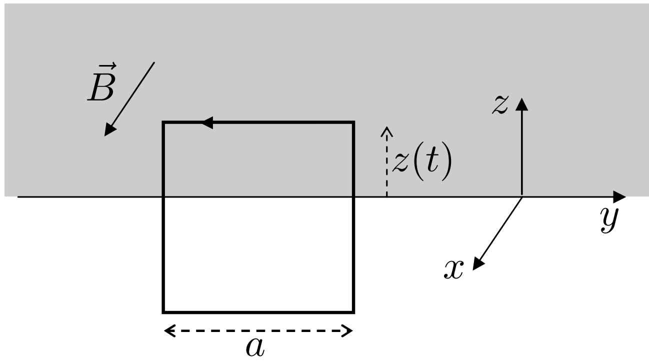
Partie IX : Champ magnétique et induction
Chapitre 3

TD – Induction et conversion de puissance

Remarque : exercice avec $\star$: exercice particulièrement important, à maîtriser en priorité (de même que les exemples de questions de cours des “ce qu'il faut savoir faire”) | [• ◦ ◦] : difficulté des exercices

I Amortissement électromagnétique [• ◦ ◦]

On considère un cadre de côté a, masse m, résistance totale R et d'inductance négligeable. Il se déplace dans une zone d'espace telle que : pour $z > 0$ il y a un champ magnétique $\vec{B} = B_0\vec{e}_x$ uniforme, et pour $z < 0$ $\vec{B} = \vec{0}$. Le déplacement est tel que l'axe Oy passe toujours dans le cadre.



1 - Déterminer l'expression du courant $i(t)$ qui parcours le cadre en fonction de a, $\dot{z}$, R et B_0 (rappel : orienter, flux de $\vec{B}$, circuit électrique équivalent, loi des mailles).

2 - Déterminer l'expression de la résultante de la force de Laplace qui s'exerce sur le cadre (il faut sommer celle sur chaque côté).

3 - On prend $a = 10\,\mathrm{cm}$, $R = 10^{-4}\,\Omega$. L'idée est que ce dispositif peut servir d'amortisseur de voiture. Le cadre est alors solidaire de l'axe de la roue, et la zone qui produit $\vec{B}$ est solidaire du châssis. Ceci convient, puisqu'il s'exerce une force sur le cadre qui s'oppose à la vitesse verticale de la roue.

Pour un amortisseur de véhicule, le coefficient de frottement doit être de l'ordre de $h = 10^4\,\mathrm{N/(m\cdot s^{-1})}$. Quelle doit être l'intensité du champ magnétique à utiliser pour reproduire un tel amortissement ? Commentaire ? Quels seraient les avantages d'un tel amortissement pour un véhicule ?

Remarque : Des suspensions électromagnétiques ont été ou sont développées. Elles utilisent le principe décrit ici, et vont même au delà puisqu'un générateur peut envoyer un courant dans le cadre et donc le faire se déplacer verticalement : il s'agit alors d'une suspension active pilotée par asservissement. Chercher “suspension électromagnétique” sur internet.

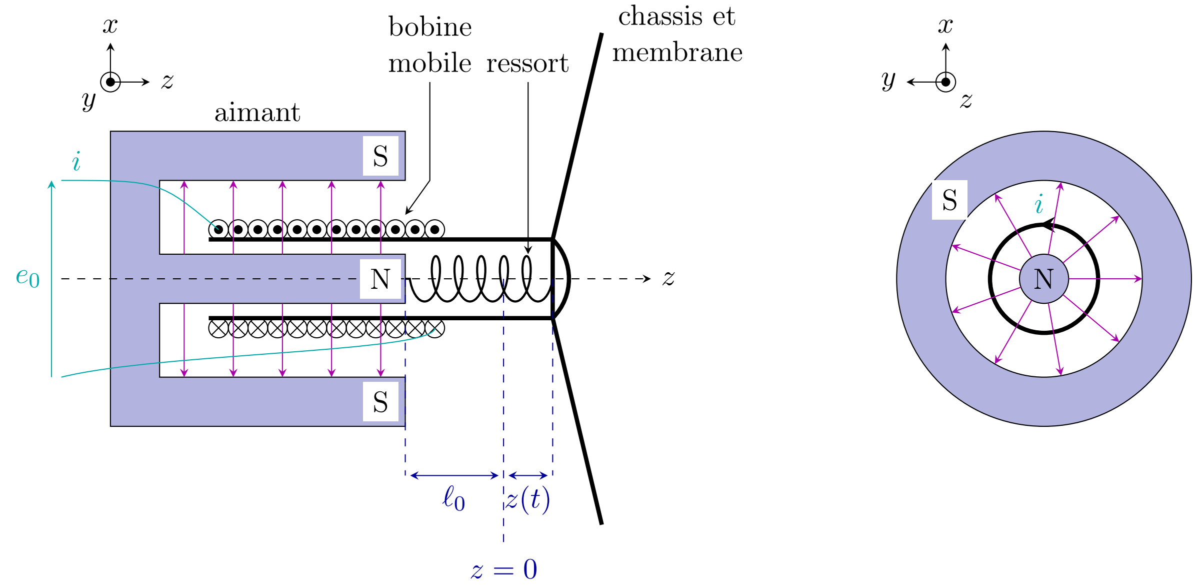
II Étude d'un haut-parleur [• • ◦]

Dans un haut-parleur, un aimant permanent fixe, de forme particulière (cf figure), crée dans son entrefer un champ magnétique radial de norme constante, $\vec{B}_0 = B_0\vec{e}_r$.

