

# MP35 - MOTEURS

29 avril 2015

« Ceci n'est pas un montage impasse. »  
RENÉ MAGRITTE

Luc Lauro & Anis Senoussi

## Commentaires du jury

**2014** : Le nouveau montage n'a été choisi par aucun candidat cette année. Il est toutefois maintenu pour la session 2015 compte tenu de la grande richesse et de l'importance industrielle de la physique des moteurs, en particulier des moteurs thermiques.

**2013** : Moteurs électriques et thermodynamiques entrent dans le cadre de ce montage.

*Jusqu'en 2013, le titre était : Conversion de puissance électrique-mécanique.*

**2010, 2013** : Comme pour le montage 21 (Conversion de puissance électrique-électrique, désormais Production et conversion d'énergie électrique.), la notion de point de fonctionnement nominal est importante. D'autre part, les modèles utilisés pour décrire les convertisseurs sont souvent trop simplifiés. Il faut être capable d'interpréter l'écart entre le système idéal et le système réel.

**2012** : Même si l'étude d'un haut-parleur relève du thème, il existe bien d'autres exemples, et souvent d'intérêt industriel (le moteur électrique est à l'ordre du jour). Il convient d'insister sur l'aspect quantitatif de la conversion électrique-mécanique.

**2007** : Un effort pédagogique incluant une approche physique des phénomènes impliqués dans le fonctionnement des moteurs permet d'éviter un montage constitué d'une série de mesures sans logique apparente.

**2005** : Les hacheurs (même sous la forme série, la plus simple) ne sont pas utilisés pour alimenter les moteurs à courant continu.

*Jusqu'en 2004, le titre était : Conversion de puissance (électrique-électrique, électromécanique...).*

**2004** : Ce montage, relativement peu choisi cette année, a donné lieu à des prestations assez pauvres, alors que des matériels d'électrotechnique adéquats sont disponibles. La conversion électrique-électrique semble se limiter, sauf exception, au transformateur et, pire, la conversion électrique-mécanique à de vagues principes. Il y a pourtant dans la collection ce qu'il faut pour des mesures de rendements électromécaniques : sur ce point, il est préférable de bien expliquer les fonctions de chacun des éléments de la chaîne de conversion (ce qui suppose qu'elles sont bien comprises), plutôt que de se contenter d'estimer un rendement global dont l'interprétation ne débouche sur rien de vérifiable. Notons, en remarque technique, qu'il est souhaitable que tous les bancs de manipulations d'électrotechnique soient complets, c'est à dire avec leurs alimentations, hacheurs et systèmes de mesures spécifiques complets ; globalement, sur l'ensemble de la collection, il est vrai qu'il est toujours possible de se débrouiller.

## Bibliographie

- ⚡ *Précis Électrotechnique - Conversion de puissance PSI, Brenders*
- ⚡ *HPrépa, Électronique II, Brébec*
- ⚡ *Dictionnaire de physique expérimentale Électricité et Applications, Quaranta*
- ⚡ *Duffait CAPES, Duffait*
- ⚡ *Poly 2014, De Zotti & Lecompte*

## Expériences

- Diagramme PV moteur de Stirling
- Rendement d'un MCC
- Rendement moteur de Stirling
- Principe et rendement d'un moteur a/synchrone

## Table des matières

<b>1 Moteur thermique : moteur de Stirling</b>	<b>2</b>
1.1 Présentation et diagramme (P,V)	2
1.2 Puissance fournie à une charge	3
<b>2 Moteur électrique</b>	<b>3</b>
2.1 Moteur à courant continu (MCC)	3
2.1.1 Étude électrique	4
2.1.2 Étude mécanique	5
2.1.3 Rendement	5
2.2 Moteur à courant alternatif	5
2.2.1 Moteur synchrone	5
2.2.2 Moteur asynchrone	6

## Introduction

Un moteur est un dispositif permettant de fournir du travail : sur un cycle, le travail donné par le reste de l'univers est négatif. On distingue deux types principaux (il en existe d'autres types) :

- les moteurs thermiques, qui fournissent du travail à partir de chaleur ;
- les moteurs électriques, qui fournissent du travail à partir de forces électromagnétiques.

On va étudier ces deux types : avantages et inconvénients, rendement, applications...

