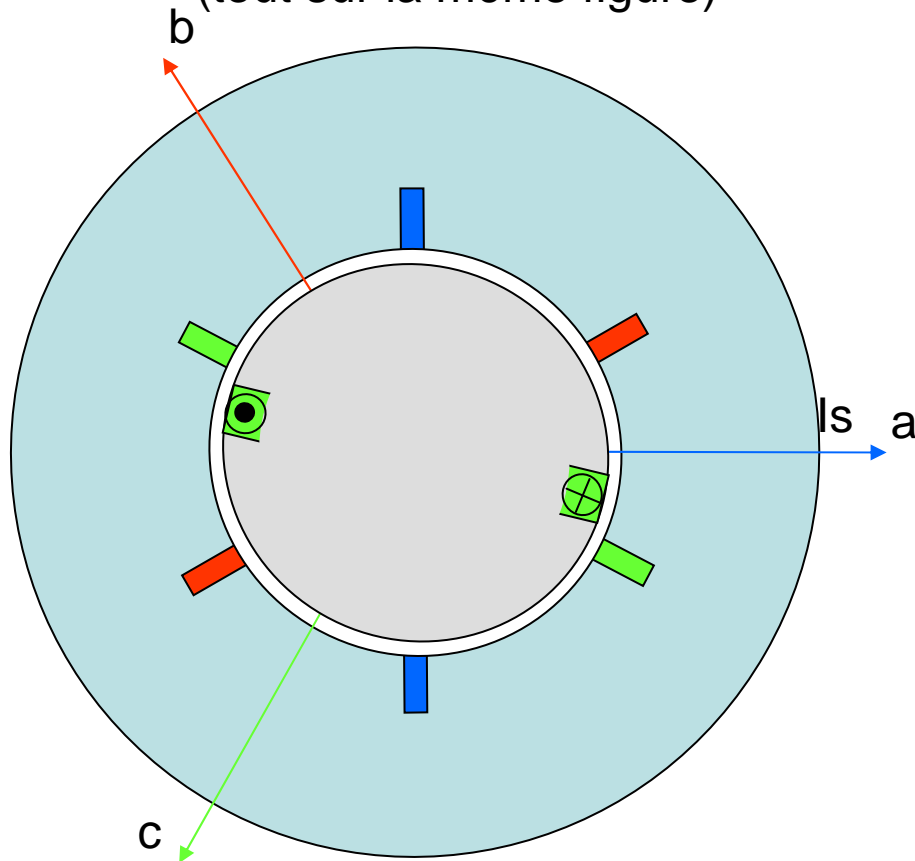


Idem, sens de rotation horaire

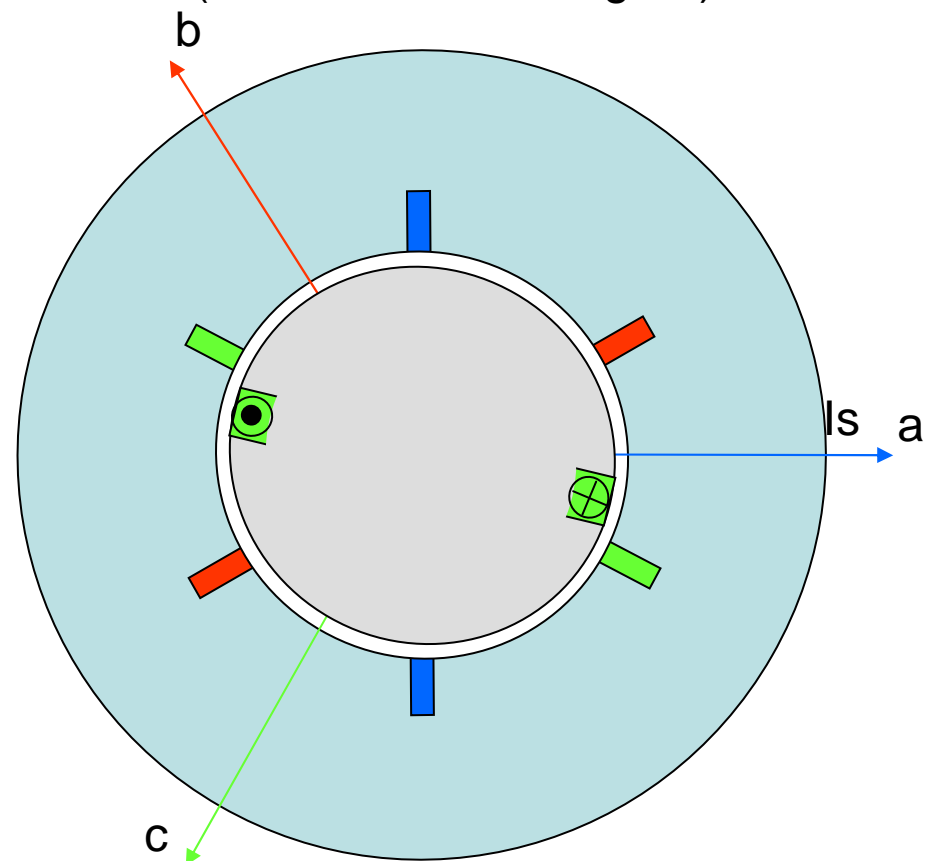


Machine synchrone

Idem à couple nul
et fonctionnement inductif
(tout sur la même figure)



Idem à couple nul
et fonctionnement capacitif
(tout sur la même figure)



=> Compensateur synchrone

Machine asynchrone

Introduction :

Vidéos des principes physiques

Ejection d'une pièce par courants induits

Plaque d'aluminium (non magnétique)

