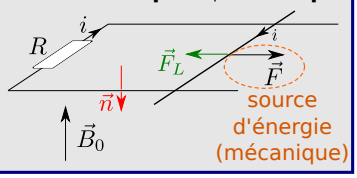
Champ magnétique et induction
Chapitre 3

Induction et conversion de puissance

I Principes de la conversion électro-mécanique

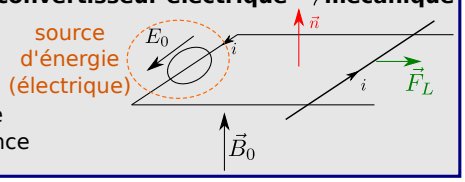
1 - Principe du convertisseur mécanique → électrique (générateur)

- 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

$$\mathcal{P}_{\text{mecanique}} \longrightarrow \mathcal{P}_{\text{electrique}}$$
$$\mathcal{P}_{\text{perte Joule frottements}}$$

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

4 - Haut-parleur électrodynamique → TD

5 - Freinage par induction → TD

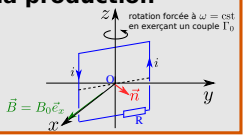
Courants de Foucault = courants induits en volume.
Lenz ⇒ freinage

II Machines avec parties mobiles en rotation

mécanique → électrique

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

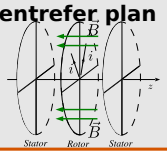
- principe, équ. élec et méca, bilan puissance



électrique → mécanique

2 - La machine à courant continu à entrefer plan

→ TD



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.

(cours : II)

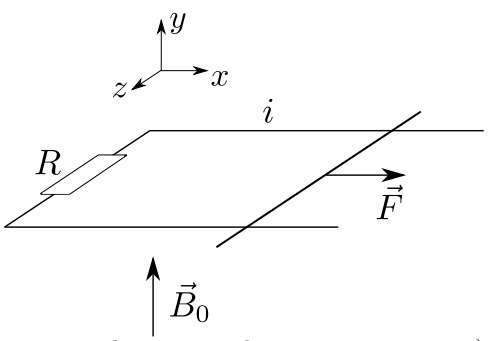
►3 Spire rectangulaire non alimentée, forcée en rotation dans un champ $\vec{B}$ uniforme et stationnaire ⊥ à l'axe de rotation : savoir décrire ce qu'il se passe, savoir écrire l'équation électrique et mécanique, faire un bilan énergétique. → **EC3**

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

Exercices de cours

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'inductance 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 force de Laplace résistante.

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 électrique 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 ?

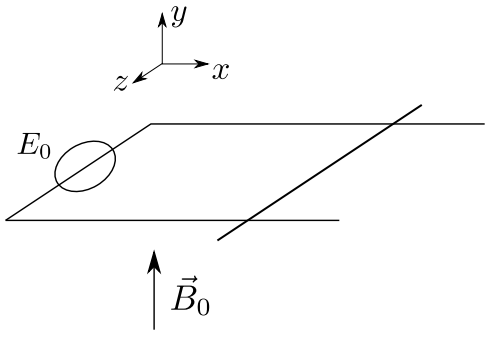
Bilan : notre modèle ne prend pas en compte les pertes, il est donc normal que toute la puissance fournie mécaniquement soit convertie en puissance électrique reçue par le dipôle :

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

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.

