

# Conversion de puissance électromécanique

Niveau : CPGE/L2

Prérequis : lois de la mécanique, milieux magnétiques, induction, électrocinétique

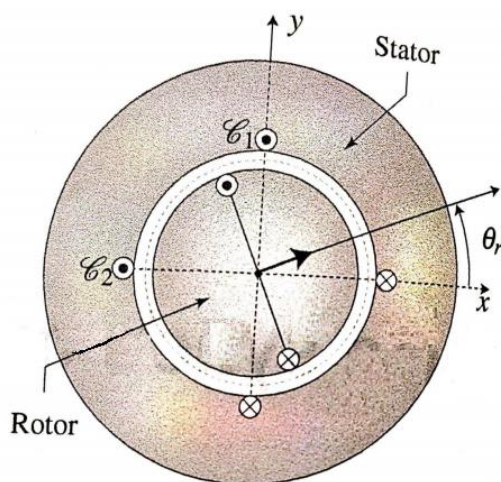
## Introduction

L'énergie que l'on utilise au quotidien est exclusivement transportée sous forme électrique. Cependant elle est produite par un travail mécanique comme une turbine et elle est souvent utilisée sous forme de travail mécanique (TGV, aspirateur...). Entre toutes ces étapes il y a donc besoin de conversion électromécanique. Ce procédé essentiel va être développé dans cette leçon autour d'un exemple qui est la machine synchrone.

Un convertisseur électromécanique est un actionneur/moteur/générateur qui met en jeu le couplage entre les phénomènes mécaniques et électriques, en présence d'un champ magnétique.

## I Description de la machine synchrone

### 1) Constitution d'une machine tournante

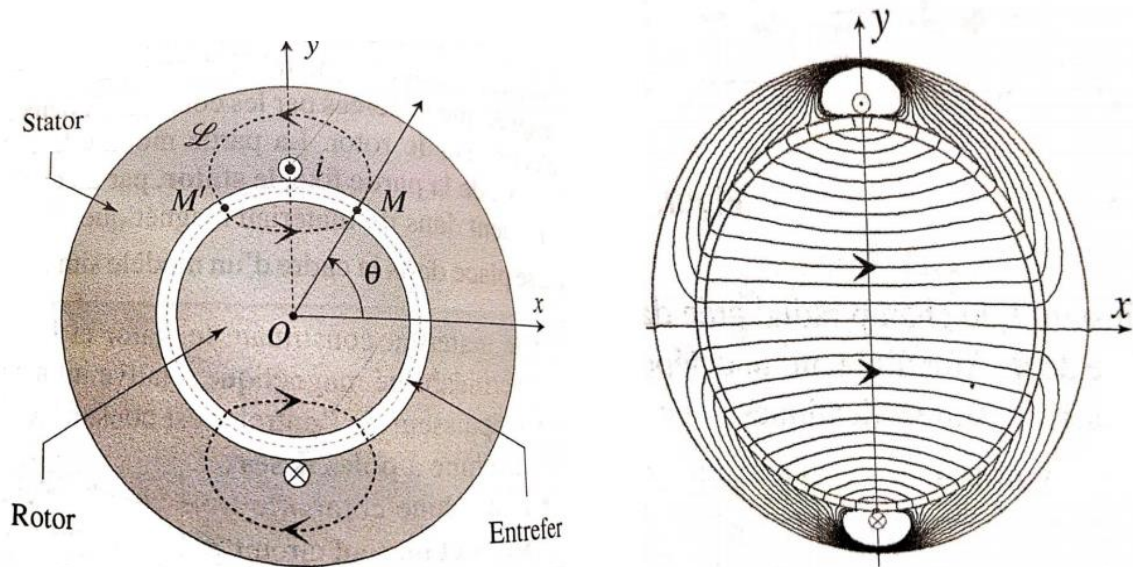


La machine synchrone est composée de deux parties en matériau magnétique: On fait l'hypothèse que ce matériau est idéal ( $\mu_r \rightarrow \infty$ ). Le stator est fixe alors que le rotor va pouvoir tourner. Entre les deux il y a un espace vide appelé entrefer.

