

# D9 – CONVERSION DE PUISSANCE ÉLECTROMÉCANIQUE

10 juin 2021

Corentin Naveau & Simon Jeanne

## Niveau : L2

### Prérequis

- Équation de Maxwell
- Induction
- ARQS magnétique

### Expériences

- ☛ Rails de Laplace (qualitatif)
- ☛ Rendement du moteur courant continu

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Les rails de Laplace</b>	<b>2</b>
1.1	Présentation du système . . . . .	2
1.2	Fonctionnement en mode générateur . . . . .	2
1.3	Fonctionnement en mode moteur . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Machine à courant continu</b>	<b>3</b>
2.1	Description du moteur . . . . .	4
2.2	Fonctionnement en mode moteur . . . . .	5
2.3	Fonctionnement en mode génératrice . . . . .	5
2.4	Estimation des rendements . . . . .	5

## Introduction

Aujourd'hui, la très grande majorité de notre production d'énergie fournit une énergie mécanique. En effet, des centrales thermiques aux centrales nucléaires, en passant par les éoliennes ou les barrages hydroélectriques, le principe est globalement le même : on utilise un flux (d'air, d'eau) pour faire tourner une turbine. Seulement, l'énergie mécanique n'est pas simple à transporter. Si on a pu, durant un temps, la transporter mécaniquement via des courroies sur des distances modestes, cette solution est inenvisageable lorsqu'il s'agit de la distribuer à l'échelle d'un pays.

Il a donc fallu trouver des méthodes pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, et vice versa. C'est cette conversion d'énergie que nous allons étudier aujourd'hui.

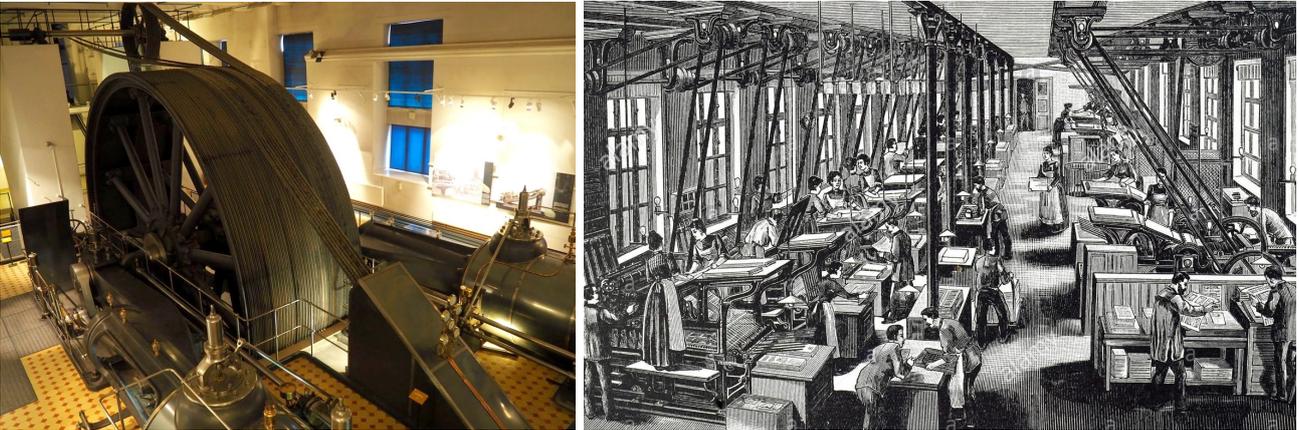


FIGURE 1 – Transmission mécanique de l'énergie

## 1 Les rails de Laplace

Nous avons, lors de la leçon sur l'induction, que les fluctuations d'un champ à travers un circuit entraînent l'apparition d'une force électromotrice sur ce circuit  $e = -\frac{d\phi}{dt}$  (cela découle directement de la version intégrale de l'équation de Maxwell-Faraday).

Nous avons également vu qu'un champ magnétique extérieur exerce sur un circuit une force dite de Laplace :  $d\vec{F}_{LP} = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$  (Force de Lorentz appliquée aux charges en mouvement dans un circuit).

