

Conversion de puissance électromécanique

Sommaire

I Principe de la conversion de puissance	2
I/A Vocabulaire	2
I/B Exemple des rails de LAPLACE moteurs	2
I/C Exemple des rails de LAPLACE générateurs	5
I/D Conclusion	8
II Exemples de convertisseurs	8
II/A Le moteur à entrefer plan	8
II/B Le haut-parleur électrodynamique	9
II/C Freinage électromagnétique	9
III Notions d'électrotechnique	10
III/A Machine à courant continu	10
III/B Champ magnétique tournant	11

Capacités exigibles

- ☐ Interpréter qualitativement les phénomènes observés.
- ☐ Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe.
- ☐ Effectuer un bilan énergétique.
- ☐ Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.
- ☐ Expliquer l'origine des courants de FOUCAULT et en citer des exemples d'utilisation.

L'essentiel

Définitions

☐ I4.1 : Rails de LAPLACE moteurs	2
☐ I4.2 : Rails de LAPLACE générateurs	5
☐ I4.3 : Fonctionnement moteur	8
☐ I4.4 : Fonctionnement générateur	9
☐ I4.5 : Haut-parleur et microphone	9
☐ I4.6 : Freinage inductif	9
☐ I4.7 : Machine à courant continu	10

Propriétés

☐ I4.1 : Équation mécanique moteur	3
☐ I4.2 : Équation électrique moteur	3
☐ I4.3 : Équation électrique générateur	6
☐ I4.4 : Équation mécanique générateur	7
☐ I4.5 : Moteur entrefer plan	8
☐ I4.6 : Freinage inductif	10
☐ I4.7 : Couple et intensité d'une MCC	10
☐ I4.8 : Tension et vitesse ang. d'une MCC	11

Implications

☐ I4.1 : Rails de LAPLACE moteurs	4
☐ I4.2 : Fonctionnement d'une MCC	11

Remarques

☐ I4.1 : Différence thermodynamique	5
☐ I4.2 : Lien FARADAY–LENZ	6
☐ I4.3 : Inconvénient principal	11

Points importants

☐ I4.1 : Méthode de résolution	4
☐ I4.2 : Conversion électromécanique	4
☐ I4.3 : SANKEY moteur	5
☐ I4.4 : SANKEY générateur	7
☐ I4.5 : Conclusion conver° électroméca.	8

Erreurs communes

☐ I4.1 : Comparaisons en induction	3
---	---

I Principe de la conversion de puissance

I/A Vocabulaire

On a vu précédemment quelques exemples où un mouvement mécanique crée un champ électrique, mais également l'inverse. Un peu de vocabulaire :

- ◇ On parle de circuit **moteur** lorsqu'il convertit une puissance de **électrique à mécanique** ;
- ◇ On parle de circuit **générateur** lorsqu'il convertit une puissance de **mécanique à électrique**.

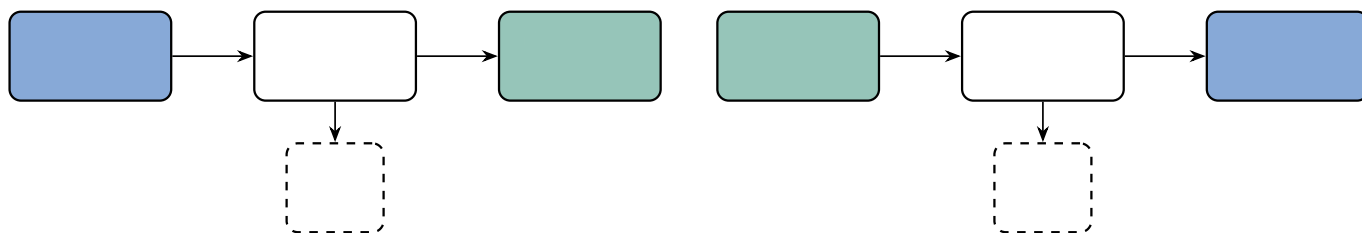


FIGURE I4.1 – Schématisation des fonctionnements moteur et générateur.