La membrane du haut-parleur est mobile. Elle est reliée au châssis fixe par une suspension appelée le “spyder”, qu'on modélise ci-dessous par un ressort de longueur à vide l_0 et raideur k.

Les forces de frottement avec l'air sont prises en compte par une force $\vec{f} = -\lambda\vec{v}$ s'exerçant sur la membrane, avec $\vec{v}$ la vitesse de celle-ci et $\lambda > 0$ une constante. Ces forces sont nécessairement présentent puisque la membrane interagit avec l'air pour produire une onde sonore.

La membrane est solidaire d'un bobinage de longueur totale l, qui peut se déplacer dans l'entrefer de l'aimant (cf schéma). On note R sa résistance totale et L son inductance propre. Un générateur extérieur impose une tension de commande $u(t) = u_0\cos\omega t$ dans ce bobinage. Le courant met alors en mouvement la membrane, et cette vibration va entraîner une mise en mouvement de l'air, et donc une onde sonore.



1 - Expliquer en trois mots pourquoi le passage du courant $i(t)$ impose un déplacement de la membrane. Dans quelle sens se déplace-t-elle si $i > 0$?

Équation mécanique

On admet que la résultante des forces de Laplace sur la bobine s'écrit

$$\vec{F}_L = \int_{\text{bobinage}} i\overrightarrow{\mathrm{d}l} \wedge \vec{B}_0 = -i\, l\, B_0\, \vec{e}_z.$$

2 - On note $\vec{v} = v\vec{e}_z$ la vitesse de la membrane, m la masse de l'ensemble de ce qui est mobile. Écrire l'équation du mouvement suivie par $v(t)$.

3 - Quel est le lien entre la vitesse v et la position z ? Comment ceci se traduit-il en représentation complexe ?

4 - Montrer que l'équation mécanique s'écrit, dans la représentation complexe :

$$\left(\lambda + j\omega m + \frac{k}{\mathrm{j}\omega}\right) \underline{v} = -lB_0\underline{i}. \tag{1}$$

Équation électrique

5 - Un calcul direct de la fem e induite par le déplacement de la bobine dans le champ $\vec{B}_0$ est compliqué. Nous utilisons plutôt la relation de conservation de la puissance lors de la conversion électro-mécanique :

$$ei + \mathcal{P}_{\text{Laplace}} = 0, \quad \text{avec} \quad \mathcal{P}_{\text{Laplace}} = \vec{F}_L \cdot \vec{v}.$$

En déduire l'expression de e.

6 - Faire un schéma électrique équivalent au haut-parleur. Il doit comprendre le générateur $u(t)$, la résistance du bobinage, la fem e due au déplacement dans le champ $\vec{B}_0$, et une inductance L qui rend compte du phénomène d'auto-inductance du bobinage.

En déduire l'équation électrique du système.

7 - En déduire qu'en représentation complexe, on a

$$\underline{u} = (R + \mathrm{j}L\omega)\underline{i} - B_0 l \underline{v}. \tag{2}$$

Étude de la réponse en fréquence

Les équations en complexe (1) et (2) permettent ensuite d'étudier la réponse en fréquence du haut parleur. On peut par exemple exprimer, après quelques manipulations, les rapports suivants :

$$\underline{Z} = \frac{\underline{u}}{\underline{i}} = R + \mathrm{j}L\omega + \frac{(B_0 l)^2}{\frac{k}{\mathrm{j}\omega} + \lambda + \mathrm{j}\omega m}, \quad \text{et} \quad \underline{G} = \frac{\underline{v}}{\underline{u}} = \frac{1}{\underline{Z}} \times \frac{-lB_0}{\frac{k}{\mathrm{j}\omega} + \lambda + \mathrm{j}\omega m}.$$

(Ceux qui sont en avance peuvent démontrer ces expressions.)

- $\underline{Z}$ est l'impédance électrique du haut-parleur. Elle caractérise la façon dont l'amplificateur (qui fournit la tension u et le courant i) voit le haut-parleur. La puissance électrique reçue est en effet (en notant avec une étoile le complexe conjugué) :

$$\mathcal{P} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(\underline{u}\,\underline{i}^*\right) = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(\underline{u}\,\frac{\underline{u}^*}{\underline{Z}^*}\right) = \frac{U_0^2}{2}\mathrm{Re}\left(\frac{1}{\underline{Z}}\right).$$

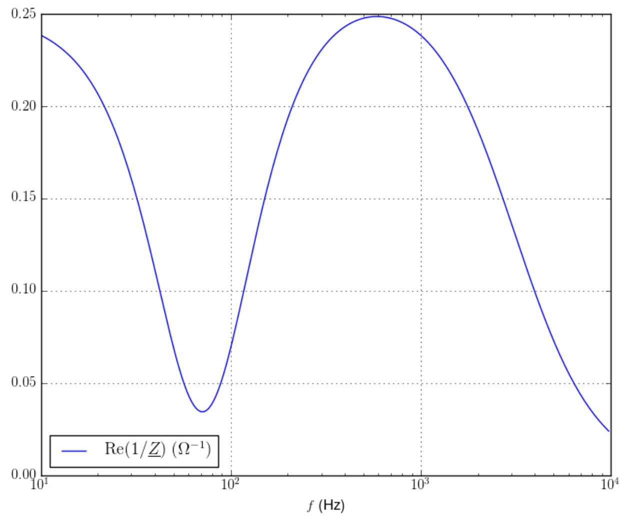
  On voit sur le graphique ci-dessous à gauche que $\mathcal{P}$ appelée par le HP est maximale vers $f = 600\,\mathrm{Hz}$.

