Chapitre III
Conversion électromécanique

La loi de Lenz-Faraday est la clé qui lie l'électricité de l'ambre avec le magnétisme de la pierre noire en une seule et même théorie : .... Elle a de nombreuses applications systématiquement utilisées partout dans le monde pour produire de l'électricité ou la convertir. Les **alternateurs** des centrales électriques, les batteries, les .... et les moteurs électriques en sont les plus importantes.

Terminale (ES)
- Analyser les propriétés d'un **alternateur** modèle étudié expérimentalement en classe.
- Tracer la caractéristique $i(u)$ d'une cellule photovoltaïque.
- Trois méthodes permettent d'obtenir de l'énergie électrique sans nécessiter de combustion.

Grandeurs physiques :

Grandeur physique	Symbole	Expression	Unité du S.I.	Apparition
puissance électrique	p		... (kg.m^2.s^{-3})	Cycle 4 (3$^{\text{ème}}$)
auto-inductance	L		... (kg.m^2.s^{-2}.A^{-2})	Ch. III ARQS p.18
inductance mutuelle	M		... (kg.m^2.s^{-2}.A^{-2})	New!

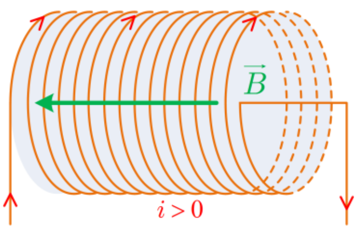
I. Circuit fixe dans un champ magnétique variable

Dans cette partie, les circuits électriques sont **fixes** dans le référentiel terrestre *i.e.* les fils, les générateurs, les récepteurs et tout objet métallique sont ...., posés sur une table par exemple, du point de vue de l'observateur.

A. Auto-induction

Soit une bobine longue alimentée par un générateur de tension E :

On sait déjà qu'une bobine longue **en cuivre** soumise à un courant i crée un champ magnétique $\overrightarrow{B_{pr}}$, ce champ est **propre** à la bobine, ce n'est pas un champ extérieur créé par un aimant extérieur ou un circuit extérieur : $\overrightarrow{B_{ext}} = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \Phi_{ext} = 0$.

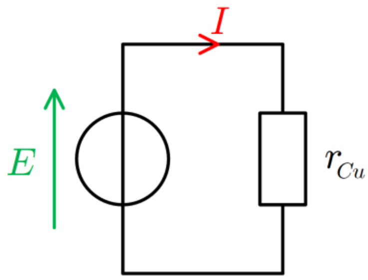


Comment interpréter ce qui subit la bobine longue soumise à un courant ?

On a déjà calculé que le flux propre $\Phi_{pr} =$ $= Li$ où $L =$

où N le nombre de spires, ℓ la longueur de la bobine, R le rayon de chaque spire.

1. Inductance propre



➢ En régime ………………….., au bout d'un certain temps, si la tension E est continue *i.e.* constante, le courant $i = I$ est continu aussi *i.e.* constant donc d'après la loi de Lenz-Faraday :

car $L, I = cstes$

La bobine n'induit pas de fem, elle se comporte comme un long fil de cuivre, on retrouve son comportement d'……………………………………………… (Ch. III ARQS p.18) auquel on peut éventuellement associer une résistance r_{Cu} au passage du courant dans la bobine.

➢ En régime ………………… ou si E dépend du temps, le courant i dépend du temps :

car $i = i(t)$

Le signe **moins** montre que la bobine induit une fem e qui **……………..** toujours à la variation du courant i c'est-à-dire à la tension E, c'est la loi de ………………………………

cause : $E \nearrow \; \Rightarrow i \nearrow \; \Rightarrow$, conséquence : $e < 0 \; \Rightarrow$

cause : $E \searrow \; \Rightarrow i \searrow \; \Rightarrow$, conséquence : $e > 0 \; \Rightarrow$

Puisque la bobine s'oppose au générateur du circuit, il est logique de la considérer comme un …………….. avec un symbole et une tension u_L en convention …………….. :

On retrouve la relation utilisée en électricité. Le coefficient d'auto-induction L est aussi appelé …………………… ou **…………………………** et s'exprime en H ("Henry").

Sagredo : Les particules ne sont pas soumises à leurs propres champs, pourquoi la bobine serait-elle soumise à son propre champ magnétique ?
Salviati : A l'échelle microscopique, chaque électron de la bobine subit les champs créés par le mouvement de **ses voisins** sous l'effet du générateur. A l'échelle macroscopique, il en résulte une induction propre ou **auto-induction**, la bobine agit sur elle-même en s'opposant au courant qui la parcourt, d'après la loi de Lenz.

