Thème I. Ondes et signaux (Induction)

Chapitre n°24 Actions d'un champ magnétique

Pierre-Simon Laplace (1749-1827), physicien, astronome et mathématicien français a travaillé sur les probabilités, le mouvement des astres, sur la capillarité, la force à laquelle un fil parcouru par un courant électrique est soumis ...

Pré-requis

- PCSI
  - Chapitre n°15. Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique ou magnétique.
  - Chapitre n°18. Mouvement d'un solide.
  - Chapitre n°23. Champ magnétique.

Objectifs du chapitre

Introduction : Au chapitre 23, nous avons identifié les sources de champ magnétique : les aimants et les circuits traversés par un courant électrique. En outre, au chapitre 15, nous avons étudié le mouvement de particules chargées dans un champ magnétique : c'est la force de Lorentz magnétique, $\overrightarrow{F_m} = q\overrightarrow{v} \wedge \overrightarrow{B}$, qui est responsable de ce mouvement. Ici, on s'intéresse aux conséquences macroscopiques de cette force sur les systèmes possédant un moment magnétique : circuits électriques traversés par un courant électrique ou aimants permanents. On se limitera à des champs magnétiques uniformes à l'échelle de la taille des systèmes étudiés.
Objectifs du chapitre : introduire la force de Laplace, exprimer sa résultante, sa puissance et/ou son moment dans le cas où le système est une barre conductrice ou un cadre rectangulaire traversés par un courant ou un aimant.

Plan du cours

Programme officiel

Notions et contenus	**Capacités exigibles**
1.7. Induction et forces de Laplace	
1.7.2. Actions d'un champ magnétique	
Densité linéique de la force de Laplace dans le cas d'un élément de courant filiforme.	Différencier le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme.
Résultante et puissance des forces de Laplace.	Établir et citer l'expression de la résultante des forces de Laplace dans le cas d'une barre conductrice placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire. Exprimer la puissance des forces de Laplace
Couple et puissance des actions mécaniques de Laplace dans le cas d'une spire rectangulaire, parcourue par un courant, en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.	Établir et exploiter l'expression du moment du couple subi en fonction du champ magnétique extérieur et du moment magnétique. Exprimer la puissance des actions mécaniques de Laplace.
Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant. Positions d'équilibre et stabilité.	[TP] Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'action d'un champ magnétique uniforme sur une boussole.
Effet moteur d'un champ magnétique tournant.	[TP] Créer un champ magnétique tournant à l'aide de deux ou trois bobines et mettre en rotation une aiguille aimantée.

Ai-je bien appris mon cours ?

1 – 🙂– ☹️– Donner l'expression de la force de Laplace qui s'exerce sur une portion d'un circuit filiforme parcouru par un courant électrique et plongé dans un champ magnétique extérieur.

2 – 🙂– ☹️– Établir l'expression de la résultante des forces de Laplace qui s'exerce sur une barre conductrice plongée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire.

3 – 🙂– ☹️– Exprimer la puissance des forces de Laplace qui s'exerce sur une barre conductrice plongée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire.

4 – 🙂– ☹️– Donner l'expression du moment du couple subi par une spire rectangulaire, parcourue par un courant, en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.

5 – 🙂– ☹️– Donner l'expression de la puissance des actions mécaniques de Laplace qui s'exercent sur cette spire.

6 – 🙂– ☹️– Établir l'expression du moment du couple subi par cette spire.

I Force de Laplace

I.1 Observations expérimentales

Expérience

On utilise le dispositif tiré du nom de Pierre-Simon de Laplace, mathématicien, astronome et physicien français (1749 - 1827). On place une tige cylindrique et conductrice sur deux rails conducteurs et horizontaux dans l'entrefer d'un aimant en U qui crée un champ magnétique stationnaire et (quasi) uniforme.

https://vimeo.com/169335705
https://www.youtube.com/watch?v=QK_irRFTM-U

Q1. On fait circuler un courant permanent dans les barres et la tige. Qu'observez-vous ?