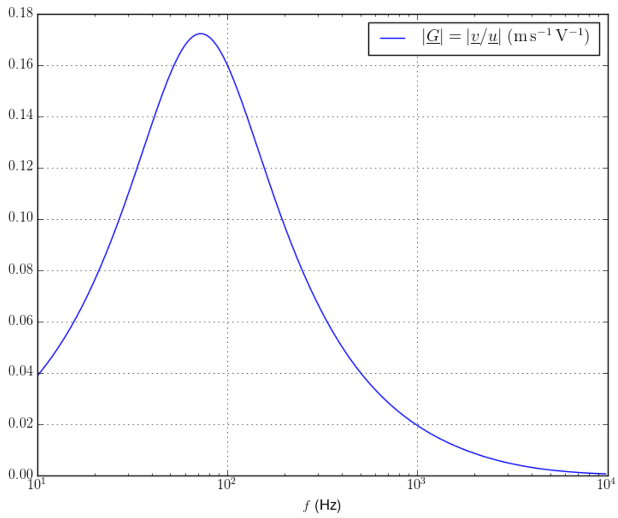
- $\underline{G}$ est l'impédance "électro-mécanique" du haut-parleur. La puissance transmise à l'onde sonore est proportionnelle à la moyenne de $v(t)^2$ où v est la vitesse de la membrane, donc à

$$\mathcal{P} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(\underline{v}\,\underline{v}^*\right) = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(|\underline{G}|^2\,|\underline{u}|^2\right) = \frac{U_0^2}{2}|\underline{G}|^2.$$

  On voit sur le graphe ci-dessous à droite que le maximum est situé proche de la résonance mécanique du système : $f_r = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{k}{m}} = 71\,\mathrm{Hz}$.

Les tracés ci-dessous sont pour $R = 4\,\Omega$, $m = 10\,\mathrm{g}$, $k = 2000\,\mathrm{N/m}$, $\alpha = 1\,\mathrm{N\cdot s\cdot m^{-1}}$, $L = 0{,}2\,\mathrm{mH}$, $l = 5\,\mathrm{m}$, $B_0 = 1\,\mathrm{T}$.





8 - Commenter la courbe qui donne $|\underline{G}|$: en particulier, que faudrait-il pour un haut-parleur parfait ?

Étude énergétique (pour ceux qui sont en avance)
Nous repartons des équations mécanique et électrique démontrées précédemment :

$$m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \underbrace{-ilB_0}_{=F_L} - kz - \lambda v \quad \text{et} \quad u = \underbrace{-vB_0 l}_{=-e} + Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}.$$

9 - Multiplier l'équation mécanique par v et l'équation électrique par i, puis les combiner pour aboutir à une équation qui indique comment la puissance électrique ui délivrée au haut-parleur est répartie.

Remarque : Tous les dispositifs vus jusqu'ici sont réversibles, c'est-à-dire peuvent fonctionner en convertisseur de puissance électrique → mécanique ou mécanique → électrique. Le haut-parleur réalise une conversion électrique → mécanique. Qu'obtient-on si on l'utilise dans l'autre sens, donc si on ne l'alimente pas par un générateur ? **Un micro** : une onde sonore arrivant sur la membrane la déplace, ce qui entraîne une fem induite dans le bobinage et donc une tension $u(t)$ mesurable, amplifiable, etc...

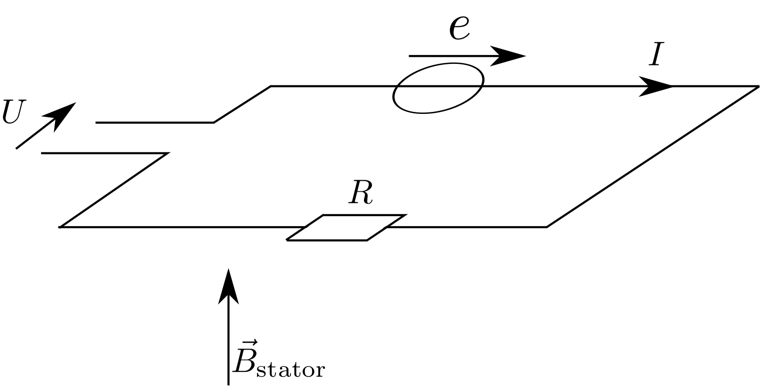
III Machine à courant continu à entrefer cylindrique [• • ○]

Remarques culturelles sur le fonctionnement d'une MCC à entrefer cylindrique

La MCC à entrefer cylindrique fonctionne exactement sur le même principe que celle à entrefer plan vue dans le II.2. Seule la géométrie change. On a donc :

