



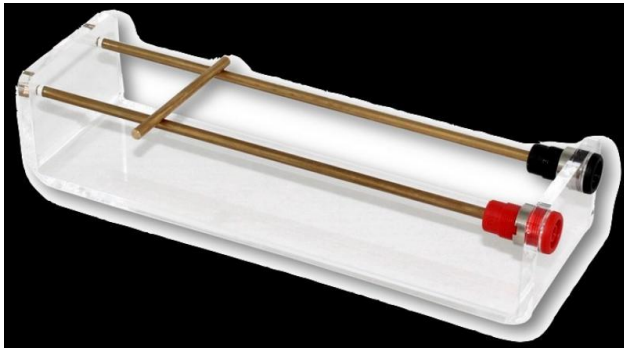
Les transducteurs électromécaniques

Moteurs et
alternateurs

Un **transducteur électromécanique** est un système qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique (ou l'inverse).

Vous avez déjà vu:

- le rail de Laplace (en fonctionnement moteur ou alternateur)
- le Haut-parleur électrodynamique

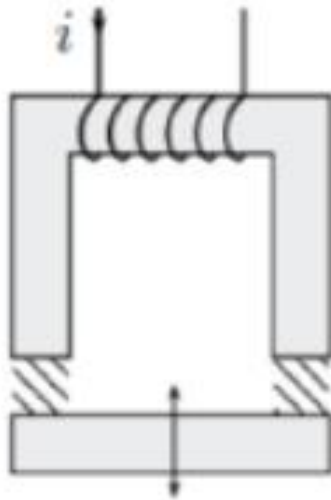
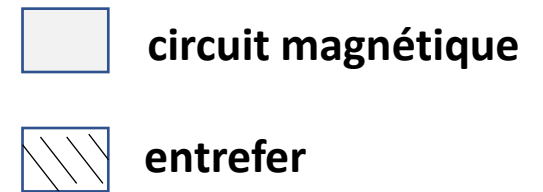


Contrairement aux machines thermiques, les transducteurs peuvent atteindre d'excellents rendements ($> 90\%$), les pertes étant essentiellement dues aux frottements mécaniques ou à l'effet Joule dans les circuits.

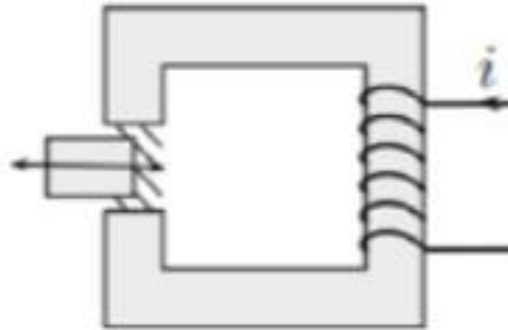
Structure des systèmes étudiés

Tous les systèmes que l'on va présenter possèdent les éléments suivants:

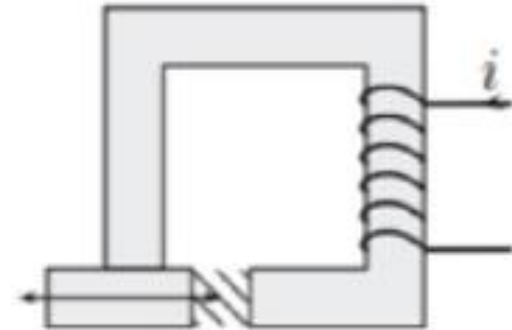
- Un **circuit magnétique ouvert ou fermé**, composé de matériaux ferromagnétiques. Généralement, il y a une partie fixe, appelée **stator**, et une partie en rotation, appelée **rotor**;
- un **entrefer**, de l'air en général considéré comme du vide, dans lequel se concentre la majorité de l'énergie électromagnétique ;
- un ou plusieurs **circuits électriques**, généralement enroulés sur le circuit magnétique.



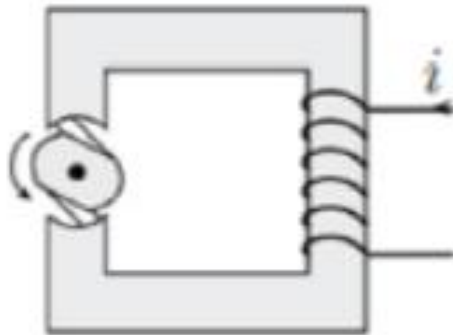
électroaimant de levage



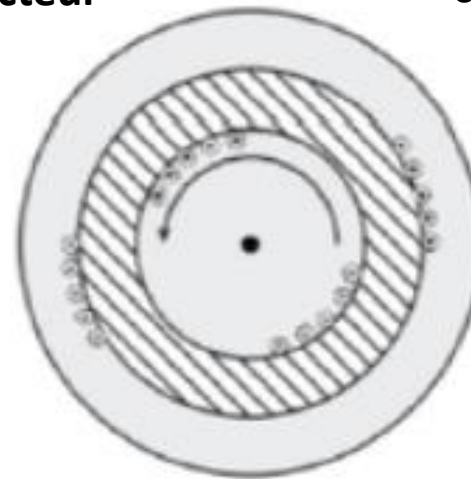
contacteur



contacteur



**moteur à
courant
continu**



moteur synchrone

Hypothèses de travail

- 1) Les circuits magnétiques sont constitués de matériaux ferromagnétiques doux fonctionnant en régime linéaire (MLHI), c'est-à-dire:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

avec $\mu_r \gg 1$.

Par conséquent:

- les lignes de champs sont parfaitement canalisées par le matériau (pas de pertes);
- les lignes de champ sont orthogonales à l'interface entre fer - MLHI ;

- 2) Dans l'ARQS, le théorème d'Ampère s'écrit:

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = i_{\text{enlacé, libre}}$$

3) L'équation de Maxwell-Flux reste inchangée:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

\vec{B} est à flux conservatif, les lignes de champ de \vec{B} sont fermées, et le flux de \vec{B} est le même à travers toute section d'un tube de champ ;

4) L'énergie électromagnétique contenue dans le système à l'instant t vaut:

$$\mathcal{E}_{\text{mag}} = \iiint_{\text{ferro}} \frac{B^2}{2\mu_0\mu_r} dV + \iiint_{\text{entrefer}} \frac{B^2}{2\mu_0} dV$$

Comme $\mu_r \gg 1$, l'énergie est surtout contenue dans l'entrefer.

5) En notant Φ le flux de \vec{B} à travers le circuit électrique, l'inductance du circuit électrique vérifie:

$$\Phi = Li$$

et l'énergie électromagnétique peut aussi s'écrire: $\mathcal{E}_{\text{mag}} = \frac{1}{2}Li^2$

Objectif

Comment, à partir de la connaissances des courants et des tensions appliquées aux circuits électriques, déterminer les actions mécaniques (forces ou moments) s'exerçant sur la partie mobile du système?

Remarque: si on sait répondre à cette question, on peut ensuite utiliser ces résultats pour résoudre le problème inverse (alternateur).

Pour parer au problème, on admettra et utilisera les résultats suivants:

Lorsque la partie mobile a un mouvement possible de translation, paramétré par l'abscisse x , alors la **force électromagnétique** qui s'exerce sur la partie mobile est:

$$\vec{F} = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{\text{mag}}}{\partial x} \right)_i \vec{u}_x$$

Lorsque la partie mobile a un mouvement possible de rotation autour d'un axe fixe (Oz), paramétré par l'angle θ , alors **le couple électromagnétique** projeté sur l'axe de rotation subi par cette partie mobile est :

$$\Gamma = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{\text{mag}}}{\partial \theta} \right)_i$$

On va justifier cette formule dans le cas de l'électroaimant de levage.



Technique d'approche

Pour déterminer les actions mécaniques s'exerçant sur le rotor, il nous faut donc:

1) Calculer l'énergie électromagnétique contenue dans le système.

Deux méthodes:

- a) On calcule la densité volumique d'énergie $\frac{B^2}{2\mu_0\mu_r}$ puis on intègre sur le volume du système;
- b) On calcule l'inductance L du(des) circuits et on en déduit $\mathcal{E}_{\text{mag}} = \frac{1}{2}Li^2$.

2) On dérive par rapport au degré de liberté de la partie mobile (degré de translation ou de rotation)



L'électroaimant de levage (contacteur)

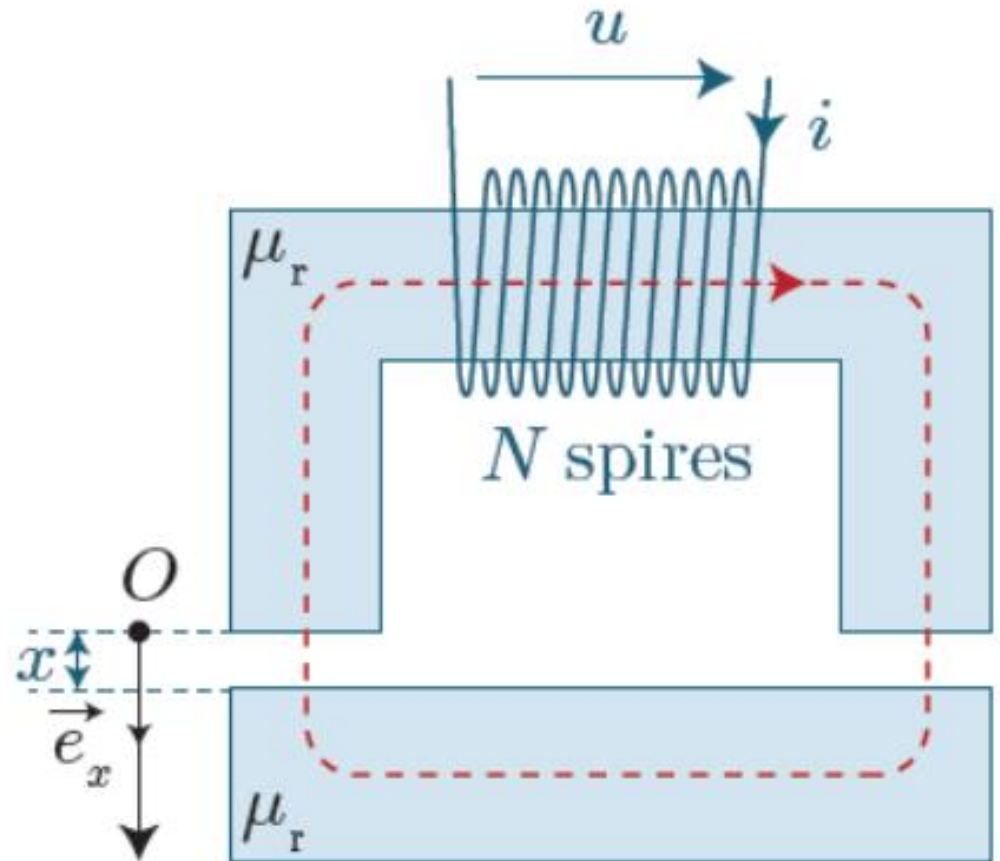


1) Présentation

On s'intéresse à un contacteur électromagnétique constitué d'un noyau de fer doux en forme de U entouré d'une bobine de $N = 500$ spires.

On applique un courant sinusoïdal $i(t)$ de fréquence $f = 50$ Hz de valeur efficace I_{eff} .

On ferme le circuit magnétique à l'aide d'un barreau de fer doux rectiligne de même section S que le noyau en U, de masse $m = 2$ kg.

