

# MP35 - Moteurs

Cléments (COLLÉAUX et DE LA SALLE)

13 mai 2020

Niveau : L3

## Bibliographie

- ↗ *Thermodynamique*, Pérez → Stirling p.182
- ↗ *BUP 864* → Stirling p.663-687
- ↗ *Notice du moteur de STIRLING* →
- ↗ P103.49/2 *BUP 846* → Principes et applications de moteurs électriques
- ↗ *LP20* → Pour plus de biblio sur la MCC
- ↗ *Quaranta IV* → À "moteur à courant continu"

## Prérequis

➤

## Expériences

☞

## Table des matières

Table des matières	1
<b>1 Moteur thermique : moteur de STIRLING</b>	<b>2</b>
1.1 Étude à vide . . . . .	2
1.2 En charge . . . . .	4
<b>2 Moteur électrique : machine à courant continu</b>	<b>4</b>
2.1 Caractéristiques du moteur . . . . .	4
2.2 Rendement . . . . .	6

## Introduction

### 1 Moteur thermique : moteur de STIRLING

J'ai laissé pas mal de pistes mais il est évident qu'on ne pourra pas tout faire... Sans doute que le mieux serait de tracer le cycle à vide et de calculer le rendement en charge pour trouver le fonctionnement nominal du moteur.

Au niveau industriel, le moteur de STIRLING est utilisé dans de nombreux systèmes : satellite, groupe électrogène... Il présente l'avantage d'être relativement silencieux et non-polluant car le gaz évolue en système fermé (contrairement au moteur Diesel). En revanche, du fait de la grande inertie thermique des éléments, il résiste mal aux changements de couple et n'est donc pas adapté à la conception de véhicules.

Pour le principe, voir dans la biblio ↗ *Pérez p.182* .

#### 1.1 Étude à vide

##### Expérience : Étude à vide du moteur de STIRLING

↗ Fascicule EM

⌚ 5 min

Utiliser le moteur de Stirling P103.49/2. Retirer la courroie qui relie le disque du moteur à sa génératrice si elle est installée. Relier le boîtier d'interface au moteur avec le cordon de liaison, puis alimenter le boîtier avec le cordon secteur, la diode clignote. Relier les tensions  $U_P$  et  $U_V$  à une carte d'acquisition. Remplir le brûleur d'éthanol, puis attendre quelques instants que le liquide monte dans la mèche par capillarité. Allumer la mèche avec un briquet P101.39 ou une allumette. Placer le brûleur sous l'extrémité droite du moteur pour former la source chaude. Après quelques minutes de chauffage, tourner le disque de façon à placer le piston vertical dans sa position basse. Appuyer sur le bouton rouge pour initialiser le boîtier d'interface, la diode s'arrête de clignoter.

**À partir de cet instant, ne toucher plus au disque à part pour lancer le moteur. Si vous faites tourner le disque dans le sens inverse de celui indiqué par la flèche, il faudra recommencer l'initialisation en débranchant l'alimentation du boîtier.**

Lancer le moteur dans le sens indiqué par la flèche avec un mouvement rapide de la main sur le disque. Si la source est assez chaude et le lancement assez rapide, le moteur démarre. Si ce n'est pas le cas, laisser chauffer plus longtemps puis recommencer l'initialisation en débranchant l'alimentation du boîtier. Acquérir les tensions  $U_P$  et  $U_V$  sur quelques cycles sous Latis-Pro. Utiliser la Feuille de Calcul pour remonter à  $P$  et  $V$  (cf. conversion suivante). Mesurer la période des cycles  $T_{\text{cycle}}$  (de l'ordre de 0,1s), puis tracer le diagramme  $(P, V)$  du moteur. Une fois les mesures effectuées, éteindre le brûleur et arrêter le moteur.

#### Conversion

Dans la notice du moteur P103.49/2, on peut lire les conversions suivantes (tensions en V, volume en  $\text{cm}^3$  et pression en hPa) :

$$U_V = \frac{5}{44 - 32} (V - 32) = 0.417V - 13.33$$

$$U_P = 5.0 \cdot 10^{-3} (P - P_0) + \text{cste}$$

La constante est à déterminer à  $P = P_0$ . Pour la pression, on donne la valeur après

le gain de 114, mais peut-être qu'il faudra tout diviser par 114... Globalement, bien vérifier dans la vraie notice!