I/B Exemple des rails de LAPLACE moteurs

Définition I4.1 : Rails de LAPLACE moteurs

Les rails de LAPLACE **moteurs** sont deux conducteurs rectilignes parallèles reliés par une tige mobile conductrice rendant le circuit **déformable**, plongé dans un champ magnétique constant perpendiculaire au circuit et **alimenté par une f.é.m. constante** U_0 .

Le générateur étant dans un circuit fermé, il impose un courant $i > 0$. **On néglige l'auto-induction**, et on appelle R la résistance totale du circuit. Nous avons déjà constaté expérimentalement la mise en mouvement de la barre à l'aide de la force de LAPLACE.

Quelle est sa vitesse limite ?

FIGURE I4.2 – Rails de LAPLACE moteurs.

I/B) 1 Analyse qualitative

Avant de se lancer dans les calculs, on peut déterminer le comportement du système avec la loi de LENZ. Le processus causal est le suivant, représenté Figure I4.3 :

- 1) À l'origine de l'induction est la présence d'un champ extérieur $\vec{B}_{\text{ext}}$ et d'un courant dans le circuit.
- 2) Combinés ensemble, ils appliquent une action de LAPLACE sur le barreau, le mettant en mouvement et **déformant** le circuit.
- 3) Il y a donc **variation du flux**, et d'après la loi de FARADAY une f.é.m. induite y apparaît.
- 4) Le circuit étant toujours fermé, il y a également un courant induit.

L'induction modérant, par ses conséquences, les causes qui lui ont donné naissance, on en conclut que ce **courant induit s'oppose au courant initial**, ce qui générera une force de LAPLACE opposée tendant à freiner l'accélération du barreau.

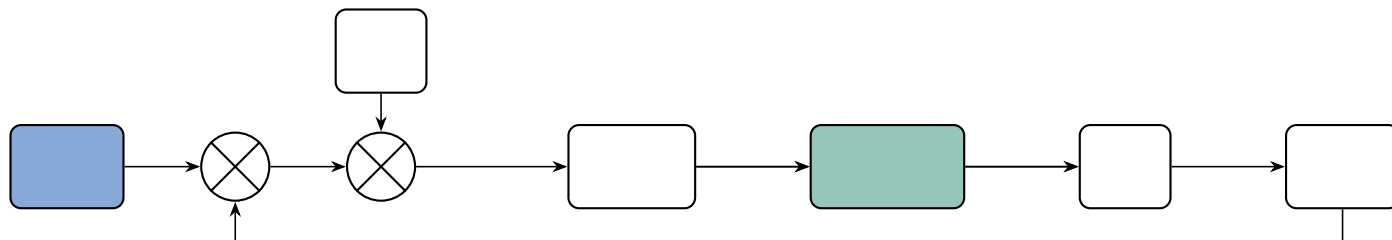


FIGURE I4.3 – Schéma de causalité des conséquences de l'induction.

♥ Attention I4.1 : Comparaisons en induction



On veut étudier ce comportement et notamment connaître la vitesse finale : est-elle infinie ? nulle ? constante ?

I/B) 2 Analyse mécanique

On étudie le mouvement de la barre de masse m dans le référentiel de la salle de classe. BdF :

- ◇
- ◇
- ◇
- ◇

Ainsi,

donc sur $\vec{u}_x$:

Propriété I4.1 : Équation mécanique moteur

(I4.1)

I/B) 3 Analyse électrique

La déformation du circuit entraîne une variation de sa surface. Ainsi, même avec un champ magnétique constant, le flux magnétique varie, impliquant l'apparition d'une f.é.m. induite.

$$\vec{S} = S\vec{u}_z \text{ sens de } i$$

FARADAY

convention **générateur**

Propriété I4.2 : Équation électrique moteur

Loi des mailles

$\Leftrightarrow$

(I4.2)

I/B) 4 Résolution

On cherche à éliminer i pour obtenir une équation différentielle sur v . On l'isole dans (I4.2) :

=

Substitution dans (I4.1) $=$ sans frottements

$=$

$=$

Forme canonique : avec $=$ et

Solution $\Leftrightarrow$

♥ Implication I4.1 : Rails de LAPLACE moteurs

I/B) 5 Résumé méthode

Important I4.1 : Méthode de résolution

1) Obtenir l'équation mécanique :

◇

◇

2) Obtenir l'équation électrique :

a)

b)

c)

d)

3) Résoudre les équations couplées.