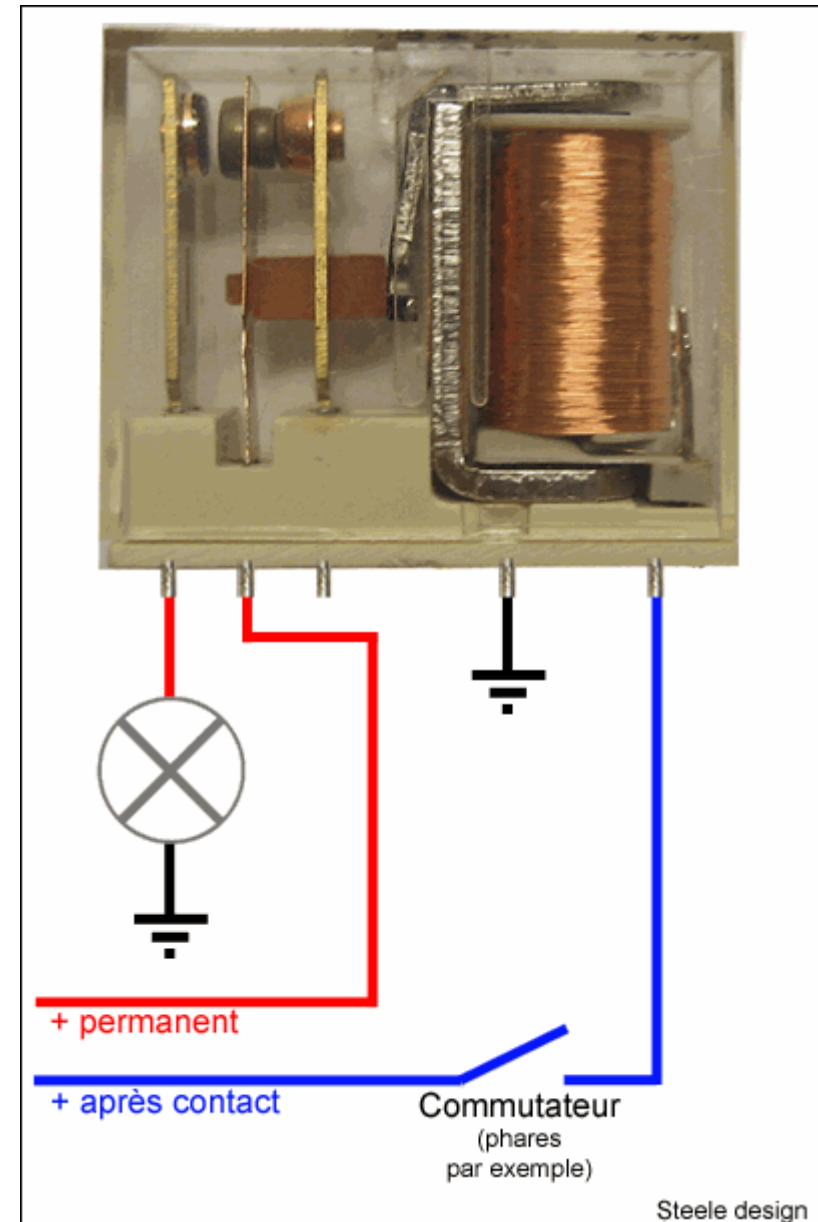


L'entrefer entre le noyau et le barreau a une épaisseur variable x .

4) Autres applications

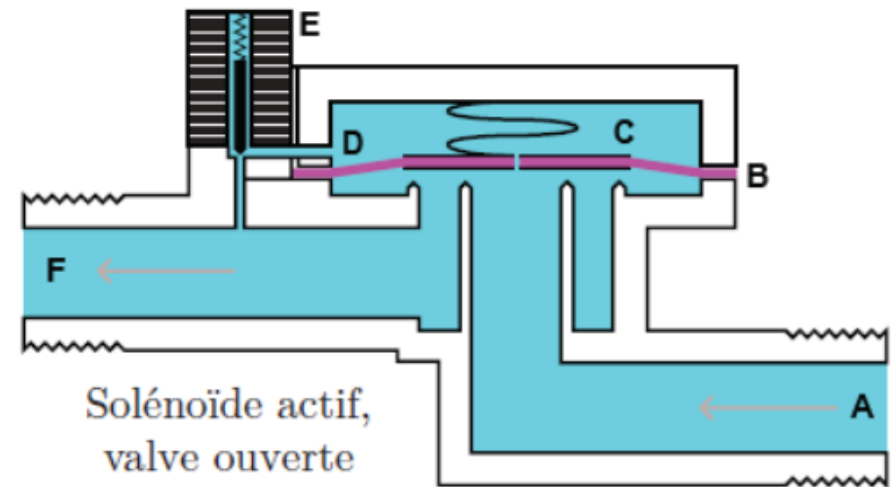
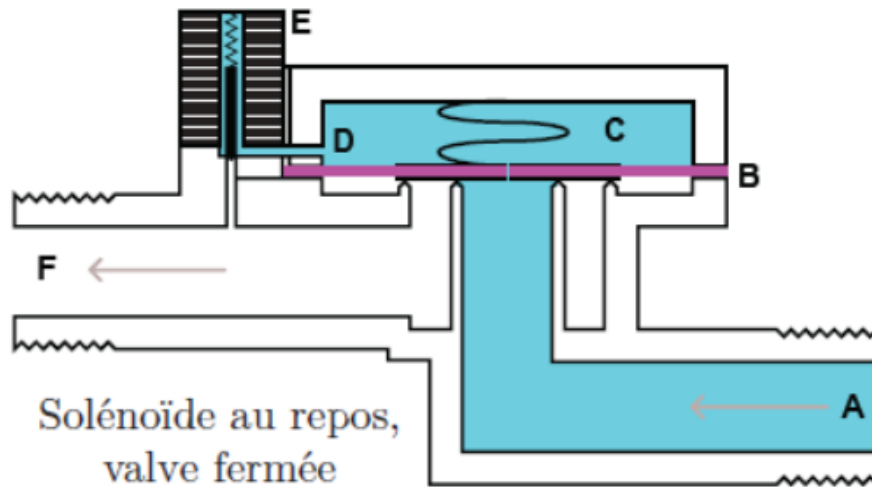
Les **relais** permettent avec un courant d'excitation faible (sur la bobine) de commuter des courants importants (par les contacts).

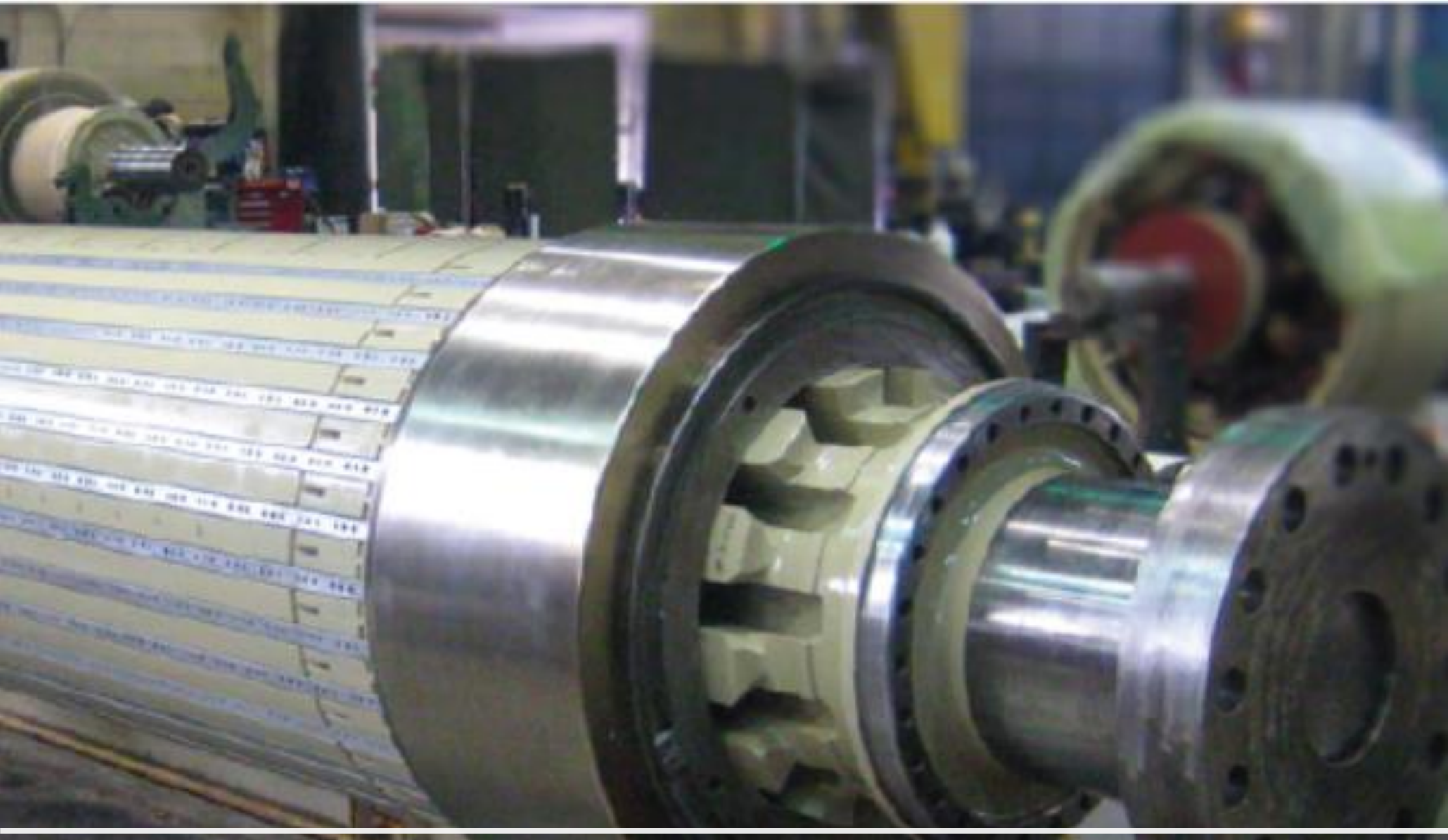
Ces commutateurs (appelés dans certains cas contacteurs) présentent la particularité de voir les courants de commande et de puissance totalement séparés.



L'**électrovanne** est une vanne commandée électriquement. Elle permet d'agir sur le débit d'un fluide dans un circuit hydraulique par une commande électrique.

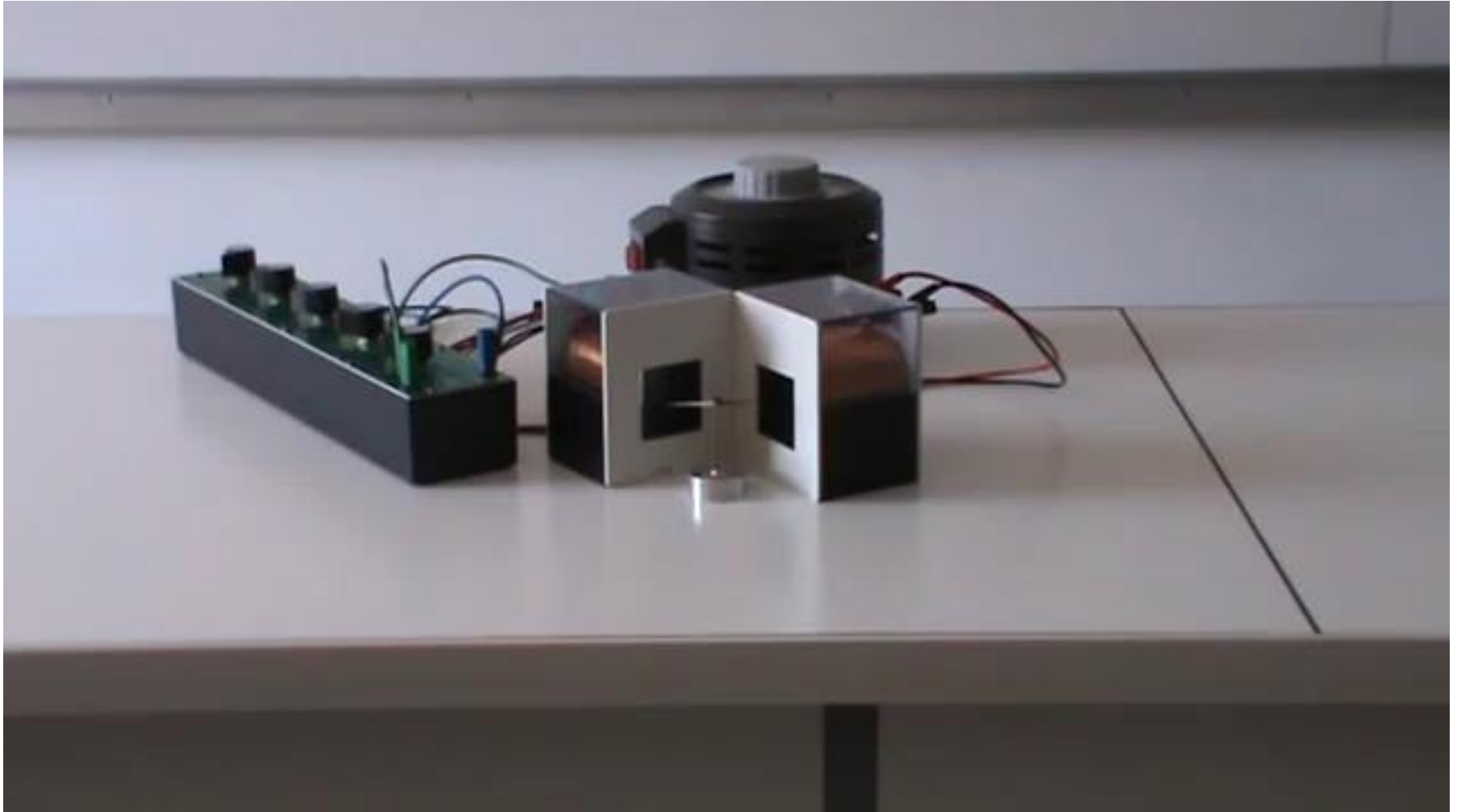
On les trouve principalement dans les lave-vaisselles et les lave-linges pour commander le remplissage.





