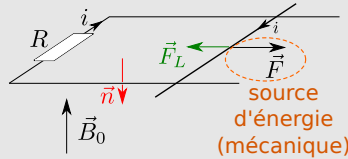


Induction et conversion de puissance

I Principes de la conversion électro-mécanique

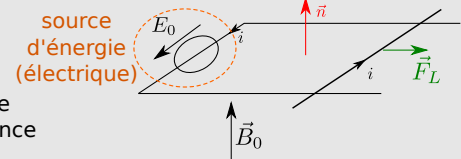
1 - Principe du convertisseur mécanique → électrique (générateur)

- principe
- équ. électrique
- équ. mécanique
- bilan de puissance



2 - Principe du convertisseur électrique → mécanique (moteur)

- principe
- équ. électrique
- équ. mécanique
- bilan de puissance



3 - Bilan



- conversion réversible
- rendement peut atteindre 100% (car $ei + \mathcal{P}_{Laplace} = 0$)

4 - Haut-parleur électrodynamique → TD

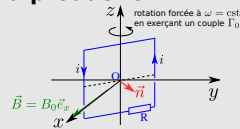
5 - Freinage par induction → TD

Courants de Foucault = courants induits en volume
Lenz ⇒ freinage

II Machines avec parties mobiles en rotation

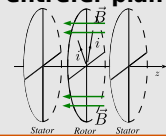
1 - Principe de l'alternateur pour la production d'un courant alternatif

- principe, équ. élec et méca,
- bilan puissance



2 - La machine à courant continu à entrefer plan

- générateur ou moteur
- principe, équ. élec et méca,
- bilan puissance

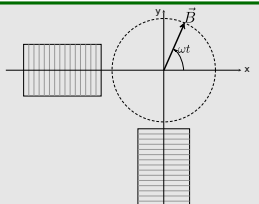


3 - MCC à entrefer cylindrique → TD

III Machines à parties mobiles en rotation entraînées par un champ tournant

1 - Production d'un champ tournant

Bobinages alimentés sinusoïdalement et avec déphasage



2 - Machine synchrone → TD

stator produit \vec{B} tournant | rotor = aimant permanent ou spire avec $i = \text{cst}$

entraîne en rotation $\omega = \omega_{\vec{B} \text{ tournant}}$

3 - Machine asynchrone → TD

stator produit \vec{B} tournant | rotor = spire court-circuitée

entraîne en rotation $\omega < \omega_{\vec{B} \text{ tournant}}$

4 - Utilisations

Ce qu'il faut savoir faire

_____ (cours : I)

- ₁ Rails de Laplace, alimentés (conversion électrique → mécanique) ou forcés mécaniquement (conversion mécanique → électrique) : savoir décrire ce qu'il se passe, savoir écrire l'équation électrique et mécanique, savoir faire un bilan énergétique. → **EC1, EC2**

- ₂ Freinage par induction : expliquer l'origine de l'apparition de courants de Foucault, justifier avec la loi de Lenz l'aspect freinage.

- ₃ Haut-parleur électrodynamique : savoir en décrire le principe de fonctionnement. TD II

_____ (cours : II)

- ₄ Spire rectangulaire non alimentée, forcée en rotation dans un champ \vec{B} uniforme et stationnaire \perp à l'axe de rotation : savoir décrire ce qu'il se passe, savoir écrire l'équation électrique et mécanique, savoir faire un bilan énergétique. → **EC3**

- ₅ Moteur à courant continu à entrefer plan : son fonctionnement étant décrit, savoir en mener une analyse.

_____ (cours : III)

- ₆ Machines à courant continu, synchrone et asynchrone : le fonctionnement étant décrit, savoir en mener une analyse.

Exercice C1 – Principe de la conversion mécanique → électrique : rails de Laplace tractés

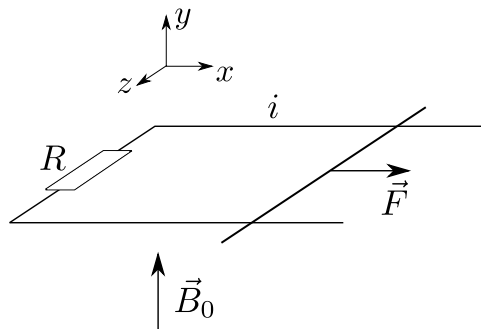
On considère le dispositif des rails de Laplace schématisé ci-contre. La longueur de la tige mobile entre les deux points de contact est notée a , sa masse m , et elle peut glisser sans frottement sur les rails.

Le champ magnétique extérieur $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_y$ est constant et uniforme à travers le circuit.

Il n'y a pas de générateur électrique. En revanche, un opérateur exerce une force \vec{F} sur la tige afin de la faire glisser avec une vitesse constante $\vec{v} = v \vec{e}_x$.

La résistance R représente un dipôle à alimenter (ceci peut-être une lampe, une batterie à charger, peu importe).

On néglige la résistance électrique r des rails ou de la tige, ainsi que l'induction propre L du circuit.



1 - Description de ce qu'il se passe :

- a - Expliquer pourquoi le fait de forcer la tige à se déplacer va donner lieu à un courant induit.
- b - D'après la loi de Lenz, que tend à faire ce courant ?
En déduire le sens dans lequel il s'établit.
Dans la suite nous orientons le circuit dans le sens de ce courant.

Bilan : il y a production d'un courant i , donc on a bien fabriqué un générateur de courant.

La force de Laplace associée à ce courant induit tend à nous empêcher de déplacer la tige : la puissance mécanique que l'on fournit via la force \vec{F} sert donc à s'opposer à cette résistance.

2 - Détermination du courant produit et de la puissance électrique produite

- a - Suivre la méthode habituelle pour aboutir à l'expression du courant i en fonction de a , B_0 , v et R (il s'agira de l'équation électrique). Attention à l'orientation de la normale du circuit.

Bilan : on a là un dispositif qui produit un courant i continu, et donc qui fournit une certaine puissance au dipôle à alimenter.

3 - Considérations mécaniques : calcul de la force F à fournir

- a - Donner l'expression de la force de Laplace \vec{F}_L qui s'exerce sur la tige. (on vérifiera que son signe est cohérent)
- b - Appliquer le théorème de la résultante cinétique à la tige afin d'obtenir l'expression de la force F en fonction de i , a et B_0 (souvenez-vous que $v = \text{cst}$ ici). Il s'agit de l'équation mécanique.

Bilan : ceci donne la relation entre la force F et le courant i que l'on souhaite obtenir.

On constate de plus que F doit compenser exactement la force induite de Laplace si on souhaite maintenir une vitesse constante.

4 - Considérations énergétiques (facultatif en colle)

- a - Exprimer, en fonction de i , a , B_0 et v , la puissance électrique reçue par la résistance, et faire de même avec la puissance mécanique fournie à la tige par la force \vec{F} .
Que constate-t-on ? Est-ce qu'on s'y attendait ?

Bilan : notre modèle ne prend pas en compte les pertes, il est donc normal que toute la puissance fournie mécaniquement soit convertie en puissance électrique reçue par le dipôle :

$$\mathcal{P}_{\text{méca fournie}} = \mathcal{P}_{\text{élec reçu dipôle}}$$

Correction :

1 - Description de ce qu'il se passe :

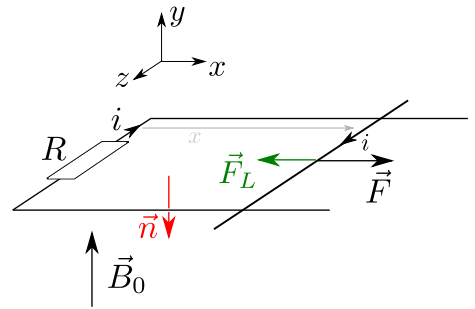
a - Déplacer la tige entraîne une variation de la surface S du circuit, et donc une variation du flux Φ de \vec{B}_0 à travers le circuit. Il en résulte donc une fem induite e , et comme le circuit est fermé, un courant induit i .

b - D'après la loi de Lenz, ce courant induit tend à freiner le déplacement de la tige.