I/B) 6 Bilan énergétique

◇ Bilan électrique :

(I4.2) $\times i$:

soit

avec $\mathcal{P}_{\text{fem}}^{\text{reçue}} = B\ell v i$

◇ Bilan mécanique :

(I4.1) $\times v$:

soit

Important I4.2 : Conversion électromécanique

On remarque donc que

Cela s'étend à d'autres types de systèmes électromécaniques :

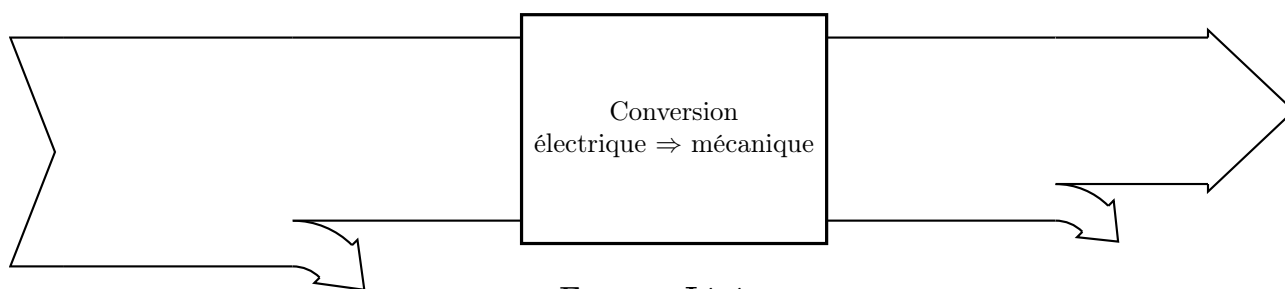
C'est-à-dire que le **couplage électromécanique est parfait**

Remarque I4.1 : Différence thermodynamique

Avec toujours

$$\eta = \left| \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance fournie}} \right|$$

on voit que **contrairement à la thermodynamique**, le **rendement théorique** de conversion électromécanique est de 1 ! En effet, seules les **pertes limitent le transfert**, alors qu'en thermodynamique **les pertes sont inhérentes aux transferts**.

I/B) 7 Bilan global**Important I4.3 : SANKEY moteur****Équation****Diagramme SANKEY****FIGURE I4.4****I/C Exemple des rails de LAPLACE générateurs****Définition I4.2 : Rails de LAPLACE générateurs**

Les rails de LAPLACE **générateurs** sont deux conducteurs rectilignes parallèles reliés par une tige mobile conductrice rendant le circuit **déformable**, plongé dans un champ magnétique constant perpendiculaire au circuit avec **une force** $\vec{F}_{\text{ope}} = F_{\text{ope}} \vec{u}_x$ **constante sur la tige**.

On néglige l'auto-induction, et on appelle R la résistance totale du circuit. Nous pouvons constater expérimentalement que le déplacement du barreau est à l'origine d'un courant de quelques μA dans le circuit. On étudie alors le circuit ci-dessous, avec un dipôle récepteur (tension U) quelconque. Comment se caractérise cette conversion ?

FIGURE I4.5 – Rails de LAPLACE générateurs.**I/C) 1 Analyse qualitative**

- 1) À l'origine de l'induction est la présence d'un champ extérieur $\vec{B}_{\text{ext}}$ et d'une action mécanique extérieure.

- 2) Ce mouvement implique un **déformation** du circuit, et donc une **variation du flux** et, d'après la loi de FARADAY, une f.é.m. induite y apparaît.
- 3) Le circuit étant fermé, il y a donc également un courant induit, et avec $\vec{B}_{\text{ext}}$ il apparaît une action de LAPLACE.