Le schéma en convention générateur pour la bobine *i.e.* le schéma de ………… est tel que :

loi des mailles :

où r_{Cu} est la résistance associée au passage du courant dans le long bobinage de cuivre

➢ Ordre de grandeur : voir Electricité Chapitre III ARQS page 23

Pour $N = 750\,\text{spires}$, $\ell = 10\,\text{cm}$, $R = 5\,\text{cm}$: $L = \mu_0 \dfrac{\pi N^2 R^2}{l} \approx$ mH (milliHenry).

2 . Etude énergétique

➢ En convention **générateur (cg)**, la puissance générée ou ……….. par la bobine s'écrit :

Lorsque $i > 0$ et $i \nearrow$ alors , la bobine réagit à une augmentation de courant en faisant …………… de la puissance au circuit, c'est le comportement d'un ………………

On peut la considérer aussi comme un générateur monté en opposition.

➢ En convention **récepteur (cr)**, la puissance reçue ou ……………… par la bobine s'écrit :

Lorsque $i > 0$ et $i \nearrow$ alors , la bobine réagit à une augmentation de courant en ………………… de la puissance au générateur, c'est le comportement d'un ………………

Une bobine ressemble bien à un ……………… quelle que soit la convention choisie.

$p_L(t) = L\dfrac{di(t)}{dt}i(t) = \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{1}{2}L\,i^2(t)\right)$ or $p_L(t) =$ donc : $\boxed{E_L(t) = \quad}$

➢ Bilan de puissance et d'énergie en convention récepteur pour la bobine :

La loi des mailles donne : où r est la résistance interne de la bobine $= r_{Cu}$

En multipliant par l'intensité i dans chaque membre, on obtient le bilan de puissance :

$$\Leftrightarrow$$

La puissance fournie par le générateur est soit emmagasinée par l'............................ de la bobine selon la loi de Lenz-Faraday, soit .... qui convertit la puissance électrique de la résistance sous forme de chaleur.

En intégrant la relation pendant un temps quelconque τ, on obtient le bilan d'énergie :

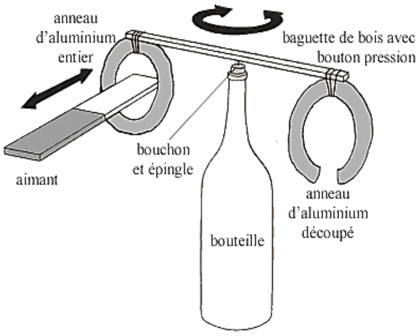
$$\Leftrightarrow$$

Salviati : **@Sagredo** Le bilan en régime permanent avec un générateur variable est le même que celui du régime transitoire avec un générateur continu vu en électricité.

L'énergie générée ou fournie par le générateur au circuit est soit reçue ou .... par la bobine sous forme d'auto-induction, soit reçue ou .... par effet Joule.

3 . Induction extérieure

On reprend l'expérience de Lenz ou l'expérience ratée de Faraday avec l'anneau d'aluminium se déplaçant sous l'influence d'un aimant permanent en mouvement.



L'anneau est soumis au champ extérieur de l'aimant :

$$\overrightarrow{B_{ext}} \neq \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \Phi_{ext} \neq 0$$

Le champ **extérieur** $\overrightarrow{B_{ext}}$ dû à l'aimant induit une fem .... donc un courant d'intensité i dans l'anneau. Ce courant .... crée un champ propre ou champ induit $\overrightarrow{B_{ind}} = \overrightarrow{B_{pr}}$ comme n'importe quelle spire de courant.

Ce champ **propre** $\overrightarrow{B_{pr}}$ va alors induire une fem .... selon la loi de Lenz-Faraday :

$$\ldots$$

Il apparaît donc 2 fem e_{ext} et e_{pr} dues aux 2 champs $\overrightarrow{B_{ext}}$ et $\overrightarrow{B_{pr}}$ par l'intermédiaire des 2 flux Φ_{ext} et Φ_{pr}. Par contre, il n'y a qu'.................... induit i dans l'anneau (ARQS).

