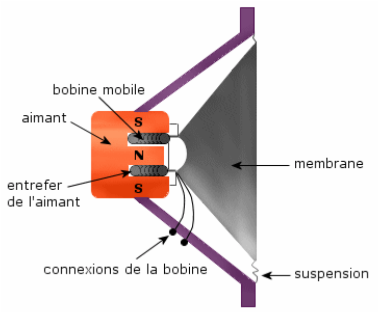
Thème I. Ondes et signaux (Induction)

Chapitre n°25 Induction dans un circuit mobile dans un champ magnétique constant



Ci-contre, un haut-parleur électrodynamique : la bobine, liée à la membrane, est parcourue par un courant électrique et placée dans l'entrefer d'un aimant permanent, l'action mécanique de Laplace met en mouvement la bobine (et donc la membrane), il y a conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique puis acoustique.

Pré-requis

- PCSI. Thème I ; Ondes et signaux
  - Électricité : Chapitres n°3 & n°4 & n°5 & n°6 & n°7
  - Mécanique du point et du solide : Chapitres n°11 & n°12 & n°16
  - Induction : Chapitres 21 à 24

Objectifs du chapitre

Au chapitre 24, on s'est intéressé aux bases théoriques ainsi qu'aux applications s'appuyant sur l'induction dans le cas de Neumann. Dans ce chapitre, on étudie cinq dispositifs basés sur l'induction dans le cas de Lorentz (circuit mobile par rapport au référentiel d'étude placé dans un champ magnétique stationnaire). Pour expliquer le principe de fonctionnement de ces dispositifs, on utilisera les lois de Lenz et de Faraday énoncées au chapitre 23 et les expressions des actions mécaniques introduites au chapitre 22. Ces cinq exemples permettent d'illustrer comment utiliser le phénomène d'induction pour convertir de la puissance mécanique en puissance électrique et inversement.

Plan du cours

Ai-je bien appris mon cours ?

1 – 🙂 – ☹ – Comment établir un bilan de puissance dans un circuit mobile ?

2 – 🙂 – ☹ – Rail de Laplace non alimenté, dont le barreau est tiré par une force constante. Établir les équations électrique et mécanique. Établir le bilan de puissance, puis l'interpréter.

3 – 🙂 – ☹ – Cadre rectangulaire en rotation. Établir les équations électrique et mécanique. Établir le bilan de puissance, puis l'interpréter.

4 – 🙂 – ☹ – Expliquer l'origine des courants de Foucault, et citer des exemples d'utilisation.

5 – 🙂 – ☹ – Donner des exemples d'utilisation du moteur à courant continu.

FlashCards :

0 Rappels : puissances

À retenir : Puissances

- Puissance mécanique reçue par un objet soumis à une résultante $\overrightarrow{F}$ de point d'application A :

- Puissance mécanique reçue par un objet en rotation (vitesse angulaire ω) autour de Oz, soumis à un couple Γ :

- Puissance électrique fournie par un générateur (convention générateur), de tension u et débitant i :

- Puissance électrique reçue par un dipôle (convention récepteur), de tension u et recevant i :

I Méthodes générales de l'étude des convertisseurs électromécaniques

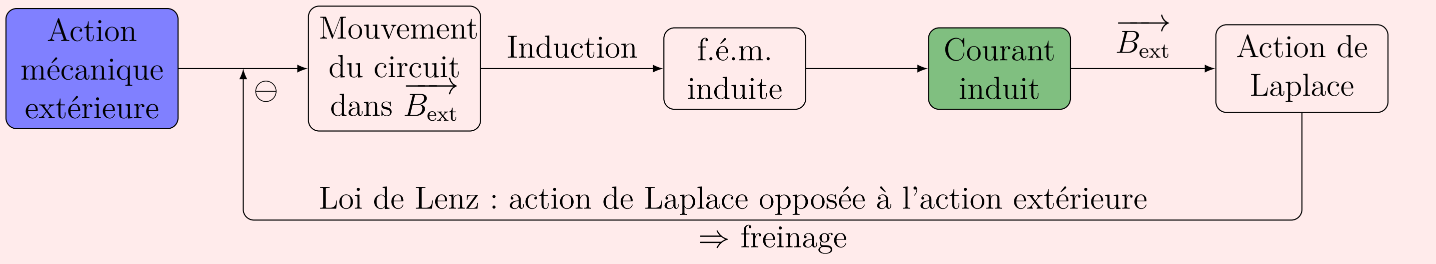
Méthode : Étude d'un phénomène d'induction dans un circuit mobile

- **Analyser physiquement** « ce qu'il se passe » : d'où vient l'induction ? quelles en sont les causes ? les conséquences ? Utiliser, notamment, la loi de Lenz.
- Établir l'**équation électrique** (EE) :
  1. Orienter le circuit (choix du sens de la flèche de i).
  2. Calculer le flux du champ magnétique, en respectant l'orientation choisie.
  3. Exprimer la fem induite e ($e = e_p + e_{\text{ext}}$) à l'aide de la loi de Faraday.
  4. Représenter le schéma électrique équivalent, constitué des éléments réellement présents dedans (résistance, GBF, condensateur) auxquels on ajoute la fem induite en convention générateur avec i.
  5. Établir l'équation électrique en utilisant les lois des mailles, des nœuds ...
- Établir l'**équation mécanique** (EM) :
  6. Exprimer les actions mécaniques de Laplace en respectant l'orientation choisie :
     — pour une tige en translation : la résultante des forces de Laplace ;
     — pour une spire en rotation : le moment résultant de Laplace.
  7. Appliquer :
     — pour un mouvement de translation : le PFD ;
     — pour un mouvement de rotation : la LMC par rapport à l'axe de rotation.
- Effectuer le **bilan énergétique** :
  8. Multiplier (EE) par i.
  9. Multiplier (EM) :
     — scalairement par $\overrightarrow{v}$ si c'est un mouvement de translation (EM obtenue à partir du PFD) ;
     — par ω si c'est un mouvement de rotation (EM obtenue à partir de la LMC).
  10. Sommer les deux en éliminant le terme de couplage en vi, en notant que la somme de la puissance des forces de Laplace et de la puissance de la force électromotrice est nulle : $\mathscr{P}_{\text{Laplace}} + \mathscr{P}_{\text{f.é.m}} = 0$.

II Conversion de puissance mécanique en puissance électrique

L'objet de cette partie est l'étude de systèmes électromécaniques, siège de phénomènes d'induction, dont le déplacement du circuit (puissance mécanique) est converti via le phénomène d'induction en un courant électrique (puissance électrique).

À retenir : Analyse qualitative lors d'une conversion mécanique → électrique

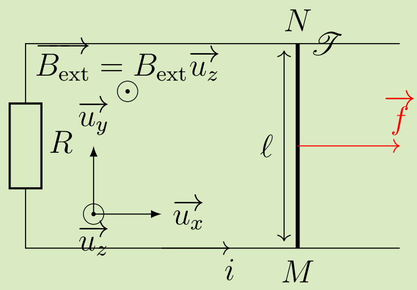


II.1 Rails de Laplace générateurs

<u>Capacités exigibles</u> : **Interpréter qualitativement les phénomènes observés. Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Effectuer un bilan énergétique.**

Exercice à maîtriser n°1 – Rails de Laplace générateurs

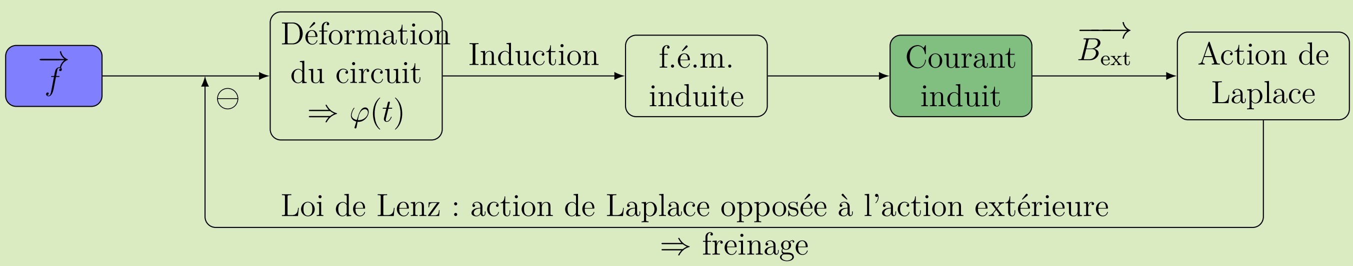
On considère le dispositif des rails de Laplace, dans lequel une tige de masse m, de longueur ℓ, conductrice, glisse sans frottement sur deux rails conducteurs, à la vitesse $\vec{v} = v\vec{u_x}$.
Elle est tirée par une force $\vec{f} = f\vec{u_x}$ constante. La tige $\mathscr{T}$ reste toujours parallèle à $\vec{u_y}$ lors de son mouvement.
L'ensemble est plongé dans un champ magnétique uniforme et stationnaire $\vec{B} = B\vec{u_z}$, orthogonal au plan des rails.
La résistance de l'ensemble est notée R, supposée constante au cours du déplacement de la tige.



Analyse physique qualitative

R1. Décrire les phénomènes mis en jeu lorsque la tige est mise en mouvement par la force $\vec{f}$.

Solution:



Équation électrique

R2. Orienter le circuit ...