La force de Laplace associée au courant induit est donc dirigée selon $-\vec{e}_x$.

On voit donc avec la main droite qu'il faut que le courant soit selon \vec{e}_z pour que $i\vec{L} \wedge \vec{B}_0$ soit selon $-\vec{e}_x$.

Le courant est donc comme indiqué ci-contre.



2 - Détermination du courant produit et de la puissance électrique produite

a - ★ Étape 1 : orienter le circuit. C'est fait. Attention, avec ce choix du courant la normale $\vec{n} = -\vec{e}_y$.

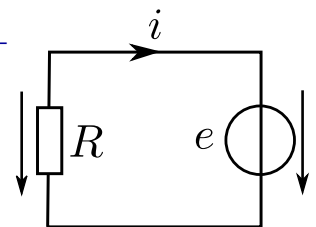
★ Étape 2 : calculer le flux. On a $\Phi = \vec{B}_0 \cdot S\vec{n} = B_0\vec{e}_y \cdot (ax)(-\vec{e}_y) = -B_0ax$.

(la surface vaut $S = a \times x(t)$)

★ Étape 3 : Schéma électrique équivalent, où les phénomènes d'induction sont remplacés par une fem e .

La fem induite s'écrit :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(-B_0ax(t)) = B_0a\frac{dx}{dt}, \quad \text{d'où } \boxed{e = B_0av.}$$



★ Étape 4 : loi des mailles.

$$Ri = e, \quad \text{d'où l'équation électrique : } \boxed{i = \frac{e}{R} = \frac{B_0av}{R}.}$$

3 - Considérations mécaniques : calcul de la force F à fournir

a - Force de Laplace : $\vec{F}_L = i\vec{L} \wedge \vec{B}_0 = ia\vec{e}_z \wedge B_0\vec{e}_y$ (cf schéma pour les orientations), donc

$$\vec{F}_L = -iaB_0\vec{e}_x.$$

Elle est dirigée selon $-\vec{e}_x$, donc s'oppose à la mise en mouvement, ce qui était attendu d'après la loi de Lenz.

b - Théorème de la résultante cinétique sur la tige :

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F}_L + \vec{F},$$

avec \vec{P} le poids et \vec{R} la réaction des rails qui est selon \vec{e}_y car pas de frottements.

En projection sur \vec{e}_x on obtient, et en se souvenant que l'opérateur qui tire fait en sorte que $\vec{v} = \text{cst}$:

$$0 = \underbrace{F_L}_{=-iaB_0} + F, \quad \text{soit l'équation mécanique : } \boxed{F = iaB_0.}$$

On note que $F = |F_L|$, il faut fournir une force qui compense celle de Laplace.

4 - Considérations énergétiques

a - ★ Puissance reçue par le dipôle R : $\mathcal{P}_{\text{élec reçu dipôle}} = u_R \times i = e \times i = aB_0v \times i$.

★ Puissance mécanique fournie à la tige par la force \vec{F} :

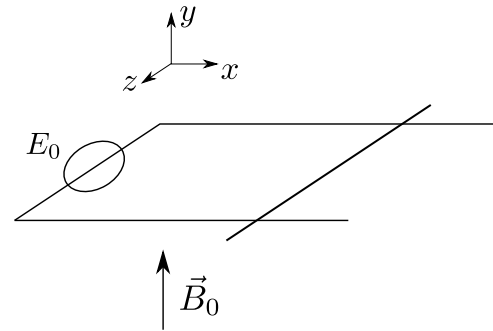
$$\mathcal{P}_{\text{méca fournie}} = \vec{F} \cdot \vec{v} = iaB_0 \times v.$$

b - On constate que $\mathcal{P}_{\text{méca fournie}} = \mathcal{P}_{\text{élec reçu dipôle}}$, et on s'y attendait (cf bilan dans l'énoncé).

Exercice C2 – Principe de la conversion électrique → mécanique : rails de Laplace alimentés

On considère le dispositif des rails de Laplace schématisé ci-contre. La longueur de la tige mobile entre les deux points de contact est notée a , sa masse m , et elle peut glisser sans frottement sur les rails.

Le champ magnétique extérieur $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_y$ est constant et uniforme à travers le circuit. Pour $t < 0$ le générateur ne fournit pas de tension. Puis à partir de $t = 0$ il fournit une tension constante E_0 . On note R la résistance électrique totale du circuit.



- 1 - L'orientation du générateur n'est pas précisée. On voudrait que le flux de \vec{B}_0 à travers le circuit orienté soit positif. Orienter le générateur pour que ce soit le cas.

2 - Équation mécanique

- a - Donner l'expression de la résultante \vec{F}_L des forces de Laplace qui s'exerce sur la tige mobile, en fonction de a , i , B_0 et d'un vecteur de la base. En quel point s'applique-t-elle ?
- b - Établir l'équation du mouvement sur la composante $v(t)$ de la vitesse de la tige selon \vec{e}_x . Il s'agit de l'équation mécanique du système.
- c - La résoudre dans l'hypothèse où le courant i est constant. On prendra $v_x(t=0) = 0$.
En pratique, le courant i est-il constant ? Pourquoi ? On attend un raisonnement qui évoque la loi de Lenz.

Bilan : l'équation mécanique fait intervenir la vitesse et le courant, qui n'est pas constant (effets d'induction). Il y a donc deux inconnues (v et i) pour une équation : il en faut une autre.

3 - Équation électrique

Afin de connaître l'évolution du courant, il faut établir l'équation électrique du circuit équivalent. Comme le circuit ne comporte qu'une seule boucle, on néglige son inductance propre (donc $L = 0$, le flux propre est négligeable devant le flux de \vec{B}_0).

- a - Suivre les étapes de la méthode (chapitre 2) pour établir l'équation électrique du circuit (équation sur i , qui fera aussi intervenir la position x de la barre ou ses dérivées).

Bilan : l'équation électrique relie elle aussi v et i .

- 4 - Utiliser les deux équations précédentes (électrique et mécanique) pour aboutir à une équation différentielle sur la vitesse de la barre.

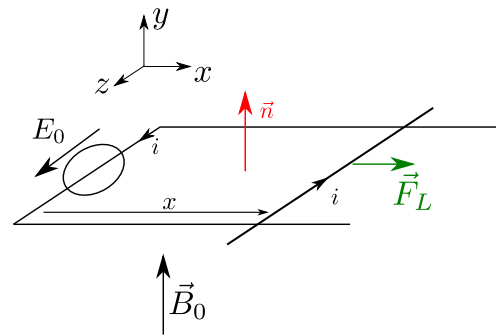
En déduire l'expression de la vitesse limite atteinte, puis du courant débité en régime permanent.

5 - Bilan énergétique (facultatif en colle)

Multiplier l'équation électrique $E_0 = Ri + B_0 av$ par l'intensité i et interpréter chacun des termes en termes de puissance reçue ou fournie.

Correction

- 1 - On place le pouce sur B_0 et la rotation de la main (droite) indique que le courant doit être dans le sens indiqué ci-contre. On en déduit alors l'orientation du générateur.



2 - Équation mécanique

- a - Résultante des forces de Laplace : $\vec{F}_L = i \vec{L} \wedge \vec{B}_0$ avec l'orientation de \vec{L} donnée par le sens du courant, donc $\vec{L} = -a \vec{e}_z$. D'où :

$$\vec{F}_L = -ia \vec{e}_z \wedge B_0 \vec{e}_y, \quad \text{soit} \quad \boxed{\vec{F}_L = ia B_0 \vec{e}_x.}$$

On vérifie avec la main droite que le sens est correcte : si $i > 0$ on a bien, avec le pouce sur la tige dans le sens de i , l'index sur \vec{B}_0 , une force dans le sens de $+\vec{e}_x$.