Les machines synchrones

1) Un rappel de SUP: création d'un champ tournant



On alimente 2 bobines placées à angle droit par des courants sinusoïdaux de même fréquence, mais déphasés de $\pi/2$:

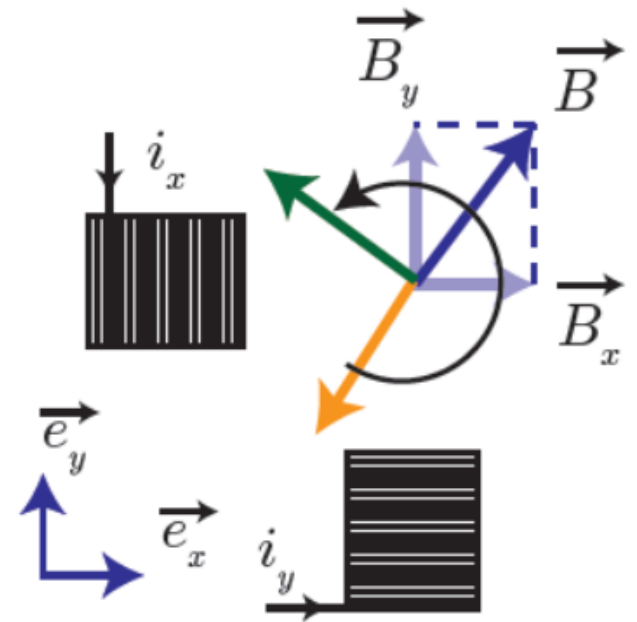
$$i_x(t) = i_m \cos(\omega t)$$

$$i_y(t) = i_m \sin(\omega t)$$

Les champs créés par chaque bobine s'écrivent:

$$\vec{B}_x = K i_m \cos(\omega t) \vec{u}_x$$

$$\vec{B}_y = K i_m \sin(\omega t) \vec{u}_y$$



$$K \approx n\mu_0$$

Le champ total créé au niveau de l'aiguille vaut:

$$\vec{B}(t) = K i_m (\cos(\omega t) \vec{u}_x + \sin(\omega t) \vec{u}_y)$$



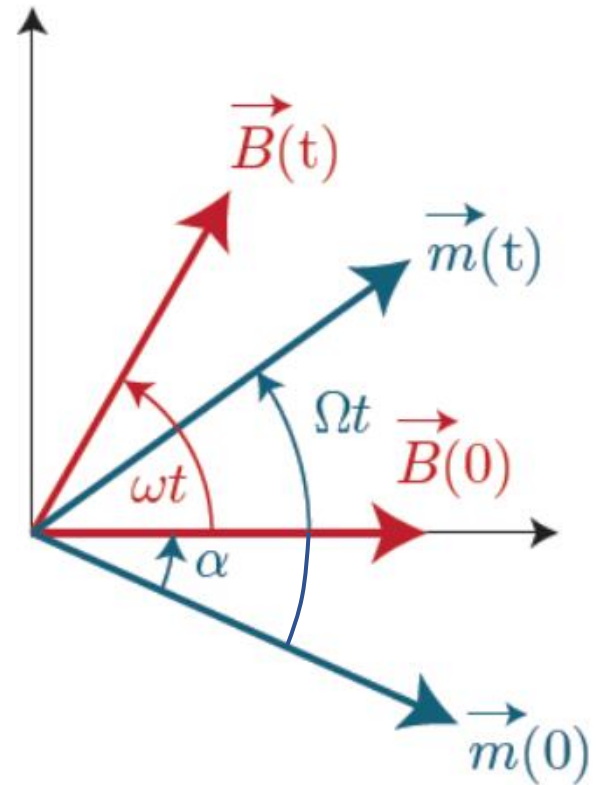
Il s'agit d'un **champ tournant**

Si on place un moment magnétique \vec{m} dans le champ magnétique tournant, celui-ci subit un couple $\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}$ qui tend à aligner le moment avec le champ magnétique.

En notant α l'angle initial entre le champ magnétique créé par les bobines et le moment magnétique, le couple s'exprime par:

Le couple moyen est non nul uniquement si:

La partie mobile (l'aiguille) tourne donc à la même vitesse que le champ magnétique. C'est la **condition de synchronisme**.



Les machines synchrones fonctionnent sur le même mode de fonctionnement:

- un stator crée un champ magnétique tournant dans un entrefer;
- en régime permanent, le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant.



www.LearnEngineering.org

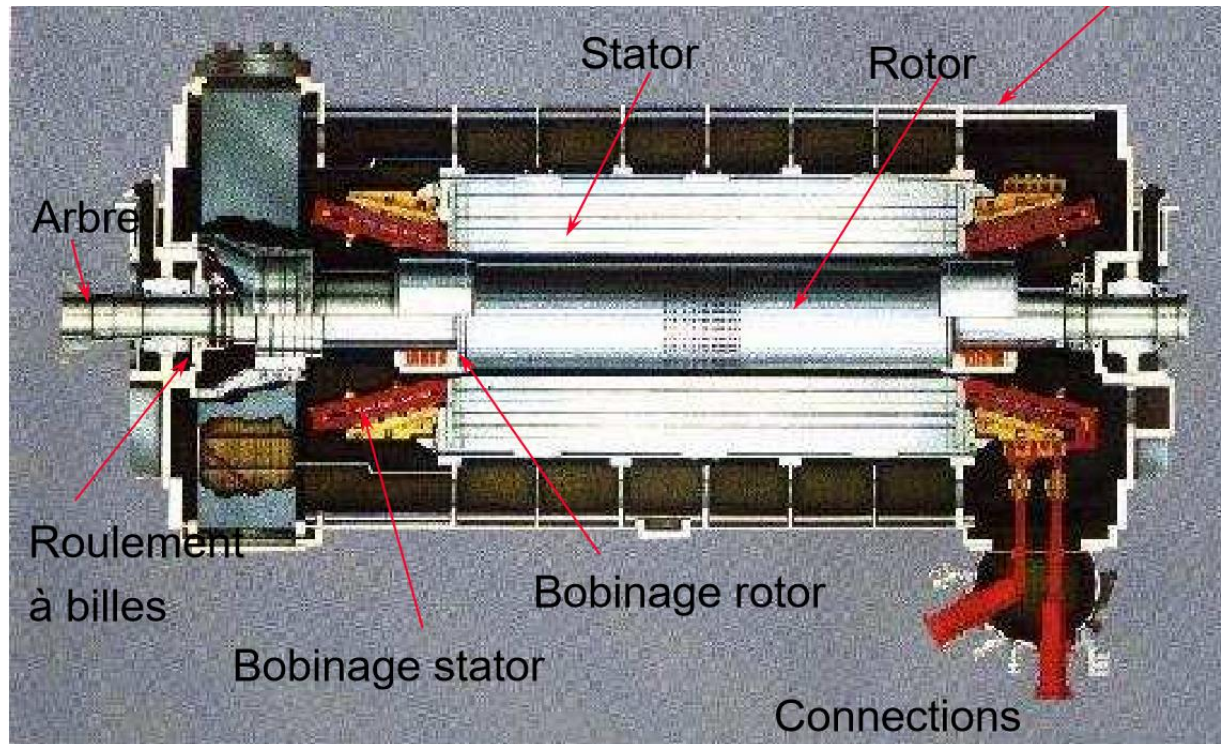
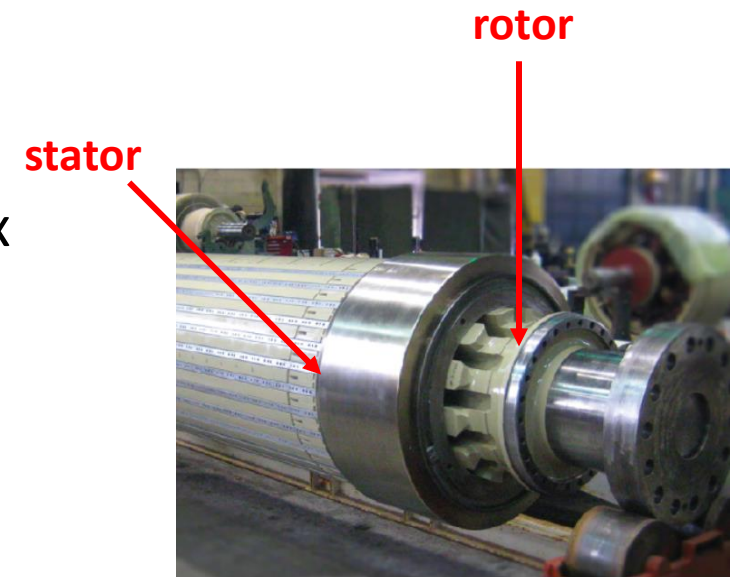
Point fort du moteur synchrone: il tourne toujours à la même vitesse, quelque soit la charge.

Exemples d'utilisation de machines synchrones:

- La plupart des alternateurs des centrales électriques ($P = 1\text{GW}$)
- Les moteurs de traction de TGV ($P = 1\text{-}10\text{ MW}$)

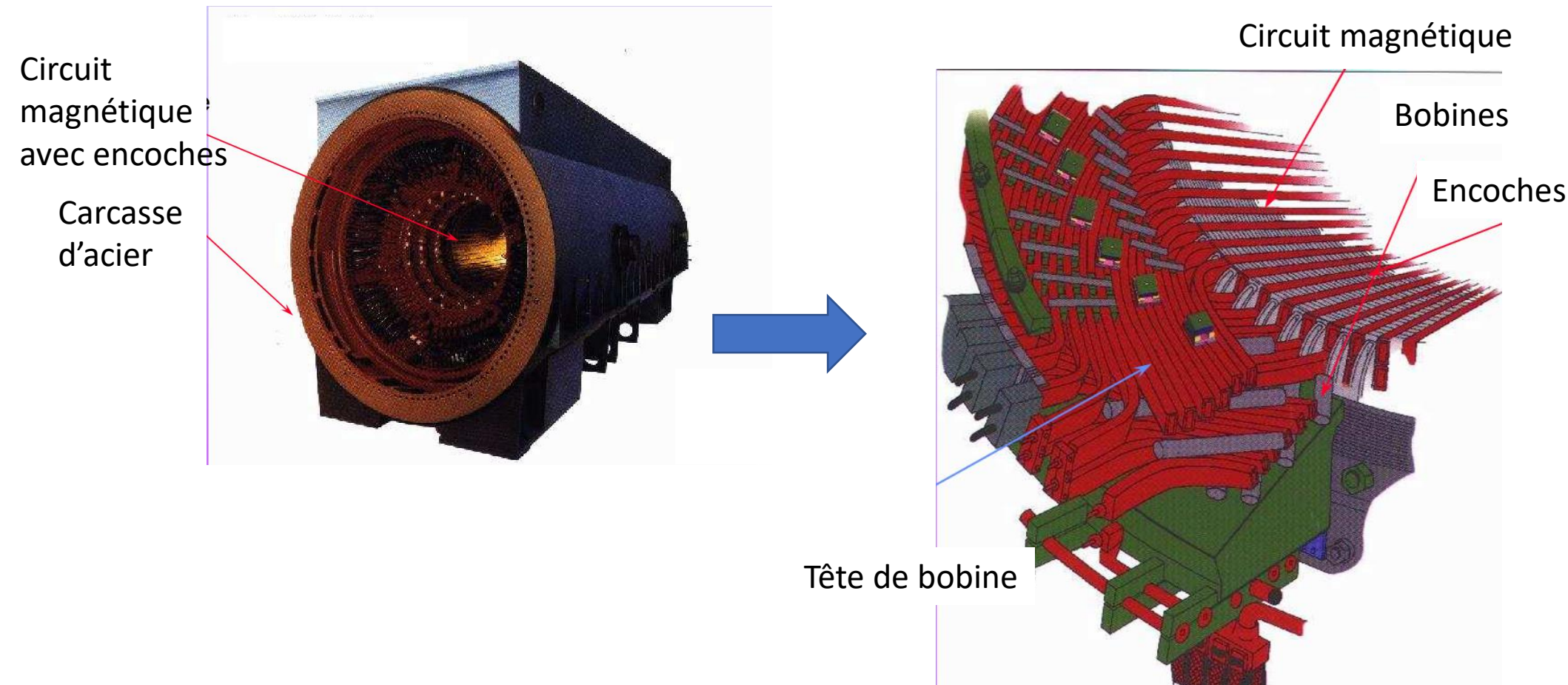
2) Présentation de la machine

Le stator (fixe) et le rotor (mobile) sont tous deux constitués de matériau ferromagnétique doux.
Ces deux parties peuvent être relativement massives;