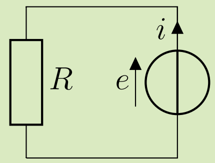
R3. Déterminer l'expression de la f.é.m. induite. *On négligera l'auto-induction.*

Solution: La f.é.m induite est donnée par la loi de Faraday : $e = -\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$, avec $\varphi = \varphi_P + \varphi_{\text{ext}}$
Or l'induction propre est négligée, donc $\varphi_P = 0$.
Et $\varphi_{\text{ext}} = \overrightarrow{B} \cdot \overrightarrow{S}$, avec $\overrightarrow{S}(t) = x(t)\ell\overrightarrow{u_z}$
Ainsi $\varphi_{\text{ext}} = B\ell x(t)$, ainsi $\boxed{e(t) = -B\ell\dot{x}}$

R4. Représenter le circuit équivalent et en déduire l'expression de l'intensité du courant induit.

Solution:

Loi des mailles : $e - Ri = 0$, soit $\boxed{-B\ell\dot{x} = Ri}$ (EE)



Équation mécanique

R5. Déterminer l'expression de la force de Laplace qui s'exerce sur la tige.

Solution: Force de Laplace :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} &= \int_M^N i\mathrm{d}\overrightarrow{\ell} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}} \\ &= \int_{y_M}^{y_N} i\mathrm{d}y\overrightarrow{u_y} \wedge B_{\text{ext}}\overrightarrow{u_z} \\ &= i\ell B_{\text{ext}}\overrightarrow{u_x}\end{aligned}$$

$\boxed{\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = i\ell B\overrightarrow{u_x}}$

En utilisant l'expression de i obtenue avec l'équation électrique : $\boxed{\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = -\frac{(B\ell)^2}{R}\dot{x}\overrightarrow{u_x} = -\frac{(B\ell)^2}{R}\overrightarrow{v}}$

La force de Laplace est opposée au vecteur vitesse, elle se comporte comme une force de frottement fluide : elle s'oppose au mouvement de la barre.

R6. Établir l'équation mécanique.

Solution: Système : tige de masse m, de centre d'inertie G situé en son milieu.
Référentiel : référentiel terrestre considéré galiléen à l'échelle de l'expérience
Bilan des actions mécaniques :

- poids : $m\overrightarrow{g} = -mg\overrightarrow{u_z}$;
- réaction normales du support au niveau des rails : $\overrightarrow{R_N} = R_N\overrightarrow{u_z}$;
- force de traction : $\overrightarrow{f} = f\overrightarrow{u_x}$;
- force de Laplace : $\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = i\ell B\overrightarrow{u_x}$.

On applique le PFD à la tige : $m\overrightarrow{a}(G) = m\overrightarrow{g} + \overrightarrow{R_N} + \overrightarrow{f} + \overrightarrow{F_{\mathscr{L}}}$
En projection selon $\overrightarrow{u_x}$: $\boxed{m\ddot{x} = f + i\ell B}$ (EM)

Résolution

On obtient alors un système de deux équations différentielles couplées à deux inconnues $\dot{x}(t)$ et $i(t)$.

R7. En combinant les deux équations précédentes, établir l'équation différentielle vérifiée par $\dot{x}(t)$.

Solution: D'après l'équation électrique : $i = -\dfrac{B\ell}{R}\dot{x}$, que l'on peut injecter dans l'équation mécanique.

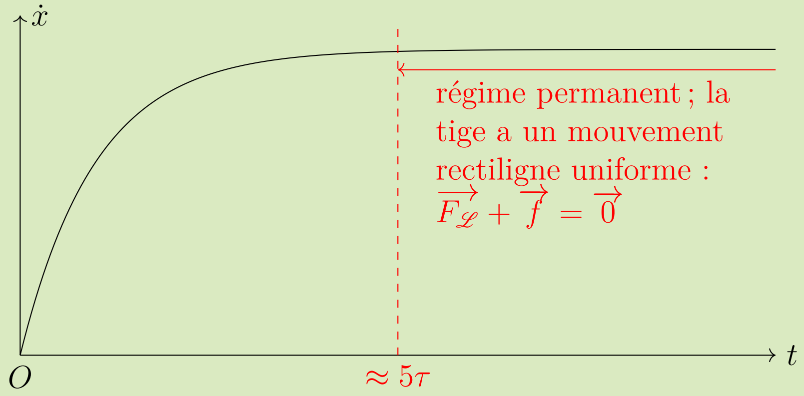
$m\ddot{x} = f - \dfrac{(B\ell)^2}{R}\dot{x}$, soit $\boxed{\ddot{x} + \dfrac{(B\ell)^2}{mR}\dot{x} = \dfrac{f}{m}}$

On peut introduire le temps $\boxed{\tau = \dfrac{mR}{(B\ell)^2}}$

R8. La résoudre. Commenter.

Solution: Solution générale : $\dot{x}(t) = Ke^{-\frac{t}{\tau}} + \dfrac{fR}{(B\ell)^2}$ Or à $t = 0$, $\dot{x}(0) = 0$, donc $K = -\dfrac{fR}{(B\ell)^2}$

Ainsi $\boxed{\dot{x}(t) = \dfrac{fR}{(B\ell)^2}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}$



R9. En déduire l'évolution de l'intensité du courant. Commenter.

Solution: Ainsi $\boxed{i(t) = -\dfrac{B\ell}{R}\dot{x} = -\dfrac{f}{B\ell}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}$
i est du signe opposé de f.

- Si $\overrightarrow{f}$ est selon $+\overrightarrow{u_x}$, la surface du circuit augmente, donc le flux du champ magnétique extérieur augmente. Le courant induit qui apparaît donne naissance à un champ magnétique induit qui s'oppose à la cause qui lui a donné naissance. Le champ propre est donc dans le sens opposé à celui de $\overrightarrow{B}$ qui est bien le cas ici avec $i < 0$ dans le sens défini ici.
- Si $\overrightarrow{f}$ est selon $-\overrightarrow{u_x}$, le flux diminue et $i > 0$ donne naissance à un champ magnétique dans le sens de $\overrightarrow{B}$.

Bilan énergétique

R10. Établir le bilan de puissance suivant : $f\dot{x} = \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{1}{2}m\dot{x}^2\right) + Ri^2$.

Solution:
(EM)$\times\dot{x}$: $m\ddot{x}\dot{x} = f\dot{x} - i\ell B\dot{x}$, soit $\underbrace{\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}m\dot{x}^2\right)}_{=\mathscr{E}_c} = \underbrace{f\dot{x}}_{=\mathscr{P}(\vec{f})} + \underbrace{i\ell B\dot{x}}_{=\mathscr{P}(\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}})}$

(EE)$\times i$: $\underbrace{-B\ell\dot{x}\times i}_{\mathscr{P}(\text{f.é.m induite})} = \underbrace{Ri^2}_{\mathscr{P}_J}$

On constate que $\mathscr{P}(\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}}) = -\mathscr{P}(\text{f.é.m induite})$

On peut alors écrire : $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}m\dot{x}^2\right) = f\dot{x} - Ri^2$

Ainsi $\boxed{f\dot{x} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}m\dot{x}^2\right) + Ri^2}$

R11. L'interpréter.

Solution: La puissance fournie par l'opérateur extérieur à la tige, $f\dot{x}$, permet la mise en mouvement de la tige $\left(\text{énergie cinétique : } \frac{1}{2}m\dot{x}^2\right)$ et une partie est dissipée par effet Joule dans la résistance des rails.
Une fois que le régime transitoire est fini, la vitesse et l'énergie cinétique sont constantes. Ainsi,lors du régime permanent, l'intégralité de la puissance mécanique fournie par l'opérateur est convertie en puissance électrique.

R12. Exprimer la puissance de la force de Laplace ainsi que la puissance électrique de la f.é.m. induite. Interpréter leurs signes. Commenter.

Solution: $\boxed{\mathscr{P}(\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}}) = -\mathscr{P}(\text{f.é.m induite})}$
La puissance mécanique fournie par la force de Laplace est intégralement convertie en puissance électrique utilisable dans le circuit.

À retenir : Conversion électromécanique parfaite

La puissance $\mathscr{P}_{\mathscr{L}}^{\text{méca}}$ des actions de Laplace et la puissance $\mathscr{P}_{\text{fem}}^{\text{élec}}$ algébriquement fournie par la force électromotrice induite sont reliées par :

$$\mathscr{P}_{\mathscr{L}}^{\text{méca}} + \mathscr{P}_{\text{fem}}^{\text{élec}} = 0$$

Cela traduit la conversion électromécanique parfaite de puissance mécanique en puissance électrique grâce au phénomène d'induction :

- le générateur fictif fournit réellement de la puissance électrique, donc $\mathscr{P}_{\text{fem}}^{\text{élec}} > 0$
- l'action mécanique de Laplace est résistante, donc $\mathscr{P}_{\mathscr{L}}^{\text{méca}} < 0$

II.2 Freinage par induction

__Capacité exigible :__ **Expliquer l'origine des courants de Foucault et en connaître des exemples d'utilisation.**

Expérience

On fixe un disque métallique massif à l'extrémité d'un pendule et ce disque passe, lorsque le pendule est proche de sa position verticale, dans l'entrefer d'un électroaimant. L'électroaimant est alimenté en régime permanent et crée un champ magnétique permanent horizontal, perpendiculaire au plan d'oscillation du pendule.

Voir : https://youtu.be/AmCx172SmmI et https://youtu.be/MnLAzrT6Ps8

R1. Qu'observe-t-on lorsque l'on alimente l'électroaimant ?