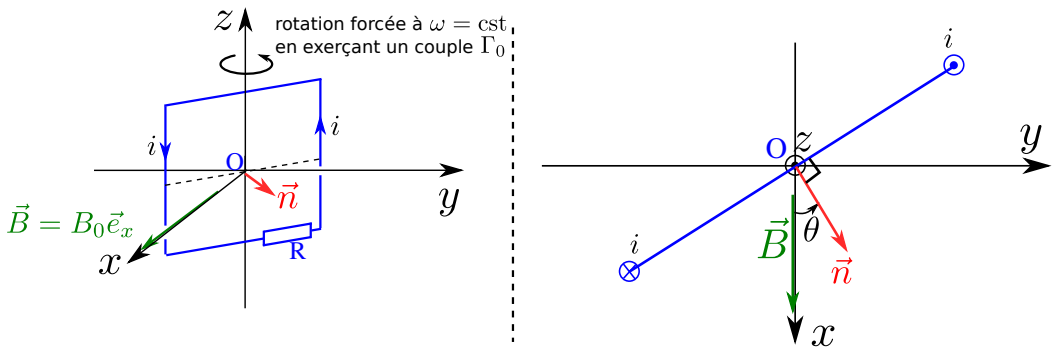
5 - Bilan énergétique (facultatif en colle)

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

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

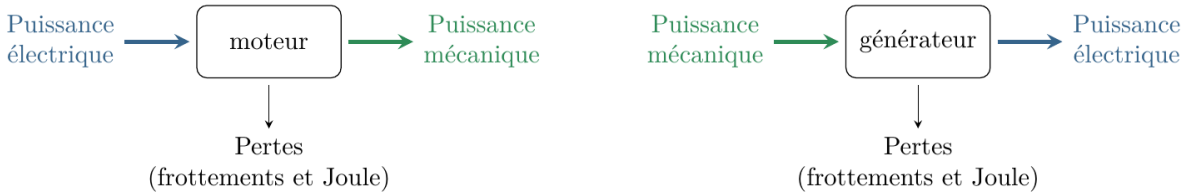
Cours

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 qui bougent. 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 → mécanique (moteur électrique, haut-parleur...) ;
- conversion mécanique → 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 :
- Puissance mécanique reçue par un objet en rotation (vitesse angulaire ω) autour de Oz, soumis à un couple $\vec{\Gamma}$:
- 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 – Principes de la conversion électro-mécanique

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

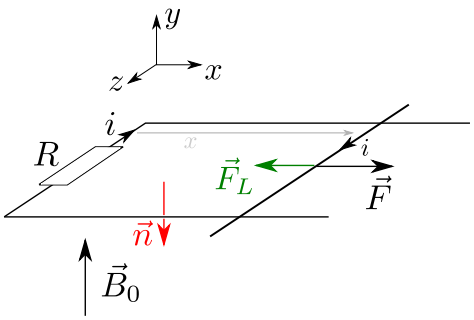
Lorsqu'il y a des parties mobiles, il faut deux types d'équations pour modéliser le fonctionnement :

- **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 → 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.



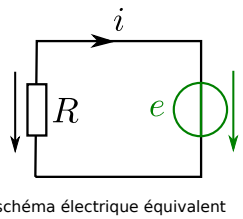


schéma électrique équivalent

$\rightsquigarrow_1$ Faire l'**EC1**.

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 :

$$\underbrace{\mathcal{P}_{\text{méca fournie}}}_{=\vec{F}\cdot\vec{v}} \longrightarrow \underbrace{\mathcal{P}_{\text{fournie par fem}}}_{=e\times i} + \underbrace{\mathcal{P}_{\text{frottements}}}_{\text{négligé ici}} \longrightarrow \underbrace{\mathcal{P}_{\text{élec recu dipole}}}_{=Ri^2} + \underbrace{\mathcal{P}_{\text{Joule fils}}}_{\text{négligé ici}}$$

- **Égalité entre puissance des forces de Laplace et puissance de la fem induite :**
  - Courant induit + champ $\vec{B}_0$ $\Rightarrow$ forces de Laplace.

    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).

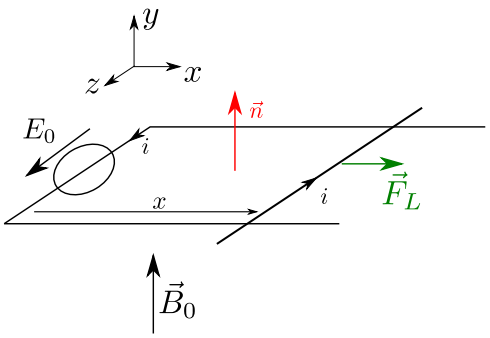
  Il y a donc égalité entre ei et $|\mathcal{P}_{\text{Laplace}}|$:

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

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 avions 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.