L'induction modérant, par ses conséquences, les causes qui lui ont donné naissance, on en conclut que cette **action de LAPLACE s'oppose à la force initiale**, tendant à freiner le barreau.

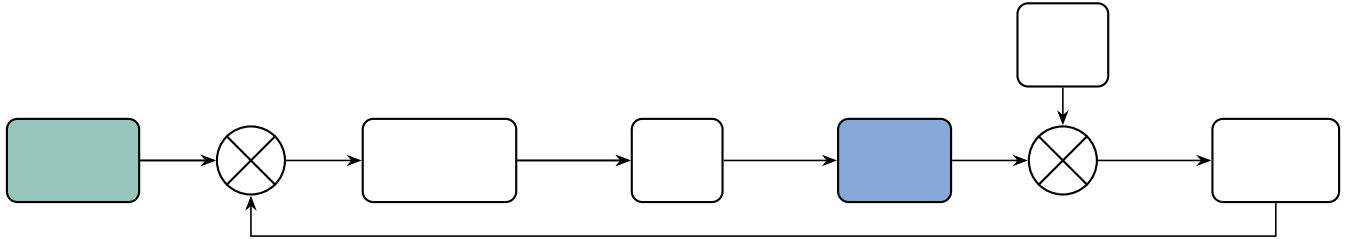


FIGURE I4.6 – Schéma de causalité des conséquences de l'induction.

I/C) 2 Analyse électrique

La déformation du circuit entraîne une variation de sa surface. Ainsi, même avec un champ magnétique constant, le flux magnétique varie, impliquant l'apparition d'une f.é.m. induite.

$$\vec{S} = -S\vec{u}_z \text{ sens de } i$$

FARADAY

convention **générateur**

♥ Propriété I4.3 : Équation électrique générateur

Loi des mailles

$\Leftrightarrow$

(I4.3)

Remarque I4.2 : Lien FARADAY–LENZ

On peut observer le lien entre la loi de FARADAY et la loi de LENZ par le signe « $-$ » : si $\dot{x} > 0$, la surface augmente donc, en valeur absolue, le flux augmente.

La loi de LENZ nous indique que le courant induit doit modérer cette augmentation, et donc créer un champ induit opposé au champ constant, donc dirigé selon $-\vec{u}_z$: on en déduit directement le sens réel de i .

Avec la loi de FARADAY et un choix arbitraire pour i , le signe « $-$ » nous donne directement que le flux diminue avec x , ce qui donne $e > 0$ et effectivement $i > 0$!

I/C) 3 Analyse mécanique

On étudie le mouvement de la barre de masse m dans le référentiel de la salle de classe. BdF :



Ainsi,

donc sur $\vec{u}_x$:

♥ Propriété I4.4 : Équation mécanique générateur

(I4.4)

On a donc de nouveau deux équations couplées, reliant v et i . On peut obtenir une seule équation que l'on peut résoudre à partir des deux équations obtenues, en utilisant l'équation électrique (I4.3) pour éliminer i de l'équation mécanique (I4.4).

I/C) 4 Bilan énergétique

◇ Bilan mécanique :

$$(I4.4) \times v :$$

Soit

◇ Bilan électrique :

$$(I4.3) \times i :$$

soit

$$\text{avec } \mathcal{P}_{\text{fem}}^{\text{fournie}} = i\ell Bv$$

$$\text{On retrouve } \mathcal{P}_{\text{fem}}^{\text{fournie}} = \mathcal{P}_{\text{Lap}}^{\text{fournie}}$$