> **Solution:** Quand l'électroaimant est alimenté, on observe le freinage du pendule.

R2. Expliquer ces observations.

> **Solution:** Lors du passage du disque en cuivre dans le champ magnétique créé par l'aimant, il y a variation du flux du champ magnétique et apparition de courants induits dans le disque par induction. Ces courants sont les **courants de Foucault**. L'action mécanique de Laplace qui apparaît alors s'oppose à la cause qui lui a donné naissance :le déplacement du pendule.
>
> L'énergie mécanique est convertie en énergie électrique dissipée effet Joule. Il y a un freinage et le dispositif chauffe, à travers la médiation du champ magnétique.

R3. Quel est l'avantage d'un tel système par rapport à d'autres systèmes de freinage ?

> **Solution:** L'absence de frottements liés au contact des freins limite l'usure des pièces et leur échauffement. De plus, le freinage par induction permet un freinage doux. Cependant, il est d'autant moins efficace que la vitesse est faible, ainsi, il n'agit pas à très faible vitesse, des freins classiques sont nécessaires.

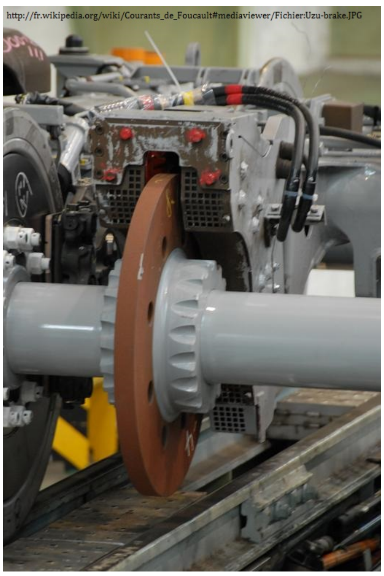
On remplace le disque métallique plein par un disque métallique possédant des encoches radiales.
Voir : https://youtu.be/9_rbI-5RnnU

R4. Le disque est-il freiné, pourquoi ?

> **Solution:** Le pendule métallique ayant des encoche n'est plus amorti. En effet, le courants de Foucault se développent très peu à cause des encoches, l'action de Laplace est alors quasi nulle.
>
> C'est ce qu'on utilise dans les transformateurs : la carcasse ferromagnétique est réalisée en fer feuilleté : des fines couches de fer séparées d'une couche d'isolant, limitant ainsi l'apparition de courants de Foucault dans la carcasse ferromagnétique.

Le freinage par induction est utilisé pour les TGV et sur certains camions.
On considère une roue constituée d'un bloc métallique massif. Bien que l'on ne puisse pas modéliser un tel système par un circuit filiforme, les phénomènes physiques restent les mêmes. Ainsi, lorsque la roue est en rotation dans un champ magnétique stationnaire :

- On retrouve un cas d'induction de Lorentz, il y a donc apparition de f.é.m. induites.
- La roue étant conductrice, il y a apparition de courants induits. Dans le cas d'une roue pleine, les courants sont répartis dans tout le volume du conducteur et on les nomme <u>**courants de Foucault**</u>.
- L'action conjuguée des courants de Foucault et du champ magnétique donne lieu à des forces de Laplace qui s'opposent au mouvement de rotation de la roue, qui est alors freinée.

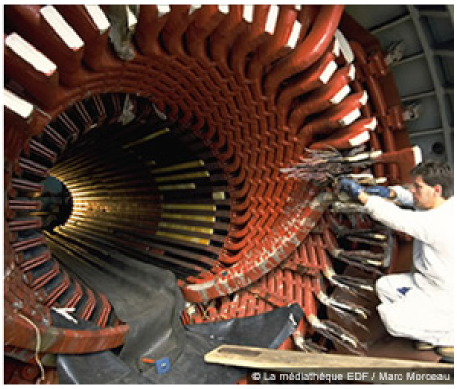


Ci-contre, la photo d'un système de freins à induction sur un train rapide Japonais. D'après http://fr.wikipedia.org/wiki/Courants_de_Foucault\#mediaviewer/Fichier:Uzu-brake.JPG

II.3 Alternateur

<u>Capacités exigibles</u> : **Interpréter qualitativement les phénomènes observés. Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Effectuer un bilan énergétique.**

Connaître des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.



Un **alternateur** sert à convertir une puissance mécanique en une puissance électrique. Ce dispositif est par exemple utilisé

— dans les dynamos de vélos : une roue entraîne en rotation l'alternateur qui alimente des ampoules ou une batterie ;

— dans les centrales électriques, où l'alternateur est entraîné par une turbine elle-même mise en rotation par de la vapeur d'eau (centrales thermiques ou nucléaires) ou de l'eau liquide (centrales hydrauliques).

L'**alternateur** est constitué

— d'un **stator** fixe par rapport au référentiel d'étude

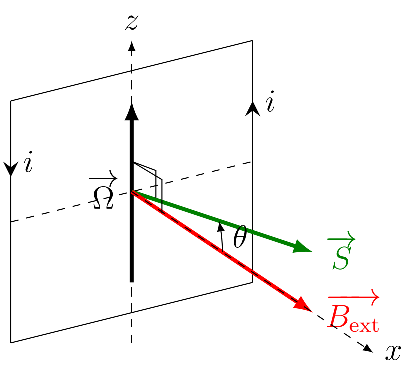
— et d'**un rotor** en rotation autour d'un axe fixe par rapport au stator.

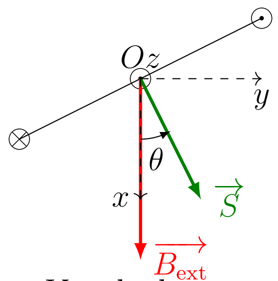
On peut expliquer le fonctionnement de l'alternateur en modélisant le rotor par une bobine plate de N spires rectangulaires, de surface $a \times b$, conductrice de résistance r_L et d'inductance propre L, en rotation autour de l'axe (Oz) fixe dans le référentiel terrestre, qui est un des axes de symétrie de la spire et qui passe par les deux milieux de côtés opposés.
On note J le moment d'inertie de la spire par rapport à l'axe (Oz).
La spire est mise en rotation autour de (Oz) à la vitesse angulaire ω par un opérateur extérieur :

— vous, si l'on s'intéresse à l'alternateur d'un vélo ;

— la turbine, si l'on étudie l'alternateur d'une centrale électrique ;

qui exerce un couple $\overrightarrow{\Gamma_{\text{mo}}} = \Gamma_{\text{mo}}\overrightarrow{u_z}$.
La liaison pivot d'axe (Oz) est supposée parfaite.
La spire est placée dans un champ magnétique uniforme et stationnaire $\overrightarrow{B_{\text{ext}}} = B_{\text{ext}}\overrightarrow{u_x}$.
On introduira l'angle $\theta = \left(\widehat{\overrightarrow{B_{\text{ext}}}, \overrightarrow{S}}\right)$.





Vue de dessus

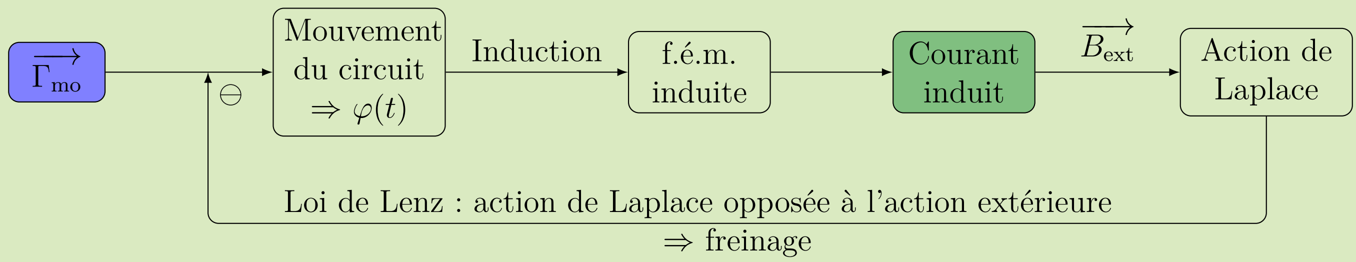
L'alternateur est branché en série avec une charge aux bornes de laquelle on récupère la tension u : cela peut être une lampe par exemple (dans le cas d'une dynamo de vélo), ou le secteur (dans le cas d'un alternateur de centrale), de résistance R.

Exercice à maîtriser n°2 – Alternateur

Analyse physique qualitative

R1. Analyser qualitativement le fonctionnement de l'alternateur.

Solution:



Équation électrique

R2. Calculer le flux du champ $\overrightarrow{B_{\text{ext}}}$ à travers les spires du rotor.

Solution: Le circuit est déjà orienté : **sinon il aurait fallu commencer par l'orienter !**

Flux du champ $\overrightarrow{B_{\text{ext}}}$ à travers la bobine plate de N spires :

$$\begin{aligned}
\varphi_{\text{ext}} &= N \times \left(\overrightarrow{B_{\text{ext}}} \cdot \vec{S}\right) \\
&= N \times B_{\text{ext}} S \cos\left(\widehat{\overrightarrow{B_{\text{ext}}}, \vec{S}}\right) \\
&= N B_{\text{ext}} S \cos(\theta)
\end{aligned}$$

$\boxed{\varphi_{\text{ext}} = N B_{\text{ext}} S \cos(\theta)}$

R3. Déterminer l'expression de la f.é.m. induite. Le rotor étant constitué d'une bobine plate de N spires, l'auto-induction ne pourra pas être négligée ici.
Commenter sa dépendance avec la fréquence f de rotation et le champ magnétique extérieur.