Extraction de la plaque d'un électroaimant 1

Extraction de la plaque d'un électroaimant 2

Lévitacion de la plaque

Freinage d'un disque par courants induits

Entraînement d'un rotor par courants induits

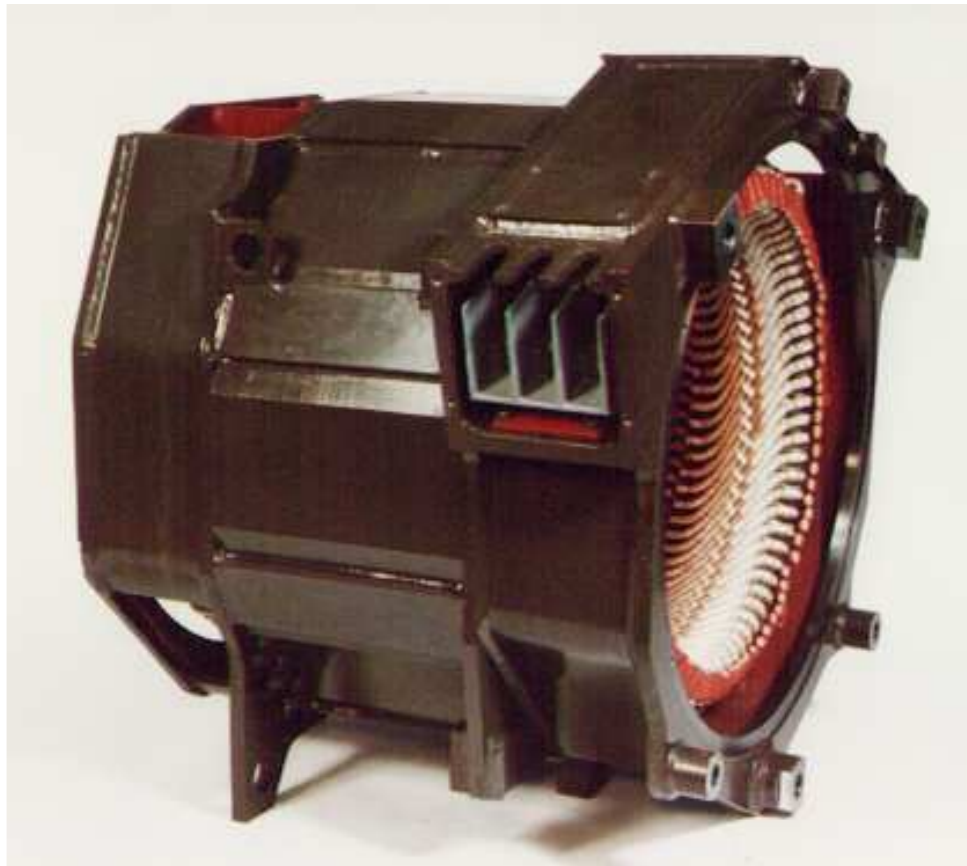
Machine asynchrone

Principe : le stator crée un champ tournant => le rotor voit une variation de flux => des courants sont induits au niveau du rotor => l'interaction de ces courants et du champ statorique crée un couple

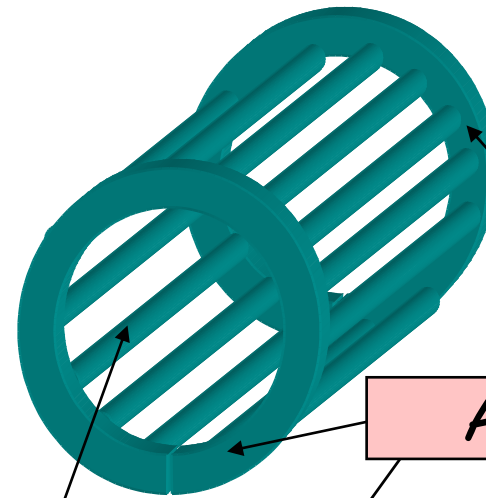
- Le rotor peut être bobiné (bobinage en court circuit) => machine à rotor bobiné.
- Le rotor peut être réalisé avec des conducteurs « massifs » => Rotor à cage
- Le couple dépend de l'intensité du champ magnétique statorique, du champ induit au rotor et de l'angle entre le champ induit au rotor et le champ statorique.

