

MP35 - Moteurs

Gauthier Legrand et Francis Pagaud

2 avril 2020

Bibliographie

- ♣ *Physique expérimentale*, **Jolidon** → expérience
- ♣ http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=15619, **BUP 864**, **Alain Caillate** → Moteur de Stirling
- ♣ *Thermodynamique*, **Pérez** → Moteur de Stirling
- ♣ <http://materiel-physique.ens-lyon.fr/BDD/job/BDD/Notices/N103-049.pdf>, **Capitaine** → Stirling
- ♣ https://users.la1.in2p3.fr/puzo/thermo/cours_thermo.pdf → Cours de thermo : regarder page 187 pour d'autres types de cycles des moteurs thermiques

Expériences



Problématique : Convertir efficacement une source d'énergie en énergie mécanique.

Table des matières

1	Source thermique : le moteur de Stirling	3
1.1	Présentation	3
1.2	Étude à vide	3
1.3	Rendement	3
1.4	Étude en charge	4
2	Moteur électrique : la MCC	5
2.1	Présentation qualitative	5
2.2	Fonctionnement à vide	5
2.3	En présence d'une charge	6

3 Principe du moteur synchrone (Bonus)	7
4 Commentaire prépa oral	7
5 Questions	7

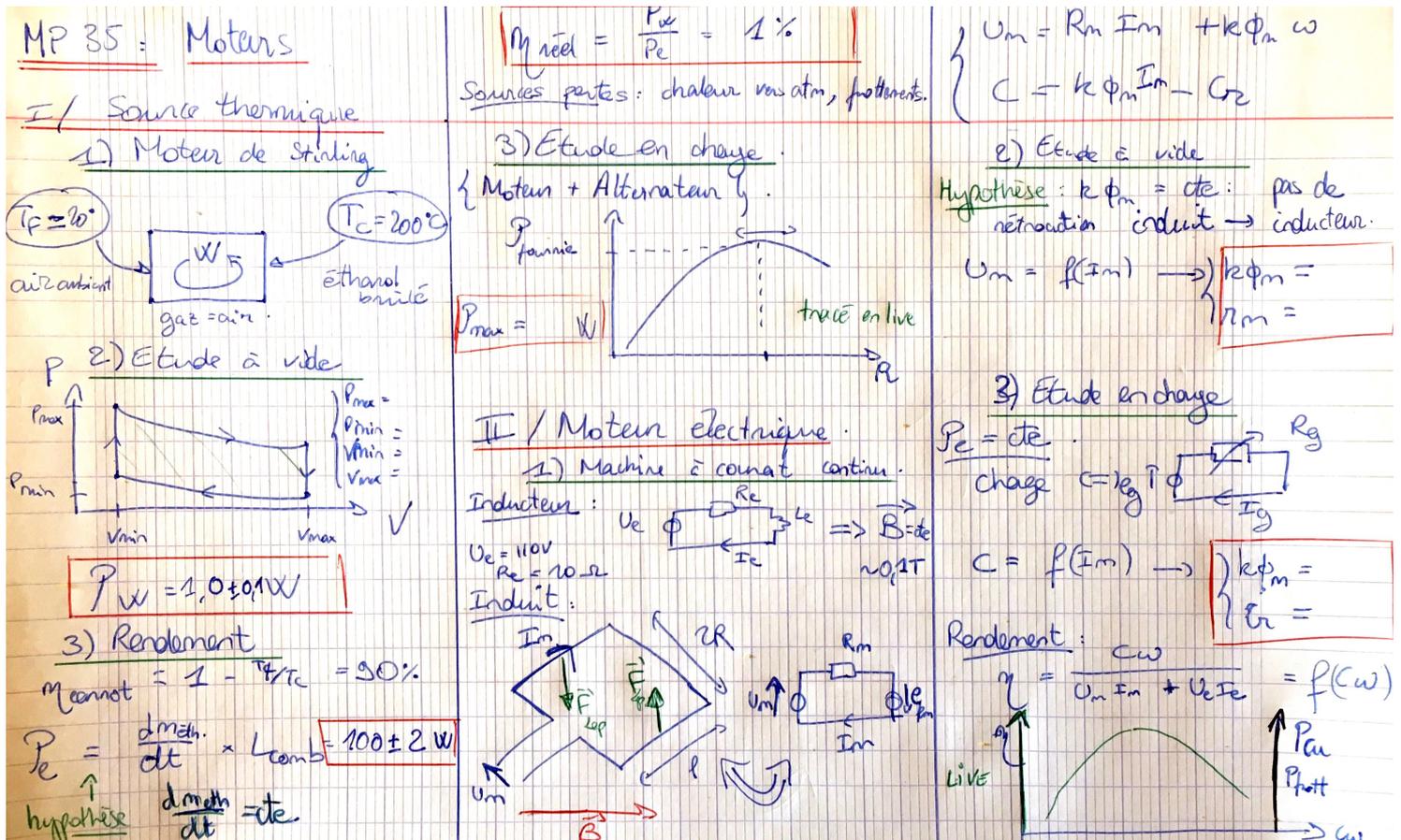


FIGURE 1 – Petite erreur à corriger : le champ B doit être dans le plan de la spire, mieux le dessiner.

Rapports de jury

2015-2017 Ce montage a été présenté plusieurs fois lors de cette session et a conduit à plusieurs prestations de bonne qualité. Le jury a apprécié la présentation quantitative d'un moteur de Stirling. Néanmoins, il est important que les candidats, face à un moteur, soient à même d'expliquer pourquoi il tourne.

2013 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.

Intro

Petit voilier du Quaranta de thermo, "machine thermique" ?

1 Source thermique : le moteur de Stirling

Pérez page 169

Éteindre le moteur systématiquement après une expérience pour qu'il puisse refroidir et être de nouveau opérationnel.

1.1 Présentation

Principe de Carnot : il n'existe pas de moteur monotherme. On va donc essayer de faire au plus simple, ie avec deux sources de chaleur. Un exemple historique est le moteur de Stirling. Inventé par Sterling en 1818 pour remplacer la machine à vapeur. Il a la particularité de fonctionner en système fermé.

