

# LP20 – CONVERSION DE PUISSANCE ÉLECTROMÉCANIQUE

25 juin 2020

Aurélien Goerlinger & Yohann Faure

## Commentaires du jury

- 2016 : Afin de pouvoir aborder des machines électriques de forte puissance, le rôle essentiel du fer doit être considéré car les forces électromagnétiques ne se réduisent pas aux seules actions de Laplace s'exerçant sur les conducteurs traversés par des courants.
- 2015 : Il est souhaitable de préciser le rôle de l'énergie magnétique lors de l'étude des convertisseurs électromécaniques constitués de matériaux ferromagnétiques linéaires non saturés.
- 2014 : Dans le cas des machines électriques, les candidats sont invités à réfléchir au rôle du fer dans les actions électromagnétiques qui peuvent également être déterminées par dérivation d'une grandeur énergétique par rapport à un paramètre de position.  
Jusqu'en 2013, le titre était : Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications.
- 2011, 2012, 2013 : Dans cette leçon, le plus grand soin dans la définition des orientations et des conventions de signe s'impose. Les applications doivent occuper une place significative dans la présentation. Ce ne sont pas les machines de technologie complexe qui illustrent le mieux les idées en jeu. Les notions de base sur l'induction sont supposées connues.
- 2008 : Cette leçon nécessite une bonne connaissance des machines présentées et de leurs applications.
- 2006 : Les principes élémentaires de l'induction ne sont pas correctement utilisés dans cette leçon qui nécessite un minimum de connaissance de la technologie des machines.
- 2005 : Il ne faut pas confondre force de Lorentz sur un porteur de charge et force de Laplace sur un conducteur. Toutes les grandeurs introduites doivent être algébriques ou vectorielles, ce qui nécessite de préciser les orientations et les bases de projection.
- 2004 : La conversion de puissance a donné lieu à des exposés purement descriptifs. Nous attendons une attitude de physicien, c'est-à-dire une justification des modèles simples proposés pour les machines à courant continu, par exemple avec les conditions d'alébrisation des grandeurs électriques et mécaniques introduites.  
Jusqu'en 2003, le titre était : Exemples de couplage électromécanique : haut-parleur électrodynamique, moteurs... Bilans énergétiques.
- 1999 : Les candidats doivent pouvoir donner le principe des moteurs électriques des différents types (à champ tournant, unipolaires, universels) ainsi que celui des générateurs électriques à courant continu ou alternatif. Il faut être particulièrement attentif aux signes dans cette leçon et ne pas omettre de mentionner des ordres de grandeur.
- 1998 : Il est essentiel de montrer l'importance des termes de couplage entre équation mécanique et équation électrique. Dans le bilan d'énergie global, il faut faire ressortir le rôle du champ magnétique et expliquer l'origine du bilan auxiliaire  $\mathcal{P}_{\text{Laplace}} + \mathcal{P}_{\text{fem}} = 0$ .
- 1997 : Dans les bilans énergétiques, deux approches sont possibles : raisonner sur le circuit mobile seulement ou sur le système constitué du circuit et des sources de B. Dans le premier cas, un fait important est que le travail des forces de Laplace extérieures subies par le circuit mobile augmenté du travail de la force électromotrice d'induction dans ce circuit et dû à son déplacement seulement, est nul ; cela provient de la nullité du travail des forces de Lorentz au niveau microscopique. Une illustration expérimentale des exemples traités, haut-parleur ou moteur, s'impose.

## Niveau : L2

### Bibliographie

↻ <i>Hprépa PSI</i> , <b>Auteur</b>	→ Pourquoi
↻ <i>Précis d'électrotechnique</i> , <b>Bréhat</b>	→ Toute la leçon
↻ <i>BUP 846</i>	→ Ordres de grandeurs
↻ <i>Electrotechnique IUT</i> , <b>Palermo</b>	→ Plein infos et récap et triphasé
↻ <i>Electrotechnique</i> , <i>Gaude</i>	→ Autre cours et électronique de puissance
↻ <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9zo%C3%A9lectricit%C3%A9">https://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9zo%C3%A9lectricit%C3%A9</a>	→ Piézoélectricité

### Prérequis

- Forces de Laplace et de Lorentz
- Lois de l'électromagnétisme (Faraday)
- Principe de l'induction
- Lois de l'électrocinétiques, puissance électrique
- PFD, puissance mécanique

### Expériences



### Table des matières

<b>1 Rappels sur l'induction</b>	<b>3</b>
1.1 Origine physique . . . . .	3
1.2 Compréhension du phénomène . . . . .	3
1.3 Lois de l'induction . . . . .	4
1.3.1 Loi locale . . . . .	4
1.3.2 Loi de Faraday . . . . .	4
1.4 Auto-induction . . . . .	4
<b>2 Principe de la conversion électromécanique</b>	<b>5</b>
2.1 Un premier exemple : les rails de Laplace . . . . .	5
2.2 Fonctionnement en générateur . . . . .	6
2.3 Fonctionnement en moteur . . . . .	7
2.4 Bilan de puissance . . . . .	7
<b>3 Machines à courant continu</b>	<b>8</b>
3.1 Principe . . . . .	8
3.2 Fonctionnement en moteur . . . . .	9
3.3 Équations de fonctionnement . . . . .	10
3.3.1 Calcul du couple . . . . .	10
3.3.2 Calcul de la fem . . . . .	11
3.3.3 Bilan de puissance . . . . .	11
3.4 Moteur ou générateur ? . . . . .	12
3.5 Considérations techniques . . . . .	12
<b>4 Machines à courant alternatif</b>	<b>13</b>
4.1 Moteurs synchrones . . . . .	13
4.1.1 Principe . . . . .	13
4.1.2 Champ tournant . . . . .	13
4.1.3 Discussion pratique . . . . .	13
4.1.4 Les calculs en mode moteur . . . . .	14
4.1.5 Les calculs en mode générateur . . . . .	14
4.2 Moteurs asynchrones . . . . .	15