Q2. On change le sens du courant. Qu'observez-vous ?

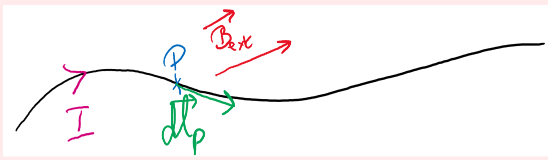
Q3. On tourne l'aimant en U de 180°. Quelle grandeur modifie-t-on et comment ? Qu'observez-vous ?

I.2 Force de Laplace

<u>Capacité exigibles</u> : **Différencier le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme.**

À retenir : Force de Laplace

Soit une portion MN d'un circuit filiforme fermé parcouru par un courant électrique I, plongée dans un champ magnétique extérieur $\overrightarrow{B_{\text{ext}}}$.
On définit l'élément de longueur $\mathrm{d}\overrightarrow{\ell_P}$ dirigé dans le sens du courant I, et tangent au conducteur en P.



L'élément de conducteur $\mathrm{d}\overrightarrow{\ell_P}$ au niveau du point P subit la force élémentaire de Laplace $\mathrm{d}\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}}(P)$:

$$\mathrm{d}\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}}(P) = I\mathrm{d}\overrightarrow{\ell_P} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}(P)}$$

Le fil conducteur MN subit la force de Laplace $\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}}$:

$$\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = \int_{P \in \widehat{MN}} \left(I\mathrm{d}\overrightarrow{\ell_P} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}(P)} \right)$$

Si le conducteur est fermé, alors on note la force de Laplace :

$$\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = \oint_{P \in \text{circuit fermé}} I\mathrm{d}\overrightarrow{\ell_P} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}(P)}$$

Les intégrales doivent être calculées <u>dans le sens du courant</u>.

Attention – NE CONFONDEZ PAS :

le champ magnétique propre créé par le circuit lui-même, et le champ magnétique extérieur imposé au circuit par un élément extérieur au circuit.

Attention – NE CONFONDEZ PAS :

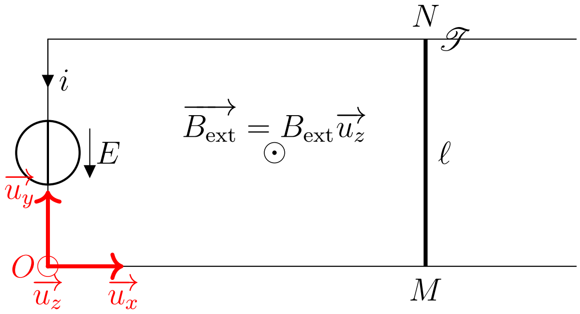
- Force de Lorentz : force qui s'exerce sur une particule chargée en mouvement dans $(\overrightarrow{E}, \overrightarrow{B})$.
- Force de Laplace : force qui s'exerce sur un conducteur parcouru par un courant électrique plongé dans $\overrightarrow{B}$.

(Physiquement les deux ont la même origine ...)

II Barre conductrice en translation

II.1 Position du problème

Une tige $\mathscr{T}$, conductrice, de longueur ℓ est posée sur deux rails, eux aussi conducteurs, nommés rails de Laplace.
L'ensemble forme un circuit électrique fermé, parcouru par un courant i, créé par un générateur de fem E.
L'ensemble est plongé dans un champ magnétique extérieur uniforme et permanent $\overrightarrow{B_{\text{ext}}} = B_{\text{ext}}\overrightarrow{u_z}$, orthogonal au plan des rails.



II.2 Résultante et puissance

<u>Capacité exigibles</u> : **Établir et connaître l'expression de la résultante des forces de Laplace dans le cas d'une barre conductrice placée dans le champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire.**

Résultante des forces de Laplace dans le cas d'une barre conductrice

On souhaite exprimer ici la résultante de la force de Laplace s'exerçant sur la tige $[MN]$.