Solution: f.é.m induite ?

Le courant qui circule dans la spire dépend du temps, donc il se produit un phénomène d'auto-induction, qui n'est pas négligeable car le circuit est constitué de plusieurs spires.

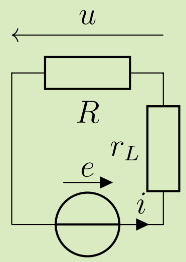
La fem induite est donnée par la loi de Faraday, le flux étant la somme du flux propre (prise en compte de l'auto-induction) et du flux extérieur dû au mouvement de la spire dans un champ magnétique extérieur.

$$\begin{aligned}
e &= -\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} \\
&= -\frac{\mathrm{d}(\varphi_P + \varphi_{\text{ext}})}{\mathrm{d}t} \\
&= -\frac{\mathrm{d}(Li)}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}(N B_{\text{ext}} S \cos(\theta))}{\mathrm{d}t} \\
&= -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} - N B_{\text{ext}} S \left(-\dot{\theta}\sin(\theta)\right)
\end{aligned}$$

Ainsi $\boxed{e = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + N B_{\text{ext}} S \dot{\theta} \sin(\theta)}$

R4. Représenter le circuit équivalent.

Solution:



R5. Établir l'équation différentielle vérifiée par i (EE).

Solution:
Loi des mailles : $e - Ri - r_L i = 0 \Leftrightarrow -L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + NB_{\text{ext}}S\dot{\theta}\sin(\theta) - Ri - r_L i$,
soit $\boxed{L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + (R + r_L)i = NB_{\text{ext}}S\dot{\theta}\sin(\theta)}$ (EE)

Équation mécanique

R6. Faire le bilan des actions mécaniques qui s'exercent sur le système.

Solution:
Système : rotor (cadre de moment d'inertie J)
Référentiel : référentiel terrestre considéré galiléen à l'échelle de l'expérience
Bilan des actions mécaniques :

— poids $m\vec{g}$, dont le moment par rapport à l'axe de rotation (Oz) est nul, car $m\vec{g}$ est colinéaire à l'axe (Oz) ;

— action de la liaison pivot, supposée parfaite, donc de moment par rapport à l'axe de rotation (Oz), nul ;

— action mécanique de Laplace, de résultante nulle et de moment : $\overrightarrow{\Gamma_{\mathscr{L}}} = \vec{m} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}}$;

— Action de l'opérateur extérieur $\overrightarrow{\Gamma_{\text{mo}}}$

R7. Déterminer l'expression du couple de Laplace, en respectant l'orientation choisie pour établir l'équation électrique.

Solution: Couple de Laplace :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{\Gamma_{\mathscr{L}}} &= \vec{m} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}}\\ &= Ni\vec{S} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}}\\ &= NiS\Big(\cos(\theta)\overrightarrow{u_x} + \sin(\theta)\overrightarrow{u_y}\Big) \wedge B_{\text{ext}}\overrightarrow{u_x}\end{aligned}$$

Ainsi $\boxed{\overrightarrow{\Gamma_{\mathscr{L}}} = -NiS\sin(\theta)\overrightarrow{u_z}}$

R8. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par ω.

Solution: On applique la loi du moment cinétique au cadre par rapport à l'axe de rotation (Oz) :
$\dfrac{\mathrm{d}L_{Oz}}{\mathrm{d}t} = \mathscr{M}_{Oz}(m\overrightarrow{g}) + \mathscr{M}_{Oz}(llp) + \Gamma_{\mathscr{L}} + \Gamma_{\mathrm{mo}}$
Soit $\boxed{J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = -NiS\sin(\theta) + \Gamma_{\mathrm{mo}}}$ (EM)

Bilan énergétique

R9. Obtenir le bilan de puissance et l'écrire sous la forme $\Gamma_{\mathrm{mo}} \times \omega = \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{1}{2}J\omega^2\right) + \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{1}{2}Li^2\right) + r_L i^2 + Ri^2$
Interpréter les différents termes.

Solution:
(EM)$\times\omega$: $J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \times \omega = -NiS\sin(\theta) \times \omega + \Gamma_{\mathrm{mo}} \times \omega$
Soit $\boxed{\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{1}{2}J\omega^2\right) = -NiS\sin(\theta) \times \omega + \Gamma_{\mathrm{mo}} \times \omega}$
(EE)$\times i$: $L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \times i + (R + r_L)i^2 = NB_{\mathrm{ext}}S\dot{\theta}\sin(\theta) \times i$ (avec $\dot{\theta} = \omega$)
Soit $\boxed{\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{1}{2}Li^2\right) + (R + r_L)i^2 = NB_{\mathrm{ext}}S\omega\sin(\theta) \times i}$
En sommant les deux équations précédentes : $\boxed{\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{1}{2}J\omega^2\right) + \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{1}{2}Li^2\right) + (R + r_L)i^2 = \Gamma_{\mathrm{mo}}\omega}$
La puissance fournie par l'opérateur extérieur, $\Gamma_{\mathrm{mo}}\omega$, permet de mettre en mouvement le cadre $(1/2J\omega^2)$, le reste est emmagasinée sous forme d'énergie magnétique $(1/2Li^2)$, et une partie est perdue par effet Joule dans la résistance de la bobine et dans la résistance de la charge.

R10. Comparer la puissance du couple de Laplace et la puissance de la fem due au champ magnétique extérieur.

Solution: On reconnait à nouveau : $\mathscr{P}_{\mathscr{L}} = -NiS\sin(\theta) \times \omega = -\mathscr{P}$(f.é.m induite ext)
Il y a conversion parfaite d'énergie via le phénomène d'induction.

R11. En déduire un bilan énergétique en régime sinusoïdal forcé sur une période. Commenter.

Solution: En régime sinusoïdal forcé, ω est une constante (le rotor tourne à une vitesse constante) et i est une fonction sinusoïdale de pulsation ω.
On intègre l'équation précédente par rapport au temps sur une période $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$:

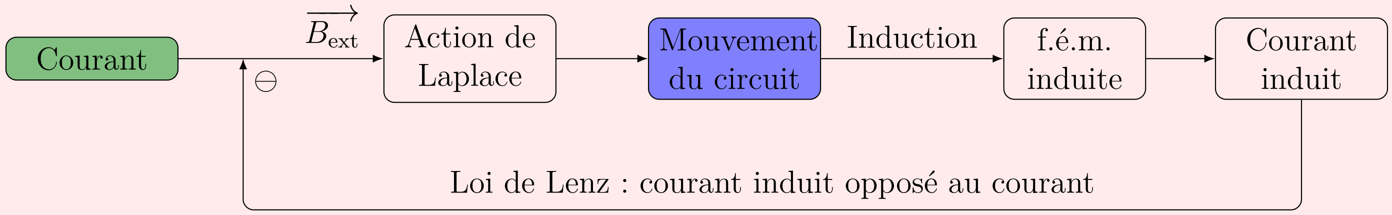
$$\begin{aligned}
\int_0^T \Gamma_{\mathrm{mo}}\omega \mathrm{d}t &= \int_0^T \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}J\omega^2\right)\mathrm{d}t + \int_0^T \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}Li^2\right)\mathrm{d}t + \int_0^T \left(r_L i^2 + Ri^2\right)\mathrm{d}t \\
\int_0^T \Gamma_{\mathrm{mo}}\omega \mathrm{d}t &= \int_0^T \mathrm{d}\left(\frac{1}{2}J\omega^2\right) + \int_0^T \mathrm{d}\left(\frac{1}{2}Li^2\right) + \int_0^T \left(r_L i^2 + Ri^2\right)\mathrm{d}t \\
\int_0^T \Gamma_{\mathrm{mo}}\omega \mathrm{d}t &= 0 + 0 + \int_0^T \left(r_L i^2 + Ri^2\right)\mathrm{d}t
\end{aligned}$$

En RSF, l'énergie moyenne fournie par l'extérieur (vous qui pédalez, la turbine dans une centrale nucléaire) est intégralement dissipée par effet Joule : une partie dans la résistance interne de la bobine (r_L) et le reste dans la résistance de charge aux bornes de laquelle on récupère la puissance électrique utile.
En pratique, de l'énergie mécanique est perdue sous forme de frottements mécaniques (liaison pivot, ...).

III Conversion de puissance électrique en puissance mécanique

L'objet de cette partie est l'étude de dispositifs électromécaniques dans lesquels un courant électrique (puissance électrique) est converti via un phénomène d'induction en un déplacement (puissance mécanique).

À retenir : Analyse qualitative lors d'une conversion électrique → mécanique



III.1 Rails de Laplace moteurs

<u>Capacités exigibles</u> : **Interpréter qualitativement les phénomènes observés. Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Effectuer un bilan énergétique.**

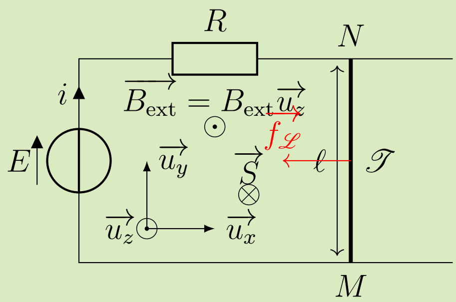
Exercice à maîtriser n°3 – Rails de Laplace moteur

On considère le dispositif des rails de Laplace, dans lequel une tige de masse m, de longueur ℓ, conductrice, glisse sans frottement sur deux rails conducteurs, à la vitesse $\vec{v} = v\overrightarrow{u_x}$.