## 1 Moteur thermique : moteur de Stirling

### 1.1 Présentation et diagramme (P,V)

Le moteur de Stirling parcourt le cycle (Figure 1). Ce cycle est composé de quatre étapes :

1. détente isotherme
2. refroidissement isochore
3. compression isotherme
4. chauffage isochore

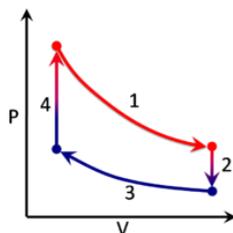


FIGURE 1 – Cycle de Stirling idéal

Le moteur réel est constitué de deux parties : une en contact avec une flamme (source chaude) et l'autre en contact avec des ailettes de refroidissement (source froide) liés par un petit conduit. Le volume total est fixé par un premier piston, un deuxième piston en quadrature assure des échanges de volume entre les deux parties.

Le moteur de Stirling dont nous disposons possède un système de mesure fait maison, comprenant un capteur de pression ainsi qu'un capteur de volume qui est un compteur, et qui nécessite donc de faire un zéro (compteur calibré avec le piston en position basse). Il faut faire attention : le comptage doit s'effectuer dans un sens uniquement (marqué par une flèche sur le moteur). Tout retour en arrière fausse le comptage, et il faut alors refaire le zéro après avoir débranché puis rebranché le moteur.

### Diagramme (P,V) du moteur de Stirling



⊖ 5 min

Le moteur est utilisé ici sans charge. Faire chauffer le moteur en avance. Après quelques minutes, le lancer et s'assurer qu'il tourne bien. Arrêter le moteur. Mettre le piston en position basse. Brancher le moteur : la diode clignote. Faire le zéro en appuyant sur le bouton rouge (avec le piston en position basse). La diode ne clignote plus. Lancer le moteur dans le sens de rotation indiqué.

L'acquisition est faite via LatisPro (0.5 s). On exporte les tensions représentant pression et volume sur Régressi. On fait la conversion en unité de pression et volume grâce aux données de la fiche technique. On calcule le travail sur un cycle via la fonction AIRE (après vérification, cette fonction permet bien de calculer l'aire et ce sur UN cycle uniquement). La puissance s'obtient en utilisant la durée d'un cycle mesurée sur LatisPro :

$$P = \frac{W_{cycle}}{T_{cycle}} =$$



FIGURE 2 – Cycle du moteur de Stirling réel

## 1.2 Puissance fournie à une charge

On ne peut pas mesurer le rendement du moteur car on n'a pas accès aux sources froides et chaudes. Pour l'évaluer, on va supposer que  $Q_c$  est à peu près constant, dans ce cas, le rendement évolue comme la puissance fournie par le moteur :

$$P = \frac{U^2}{R} = C\omega$$

### Puissance fournie à une charge



⊖ 5 min

On relie le moteur à la génératrice que l'on fait débiter sur une boîte à décade. On trace  $P(C)$ . Le maximum est obtenu pour :

$$\begin{cases} P_m = \\ C_m = \end{cases}$$

Les moteurs thermiques présentent une grande flexibilité (autonomie par exemple) mais possèdent un rendement faible, du fait de la limite de Carnot en particulier, et sont polluants qui plus est.

## 2 Moteur électrique

### Rails de Laplace

On illustre le couplage électromécanique dans les deux sens.

Nous allons présenter des moteurs électriques qui fonctionnent sur ce principe. Pour réaliser de tels moteurs on a donc besoin :

- d'un champ magnétique, créé par un aimant permanent ou par induction (dans un matériau ferromagnétique) ;
- d'un courant, soit continu (MCC), soit alternatif (machines synchrone et asynchrone).

### 2.1 Moteur à courant continu (MCC)

Le moteur à courant continu est constitué (Figure 3) par :

- un stator, fixe, dans lequel on fait passer un courant  $I_e$  dans des bobinages pour créer un champ  $\vec{B}$  radial ;
- un rotor, en rotation, dans lequel on fait passer un courant  $I$  ce qui le met en rotation par le champ magnétique ;
- un collecteur, constitué par des balais qui permettent de changer le sens du courant à chaque demi-tour pour garder le même sens de rotation.