Constitution d'une machine asynchrone

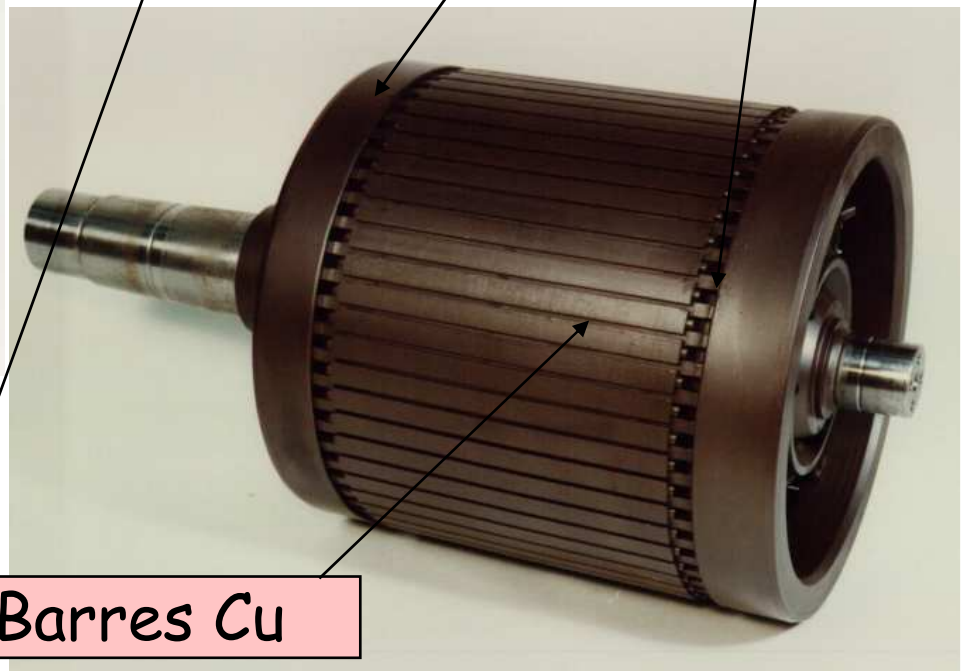
Rotor => courants induits



Stator => Champ tournant



Anneaux

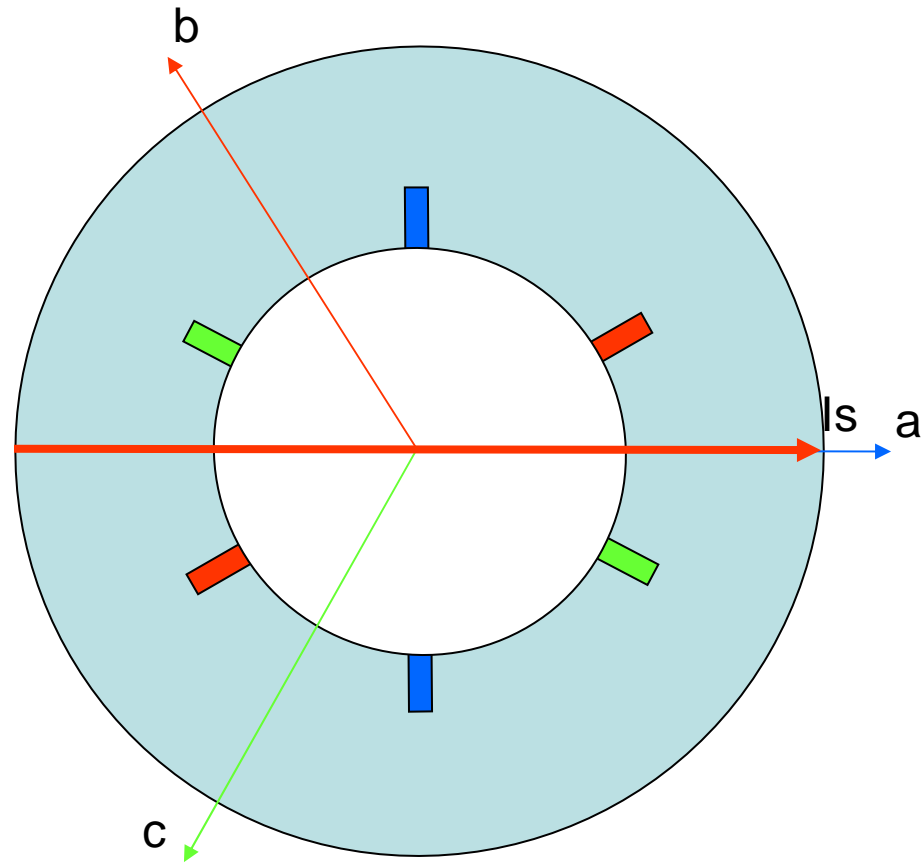


Barres Cu

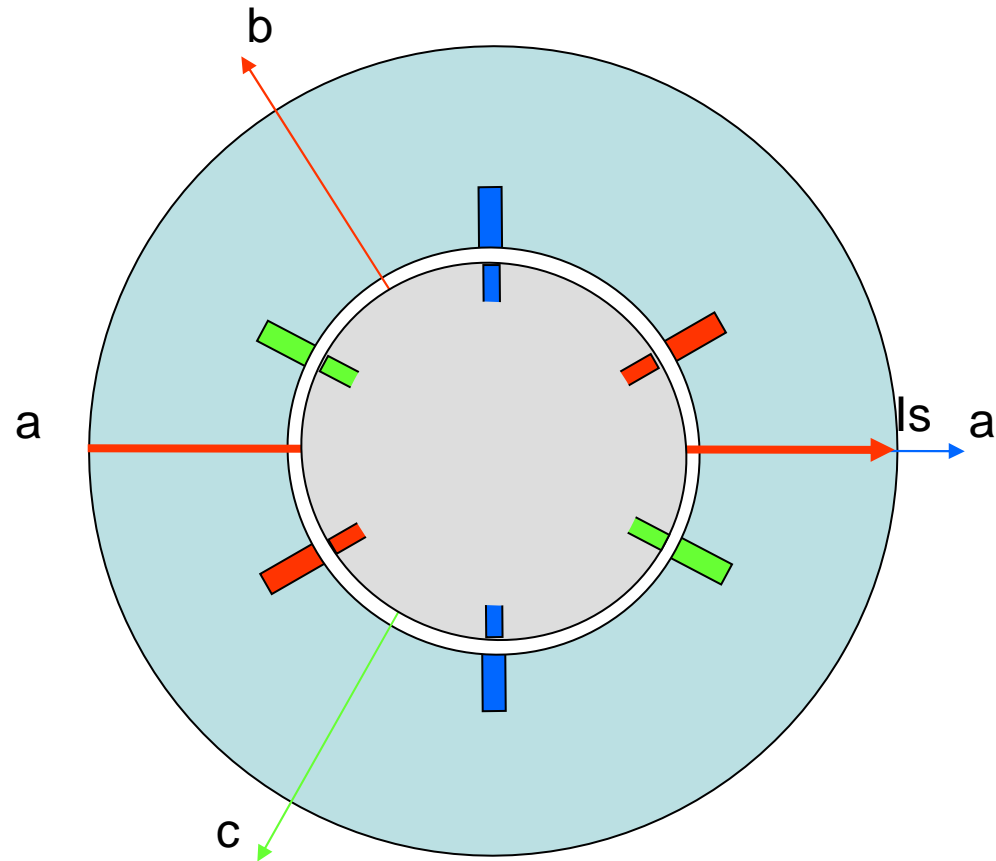
Coupe d'un rotor de machine asynchrone à cage