Le dispositif est alimenté par un (« vrai ») générateur de fem E constante.

L'ensemble est plongé dans un champ magnétique uniforme et stationnaire $\overrightarrow{B_{\text{ext}}} = B_{\text{ext}}\overrightarrow{u_z}$, orthogonal au plan des rails.

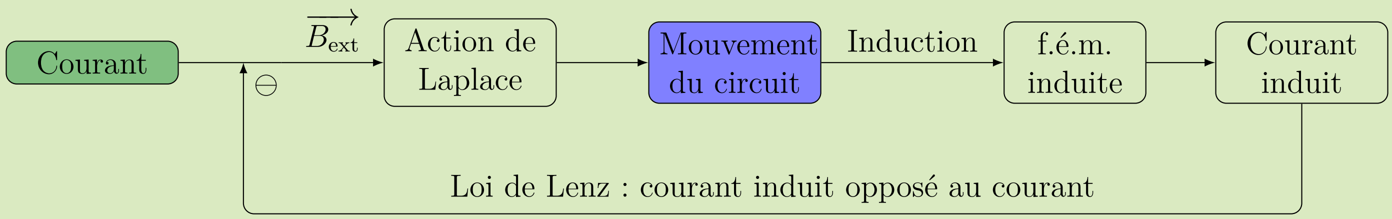
La résistance de l'ensemble est notée R, supposée constante au cours du déplacement de la tige.



Analyse physique qualitative

R1. Que se passe-t-il lorsqu'on allume le générateur ? Analyser qualitativement ce qu'il se passe.

Solution:



Équation électrique

R2. Orienter le circuit . . .

R3. Déterminer l'expression de la f.é.m. induite. *On négligera l'auto-induction.*

Solution: La f.é.m induite est donnée par la loi de Faraday : $e = -\dfrac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$, avec $\varphi = \varphi_P + \varphi_{\text{ext}}$

Or l'induction propre est négligée, donc $\varphi_P = 0$.

Et $\varphi_{\text{ext}} = \overrightarrow{B_{\text{ext}}} \cdot \vec{S}$, avec $\vec{S}(t) = -x(t)\ell\overrightarrow{u_z}$

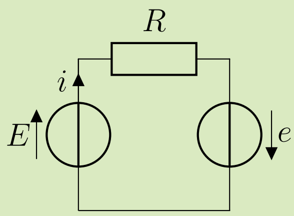
Ainsi $\varphi_{\text{ext}} = -B_{\text{ext}}\ell x(t)$, ainsi $\boxed{e(t) = B\ell\dot{x}}$

R4. Représenter le circuit équivalent et en déduire l'expression de l'intensité du courant induit.

Solution:

Loi des mailles : $E + e - Ri = 0$, soit $E + B_{\text{ext}}\ell\dot{x} - Ri = 0$

$\boxed{E = -B_{\text{ext}}\ell\dot{x} + Ri}$ (EE)



Équation mécanique

R5. Déterminer l'expression de la force de Laplace.

Solution: Force de Laplace :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} &= \int_N^M i\mathrm{d}\overrightarrow{\ell} \wedge \overrightarrow{B_{\text{ext}}} \\ &= \int_\ell^0 i\mathrm{d}y\overrightarrow{u_y} \wedge B_{\text{ext}}\overrightarrow{u_z} \\ &= iB_{\text{ext}}\int_\ell^0 \mathrm{d}y\overrightarrow{u_x}\end{aligned}$$

$\boxed{\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = -i\ell B_{\text{ext}}\overrightarrow{u_x}}$

R6. Établir l'équation mécanique.

Solution: Système : tige de masse m, de centre d'inertie G situé en son milieu.
Référentiel : référentiel terrestre considéré galiléen à l'échelle de l'expérience
Bilan des actions mécaniques :

- poids : $m\overrightarrow{g} = -mg\overrightarrow{u_z}$;
- réaction normales du support au niveau des rails : $\overrightarrow{R_N} = R_N\overrightarrow{u_z}$;
- force de Laplace : $\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = -i\ell B_{\text{ext}}\overrightarrow{u_x}$.

On applique le PFD à la tige : $m\overrightarrow{a}(G) = m\overrightarrow{g} + \overrightarrow{R_N} + \overrightarrow{F_{\mathscr{L}}}$
En projection selon $\overrightarrow{u_x}$: $\boxed{m\ddot{x} = -i\ell B_{\text{ext}}}$ (EM)

Résolution

On obtient alors un système de deux équations différentielles couplées à deux inconnues $\dot{x}(t)$ et $i(t)$.

R7. En combinant les deux équations précédentes, établir l'équation différentielle vérifiée par $\dot{x}(t)$.

Solution: D'après l'équation électrique : $i = \dfrac{E + B_{\text{ext}}\ell\dot{x}}{R}$, que l'on peut injecter dans l'équation mécanique.

On obtient : $m\ddot{x} = -\dfrac{E + B_{\text{ext}}\ell\dot{x}}{R} \times \ell B_{\text{ext}}$, soit $m\ddot{x} + \dfrac{\ell^2 B_{\text{ext}}^2}{R}\dot{x} = -\dfrac{E\ell B_{\text{ext}}}{R}$

Enfin : $\boxed{\ddot{x} + \dfrac{(B_{\text{ext}}\ell)^2}{mR}\dot{x} = -\dfrac{E\ell B_{\text{ext}}}{mR}}$

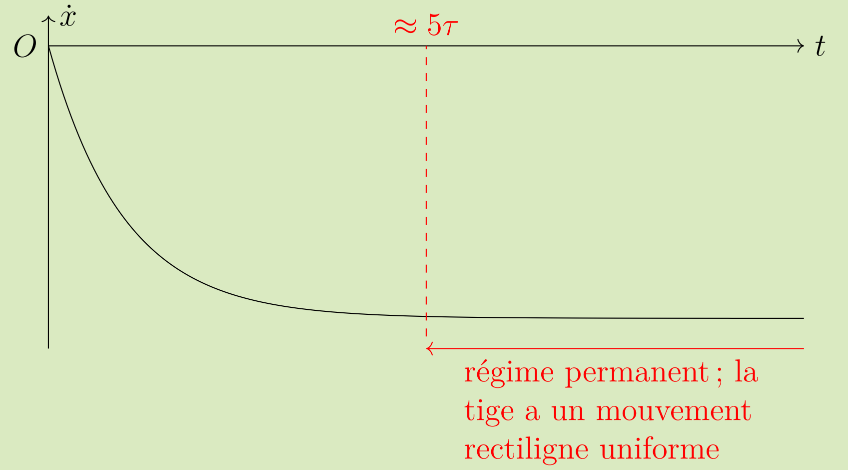
On peut introduire le temps $\boxed{\tau = \dfrac{mR}{(B\ell)^2}}$

R8. La résoudre. Commenter.

Solution: Solution générale : $\dot{x}(t) = Ke^{-\frac{t}{\tau}} - \dfrac{E}{\ell B_{\text{ext}}}$

Or à $t = 0$, $\dot{x}(0) = 0$, donc $K = \dfrac{E}{\ell B_{\text{ext}}}$

Ainsi $\boxed{\dot{x}(t) = -\dfrac{E}{\ell B_{\text{ext}}}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}$

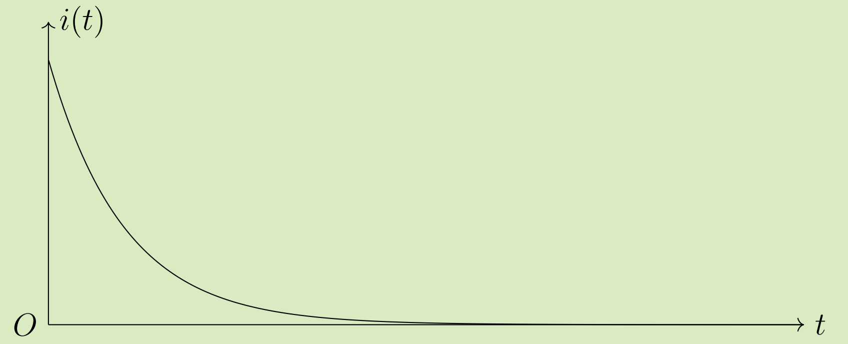


R9. En déduire l'évolution de l'intensité du courant. Commenter.

Solution: D'après l'équation électrique :

$$\begin{aligned} i &= \frac{E}{R} + \frac{B_{\text{ext}}\ell\dot{x}}{R} \\ &= \frac{E}{R} + \frac{B_{\text{ext}}\ell}{R} \times -\frac{E}{\ell B_{\text{ext}}}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \\ &= \frac{E}{R} - \frac{E}{R} + \frac{E}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned}$$

Soit $\boxed{i(t) = \dfrac{E}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}}$



Bilan énergétique

R10. Établir le bilan de puissance.

Solution:
(EM)$\times x$: $m\ddot{x} \times \dot{x} = -i\ell B_{\text{ext}} \times \dot{x}$
(EE)$\times i$: $E \times i = -B_{\text{ext}}\ell\dot{x} \times i + Ri^2$
En soustrayant les deux équations : $m\ddot{x} \times \dot{x} - Ei = -Ri^2$
soit $\boxed{Ei = \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{1}{2}m\dot{x}2\right) + Ri^2}$

R11. L'interpréter.