Sur slide : présentation du cycle de Carnot avec le schéma du moteur correspondant. (bon alors je me suis un peu pris la tête avec, dans l'idée ça ressemblera à ca https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/89/Alpha_Stirling_animation.gif)

1.2 Étude à vide

On va d'abord s'intéresser au fonctionnement du moteur. Regardons le cycle réel dans le diagramme de Clapeyron. On doit alors mesurer P et V . La pression est mesurée de façon relative grâce à une jauge de contrainte, l'interface renvoie une tension U_P . Le volume est déduit de la position du piston vertical et des dimensions géométriques du moteur, transcrit par la tension U_V . https://fr.wikipedia.org/wiki/Jauge_de_d%C3%A9formation#Pi%C3%A9zor%C3%A9sistance

La notice donne $P = P_0 + \frac{U_P}{20.10^{-6}}$ Pa et $V = 32 + \frac{44-32}{4.096} U_V$ cm³

Étude à vide



⊙ 5 minutes

Pour plusieurs cycles mesurer P et V , présenter le cycle sous un diagramme de Clapeyron. Calculer l'aire d'un cycle et remonter à la puissance du moteur $\mathcal{P}_W = \frac{\text{Aire cycle}}{\text{Durée cycle}} \simeq 1\text{W}$.

Noter les valeurs de T_c et T_f , les caractéristiques du cycle sur le graphe.

Expliquer pourquoi on n'a pas exactement le beau cycle à 4 phases : les hypothèses ne sont pas toujours vérifiées et les phases se chevauchent.

Bien faire attention à toujours faire tourner le disque dans le même sens sinon ça pose des problèmes de calibration qu'il faut alors recommencer.

Transition : est-ce que ce système est efficace ?

1.3 Rendement

Bilan énergétique : la source de chaleur n'est pas totalement utilisée comme source chaude : elle chauffe tout l'appareil et aussi l'air ambiant. Il y a des pertes thermiques aussi au niveau de chaque

volume. Les frottements mécaniques doivent aussi être pris en compte (mais sont probablement négligeables).

On s'attend donc à avoir un rendement relativement faible dans ce dispositif, essayons de l'évaluer.

