

LP14 - Machines thermiques réelles

Gauthier Legrand et Francis Pagaud

27 juin 2020

Bibliographie

- Thermodynamique, **Pérez**
- Physique tout-en-un PCSI 5e édition, **Salamito** (Premier principe industriel, frigoristes p. 979, Stirling p. 992)
- Le diagramme de Raveau revisité, **BUP 749** (Partie 1)
- Les cycles dithermes dans le temps, **BUP 824** (Partie 2)
- Le réfrigérateur, **BUP 832** (Partie 3)
- Défense et illustration du moteur Stirling, **BUP 864** (Excellent BUP sur Stirling)
- <http://materiel-physique.ens-lyon.fr/BDD/job/BDD/Notices/N103-049.pdf>, notice du Stirling

Pré-requis :

- Premier et seconds principes
- Bilan sur un système ouvert
- Gaz parfait
- Transformations élémentaires d'un fluide

Table des matières

1	Notion de machine thermique	3
1.1	Généralités	3
1.2	Machine monotherme	3
1.3	Machine ditherme	3
2	Moteurs thermiques réels	5
2.1	Le moteur de Stirling	5

2.2 Transformation réelle	5
3 Réfrigérateurs réels	6
3.1 Fluide caloporteur	6
3.2 Premier principe industriel	7
3.3 Application	7

Les BUPs sur les machines dithermes dans le temps et le frigo sont passionnants, à lire. C'est le coeur de la leçon.

La leçon est dense, ne pas se perdre dans le détail !

Reste à faire : tester le code python pour Stirling (voir si on peut se débrouiller sous latis pro pour n'avoir qu'un cycle, et ensuite sous python comment découper le cycle pour calculer son aire à partir de deux intégrales.)

Commentaires du jury

- 2017** L'utilisation de diagrammes enthalpiques peut permettre de discuter de façon quantitative l'irréversibilité d'une machine réelle et, en plus, d'éviter de se contenter du modèle du gaz parfait. Le jury rappelle en outre que les machines thermiques ne se limitent pas aux moteurs.
- 2016** Au-delà des modèles classiques, le candidat s'appuiera sur des diagrammes de fluides réels. *Jusqu'en 2016, le titre était : Applications des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques.*
- 2015** Les diagrammes thermodynamiques, exploités dans les programmes de CPGE, sont trop rarement présentés et utilisés.
- 2014** L'utilisation de diagrammes thermodynamiques relatifs à des fluides réels pour illustrer le propos est appréciée par le jury. Les moteurs thermiques ne sont pas réalisés en visant uniquement un rendement optimal.

Introduction

A quel point il faut parler des machines réelles ? C'est incertain... Etant donné le temps de 30 min, je ferais sauter le diagramme de Raveau.

On a vu les 1er et second principes. Mais comme on le sait tous, ce domaine de la physique a émergé pendant la révolution industrielle, lors de la réalisation de machines. Celles-ci ont bien des utilités : frigo, voiture... Même dans le vivant ! Comme le corps humain par exemple.

Problématique : Aujourd'hui on verra les différents aspects importants de ces machines thermiques, autant idéales que réelles.

1 Notion de machine thermique

1.1 Généralités

Source : Diu p. 103 pour poser le cadre

A vérifier dans le Tallet : **Machine** : Système thermodynamique (un fluide) subissant une transformation cyclique, retour à l'état initial.

– **thermique** : Machine ne recevant de l'extérieur que du travail mécanique et de la chaleur.

Source de chaleur = réservoir d'entropie, soit un thermostat : grand système toujours à l'équilibre ne fournissant que de la chaleur.