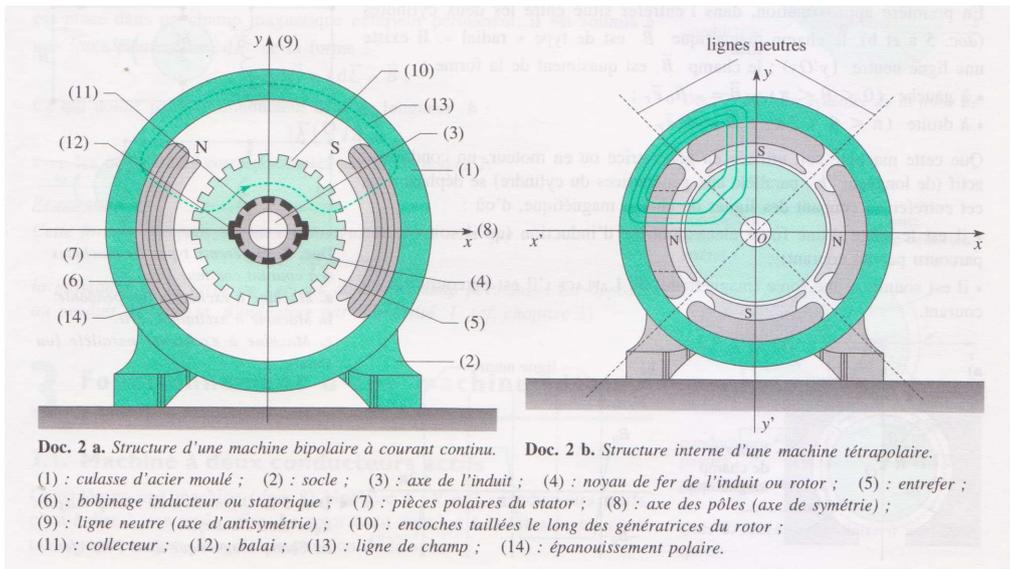


FIGURE 3 – Schéma d'une machine à courant continu

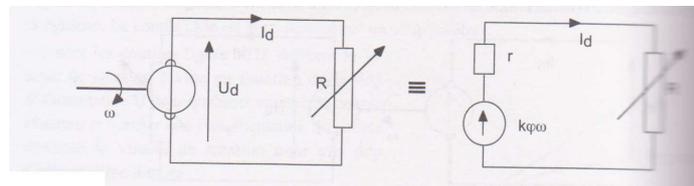


FIGURE 4 – Schéma équivalent MCC

Le schéma équivalent de la MCC est (Figure 4) :  
 À l'équilibre électrique et mécanique :

$$\begin{cases} U = E + rI = k\phi\Omega + rI \\ \Gamma = k\phi I - \Gamma_r \end{cases}$$

### 2.1.1 Étude électrique

#### Étude électrique du MCC



⊖ 15 min

- Alimenter l'inducteur du moteur avec  $U_e = 110V$  – mesurer également  $I_e$  ;
- Mettre un rhéostat en série avec l'induit avant de l'alimenter avec la tension  $U$ , puis court-circuiter le rhéostat une fois le moteur en marche – on évite ainsi une trop forte intensité au démarrage qui pourrait endommager le moteur (puisque à  $\Omega$  nul au démarrage,  $U = rI$  avec  $r$  petit si pas de rhéostat) ;
- On mesure  $I$  (ampèremètre sur l'induit) et  $\Omega$  (via le fréquencemètre en tours par minute pour plus de précision) pour différentes valeurs de  $U$ . On fait les mesures sans charge (pas de résistance de charge sur la dynamo) dans cette partie. On prend également d'autres séries de mesure pour  $U_e = 60V$  puis  $80V$  par exemple.

On modélise  $U/I = f(\Omega/I)$  (à  $U_e$  fixé) par :  $U/I = k\phi\Omega/I + r$ , et on trouve :

$$\begin{cases} k\phi = \\ r = \end{cases}$$

On peut également tracer  $k\phi = f(I_e)$  pour les différentes valeurs de  $U_e$  pour constater la saturation en flux (courbe de saturation du matériau ferromagnétique) :

### 2.1.2 Étude mécanique



#### Étude mécanique du MCC



⊖ 5 min

On travaille cette fois-ci avec une résistance de charge dans le circuit "générateur", dont on alimente l'inducteur. Le rotor étant en mouvement dans le champ magnétique de la génératrice, un courant va s'établir dans son induit. La résistance en série avec l'induit dissipe de l'énergie, et va représenter un couple supplémentaire au couple résistant présent dans le circuit sans charge. On fixe  $U_e$  et  $U$  aux valeurs nominales (110 V), on mesure le couple  $C$  via le couplemètre et l'intensité  $I$  pour différentes valeurs de la résistance de charge.