## Introduction

Au quotidien, on utilise des moteurs, des générateurs, et de l'électricité tous les jours. Rien que dans une voiture, qui est un gros moteur sur pattes (ou plutôt sur roues), on a une quarantaine de moteurs électriques entre les pompes et autres essuie-glaces, ainsi que des transformateurs et des générateurs.

Dans la maison, on a des moteurs dans les lave-linges et autres portails électriques, qui convertissent de la puissance électrique en puissance mécanique. À l'autre bout de la chaîne, chez EDF, on convertit de la puissance mécanique sous forme de turbine qui tournent en énergie électrique.

Ce sont ces deux aspects de la conversion de puissance que l'on va voir aujourd'hui.

## 1 Rappels sur l'induction

✦ Perez, Électromagnétisme

L'induction électromagnétique est un phénomène physique conduisant à l'apparition d'une force électromotrice dans un conducteur électrique soumis à un flux de champ magnétique variable. Cette force électromotrice peut engendrer un courant électrique dans le conducteur.

Ce phénomène est d'une importance pratique capitale. Il est notamment utilisé dans les générateurs et les transformateurs électriques, les bobines, ou encore les plaques à induction grâce aux courants de Foucault.

### 1.1 Origine physique

Ce phénomène a pour origine la force de Lorentz  $\vec{F}$ , appliquée aux électrons libres dans le conducteur électrique :

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad (1)$$

où  $q$  est la charge de la particule (exprimée en coulombs),  $\vec{E}$  le champ électrique (volts par mètre),  $\vec{v}$  la vitesse de la particule (mètres par seconde), et  $\vec{B}$  l'induction magnétique (teslas).

Ces grandeurs sont toutes mesurées dans le même référentiel galiléen au point où se trouve la particule. La notion de référentiel est ici très importante car suivant le référentiel dans lequel on se place, il y a deux manières d'interpréter le même phénomène. Dans ces deux points de vue, cela se modélise par la loi de Lenz-Faraday, ou bien une des quatre équations de Maxwell.

### 1.2 Compréhension du phénomène

On considère un conducteur électrique placé dans un champ magnétique. Suivant le référentiel de travail choisi, il est possible de mettre en évidence deux cas particuliers du phénomène d'induction :

- L'induction de Lorentz :

on parle de l'induction de Lorentz lorsqu'on travaille dans un référentiel dans lequel le champ magnétique est stationnaire et que le conducteur électrique se déplace ou se déforme. Dans ce référentiel, les électrons ont alors une vitesse, subissent une force qui correspond à la partie magnétique de la force de Lorentz

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad (2)$$

Le phénomène est exploité dans les machines à courant continu. Pour un circuit filiforme, f.é.m. induite a pour expression :

$$e = \oint (\vec{v} \wedge \vec{B}) d\vec{\ell} \quad (3)$$

- L'induction de Neumann : dans le cas de l'induction de Neumann, le conducteur électrique est considéré rigide et fixe dans le référentiel de travail, et le champ magnétique y est variable dans le temps. Dans ce référentiel, les électrons n'ont pas de vitesse, donc la contribution de la force de Lorentz est nulle. Cependant, on observe la variation du flux du champ magnétique. Le phénomène est exploité dans les alternateurs, les moteurs asynchrones et moteurs à induction ainsi que des transformateurs électriques.

## 1.3 Lois de l'induction

Il existe deux formes, intégrale et locale, qui sont équivalentes.

### 1.3.1 Loi locale

La loi d'Ohm s'écrit localement :

$$\vec{j} = \sigma(-\vec{\nabla}V + \vec{E}_{em}) \quad (4)$$

où  $\sigma$  est la conductivité électrique du conducteur,  $\vec{j}$  est la densité volumique du courant électrique. En l'absence de générateur électrochimique (qui crée un gradient de potentiel  $\vec{\nabla}V$ , seuls les phénomènes d'induction peuvent expliquer la naissance de courant, "via" le champ électromoteur

$$\vec{E}_{em} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{v} \wedge \vec{B} \quad (5)$$

### 1.3.2 Loi de Faraday

La forme intégrale, ou loi de Faraday, est la suivante : un circuit soumis à un flux magnétique variable  $\Phi$  (issu d'un champ magnétique variable  $B$ ) subit une force électromotrice :  $e$  (en volts) orientée selon une convention générateur telle que :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (6)$$

où  $\Phi$  est le flux de  $B$  à travers le circuit.