### Expérience : Aire du cycle

🔗 Fascicule

⌚ 5 min

Le diagramme (  $P, V$  ) réel du moteur est assez éloigné du cycle de Stirling théorique. On peut remonter au travail  $W$  fourni par le moteur au cours d'un cycle en mesurant l'aire balayée par son diagramme (  $P, V$  ). Latis-Pro n'ayant pas de fonction permettant de calculer une aire, on exportera les données sous Régressi.

**Exporter les données de  $P$  et  $V$  dans un fichier au format txt (Menu Fichier/Exportation). Ouvrir le fichier sous Régressi. Dans l'onglet Expression, calculer le travail avec la formule :  $W = \text{aire}(P, V)$  En déduire la puissance du moteur à vide  $P_{\text{vide}} = W/T_{\text{cycle}}$  ( de l'ordre de 1W)**

Attention, Regressi donne l'aire d'un cycle... Pour remonter à la puissance, il faut donc connaître le nombre de cycles parcourus!

### Arrêt du moteur

Après quelques dizaines de minutes de fonctionnement, il est normal que le moteur ralentisse puis s'arrête. Cela est dû à la diffusion progressive de la chaleur depuis la source chaude jusqu'à la source froide. Lorsque la différence de température devient trop faible, le moteur s'arrête, et il faut alors attendre qu'il refroidisse pour le relancer. On peut placer un petit bœcher contenant de la glace sur la partie gauche du moteur pour le refroidir plus vite

### Expérience : Rendement du moteur

🔗 Fascicule

⌚ 5 min

Le rendement  $\eta$  du moteur est défini comme le rapport de sa puissance en sortie  $P_{\text{vide}}$  sur la puissance fournie par la combustion de l'éthanol  $P_c$ . Nous pouvons l'estimer en ordre de grandeur. On rappelle que la combustion d'une masse  $m$  d'éthanol durant un temps  $\tau$  fournit une puissance :

$$P_c = \frac{m\Delta_c H_{\text{eth}}}{\tau}$$

avec  $\Delta_c H_{\text{eth}} \approx 29,8 \text{ kJ/g}$  l'enthalpie massique de combustion de l'éthanol.

Lorsque le brûleur est froid, le remplir d'éthanol, puis mesurer sa masse avec une balance de précision. Allumer le brûleur pendant un temps  $\tau$  de quelques minutes, puis le peser à nouveau. La différence de masse  $m$  permet de remonter à la puissance  $P_c$  fournie par la combustion (de l'ordre de 100W), on estime alors le rendement du moteur  $\eta = P_{\text{vide}} / P_c$  Le rendement théorique maximal d'un moteur de Stirling est donné par le rendement de Carnot :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

avec  $T_f$  et  $T_c$  les températures des sources froide et chaude. La température d'une flamme d'éthanol étant de l'ordre de  $1000^\circ\text{C}$  et en considérant que la source froide est à température ambiante, on obtient un rendement de Carnot  $\eta_C$  proche de 1

Le rendement obtenu en pratique est bien inférieur car la majorité de l'énergie fournie par la combustion est dissipée dans le milieu ambiant, la source chaude n'est pas non plus à la température

de la flamme. Ce moteur n'a pas pour but d'avoir un bon rendement, c'est un moteur pédagogique.

## 1.2 En charge

On relie le moteur à la génératrice, que l'on charge avec une résistance variable.

### Expérience : Moteur chargé

🔗 Fascicule

⌚ 5 min

Relier le disque du moteur à la génératrice avec la courroie en caoutchouc. Placer l'interrupteur sur la position générateur, et dévisser la petite ampoule. Allumer le bruleur, faire chauffer le moteur plusieurs minutes, puis le lancer. Lorsque le moteur tourne, brancher sur la sortie Output de la génératrice une résistance à décade P56.14 (initialement réglée sur  $1k\Omega$ ) en série avec un ampèremètre. Pour différentes résistances  $R$ , mesurer l'intensité  $I$  tout en veillant à ne pas dépasser pas 80 mA, et mesurer  $\omega$  en reliant la tension correspondante à  $P$  ou  $V$  à un multimètre en mode fréquencemètre. Représenter la puissance utile  $P_u = RI^2$  fournie par le moteur en fonction de la charge  $R$  ou de la vitesse  $\omega$ . On obtient une courbe en cloche, dont le maximum correspond au fonctionnement nominal du moteur