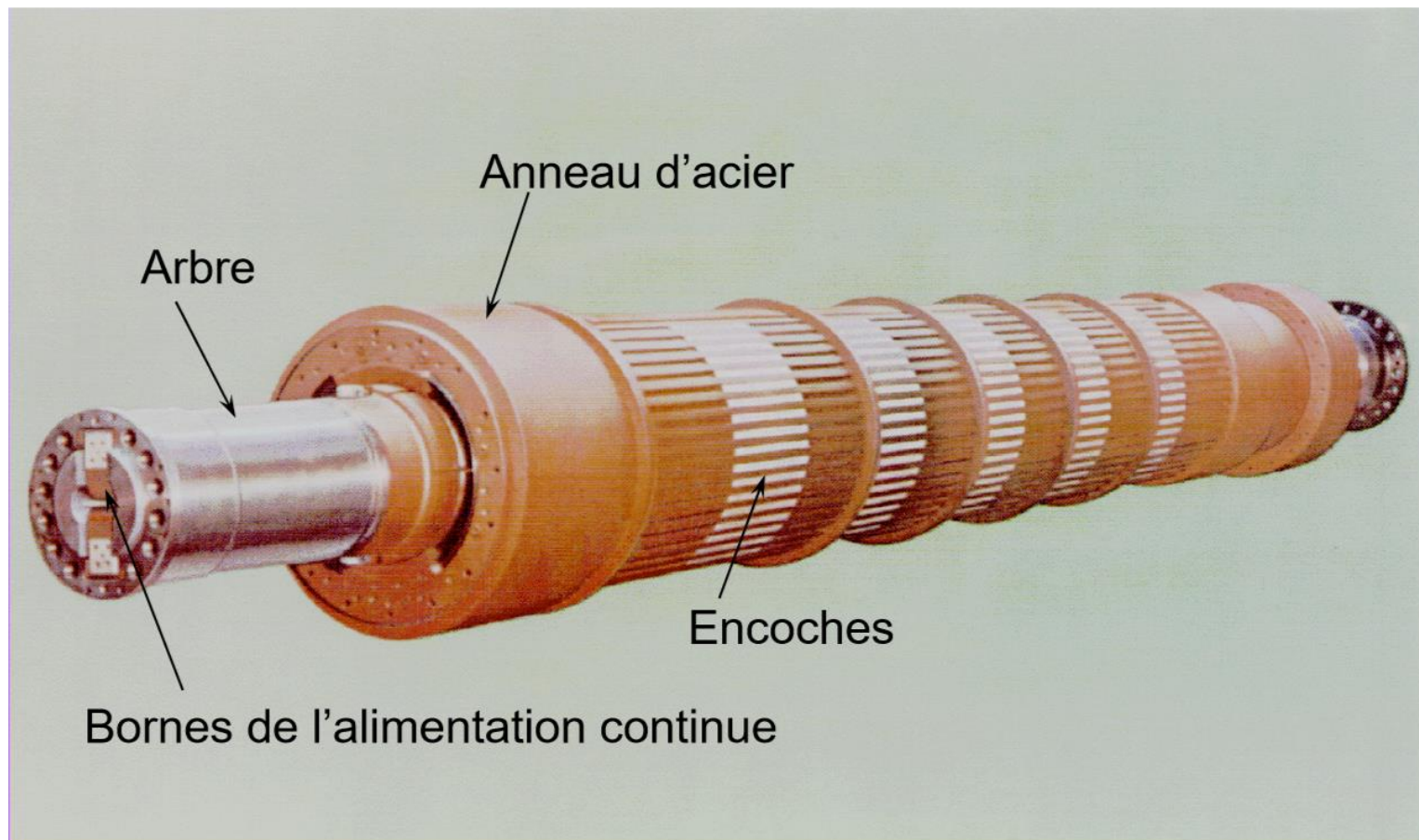
a) Le stator

Le stator comprend deux circuits bobinés C_1 et C_2 , appelés **circuits induits**, alimentés par des courants **alternatifs** de même fréquence mais déphasés entre eux de $\pi/2$ (chaque circuit est nommé **phase du stator**).

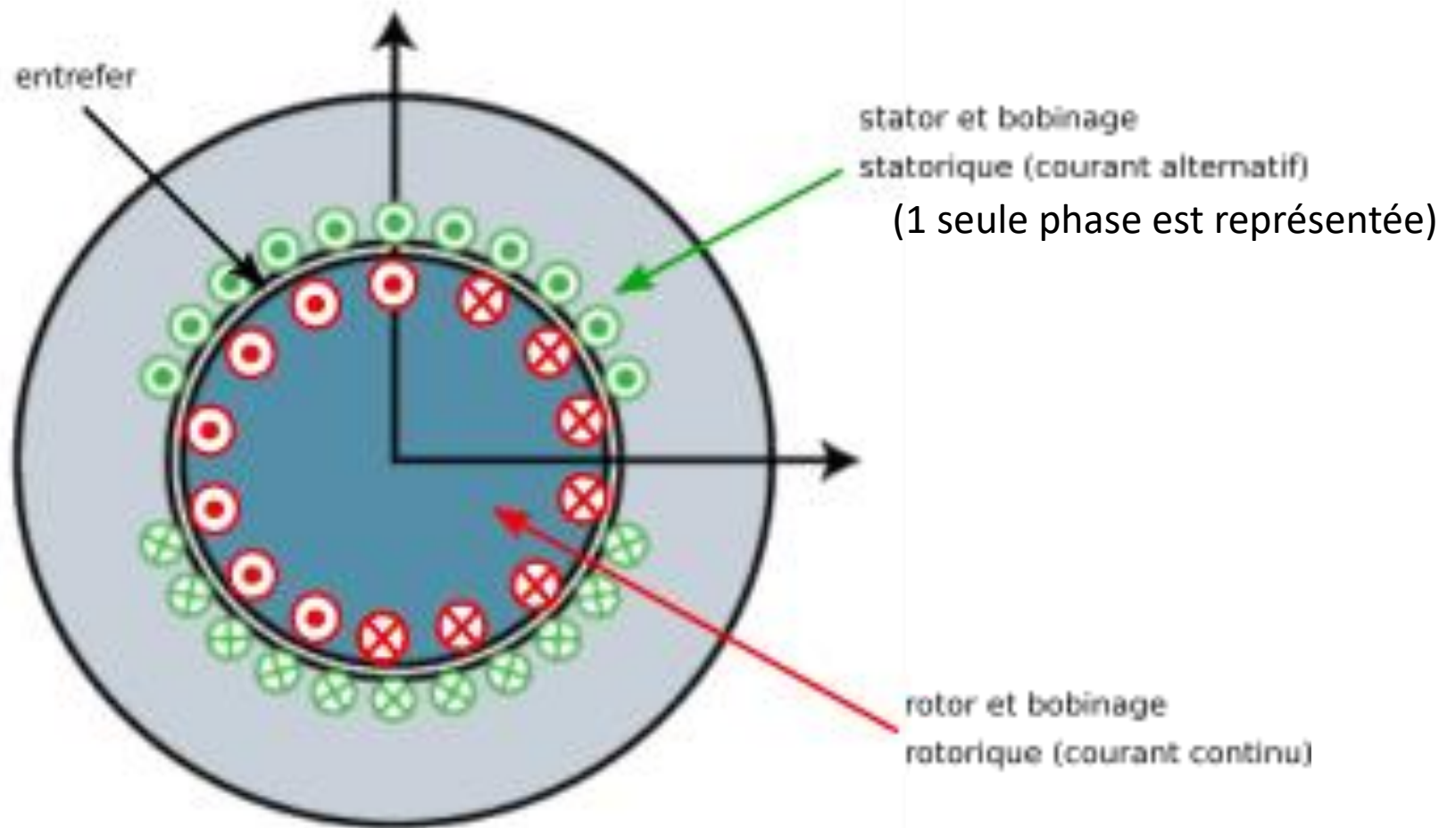


b) Le rotor à pôles lisses

Les circuits du rotor, nommés **circuits inducteurs**, sont parcourus par des **courants continus**.



Coupe dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation (Oz)



c) Objectif

Connaissant les courants appliqués, on souhaite déterminer le couple électromagnétique exercé par le stator sur le rotor.

Pour cela, il faut:

- 1) Déterminer le champ magnétique exercé par le bobinage statorique
- 2) Déterminer le champ magnétique exercé par le bobinage rotorique
- 3) Calculer l'énergie magnétique contenue dans l'entrefer de la machine
- 4) En déduire le couple électromagnétique:

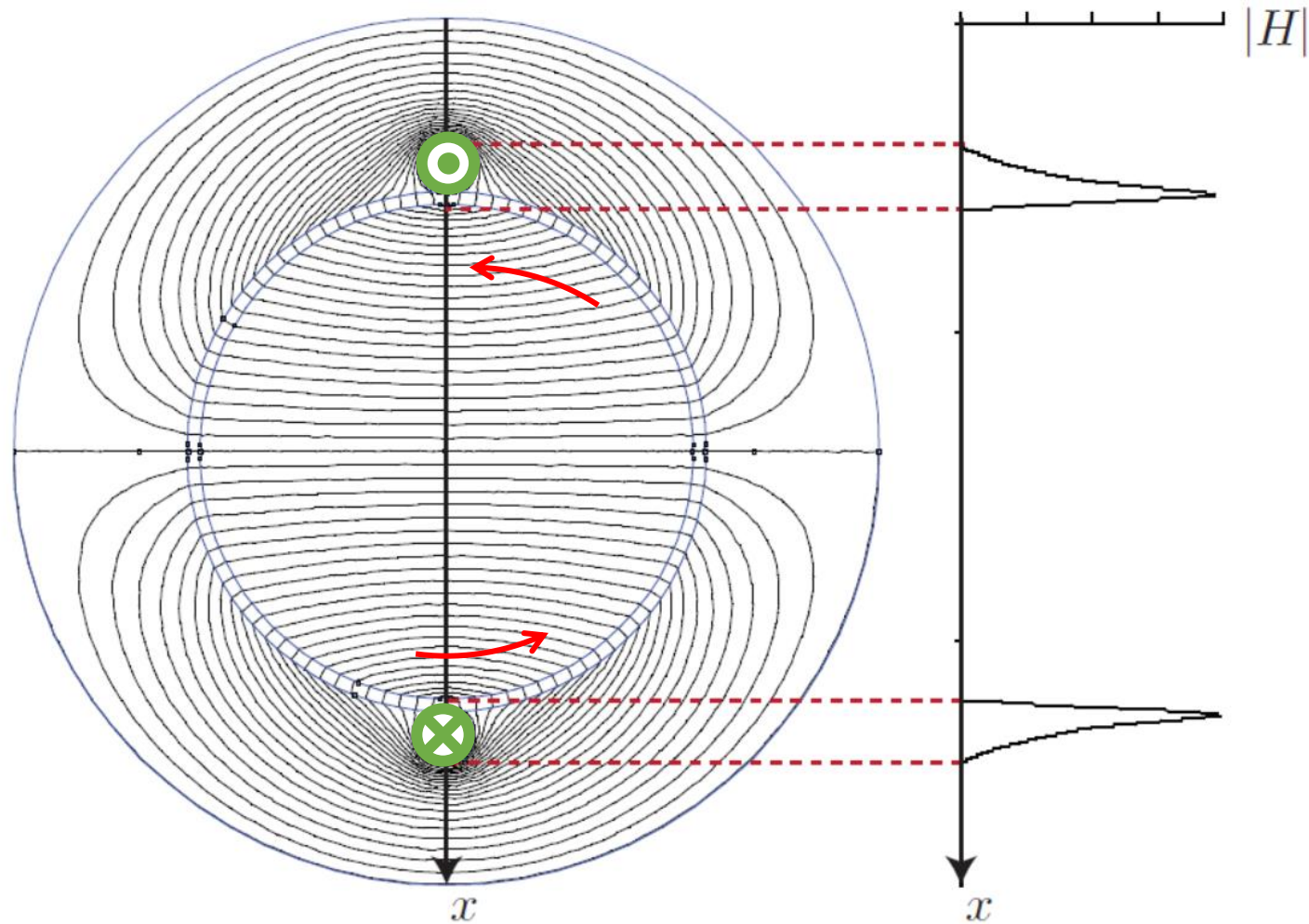
$$\Gamma = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{\text{mag}}}{\partial \theta} \right)_i$$

3) Le champ tournant statorique

On va décomposer le problème en étudiant:

- le champ créé par une seule spire dans l'entrefer,
- le champ créé par une phase du stator contenant N spires,
- le champ créé par les deux phases du stator.