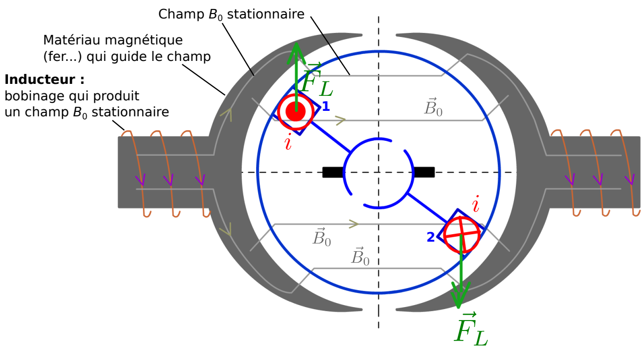
- Un **stator** fixe, dans lequel des aimants permanents, ou le plus souvent un bobinage alimenté par un courant continu, produit un champ magnétique $\vec{B}_0$ stationnaire. Dans le cas d'un bobinage on parle de **circuit inducteur**.
- Un **rotor** mobile, constitué d'un bobinage, donc d'un ensemble de spires, parcourue par un courant continu I. On parle d'**induit** pour ce circuit. La force de Laplace exercée sur ces fils, par $\vec{B}_0$, fait tourner l'ensemble.

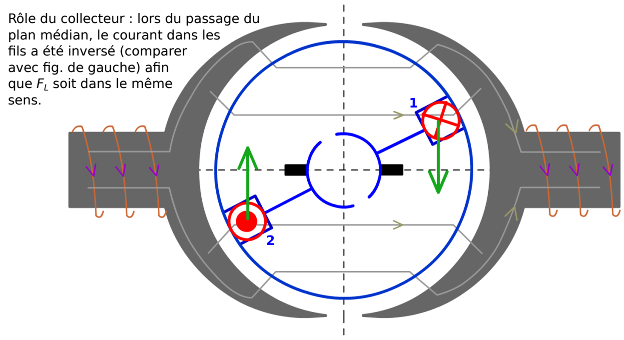
Ci-contre on a schématisé une spire du rotor. e est la fem induite par le mouvement de la spire dans $\vec{B}_0$, R sa résistance totale, U la tension constante d'alimentation.



Ci-dessous une autre représentation de la spire, vue de face.

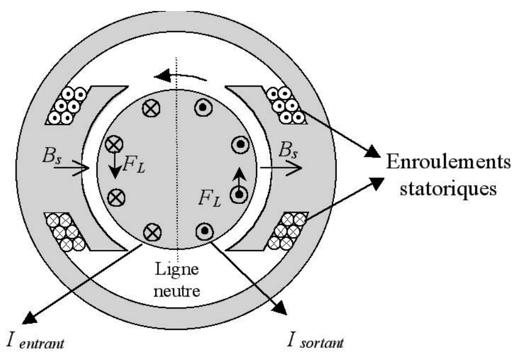
(Figure tirée de l'animation http://fisik.free.fr/ressources/MccComplet.swf, cf lien site classe.)

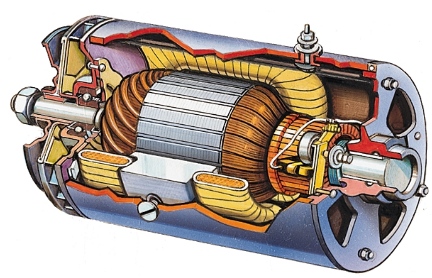




Comme pour la MCC à entrefer plan, il est nécessaire qu'un système de collecteur inverse le sens du courant dans la spire à chaque fois qu'elle franchit la ligne médiane. Ceci est bien visible sur l'animation en lien ci-dessus.

Enfin, il n'y a pas une unique spire, mais tout un bobinage de spires sur le rotor, comme on le voit ci-dessous.





La MCC fonctionne en mode moteur ou génératrice, selon qu'on lui impose une tension pour la faire tourner, ou qu'on la fait tourner pour récupérer une tension. Nous l'étudions ici en fonctionnement moteur.

On note U la tension d'alimentation (constante), R la résistance du bobinage du rotor, on néglige son inductance propre, et on note e la fem induite par le mouvement de la spire dans $\vec{B}_0$. On a une relation similaire à celle de la MCC à entrefer plan :

$$e = -K\omega$$

avec ω la vitesse de rotation et K une constante proportionnelle à $\|\vec{B}_0\|$ et qui dépend des détails géométriques du moteur (nombre de spires, rayons et surfaces...).

On note J le moment d'inertie de l'ensemble tournant, $\Gamma_r > 0$ le couple résistant imposé par l'extérieur à l'axe du moteur, et Γ_L le couple électromagnétique des forces de Laplace (qui fait tourner le moteur). On a une relation similaire à celle de la MCC à entrefer plan :

$$\Gamma_L = Ki$$

avec K la même constante que précédemment (car on a la relation $\mathcal{P}_{\text{Laplace}} + ei = 0$).

1 - Équation électrique : en vous basant sur le schéma électrique équivalent d'une spire ci-dessus, écrire l'équation électrique du moteur.

2 - Équation mécanique : à l'aide du TMC, écrire l'équation mécanique du moteur. Le couple Γ_r y apparaîtra avec un moins car il est résistant.

3 - Étude en régime permanent : on suppose le régime où $\omega = \text{cst}$ atteint.