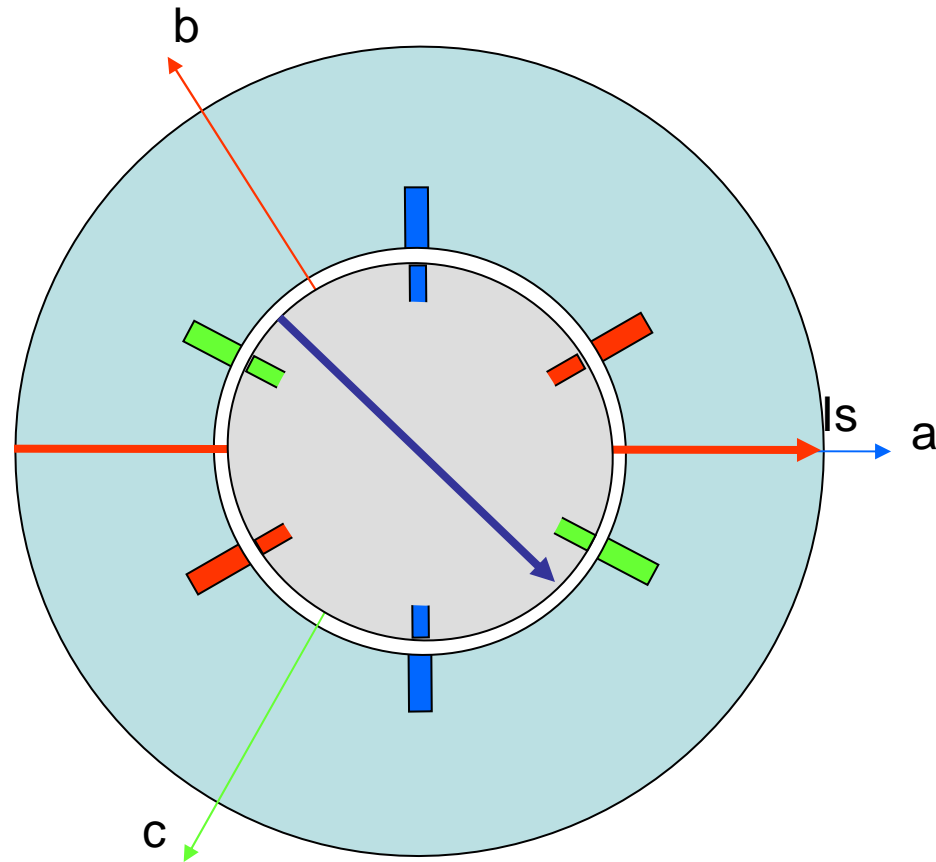
Machine asynchrone



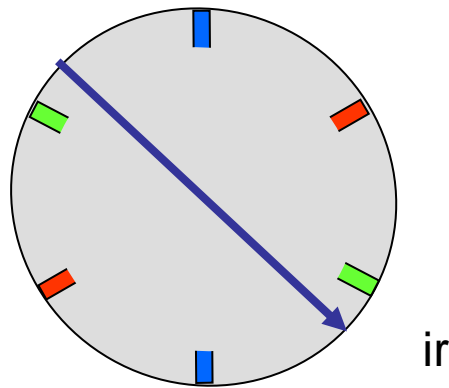
Machine asynchrone



Machine asynchrone

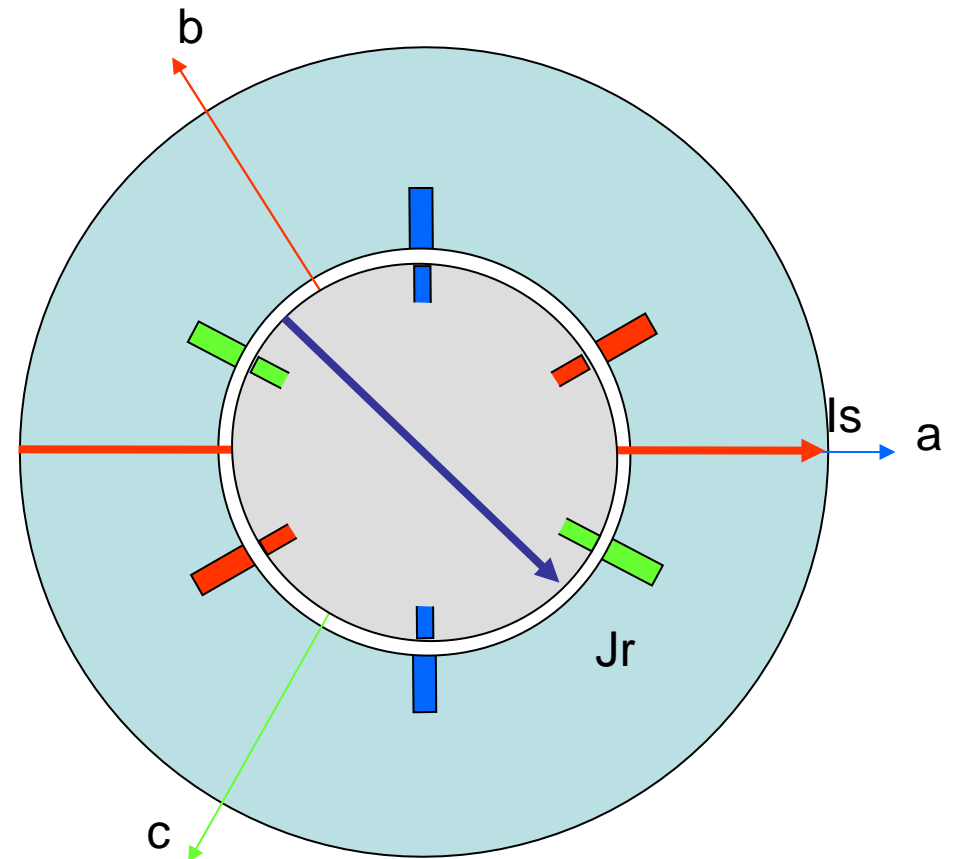


Machine asynchrone



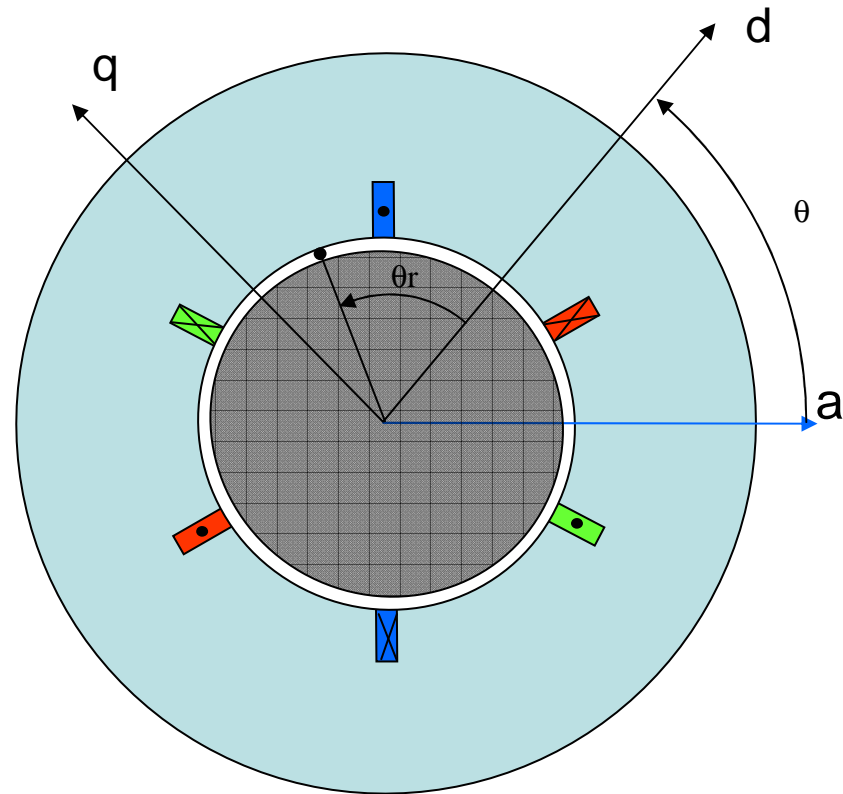
Le vecteur i_r correspond aux courants du rotor.

=> Ce vecteur tourne par rapport au repère du rotor.