Q1. Donner l'expression de la force de Laplace s'exerçant sur la barre $[MN]$ à l'aide d'une intégrale.
On fera attention aux bornes de l'intégrale qui doivent être dans le sens du courant.

Q2. Exprimer $\text{d}\overrightarrow{\ell_P}$ et $\overrightarrow{B_{\text{ext}}}$ dans la base cartésienne.

Q3. Exprimer $\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}}$ en fonction de i, ℓ, B_{ext} et d'un vecteur unitaire.

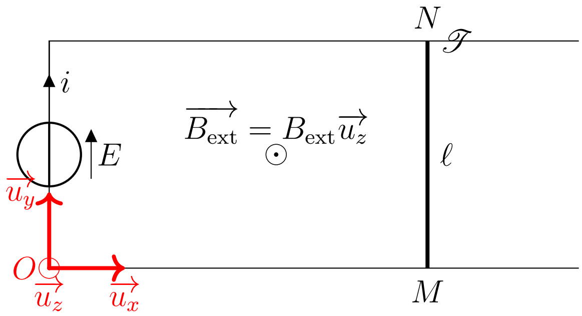
Q4. Exprimer la puissance de la force de Laplace s'exerçant sur la barre précédente.

Exercice de cours A

On change l'orientation du circuit.

Q1. Exprimer la force de Laplace qui s'exerce sur la tige.

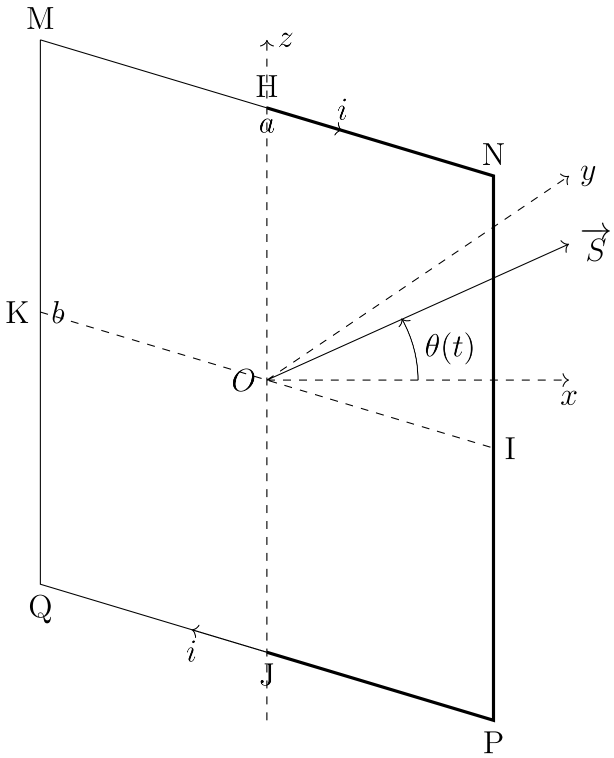
Q2. Exprimer la puissance de la force de Laplace s'exerçant sur la barre précédente.

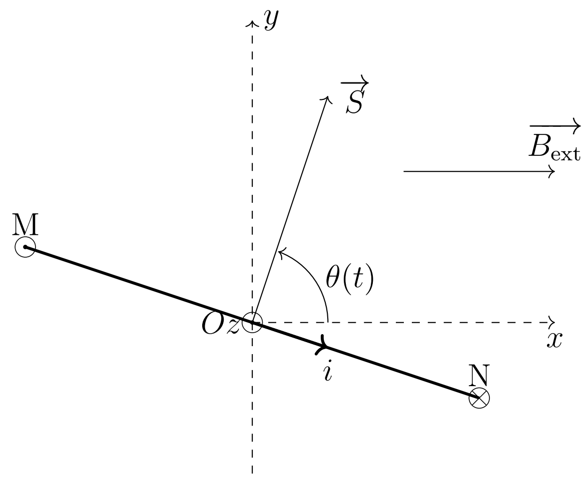


III Spire rectangulaire en rotation

III.1 Position du problème

On étudie une spire rectangulaire MNPQ parcourue par un courant i, qui peut tourner autour de l'axe (Oz). On note $MN = PQ = a$, $NP = QM = b$ et $S = ab$. La spire est plongée dans un champ magnétique $\overrightarrow{B_{\text{ext}}} = B_{\text{ext}}\overrightarrow{u_x}$ permanent et uniforme, créé par un environnement extérieur.
Objectif : déterminer la résultante et le moment par rapport à O de l'action mécanique que subit la spire de la part du champ magnétique.