Dans un schéma électrique, cette force électromotrice est toujours fléchée avec la convention générateur. Ainsi, lorsqu'on utilise la convention récepteur, la tension  $u$  aux bornes de ce circuit est égale à la somme des chutes de tension liées à l'intensité  $i$  qui le parcourt, retranchées de cette force électromotrice.

En régime de courant continu, on peut alors écrire ce qu'on appelle la loi d'Ohm généralisée :

$$U = R \cdot I - e \quad (7)$$

où  $R$  est la résistance électrique du conducteur.

## 1.4 Auto-induction

On parle d'auto-induction lorsque la source du champ magnétique à l'origine d'une force électromotrice dans un circuit est le courant électrique parcourant ce même circuit. Le champ magnétique établit une rétroaction des variations du courant dans le circuit sur elles-mêmes.

L'auto-induction est la propriété électromagnétique remarquable qu'à un conducteur parcouru par un courant électrique, de s'opposer aux variations de celui-ci.

En effet, un conducteur parcouru par un courant électrique génère un champ magnétique (cf. loi de Biot et Savart). La loi de Lenz-Faraday décrit le phénomène suivant : lorsque le flux du champ magnétique qui traverse un circuit conducteur varie au cours du temps, il apparaît dans ce circuit une tension appelée force électromotrice. La f.e.m. ainsi créée est orientée de façon à générer des courants s'opposant à la variation du flux :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

Toute variation du courant produit une variation de ce champ induit, ce qui a pour effet de produire une tension qui s'oppose à la variation du champ donc qui s'oppose à la variation du courant :

$$u = -L\frac{di}{dt} \quad (9)$$

où  $L$  s'appelle le coefficient d'auto-inductance du circuit ou inductance propre du circuit. Il ne dépend que de la configuration géométrique du circuit, et est toujours strictement positif.

## 2 Principe de la conversion électromécanique

**Système électromécanique** : système mécanique couplé à un système électrique. Nous nous limiterons dans ce cours au couplage par les lois de l'induction.

### 2.1 Un premier exemple : les rails de Laplace

Un premier système que l'on peut étudier est celui des rails de Laplace. Ce montage est constitué de deux rails séparés d'une distance  $a$  reliés entre eux par un générateur vénére en mode moteur ou un ampèremètre en mode générateur. On ferme le circuit avec une barre en métal, placée dans un champs  $\vec{B}$  permanent, uniforme et constant.

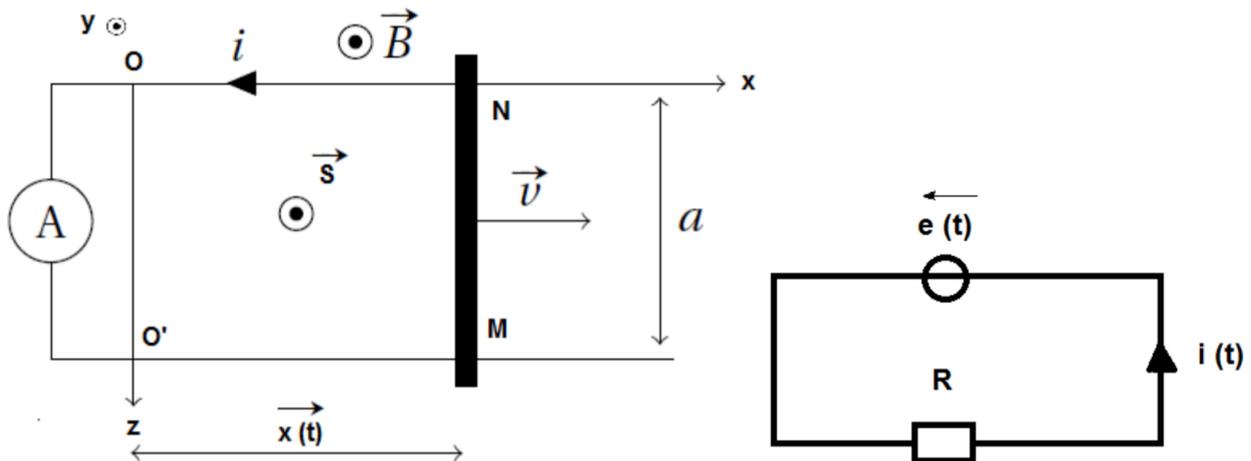


FIGURE 1 – Le montage des rails de laplace (ici en générateur) et son schéma électrique équivalent.

## 2.2 Fonctionnement en générateur

### Conversion méca vers élec



#### Rails de Laplace générateur



On mesure au microampèremètre à aiguille, avec le 0 au milieu pour bien voir dans le deux sens.

On crée un champ  $\vec{B}$  à l'aide d'un aimant en U, créant un champ magnétique ascendant. La seule façon de bien l'orienter, c'est d'utiliser le schéma au-dessus.

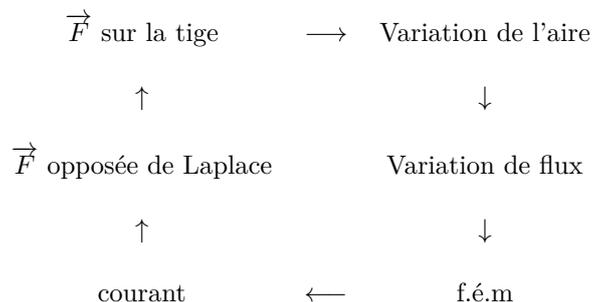
On déplace la tige le long des rails, et on observe un courant ! Il change de sens avec le sens de la barre.