I/C) 5 Bilan global

Important I4.4 : SANKEY générateur

Équation

Diagramme SANKEY

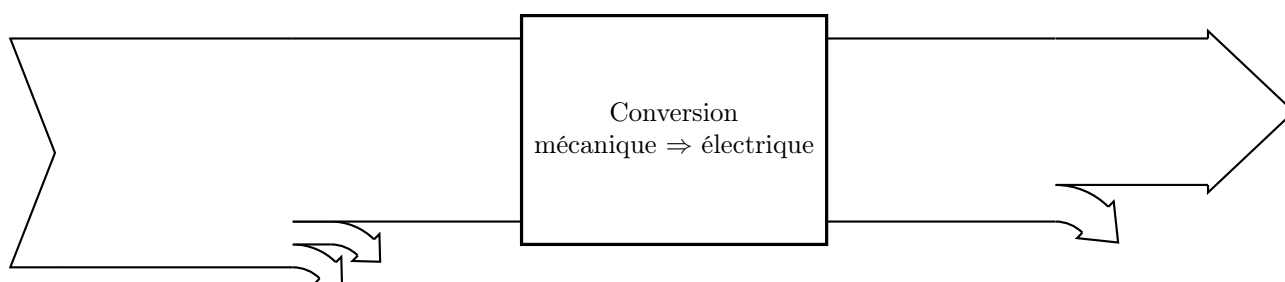


FIGURE I4.7

I/D Conclusion

Important I4.5 : Conclusion conversion électromécanique

- ◇
- ◇
- ◇

II Exemples de convertisseurs

II/A Le moteur à entrefer plan

La géométrie des rails de LAPLACE peut être modifiée pour obtenir un moteur rotatif alimenté courant continu. Il se compose d'un **stator**, partie fixe constitué d'aimants qui produisent un champ magnétique stationnaire $\vec{B}_0$, et d'un **rotor**, partie mobile constituée de N fils partant dans la direction radiale et parcouru par un courant d'intensité i .

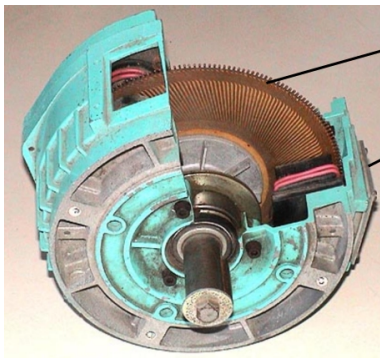


FIGURE I4.8 – Photo d'un moteur à entrefer plan.

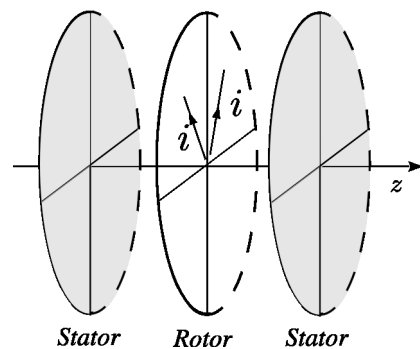


FIGURE I4.9 – Schéma simplifié, vue de côté.

Ce dispositif peut s'utiliser de deux manières :

Définition I4.3 : Fonctionnement moteur

On impose un courant i dans chaque rayon, qui va du centre vers la périphérie. Chaque rayon sera comme un rail de LAPLACE moteur, créant des moments qui s'additionnent.

Via la loi de LENZ, ce mouvement va *in fine* être à l'origine d'une f.é.m. induite, à l'origine d'un courant qui modèrera ce mouvement : le rotor atteint une vitesse angulaire limite, proportionnelle à la tension d'alimentation.

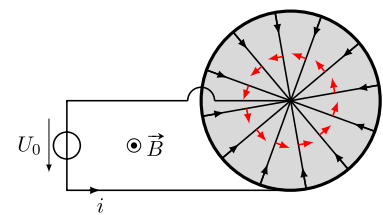


FIGURE I4.10

Propriété I4.5 : Moteur entrefer plan

La vitesse de rotation de ces moteurs est très stable, le couple est indépendant de la vitesse de rotation et du fait de la faible inertie du rotor, il réagissent rapidement aux changements de vitesse de rotation. Ils sont également peu encombrants. En revanche, leur puissance est limitée à 1 kW.

Définition I4.4 : Fonctionnement générateur

On exerce sur la roue un couple Γ_0 afin de la forcer à tourner à une vitesse angulaire ω .

Chaque rayon joue le rôle d'un rail de LAPLACE générateur, créant un courant induit à cause de la rotation dans le champ magnétique stationnaire $\vec{B}_0$.