Loi de Lenz-Faraday : et loi des mailles : $e = R_{Al} i$

où R_{Al} est la résistance de l'anneau d'aluminium

➢ Schémas équivalents à l'expérience de Lenz :

En modélisant l'anneau comme une bobine d'aluminium, la fem propre s'écrit :

…

En posant $e_{ext} = E$, on retrouve le circuit RL forcé étudié page 3 :

…

On peut donc considérer que l'anneau d'aluminium perçoit l'aimant permanent comme un …………………………… et se comporte comme une ……………………………………………

B . Induction mutuelle

Le champ extérieur $\overrightarrow{B_{ext}}$ créé par l'aimant permanent peut très bien être créé par autre chose comme une spire de courant ou une bobine longue.

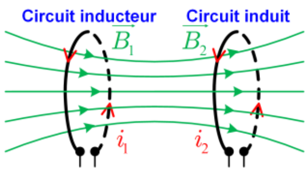
Comment une bobine peut-elle en induire une autre ?

1 . Inductance totale

On considère 2 bobines longues notés 1 et 2 chacune alimentée par un générateur de tensions respectives $E_1(t)$ et $E_2(t)$ produisant des courants respectifs $i_1(t)$ et $i_2(t)$.

bobine	**1**	**2**
longueur		
section		
nombre de spires		
auto-inductance		
résistance interne		
champ magnétique propre		

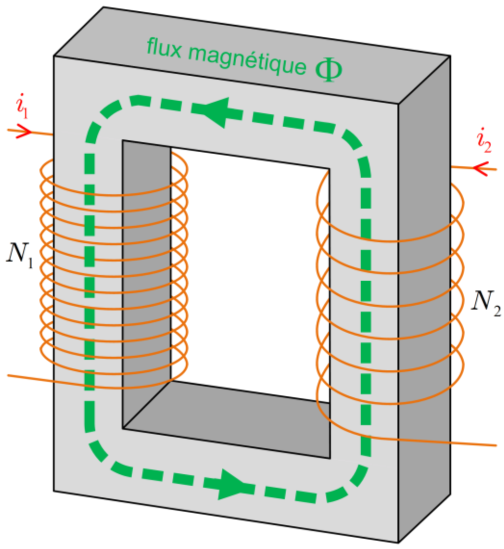
Il existe au moins 3 possibilités d'**induction mutuelle** *i.e.* 3 façons d'induire une bobine par une autre en faisant en sorte que les lignes de champ de l'une passent à l'intérieur de l'autre.



1) en plaçant l'une .... comme dans la 1ère expérience ratée de Faraday qui aurait fonctionné si le courant inducteur n'était pas une simple pile mais un générateur variable.

2) en plaçant l'une ....

3) en plaçant l'une .... de l'autre en utilisant un matériau magnétique qui conduise les lignes de champ magnétique d'une bobine à l'autre, c'est le principe d'un ....



On admet que les champs sont .... et les surfaces .... pour faciliter les calculs.

- flux propre dans la bobine 1 : $\Phi_{pr1} = \Phi_{1\to 1} = N_1 \overrightarrow{B_1}.\overrightarrow{S_1} = \mu_0 \dfrac{N_1^{\,2} S}{\ell} i_1 = L_1 i_1$ avec $L_1 = \mu_0 \dfrac{N_1^2 S}{\ell}$
- flux extérieur de 2 sur 1 : $\Phi_{ext1} = \Phi_{2\to 1} =$ avec $M = \mu_0 \dfrac{N_1 N_2 S}{\ell}$
- flux propre dans la bobine 2 : $\Phi_{pr2} = \Phi_{2\to 2} =$ avec $L_2 = \mu_0 \dfrac{N_2^2 S}{\ell}$
- flux extérieur de 1 sur 2 : $\Phi_{ext2} = \Phi_{1\to 2} =$ avec $M = \mu_0 \dfrac{N_1 N_2 S}{\ell}$

Le coefficient d'induction mutuelle M est appelée .... en H ("Henry").

De façon générale, $\boxed{\Phi_{ext} = M i_{ext}}$ où i_{ext} est le courant d'une autre bobine.

On en déduit :

Salviati : On pourrait penser que si les valeurs de ℓ ou S sont différentes pour les bobines 1 et 2, le coefficient M sera différent pour Φ_{ext1} et Φ_{ext2}. En fait, la formule générale qui définit M montre que, quels que soient les circuits 1 et 2, on a toujours $M_{12} = M_{21} = M$.

D'après la loi de Lenz-Faraday,

$e_1 = -\dfrac{d\Phi_1}{dt} =$ et $e_2 =$

En utilisant les expressions des flux, on obtient alors :

2. Couplage des circuits

Les schémas équivalents donnent les lois des mailles :

…

Les termes $M\frac{di_2}{dt}$ et $M\frac{di_1}{dt}$ sont des ……………………………. entre circuits.