#### Question : d'où ça vient ?

Le flux passant dans la boucle, que l'on nommera  $\phi$  dépend de la distance entre la barre et le bout des rails, nommé  $x(t)$ . On a grosso-modo  $\phi \propto x(t)$ .

Cette variation de flux au cours du temps va provoquer l'apparition d'une force électromotrice dans le circuit, par induction de Lorentz, dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen.

$$d\vec{F}_L = i d\vec{\ell} \wedge \vec{B} \quad (10)$$



#### Mise en équations :

On se place dans le cas d'un déplacement à  $x$  croissants. On oriente le courant comme indiqué dans le schéma, avec  $i$  de  $M$  vers  $N$ . La règle des trois doigts donne une force de Laplace dans le sens opposé à la vitesse, et une intensité négative.

$$\text{équation mécanique, PFD : } m\ddot{x} = i(t)aB + T \quad (11)$$

On a de plus une loi des mailles à exprimer, en considérant une résistance  $R$  pour la barre, et en utilisant la loi de Faraday,  $e(t) = -d_t\phi = -aB\dot{x}$ .

$$\text{équation électrique : } aB\dot{x} + Ri = 0 \quad (12)$$

On a donc ici un couplage entre une équation mécanique et une équation électrique, comme annoncé dans l'introduction ! On voit aussi une propriété amusante de tout cela, le couplage n'a pas de notion de causalité, mais plutôt de boucle de rétroaction. Que se passe-t-il si je fais passer un courant ?

## 2.3 Fonctionnement en moteur

Conversion élec vers méca

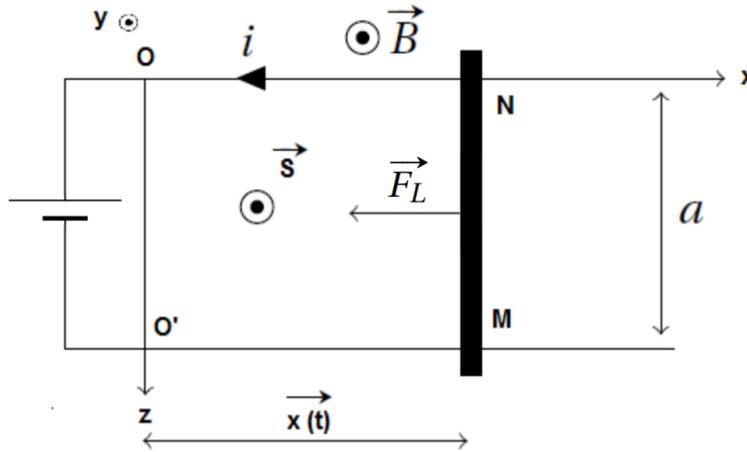


FIGURE 2 – Montage et conventions en mode moteur.



### Rails de Laplace



Même expérience, en remplaçant l’ampèremètre par un gros générateur de tension continue générant quelques volts. Humidifier le barreau pour assurer un contact électrique et éviter les arcs électriques.

Les équations sont alors exactement les mêmes :

$$\begin{cases} E - aB\dot{x} + Ri = 0 \\ n\ddot{x} - aBi = 0 \end{cases} \quad (13)$$

On a donc réussi à faire des conversion de puissance électrique en puissance mécanique et inversement. Mais qu’en est-il du bilan de puissance justement ?

## 2.4 Bilan de puissance

Dans le cas du moteur, on peut écrire le bilan de puissance comme suit :

$$Ei = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2}mv^2 \right) + Ri^2 \quad \text{d'où} \quad \mathcal{P}_{\text{généré}} = \frac{dE_c}{dt} + \mathcal{P}_{\text{joule}} \quad (14)$$

Dans le cas du générateur on a le même type d'équation, avec comme source cette fois la traction  $T$ .

$$T\dot{x} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2}mv^2 \right) + Ri^2 \quad \text{d'où} \quad \mathcal{P}_T = \frac{dE_c}{dt} + \mathcal{P}_{\text{joule}} \quad (15)$$

On voit donc qu’on converti de la puissance électrique en puissance mécanique et inversement, avec pour pertes les pertes par effets Joule. Le rendement théorique maximal n’est, contrairement au cas des machines thermiques, pas limité par la physique. Seule la résistance du bousin limite l’efficacité de la conversion.

Il s’agit là d’un modèle très simpliste mais également très explicatif pour introduire les **vrais** machines de conversion.

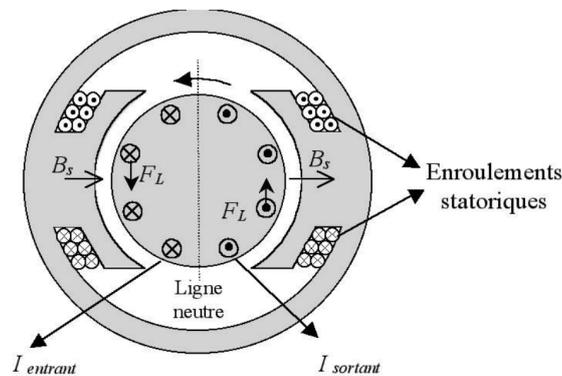


FIGURE 3 – Les trains ART de Bombardier se déplacent grâce à la bande d'aluminium que l'on voit entre les voies. Ce train relie les terminaux du JFK-Airport de New-York.