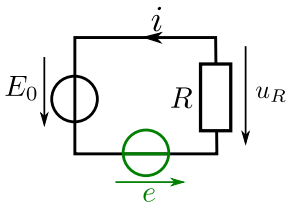


Schéma électrique équivalent

$\rightsquigarrow_2$ Faire l'**EC2**.

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 partie 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 :

$$\underbrace{\mathcal{P}_{\text{élec fournie géné}}}_{=E_0 i} \longrightarrow \underbrace{\mathcal{P}_{\text{Laplace}}}_{=\vec{F}_L\cdot\vec{v}} \longrightarrow \mathcal{P}_{\text{utile}}$$
$$+\underbrace{\mathcal{P}_{\text{Joule}}}_{=Ri^2} \qquad +\underbrace{\mathcal{P}_{\text{frottements}}}_{\text{négligé ici}}$$

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

  D'après le schéma ci-dessus :

$$\mathcal{P}_{\text{élec fournie générateur}} = \mathcal{P}_{\text{Laplace}} + \mathcal{P}_{\text{Joule}}.$$

  Comparons ce bilan de puissance à ce que donne l'équation électrique $E_0 = Ri - e$, en la multipliant par i :

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

  Par identification on obtient :

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

  Vérification des signes :

  - On a $\mathcal{P}_{\text{Laplace}} > 0$ car cette force est motrice.
  - Signe de e : 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. Donc $e < 0$.

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

3 – Bilan du 1 et du 2

Généralités

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

$$\begin{array}{ccccc} \text{puissance} & & \text{puissance} & & \text{puissance} \\ \text{mécanique} & \leftrightarrows & \text{électromagnétique} & \leftrightarrows & \text{électrique} \end{array}$$

- 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 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 connaitre)

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

  où e est la fém 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,
- on ne prend en compte dans e que la contribution due au champ externe $\vec{B}_0$, et pas celle due au champ propre $\vec{B}_{\text{propre}}$ produit par le circuit.

  Ainsi 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. Cf TD haut parleur et TD MCC.

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

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

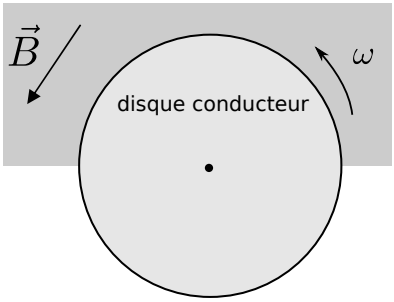
5 – Exemple de mise en œuvre : freinage par induction

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.
(cf par ex. TD sur la suspension magnétique.)

Ce principe est utilisé dans des dispositifs de freinage des camions, bus, trains, tram et métros. 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.

Avantages : pas de frottements donc pas d'usure, création de chaleur répartie sur tout le volume donc moins violente, pas de risque de blocage car si la roue 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 mises 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 (partie II.2).

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

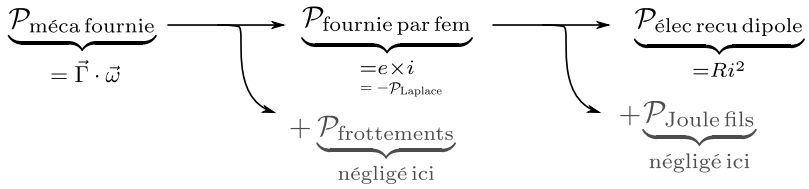
L'exercice qui suit présente le principe d'un alternateur, machine dont la rotation forcée permet de produire un courant alternatif.

$\rightsquigarrow_3$ Faire l'**EC3**.

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 continue (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 en TD la MCC à entrefer plan.

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.

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