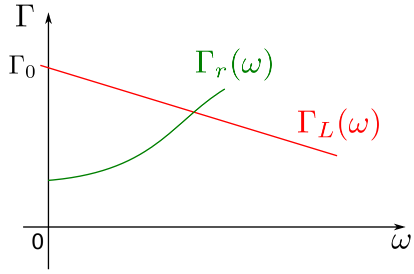
a - Simplifier l'équation mécanique. Montrer qu'on a la relation $\Gamma_r = \dfrac{K}{R}U - \dfrac{K^2}{R}\omega$.

b - Le second membre, $\dfrac{K}{R}U - \dfrac{K^2}{R}\omega$, est le couple de Laplace que fournit le moteur.

Il est naturel qu'en régime permanent, il compense exactement le couple Γ_r qu'on demande au moteur de fournir.

Le graphique ci-contre donne le tracé de l'expression $\Gamma_L = \frac{K}{R}U - \frac{K^2}{R}\omega$ en fonction de ω, et un exemple de tracé de Γ_r dans un cas où cette demande dépend de la vitesse de rotation.

Expliquer brièvement où se trouve le point de fonctionnement du moteur.



c - Que représente Γ_0 ? Que doit-t-il vérifier par rapport à $\Gamma_r(0)$ pour que le moteur démarre ?

d - On considère un cas où le couple résistant est du type $\Gamma_r = \alpha\omega$.
On prend $\alpha = 5\,\mathrm{N\cdot m\cdot s\cdot rad^{-1}}$, $U = 50\,\mathrm{V}$, $R = 1{,}0\,\Omega$, $K = 5{,}0\,\mathrm{Wb}$ (un weber $= 1\,\mathrm{T\cdot m^2}$ est une unité de flux magnétique).
Déterminer la valeur de ω, du couple Γ_r atteint, et du courant i.
En déduire le rendement du moteur (rapport de la puissance mécanique fournie sur la puissance électrique consommée).

4 - Étude en régime transitoire (partie à aborder uniquement pour ceux qui sont en avance)

On considère le démarrage du moteur, donc initialement $\omega = 0$. On prend un couple Γ_r imposé constant.

a - Écrire l'équation portant sur la vitesse angulaire ω. Elle ne doit faire intervenir que des termes constants (à part ω et sa dérivée). Faire apparaître un temps caractéristique τ pertinent.

b - Résoudre cette équation.

IV Machine synchrone [• • ○]

Dans un **moteur** synchrone, le stator produit un champ magnétique tournant à l'aide de plusieurs bobines alimentées avec un déphasage (cf cours, III.1). Le rotor est un aimant permanent de moment magnétique $\vec{m}$ (ou une spire de courant parcourue par un courant constant I qui fait office de moment magnétique $\vec{m}$).

Le couple qu'exerce le champ tournant $\vec{B}$ sur le moment $\vec{m}$ tend à toujours aligner $\vec{m}$ avec $\vec{B}$, et ceci entraîne donc le moment magnétique en rotation et donc tout le rotor.

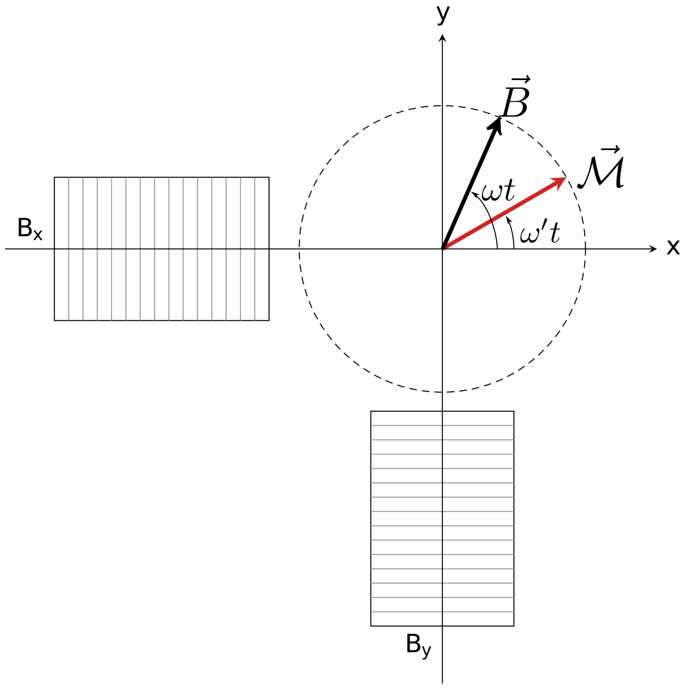
> Une telle machine est dite **synchrone** car le champ et le moment magnétique tournent à la même vitesse angulaire en régime permanent.

On pourra regarder l'animation suivante : http://fisik.free.fr/ressources/LeMoteurSynchrone.swf (lien site classe).

On considère ici un moteur synchrone et une modélisation simple :

- Le rotor est assimilé à un moment magnétique $\vec{m}$ dont la direction de $\vec{m}$ tourne à la vitesse angulaire ω'.
- Les bobinages statoriques produisent un champ magnétique $\vec{B}$ tournant à la vitesse angulaire ω, de norme constante.
- Le couple moteur exercé sur le rotor, résultant des actions de Laplace, est ainsi donné par $\vec{\Gamma}_L = \vec{m} \wedge \vec{B}$.
- On se place en régime permanent.

On prendra 50 tours par seconde pour la rotation du champ magnétique, $m = 8\,\mathrm{A\cdot m^2}$, et $B = 0{,}2\,\mathrm{T}$.