## 2 Moteur électrique : machine à courant continu

🔗 Quaranta IV p.277

Pour le principe, voir 🔗 LP20 ... Ici on utilisera les mêmes notations mais le flux effectif  $\phi_0$  sera précédé d'un facteur  $k$ , caractéristique de la géométrie de la machine, et nécessaire pour traduire la machine réelle. Les grandeurs seront indicées  $m$  pour le fonctionnement moteur et  $g$  pour le fonctionnement génératrice. Les équations électromécanique s'écrivent donc

$$\text{Moteur} \begin{cases} U_m = k\phi_m\Omega + R_m I_m \\ C = k\phi_m I_m - C_r \end{cases} \quad \text{Génératrice} \begin{cases} U_g = k\phi_g\Omega - R_g I_g \\ C = k\phi_g I_g + C_r \end{cases}$$

Globalement les formes sont les mêmes mais faut juste retenir que les signes changent juste pour faire chier : le couple résistant diminue le couple produit en fonctionnement moteur et la résistance électrique diminue la tension délivrée en fonctionnement génératrice.

Globalement, les flux effectifs dépendent principalement de l'intensité parcourant l'inducteur.

### But

Le but sera de retrouver les deux lois du moteur et d'en extraire les caractéristiques :

- étude électrique donne  $k\phi_m$  et  $R_m$
- étude mécanique donne  $k\phi_m$  et  $C_r$

On ne cherchera pas à caractériser la génératrice (puisque l'on est dans un montage "moteurs"). Cependant, on sera amenés à l'utiliser pour l'étude mécanique.

## 2.1 Caractéristiques du moteur

Les rhéostats ont des limites de courant à respecter!!!

### Expérience : Étude électrique

⚡ Quaranta IV

⌚ 10 min

Alimenter l'inducteur à  $U_e = 110\text{ V}$  avec une alimentation Langlois 0.44 réglée en DC avec disjoncteur relevé. Mesurer  $U_e$  et  $I_e$  avec un voltmètre et un ampèremètre. Alimenter ensuite l'induit avec une autre alim P0.44 et insérer un rhéostat dans le circuit, mesurer  $I_m$  et  $U_m$  dans l'induit.

Faire varier la tension de l'induit (toujours inférieure à 110V) et relever  $U_m, I_m, \Omega$  (la vitesse de rotation s'obtient avec le tachymètre, qui est une petite génératrice donc en vrai on charge légèrement la machine...). Tracer  $U_m/I_m$  en fonction de  $\Omega/I_m$  et remonter aux coefficients  $k\phi_m$  et  $R$  de la machine.

### Démarrage et arrêt

Si l'induit est alimenté, alors l'inducteur doit l'être aussi! En effet imaginons qu'on coupe  $U_e$  alors  $\phi \rightarrow 0$  donc à vide  $U_m = \phi\Omega = \text{cste} \implies \Omega \rightarrow +\infty$ . De même il faut commencer par charger ( $10\ \Omega$ ) la machine puis une fois lancée, on réduit la résistance et on la court-circuite : si on se place à vide dès le démarrage,  $\Omega = 0 \implies I_m = U_m/R_m \rightarrow +\infty$ .

### Cycle d'hystérésis

La valeur de  $\phi_m$  est déterminée par  $I_e$  et donc  $U_e$  à cause des propriétés ferromagnétiques du stator. On peut retrouver le cycle d'hystérésis de ce dernier en répétant plusieurs fois ces mesures pour différents  $U_e$  et en traçant  $k\phi_m$  en fonction de  $U_e$ . On observe notamment la saturation du flux effectif.

On va modéliser la charge non pas par un couple résistant, mais en reliant au moteur précédemment étudié la génératrice que l'on charge par une résistance (cf. ⚡ LP20 pour les circuits équivalents).

### Expérience : Étude mécanique

⚡ Quaranta IV

⌚ 10 min

Alimenter les deux inducteurs (moteur et génératrice) en parallèle à 110V. Alimenter l'induit du moteur avec 60 V, lancer la machine comme expliqué précédemment. Brancher alors un rhéostat de  $100\ \Omega$  à l'induit de la génératrice et constater un ralentissement.