Remarque : On mesure aussi  $I_e$  et  $\Omega$  pour la suite.

On modélise  $C = f(I)$  par :  $C = k\phi \times I - C_r$ , et on trouve (Figure ??) :

$$\begin{cases} k\phi = \\ C_r = \end{cases}$$

### 2.1.3 Rendement

Le rendement est défini comme le rapport de la puissance mécanique récupérée et de la puissance électrique fournie :

$$\eta = \frac{C\omega}{UI + U_e I_e}$$

On représente l'évolution du rendement en fonction de la puissance utile prenant en compte :

- les pertes Joule dans l'induit  $P_{joule,induit} = rI^2$  ;
- les pertes Joule dans l'inducteur  $P_{joule,inducteur} = r_e I_e^2$  ;
- les pertes par frottement mécanique dues au couple résistant  $P_{frottements} = C_r \Omega$ .

$$P_u = UI + U_e I_e - rI^2 - r_e I_e^2 - C_r \Omega$$

On trace  $\eta = f(P_u)$  et on observe la limitation du rendement à forte puissance utile due aux pertes Joule principalement. On compare le rendement maximal obtenu à un ordre de grandeur du rendement du Stirling.

En traçant  $\eta = f(C)$ , on peut également remonter au couple nominal.

$$C_n =$$

Les principaux avantages du moteur à courant continu sont la commande facile de la vitesse angulaire (par  $U$ ), l'adaptation à la charge. Le problème est que le collecteur est fragile.

Il est utilisé en faible puissance dans de nombreuses petites applications (démarreur d'automobiles, essuies-glace, outillage), mais aussi parfois en fortes puissances (locomotives, TGV jusqu'aux années 1980).

## 2.2 Moteur à courant alternatif

Ils sont basés sur la création d'un champ magnétique tournant, et l'interaction de ce dernier avec un moment magnétique, générant un couple :

$$\vec{\Gamma} = \vec{M} \times \vec{B}$$

On distingue deux types de moteurs :

- Moteurs synchrones : les moments magnétiques sont permanents (ou induit séparément) ;
- Moteurs asynchrones : les moments magnétiques sont induits par le champ tournant.

On va se contenter de décrire qualitativement le principe de ces deux moteurs.

### 2.2.1 Moteur synchrone

L'aimant de moment magnétique  $\vec{M}$  ne va être en équilibre que s'il tourne à la même vitesse angulaire que le champ magnétique. Pour cela, il nécessite d'être lancé initialement pour accrocher au champ, sauf si, comme ici, on commence avec un champ tournant à faible fréquence.



### Principe d'un moteur synchrone



⊖ 5 min

On illustre le principe avec un champ tournant créé par trois bobines (40 mH) munies de noyaux de matériau ferromagnétique, dans lequel on place l'aiguille de boussole. On alimente les bobines en triphasé (montage étoile avec onduleur), en mettant en série des rhéostats afin de ne pas dépasser l'intensité maximale des bobines.

L'avantage résulte dans le grand rendement de ces moteurs, et d'une vitesse de synchronisation très précise. Cependant, il nécessite d'être lancé. 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).

## 2.2.2 Moteur asynchrone

Le moment est induit par les courants de Foucault, d'après la loi de Lenz, l'objet va s'opposer à la variation de flux magnétique en se mettant à tourner dans le même sens. On a alors  $\omega$  qui tend vers  $\omega_0$ , mais l'objet n'atteindra jamais cette vitesse à cause des frottements.



### Principe d'un moteur asynchrone



⊖ 5 min

On peut illustrer la cage d'écureuil (même montage).

Il permet d'obtenir des vitesses assez élevées, n'a pas besoin d'être lancé initialement, mais il est difficile d'avoir une vitesse de rotation précise. Il est de plus en plus utilisée grâce au développement de l'électronique de puissance (TGV récents, machines-outils, propulsion des navires...).

## Conclusion

Les moteurs ont une importance considérable dans la société moderne, il faut choisir le type de moteurs approprié en fonction de la tâche à réaliser, des contraintes économiques, écologiques... De plus, la plupart des moteurs sont réversibles, on peut les faire fonctionner en génératrice et produire ainsi de l'énergie électrique (barrages, éolienne).