Solution: La puissance fournie par le générateur, Ei, permet la mise en mouvement de la tige $\left(\text{énergie cinétique : } \dfrac{1}{2}m\dot{x}^2\right)$ et une partie est dissipée par effet Joule dans la résistance des rails.
Une fois que le régime transitoire est fini, la vitesse et l'énergie cinétique sont constantes, et l'intensité du courant est nulle. Ainsi, lors du régime permanent, l'intégralité de la puissance électrique fournie par le générateur est convertie en puissance mécanique.

R12. Exprimer la puissance de la force de Laplace ainsi que la puissance électrique de la f.é.m. induite. Interpréter leurs signes. Commenter.

Solution: $\boxed{\mathscr{P}(\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}}) = -\mathscr{P}(\text{f.é.m induite})}$
La puissance mécanique fournie par la force de Laplace est intégralement convertie en puissance électrique utilisable dans le circuit.

♥ À retenir : Conversion électromécanique parfaite

La puissance $\mathscr{P}_{\mathscr{L}}^{\text{méca}}$ des actions de LAPLACE et la puissance $\mathscr{P}_{\text{fem}}^{\text{élec}}$ algébriquement fournie par la force électromotrice induite sont reliées par :

$$\mathscr{P}_{\mathscr{L}}^{\text{méca}} + \mathscr{P}_{\text{fem}}^{\text{élec}} = 0$$

Cela traduit la conversion électromécanique parfaite de puissance électrique en puissance mécanique grâce au phénomène d'induction :

- le générateur fictif reçoit réellement de la puissance électrique, donc $\mathscr{P}_{\text{fem}}^{\text{élec}} < 0$
- l'action mécanique de Laplace est motrice, donc $\mathscr{P}_{\mathscr{L}}^{\text{méca}} > 0$

III.2 Machine à courant continu

<u>Capacité exigible</u> : **Analyser le fonctionnement du moteur à courant continu à entrefer plan en s'appuyant sur la configuration des rails de Laplace. Citer des exemples d'utilisation du moteur à courant continu.**

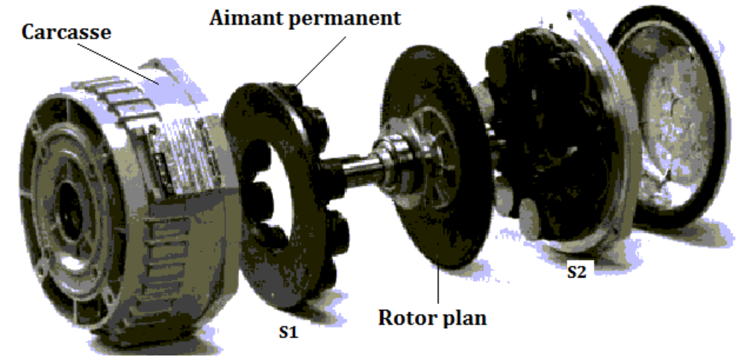
Les machines à courant continu font partie des convertisseurs électro-magnéto-mécanique réversibles. Elles ont été les premières à être utilisées massivement dans toutes les gammes de puissance du fait de la simplicité de leur commande en vitesse, et de leur faible encombrement.
On trouve des machines à courant continu dans l'industrie (ascenseur, machines d'imprimerie..), dans les domaines des faibles puissances (jouets, perceuses...), dans les équipements automobiles (essuie glaces, toits ouvrants...). Pour les grandes puissances, il est principalement utilisé comme moteur de traction (pour mettre en mouvement un véhicule), par exemple dans le TGV Nord ou les RER parisiens.

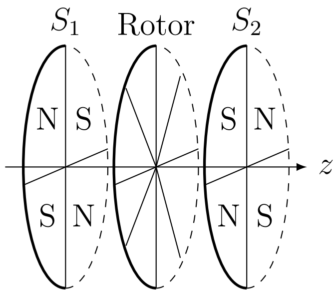
III.2.a) Dispositif

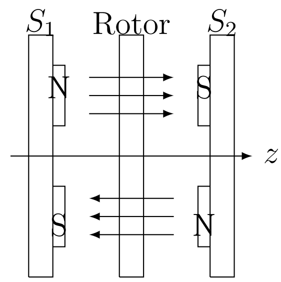
Comme dans toute machine tournante, une MCC est constituée d'un stator fixe et d'un rotor mobile :

- Le **rotor** est le disque au centre, qui est entraîné en rotation autour de son axe.
  Les spires présentes sur le rotor comportent deux fils dans la direction radiale, faisant entre eux un angle de 90° et reliés en périphérie par une partie circulaire. Ils sont parcourus par des courants continus (d'où le nom de la machine).
- Les deux disques de part et d'autre du rotor constituent le **stator**. Ces deux disques sont fixes dans le référentiel d'étude. Des aimants permanents disposés sur ces disques développent des lignes de champ magnétique orthogonales au plan définir par le rotor. L'ensemble $\{S_1,S_2\}$ définit donc un entrefer plan, dans lequel est placé le rotor.
- Des contacts métalliques frottants appelés **balais** assurent le passage du courant entre les circuits électriques mobiles du rotor et l'alimentation, liée au stator. Un câblage astucieux du rotor couplé à une répartition bien choisie des aimants du stator permet une alimentation uniquement à partir des balais.

On appelle **entrefer** l'espace situé entre les aimants : il s'agit ici du plan du rotor, d'où la dénomination de MCC à entrefer plan.







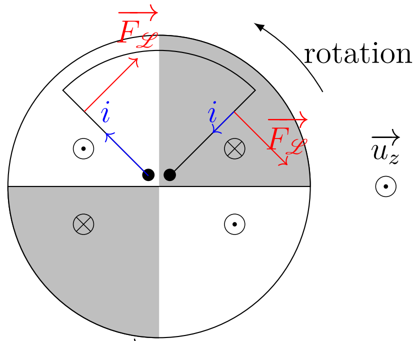
III.2.b) Analyse physique

Ce dispositif est réversible et fonctionne en générateur ou en moteur.

■ MCC en fonctionnement générateur

- la roue est entraînée en rotation par un système mécanique externe,
- c'est alors un conducteur mobile dans un champ magnétique $\overrightarrow{B}$ permanent,
- par induction, il apparaît un courant dans les fils,
- le circuit mobile dans un champ magnétique est alors soumis aux forces de Laplace qui, d'après la loi de Lenz, s'opposent à la cause qui leur a donné naissance, c'est-à-dire au mouvement.

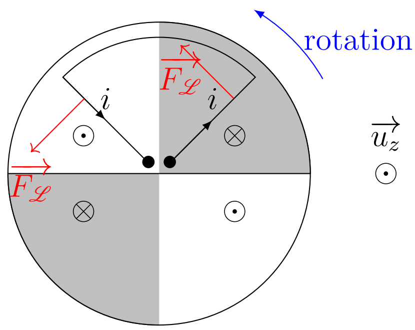
On déduit du sens de la loi de Lenz, le sens de la force de Laplace, et on en déduit alors le sens du courant positif à l'aide de la définition de la force de Laplace $\mathrm{d}\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = i\mathrm{d}\overrightarrow{\ell} \wedge \overrightarrow{B}$, le sens du champ magnétique étant connu.
Un régime permanent s'établit alors (vitesse de rotation constante).



$\odot$: $\overrightarrow{B}$ vient vers nous ;
$\otimes$: $\overrightarrow{B}$ part derrière.

■ MCC en fonctionnement moteur

- les rayons de la roue sont parcourus par un courant d'intensité i,
- c'est donc un circuit parcouru par un courant électrique placé dans un champ magnétique $\overrightarrow{B}$,
- il est donc soumis aux forces de Laplace : $\mathrm{d}\overrightarrow{F_{\mathscr{L}}} = i\mathrm{d}\overrightarrow{\ell} \wedge \overrightarrow{B}$,
- on en déduit alors le sens de rotation,
- le circuit est alors mobile dans un champ magnétique, un phénomène d'induction se produit, qui s'oppose à la cause qui lui a donné naissance : on le quantifie par un générateur fictif de fem $e < 0$ (en convention générateur avec $i > 0$).



III.2.c) Équations électrique et mécanique

■ Action mécanique de Laplace

- Force de Laplace s'exerçant sur la première partie radiale de la spire représentée ci-dessus, plongée dans le champ $\overrightarrow{B} = -B\overrightarrow{u_z}$: $\overrightarrow{F} = iR\overrightarrow{u_r} \wedge (-B\overrightarrow{u_z}) = iRB\overrightarrow{u_\theta}$
  La force de Laplace sur cette portion de spire s'exerce au milieu du rayon, donc à une distance $R/2$ de l'axe de rotation, donc le moment de cette force de Laplace s'écrit $\mathscr{M}_{Oz} = \dfrac{iR^2B}{2}$.
- Sur la partie circulaire de la spire, le moment des forces de Laplace est nulle.
- Pour l'autre partie radiale de la spire, le courant est inversé tout comme le champ magnétique, la force de Laplace et le moment de la force sont donc identiques à celui qui vient d'être calculé.