Le vecteur J_r correspond au vecteur i_r exprimé dans le repère du stator

Conventions angulaires



Modélisation vectorielle d'une machine asynchrone

(A partir du cours de Robert Perret)

Hypothèses :

- Circuit magnétique non saturé.
- Pertes fer sont négligées.
- Machine de construction symétrique.
- Entrefer est considéré régulier.
- Champs à répartition sinusoïdale dans l'entrefer.

Dans le repère du stator, en utilisant le formalisme des vecteurs tournants :

$$S : \begin{cases} \bar{v}_S = R_S \bar{i}_S + \frac{d \bar{\varphi}_S}{dt} \\ \bar{\varphi}_S = L_S \bar{i}_S + M e^{j\theta} \bar{i}_R \\ 0 = R_R \bar{i}_R + \frac{d \bar{\varphi}_R}{dt} \\ \bar{\varphi}_R = M e^{-j\theta} \bar{i}_S + L_R \bar{i}_R \end{cases}$$

Equations de la machine symétrisées dans le repère statorique S

En posant :

$$\bar{j}_R = \bar{i}_R e^{j\theta} \quad \text{soit :} \quad \frac{d\bar{i}_R}{dt} = \frac{d\bar{j}_R}{dt} e^{-j\theta} - j \frac{d\theta}{dt} \bar{j}_R e^{-j\theta}$$

On obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{v}_S = R_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\varphi}_S}{dt} \\ \bar{\varphi}_S = L_S \bar{i}_S + M \bar{j}_R \\ 0 = R_R \bar{j}_R e^{-j\theta} + \frac{d\bar{\varphi}_R}{dt} \\ \bar{\varphi}_R = L_R \bar{j}_R e^{-j\theta} + M \bar{i}_S e^{-j\theta} \end{array} \right.$$

Equations de la machine symétrisées dans le repère statorique S

En posant :

$$\bar{\psi}_R = \bar{\varphi}_R e^{j\theta} \quad \text{soit :} \quad \frac{d\bar{\varphi}_R}{dt} = \left[\frac{d\bar{\psi}_R}{dt} - j \frac{d\theta}{dt} \bar{\psi}_R \right] e^{-j\theta}$$

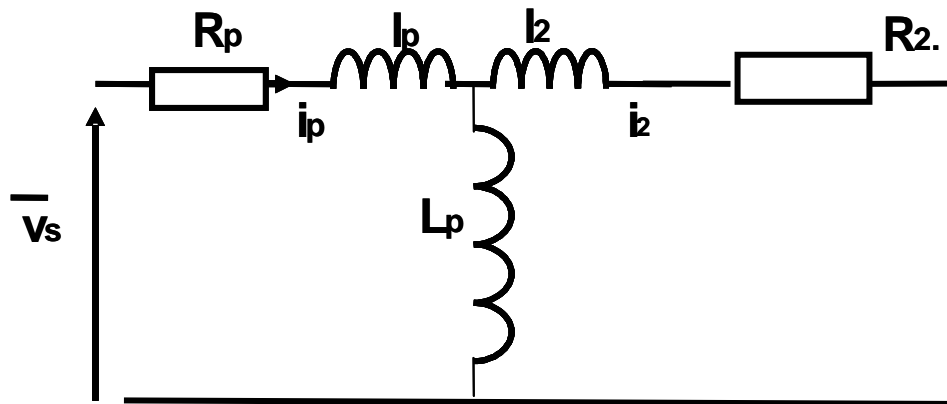
On obtient :

$$S : \begin{cases} \bar{v}_S = R_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\varphi}_S}{dt} \\ 0 = R_R \bar{j}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} - j \frac{d\theta}{dt} \bar{\psi}_R \\ \bar{\varphi}_S = L_S \bar{i}_S + M \bar{j}_R \\ \bar{\psi}_R = M \bar{i}_S + L_R \bar{j}_R \end{cases}$$

Schéma équivalent d'une machine asynchrone

On peut voir une machine asynchrone comme un transformateur tournant dont le secondaire est en court circuit.

Schéma équivalent d'un transformateur en court-circuit :



Avec :

$i_2 = m I_s$ (i_2 : courant secondaire (I_s) ramené au primaire)

$\varphi_2 = \varphi S / m$ (φ_2 : flux embrassé par le bobinage secondaire (φS) ramené au primaire)

Schéma équivalent d'une machine asynchrone

On s'inspire de cette démarche pour la machine asynchrone :

$$\bar{i}_2 = \alpha j_R \quad \text{et} \quad \bar{\varphi}_2 = \psi_R / \alpha$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{v}_S = R_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\varphi}_S}{dt} \\ \bar{0} = R_2 \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\varphi}_2}{dt} - j\omega \bar{\varphi}_2 \\ \bar{\varphi}_S = l_S \bar{i}_S + L_m (\bar{i}_S + \bar{i}_2) \\ \bar{\varphi}_2 = l_2 \bar{i}_2 + L_m (\bar{i}_S + \bar{i}_2) \end{array} \right.$$

avec :

$$L_m = \frac{M}{\alpha} ; \quad R_2 = \frac{R_R}{\alpha^2} ; \quad L_2 = \frac{L_R}{\alpha^2}$$

$$l_S = L_S - L_m ; \quad l_2 = L_2 - L_m$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Schéma équivalent d'une machine asynchrone

Ces équations peuvent être représentées par :