Vue de dessus

III.2 Résultante

La résultante des forces de Laplace s'exerçant sur la spire rectangulaire est $\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = \oint_{\text{spire}} \mathrm{d}\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = \oint_{\text{spire}} i\mathrm{d}\overrightarrow{\ell} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}}$
Le vecteur champ magnétique étant uniforme sur le cadre, on peut le sortir de l'intégrale, i de même.
Ainsi : $\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = i\left(\oint_{\text{spire}} \mathrm{d}\overrightarrow{\ell}\right) \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}} = i\left(\int_M^N \mathrm{d}\overrightarrow{\ell} + \int_P^Q \mathrm{d}\overrightarrow{\ell} + \int_N^P \mathrm{d}\overrightarrow{\ell} + \int_Q^M \mathrm{d}\overrightarrow{\ell}\right) \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}}$
Or : $\int_M^N \mathrm{d}\overrightarrow{\ell} = -\int_P^Q \mathrm{d}\overrightarrow{\ell}$ et $\int_N^P \mathrm{d}\overrightarrow{\ell} = -\int_Q^M \mathrm{d}\overrightarrow{\ell}$
Les intégrales précédentes s'annulent deux à deux, donc

La résultante des forces de Laplace s'exerçant sur une spire rectangulaire plongée dans un champ magnétique extérieur uniforme est nulle.

III.3 Moment du couple

<u>**Capacité exigibles**</u> : **Établir et connaître l'expression du moment du couple subi en fonction du champ magnétique extérieur et du moment magnétique de la spire rectangulaire.**

Moment du couple subi par la spire rectangulaire

Q1. Exprimer le moment de l'action mécanique de Laplace subie par la spire, puis le réécrire sous la forme de la somme de quatre intégrales.

Sur chaque côté de la spire, la force élémentaire $\mathrm{d}\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}}$ s'exerçant sur $\mathrm{d}\overrightarrow{\ell_A}$ est uniforme, indépendante de la position sur ce côté de la spire. Ainsi, le **moment résultant de Laplace s'exerçant sur un côté est égal au moment de la résultante des forces s'exerçant au milieu du côté** considéré.

Q2. Montrer que les moments des actions de Laplace s'exerçant sur $[MN]$ et $[PQ]$ sont nuls.

Q3. Exprimer le moment des actions de Laplace s'exerçant sur $[NP]$ en fonction de i, a, b, B_{ext}, θ et $\overrightarrow{u_z}$. En déduire le moment s'exerçant sur $[QM]$.

Q4. En déduire le moment résultant des actions mécaniques de Laplace en fonction de i, S, B_{ext}, θ et $\overrightarrow{u_z}$.

Q5. Montrer que le moment précédent est égal à $\overrightarrow{\mathcal{M}} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}}$.

III.4 Puissance du couple

<u>Capacité exigibles</u> : **Établir et connaître l'expression de la puissance du couple subi en fonction du champ magnétique extérieur et du moment magnétique de la spire rectangulaire.**

Puissance du couple

Q1. Rappeler l'expression de la puissance d'une action mécanique s'exerçant sur un solide en rotation autour d'un axe fixe.

Q2. En déduire l'expression de la puissance des actions mécaniques de Laplace s'exerçant sur la spire étudiée précédemment.