Son point d'application est le milieu de la tige.

b - Théorème de la résultante cinétique sur la tige :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F}_L,$$

avec \vec{P} le poids et \vec{R} la réaction des rails qui est selon \vec{e}_y car pas de frottements. En projection sur \vec{e}_x on obtient :

$$m \frac{dv}{dt} = iaB_0, \quad \text{soit l'équation mécanique : } \boxed{\frac{dv}{dt} = \frac{iaB_0}{m}}.$$

c - Si $i = \text{cst}$, alors ceci s'intègre en $\boxed{v = \frac{iaB_0}{m} t}$.

En pratique, le courant i n'est pas constant :

- nous avons montré que la tige s'éloigne selon $+\vec{e}_x$,
- donc la surface du circuit est de plus en plus grande, donc le flux Φ de \vec{B}_0 augmente,
- si Φ varie, c'est qu'il y a création d'un courant induit dans le circuit,
- d'après la loi de Lenz le courant induit va s'opposer à ce qui le cause, c'est-à-dire qu'il va freiner la tige,
- et pour cela, ce courant induit doit s'opposer au courant du générateur.

3 - Équation électrique

a - ★ Étape 1 : orienter le circuit. C'est déjà fait avec le choix du sens du courant.

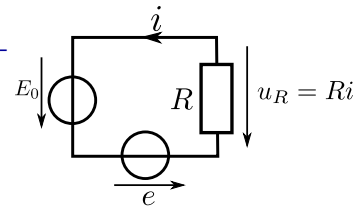
★ Étape 2 : calculer le flux à travers le circuit.

$$\Phi = \underbrace{Li}_{\text{négligé}} + \vec{B}_0 \cdot S\vec{n} \quad \text{avec } S = a \times x \text{ et } \vec{n} = +\vec{e}_y.$$

On a donc $\Phi = B_0 a x(t)$.

★ Étape 3 : schéma électrique équivalent, où les phénomènes d'induction sont remplacés par une fem

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dB_0 a x(t)}{dt} = -B_0 a \frac{dx}{dt} \quad \text{soit } e = -B_0 a v.$$



★ Étape 4 : loi des mailles, $E_0 + e = Ri$, d'où :

$$\text{équation électrique : } \boxed{E_0 = B_0 a v + Ri}.$$

4 - ★ On a donc deux équations couplées, portant sur les deux inconnues $i(t)$ et $v(t)$:

$$m \frac{dv}{dt} = iaB_0 \quad \text{et} \quad E_0 = B_0 a v + Ri.$$

On cherche une équation sur v uniquement, donc on isole i dans la seconde : $i = \frac{E_0}{R} - \frac{B_0 a}{R} v$, et on injecte dans la première :

$$m \frac{dv}{dt} = aB_0 \left(\frac{E_0}{R} - \frac{B_0 a}{R} v \right), \quad \text{soit } \boxed{\frac{dv}{dt} = \frac{aB_0 E_0}{mR} - \frac{a^2 B_0^2}{mR} v}.$$

On peut interpréter cette équation :

$$\frac{dv}{dt} = \underbrace{\frac{aB_0 E_0}{mR}}_{\text{terme moteur dû au générateur}} - \underbrace{\frac{a^2 B_0^2}{mR} v}_{\text{terme résistif dû à l'induction}}.$$

On remarque que le carré sur B_0 fait que le second terme est toujours de même signe et freine la tige.

★ On constate que plus v augmente, plus le terme qui freine va être grand, et il va finir par compenser le terme moteur. Donc au bout d'un temps long (quelques fois $\tau = \frac{mR}{a^2 B_0^2}$), $\frac{dv}{dt} = 0$.

On a alors $\frac{aB_0 E_0}{R} = \frac{a^2 B_0^2}{R} v$, d'où $\boxed{v = \frac{E_0}{aB_0}}$.

★ Quant au courant, on avait l'équation mécanique :

$$m \frac{dv}{dt} = iaB_0, \quad \text{donc lorsque } v = \text{cst, on a } \boxed{i = 0.}$$

Ce courant i est le courant total (générateur + effet d'induction). Il est nul, c'est donc que le courant induit compense complètement le courant produit par le générateur. C'est un cas extrême de la loi de Lenz. La force de Laplace devient nulle, et la tige continue son mouvement à vitesse constante (car nous négligeons tout frottements).

5 - Bilan énergétique :

On part de $E_0 = Ri + B_0av$ que l'on multiplie par i , et on se souvient que $F_L = B_0ai$:

$$E_0i = Ri^2 + B_0avi, \quad \text{soit } E_0i = Ri^2 + F_Lv.$$

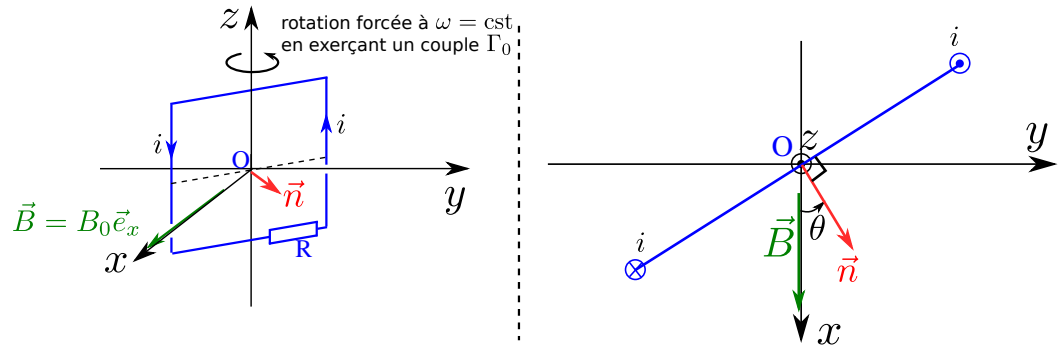
On a donc :

- $\mathcal{P}_{\text{elec fournie généré}} = E_0i$ la puissance électrique fournie par le générateur, qui est distribuée dans deux termes :
- $\mathcal{P}_{\text{pertes Joule}} = Ri^2$ la puissance dissipée par effet Joule, et
- $\mathcal{P}_{\text{méca forces Laplace}} = F_Lv$ la puissance mécanique fournie par les forces de Laplace à la tige.

Exercice C3 – conversion mécanique → électrique avec machine en rotation : l'alternateur

On considère une spire rectangulaire de surface S , schématisée ci-contre. Cette spire est refermée sur une résistance R , qui représente un dipôle à alimenter (ceci peut-être une lampe, une batterie à charger, peu importe).

La spire baigne dans un champ magnétique uniforme et stationnaire \vec{B}_0 , produit par un dispositif externe (par exemple des aimants).



On fournit un certain couple Γ_0 pour maintenir en rotation cette spire autour de l'axe Oz à une vitesse angulaire ω constante.

Ceci va avoir pour effet de produire un courant induit i dans la spire, et donc d'alimenter le dipôle R . Il s'agit donc d'un convertisseur de puissance mécanique ($\Gamma_0\omega$ donne la puissance mécanique fournie pour maintenir la rotation) en puissance électrique (Ri^2 fournie au dipôle).

C'est le principe de base des dynamos de vélo ou des alternateurs de voiture qui recharge la batterie en roulant.

Description de ce qu'il se passe

- 1 - Expliquer qualitativement (= sans équations) pourquoi la rotation de la spire dans le champ \vec{B}_0 induit un courant i .