1 - D'après le principe du moteur synchrone exposé ci-dessus, que dire de ω et de ω' ? Et donc de l'angle $\theta = (\vec{m}, \vec{B})$?

2 - Donner l'expression du couple moteur $\vec{\Gamma}_L$ en fonction de $m = \|\vec{m}\|$, $B = \|\vec{B}\|$ et θ.

3 - Que vaut θ pour un fonctionnement à vide (couple fourni nul) ?

Et pour un couple moteur $\Gamma_c = 0{,}65\,\mathrm{N\cdot m}$?

Dans ce dernier cas donner également la puissance fournie par le moteur.

4 - La vitesse de rotation dépend-elle de la charge ?

Quel est le couple maximal que peut fournir ce moteur ?

Remarques culturelles :

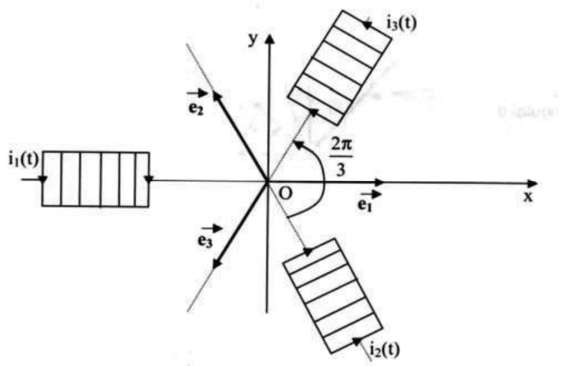
Les machines synchrones possèdent un excellent rendement (meilleur que les MCC), sont robustes et capables de délivrer des couples importants. La seule difficulté est leur démarrage : le rotor peut ne pas accrocher le champ tournant, et il faut donc soit le lancer avec un moteur annexe (une MCC par exemple), soit augmenter progressivement la fréquence d'excitation de l'inducteur.

Elles sont réversibles, c'est-à-dire qu'elles peuvent fonctionner en générateur. Dans ce cas on fournit une puissance mécanique pour faire tourner le stator. Celui-ci agit comme un aimant tournant, qui induit des variations de flux dans les bobines du stator, et donc une fem et un courant. (C'est l'exercice VI du TD du chapitre précédent.) C'est ce qui est utilisé dans les centrales de production d'électricité.

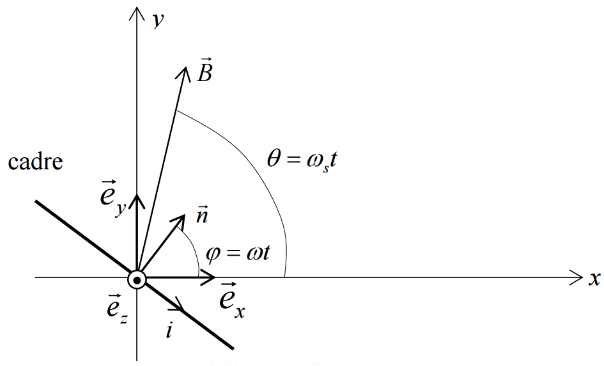
V Machine asynchrone [$\bullet\bullet\circ$]

Dans un **moteur** asynchrone, le stator est identique à celui du moteur synchrone : il produit un champ magnétique tournant à l'aide de plusieurs bobines alimentées avec un déphasage (cf cours, III.1).

La différence avec la machine synchrone est qu'ici, le rotor est un simple bobinage *non alimenté*. Il est simplement court-circuité, c'est-à-dire refermé sur lui-même. On a schématisé ci-dessous un cas où il est constitué d'une seule spire.



Les bobinages statoriques produisent au centre un champ magnétique tournant $\vec{B}_s(t)$ de norme constante B_0 et tournant à la vitesse angulaire ω_s (indice s pour stator).



Le rotor est modélisé par une spire rectangulaire, pouvant tourner autour de l'axe z. On la représente ici vue de dessus. On note S sa surface et $\vec{n}$ le vecteur normal à cette surface, ainsi que ω sa vitesse angulaire de rotation.

Le champ tournant induit une fem e dans la spire du rotor, et donc un courant $i(t)$. Ce courant ayant lieu dans un champ magnétique $\vec{B}_s$ (celui du stator), il en résulte des actions de Laplace et un couple, donné par $\vec{\Gamma}_L = \vec{m} \wedge \vec{B}_s$, avec $\vec{m} = i\,S\vec{n}$ le moment magnétique de la spire.

> Une telle machine est dite **asynchrone** car le champ et le moment magnétique ne tournent *pas* à la même vitesse angulaire en régime permanent.

En effet lorsque $\omega = \omega_s$, le champ ne varie plus dans le référentiel tournant du rotor, et il n'y a donc plus de courants induits, et donc $\vec{\Gamma}_L = \vec{0}$.

On note $\Omega = \omega_s - \omega$ la "vitesse de glissement".

Une vidéo qui en illustre le fonctionnement : https://www.youtube.com/watch?v=yEOYm9EB-UY (lien site classe).

1 - Donner l'expression du flux $\Phi(t)$ du champ statorique $\vec{B}_s$ à travers la spire en fonction de B_0, Ω et S (surface de la spire) (s'appuyer sur la figure ci-dessus à droite).

En déduire l'expression de la fem e associée, induite dans la spire.

Soit R la résistance de la spire et L son inductance propre. Établir l'équation électrique portant sur le courant i.