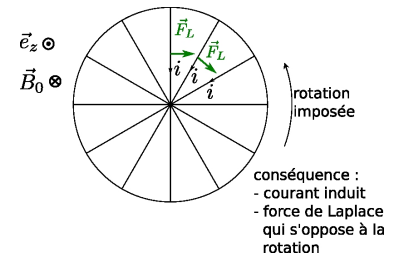


FIGURE I4.11

Exemple I4.1 : Moteur entrefer plan au quotidien

- ◇ motorisation vélo, chaises ◇ robotique industrielle ;
- ◇ médical (pompes à sang, dialyse).

II/B Le haut-parleur électrodynamique

Cas particulier des ondes sonores Le son étant une onde mécanique (propagation de proche en proche de vibrations mécaniques dans un milieu), on peut utiliser des phénomènes d'induction pour convertir un signal électrique en un signal sonore (énergie mécanique).

♥ Définition I4.5 : Haut-parleur et microphone

- ◇ On parle de **haut-parleur** pour la conversion de puissance **électrique** en puissance **sonore**.
- ◇ On parle de **microphone** pour la conversion de puissance **sonore** en puissance **électrique**.

La géométrie des haut-parleurs rend difficile un calcul du flux magnétique à travers un circuit déformable, néanmoins, on peut mettre en évidence quelques-unes de ses caractéristiques sur un modèle très simple dans la géométrie des rails de LAPLACE. Nous le ferons en TD.

II/C Freinage électromagnétique

Dans le dispositif des rails de LAPLACE, la force de LAPLACE s'oppose au mouvement de la barre, conformément à la loi de LENZ. En l'absence d'opération externe pour maintenir le mouvement ($F = 0$) :

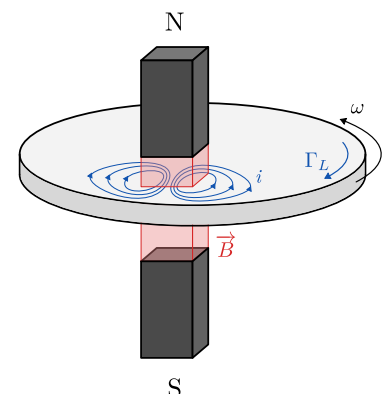
$$v_{\text{lim}} = 0 \Rightarrow \frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = 0 \Rightarrow v(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Cela conduit à une décroissance exponentielle de la vitesse de la barre sur un temps τ .

Définition I4.6 : Freinage inductif

C'est le principe des ralentisseurs électromagnétiques utilisés sur les poids lourds. Dans un camion, il y a un disque solidaire de l'essieu qui tourne à la même vitesse angulaire que les roues. Sur demande de la conductrice, un électroaimant peut générer un champ magnétique orthogonal au disque : des courants induits apparaissent dans le volume du disque : ces courants sont nommés **courant de FOUCAULT**.

Un couple proportionnel à ω induit une décroissance exponentielle de la vitesse du camion.



Propriété I4.6 : Freinage inductif

Avantages

- ◇
- ◇
- ◇
- ◇

Inconvénients

- ◇

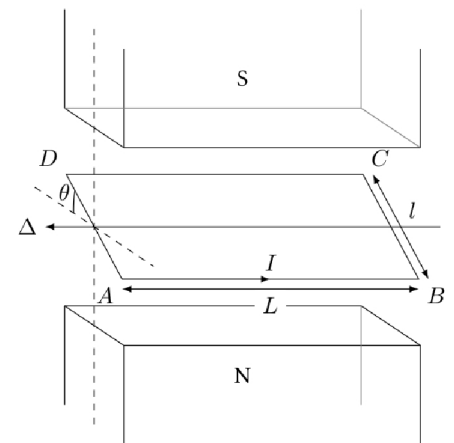
III Notions d'électrotechnique

III/A Machine à courant continu

Définition I4.7 : Machine à courant continu

On fabrique un moteur en plaçant un rotor constitué d'une spire rectangulaire plongée dans le champ magnétique créé par deux aimants permanents (le champ magnétique est supposé uniforme). La spire a une longueur ℓ et une largeur L et est parcourue par un courant I .