Ce sont ces deux forces qui nous permettent de convertir une puissance mécanique en puissance électrique et vice versa.

### 1.1 Présentation du système

Les rails de Laplace sont constitués de deux rails sur lesquels peut rouler une barre mobile. Les rails et la barre forment un circuit électrique plan. À l'aide d'un aimant permanent, on applique un flux magnétique à travers le circuit. [vidéo](#)

### 1.2 Fonctionnement en mode générateur

En mode générateur, on déplace la barre de largeur  $a$  manuellement. On observe alors l'apparition d'une tension et d'un courant au bornes d'une résistance reliée au circuit.

On applique une force extérieure  $F_{ext}$  sur le rail, ce qui engendre une force électromotrice sur le circuit. Cette dernière engendre à son tour un courant  $I$ . Ce dernier implique une force de Laplace dans le rail, s'opposant à la force extérieure.

L'ensemble des forces s'appliquant sur le rail :

$$m \frac{dv}{dt} = F_{ext} + aIB \quad (1)$$

Équation du circuit électrique :

$$I = \frac{e}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt} = -\frac{aBv}{R} \quad (2)$$

On combine les deux équations et on trouve :

$$\frac{dv}{dt} + \frac{a^2 B^2}{mR} v = \frac{F_{ext}}{m}$$

Ce qui se résout par :

$$v(t) = \frac{RF_{ext}}{a^2 B^2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{a^2 B^2}{mR} t\right) \right) \quad (3)$$

Le temps caractéristique  $\frac{mR}{a^2 B^2}$  vaut 20s pour une barre de 1g, un champ de 1T, une charge de 50Ω et un espacement de 5cm. Après un temps de l'ordre de la minute, on atteint donc un régime permanent. En régime permanent, la puissance utile fournie au circuit est  $P_u = RI^2$  tandis que la puissance fournie  $P_f = F_{ext}v$ . On a donc le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_f} = \frac{RI^2}{F_{ext}v} = \frac{\frac{a^2 B^2 v^2}{R}}{F_{ext}v} = \frac{a^2 B^2}{RF_{ext}} v = 1 \quad (4)$$

En régime permanent, les rails de Laplace permettent une conversion parfaite d'une puissance mécanique vers une puissance électrique.

### 1.3 Fonctionnement en mode moteur

Nous nous plaçons à présent en mode moteur. Nous ajoutons au circuit un générateur de tension  $U$ . Ce courant va engendrer une force de Laplace sur la barre, qui va ainsi se mettre en mouvement. Ce mouvement va engendrer une force électromotrice qui va s'opposer au générateur.

L'ensemble des forces s'appliquant sur le rail :

$$m \frac{dv}{dt} = F_{ext} - aIB \quad (5)$$

Attention, en se plaçant en convention générateur pour le générateur (oui), on a inversé la convention du sens de rotation du courant dans le circuit.

Équation du circuit électrique :

$$U = RI + e = RI - aBv \quad (6)$$

$$I = \frac{U}{R} + \frac{aBv}{R} \quad (7)$$

Remarque : la force électromotrice est en convention réceptrice et non plus génératrice.

On combine les deux équations et on trouve :

$$\frac{dv}{dt} + \frac{a^2 B^2}{mR} v = \frac{F_{ext}}{m} - \frac{aBU}{mR}$$

Comme pour précédemment, on tend vers un régime permanent. On trouve :

$$v_p = \frac{RF_{ext}}{a^2 B^2} - \frac{U}{aB} \quad I_p = \frac{F_{ext}}{aB}$$

Finalement, le rendement en régime permanent,

$$\eta = \frac{-F_{ext}v_p}{UI_p} = 1 - \frac{RF_{ext}}{aBU} \quad (8)$$

Le rendement en régime permanent tend vers 1 si la résistance interne du circuit tend vers 0. Ainsi, l'utilisation des forces électromotrices et de Laplace permettent, dans la limite d'un système idéal, de convertir sans perte de la puissance mécanique et puissance électrique et vice versa.

## 2 Machine à courant continu

On suit le TP électromagnétisme p31 et (surtout) le Jolidon p199.