a) Champ créé par une spire

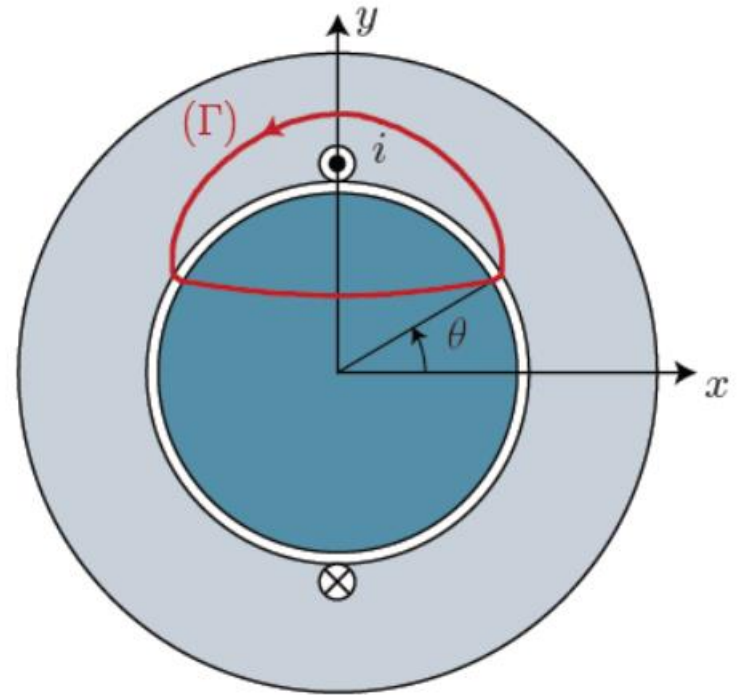


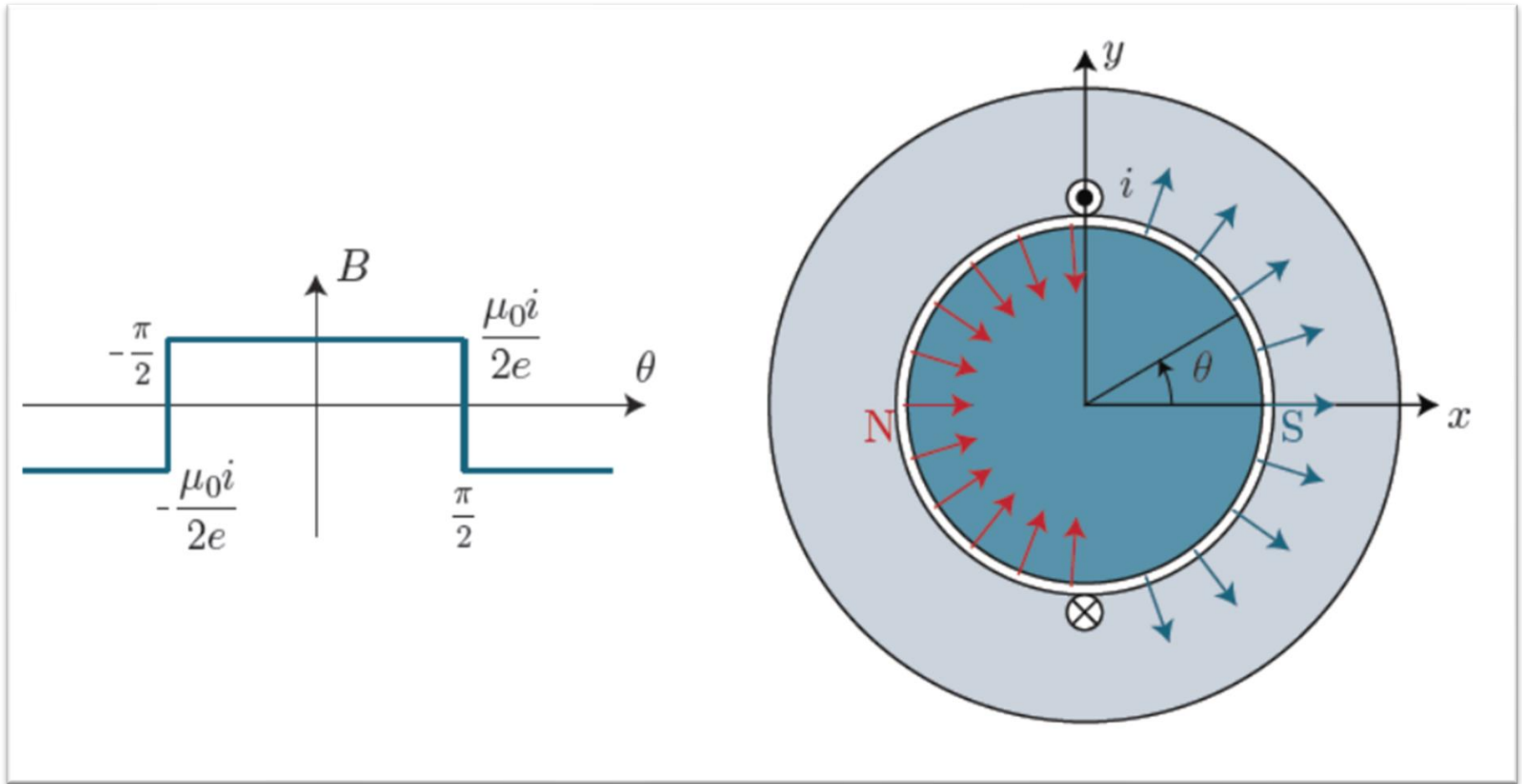
Coupe dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation (Oz)

Etude des symétries

On s'intéresse aux symétries et aux invariances du champ magnétique dans l'entrefer.

Application du théorème d'Ampère sur une ligne de champ





La spire est donc l'équivalent d'un aimant, avec un pôle nord et un pôle sud (on parle d'enroulement statorique bipolaire).

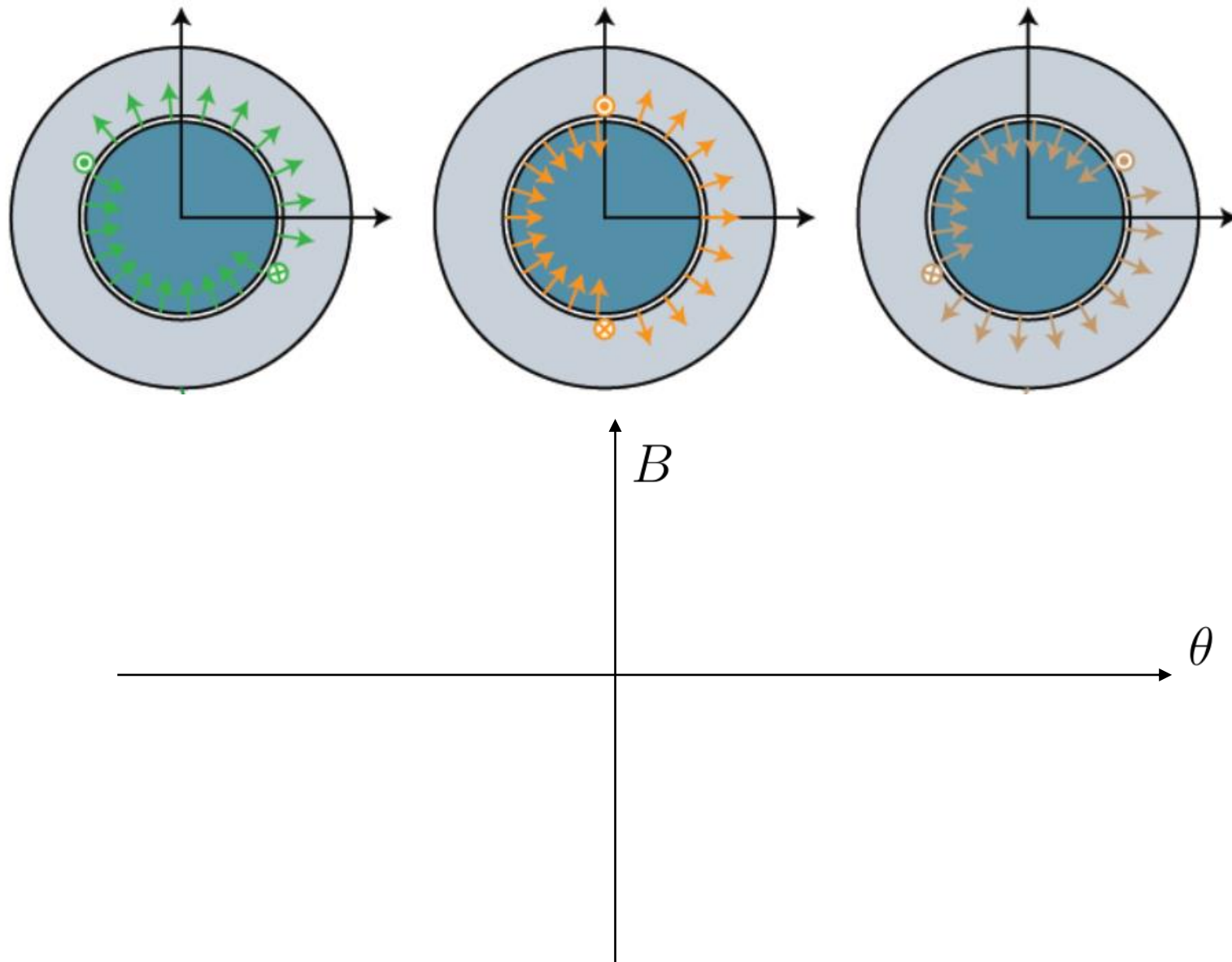
b) Champ créé par N spires

Le champ obtenu par une spire n'est pas intéressant, car discontinu dans l'espace. En pratique on recherche une répartition **sinusoïdale** du champ dans l'entrefer en fonction de l'angle θ .

La solution consiste à combiner plusieurs des spires précédentes, alimentées par le même courant!

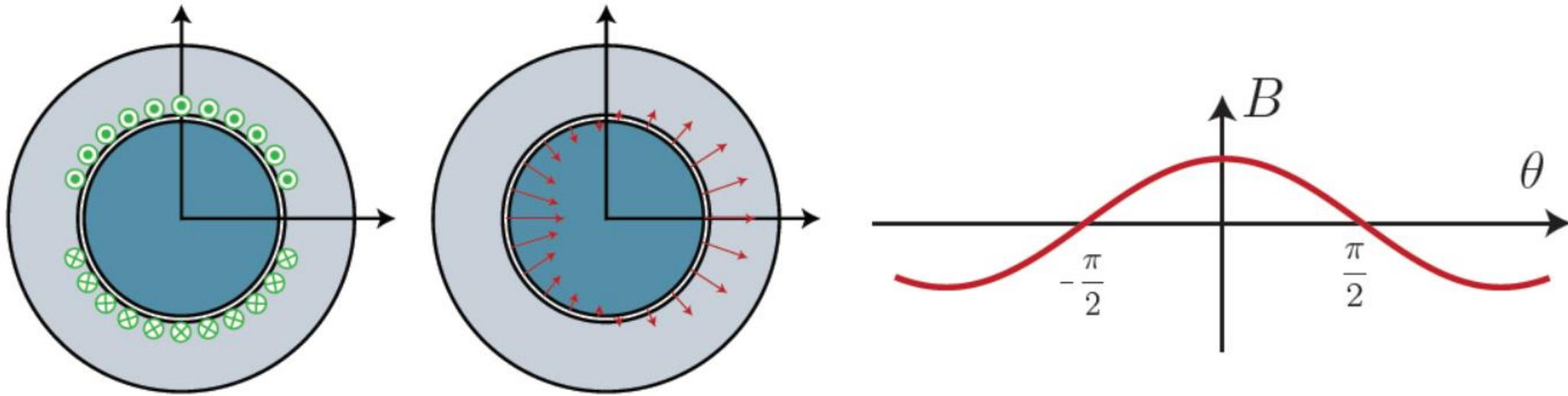
L'ensemble des spires forme alors une **phase** du stator.

Exemple avec 3 spires décalés de $\pi/3$.