Le champ magnétique est vertical, du Nord vers le Sud. On note $\vec{u}_y$ son sens, soit $\vec{B} = B\vec{u}_y$, $\vec{u}_x$ est la direction perpendiculaire à $\vec{u}_y$ et l'axe Δ de sorte que $(xy\Delta)$ soit directe.



Couple des actions de LAPLACE La norme du moment magnétique est $m = IS$, donc le couple :

A priori, la spire se stabilise alors dans sa position d'équilibre $\theta = 0$. Pour que ce système se comporte comme un moteur, on ajoute un mécanisme qui permet d'**inverser le sens du courant à chaque demi-tour**. Ainsi, si $0 < \theta < \pi$, on a le même couple que précédemment, et si $\pi < \theta < 2\pi$, on a $\Gamma = -IS \sin(\theta)$; autrement dit,

soit

$\Leftrightarrow$

Propriété I4.7 : Couple et intensité d'une MCC

On a alors un **couple proportionnel à l'intensité** :

Force électromotrice d'induction On trouve le flux

Donc

 $\Leftrightarrow$

Lorsque $\pi < \theta < 2\pi$, la tension est inversée par le collecteur, de sorte que la tension aux bornes de la machine soit $u = -e = -BS\omega \sin(\theta)$. Et donc, quel que soit θ :

soit

 $\Leftrightarrow$ **Propriété I4.8 : Tension et vitesse angulaire d'une MCC**

On a alors une **tension proportionnelle à la vitesse angulaire** :

♥ Implication I4.2 : Fonctionnement d'une MCC

Par une rapide étude en puissance, on trouve

On peut donc facilement **adapter la charge** en jouant sur l'intensité.

♥ Remarque I4.3 : Inconvénient principal

Ce moteur présente l'inconvénient d'imposer une couple variable en fonction de θ (le couple est nul pour certaines positions et ne peut démarrer dans ces positions). Les moteurs réels ont donc un champ magnétique radial pour avoir un couple constant.

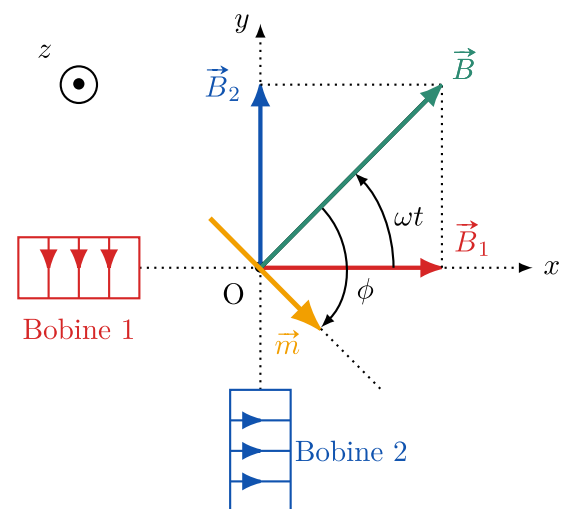
III/B Champ magnétique tournant**Exemple I4.2 : Champ magnétique tournant**

On place deux bobines à 90° l'une de l'autre. La bobine 1 est parcourue par un courant $i_1 = i_0 \cos(\omega t)$, et la bobine 2 par un courant $i_2 = i_0 \sin(\omega t)$. Le champ produit par la bobine 1 est $\vec{B}_1 = B_0 \cos(\omega t) \vec{u}_x$, et par la bobine 2 est $\vec{B}_2 = B_0 \sin(\omega t) \vec{u}_y$, en déphasage de $\pi/2$. Le champ total au centre est donc

c'est-à-dire un champ magnétique tournant. En plaçant un aimant au centre de ce champ, comme il a tendance à s'aligner sur le champ, il va se mettre à tourner : on a construit un moteur, dit **moteur synchrone**.

En pratique, on utilise des tensions triphasées, c'est-à-dire trois signaux de tensions :

$$U_0(t) = U \cos(\omega t) \quad U_1(t) = U \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad U_2(t) = U \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$



avec trois bobines placées à des angles $0, 2\pi/3$ et $4\pi/3$.