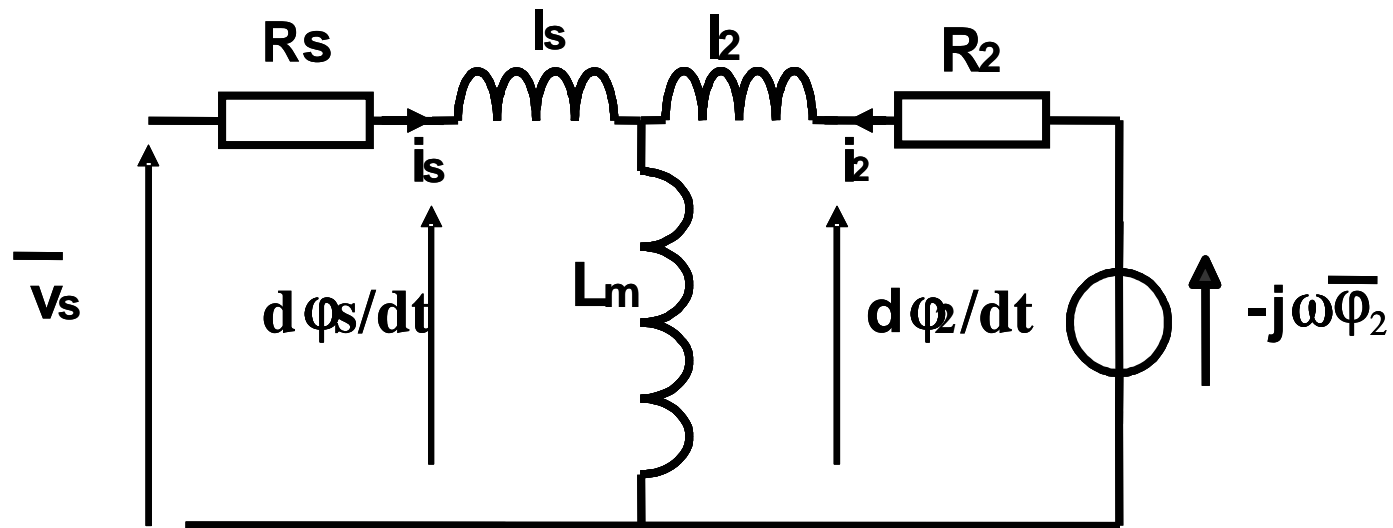


Schéma équivalent d'une machine asynchrone en régime permanent

$$\text{RP} \quad \begin{cases} \bar{V}_s = \bar{R}_s \bar{I}_s + j \omega_s \bar{\phi}_s \\ 0 = R_2 \bar{I}_2 + j \omega_s \bar{\phi}_2 - j \omega \bar{\phi}_2 \\ \bar{\phi}_s = l_s \bar{I}_s + L_m (\bar{I}_s + \bar{I}_2) \\ \bar{\phi}_2 = l_2 \bar{I}_2 + L_m (\bar{I}_s + \bar{I}_2) \end{cases}$$

Glissement :

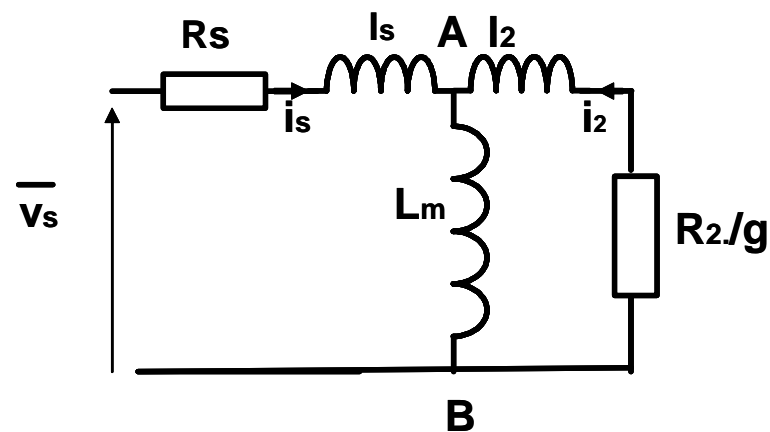
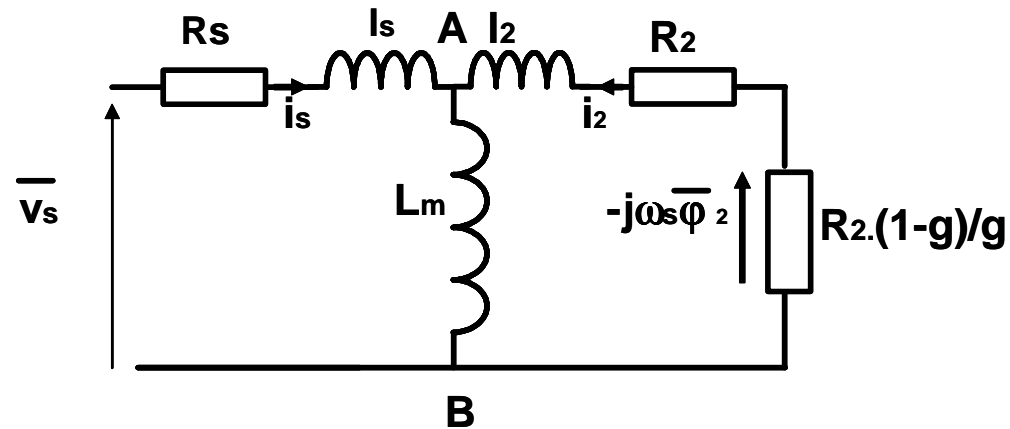
$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

$$\Rightarrow 0 = R_2 \bar{I}_2 + jg \omega_s \bar{\phi}_2$$

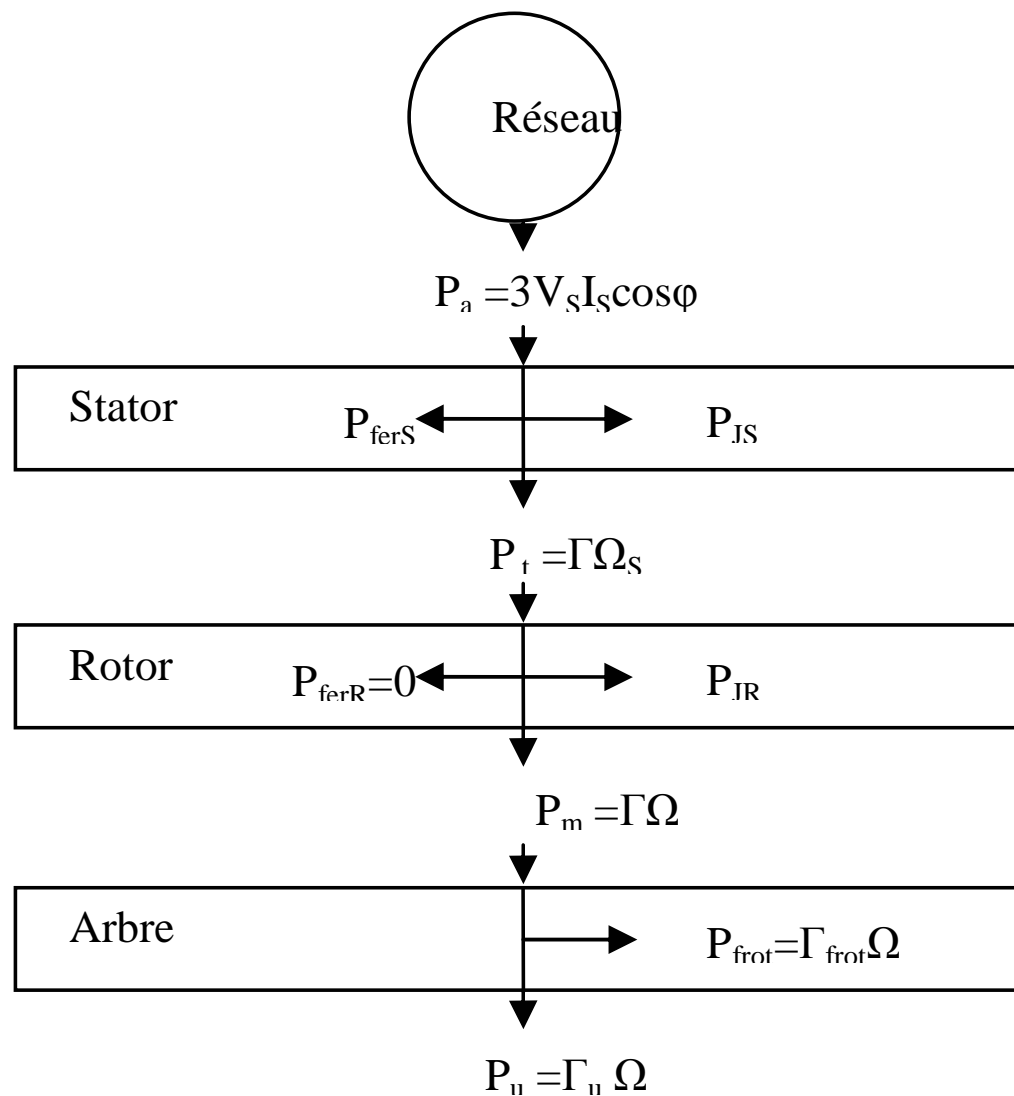
Force électromotrice apparaissant dans le schéma équivalent :