On commence à observer une « allure » sinusoïdale

Si on rajoute beaucoup de spires:



Pour une assemblée de spires encochées dans le stator et décalées angulairement, parcourues par le même courant $i(t)$, le champ magnétique créé dans l'entrefer possède une dépendance angulaire sinusoïdale de la forme :

$$\vec{B}_{s,1} = K_s i(t) \cos \theta \vec{u}_r$$

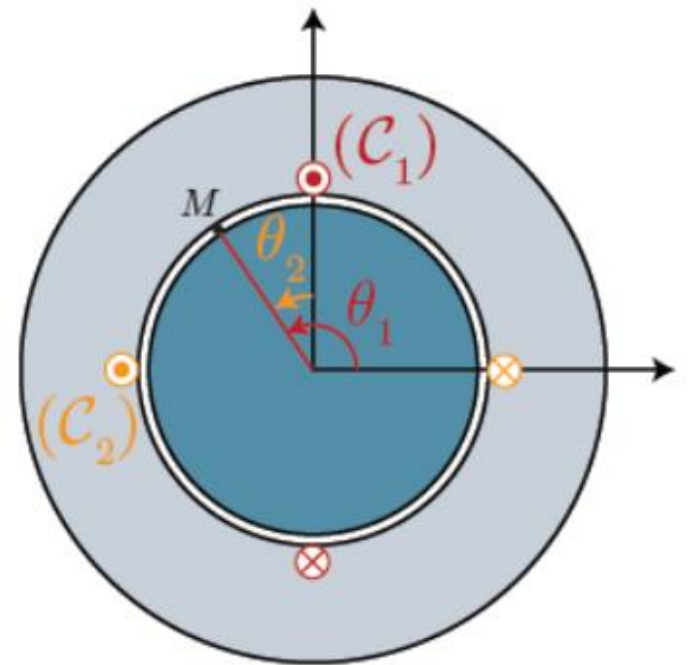
avec K_s une constante de forme du stator, dépendant du nombre de spires et de leur répartition spatiale et de la largeur de l'entrefer. Si $i(t)$ est sinusoïdal, on qualifie le champ créé de **champ pulsant**.

c) Champ glissant statorique

Le champ que l'on vient d'obtenir n'est pas tournant. Il faut pour cela combiner deux circuits statoriques, les phases.

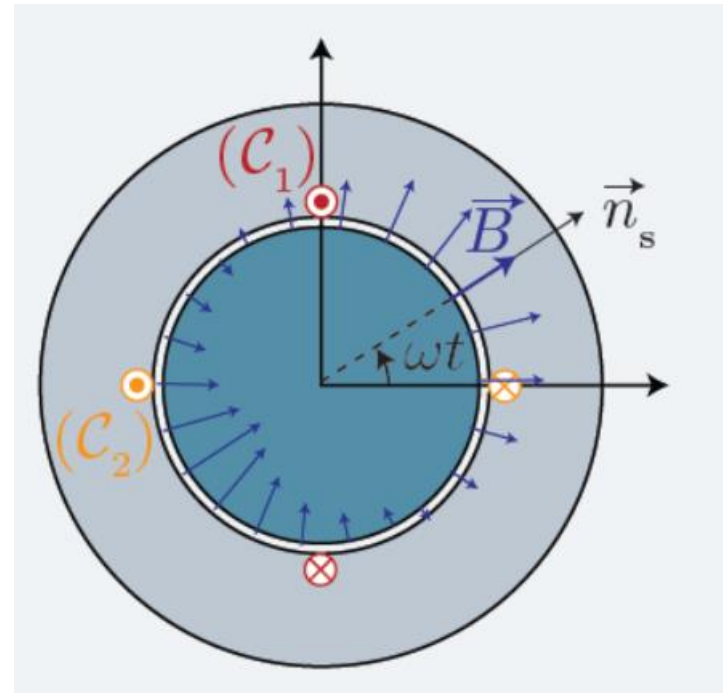
Considérons deux circuits statoriques orthogonaux, alimentés par des courants sinusoïdaux déphasés de $-\pi/2$, et repérées spatialement par $\theta_1 = \theta$ et $\theta_2 = \theta - \pi/2$.

Le champ statorique total vaut:



L'association de deux phases statoriques perpendiculaires et alimentées par des courants sinusoïdaux de pulsation ω , en quadrature, permet l'obtention d'un champ magnétique tournant appelé **champ glissant statorique**:

$$\vec{B}_s = K_s I_m \cos(\omega t - \theta) \vec{u}_r$$



correspondant à une onde sinusoïdale se propageant angulairement à la vitesse angulaire ω dans le sens direct autour de l'axe(Oz).

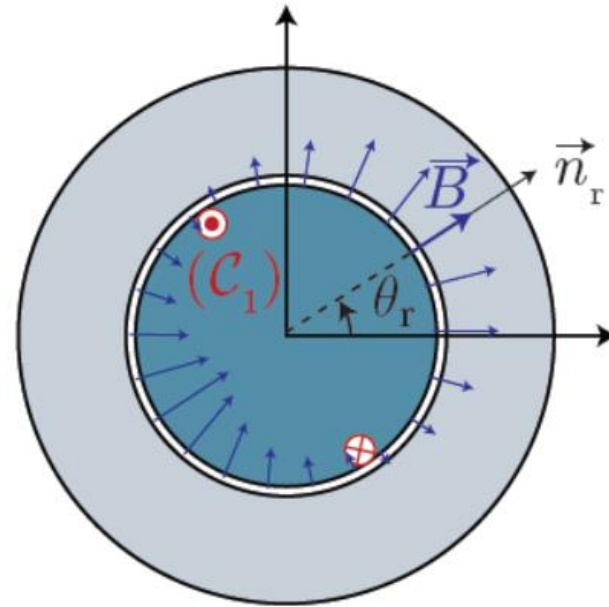
On repère par $\theta_m = \omega t$ l'angle pour lequel la norme du champ magnétique statorique est maximale à l'instant t .

On note l'analogie avec une OPPH se déplaçant dans le sens des x croissants.

d) Champ glissant rotorique

Sur le rotor, on place également un circuit, parcouru cette fois par un courant continu d'intensité I_r , complètement identique à celui créé par une phase du circuit statorique.

$$\vec{B}_r(t) = K_r I_r \cos(\theta - \theta_r(t)) \vec{u}_z$$



où $\theta_r(t)$ est l'angle pour lequel la norme du champ rotorique est maximale.

Si le rotor tourne à la vitesse de rotation Ω , on crée « naturellement » un champ glissant rotorique.

3) Energie électromagnétique

4) Couple électromagnétique

a) Expression

Points forts/points faibles

Les moteurs synchrones sont très présents : TGV Atlantique, ascenseurs, certaines voitures électriques (Prius), etc. Les avantages que l'on peut évoquer sont :

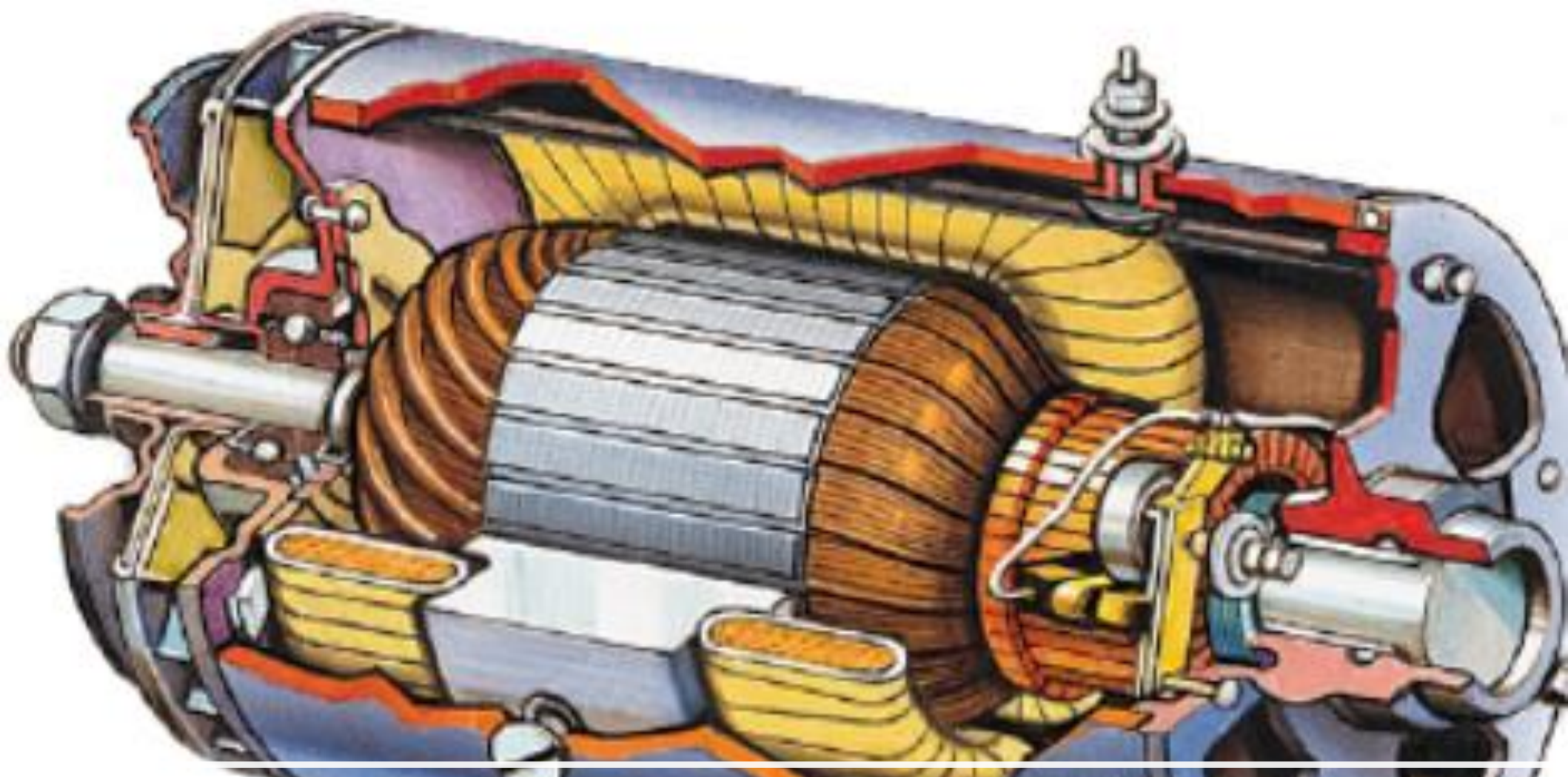
- puissances et couples importants par rapport au volume occupé ;
- Des **rendements très bons** (régulièrement $> 95\%$) ;
- la vitesse de rotation est contrôlée très précisément par la pulsation de l'alimentation, **indépendamment du couple de charge** (par exemple 50 Hz correspond à une vitesse de rotation de 3000 tours/min).

Les inconvénients :

- le **démarrage n'est pas autonome**, il faut soit le lancer avec un autre moteur (à courant continu, par exemple), soit utiliser un **circuit de pilotage** permettant d'augmenter la fréquence des courants statoriques ;



Les alternateurs synchrones sont à la base de la production électrique mondiale, dans toutes les centrales (nucléaires, hydrauliques, à charbon) où des turbines entraînent le rotor ; mais également dans les éoliennes.



Machine à courant continu

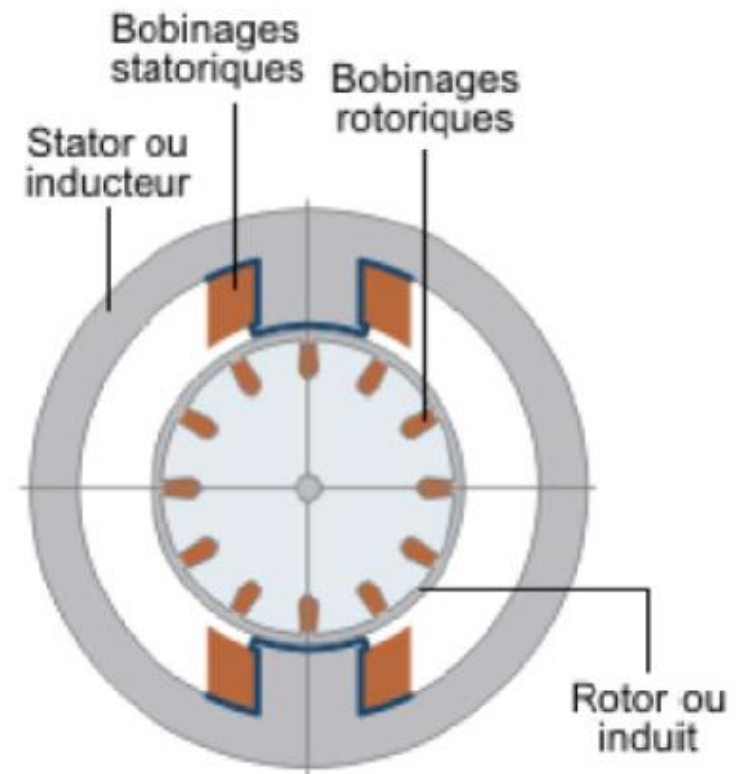
1) Description de la machine

On retrouve le même type de constitution que pour la machine synchrone

le **stator** est constitué soit d'un aimant permanent ou d'un électroaimant avec un enroulement en cuivre autour du noyau de fer doux, parcouru par un courant d'excitation **continu**.