Ils font intervenir des grandeurs i_2, i_1 qui sont respectivement extérieures aux circuits 1,2.

On admet que le régime est ……………… ………………… (Electricité chapitre IV page 10). La tension E_1 qu'on peut considérer comme tension d'entrée impose au bout d'un temps caractéristique du passage du régime transitoire au régime permanent *i.e.* environ 5τ, son caractère sinusoïdal aux grandeurs variables dans le temps du système : E_2, i_1, i_2, etc…

- Pour une tension sinusoïdal de pulsation ω : $E_1(t) = E_1\cos(\omega t)$ avec E_1 son amplitude

  D'où , etc…

- Passage en notation complexe : $\underline{E_1}(t) = E_1 e^{j\omega t}$ ($\underline{E_1} = E_1$ car $\varphi_1 = 0$ par référence)

  D'où l'amplitude complexe de E_2

  De même pour les notations complexes des courants : $\underline{i_1} =$ et $\underline{i_2} =$

La dérivée par rapport au temps en notation complexe revient à …………………………..
Après simplification par $\exp(j\omega t)$, les lois des mailles deviennent :

$$\Leftrightarrow$$

- **Application :** Les transformateurs de tension

Un transformateur **idéal** est un …………………………………………………….

On néglige donc les résistances internes des bobines : $\dots_{\dots} = \dots_{\dots} = \dots$

Un transformateur est **parfait** lorsque ....

Toutes les lignes de champ d'une bobine passent dans l'autre bobine et inversement d'où :

… (moyenne géométrique)

Pour un transformateur parfait, les équations deviennent :

…

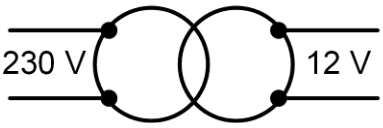
En faisant le rapport des tensions, le terme en facteur se simplifie : $\dfrac{\underline{E}_1}{\underline{E}_2} =$

En factorisant le numérateur par N_1 et le dénominateur par N_2 :

avec $\varphi_2 = \varphi_1 = 0$

Le rapport des amplitudes complexes étant un réel positif, les tensions sont **en phase**.

Pour passer de la tension du secteur de 230 V à une tension adaptée de 12 V pour un téléphone portable, il faut que la différence de bobinage dans le chargeur soit telle que :



$\dfrac{E_1}{E_2} = \dfrac{N_1}{N_2} = \dfrac{\ldots\ldots}{\ldots\ldots} \approx \ldots$ Le nombre de spires de 1 doit être ...... fois plus grand que celui de 2.

3 . Etude énergétique

A partir des équations temporelles de couplage, on multiplie par les intensités :

$$\begin{cases} E_1 = L_1 \dfrac{di_1}{dt} + M\dfrac{di_2}{dt} + r_1 i_1 \\ E_2 = L_2 \dfrac{di_2}{dt} + M\dfrac{di_1}{dt} + r_2 i_2 \end{cases} \Leftrightarrow$$

En ajoutant les équations membre à membre :

…

En regroupant les termes qui contiennent des dérivées :

…

La puissance fournie par les générateurs au circuit est soit emmagasinée par auto-induction et par ...., soit dissipée par effet Joule.
L'énergie magnétique associée à 2 bobines couplées est donc égale à l'énergie magnétique de chaque bobine plus un .... entre les bobines :

$\boxed{}$ avec $E_{Ln} = \frac{1}{2}L_n i_n^2$, $n \in \{1,2\}$ et $E_{\text{couplage}} =$

Les fem créées par les bobines s'opposent à la tension créée par le générateur et elles s'y opposent **encore plus** si elles sont couplées entre elles à cause des termes de couplage.

Salviati : Ici, "$1+1 \neq 2$, ici, $1+1>2$ dans le sens où 1 bobine + 1 bobine emmagasinent l'énergie du circuit **non pas** comme 2 bobines mais comme **un peu plus** que 2 bobines.

➢ **Application :** Le chauffage par induction
La plaque à induction assimilée à une bobine 1 produit un champ magnétique $\vec{B_1}$ et induit un courant i_2 dans la casserole assimilée à une bobine 2. Ce courant induit crée des pertes par effet Joule dans la résistance r_2 associée à la casserole. Ces pertes par effet Joule sont converties en chaleur donc chauffe la casserole et les aliments qui s'y trouvent.