$$j \omega \bar{\phi}_2 = j(1-g) \omega_s \bar{\phi}_2 = -\frac{(1-g)}{g} R_2 \bar{I}_2$$

Schéma équivalent d'une machine asynchrone en régime permanent



Bilan de puissance en régime permanent



Bilan de puissance en régime permanent

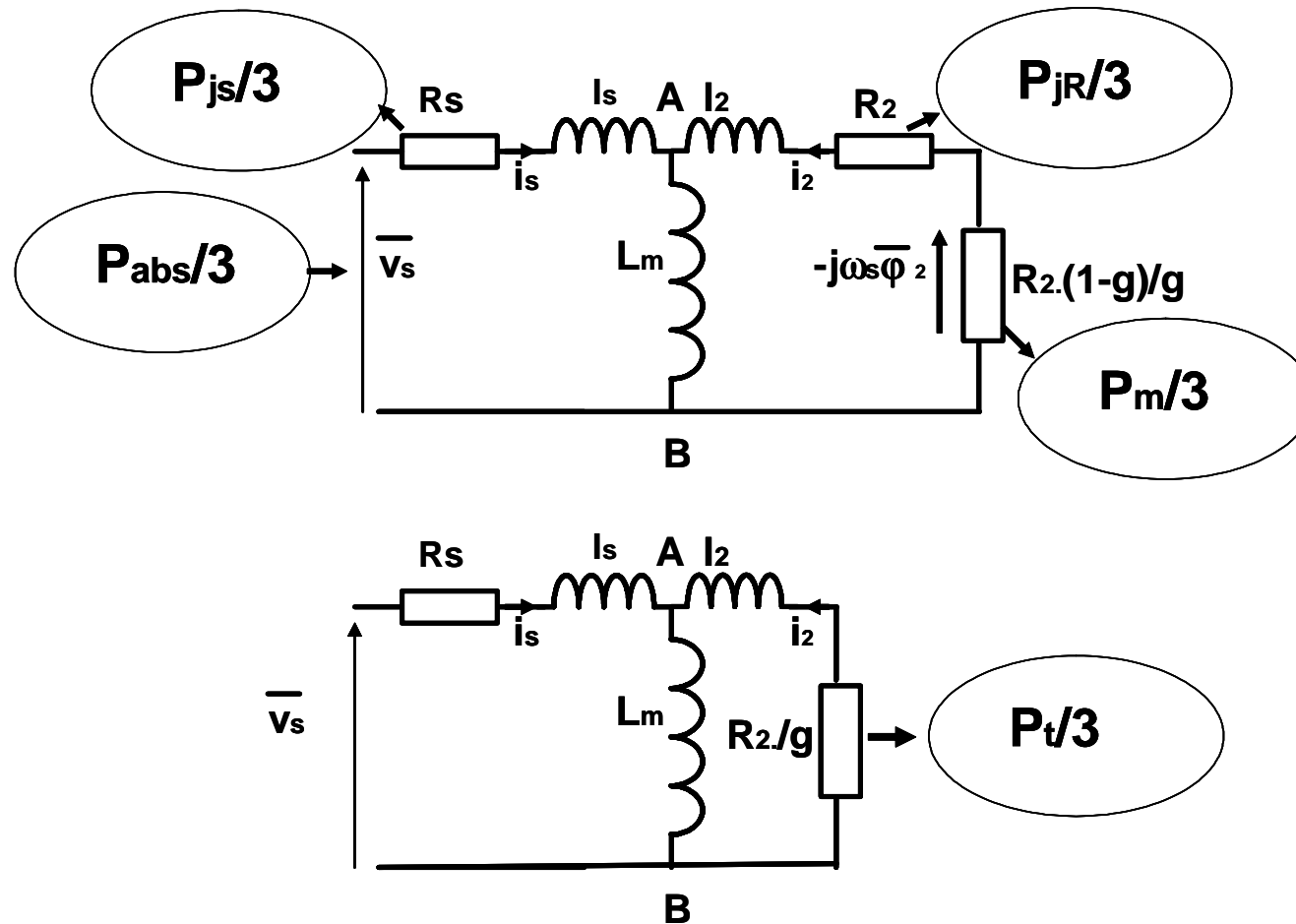


Schéma équivalent généralement utilisé

Calcul du couple

$$P_{méca} = 3 \frac{1-g}{g} R_2 I^2 = \Gamma \Omega = \Gamma (1-g) \Omega_s$$