Ainsi, le moment résultant de Laplace s'exerçant sur la spire représentée ci-dessus vaut $\mathscr{M}_{Oz} = iR^2B$
Pour N spires présentes sur le rotor, le moment résultant vaut donc $\Gamma_L = NiR^2B$

■ Lien entre fém induite et vitesse de rotation

La géométrie de la machine à courant continu ne permet pas d'appliquer la loi de Faraday.
On utilise alors la conservation de la puissance : $\mathscr{P}_{\text{Laplace}} + \mathscr{P}_{\text{f.é.m}} = 0$
Avec $\mathscr{P}_{\text{Laplace}} = \Gamma_L \times \omega = NiBR^2\omega$
et $\mathscr{P}_{\text{f.é.m}} = ei$
Alors $NiBR^2\omega + ei = 0 \Leftrightarrow e = -NBR^2\omega$

En fonctionnement moteur : $\mathscr{P}_{\text{Laplace}} > 0$ et $\mathscr{P}_{\text{fém}} < 0$: le moteur reçoit de la puissance électrique et la convertit en puissance mécanique.
En fonctionnement générateur : $\mathscr{P}_{\text{Laplace}} < 0$ et $\mathscr{P}_{\text{fém}} > 0$: le générateur reçoit de la puissance mécanique et la convertit en puissance électrique.

RENDEZ-VOUS

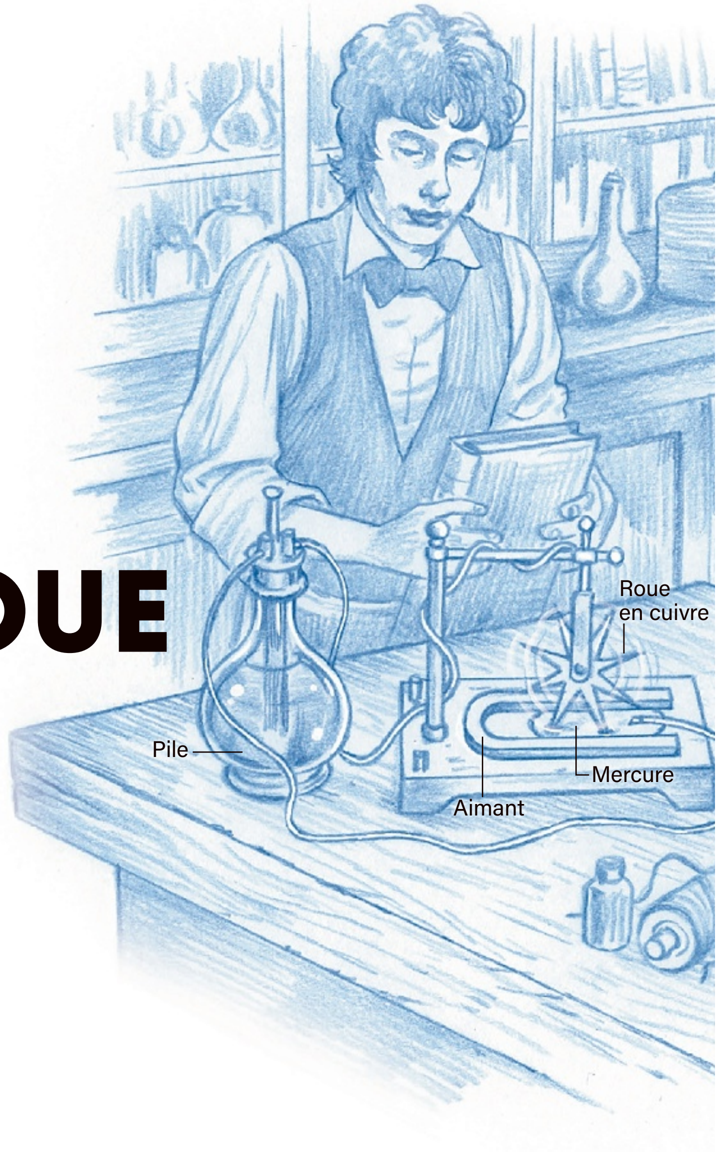
IDÉES DE PHYSIQUE

LES AUTEURS

JEAN-MICHEL COURTY ET ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

UN MOTEUR DANS MA ROUE

Grâce à l'électronique et aux nouveaux aimants, on peut imaginer des moteurs électriques d'un nouveau genre et les placer dans les roues des véhicules. Les avantages sont nombreux!



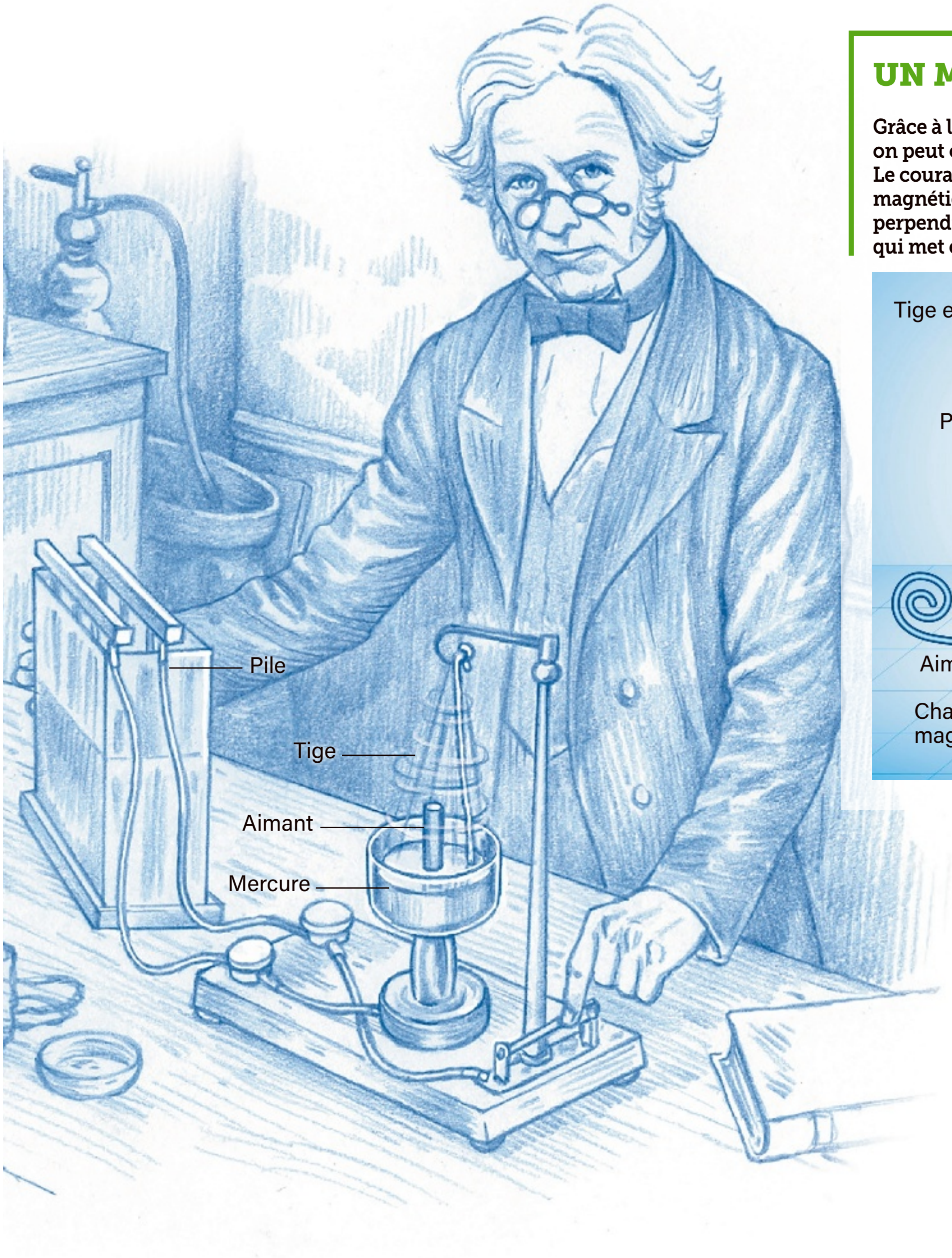
Le nom de Porsche est associé à des modèles célèbres de voitures de luxe comme la 911. On sait moins que lors de l'exposition universelle de 1900, le fondateur de la marque, Ferdinand Porsche, présenta avec Ludwig Lohner l'une des premières voitures hybrides jamais conçue: la Semper Vivus (la «toujours vivante»). Cette voiture était mue par deux moteurs électriques placés directement dans chacune des roues avant et alimentés par une batterie. Deux moteurs thermiques rechargeaient cette batterie afin qu'elle ne se vide pas. Si ce prototype, lourd, compliqué et peu maniable n'a pas eu de descendance directe, l'électrification en cours des véhicules remet à l'ordre du jour l'idée de placer des moteurs directement dans les roues. Mais lesquels sont les mieux adaptés à cet usage? Pour répondre, explorons le fonctionnement des moteurs électriques et découvrons la liberté que laissent leurs conceptions.

DES PREMIERS MOTEURS PEU PERFORMANTS

Au cœur de ces moteurs, une force est particulièrement à l'œuvre: la force de Laplace, que l'on observe lorsqu'un conducteur électrique, comme un fil de cuivre, est parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique. Cette force, dont l'origine est l'action du champ magnétique sur les électrons de conduction du métal, est orthogonale à la fois au courant et au champ magnétique.