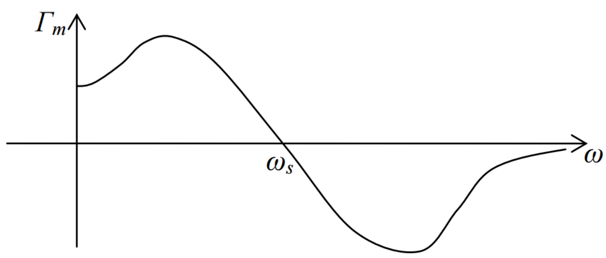
La résolution de cette équation sur $i(t)$ en régime sinusoïdal forcé à Ω (formalisme complexe) permet d'obtenir $\underline{i}(t)$. On trouve en particulier pour l'amplitude de $i(t)$:

$$I_0 = |\underline{i}| = \frac{B_0 S|\Omega|}{\sqrt{R^2 + (L\Omega)^2}}. \qquad (3)$$

On peut ensuite calculer le couple moyen des actions de Laplace (ou couple moteur) :

$$\Gamma_m = \langle \vec{\Gamma}_L \cdot \vec{e}_z \rangle = \frac{1}{2}\frac{(B_0 S)^2 R\Omega}{R^2 + (L\Omega)^2}. \qquad (4)$$

Cette fonction est tracée ci-contre.



2 - On considèrera que ω et ω_s sont positifs (rotation dans le sens horaire).

À quelle condition sur la vitesse angulaire ω du moteur le couple est-il moteur ?

À quoi correspond physiquement la valeur du couple lorsque ω tend vers 0 ?

Que remarque-t-on lorsque $\omega = \omega_s$ et était-ce attendu ?

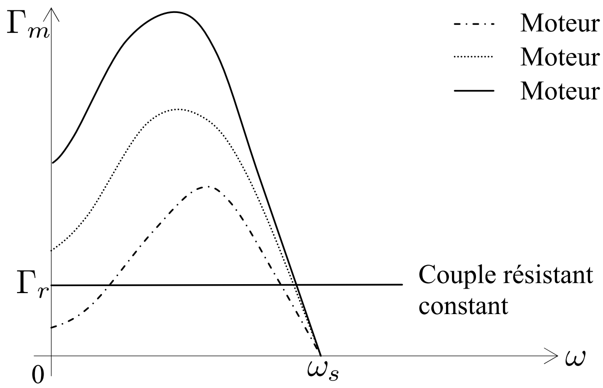
Que se passe-t-il lorsque $\omega > \omega_s$?

On place une charge sur le moteur : cette charge exerce alors un couple Γ_r (on note $\Gamma_r > 0$) sur l'arbre moteur. On note J le moment d'inertie de l'arbre.

3 - **a.** Écrire le théorème du moment cinétique pour établir une relation entre $\dot{\omega}$, J, Γ_m et Γ_r.

b. On se donne un couple résistif Γ_r constant en fonction de ω. Des trois moteurs ci-contre, lequel (ou lesquels) est susceptible de démarrer ? Expliquer.

c. On se place en régime permanent. On considère le moteur 1 ci-contre. Quelles sont, graphiquement, les valeurs possibles pour ω ? Montrer graphiquement que seule la plus grande correspond à un fonctionnement stable du moteur (pas évident, voir la correction).



4 - On rappelle qu'en régime sinusoïdal forcé, la valeur moyenne de la grandeur réelle $f(t) \times g(t)$ est donnée par $\langle f(t)\, g(t)\rangle = \dfrac{1}{2}\mathrm{Re}\left(\underline{f}\, \underline{g}^*\right)$ où $*$ signifie complexe conjugué. Dans le cas où f et g sont les mêmes grandeurs, ceci se réduit à $\langle f(t)^2\rangle = \dfrac{1}{2}\,|\underline{f}|^2$. Ce sera utile pour le calcul de $\mathcal{P}_{\text{Joule}}$ ci-dessous.

a. Donner l'expression de la puissance mécanique fournie par le moteur, $\mathcal{P}_{\text{m}} = \Gamma_m\omega$, et de la puissance dissipée par effet Joule dans la spire, $\mathcal{P}_{\text{Joule}} = \langle Ri(t)^2\rangle$.

b. La puissance électrique fournie au moteur est délivrée au stator afin de produire le champ tournant $\vec{B}_s$. Si on néglige les pertes joules dans le bobinage statorique, cette puissance se retrouve intégralement dans la puissance mécanique et dans la puissance dissipée par effet Joule dans le rotor.

Le rendement est alors donné par $\eta = \mathcal{P}_{\text{m}}/(\mathcal{P}_{\text{m}} + \mathcal{P}_{\text{Joule}})$.

Donner l'expression de η en fonction de ω/ω_s.

c. La vitesse de rotation des moteurs asynchrones s'écarte rarement de plus de 5% de la vitesse de synchronisme ω_s. En déduire la valeur correspondante du rendement.

Pour ceux qui sont en avance : les questions qui suivent proposent de démontrer les relations (3) et (4) ci-dessus.

5 - La première étape est de passer l'équation $L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + Ri = B_0 S\Omega \sin\Omega t$, obtenue question 1, en représentation complexe.