Dessin du formalisme de la machine thermique (un système, recevant plusieurs travaux et plusieurs chaleurs via différents thermostats).

$$\text{Système cyclique : } \begin{cases} \Delta U = 0 = \sum_i W_i + \sum_j Q_j = W + Q \\ \Delta S = 0 = \sum_j \frac{Q_j}{T_j} - S_{c,j}, S_{c,j} \text{ sont les entropies créées } \geq 0 \end{cases}$$

Moteur : Machine thermique dont le travail est délivré à l'extérieur, $W < 0$. On voit très bien pourquoi une machine perpétuelle est impossible : $W = -Q$, il est nécessaire d'apporter constamment de l'énergie sous forme de chaleur pour obtenir un travail.

$$\text{Second principe de la thermo : } dS \geq 0 \rightarrow \sum_j \frac{\delta Q_j}{T_j} \leq 0 \text{ car } \sum_j \delta S_{c,j} \geq 0.$$

C'est l'inégalité de Clausius. Conséquences :

→ Le système est globalement une source de chaleur.

→ Si le cycle est réversible, alors on a l'égalité de Clausius $\sum_j \frac{\delta Q_j}{T_j} = 0$.

1.2 Machine monotherme

Et si l'on a qu'un thermostat et qu'un seul transfert de travail ? Machine monotherme.

$$\begin{cases} \text{Clausius : } Q \leq 0 \\ W = -Q \geq 0 \end{cases}$$

Bilan : cette machine ne peut pas être un moteur. Typiquement c'est un piston seul.

1.3 Machine ditherme

Source : BUP 749, Raveau

Là on passe aux choses sérieuses. (slide du formalisme) Ré-écrivons les choses avec des égalités :

$$\begin{cases} Q_c = -W - Q_f \\ \delta S = 0 \leftrightarrow Q_f = -\frac{T_f}{T_c} Q_c - \oint T \delta S_c \end{cases}$$

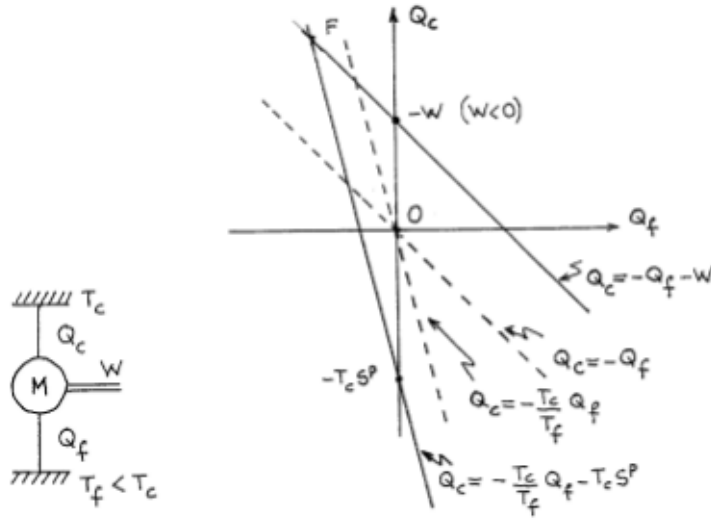


FIGURE 1 – Diagramme de Raveau moteur

Le diagramme de Raveau c'est sympa, si on veut quelque chose de plus calculatoire et basique c'est Pérez p. 175

Si on trace les deux équations sur un graphe (Q_f, Q_c) , on obtient le diagramme de Raveau. Une droite à un coefficient directeur de -1 et l'ordonnée à l'origine $-W$, l'autre une pente de $-\frac{T_f}{T_c}$ et une ordonnée à l'origine ayant pour cause l'entropie créée. Une ordonnée à l'origine nulle pour cette droite correspond à un cycle réversible. La zone à droite de cette deuxième droite est une zone interdite par le second principe. La croisée des droites donne le point de fonctionnement.

Ainsi, on voit bien que si $-W$ est positif, alors Q_f est négatif et Q_c est positif, on capte l'énergie de la source chaude et on réchauffe le froid avec un moteur. Si le cycle est réversible, on optimise $-W$ et le travail est maximal.