Comparativement à la machine synchrone, il s'agit de l'**inducteur** ;

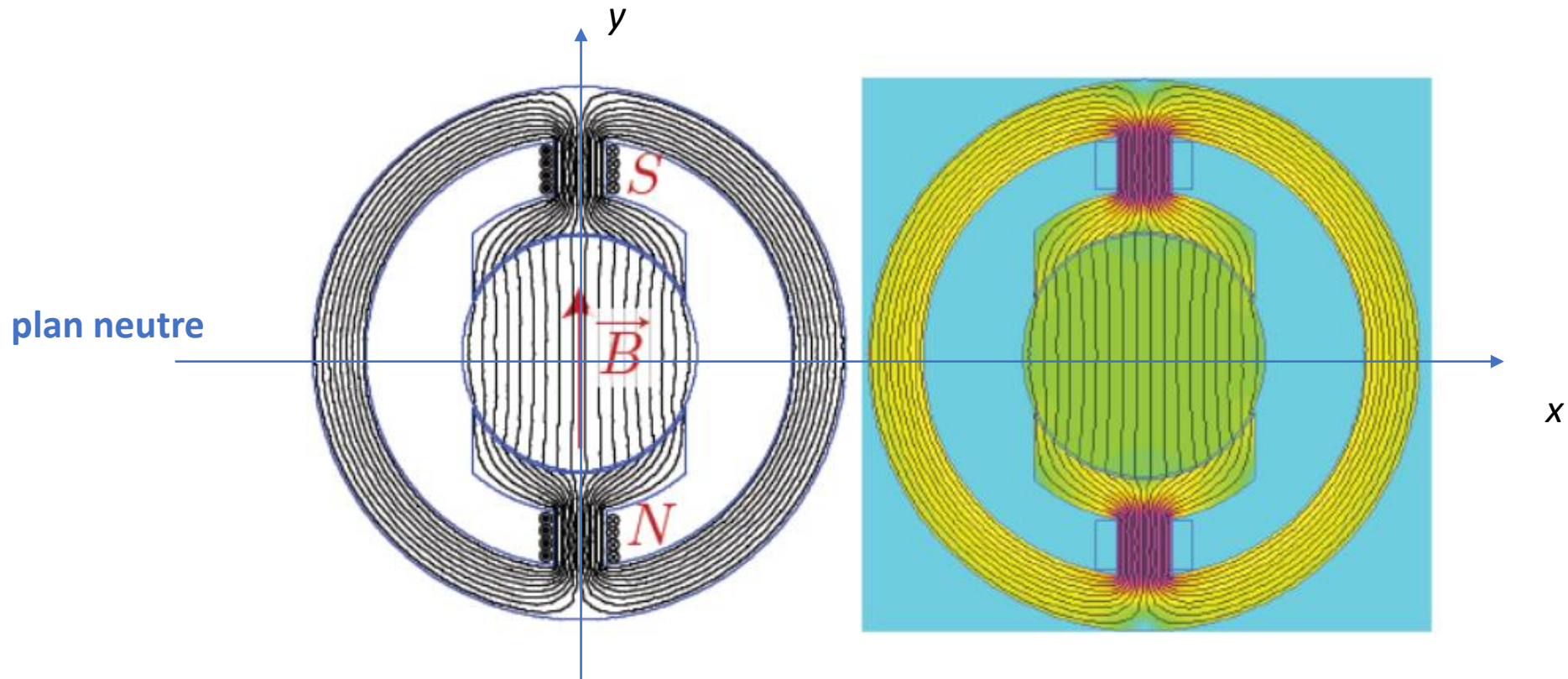
le **rotor** est quant à lui constitué d'un bobinage de cuivre autour d'un noyau de fer doux, alimenté par un courant **continu**. Il constitue le rôle d'**induit**.



Tous les courants sont continus dans une MCC



2) Champ statorique



Le stator, génère dans l'entrefer un champ magnétique bipolaire

$$\vec{B}_s = K_s I_s \vec{u}_y$$

direction moyenne $\vec{n}_s = \vec{u}_y$, et présentant un plan d'antisymétrie (xOz) appelé plan neutre.

Dans une MCC, le champ statorique est stationnaire!



3) Champ rotorique

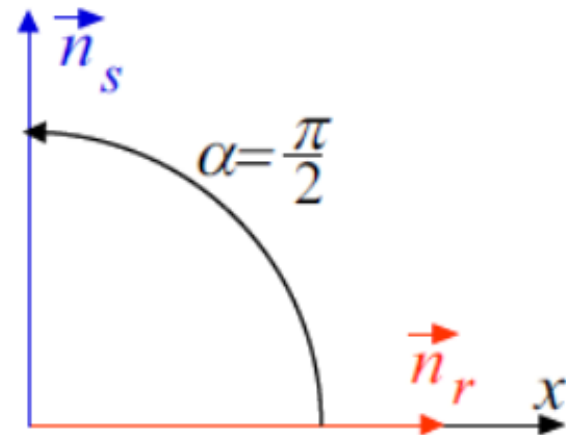
D'après l'analyse de la machine synchrone, pour que le couple moyen exercé sur le rotor soit non nul, les champs statoriques et rotoriques doivent être synchrones.

Le champ statorique étant stationnaire, le champ créé par l'enroulement rotorique doit aussi être **stationnaire**.

Par ailleurs, pour obtenir un couple maximal, champ rotorique et champ statorique doivent être **orthogonaux**.

Il faut donc créer un champ de la forme:

$$\vec{B}_r = K_r I_r \vec{u}_x$$



4) Le collecteur

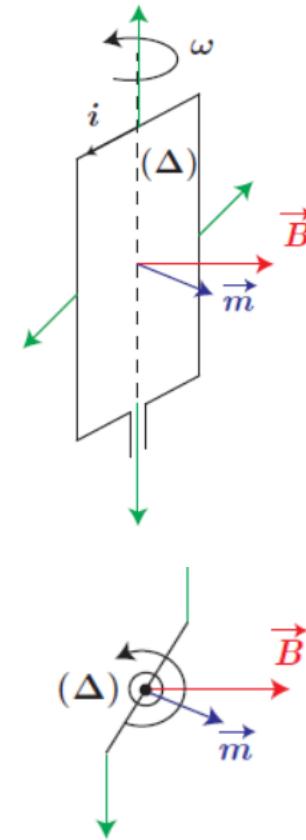
Comment créer un champ de direction fixe avec des enroulements qui tournent?

Considérons une seule spire rotorique traversée par le courant I_r dans le champ stationnaire \vec{B}_s du stator. La spire est décrite par son moment magnétique $\vec{m} = I_r \vec{S}$.

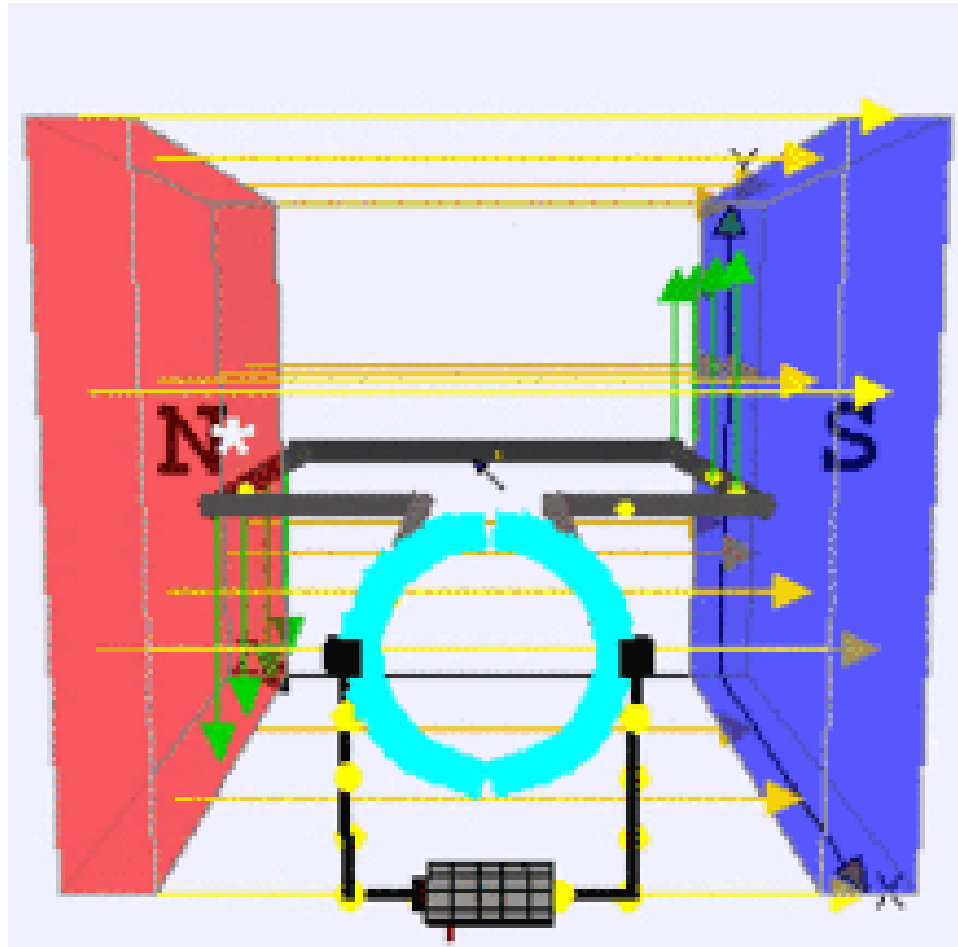
La spire est soumise au couple $\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}_s$ qui tend à aligner \vec{m} et \vec{B}_s .

La spire tend donc **à s'aligner** sur le plan neutre.

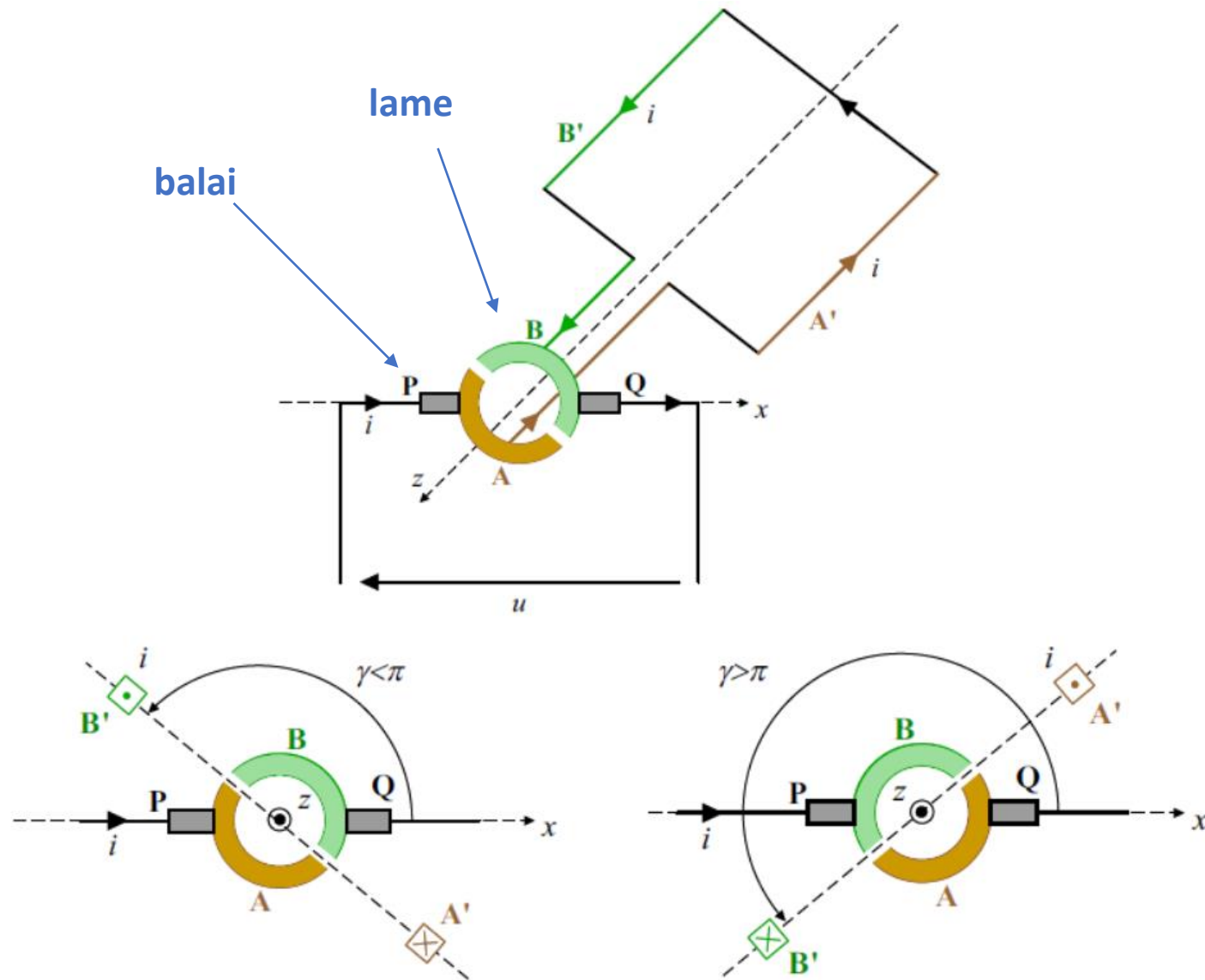
Cette position est **stable**. La spire ne tourne pas.