Rendement



⊖ 2 minutes

Allumer la bougie à éthanol et mesurer la différence de masse m entre t et $t + \tau$. On obtient alors la puissance que fournit la combustion $\mathcal{P}_c = \frac{m}{\tau} \simeq 100\text{W}$.

Si le temps le permet on fait cette expérience plusieurs fois en préparation pour faire des incertitudes de type A (c'est l'occasion d'en faire pour changer des droites). Sinon on peut aussi tracer m en fonction de τ et tirer \mathcal{P}_c d'une régression linéaire. (est-ce que c'est équivalent d'ailleurs?)

On peut alors calculer le rendement $\eta = \frac{\mathcal{P}_W}{\mathcal{P}_c} \simeq 1\%$ ouf on dépasse pas le rendement de Carnot. Le résultat est mauvais ici comme on s'y attendait, des machines plus optimisées (mieux calorifugées) seraient sans aucun doute plus efficace.

Bazarov, Thermodynamique page 331 apparemment dans ce bouquin on montre que le rendement est $\eta = \frac{T_c - T_f}{T_c + (T_c - T_f) \frac{C_{V,m}}{R \ln v_2/v_1}} \neq \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$

Transition : Dans la vraie vie on fait pas tourner une machine pour rien, voyons son fonctionnement en charge.

1.4 Étude en charge

A priori c'est la manip "bonus" et la plus délicate. La faire si on a le temps.

Étude en charge



⊖ 5 minutes

On branche l'alternateur du boîtier. On fait débiter dans une résistance avec un ampèremètre en série (il ne faut pas dépasser 80mA). On fait la mesure pour plusieurs valeurs de résistances (qu'on aura mesurées précisément en préparation), rapidement pour éviter les problèmes de thermalisation. On trace alors RI^2 en fonction de R (puissance fournie en fonction de la charge) et on trouve le fonctionnement nominal du système {moteur + alternateur }.

(On pourrait éventuellement faire l'étude sans l'alternateur avec un couple-mètre pour mesurer la puissance en sortie du moteur, mais cela semble délicat) **Question sans réponse :** Comment prédire le couple et la vitesse de rotation du moteur indépendamment ?

Bilan du moteur Stirling : très simple et facilement optimisable pour le rendement. Il est d'ailleurs utilisé pour faire des groupes électrogènes notamment (en le reliant à un alternateur). Le gros désavantage est l'inertie thermique, ce qui le rend inadapté pour les véhicules (changer de vitesse sur une voiture c'est changer le couple qu'on exerce sur le moteur).

Transition : Apport de l'électricité ?

2 Moteur électrique : la MCC

2.1 Présentation qualitative

Mise en évidence du couplage électro-mécanique

⚡ Quaranta IV, "Laplace"

⌚ 2 minutes

1re possibilité : Les rails de Laplace. Un aimant en U puissant est placé, un microampèremètre est relié aux rails, le rail est déplacé. Un courant algébrique de l'ordre du μA apparaît. Ensuite ce multimètre est remplacé par un générateur de tension continue. Qq volts => Déplacement : **Caractère réversible.** Règle du flux maximum. Si l'expérience ne marche pas très bien, on peut humidifier les rails ou prendre l'alternative :

2me possibilité : Le pendule métallique dans un aimant. En mettant une alim alternative, le pendule oscille spontanément à la bonne fréquence. (manip. efficace mais moins riche)

Ca marche bien ! On vérifie que la force est dans le bon sens avec ses doigts. Intérêt : rendement pouvant aller jusqu'à 100%.

2.2 Fonctionnement à vide

N.B. : -Les mesures doivent être faites au voltmètre qui est plus précis -Penser au rhéostat en série de l'induit de 10Ω pour le démarrage. (l'induit équivaut à une faible résistance à rotation nulle, risque de surintensité) -Les caractéristiques changent avec la température et l'oxydation, ne pas la faire tourner trop longtemps. -Toujours éteindre l'induit en premier !

Présentation des différents blocs dans le moteur pédagogique ouvert et analogie avec l'expérience inductive. On peut montrer le rotor, le collecteur...

Schéma de la machine ? On part du schéma à une spire, puis schéma type Précis électrotech. p. 127. + schéma électrique pour introduire les tensions et courants...