Le stator comprend des bobinages parcourus par des courants imposés par des sources extérieures, ce qui crée dans l'entrefer un champ magnétique radial tournant. S'il y a 2 sources on parlera de machine diphasée (on se limitera à ça dans la leçon), s'il y a 3 sources on parlera de machine triphasée. Le bobinage du rotor est parcouru par un courant constant qui crée un champ magnétique radial dans l'entrefer. On dit qu'un champ est glissant s'il est de la forme :  $\vec{B} = B_0 \cos(\omega t - p\theta)$ ,  $p$  est le nombre de paires de pôles.

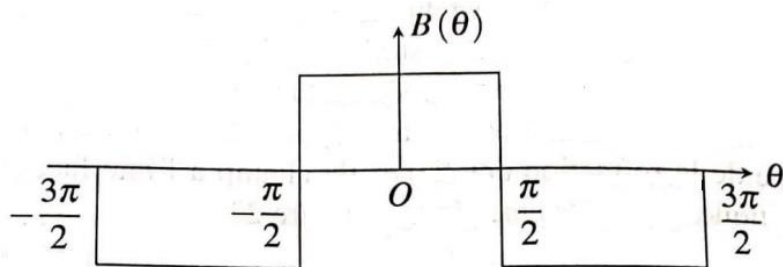
## 2) Champ statorique

On considère une spire du stator et on cherche la forme des lignes de champ qu'elle crée.

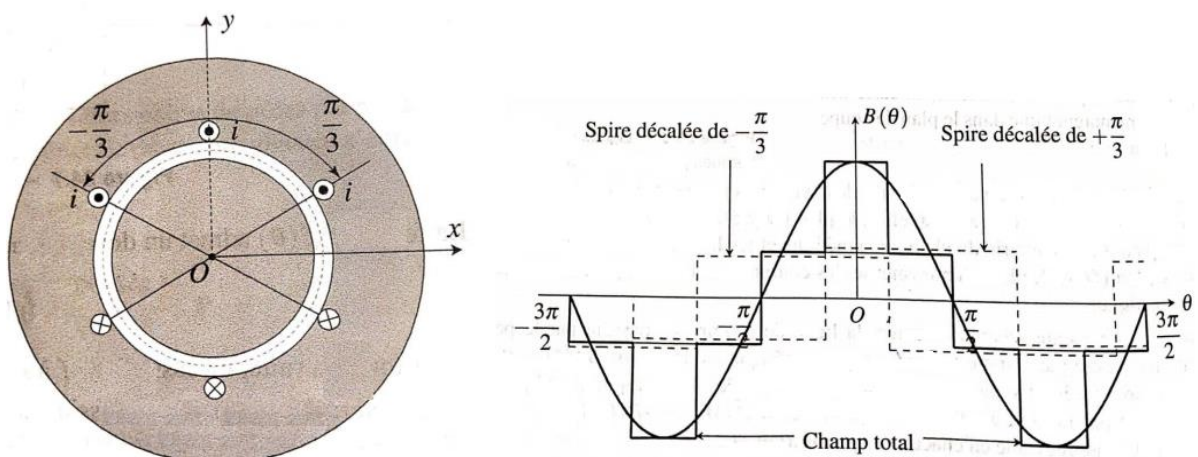


On applique le théorème d'Ampère à la ligne de courant.  $H$  est nul sur les portions de la ligne de champ dans le matériau magnétique, car il est considéré idéal. Avec la symétrie du système, on a pour  $\theta \in ]-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}[$ ,  $B(\theta) = \frac{\mu_0 i}{2e}$ , avec  $e$  l'entrefer.