Détermination du courant produit et de la puissance électrique produite

- 2 - Suivre les étapes de la méthode du chapitre précédent pour établir l'équation électrique :
 - a - Étape 1 : Orienter le circuit en choisissant un sens du courant (c'est déjà fait sur le schéma!).
 - b - Étape 2 : Montrer que le flux de \vec{B}_0 à travers la spire s'écrit $\Phi = B_0 S \cos \omega t$.
 - c - Étape 3 : Faire un schéma électrique équivalent.
 - d - Étape 4 : à l'aide de la loi des mailles, en déduire l'expression du courant i induit.

(Remarque : On a négligé l'inductance propre de la spire, qu'on aurait pu prendre en compte soit en ajoutant un terme Li à Φ , soit en ajoutant une inductance L dans le schéma électrique équivalent.)

- 3 - En déduire l'expression de la puissance $\mathcal{P}_{\text{elec}} = ei$ fournie par la fem induite (et donc aussi reçue par le dipôle R).

Bilan : l'expression de i montre qu'on a bien fabriqué un générateur de courant alternatif

Considérations mécaniques : calcul du couple Γ_0 à fournir

On suppose la liaison pivot selon Oz parfaite. Il n'y a donc pas de dissipation d'énergie. Le moyen le plus simple d'obtenir le couple à fournir est alors de dire que la puissance électrique calculée précédemment provient entièrement de la puissance mécanique fournie à la spire.

- 4 - Donner l'expression de cette puissance mécanique fournie en fonction de Γ_0 et de ω , puis en l'égalant à la puissance reçue par le dipôle, en déduire l'expression de Γ_0 .

Remarque : On vient en fait d'utiliser $ei + \mathcal{P}_{\text{Laplace}} = 0$.

Correction :

Description de ce qu'il se passe

- 1 - La rotation de la spire dans le champ \vec{B}_0 entraîne une variation du flux Φ du champ \vec{B}_0 à travers la spire, et donc une fem induite et un courant induit i .

La production de puissance électrique se fait donc par l'intermédiaire des effets d'induction.

Détermination du courant produit et de la puissance électrique produite

- 2 - a - Étape 1 : Orienter le circuit en choisissant un sens du courant (c'est déjà fait sur le schéma!).

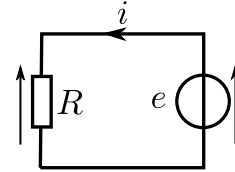
- b - Étape 2 : le flux de \vec{B}_0 à travers la spire s'écrit

$$\Phi = \vec{B}_0 \cdot S\vec{n} = B_0 S \cos \omega t, \quad \text{car l'angle entre } \vec{B}_0 \text{ et } \vec{n} \text{ est } \theta = \omega t.$$

- c - Étape 3 : schéma électrique équivalent ci-contre.

La fem induite est

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega B_0 S \sin \omega t.$$



- d - Étape 4 : loi des mailles :

$$e = Ri, \quad \text{d'où} \quad i = \frac{\omega B_0 S}{R} \sin \omega t.$$

- 3 - La puissance fournie par la fem induite e (et aussi reçue par le dipôle R) s'écrit

$$\mathcal{P}_{\text{elec}} = e \times i = Ri^2 = \frac{\omega^2 B_0^2 S^2}{R} \sin^2 \omega t.$$

Considérations mécaniques : calcul du couple Γ_0 à fournir

- 4 - Puissance mécanique fournie : $\mathcal{P}_{\text{meca}} = \Gamma_0 \omega$.

Or cette puissance fournie se retrouve reçue par le dipôle (car nous négligeons les frottements et les pertes Joules dans les fils), donc

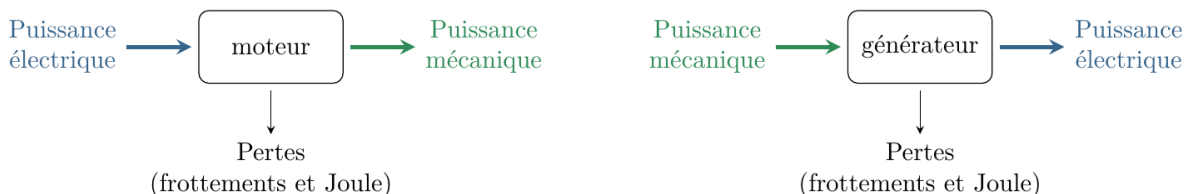
$$\Gamma_0 \omega = Ri^2 = \frac{\omega^2 B_0^2 S^2}{R} \sin^2 \omega t, \quad \text{d'où} \quad \Gamma_0 = \frac{\omega B_0^2 S^2}{R} \sin^2 \omega t.$$

Dans le chapitre précédent, nous avons donné les lois de l'induction. Nous avons uniquement considéré des circuits fixes, et donc le flux Φ du champ magnétique à travers le circuit pouvait varier car le champ \vec{B} dépendait du temps.

Dans ce chapitre nous allons envisager des circuits se déplaçant, ou qui comportent des parties mobiles. Ceci permet aussi à Φ de varier, et donc à une fem d'apparaître.

Le fait qu'il y ait des parties mobiles va permettre l'étude de dispositifs qui permettent une conversion de puissance :

- conversion électrique \rightarrow mécanique (moteur électrique, haut-parleur...);
- conversion mécanique \rightarrow électrique (générateur de type dynamo ou alternateur, freinage par induction...).



Quelques rappels sur la puissance :

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

$$\mathcal{P} = \vec{F} \cdot \vec{v}(A).$$

- Puissance mécanique reçue par un objet en rotation (vitesse angulaire ω) autour de Oz , soumis à un couple $\vec{\Gamma}$:

$$\mathcal{P} = \vec{\Gamma} \cdot \omega \vec{e}_z.$$

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

$$\mathcal{P}_{\text{fournie}} = U \times i.$$

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

$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = U \times i.$$

I – Principes de la conversion électro-mécanique

Nous introduisons les principes généraux de la conversion de puissance électrique \leftrightarrow mécanique sur l'exemple simple et pédagogique des rails de Laplace dans le I.1 et le I.2.

Ceci permettra, dans les parties I.3, I.4, II et III, de traiter des dispositifs plus concrets.

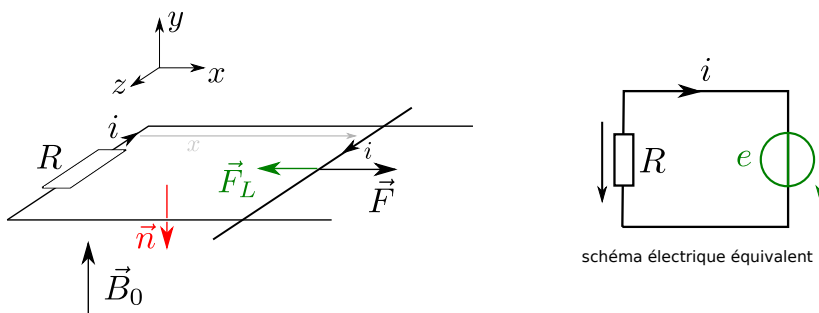
Nous allons voir que lorsqu'il y a des parties mobiles, il faut deux types d'équations modéliser le fonctionnement :

- **L'équation électrique**, qui s'obtient avec la méthode du chapitre précédent (orienter, exprimer le flux, schéma électrique équivalent, loi de Faraday, loi des mailles).
- **L'équation mécanique**, qui s'obtient en appliquant aux parties mobiles soit le PFD (si elles sont en translation) soit le TMC (si elles sont en rotation).

1 – Principe du convertisseur mécanique \rightarrow électrique (générateur)

On considère le dispositif des rails de Laplace ci-contre, dans lequel il n'y a pas de générateur, mais un dipôle R que l'on désire alimenter électriquement.

Pour cela, on **tire** sur la tige avec une force \vec{F} , qui est telle qu'on impose une vitesse v constante à la tige.



→₁ Faire l'**EC1** (avec la vidéo associée).