La “difficulté” est le terme en $\sin\Omega t$. On sait qu'un terme en $\cos(\Omega t + \varphi)$ se transforme en $\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\Omega t+\varphi)}$ (dont la partie réel redonne bien le cos). Rappelons que $\cos(x - \pi/2) = \sin x$.

a. Transformer le $\sin\Omega t$ en un cosinus, puis écrire l'équation électrique en représentation complexe.

En déduire l'expression de $\underline{i}$.

b. Retrouver alors l'expression (3).

6 - On souhaite ensuite retrouver l'expression (4). Pour cela il faut calculer la valeur moyenne

$$\Gamma_m = \langle(\vec{m} \wedge \vec{B}_s) \cdot \vec{e}_z\rangle.$$

a. Montrer que Γ_m s'écrit $\Gamma_m = \langle i(t)\, g(t)\rangle$ avec $g(t) = SB_0 \sin\Omega t$.

b. En utilisant le résultat rappelé à la question 4 sur la valeur moyenne, retrouver l'expression (4).

Remarques culturelles :

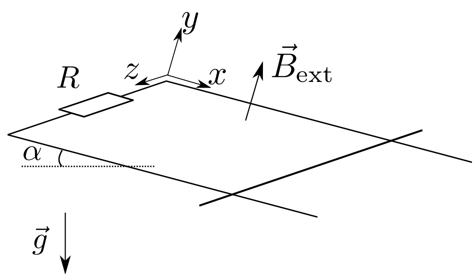
Le rotor est en réalité constitué non pas d'une seule spire, mais de plusieurs, et même plus souvent d'une sorte s'assemblage de spires appelé “cage d'écureuil” et représenté ci-dessous à gauche. Celle de gauche est une cage d'écureuil dans une génératrice d'éolienne.

Les moteurs asynchrones sont les plus largement utilisés, grâce à leur rapport coût/puissance le plus faible et des rendements très proches de 1 rendus possibles par l'absence de balais (le rotor n'étant relié à rien électriquement). Cette absence de balais réduit considérablement l'usure et l'entretien. Un des inconvénient est une vitesse de rotation pas nécessairement très précise.

En mode générateur : comme une machine asynchrone ne possède pas d'aimants permanents, la faire tourner sans l'alimenter ne produit rien. Il faut donc alimenter le stator pour produire un champ tournant, et alors si le rotor est entraîné plus rapidement que le champ tournant, il y a production d'un surplus de puissance électrique. Ces génératrices sont très utilisées dans les éoliennes.

VI Rails de Laplace inclinées et conversion mécanique → électrique [• • ○]

On considère le dispositif des rails de Laplace schématisé ci-contre. Il est incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale. La longueur du rail mobile entre les deux points de contact est notée a.
Le champ magnétique extérieur $\vec{B}_{\text{ext}}$ est constant et uniforme à travers le circuit.



1 - Expliquer intuitivement ce qu'il va se produire (création d'un courant ? dans quel sens ? quel effet sur le rail ?)

2 - Suivre la méthode pour établir l'équation électrique du circuit. Quel va être le signe de i d'après cette équation ?

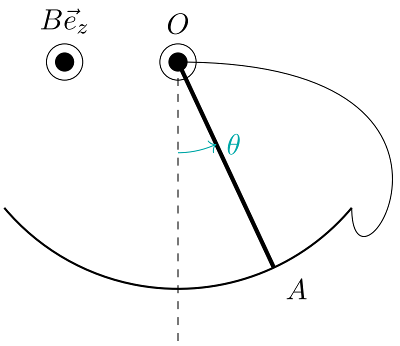
3 - Établir ensuite l'équation mécanique. On négligera tout frottement. On commencera par poser le problème avec un schéma sur lequel figurent toutes les forces en présence. Puis on se demandera quel est l'axe qui nous intéresse pour le mouvement en question afin de projeter.

4 - En déduire enfin une équation portant sur la vitesse de la tige.

5 - On se place en régime permanent, où les grandeurs ne varient plus.

- **a -** Quel temps caractéristique faut-il attendre pour que ce soit le cas ?
- **b -** Donner alors l'expression de la vitesse et du courant.
- **c -** Effectuer un bilan de puissance en comparant la puissance mécanique reçue par la tige suite à l'action de la pesanteur, et la puissance électrique reçue par la résistance R (qui symbolise un appareil électrique quelconque que l'on souhaite alimenter). Conclure en revenant sur le titre de l'exercice.

VII Pendule amorti par induction [• • •]



On considère un pendule rigide OA, homogène, de masse m et de longueur l, libre de tourner autour d'un axe horizontal (Oz) passant par une de ses extrémités. On note $J = \frac{1}{3}ml^2$ son moment d'inertie par rapport à cet axe. Le centre de masse G de la tige est situé en son milieu. Le pendule est repéré par l'angle θ qu'il forme avec la verticale.
La tige est en contact en A avec un rail métallique ce qui forme un circuit électrique. L'ensemble est placé dans un champ magnétique $\vec{B} = B\vec{e}_z$. On note R la résistance électrique de l'ensemble du circuit.

1 - Déterminer l'équation différentielle vérifiée par l'angle θ avec la verticale.

2 - On suppose les oscillations de petite amplitude. Montrer que si le champ magnétique est suffisamment fort, lorsqu'on écarte la tige de sa position d'équilibre, elle y retourne sans osciller.

VIII Moteur homopolaire de Faraday [• • ○]

Expliquez : https://www.youtube.com/watch?v=zOdboRYf1hM