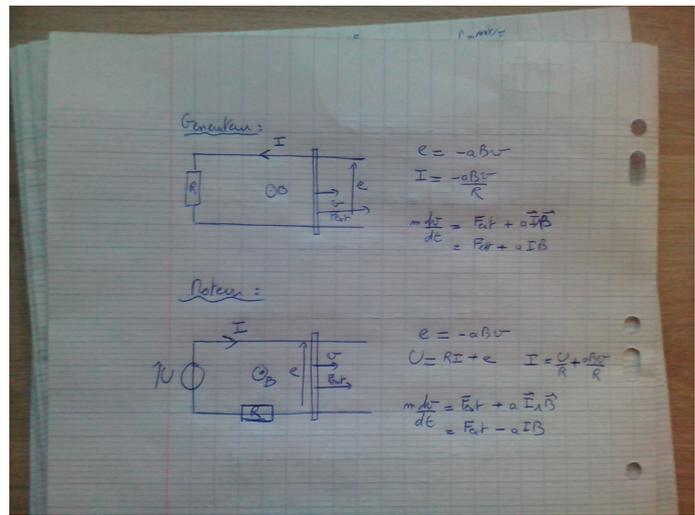


FIGURE 2 – schéma rails Laplace en convention moteur et générateur

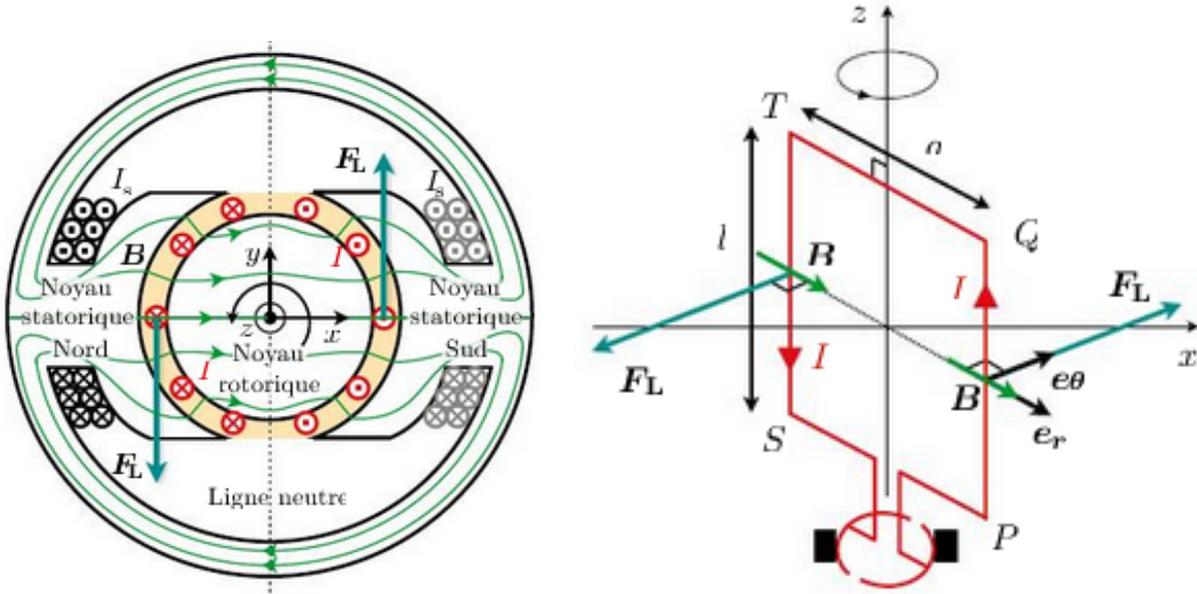


FIGURE 3 – Schéma machine courant continu

### 2.1 Description du moteur

La machine a courant continu est constituée de deux partie principale : la stator (qui est statique) et le rotor (qui rotate bien sur).

Le rôle du stator est de former un champ magnétique constant qui traverse le rotor. Pour les petits moteurs, de faible puissance, on peut utiliser un aimant permanent. Pour des machines plus puissantes, le stator est un électroaimant alimenté par un courant continu.