Bilan :

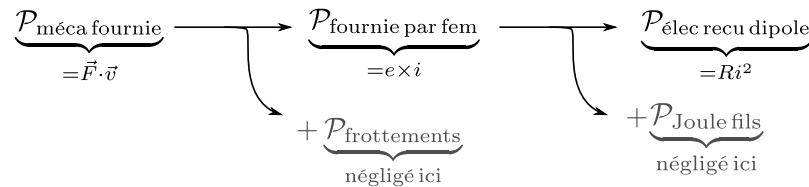
Ce système simple permet de mettre en évidence des éléments que l'on retrouve toujours dans les dispositifs de conversion mécanique → électrique (les générateurs) :

- ▶ **Idée du fonctionnement :** la conversion de puissance mécanique en puissance électrique se fait par l'intermédiaire des effets d'induction.
 - On fournit une certaine puissance mécanique pour mettre en mouvement des parties mobiles.
 - Ce mouvement imposé est dans un champ \vec{B}_0 externe, il en résulte donc une variation du flux de \vec{B}_0 à travers le circuit, une fem induite e , et un courant induit.
 - C'est ce courant induit qui sert à alimenter le dipôle voulu.

- ▶ **Bilan global de puissance :** s'il n'y a pas de frottements, la puissance fournie mécaniquement est intégralement convertie en puissance électrique $e \times i$ débitée par la fem induite.

Cette puissance électrique $e \times i$ est à son tour répartie d'une part en pertes (effet Joule dans les fils), et d'autre part en puissance électrique reçue par le dipôle.

En résumé :



- ▶ **Égalité entre puissance des forces de Laplace et puissance de la fem induite :**

- La présence du courant induit, et du champ \vec{B}_0 , impliquent l'existence de forces de Laplace. D'après la loi de Lenz, ces forces s'opposent à la mise en mouvement des parties mobiles (leur puissance est donc négative : $\mathcal{P}_{\text{Laplace}} < 0$). C'est contre ces forces de Laplace que doit lutter la force fournie par l'opérateur afin de produire une puissance électrique. Ainsi, $|\mathcal{P}_{\text{Laplace}}|$ est la puissance électrique produite.
- Or le terme de production de puissance électrique est ei (puissance délivrée par la fem, > 0).

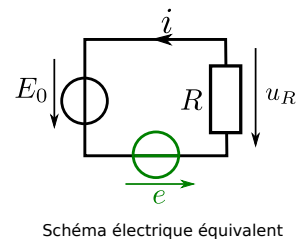
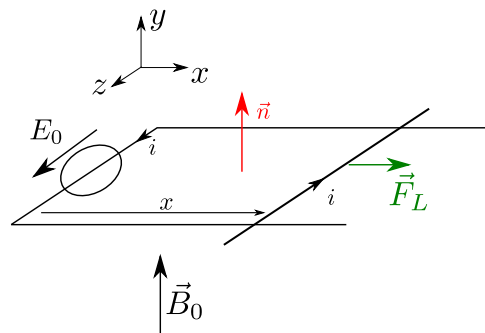
Il y a donc égalité entre ei et $|\mathcal{P}_{\text{Laplace}}|$:

$$ei = -\mathcal{P}_{\text{Laplace}}, \text{ donc } \boxed{ei + \mathcal{P}_{\text{Laplace}} = 0.}$$

2 – Principe du convertisseur électrique → mécanique (moteur)

On considère maintenant un rail de Laplace alimenté par un générateur de tension E_0 . Nous l'avons déjà vu au chapitre 1, ceci va mettre la tige en mouvement.

Cependant dans le chapitre 1 nous avons utilisé un générateur de courant I , qui impose un courant constant et empêche donc tout courant induit. Ici le courant n'est plus imposé, seule la tension E_0 l'est.



→₂ Faire l'**EC2** (avec la vidéo associée).

Bilan : Ce système simple permet de mettre en évidence des éléments que l'on retrouve toujours dans les dispositifs de conversion électrique → mécanique (comme les moteurs, mais aussi les haut-parleurs) :

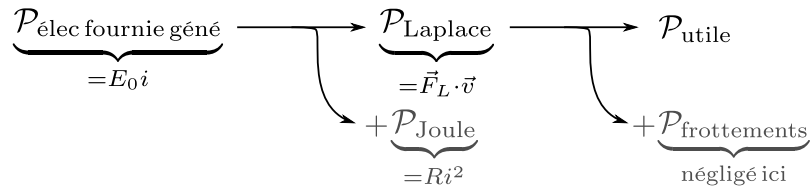
- **Idée du fonctionnement :** la conversion de puissance électrique en puissance mécanique se fait par l'action des forces de Laplace sur les parties mobiles.

Ces forces sont présentes car un générateur impose un courant i dans une zone où règne un champ magnétique \vec{B}_0 .

- **Bilan global de puissance :** la puissance électrique $E_0 i$ fournie par le générateur se retrouve d'une part dissipée par des pertes (effet Joule), d'autre part convertie en puissance mécanique (la puissance des forces de Laplace).

La puissance des forces de Laplace est motrice. Elle sert à mettre en mouvement les parties mobiles, donc à fournir la force nécessaire ou le couple utile, à vaincre les frottements, etc.

En résumé :



- **Égalité entre puissance des forces de Laplace et puissance de la fem induite :**

Les phénomènes d'induction agissent en s'opposant à la mise en mouvement. La fem induite e est ainsi toujours opposée au générateur E_0 qui fournit la puissance ($e < 0$).

Remarque : En SII, on pose $e' = -e > 0$ et on parle de force contre-électromotrice, car elle s'oppose à celle du générateur.

Le générateur fournit une puissance $E_0 i$, qui est en partie donnée aux phénomènes d'induction sous la forme de $\mathcal{P}_{\text{Laplace}}$ et en partie dissipée par effet Joule. On a $\mathcal{P}_{\text{Laplace}} > 0$ car cette force est motrice.

Où cette puissance apparaît-elle dans l'équation électrique $E_0 = Ri - e$? Multiplions par i :

$$E_0 i = Ri^2 + (-ei).$$

On voit que la puissance $E_0 i$ délivrée par le générateur est d'une part dissipée par effet Joule, d'autre part fournie à la fem induite (terme $-ei > 0$). C'est donc ce dernier terme qui correspond à $\mathcal{P}_{\text{Laplace}}$. On a donc l'égalité :

$$-ei = \mathcal{P}_{\text{Laplace}}, \quad \text{soit} \quad \boxed{ei + \mathcal{P}_{\text{Laplace}} = 0.}$$

3 – Bilan du 1 et du 2

Généralités

- La conversion de puissance électromécanique passe par des phénomènes d'induction.

$$\text{puissance mécanique} \quad \Leftrightarrow \quad \text{puissance électromagnétique} \quad \Leftrightarrow \quad \text{puissance électrique}$$

- La conversion est réversible : des dispositifs semblables (pas forcément dans la technologie mais au moins dans le principe) peuvent réaliser la conversion dans un sens ou dans l'autre.

- Le rendement de la conversion n'est pas borné par un principe physique et peut atteindre 100%.

Il l'atteint si on néglige les différents types de pertes (Joule, frottements...).

C'est très différent des machines thermiques où nous avons vu que le rendement est borné par le second principe : $\eta \leq \eta_{\text{rév}} = 1 - T_f/T_c \simeq 60\%$ pour un moteur et des températures courantes.

- La conversion parfaite entre puissance électrique et mécanique, via les phénomènes d'induction, est contenue dans la relation (à connaître)

$$ei + \mathcal{P}_{\text{Laplace}} = 0$$

où e est la fem d'induction due au champ \vec{B}_0 externe.

La relation $ei + \mathcal{P}_{\text{Laplace}} = 0$ est toujours valable, pourvu que :

- le champ \vec{B}_0 soit stationnaire (donc pas dans les cas de la partie III),
 - on ne prend en compte dans e que la contribution due au champ externe \vec{B}_0 , et pas celle due au champ propre \vec{B}_{propre} produit par le circuit.
- C'est pourquoi, si l'autoinductance L n'est pas négligée, alors on en tient compte en dehors de e (en ajoutant dans le circuit électrique équivalent une inductance L en convention récepteur). Nous le ferons en exercice.