Par symétrie, pour  $\theta \in ]\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}[$ ,  $B(\theta) = -\frac{\mu_0 i}{2e}$

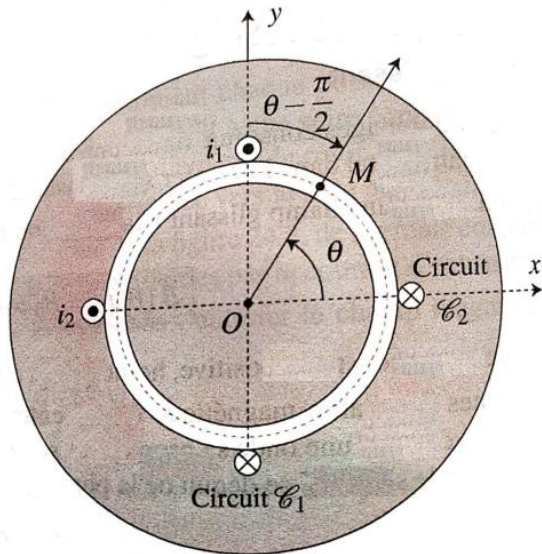


Si on ajoute 2 spires déphasées de  $\frac{\pi}{3}$  et  $-\frac{\pi}{3}$  par rapport à la première spire, on obtient :



On peut en conclure que si on ajoute un grand nombre de spires, le champ est :  $B(\theta) = ki(t)\cos(\theta)$ ,  $k$  dépend du matériau du stator, de la géométrie des spires et de leur nombre. L'ensemble de ces spires forment un bobinage qui est parcouru par un seul et même courant.

Mais pour faire un champ tournant, on ajoute un circuit au stator.



Le premier circuit crée un champ :  $\vec{B}_{S1} = ki_1(t)\cos(\theta)\vec{e}_r$

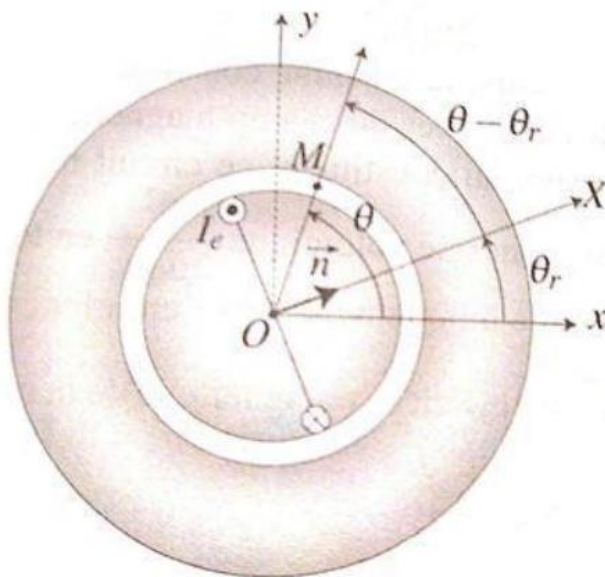
Le deuxième circuit crée un champ :  $\vec{B}_{S2} = ki_2(t)\cos(\theta - \frac{\pi}{2})\vec{e}_r$

Les intensités sont également déphasées :  $i_1(t) = I \cos(\Omega t)$  et  $i_2(t) = I \cos(\Omega t - \frac{\pi}{2})$

Le champ créé par le stator est la somme des deux champs :  $\vec{B}_S = kI \cos(\Omega t - \theta)\vec{e}_r$

On a donc un champ glissant, avec  $p = 1$ .