### 3 Machines à courant continu

La MCC est un moteur-générateur qui a été grandement utilisé au cours du 20ème siècle. Elle a notamment servi à alimenter les TGV dans les années 80 (avant d'être remplacée par des machines à courant alternatif) et dans le métro de Lyon depuis 1978.

#### 3.1 Principe



La MCC est une machine **réversible** : en mode moteur, elle convertit l'énergie électrique en énergie mécanique tandis qu'en mode générateur, elle fait l'inverse. Elle est composée de 2 parties :

- **le stator** : c'est la partie immobile qui joue le rôle de l'inducteur.  
Il crée un champ  $\vec{B}$  constant à l'aide d'un bobinage traversé par un courant continu ou à l'aide d'un aimant permanent. Il est composé de fer pour canaliser les lignes de champ magnétiques.
- **le rotor** : c'est la partie mobile qui joue le rôle de l'induit  
Il est constitué d'un ensemble de spires pouvant être mises en rotation et qui sont reliées à l'arbre de transmission.

On appelle *ligne neutre* ou *ligne polaire* le plan d'antisymétrie de  $\vec{B}$ . De manière générale, tout ce qui nous intéresse se passera au niveau de l'induit. L'inducteur ne sert juste qu'à créer un champ  $\vec{B}$ .

En fonctionnement moteur, un courant circule dans les spires, ce qui induit une force de Laplace due à la présence d'un champ  $\vec{B}$ . Il y a donc création d'un couple qui engendre la rotation du rotor.

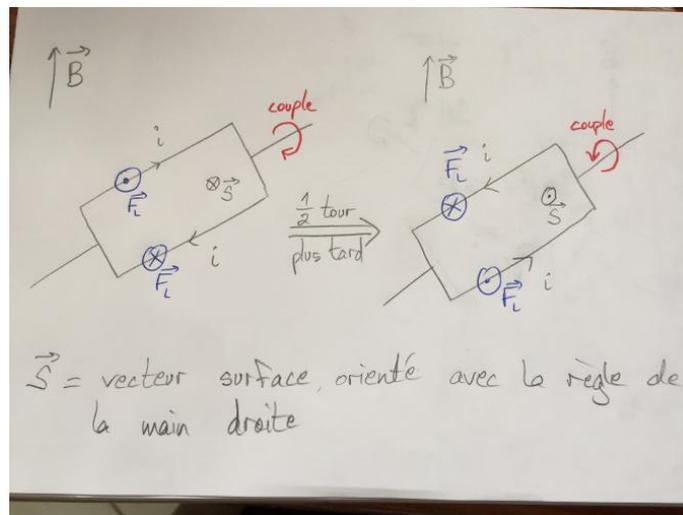
En fonctionnement générateur, les spires tournent, ce qui implique une modification du flux de  $\vec{B}$ . D'après la loi de Faraday, on a création d'une force électromotrice (fem) et donc d'une tension.

Dans la suite, on se placera en fonctionnement moteur.

### 3.2 Fonctionnement en moteur

<https://youtu.be/q4yZDYWMzJo>

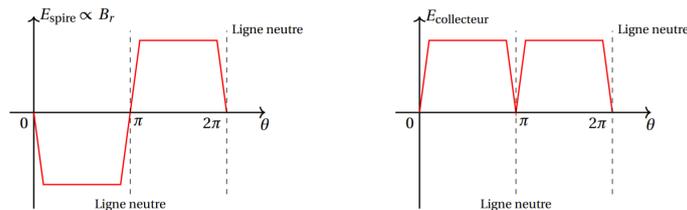
Lorsque la spire passe par la position pour laquelle le vecteur normal à la surface est perpendiculaire au champ  $\vec{B}$ , le couple appliqué change de signe et la force de Laplace tend à ramener la spire en sens inverse. Pour que la rotation perdure, il faut donc que le **courant soit inversé** à chaque moitié de tour de la spire.



Encore faut-il être capable de fournir du courant à un conducteur en rotation. Pour cela, on utilise :

- **un collecteur (ou commutateur)** : c'est un ensemble de cylindres conducteurs isolés les uns des autres et reliés 2 par 2 à un solénoïdes du bobinage du rotor
- **2 balais** : ce sont 2 petits éléments circulaires sur lesquels les lames du collecteur glissent lors de la rotation du rotor. L'un de ces éléments possède un courant entrant tandis que l'autre possède un courant sortant.

Lorsqu'un solénoïde passe par la position critique d'inversion du couple, les 2 cylindres reliés au solénoïdes échangent de balais : le cylindre qui était au contact du balai ayant le courant entrant rompt ce contact pour entrer en contact avec le balai ayant le courant sortant et inversement. Ainsi, à chaque moitié de tour, le courant change de sens, c'est ce qu'on appelle la **commutation**.