On peut comprendre les assertions suivantes :
➢ Il faut des ustensiles adaptés à l'induction *i.e.* ....
➢ Les matériaux des ustensiles doivent être ....
➢ Il faut éviter de poser des objets magnétiques à proximité à cause des ....

II . Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire

Dans cette partie, le champ est uniforme et stationnaire : $\vec{B} = \overrightarrow{cste}$. Par contre, les circuits électriques ou certaines parties des circuits sont **mobiles** dans le référentiel terrestre.

Contrairement à l'énergie **dissipée** par effet Joule dans les résistances des circuits, l'énergie **emmagasinée** dans les bobines est **récupérable** de différentes manières.

A . Rails de Laplace

Soit une barre métallique AB de masse m sur des rails distants de l soumise à un champ magnétique $\vec{B} = \overrightarrow{cste} = B\vec{e_z}$. *Système :* {barre AB}, *Référentiel :* terrestre supposé galiléen.

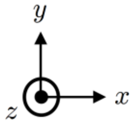
Repère : $\left(O, \vec{e_x}, \vec{e_y}, \vec{e_z}\right)$ avec $\vec{e_y}$ parallèle et dans le même sens que $\overrightarrow{AB}$.

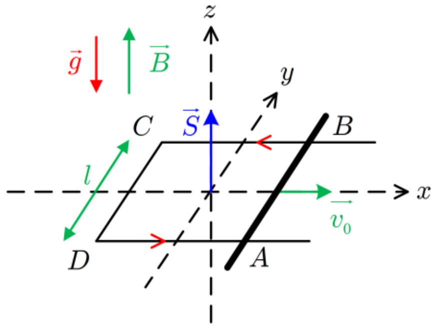
On assimile la barre à une .... **.........** : rotation négligé, contact ponctuel.

1. Freinage par induction

Hyp.1 : On néglige tous les frottements : solides avec les rails, fluides avec l'air.
Hyp.2 : On néglige l'éventuel champ magnétique propre $\overrightarrow{B_{pr}}$ créé par la barre.

On suppose que la barre AB est **en mouvement** à une vitesse initiale $\overrightarrow{v_0} = v_0\overrightarrow{e_x}$.





On choisit un sens de parcours dans la boucle fermée qui va fixer :

- ……………………………………………………… dans $ABCD$ (qu'il soit positif ou négatif)
- …………………………………………………………………………… : $\vec{l} = \overrightarrow{AB} = l\overrightarrow{e_y}$
- la direction et le sens de la normale à la surface : $\vec{S} = \vec{S}(t) =$

Soit R la résistance associé au passage du courant induit i dans $ABCD$.
La barre est en mouvement donc la surface S …………… : 1) le flux du champ magnétique dépend du temps $\Phi_{ext}(t)$, va induire 2) une fem e et donc 3) un courant induit i.

La barre sera alors soumise à 4) une force de Laplace $\vec{F}$.

1) $\Phi_{ext}(t) =$ avec $x = x(t)$

2) Loi de Lenz-Faraday : $e =$

3) Schéma du circuit équivalent :

Loi des mailles :

$\Leftrightarrow$ (équation électrique)

La vitesse de la barre et l'intensité du courant sont ………………………, ce n'est plus juste une analogie entre l'oscillateur harmonique et le circuit RLC (Mécanique ch. III p.15).

4) Force de Laplace : $\vec{F} =$

On pose avec $\alpha = \frac{\quad}{\quad}$, c'est une **force de ……………………………………**

Elle est analogue au ………………… ………… …………… $\vec{f} = -\alpha\vec{v}$ (Mécanique ch. III p.7).
Ce résultat était prévisible d'après la loi de modération de Lenz : les ………… du courant induit *i.e.* la force de Laplace $\vec{F}$ s'opposent à la cause *i.e.* ………………………

2 . Etude mécanique

Bilan des forces : poids en G : $\vec{P} = -mg\vec{e_z}$, force de Laplace en G : $\vec{F} =$

résultante des réactions normales des rails aux points A et B : $\vec{N} =$

2ème loi de Newton ou loi de la quantité de mouvement : $\frac{d\vec{p}}{dt} = \qquad =$

- Selon $\vec{e_y}$: . Pas de mouvement …………………

- Selon $\vec{e_z}$: . Pas de lévitation ni d'écrasement des rails.

  La normale $\vec{N}$ aux rails ………………… le poids $\vec{P}$ à chaque instant.