Diminuer la charge augmente le courant dans l'induit de la génératrice  $I_g$  et donc augmente le freinage par induction.

Pour plusieurs valeurs de  $R$ , toujours ajuster la tension de l'induit du moteur pour se ramener à  $U_m = 60\text{ V}$  (afin d'être à  $\phi_m = \text{cste}$ ). Mesurer alors  $C$  (via le couplemètre) et  $I_m$  et tracer  $C$  en fonction de  $I_m$  et retrouver les grandeurs mécaniques  $k\phi_m$  et  $C_r$  (de l'ordre de  $0.1\text{ N}\cdot\text{m}$ ). On peut comparer  $k\phi_m$  à la valeur précédemment obtenue.

## Variante

On a mené l'étude à  $U_m$  constante mais il est possible de le faire à  $\Omega$  constante ou encore  $C$  constant, toujours en ajustant  $U_m$  après chaque changement de  $R$ .

## 2.2 Rendement

Le rendement se définit ici (pour le moteur uniquement) comme

$$\eta_m = \frac{\mathcal{P}_{utile}}{\mathcal{P}_{tot}} = \frac{C\omega}{U_m U_m + U_e I_e}$$

### Expérience : Rendement et fonctionnement nominal

🔧 Quaranta IV

⌚ 5 min

Tracer l'évolution de  $\eta_m$  en fonction de  $C$  (ou  $\Omega$ ). On obtient une courbe en cloche dont le maximum nous donne le fonctionnement nominal. Donner les valeurs nominales de  $C$ ,  $\Omega$ ,  $\mathcal{P}_{utile}$  et  $\eta_m$ .

## Questions

Pourquoi utiliser du 110V pour vos inducteurs ? Valeurs nominales

Moteur de Stirling : qu'est-ce qui permet de dire que les étapes sont celles citées (compression isotherme, chauffage isochore...) ? Écarts au cycle idéal ? Comment le voir sur le cycle ? Tracer le diagramme  $T-V$  c'est pas bien car cela devrait être un rectangle

Quelle est la source de travail d'un moteur thermique ? Les forces de pression

Qu'est-ce que la chaleur ? un transfert d'énergie sous forme microscopique

Stirling : Capteurs de pression et de volumes comment ça marche ? Pression = jauge de contrainte avec un effet piézoélectrique (compression=électricité)  
Volume = capteur de position

Stirling : Incertitudes sur l'aire ? Remarque : le travail peut varier du simple au double selon le temps pendant lequel on a laissé la flamme en dessous. On peut prendre un bûcher de glace pour pouvoir le refroidir. C'est bien de le proposer en charge car pas fait souvent.

MCC : Quelles sont les différentes façons de faire fonctionner la MCC en génératrice ? en shunt ou à excitation séparée

MCC : Comment distinguer à vue d'oeil si c'est un moteur asynchrone ou une MCC au vu du bobinage ?

MCC : Comment fonctionne le couple-mètre ?

MCC : Comment fonctionne le tachymètre ? Roue avec surface réfléchissante, laser qui est réfléchi dessus avec un compteur.

MCC : Comment est produit le champ B ?

MCC : Qu'est-ce que ça change si les bobinages du stator et du rotor du moteur à courant continu sont alimentés en série/parallèle ?

MCC : Vous dites qu'en faisant un essai en moteur à vide vous évaluez les pertes constantes, à quoi sont-elles dues ? Quels paramètres faut-il fixer pour qu'elles soient constantes ?

MCC : Principe de fonctionnement de la machine à courant continu ?

MCC :  $E = K\phi\omega$  et  $C = K\phi I$ , pourquoi même  $K$  ?

MCC : A quoi ressemble le champ magnétique dans le moteur ? Radial dans l'entrefer, après il y a déviation à cause de la différence de perméabilité magnétique.

MCC : De quel matériau est faite la structure ? Fer ou Ferri pour limiter les courants de Foucault, matériau feuilleté. Rotor et Stator en fer doux, ce qui limite les pertes par hystérésis

MCC : D'où vient le couple résistant  $C_r$  ? Frottements (qu'on peut éliminer en lubrifiant), la charge du ventilateur utilisé pour limiter la chauffe due aux pertes joules.