**Remarque**

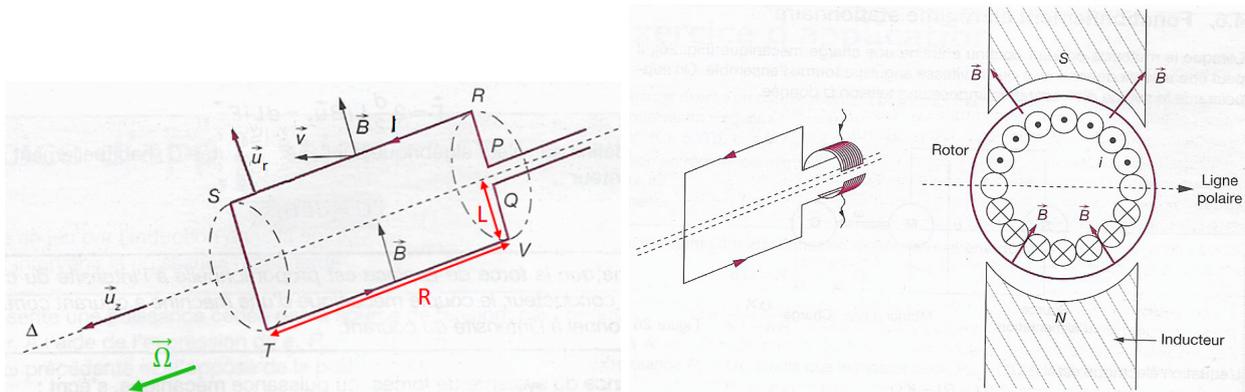
Dans la suite, on s'intéresse au montage à courant d'excitation séparé, c'est-à-dire dans lequel l'inducteur et l'induit sont alimentés séparément. Dans un tel montage, on a

- résistance de l'inducteur élevée
- vitesse stable pour le moteur en charge
- emballement possible si on coupe l'excitation
- couple proportionnel à  $I$
- démarrage à courant élevé
- possibilité de freinage

C'est ce qui est toujours utilisé dans les machines actuelles.

### 3.3 Équations de fonctionnement

#### 3.3.1 Calcul du couple



L'axe de rotation  $\Delta$  est inclus dans le plan d'antisymétrie de  $\vec{B}$ , donc

$$\vec{B}(r, \theta + \pi) = -\vec{B}(r, \theta)$$

Puisque  $\vec{B}$  est radial, les portions du solénoïdes à direction radiale ne subissent pas de force de Laplace. Seules les portions RS et TV la subissent :

$$\begin{cases} \vec{F}_{RS} = i \vec{l} \wedge \vec{B} = iLB\vec{u}_\theta \\ \vec{F}_{TV} = -\vec{F}_{RS} = -iLB\vec{u}_\theta \end{cases} \tag{16}$$

On constate donc ces deux forces se compensent pour donner une résultante des forces nulles. Cependant, on ne peut pas en dire autant pour le couple :

$$\vec{\Gamma} = r\vec{e}_r \wedge \vec{F}_{RS} + r(-\vec{e}_r) \wedge \vec{F}_{TV} = 2rLiB\vec{u}_z \tag{17}$$

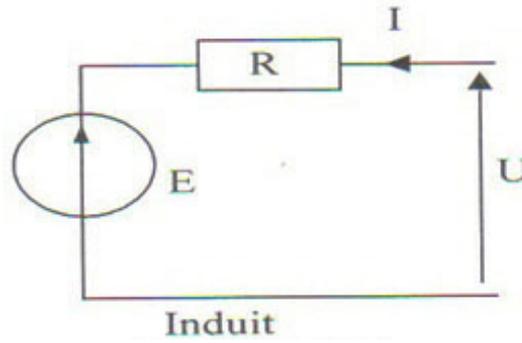
en notant  $r$  le rayon de la spire. On remarque que  $\vec{\Gamma}$  est indépendant de  $\omega$ , ce qui veut dire qu'on peut très bien avoir  $\vec{\Gamma} \neq \vec{0}$  pour  $\omega = 0$ , c'est-à-dire avoir un couple au démarrage!!

On notera  $\vec{\Gamma} = \Phi_0 i \vec{u}_z$  avec  $\Phi_0 = 2rLB$  une constante (flux exprimé en Weber). On a donc directement  $\Gamma \propto i$ , on comprend comment on peut contrôler la rotation du moteur.

On peut être un peu plus réaliste en prenant en compte les frottements au niveau des contacts avec les balais. ces frottements génèrent une force selon  $-\vec{u}_\theta$  et donc un couple  $\vec{\Gamma}_r \parallel -\vec{u}_z$ .

Le couple total est alors  $\vec{\Gamma}_{tot} = \vec{\Gamma} - \vec{\Gamma}_r$ .

### 3.3.2 Calcul de la fem



On note  $U$  la tension de l'induit. On peut faire un bilan de puissances pour l'induit et écrire  $\mathcal{P}_m + \mathcal{P}_e = 0$  avec :

- la puissance mécanique  $\mathcal{P}_m = \vec{\Gamma}_{\text{tot}} \cdot \vec{\omega} = \Phi_0 i \omega - \Gamma_r \omega$ . Par définition de l'effet Joule, on obtient

$$\mathcal{P}_m = -\Phi_0 i \omega - Ri^2$$

- la puissance électrique  $\mathcal{P}_e = Ui$  donc

$$\mathcal{P}_e = (E + Ri)i$$

On identifie alors  $E = \Phi_0 \omega$  et en terme de tension imposée  $U = \Phi_0 \omega + Ri$ . On écrit aussi  $\Gamma_{\text{tot}} = \Phi_0 i - \Gamma_r$ .