Présentation des équations. On ne s'intéresse pas au mode générateur. (Pour toute la théorie et des discussions énergétiques, **H-Prépa électronique II, p.84-92**)

$$\begin{cases} C = k\Phi_m I_m - C_r \\ U_m = k\Phi_m \omega + r_m I_m \end{cases}$$

Les équations sont dans le Hprépa p. 86. Je viens de réaliser qu'on a ici supposé C_r ne dépendant pas de ω , c'est pas si trivial non ?

Passage sur la grosse machine : la MCC à excitation séparée (schéma Quaranta). $U_e = 110 \text{ V}$.

MCC à vide

⚡ Quaranta IV, "Moteurs à courant continu", ⌚ 5 minutes
Hprépa p. 87

On lance la machine avec toute les précautions. On peut vérifier l'existence du couple résistif : $U_m \neq 0$ et $\omega = 0$.

On mesure constamment U_e et I_e . Idem pour l'induit U_m et I_m . Une fois l'ensemble en marche, on court-circuite le rhéostat de l'induit pour éviter des pertes.

On mesure f (fréquence de rotation, attention au facteur 2π) et I_m avec U_m qui varie jusqu'à 110 V. Retrouver les équations et remonter à $k\phi_m$.

On peut le faire pour pleins de valeurs de U_e pour voir les changements dans l'aimantation, mais attention de parcourir U_m toujours dans le même sens (hysteresis).

Valeurs cohérentes... En vrai $k\Phi_m$ dépend aussi de l'induit par la réaction magnétique de l'induit, mais c'est au moins d'ordre 1. Mais ce qui compte c'est de délivrer la puissance dans une charge.

2.3 En présence d'une charge

Essays de retrouver le point nominal.

MCC en charge

⚡ Quaranta IV, "Moteurs à courant continu" ☉ 5 minutes

On se place à $U_e = 110$ V et $U_m = 60$ V (**Intérêt de se placer à 60 V ?**). Nous regarderons le couple transmis à la génératrice, on ne cherche pas à produire du courant cela dit. Donc rhéostat de 100 Ω avec ampèremètre sur l'induit de la génératrice.

Ce rhéostat contrôle I_g , un fort courant induit freine le rotor par induction.

Manip : On fait varier R de la génératrice puis on ajuste l'induit du moteur pour la ramener à $U_m = 60$ V, on a besoin de plus de puissance (**Attention!** I_g toujours inférieur aux limites du rhéostat et de l'induit). On veut garder la même puissance en entrée pour que la courbe de l'expérience suivante ait un sens.

Mesure du couple, de ω , de I_m et I_e (ω et I_e serviront pour la puissance). Tracé de C vs I_m pour remonter à C_r (et retrouver $k\phi_m$).

On a donc vérifié les deux lois de fonctionnement du moteur. Voyons maintenant comment l'utiliser de manière optimale.

Déduction du rendement

⚡ Quaranta IV, "Moteurs à courant continu" ☉ 3 minutes

On veut un couple. On dépense toute l'énergie électrique, donc $\eta = \frac{C\omega}{U_m I_m + U_e I_e}$, que l'on trace en fonction de la puissance utile $C\omega$.

Tu veux les pertes cuivre? Et bien trace $r_m I_m^2 + r_e I_e^2$. Et les frottements : $P_{frot} = C_r \omega$.

Les autres pertes : fer et défauts (pertes de flux). **N.B. : Ces pertes peuvent être connues par la méthode des pertes séparées, Hprépa p. 91. Mais pour ça il faut que $U_e = 110$ V soit le même à vide ou en charge ainsi que ω . Donc l'asservissement ne se ferait plus sur U_m mais ω . À tester en expérience ?**

On a donc un fonctionnement nominal pour $U_m = 60$ V. Bilan sur l'utilité de ces moteurs actuellement, cf. BUP.

L'interprétation des pertes est assez variée, cf. Hprépa. Bien sûr il y a les pertes fer / pertes Joule, mais pas que.

3 Principe du moteur synchrone (Bonus)

Montrer les trois bobines déphasées de $\frac{2\pi}{3}$, et la synchronisation de l'aiguille au strobo et expliquer le principe sur slide (l'idée c'est de pas l'écrire au tableau vu qu'on est pas sûr d'avoir le temps).