À retenir : Actions mécaniques de Laplace sur le cadre en rotation

Les actions mécaniques de Laplace s'exerçant sur

- une spire plane,
- en rotation autour d'un axe de symétrie $\Delta = (O; \overrightarrow{u_\Delta})$ de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés, avec le vecteur de rotation $\overrightarrow{\Omega} = \omega \overrightarrow{u_\Delta} = \dot{\theta} \overrightarrow{u_\Delta}$,
- parcourue par un courant i,
- de moment magnétique $\overrightarrow{\mathcal{M}} = i\,\overrightarrow{S}$,
- et placée dans un champ magnétique $\overrightarrow{B_{\text{ext}}}$ extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe de rotation.

sont un **couple**, de

- **Moment du couple :**

$$\overrightarrow{\Gamma_{\mathscr{L}}} = \overrightarrow{\mathcal{M}} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}} = i\,\overrightarrow{S} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}}$$

Par abus de langage, on parlera souvent du « couple » plutôt que du « moment du couple ».

- **Puissance :**

$$\mathscr{P}_{\mathscr{L}} = \Gamma_{\mathscr{L}} \times \omega$$

REMARQUES

Si le cadre en rotation est constitué de N spires identiques parcourues par le même courant d'intensité i, le moment magnétique s'écrit $\overrightarrow{\mathcal{M}} = N i\,\overrightarrow{S}$, et donc le moment du couple s'écrit

$$\boxed{\overrightarrow{\Gamma_{\mathscr{L}}} = N i\,\overrightarrow{S} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}}}$$

IV Action d'un champ magnétique sur un aimant

IV.1 Action d'un champ magnétique sur une boussole

<u>Capacité exigible</u> : **Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant.**

À retenir : Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant

Un aimant de moment magnétique $\overrightarrow{\mathcal{M}}$ plongé dans un champ magnétique extérieur uniforme $\overrightarrow{B_{\text{ext}}}$ est soumis à l'action mécanique de moment

$$\overrightarrow{\Gamma} = \overrightarrow{\mathcal{M}} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}}$$

Expérience

Expérimentalement, on observe qu'une boussole (qui est un petit aimant), de moment magnétique $\overrightarrow{\mathcal{M}}$ s'oriente dans le sens du champ magnétique dans lequel elle est plongée.

La position pour laquelle le moment magnétique $\overrightarrow{\mathcal{M}}$ et champ magnétique extérieur uniforme $\overrightarrow{B_{\text{ext}}}$ sont colinéaires et de même sens est une position d'$\boxed{\text{équilibre stable}}$.

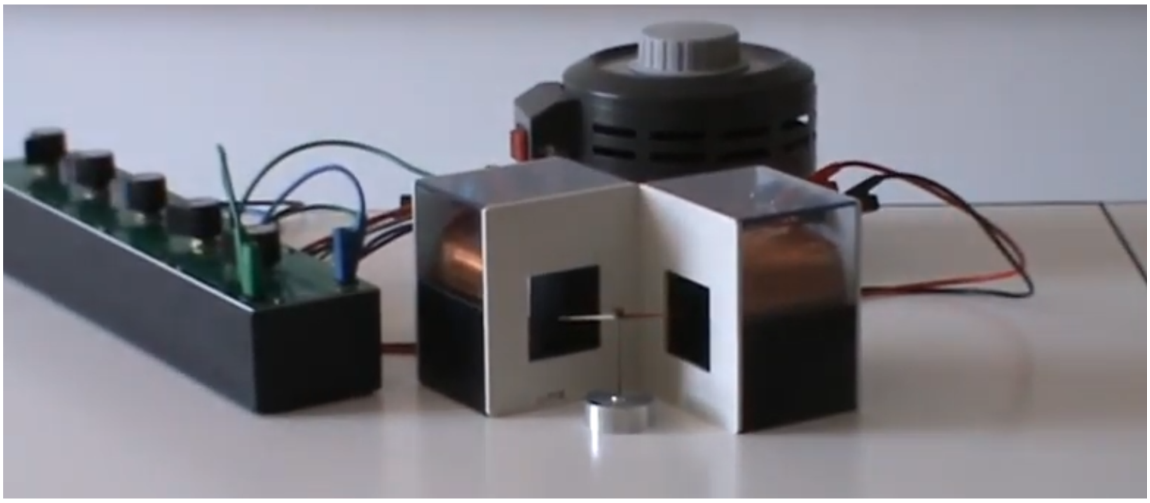
Si on écarte légèrement la boussole de cette position d'équilibre, elle oscillera autour de la position d'équilibre stable (c'est-à-dire du sens du champ magnétique extérieur) à une fréquence dépendant du moment magnétique de la boussole et du champ magnétique.