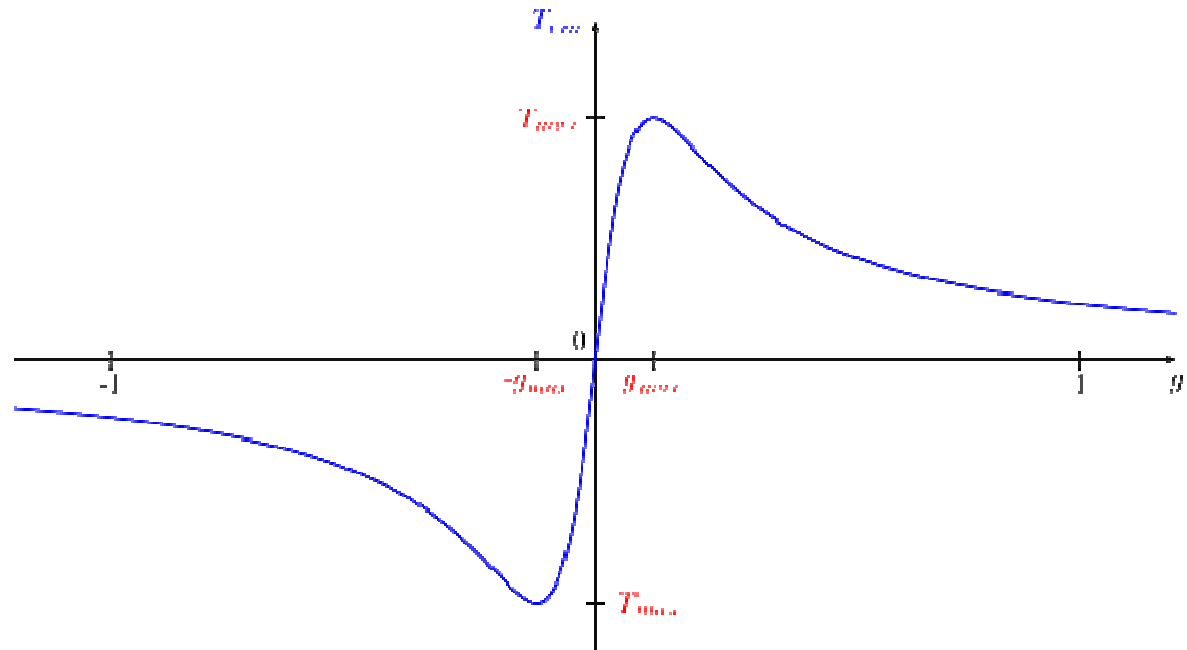
soit :

$$\Gamma = \frac{3}{g \cdot \Omega_s} R_2 I_2^2$$

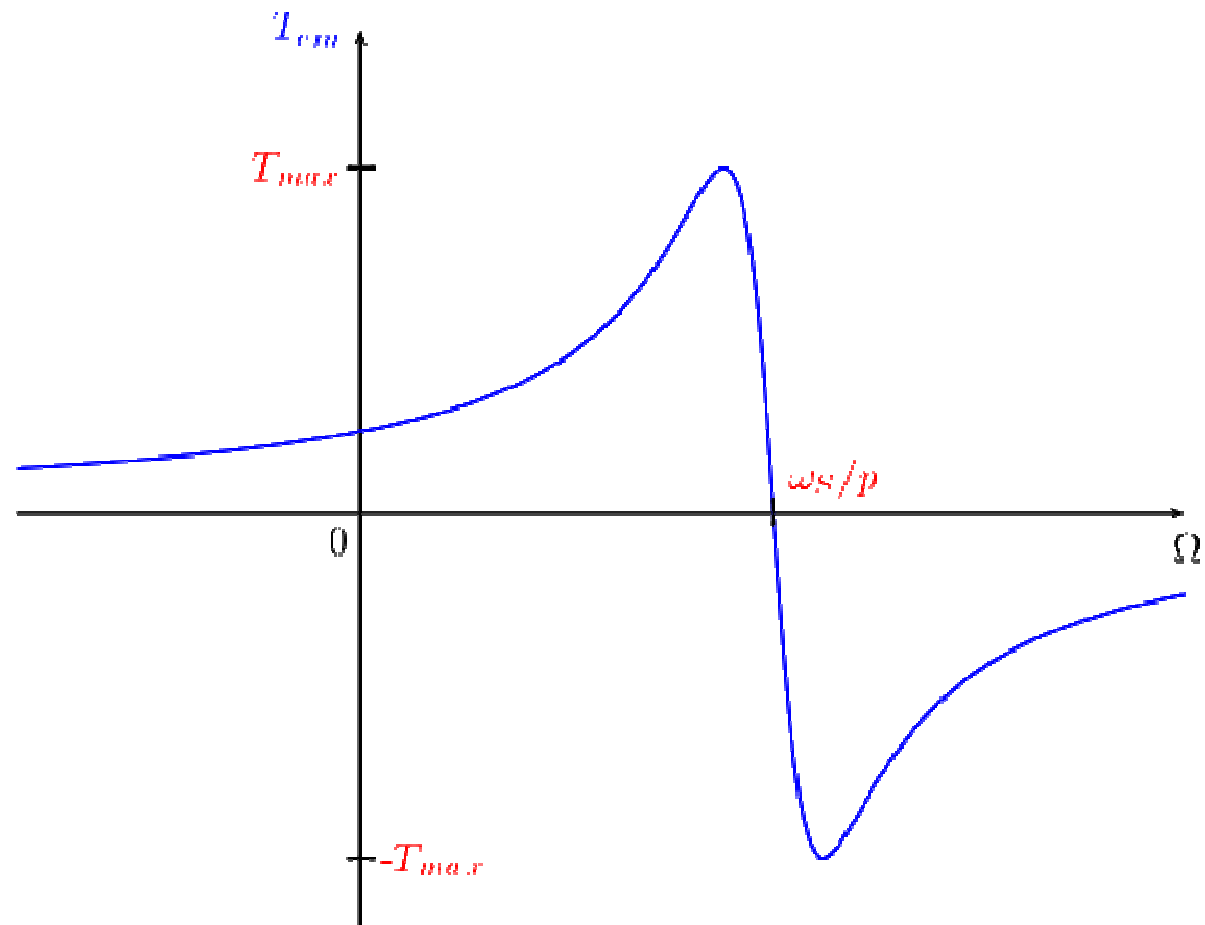
Couple en fonction du glissement

$$\Gamma = \frac{2\Gamma_{\max}}{\frac{g_{\max}}{g} + \frac{g}{g_{\max}}}$$

$$\Gamma_{\max} = \frac{3pV_s^2}{2l_2\omega_s^2}, \quad g_{\max} = \frac{R_2}{l_2\omega_s}$$



Couple en fonction de la vitesse



Les trois domaines de fonctionnement de la machine asynchrone