### 3) Champ rotorique



Les bobinages dans le rotor sont parcourus par un courant  $I_r$  constant qui crée un champ :

$$\vec{B}_r = k' I_r \cos(\theta - \theta_r) \vec{e}_r = k' I_r \cos(\theta - \omega t - \theta_0) \vec{e}_r$$

## II Principe de la machine synchrone

### 1) Énergie emmagasinée dans l'entrefer

$$E_{mag} = \int_R^{R+e} \int_0^{2\pi} \int_0^L \frac{B^2}{2\mu_0} d\tau$$

$$E_{mag} = E_{mag,s} + E_{mag,r} + E_{mag,couplage}$$

$$E_{mag} = \frac{\pi L R e k^2 I_s^2}{2\mu_0} + \frac{\pi L R e k'^2 I_r^2}{2\mu_0} + \frac{\pi L R e k k' I_s I_r}{\mu_0} \cos(\Omega t - \omega t - \theta_0)$$

$$E_{mag} = \frac{\pi L R e}{\mu_0} \left( \frac{k^2 I_s^2}{2} + \frac{k'^2 I_r^2}{2} + k k' I_s I_r \cos(\Omega - \theta_r) \right)$$

Pour une machine synchrone, le couple électromécanique s'écrit :

$$C = \frac{\partial E_{mag}}{\partial \theta_r} = \frac{\pi L R e k k' I_s I_r}{\mu_0} \sin(\Omega t - \theta_r)$$

### 2) Synchronisme

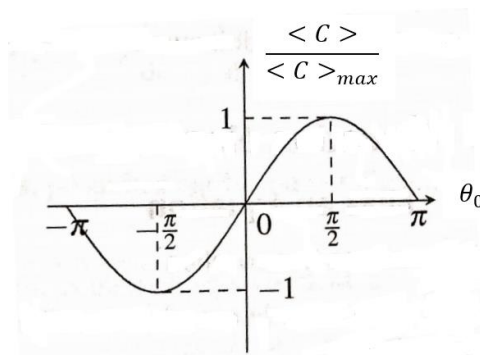
On cherche à avoir un couple moyen non nul. Or  $\theta_r = \omega t + \theta_0$ , donc la condition précédente est réalisée si  $\Omega = \omega$  (condition de synchronisme).

Si  $\Omega \neq \omega$ , alors  $\langle C \rangle = 0$ .

$$\langle C \rangle = \frac{\pi L R e k k' I_s I_r}{\mu_0} \sin(\theta_0)$$

### 3) Réversibilité

La machine peut fonctionner en mode alternateur ou moteur selon le signe de  $\theta_0$ .

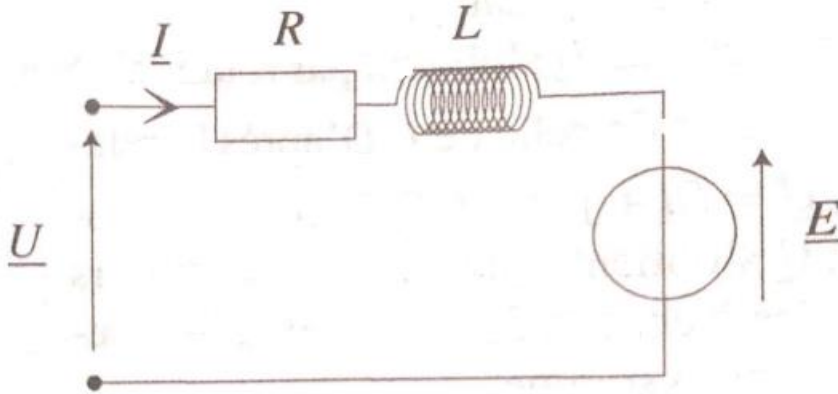


Si  $\langle C \rangle > 0$  : fonctionnement moteur, le champ rotorique est en retard sur le champ statorique.

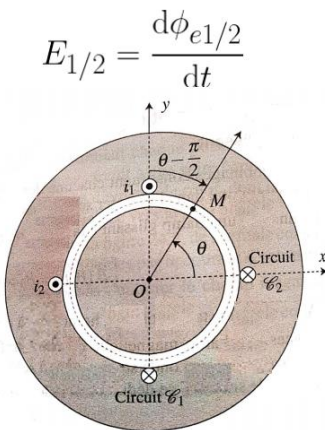
Si  $\langle C \rangle < 0$  : fonctionnement générateur, le champ statorique est en retard sur le champ rotorique.