4 – Exemple de mise en œuvre : le haut-parleur électrodynamique

→ Ceci fera l'objet d'un exercice du TD.

5 – Exemple de mise en œuvre : freinage par induction

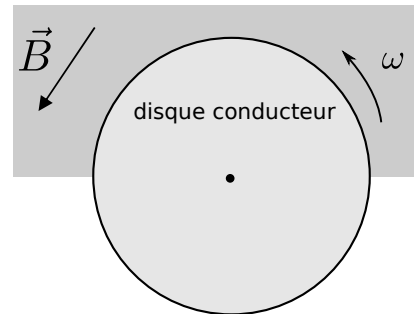
L'aspect modérateur de l'induction peut servir dans des dispositifs de freinage.

Considérons à nouveau le rail de Laplace non alimenté du I.1. Si on donne une vitesse initiale \vec{v}_0 à la tige, alors ce mouvement provoque une variation de flux, une fem, un courant induit, et une force de Laplace qui s'oppose au mouvement.

Il y a donc un effet de freinage.

→ Nous explorerons ceci dans un exercice du TD sur la suspension magnétique.

Mentionnons aussi que ce principe est utilisé dans des dispositifs de freinage des camions, bus, trains, tram et métros. Dans ces cas là un disque conducteur est solidaire de la roue. Lorsqu'un freinage est souhaité, un champ magnétique \vec{B} est produit sur une partie du disque. Alors :



- Vu du disque en rotation, le champ magnétique n'est pas stationnaire.
- Il en résulte un flux Φ non constant, et donc une fem e induite.
- Le disque étant conducteur, il en résulte des courants.

Ces courants prennent place dans tout le volume du conducteur. On les appelle **courants de Foucault**.

- Courant + champ $\vec{B} \Rightarrow$ force de Laplace.

D'après la loi de Lenz, la résultante de ces forces freine le mouvement du disque, donc freine la roue.

D'un point de vue énergétique, l'énergie cinétique du véhicule est dissipée par effet Joule dans le disque conducteur, qui s'échauffe.

Ce type de freinage est avantageux car il n'y a pas de frottements donc pas d'usure, une création de chaleur répartie sur tout le volume donc moins violente, et pas de risque de blocage de la roue puisque si elle ne tourne plus la variation de flux est nulle et les courants également. Il faut en revanche conserver un dispositif de freinage standard, puisque l'efficacité de celui par induction décroît avec la vitesse de rotation.

Enfin, certaines mise en œuvre permettent de récupérer le courant et de réinjecter la puissance électrique sur le réseau (cas de certains métros, trains, et même voitures électriques).

Courants de Foucault

On retiendra que les courants de Foucault sont des courants qui apparaissent dans le volume d'un conducteur lorsqu'il est soumis à un champ magnétique variable dans son référentiel, à cause des phénomènes d'induction.

II – Machines avec parties mobiles en rotation

Les dispositifs vus dans la partie I utilisent des mouvements de translation des parties mobiles. Il est plus courant et pratique d'utiliser des mouvements de rotation (moteur, générateur). Dans cette partie II nous voyons le principe du générateur (ou dynamo, partie II.1), et le principe du moteur/générateur à courant continu (parties II.2 et II.3).

1 – Principe de l'alternateur pour la production d'un courant alternatif

L'exercice qui suit présente le principe d'un alternateur, machine dont la rotation forcée permet de produire un courant alternatif.

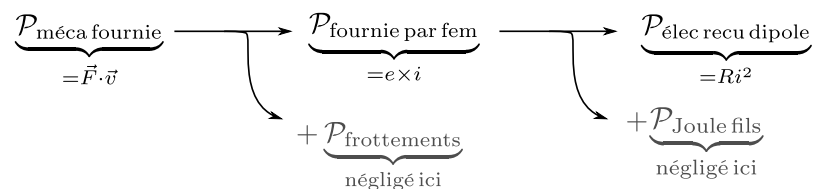
→₃ Faire l'EC3 (avec la vidéo associée).

Bilan : très similaire au rail de Laplace tracté.

► **Idée du fonctionnement :** la mise en rotation de la spire dans \vec{B}_0 fixe engendre une variation de flux dans la spire, donc une fem induite dans la spire, donc un courant dans la spire qui va alimenter le dipôle.

► **Bilan global de puissance :** s'il n'y a pas de frottements, la puissance fournie mécaniquement est intégralement convertie en puissance électrique $e \times i$ débitée par la fem induite.

Cette puissance électrique est à son tour répartie d'une part en pertes (effet Joule dans les fils), et d'autre part en puissance électrique reçue par le dipôle.



En négligeant les pertes, le rendement est de 100%.

Remarque culturelle : il existe d'autres solutions technologiques que celle présentée ici pour faire un générateur électrique :

- Dans une dynamo de vélo, c'est plutôt l'inverse qui est mis en œuvre : le rotor est un aimant permanent, et le stator est un bobinage fixe dans lequel un courant est induit par le fait que l'aimant en rotation produit un flux de \vec{B} variable.
- Dans un alternateur de voiture (utilisé pour charger la batterie), on trouve la même configuration que pour la dynamo de vélo. À une différence près : le champ magnétique créé par le rotor ne l'est pas par un aimant permanent, mais par un bobinage alimenté par un courant continu I (en provenance de la batterie). Le rotor est donc équivalent à un moment magnétique \vec{m} proportionnel à I , dont la rotation produit un flux variable dans le stator et donc un courant induit i alternatif, redressé par un pont de diodes et envoyé pour charger la batterie.

Le courant I du rotor est régulé afin que la tension de sortie de l'alternateur soit indépendante de la vitesse de rotation du moteur.¹

2 – La machine à courant continu à entrefer plan

Une machine à courant continu (MCC) peut fonctionner en moteur (on lui fournit un courant pour la faire tourner) ou en générateur (on la fait tourner pour produire un courant).

Dans tous les cas, le courant est continu ($i = \text{cst}$).

Il en existe plusieurs technologies. Nous en voyons une ici (la MCC à entrefer plan), et une autre en TD.

Elles sont toujours réversibles, c'est-à-dire qu'elles peuvent fonctionner en moteur si elles sont alimentées, ou en générateur si on les force à tourner.

Rien n'est à connaître par cœur, en particulier la description des machines sera toujours fournie.

De plus, vous voyez aussi ces équations en cours de SII, sans toutefois les démontrer, et avec parfois des conventions de signe différentes.

1. Pour les curieux : <https://www.tecnipass.com/cours-materiels-machines-alternateurs>

a/ Structure

Une machine tournante est toujours composée d'un **rotor** et d'un **stator**.

- Le stator est fixe.

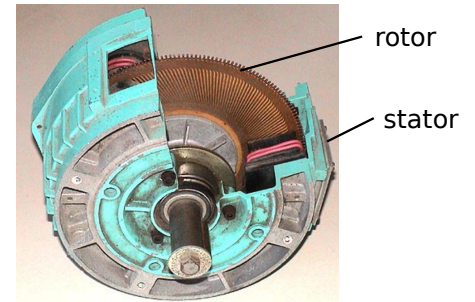
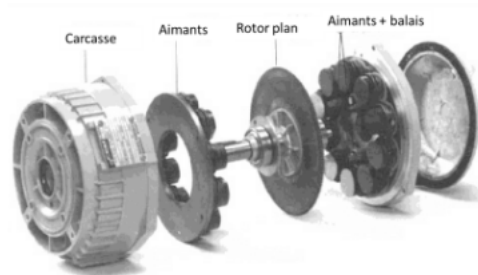
Dans le cas de la MCC à entrefer plan, il est constitué d'aimants qui produisent un champ magnétique stationnaire.