En fonctionnement générateur, on a  $U = \Phi_0 \omega - Ri$  et  $\Gamma_{\text{tot}} = \Phi_0 i + \Gamma_r$ .

#### Remarques

Si on néglige  $Ri$ , la vitesse de rotation est alors directement contrôlé par la tension  $U$  appliquée à l'induit.

On remarque également que  $\omega \propto \frac{1}{\Phi_0}$  : **si on éteint l'induit avant l'inducteur, le moteur s'emballe.**

### 3.3.3 Bilan de puissance

La machine absorbe au total la puissance  $Ui$  à l'induit mais également la puissance  $U_e I_e$  à l'inducteur lorsqu'il est bobiné (ce n'est donc pas le cas si l'inducteur est un aimant permanent : il ne consomme alors aucune puissance électrique). Cependant, la puissance  $U_e I_e$  est intégralement dissipée par effet Joule :  $U_e I_e = R_e I_e^2$ . On comprend donc pourquoi l'inducteur ne sert qu'à générer  $\vec{B}$  pour générer un couple.

Au niveau de l'induit,  $Ui = Ei + Ri^2$ . Puisque  $Ri^2$  représente les pertes, la puissance disponible est donc  $Ei = \Gamma \omega$ . Il existe également d'autres types de pertes que l'effet Joule (aussi appelé 'pertes cuivre') : les frottements, les pertes magnétiques dues aux courants de Foucault ('pertes fer' causées hystérésis).

On peut alors calculer le rendement :

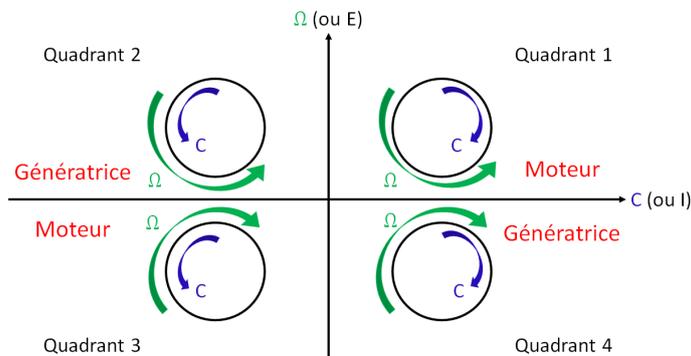
$$\eta = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance électrique absorbée}} = \frac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{\text{fer}} + \mathcal{P}_{\text{frot}} + Ri^2 + R_e I_e^2} \quad (18)$$

#### Ordre de grandeur

Pour un moteur donc l'inducteur est un aimant permanent,  $\mathcal{P}_u = Ui$ . Ainsi, avec  $U = 150$  V,  $i = 40$  A,  $R = 0.3$   $\Omega$ ,  $\omega = 105$  rad/s et  $\mathcal{P}_{\text{fer}} + \mathcal{P}_{\text{frot}} = 200$  W, on obtient un rendement  $\eta = 88.7\%$ .

### 3.4 Moteur ou générateur ?

On a montré que  $\gamma = \Phi_0 i$  et  $\Gamma \omega = E i$ . Ainsi, le signe de  $i$  détermine celui de  $\Gamma$  via la première relation et les signes de  $\Gamma$  et de  $E$  déterminent celui de  $\omega$  via la seconde relation. En fonctionnement moteur,  $E i > 0$  (puissance reçue) et en fonctionnement générateur,  $E i < 0$  (puissance donnée).



- Quadrant 1 :  $E i > 0$  avec  $E > 0$  et  $i > 0$   
 $\Rightarrow C > 0$   
 $\Rightarrow \Gamma > 0$   
 On est en fonctionnement moteur : tout tourne dans le même sens.
- Quadrant 2 :  $E i < 0$  avec  $E > 0$  et  $i < 0$   
 $\Rightarrow C < 0$   
 $\Rightarrow \Gamma < 0$   
 On est en fonctionnement générateur : tout tourne dans des sens opposés.
- Quadrant 3 :  $E i > 0$  avec  $E < 0$  et  $i < 0$   
 $\Rightarrow C > 0$   
 $\Rightarrow \Gamma > 0$   
 On est de nouveau en fonctionnement moteur : tout tourne dans le même sens.
- Quadrant 4 :  $E i < 0$  avec  $E < 0$  et  $i > 0$   
 $\Rightarrow C < 0$   
 $\Rightarrow \Gamma < 0$   
 On est encore une fois en fonctionnement générateur : tout tourne dans des sens opposés.

On voit donc qu'on peut passer de moteur à générateur en jouant sur les signes de  $E$  et  $i$ .

### 3.5 Considérations techniques

Les avantages de cette machine résident dans le fait que la vitesse de rotation est réglable à volonté et que le démarrage est autonome. On l'utilise en tant que moteur dans les voitures par exemple ; et en tant que génératrice pour recharger les batteries.