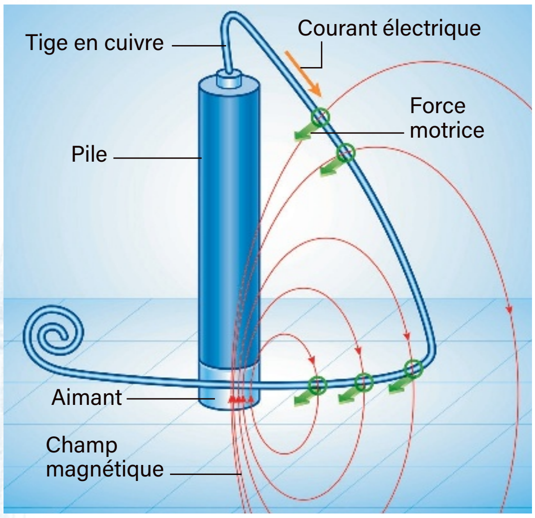
C'est Michael Faraday qui, en 1821, eut l'idée d'utiliser cette force pour créer un mouvement continu. Pour cela, il plaça un aimant droit verticalement dans un bain de mercure et suspendit au-dessus du dispositif une tige de cuivre en biais (*voir la figure ci-dessus*). L'extrémité supérieure de la tige est à la verticale de l'aimant tandis que l'extrémité inférieure baigne dans le mercure. Avantage: le mercure étant bien plus dense que le cuivre, le bas de la tige flotte et ne touche pas le fond du récipient et, étant conducteur, le mercure assure le contact électrique même quand la tige se déplace. Lorsqu'un courant traverse cette tige, celle-ci subit une force perpendiculaire au plan qui contient à la fois la tige et la verticale. Résultat: la tige tourne autour de l'aimant.

C'est le premier moteur rotatif! Son intérêt pratique semble très limité, mais sa simplicité peut nous inspirer afin de



UN MOTEUR FAIT MAISON

Grâce à la puissance des petits aimants à néodyme, on peut chez soi construire un moteur électrique. Le courant électrique *(en orange)* associé au champ magnétique *(en rouge)* crée une force motrice perpendiculaire au plan des deux précédents *(en vert)*, qui met en rotation la tige de cuivre.



Au XIX^e siècle, Michael Faraday et Peter Barlow ont tous les deux conçu les premiers moteurs électriques. Celui du premier *(à droite)* consiste en une tige de cuivre parcourue par un courant électrique qui tourne autour d'un aimant droit placé verticalement dans un bain de mercure. Dans le dispositif de Barlow *(à gauche)*, une roue ou une étoile en cuivre, en contact avec du mercure, tourne dans un aimant en fer à cheval quand elle est parcourue par un courant électrique.

fabriquer une (presque) réplique chez soi: il suffit d'une pile bâton, d'un aimant au néodyme et d'un fil de cuivre (*voir la figure ci-dessus, à droite*). Faraday n'a pas utilisé cette géométrie très compacte, car il n'avait ni piles bâtons ni surtout aimants suffisamment puissants. Ceux dont il disposait, ordinaires, produisent des champs magnétiques un ordre de grandeur moins intense que ceux, à taille comparable, au néodyme développés depuis 1982. Attention de ne pas se pincer quand on les manipule!

Pour en revenir au moteur, il ne fallut attendre qu'un an après Faraday pour que Peter Barlow conçoive un nouveau dispositif qui ouvre des perspectives d'applications. La géométrie y est très différente: un disque (ou une étoile) de cuivre est fixé en son centre sur un axe horizontal. Un courant électrique circule du centre du disque vers une zone de sa périphérie qui baigne dans un bain de mercure. La zone où circule du courant est traversée par un champ magnétique, parallèle à l'axe de rotation, créé par un aimant en fer à cheval. Une force de Laplace met alors le disque et donc l'axe en rotation: de quoi entraîner une poulie et soulever des poids! Hélas, cette roue de Barlow a elle aussi de bien piètres performances!

UNE FORCE UNIQUE POUR LES GOUVERNER TOUS

Les expériences de Faraday et Barlow montrent que la force qu'exerce un champ magnétique sur un conducteur peut créer une rotation continue. Dans ces deux cas, l'aimant est la partie fixe du moteur – le stator – et exerce un couple (un effet de forces qui s'annulent mais provoquent une rotation) sur la partie mobile conductrice, le rotor. Mais on peut parfaitement imaginer l'inverse. La loi de l'action et de la réaction nous assure en effet que le rotor (dans les expériences, le conducteur) exerce en retour un couple sur le stator (l'aimant). La compréhension de cette action mécanique est bien moins facile, car il faudrait pour cela déterminer quel est le champ magnétique créé par le courant électrique,

Les auteurs ont notamment publié: En avant la physique!, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

R ENDEZ-VOUS

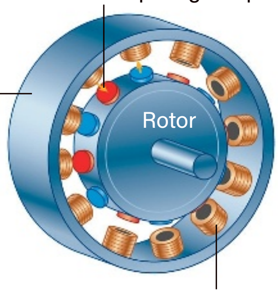
IDÉES DE PHYSIQUE

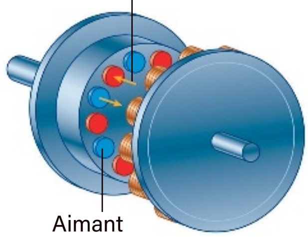
puis la force et le couple qu'il engendre sur l'aimant lui-même. Mais cette réaction n'en existe pas moins et les deux éléments, aimant et conducteur, peuvent être échangés de sorte que l'on peut concevoir des moteurs où c'est l'aimant qui tourne sous l'effet du champ magnétique créé par un courant continu.

Ainsi, à partir d'un principe physique unique, on peut imaginer de multiples géométries à la fois pour le circuit électrique et pour les aimants. Et les possibilités s'enrichissent encore si l'on envisage d'utiliser du courant alternatif, mais nous nous restreindrons à un type de moteur particulièrement répandu dans lequel le rotor est constitué d'aimants permanents et le stator de bobines. Lorsque ces dernières sont alimentées par des courants alternatifs avec des déphasages judicieusement choisis les uns par rapport aux autres, elles produisent un champ tournant autour de l'axe du moteur, qui entraîne avec lui les aimants du rotor et donc met en rotation l'axe.

RADIAL OU AXIAL ?

Deux principaux types de moteur électrique sont imaginables. Dans l'un *(à gauche)*, dit « radial » (le plus courant), en référence à la direction du champ magnétique par rapport à l'axe de rotation, les aimants sont volumineux et placés au voisinage de l'axe. Dans le second, dit « axial » *(à droite)*, favorisé par les nouveaux puissants aimants et les progrès de l'électronique, le champ magnétique est parallèle à l'axe. Le gain de place et de performance autorise de nouvelles applications.





LA FIN DES BOÎTES DE VITESSES

Pendant longtemps, la géométrie de ces moteurs était «concentrique»: le rotor se trouvant à l'intérieur du stator dans la grande majorité des cas ou plus rarement à l'extérieur (par exemple pour les moteurs de ventilateur de plafond). Dans cette géométrie, le champ magnétique produit par les bobines est radial, d'où l'appellation de «moteur à champ radial». Si ces moteurs sont les plus répandus, c'est que les aimants utilisés restent volumineux et lourds et que, mécaniquement, il est préférable qu'ils ne soient pas trop éloignés de l'axe afin de réduire la force centrifuge qu'ils subissent. Le résultat consiste en des moteurs à la forme reconnaissable de cylindre dont le diamètre est comparable à la hauteur.

Un élément change désormais la donne dans la conception des moteurs: les progrès de l'électronique de puissance qui offrent des onduleurs très efficaces. Ces derniers transforment un courant continu en un courant alternatif de fréquence variable et donc ajustable. Plus besoin par conséquent d'engrenages ou de boîte de vitesses pour changer la vitesse de rotation de l'axe: il suffit de modifier la fréquence d'alimentation. On peut ainsi envisager de se passer de tous les intermédiaires se trouvant entre le moteur et la roue et qui sont source de pertes énergétiques et de fragilités mécaniques. Le moteur peut alors être placé directement sur le moyeu et, donc, dans la roue. Mais les moteurs à champ radial sont mal adaptés par leur forme, ils sont trop épais pour une roue, et aussi par le fait qu'ils exercent des couples trop faibles. Face à ces deux obstacles, la solution est de revenir aux sources et à la géométrie axiale de la roue de Barlow.

Dans cette géométrie, rotor et stator ne sont pas concentriques, mais sont placés côte à côte et sont de même diamètre. Grâce aux aimants néodymes, on peut réaliser un rotor mince mais de forte aimantation, et les bobines peuvent elles aussi être plates. Grâce au diamètre bien plus élevé du rotor, une même force magnétique produit un couple plus important que dans le cas d'un moteur à champ radial. De plus, on peut montrer qu'avec cette géométrie le couplage entre les bobines et le champ magnétique est plus efficace, surtout si on dispose deux rotors de part et d'autre du stator, ce qui conduit à un meilleur rendement. Enfin, plus larges qu'épais, ces moteurs dissipent très bien la chaleur et sont très facilement intégrables dans un véhicule.

Nous assistons donc actuellement à de nombreux développements de moteurs «à champ axial» pour équiper tous types de véhicules: trottinettes, vélos, scooters et même voitures... Le constructeur français Renault est ainsi devenu, depuis 2021, le premier constructeur à investir dans la production à l'horizon 2025 d'un moteur électrique axial. Les Porsche reviendront peut-être aussi à cette technologie... ■

BIBLIOGRAPHIE

Fabriquer un moteur électrique chez soi : youtu.be/YdY3iqcJ5hA

J. Gieras *et al.*, ***Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines***, Springer, 2008.

M. Zeraoulia *et al.*, **Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems : A comparative study**, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006.