- Le rotor est la partie tournante.

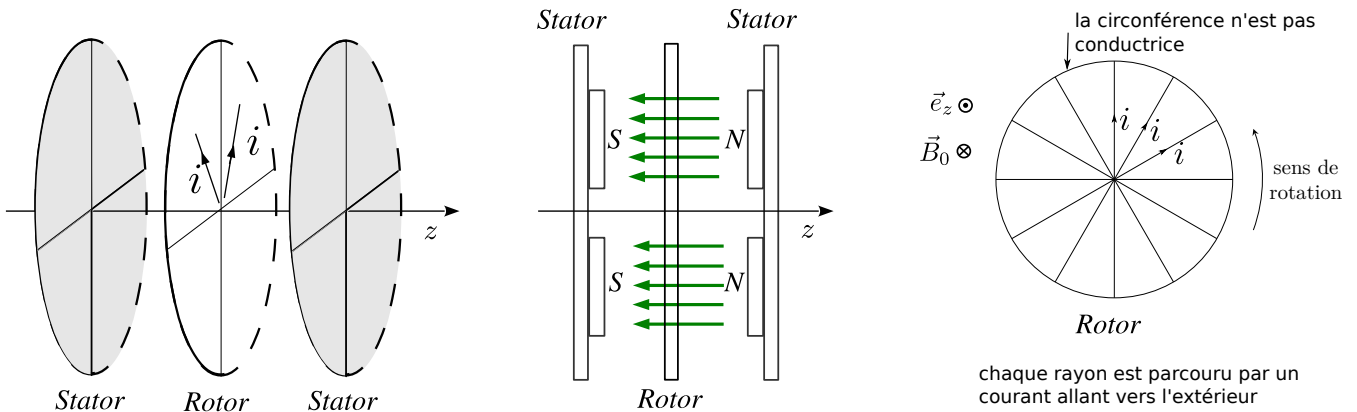
Dans le cas de la MCC à entrefer plan, il est constitué de fils qui partent dans la direction radiale. Chaque fil est parcouru par un courant i .

Un choix astucieux du câblage et du sens de polarité des aimants permet de n'alimenter les fils qu'en passant par l'axe. Nous le décrirons en remarque plus loin. Pour l'instant, nous allons faire comme si la machine était une roue d'axe Oz , composée de N rayons parcourus chacun par un courant i , plongée dans un champ $\vec{B}_0 = -B_0\vec{e}_z$.

Ci-contre : exemple d'une MCC à entrefer plan →



Ci-dessous, le modèle simple que l'on en fait ⇓



b/ Fonctionnement en générateur

En fonctionnement générateur, on exerce sur la roue un couple Γ_0 afin de la forcer à tourner à une vitesse angulaire $\omega = \text{cst}$.

On peut voir chaque rayon comme un rail de Laplace : le rayon joue le rôle de la tige que l'on force à se déplacer, dans un champ \vec{B}_0 .

→₄ Expliquer pourquoi il va y avoir génération d'un courant.

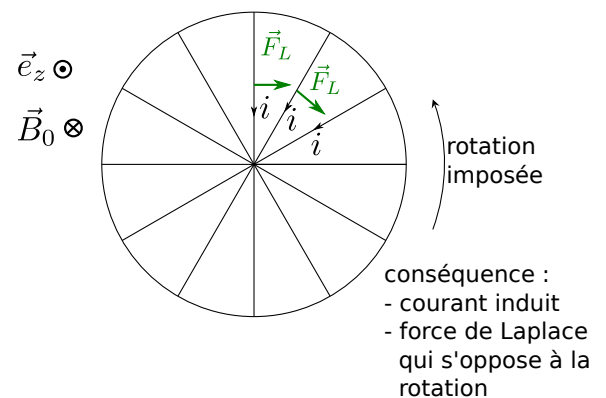
Idem rail de Laplace : le conducteur se déplaçant dans un champ \vec{B} va induire un courant.

→₅ En utilisant la loi de Lenz, prévoir le sens du courant.

D'après la loi de Lenz, l'induction va s'opposer à la mise en rotation de la roue.

Donc la force de Laplace doit être comme sur le schéma ci-contre, ce qui implique que i va vers le centre de la roue sur chaque rayon (règle main droite).

Conclusion : on a bien un générateur de courant.

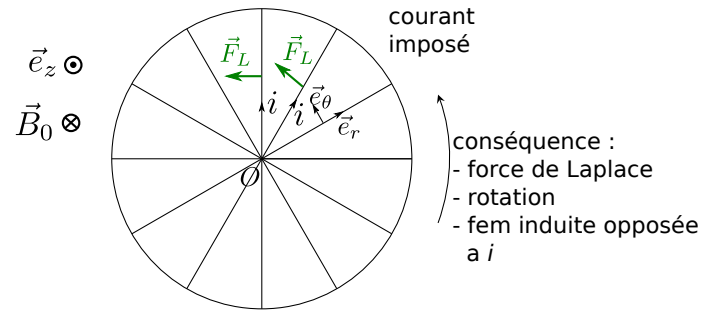


c/ Fonctionnement en moteur

En fonctionnement moteur, on impose un courant i dans chaque rayon, qui va du centre vers la périphérie.

→₆ Expliquer pourquoi ceci entraîne la rotation de la roue, et dans quel sens.

Courant i dans un champ \vec{B}_0 : il y a une force de Laplace $\vec{F}_L = i\vec{L} \wedge \vec{B}_0$ sur chaque rayon, qui fait tourner la roue.



Conclusion : on a bien un moteur. Mettons en équation son fonctionnement.

Équation mécanique

→₇ On note a la longueur d'un rayon, donner l'expression de la force de Laplace s'exerçant sur un rayon, rappeler son point d'application, puis donner l'expression du moment résultant en O .

- Force de Laplace : $\vec{F}_L = i\vec{L} \wedge \vec{B}_0 = ia\vec{e}_r \wedge (-B_0\vec{e}_z) = iaB_0\vec{e}_\theta$.

C'est bien dans le sens attendu.

- Point d'application : le milieu du rayon.

- Moment en O : $\vec{\Gamma}_O = \frac{a}{2}\vec{e}_r \wedge \vec{F}_L = \frac{ia^2B_0}{2}\vec{e}_z$.

Conclusion : le couple exercé par les N rayons sur la roue est

$$\Gamma = \frac{Nia^2B_0}{2}.$$

Couple pour une MCC

Le couple résultant des actions de Laplace sur une MCC est proportionnel au courant qui la parcourt :

$$\Gamma_L = Ki.$$

(ici nous avons $K = \frac{Na^2B_0}{2}$, mais l'expression diffère pour chaque type de MCC)

Nous pouvons poursuivre en écrivant l'équation mécanique, à l'aide du TMC appliqué à la roue. Supposons pour cela que le moteur doit entraîner une charge qui nécessite un couple utile $\vec{\Gamma}_u = -\Gamma_u\vec{e}_z$ ($\Gamma_u > 0$). Alors :

$$J \frac{d\omega}{dt} = \Gamma_L - \Gamma_u$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = Ki - \Gamma_u.$$

Équation électrique

On constate que le flux Φ de \vec{B}_0 à travers la roue est constant. La loi de Faraday donnerait donc $e = -d\Phi/dt = 0$. Il y a pourtant bien une fem induite ! Ceci se comprend en voyant que chaque rayon agit comme la tige des rails de Laplace. C'est donc une exception à la loi de Faraday, due au fait qu'il y a des contacts glissants dans le circuit (ceux qui maintiennent le contact entre rotor et stator).

Nous utilisons donc la relation $ei + \mathcal{P}_{\text{Laplace}} = 0$.