Elle a cependant quelques inconvénients : elle est difficile à entretenir (démontage complet annuel pour les TGV) et plutôt coûteuses à cause de l'usure des balais (remplacés à chaque aller-retour pour les TGV).

## 4 Machines à courant alternatif

Les moteurs à courant alternatifs ont remplacé, au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, les machines à courant continu, et ce pour deux raisons : la première est leur plus grande simplicité et durabilité, car il n'y a pas de balais pour faire contact entre le rotor et le stator, la deuxième est la plus grande facilité à les contrôler en vitesse, simplement via la fréquence du courant reçu.

### 4.1 Moteurs synchrones

✦ MP35

Inventé par Tesla en 1888, cette belle machine permet elle aussi de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement.

#### 4.1.1 Principe

- Le principe de fonctionnement en mode moteur est le suivant :

Le rotor est un aimant permanent (ou électroaimant d'ailleurs, quand on veut être efficace). Le stator est pour sa part un générateur de champs magnétique tournant. En tournant, le champs va pousser le rotor à s'aligner, le faisant tourner. Le couple généré est

$$\vec{T} = \vec{M} \wedge \vec{B}$$

- Le principe de fonctionnement en mode générateur est le suivant :

Le rotor est toujours un aimant permanent, et le stator est parcouru par des courant induits par la variation de flux dans le bobinage. Grâce à cela, on génère un courant électrique triphasé.

Le rendement d'une telle machine est généralement de l'ordre de 95% !

#### 4.1.2 Champ tournant

La génération de champs tournant se fait comme détaillé dans le ✦ MP35

#### 4.1.3 Discussion pratique

L'avantage de ces machines en moteur réside dans leur grand rendement, et leur vitesse de synchronisation très précise. Cependant, ils nécessitent d'être lancés. Le moteur synchrone a beaucoup été utilisé pour la conception de machines-outil des anciens TGV mais tend à être supplanté par la machine asynchrone. Il est encore utilisé pour des applications de forte puissance (Renault Zoé et Peugeot iOn par exemple) ou de faible puissance (commande de disque dur d'ordinateur).

En générateur cependant, la machine synchrone a de beaux jours devant elle du fait qu'elle génère une tension triphasée de fréquence connue avec une très bonne précision, d'où son nom d'ailleurs.



#### Moteur synchrone



Faire la manip du MP35

#### 4.1.4 Les calculs en mode moteur

On considère que les bobines sont décalées de  $\frac{2\pi}{3}$ , et que les bobinages sont parcourus par des courants de la forme suivante, avec  $\alpha \in \llbracket 0, 2 \rrbracket$

$$i_k(t) = I \cos(\omega t + \alpha \frac{2\pi}{3}) \quad (19)$$

On a alors superposition (#linéarité) de trois champs magnétiques de la forme  $\vec{B}_\alpha = kI \cos(\omega t + \dots) \vec{u}_\alpha$ , ce qui donne un champ résultant

$$\vec{B} = \frac{3kI}{2} (\cos(\omega t) \vec{u}_x + \sin(\omega t) \vec{u}_y) \quad (20)$$

On a alors directement le couple !

#### 4.1.5 Les calculs en mode générateur

Par souci de simplicité nous allons étudier une machine constituées d'un rotor et d'un stator bipolaire. Le champ magnétique tournant engendré par le rotor de la génératrice synchrone, appelée aussi alternateur, est assimilable à celui créé par un aimant permanent en rotation autour de son axe. Le rotor est placé au coeur d'un système de bobinages (stator) dans lesquels apparaissent des f.é.m induites.

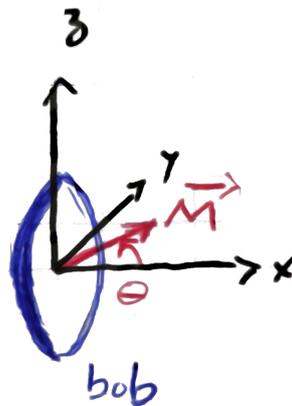


FIGURE 4 – Schématisation du générateur.

On considère un moment magnétique permanent  $\vec{M}$  en rotation autour d'un point fixe  $O$  placé près d'une bobine comportant  $N$  spires, de section  $S$  et d'axe  $O_x$ . Le champ engendré par cette rotation est

$$\vec{B} = B_O \cos(\omega t) \vec{u}_x + B_O \sin(\omega t) \vec{u}_y \quad (21)$$

La f.é.m induite est alors simplement par la loi de Faraday

$$e = \omega N S B_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (22)$$

Et paf, on a un alternateur tout joli tout beau ! Dans le cas d'un alternateur triphasé, on va juste générer un courant triphasé !

## 4.2 Moteurs asynchrones

➤ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_asynchrone](https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone)

La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor.

Comme les autres machines électriques (machine à courant continu, machine synchrone), la machine asynchrone est un convertisseur électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant électrique (ici alternatif) et un dispositif mécanique.

Cette machine est réversible et susceptible de se comporter, selon la source d'énergie, soit en « moteur » soit en « générateur ».

Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts.

Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé, mais de nombreuses méthodes expérimentales existent (onduleur notamment) pour palier à cela.

Elle est aujourd'hui l'instrument de choix pour faire avancer les TGV, les métros parisiens, ou encore pour générer du courant dans les centrales EDF.