IV.2 Effet moteur d'un champ magnétique tournant

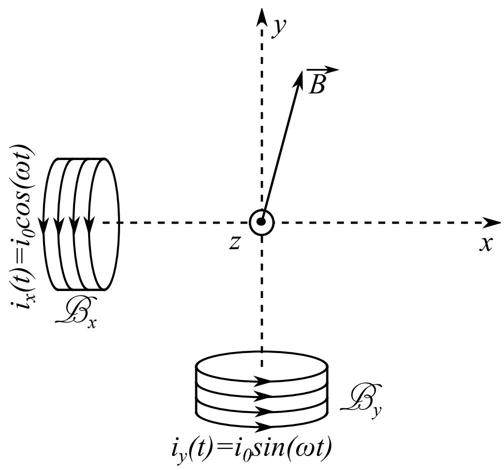
<u>Capacité exigible</u> : **Créer un champ magnétique tournant à l'aide de deux ou trois bobines et mettre en rotation une aiguille aimantée.**

Expérience : Création d'un champ tournant

https://www.youtube.com/watch?v=BmJTWr8Fbqk



Deux bobines $\mathscr{B}_x$ et $\mathscr{B}_y$ identiques d'axes orthogonaux entre eux, sont alimentées par des courants sinusoïdaux de même pulsation ω et de même amplitude i_0. Les deux courants sont en quadrature de phase.



Ces deux bobines créent chacune un champ magnétique en O :

— La bobine $\mathscr{B}_x$ crée le champ $\overrightarrow{B_x} = Ki_x(t)\overrightarrow{u_x} = Ki_0\cos(\omega t)\overrightarrow{u_x}$

— La bobine $\mathscr{B}_y$ crée le champ $\overrightarrow{B_y} = Ki_y(t)\overrightarrow{u_y} = Ki_0\sin(\omega t)\overrightarrow{u_y}$

avec K un facteur constant qui dépend de la géométrie des bobines. D'après le principe de superposition, les champs créés par les deux bobines s'ajoutent :

$$\overrightarrow{B} = \overrightarrow{B_x} + \overrightarrow{B_y}$$

On place une aiguille aimantée (boussole) au centre O du dispositif précédent.

Q1. Noter vos observations.

Q2. Représenter le champ $\overrightarrow{B}$ aux instants $t = 0$; $t_1 = \dfrac{\pi}{4\omega}$; $t_2 = \dfrac{\pi}{2\omega}$; $t_3 = \dfrac{3\pi}{4\omega}$; $t_4 = \dfrac{\pi}{\omega}$; $t_5 = \dfrac{3\pi}{2\omega}$; $t_6 = \dfrac{2\pi}{\omega}$.
Comment est le champ ainsi créé ?

Q3. Expliquer les observations en lien avec la forme du champ magnétique et le paragraphe précédent

L'expérience précédente montre le **principe d'un moteur synchrone**, qui est constitué :

- d'un **stator** constitué de plusieurs bobines parcourus par des courants sinusoïdaux déphasés les uns par rapport aux autres ;
- d'un **rotor** constitué d'un aimant permanent ou d'un bobinage parcouru par un courant permanent pour engendrer un moment magnétique $\overrightarrow{\mathcal{M}}$.

La vitesse de rotation du rotor est identique à la vitesse de rotation du champ magnétique tournant, c'est pour cela qu'on parle de moteur synchrone.