- Selon $\vec{e_x}$: . On pose $\tau =$ d'où :

$$\boxed{\qquad\qquad}$$ (équation mécanique)

équation différentielle linéaire, du 1er ordre, à coefficients constants, sans second membre

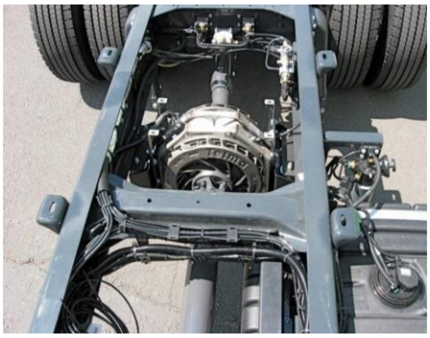
Solution homogène (ARQS page 13) : $v_x(t) =$ où A une constante à déterminer.

D'après les conditions initiales et l'expression de $v_x(t)$,

$v_x(t=0) =$ d'où

La vitesse ………………………………………, la barre est donc freinée par la force de Laplace et puisque cette force provient d'un courant induit, c'est un ………………………………

Culture scientifique :



Le même système est utilisé en rotation car ici, c'est une translation, pour **les freins** de certains camions : sous l'effet de la pédale de frein, un système situé sous le camion sur l'axe de transmission entre l'avant et l'arrière subit un champ magnétique qui va bloquer les roues arrière.
L'intérêt de ce système de freinage est de permettre un freinage …………… non brusque. Compte tenu du poids et des marchandises transportées, les frottements solides permettent ensuite l'arrêt complet.

B . Principe de l'alternateur

Chaque **centrale électrique** possède une turbine qui récupère l'énergie de mouvement créant de l'énergie sous forme électrique dans l'alternateur ou stator :

centrale	fait tourner le rotor
nucléaire	
éolienne	
hydraulique	
thermique	

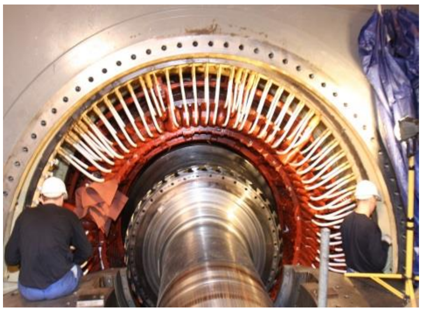
1 . Liaison pivot idéale

Sous l'effet d'une pression hydraulique, de vapeur ou éolienne, une turbine en liaison pivot tourne dans un système d'induction appelé alternateur qui va produire de l'électricité.
Les **alternateurs** permettent de ……………………………………………………………………… ……………………………… dans les centrales électriques.

Fonctionnement d'un turboalternateur.mp4

Ils sont composés d'un **…………** : solide en rotation autour d'un axe fixe et d'un **…………** : solide recouvrant le rotor, fait d'une multitude de bobines qui permettent de produire du courant électrique. Le rotor et le stator sont en **liaison pivot** (Mécanique ch. VII p.13).

turbine (rotor)



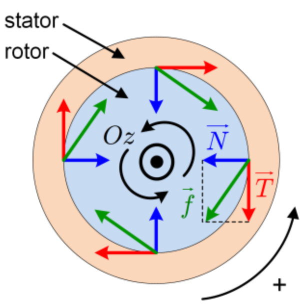
turboalternateur

alternateur (stator)

Objectif : Etablir le lien entre la puissance mécanique qui fait tourner le rotor et la puissance électrique produite par le stator à l'aide d'un modèle de spire rectangulaire.

L'énergie de mouvement produit un couple moteur $\Gamma_m > 0$ de puissance $p_m = \mathcal{P}(\Gamma_m) > 0$.

Pour une **liaison pivot**, le solide en rotation doit être bloqué soit à ses extrémités par un contact partiel avec deux solides pour un essieu de voiture ou un vélo par exemple, soit complètement en étant recouvert par un autre solide comme pour une turbine.
Ce contact avec d'autres solides entraîne des forces de frottements solides notés $\vec{f}$, ……………………………………………



Système : rotor

Référentiel : terrestre supposé galiléen.