→₈ Donner l'expression de la puissance des forces de Laplace. En déduire l'expression de la fem induite e en fonction de K et de ω .

$$\mathcal{P}_{\text{Laplace}} = \Gamma_L\omega = Ki\omega.$$

Donc $ei = -\mathcal{P}_{\text{Laplace}} = -Ki\omega$, d'où $e = -K\omega$.

Fem pour une MCC

La fem d'une MCC est proportionnelle à sa vitesse angulaire :

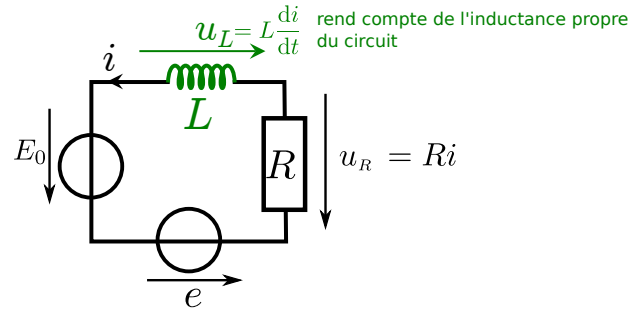
$$e = -K\omega,$$

et la constante de proportionnalité est la même que celle de la relation entre couple et courant ($\Gamma_L = Ki$).

Nous pouvons poursuivre en réalisant le schéma électrique équivalent pour un rayon (ci-contre) afin d'en déduire l'équation électrique. On prend en compte l'inductance propre du bobinage en rajoutant une inductance L dans le circuit. E_0 est la tension imposée par le générateur à un rayon.

$$E_0 = Ri - e + L \frac{di}{dt}$$

$$E_0 = Ri + K\omega + L \frac{di}{dt}.$$



Bilan énergétique

Illustrons une méthode générale pour mener un bilan énergétique. Il faut écrire l'équation électrique, multipliée par i , et l'équation mécanique multipliée par ω (ou par v si c'est une pièce en translation) :

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = Ki - \Gamma_u \\ E_0 = Ri + K\omega + L \frac{di}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} \omega = Ki\omega - \Gamma_u \omega \\ E_0 i = Ri^2 + K\omega i + L \frac{di}{dt} i \end{cases}$$

On soustrait les deux pour éliminer le terme $K\omega i$:

$$E_0 i - \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) = Ri^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) + \Gamma_u \omega.$$

On a donc :

$$E_0 i = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) + Ri^2 + \Gamma_u \omega.$$

On voit donc que la puissance électrique fournie au moteur ($E_0 i$) sert à (dans l'ordre des termes de gauche) :

- augmenter l'énergie cinétique de l'axe,
- augmenter l'énergie magnétique stockée par le circuit,
- est dissipée par effet Joule,
- fournit une puissance mécanique $\Gamma_u \omega$ sur l'axe moteur.

Câblage

La câblage réel de la machine est plus subtil que ce qui est présenté ici. Si vous êtes curieux, vous pourrez aller lire le document complémentaire sur le site de la classe.

Utilisation

Avantages de la MCC à entrefer plan (pas à connaître) :

- Vitesse réglable par simple variation de la tension. Grande gamme de vitesses : de 1 à 3000 tr/min.
- Très faible inertie du rotor, ce qui autorise des changements de vitesse rapides (utilisation dans les servo-mécanismes, dérouleurs de bandes magnétiques, ...).
- Moteur très plat.
- Utilisé également comme moteur à courant continu pour climatiseurs, essuie-glaces d'automobiles, ventilateurs, etc.

Désavantages : le système de balais implique des frottements et donc une usure.

3 – La machine à courant continu à entrefer cylindrique

→ Ceci fera l'objet d'un exercice du TD.

III – Machines à parties mobiles en rotation entraînées par un champ tournant

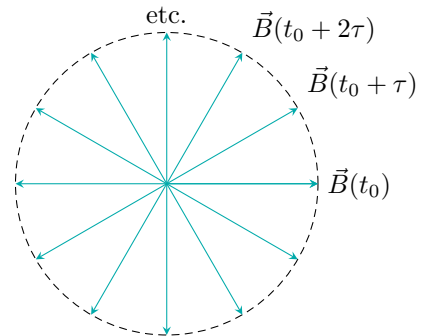
Dans les exemples précédents, le champ magnétique était fixe. Il existe pourtant une classe très importante de moteurs électriques qui génèrent un champ magnétique tournant afin d'entraîner en rotation le rotor (où vice-versa en mode générateur) : les machines synchrones et asynchrones.

Nous allons voir (partie 1) comment produire un champ \vec{B} tournant, puis nous verrons en TD comment fonctionnent ces machines.

1 – Production d'un champ tournant

Un champ tournant est un champ de norme constante, mais dont la direction tourne à vitesse angulaire constante.

On peut le produire en faisant tourner un aimant, mais il faut alors un moteur pour faire tourner l'aimant, ce qui n'est pas judicieux si l'objectif est de fabriquer un moteur...



On utilise plusieurs bobines alimentées par une tension sinusoïdale, déphasée différemment selon la bobine.

Prenons l'exemple de deux bobines, dont les courants sont

$$i_1(t) = I_0 \cos \omega t \quad \text{et} \quad i_2(t) = I_0 \cos(\omega t - \pi/2) = I_0 \sin \omega t$$

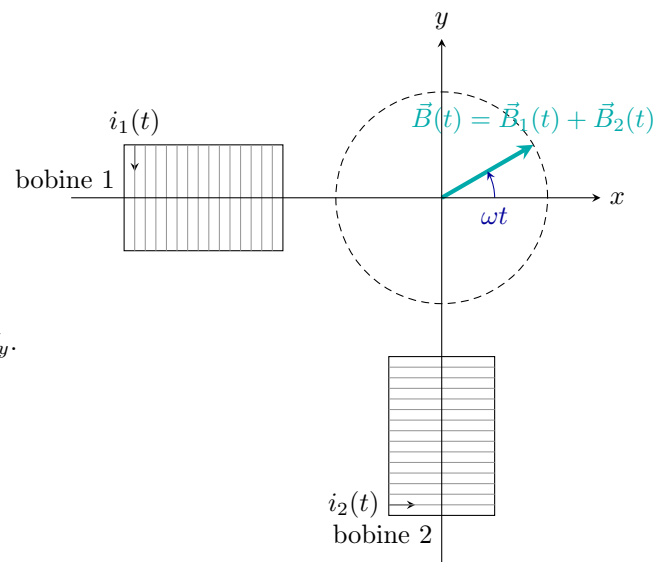
Le champ magnétique produit par chaque bobine, en un point à proximité de l'axe, est proportionnel au courant et dirigé selon l'axe (cf figure ci-contre) :

$$\vec{B}_1(t) = k i_1(t) \vec{e}_x = k I_0 \cos \omega t \vec{e}_x \quad \text{et} \quad \vec{B}_2(t) = k i_2(t) \vec{e}_y = k I_0 \sin \omega t \vec{e}_y.$$

Le champ magnétique total est alors :

$$\vec{B}(t) = \vec{B}_1(t) + \vec{B}_2(t) = k I_0 (\cos \omega t \vec{e}_x + \sin \omega t \vec{e}_y),$$

ce qui est bien un vecteur de norme constante qui tourne à la vitesse angulaire ω .



Production d'un champ tournant

On produit un champ tournant en alimentant plusieurs bobinages par des tensions sinusoïdales déphasées.

On utilise deux bobines (décalées de $\pi/2$) dans le cas d'un réseau diphasé, ou trois (décalée de $2\pi/3$) dans le cas d'un réseau triphasé (ce qui est le cas dans les domaines industriels).

2 – Moteur ou générateur synchrone

→ Ceci fera l'objet d'un exercice du TD.

3 – Moteur ou générateur asynchrone

→ Ceci fera l'objet d'un exercice du TD.

4 – Utilisations et compléments

Voir le document sur le site de la classe sur des informations supplémentaires sur l'utilisation des moteurs et des génératrices (à titre informatif).