### III Bilan de puissance

Modèle électrique d'une phase :



$$\begin{cases} u_1 = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + E_1 \\ u_2 = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} + E_2 \end{cases}$$



$$\phi_{e,1} = N_s \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \vec{B}_r \cdot \vec{e}_r R h d\theta$$

$$\phi_{e,2} = N_s \int_0^{\pi} \vec{B}_r \cdot \vec{e}_r R h d\theta$$

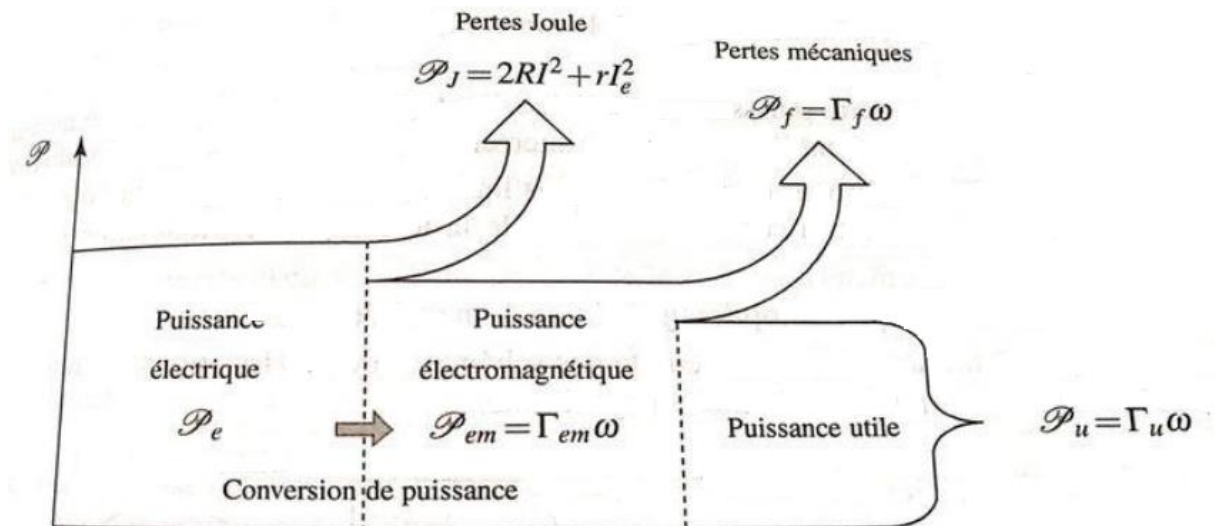
$$\begin{cases} \phi_{e,1} = \phi_0 \sqrt{2} \cos(\omega t - \alpha) \\ \phi_{e,2} = \phi_0 \sqrt{2} \cos(\omega t - \alpha - \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

Avec :  $\phi_0 = \frac{2k' N_s I_r R L}{\sqrt{2}}$

$$p_e(t) = u_1 i_1 + u_2 i_2 + U_e I_e$$

$$\Rightarrow p_e(t) = Ri_1^2 + Ri_2^2 + rI_e^2 + \underbrace{\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Li_1^2 + \frac{1}{2} Li_2^2 \right)}_{=0} + E_1 i_1 + E_2 i_2$$

$$\mathfrak{P}_e = \mathfrak{P}_J + \mathfrak{P}_{em}$$



La puissance électrique qui est fournie au moteur est convertie en pertes Joule et en puissance électromagnétique. Celle-ci est convertie en puissance mécanique et en perte par frottement.

## Conclusion

D'autres systèmes permettent de convertir l'énergie, c'est le cas notamment de la machine asynchrone. Elle a la même organisation statorique mais son rotor fonctionne différemment. Par ailleurs, du fait de la condition de synchronisme, la machine synchrone ne peut démarrer seule. On peut alors être amené à utiliser des petits moteurs asynchrones pour l'entraîner.

## Bibliographie

- Tout en un PSI, PSI\*, Dunod
- H Prépa, électrotechnique