Le rotor est constitué de plein de circuits électriques parcourus également par un courant continu. Il subit alors des forces de Laplace, qui le mettent en mouvement.

Un système de balais permet de mettre en contact le rotor mobile avec le générateur de courant. Par ailleurs ce système permet de changer le sens du courant dans le circuit tout les 180° (si on ne le fait pas, la moyenne des forces de Laplace sur 360° est bien sur nulle).

On remarquera que la MCC est parfaitement réversible : si on envoie un courant dans le rotor, on obtient un couple moteur (force de Laplace). A l'inverse, si on fait tourner le rotor, on obtient une tension (force électromotrice).

## 2.2 Fonctionnement en mode moteur

Déterminons les équations en fonctionnement moteur. Le couple s'exerçant sur le rotor dû aux forces de Laplace :

$$C_{EM} = kI_m\phi \qquad C = C_{EM} - C_r \qquad (9)$$

Où  $k$  est un facteur dépendant de la géométrie du moteur (au passage,  $k$  est linéaire en le nombre de spires du rotor). Par ailleurs, le mouvement du rotor induit une variation du champ magnétique (passant de  $\phi S$  lorsque la spire fait face au champ à 0 lorsque la spire est de profil) :

$$e = -k\phi\omega \qquad U_r = k\phi\omega + rI_m \qquad (10)$$

## 2.3 Fonctionnement en mode génératrice

En mode génératrice, on fait tourner le rotor dans le champ magnétique, ce qui induit une force électromotrice. Les équations de fonctionnement deviennent :

$$U_g = k\phi\omega - rI_g \qquad C = k\phi I_r + C_r \qquad (11)$$

## 2.4 Estimation des rendements

On mode moteur, le rendement s'exprime :

$$\eta_m = \frac{C\omega}{U_e I_e + U_m I_m} \qquad (12)$$

On mode génératrice, le rendement s'exprime :

$$\eta_g = \frac{U_g I_g}{U_e I_e + C\omega} \qquad (13)$$

On va tracer ces deux rendements en une seule série de mesures. On se place à  $\omega$  fixé (20 tours par seconde). On place une charge (un rhéostat de 100 ohms) en sortie de la génératrice. On va faire varier cette charge, tout en changeant le courant dans le rotor pour se maintenir à vitesse de rotation fixe. On mesure  $U_e$  et  $I_e$ , le courant et tension envoyés dans les deux stators,  $U_m$  et  $I_m$  le courant et la tension envoyés dans le rotor du moteur, le couple produit, et pour finir la tension et l'intensité aux bornes de la génératrice (ça fait beaucoup de multimètres!)

On vérifie que cela correspond bien au rendement prévu par le constructeur :  $C\omega = 250W$  à 1400 tours/minute, ce qui donne un maximum de rendement pour un couple  $C$  de 1.7 N.m

## Conclusion

Aujourd'hui, nous avons comment convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique, et vice versa, grâce à une machine simple : la MCC.

Il existe d'autres machines plus complexes, fonctionnement avec des courants alternatifs (machines synchrones et asynchrones).

Pour ces moteurs, le stator est alimenté en courant alternatif, le champ magnétique n'est plus constant ! Pour la machine asynchrone, il n'y a même plus besoin d'alimenter directement le rotor : les variations du champ magnétique induisent déjà un courant, sur lequel s'exerce ensuite les forces de Laplace. L'intérêt est l'entretien : on a plus besoin de balais qui frottent pour faire le contact, ce qui rend la machine bien plus robuste. Par contre, le rotor ne tourne pas à la même vitesse du champ, il peut donc être compliqué de commander correctement ce type de moteur.

Pour la machine synchrone, nous seulement le champ magnétique tourne, mais en plus on alimente aussi le rotor avec un courant continu. Celui-ci est alors "fixé" par magnétisme sur le champ tournant : la machine est synchrone. On retrouve nos balais (pour alimenter le rotor), mais le contrôle précis de la vitesse de rotation en fait un moteur très apprécié par l'industrie.