MCC :  $K\phi$  sur un vrai moteur, on le maximise ? Oui, pour ça on diminue l'entrefer

MCC : Sous quelle tension marche le métro de Lyon ? La SNCF ? 750 V pour le métro (MCC toujours utilisée) et 1500V pour la sncf (machines synchrones et asynchrones)

MCC :  $K\phi$  : tu as trouvé un écart suivant la mesure que tu fais, pourquoi ?

MCC : Peut-on dépasser les valeurs nominales ? Dépend pendant combien de temps on dépasse les valeurs nominales.

MCC : pour le calcul de rendement, quels termes ont les incertitudes prédominantes ? Si on fait la manip en 1 fois, il y a juste à mesurer  $\omega$  et  $I_m$ . L'incertitude sur la tension est négligeable

MCC : Que faire pour limiter les pertes Joule ? Matériau supra : pas rentable

MCC : Mettre en évidence l'induit et l'inducteur sur le schéma. Où sont-ils sur la machine ?

**Pour le moteur asynchrone, vous alimentez l'induit ou l'inducteur en triphasé ?**

**Principe du moteur asynchrone ? Pourquoi « asynchrone » ?**

**Peut-on imaginer un moteur synchrone ? Différences ?**

MCC : Quelles sont les différentes façons de faire fonctionner la MCC en génératrice ? en shunt ou à excitation séparée

MCC : Comment distinguer à vue d'oeil si c'est un moteur asynchrone ou une MCC au vu du bobinage ? En théorie, MCC avec 1 paire de bobines et asynchrone avec 2 ou 3 paires

MCC : Comment fonctionne le couple-mètre ? Jauge de contrainte (résistance qui change suivant la contrainte appliquée = piézorésistance) ou piézoélectrique (tension proportionnelle à la force appliquée)

MCC : Comment fonctionne le tachymètre ? Roue avec surface réfléchissante, laser qui est réfléchi dessus avec un compteur mais plutôt petite génératrice car vitesse de rotation proportionnelle à la tension induite.

MCC : Comment est produit le champ B ? Bobinages + courant continu

MCC : Qu'est-ce que ça change si les bobinages du stator et du rotor du moteur à courant continu sont alimentés en serie/parallèle ?

MCC : Vous dites qu'en faisant un essai en moteur à vide vous évaluez les pertes constantes, à quoi sont-elles dues ? Quels paramètres faut-il fixer pour qu'elles soient constante ?

MCC : Principe de fonctionnement de la machine à courant continu ?

MCC :  $E = K\phi\omega$  et  $C = K\phi I$ , pourquoi même K ?  $\phi$  = flux magnétique créé par l'inducteur, K car on ne récupère pas tout le flux (dépend de la géométrie...), même K car E obtenue à partir de C grâce à la conversion électromécanique ( $P_m = P_e$  avec  $P_e = EI$  et  $P_m = C\omega$ )

MCC : A quoi ressemble le champ magnétique dans le moteur ? Radial dans l'entrefer, après il y a déviation à cause de la différence de perméabilité magnétique.

MCC : De que matériau est fait la structure ? Ferro ou Ferri pour limiter les courants de Foucault, matériau feuilleté. Rotor et Stator en fer doux, ce qui limite les pertes par hystérésis

MCC : D'où vient le couple résistant  $C_r$  ? Frottements (qu'on peut éliminer en lubrifiant), la charge du ventilateur utilisé pour limiter la chauffe due aux pertes joules.

MCC : K $\phi$  sur un vrai moteur, on le maximise ? Oui, pour ça on diminue l'entrefer

MCC : Sous quelle tension marche le métro de Lyon ? La SNCF ? 750 V pour le métro (MCC toujours utilisée) et 1500V pour la sncf (machines synchrones et asynchrones)

MCC : K $\phi$  : tu as trouvé un écart suivant la mesure que tu fais, pourquoi ?

MCC : Peut-on dépasser les valeur nominale ? Dépend pendant combien de temps on dépasse les valeurs nominales.

MCC : pour le calcul de rendement, quels termes ont les incertitudes prédominantes ? Si on fait la manip en 1 fois ,il y a juste à mesurer  $\omega$  et  $I_m$ . L'incertitude sur la tension est négligeable

MCC : Que faire pour limiter les pertes Joule ? Matériau supra : pas rentable

Comment fonctionne un alternateur ? Champ tournant (machine asynchrone à l'envers)

MCC : comment retrouve-t-on les équations de fonctionnement ?