Repère : …………………… $\left(O,\overrightarrow{e_r},\overrightarrow{e_\theta},\overrightarrow{e_z}\right)$

Pour chaque point M_i de la **surface extérieure** du rotor en contact avec le stator, à distance R du centre, on peut décomposer la force de frottement solide $\vec{f_i}$ en une force **……………** $\overrightarrow{N_i}=-N_i\overrightarrow{e_{ri}}$ orthogonal à la surface et une force **…………………** $\overrightarrow{T_i}=-T_i\overrightarrow{e_{\theta i}}$ le long de la surface, N_i et T_i sont les normes des vecteurs donc des grandeurs **………………** :

$\vec{f_i}=$ avec $\overrightarrow{e_{ri}},\overrightarrow{e_{\theta i}}$ les vecteurs unitaires dépendant de chaque point M_i

Le rotor est forcément cylindrique donc d'après la symétrie du problème : $\sum_{surface}\vec{f_i}=\vec{0}$

$\sum_{surface}\mathcal{M}_{Oz}\left(\vec{f_i}\right)=$ (somme de produits mixtes)

$=\sum_{surface}$

La résultante des forces est **…………** alors que la résultante des moments des forces n'est **………………**, il s'agit donc bien d'un …………………………………………… qu'on note Γ_f.

Avec les conventions choisies, une rotation voulue dans le sens **trigonométrique** :

$$\boxed{\Gamma_f=\sum_{surface}\mathcal{M}_{Oz}\left(\vec{f_i}\right)=-R\sum_{surface}T_i} \text{ où } \Gamma_f<0$$

C'est un couple de freinage ou …………… **……………** due à la liaison pivot qui est aussi appelée ……………………… On remarque que le couple résistant augmente en valeur absolue avec ………………………… et ne dépend que des frottements **……………………**

On définit alors la liaison pivot **idéale** pour laquelle les frottements tangentiels sont nuls et donc pour laquelle l'action de liaison entre rotor et stator est nulle :

$\boxed{}$ (liaison pivot idéale)

Théorème du moment cinétique :

Pour une liaison pivot **idéale**, l'équation du mouvement s'écrit :
Pour une liaison pivot **non idéale**, l'équation du mouvement s'écrit :

- Pour une rotation voulue dans le sens **trigonométrique**, $\Gamma_m>0$, $\Gamma_f<0$.
- Pour une rotation voulue dans le sens **………………**,

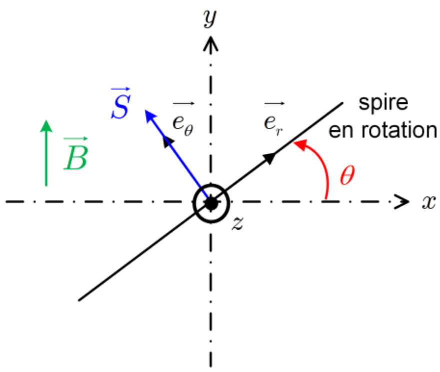
2 . Spire rectangulaire

Magnetism_Motors_and_Generators.mp4

On reprend le modèle de la spire rectangulaire $ABCD$ de surface S soumise à un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire dans un référentiel terrestre galiléen.
Cette fois, la spire n'est pas soumise à un courant électrique, elle est soumise à un couple mécanique Γ_m provenant du vent, d'un courant, de la vapeur d'eau, etc…

La spire est en liaison pivot autour d'un axe Oz. $\vec{B} = \overrightarrow{cste} = B\vec{e_y} =$

La gravité est compensée à chaque instant par le support sur lequel est posé le système.



On négligera le champ **propre** associé à la spire supposé faible devant le champ extérieur appliqué sur le système. On choisit ………………………………………………… qui va fixer :

- le sens d'un éventuel courant induit i dans $ABCD$ qu'il soit positif ou négatif
- l'orientation des longueurs pour d'éventuelles forces de Laplace : $\overrightarrow{AB} = -\ell\vec{e_r}$
- …………………………………………………………………… : $\vec{S} =$

La spire est en mouvement donc ………………………………………………………………………
………

La spire sera alors soumise à **4)** …………………………………………………

Bilan des couples de forces :

- Couple mécanique des forces extérieures ……………… : Γ_m
- Couple mécanique des frottements …………… entre le rotor et le stator : Γ_f
- Couple de Laplace :

…

Loi du moment cinétique scalaire pour un solide en rotation autour d'un axe fixe :

TMC : $\boxed{}$ (équation mécanique de la spire)

Le couple Γ_m est **moteur** alors que les couples Γ_f et Γ_e seront **résistants**.
D'après la loi de modération de Lenz, le couple de Laplace va ....

On suppose $\theta(t=0)=0$, $\dot{\theta}(t=0)=\omega_0>0$. On raisonne par disjonction de cas :

- Si $\Gamma_m>\Gamma_f+\Gamma_e$ alors $\ddot{\theta}\quad\Rightarrow\dot{\theta}\quad$, la vitesse angulaire va augmenter faisant tourner la spire plus vite dans le sens trigonométrique, la rotation sera ....