Conclusion

Voilà, on a vu deux types de moteurs. On peut approfondir dans chaque domaine, thermo ou électro car il existe une grande variété de moteurs aujourd'hui. Ceux présentés ici sont loin d'être optimisés (ex : le rendement pourri de Stirling, le rhéostat de démarrage du moteur, cf. Hprépa p. 87), mais ils ont chacun leurs intérêt. Mention des domaines d'application de chacun.

Ouverture possible : Machine asynchrone...

4 Commentaire prépa oral

- Attention à ne pas mettre de trop grosses charges sur le Stirling, il a un faible couple (on l'arrête à la main). Donc on veut des faibles courants dans la charge, donc des grosses résistances.
- Le Hprépa sur la MCC remet très bien les idées en place.
- Lorsque l'on fait une mesure de fréquence par stroboscopie, ne pas oublier la contre-mesure à $f/2$.
- Pour la qualité des mesures et de la présentation, ne pas mettre un électroaimant puissant à côté d'un oscilloscope.
- Pour voir la réaction magnétique d'induit : [Par là, merci Boris](#)
- Le couple résistif C_r est constant, c'est pas si trivial non ? Ce sont principalement des frottements solides qui dépendent de l'état des balais, ce qui peut varier. A ça il faut rajouter des pertes de lubrification dépendant de ω . Si en plus on a un ventilateur, il existe d'autres pertes en ω^2 . Mais tout ça ne domine pas dans notre MCC.
- Sur la charge de la MCC : on se met à 60 V, ce qui n'est pas opti. Si on fait l'étude à U_m fixé, c'est un peu dommage car on n'est pas en régime nominal, donc autant passer à 110 V. Attention à ne pas dépasser les intensités limites de la génératrice cependant. Mais si on travaille à ω fixé, U_m va s'ajuster et il faut bien partir de 60 V.

5 Questions

- Quelle influence sur le cycle de la position de lancement pour le Stirling ? Le cycle est plus propre en partant de la position comprimée, le gaz est au contact d'une source chaude, ce qui est plus propice à lancer la machine.

- Est-ce que ça vous fait penser à d'autres machines actuelles ? Le moteur essence se lance via les bougies et une explosion, le diesel par l'échauffement du milieu jusqu'à auto-explosion. Avant ces démarreurs automatiques on utilisait une manivelle, c'est tout à fait similaire.
- Que se passe-t-il pour des temps longs sur la machine de Stirling ? Thermalisation de la source froide.
- En charge, à quoi est lié le couple du Stirling ? On a un alternateur qui délivre une intensité proportionnelle au couple, comme pour la MCC. Conséquence de la charge (rhéostat) : changer R fait changer I, donc le couple de la machine de Stirling. La vitesse de rotation s'adapte alors.
- On passe à la MCC : Quelle utilité du système balai-collecteur ? Le courant est redressé dans le sens nécessaire au couple constamment positif du moteur.
- Forme du champ magnétique B dans l'entrefer ? Il est radial à la carcasse statorique, qui est circulaire. Ainsi ce champ B est constamment dans le plan de la spire.
- Intérêt du rhéostat sur l'induit.
- Pourquoi à vide on s'intéresse à $U_m(\omega)$? Le courant dans l'induit est très faible, car le couple résistif appliqué est nul. Donc dans la deuxième équation : $I_m = \frac{C_r}{k\Phi_m}$, ça ne bouge pas vraiment.
- Où sont les pertes fer par hysteresis ? C'est dans l'induit, qui voit un champ magnétique alternatif. Dans le stator, le champ est constant.
- Comment marche la mesure du couple de la MCC ? Similairement à la génératrice, la MCC fait tourner un arbre dont le rotor est un aimant permanent. Cela crée une fem aux bornes de cette nouvelle MCC en quelque sorte. Or, elle est en circuit ouvert, il n'y a pas de débit de courant dans ce nouveau stator, donc pas de couple résistif d'induction. On mesure ω à l'aide de cette fem. (En pratique, léger couple résistif dû à la rotation de l'arbre).
- Qu'est-ce que la chaleur ? Transfert d'énergie sous forme microscopique.
- Qu'est-ce que la réaction magnétique d'induit, comment la contrecarrer ?