- Pour faire tourner la spire tout en maintenant le champ statorique constant, il faudrait inverser le sens du courant dans la spire à chaque passage dans le plan neutre. C'est le rôle du **collecteur**.

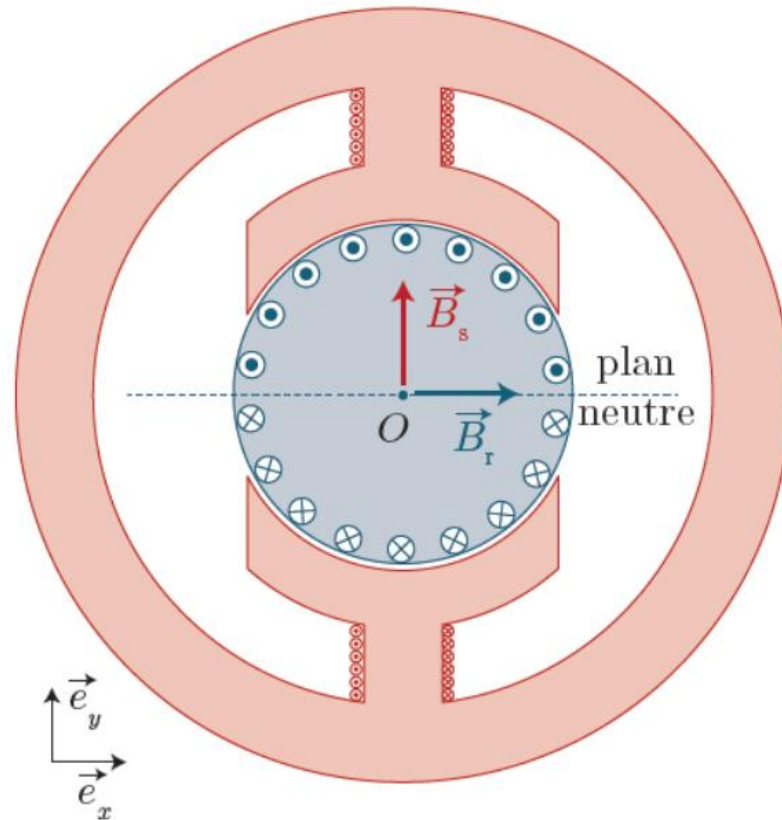


Le collecteur est un commutateur rotatif constitué de deux lames A et B connectées à l'enroulement, et de deux balais P et Q connectés au circuit électrique extérieur.



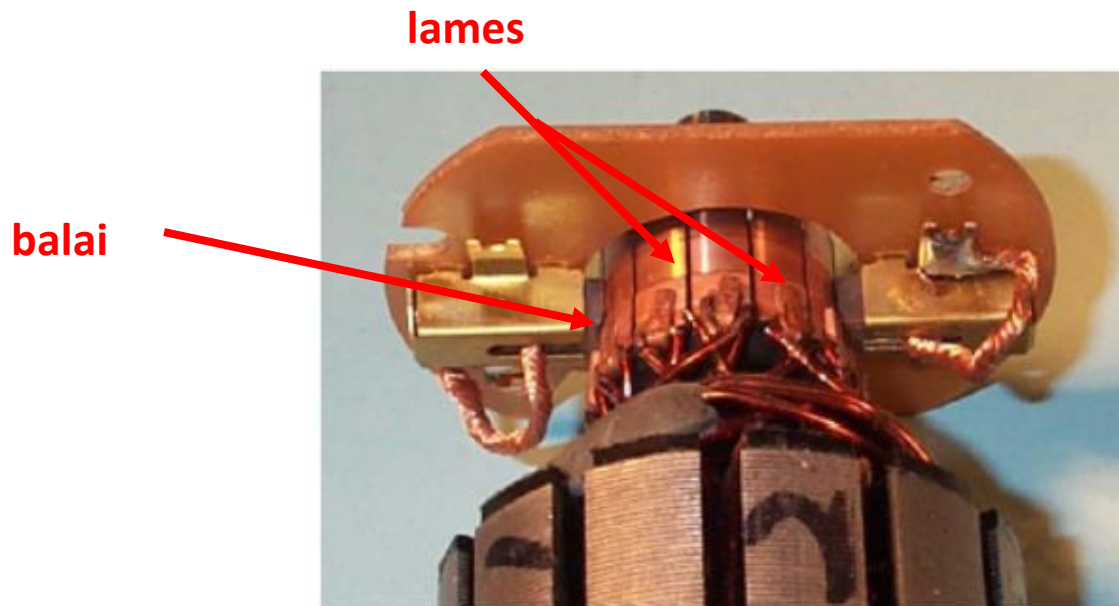
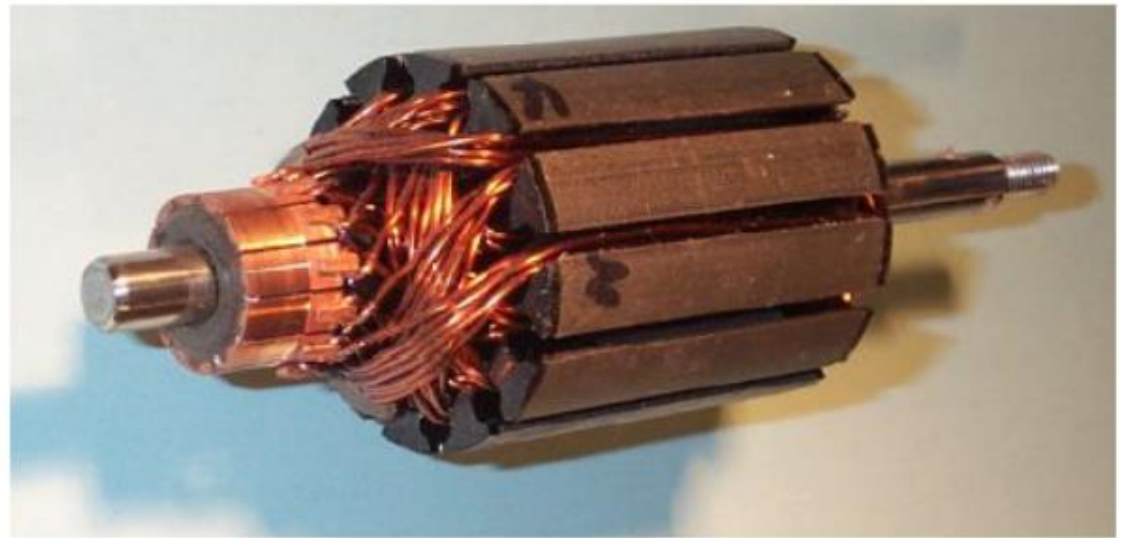
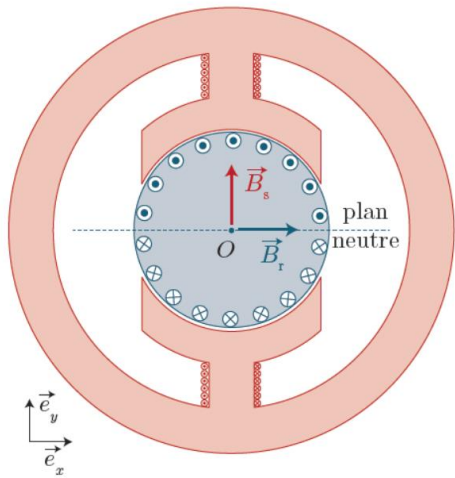
A chaque passage de la spire dans le plan neutre, le sens du courant est inversé!

Pour une machine réelle, il y a N spires enroulées autour du rotor.



Grâce au collecteur, le champ rotorique créé par l'ensemble des spires a toujours la même direction, quelque soit la position angulaire du rotor!

$$\vec{B}_r = K_r I_r \vec{u}_x$$



Notez que le collecteur est le point faible de la MCC par rapport aux autres machines électriques. En effet, le contact glissant entre les balais et les lames provoque une usure régulière des balais réalisés généralement en graphite, cela nécessite un entretien régulier.

5) Couple électromagnétique

On utilisera directement le résultat obtenu sur le cas du moteur synchrone avec $\alpha = \pi/2$:

$$\Gamma = \frac{V}{2\mu_0} K_r K_s I_r I_s$$

On admettra de manière générale:

$$\Gamma = \Phi_0 I_r$$



où Φ_0 est une constante dépendant du courant statorique et plus généralement du flux du champ statorique à travers le rotor.

Dans une MCC, le couple électromagnétique exercé sur le rotor est commandé par le courant traversant le rotor.



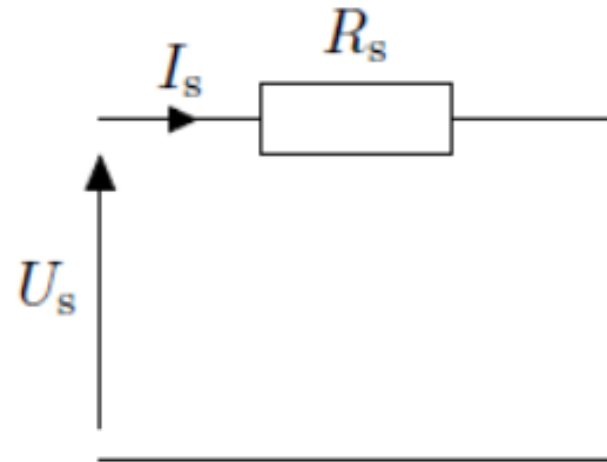
6) Modélisation électrique

a) Modélisation du stator

Au niveau du stator, la répartition spatiale des deux champs magnétiques est indépendante du temps, donc on n'a ni phénomène d'auto-induction, ni couplage par mutuelle.

On a simplement une résistance parcourue par I_s :

(EES) $U_s = R_s I_s$ ★★

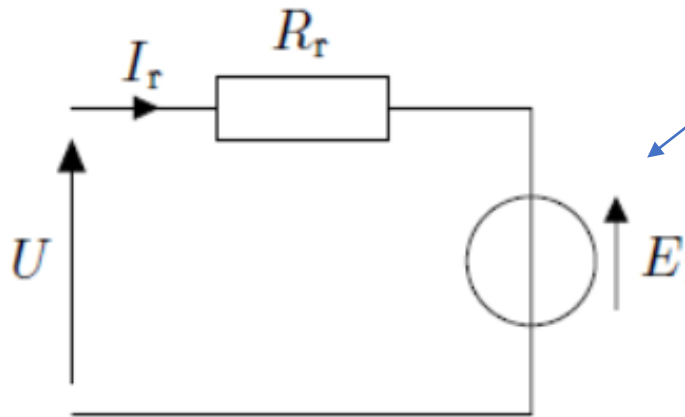


b) Modélisation du rotor

Au niveau du rotor, ce dernier tourne dans le champ stationnaire du stator, le flux de celui-ci à travers le circuit rotorique est non nul. Il y a donc un effet d'induction et une force électromotrice E .

En fonctionnement moteur, on utilise plutôt **la force contreélectromotrice** $E' = -E$.

$$E' = + \frac{d\Phi_{s \rightarrow r}}{dt}$$



Dû à l'action du stator sur le rotor

(EER)

$$U_r = R_r I_r + E'$$



C'est pour cela que le **stator est l'inducteur**, et le **rotor est l'induit**, dans une MCC.

c) Bilan énergétique

On effectue le même travail que pour le moteur synchrone:

1) Bilan électrique

La puissance électrique reçue par le système vaut:

2) Bilan mécanique

Considérons le système en régime permanent et soumis à une charge exerçant un couple résistant $-\Gamma_c$

3) Premier principe à la machine

On en déduit

$$E' = \Phi_0 \Omega$$



Dans une MCC, la vitesse de rotation est commandée par la fcém du rotor, et donc par la tension aux bornes du rotor



Contrôle d'une MCC

Le moteur à courant continu a l'avantage d'être facilement contrôlable.

Pour une MCC en fonctionnement moteur, on modifie :

- la vitesse angulaire, à courant induit fixé I_r , en modifiant la tension U :

$$E' = \Phi_0 \Omega$$

- le couple, à tension d'induit U fixée, en modifiant l'intensité I_r

$$\Gamma = \Phi_0 I_r$$

d) Réversibilité

Les équations précédentes sont valables quelque soit le mode de fonctionnement de la machine (moteur ou alternateur). Seul les signes changent.

Pour un moteur:

Γ est positif, Γ_c est négatif

Ω est positif

E' est positif

Pour un alternateur:

Γ est négatif, Γ_c est positif

Ω est négatif

E' est négatif

7) Etude de la MCC en régime non permanent