Problème : Lorsque la vitesse angulaire devient trop grande, le système finira par ....

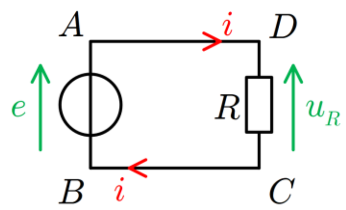
- Si $\Gamma_m<\Gamma_f+\Gamma_e$ alors $\ddot{\theta}\quad\Rightarrow\dot{\theta}\quad$, la vitesse angulaire va diminuer faisant tourner la spire moins vite dans le sens trigonométrique, la rotation sera ....

Problème : Si les couples s'opposant au mouvement prennent le dessus sur le couple moteur alors la spire va s'arrêter, θ devient constant et il n'y a plus de ....

- Si $\Gamma_m=\Gamma_f+\Gamma_e$ alors $\ddot{\theta}\quad\Rightarrow\dot{\theta}\quad$. Si les couples s'équilibrent alors la vitesse angulaire est constante, le mouvement est .... C'est le cas le plus intéressant.

On considère donc que la spire est en rotation .... : $\forall t>0$, $\dot{\theta}(t)=\dot{\theta}=cste=\omega>0$
En dérivant, on obtient : $\ddot{\theta}=$, en intégrant, on obtient : $\theta=$ car $\theta(0)=0$.

1) $\Phi_{ext}=$



2) Loi de Lenz-Faraday : $e=$

3) Schéma du circuit équivalent :

Soit R la résistance associé au passage du courant induit i dans $ABCD$.

Loi des mailles : $e-Ri=0\quad\Leftrightarrow\quad e(t)=Ri(t)=$ d'où $\boxed{i(t)=\qquad\qquad}$

Le courant induit est bien .... donc .... et .... comme celui qui arrive dans chaque maison. Plus le champ B est fort ou plus la résistance R est faible, plus l'intensité i sera importante. Plus la taille du rotor S est grande, plus l'intensité i du courant sera importante, c'est pourquoi les turboalternateurs sont ....

La fréquence en Europe vaut $f_0=50\,\text{Hz}$ donc $\omega_0=2\pi f_0=$...... rad.s^{-1} =......... tr.min^{-1}.
La vitesse de rotation du rotor ω est un sous-multiple de cette pulsation : $\omega=\omega_0/n$ où n est un entier naturel pour des raisons d'................................. du courant électrique.

3 . Bilan de puissance

On reprend l'équation mécanique : $J_{Oz}\ddot{\theta} =$ (TMC)

On multiplie par $\omega = \omega(t) = \dot{\theta}(t)$, **différent d'une constante** dans le cas général :

$$\Leftrightarrow$$

$\boxed{}$ (bilan général de puissance)

La puissance mécanique p_m est soit convertie en énergie .... E_C pour faire tourner la turbine, soit dissipée par .... $p_f = \Gamma_f \omega$, soit emmagasinée par .... $p_e = \Gamma_e \omega$. Lorsque la spire est en rotation **uniforme** :

$$\dot{\theta} = cste = \omega \quad \Rightarrow$$

4) Couple de Laplace : $\Gamma_e =$ car $\theta = \omega t$

Par ailleurs, $p_e = \Gamma_e \omega =$ où e est la fem d'induction

La puissance électrique p_e en convention .... peut être vue comme une opposition au mouvement $\Gamma_e \omega$ ou comme .... e : $\boxed{p_g = -p_e = ei}$.

$$\boxed{\qquad \Leftrightarrow \qquad}$$

En rotation uniforme, la **puissance mécanique** de la turbine est en partie dissipée par les frottements mais surtout convertie en .... dans le circuit.

C'est le principe pour produire de l'électricité dans toutes les centrales.

III . Récapitulatif

Variations possibles du flux : $\Phi = \vec{B}.\vec{S} = B \times S \times \cos\theta$ avec $\theta = \left(\vec{B}, \vec{S}\right)$

$B(t)$ avec $S, \theta = cstes$	$S(t)$ avec $B, \theta = cstes$	$\theta(t)$ avec $B, S = cstes$
....	.... haut-parleurs	....

3 façons de faire varier le flux :

- soit le champ varie : circuit fixe
- soit la surface varie : partie du circuit mobile
- soit l'angle varie : circuit indéformable mais mobile

Table des matières