On peut calculer le rendement :

$$\eta = \frac{-W}{Q_c} = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} \underbrace{=}_{\text{réversible}} 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Si l'on veut obtenir une machine frigorifique/une pompe à chaleur ($W > 0$), l'ordonnée à l'origine est négative, et donc $Q_c < 0$. On a deux cas possible : $Q_f > 0$ ou $Q_f < 0$. Si $Q_f = 0$, on est en train de chauffer les deux thermostats, c'est comme un monotherme.

On est donc dans le cadran en bas à droite. Le coût pour faire tourner le système, c'est W . Ce que ça nous apporte, c'est Q_f ou Q_c , c'est selon pompe à chaleur/frigo. Dans le cas du frigo, on extrait de la chaleur du milieu froid, donc $Q_f > 0$, on peut définir l'efficacité de l'ensemble :

$$e_f = \frac{Q_f}{W} = \frac{Q_f}{-Q_f - Q_c} \underbrace{=}_{\text{réversible}} \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Ca peut être supérieur à 1, c'est parce que une partie de l'énergie est partie dans Q_c , ici on fait pas un bilan d'énergie mais on cherche bien à optimiser le flux de chaleur désiré par rapport au travail fourni.

Plus globalement : **Théorème de travail maximal (Diu p. 111)**. Interprétation : il faut des différences de température significatives pour un moteur ditherme afin d'obtenir un bon rendement (face au moteur électrique). Pour le frigo, la limite c'est à basse température : très peu efficace.

Si le seul travail est la pression et que les échanges sont réversibles, alors W et Q se déduisent des diagrammes (P,V) et (T,S) via l'aire du cylce. Pour le travail, sens horaire : la machine fournit l'énergie à l'extérieur. Pour la chaleur, c'est l'inverse.

Mais ça c'est pas des vraies machines !

2 Moteurs thermiques réels

2.1 Le moteur de Stirling

On va voir cela à travers un exemple : moteur de Stirling.

Animation gif sur slide + schémas

Etapas :

AB : Le gaz sur la source chaude est en expansion isotherme. Augmentation du volume.

BC : Transformation très rapide à volume constant, le gaz est envoyé sur la source froide, baisse de la pression à volume constant.

CD : Compression isotherme au contact de la source froide.

DA : Repassage au niveau de la source chaude.

Mais quand on fait le cycle en live... Ben c'est dégueu. Qu'est-ce qu'il se passe ?

2.2 Transformation réelle

Source : BUP 824 pour la puissance fournie, Archambault pour l'A.N. gaz parfait

Qu'est-ce que l'on pourrait bien modifier ? Tout d'abord, on peut affiner les modèles. Gaz parfait ?

Souvent on remplace le gaz parfait par Van der Waals. Cela fait par exemple changer la valeur de PV en fonction de P (courbe d'Amagat). Mais si on regarde l'air entre -100 degrés et 100 degrés, de 0.1 à 4 bars (via un diagramme thermo réel présenté en annexe), on remarque que $P \propto V^{-1}$ ça marche carrément bien. (montrer sur slide)

Ici, jamais on va pas dépasser des conditions aussi difficiles, donc le gaz parfait, c'est très bien. Maintenant, si l'application est plus solide en termes de conditions, ça peut poser

problème. Par exemple : détente de Joule-Thomson isenthalpique, il y a une variation de température : [Voir paragraphe sur le sujet + slide](#).

Autre source imparfaite : les transformations ne sont pas idéales. Pour faire ce raisonnement, on va s'appuyer sur le cycle de Carnot (2 isothermes + 2 isentropiques), mais le raisonnement est généralisable au cycle du moteur de Stirling.

En direct-live : construire la figure 2 du BUP. Chaque étape dure δt , on a un rendement de Carnot. Le transfert thermique est réalisé durant l'isotherme (l'adiabatique est... adiabatique). On a une source T_c en contact avec le système à T'_c durant Δt . faible temps de transfert thermique : $Q_c = \alpha(T_c - T'_c)\Delta t$.

$$\text{Or, la puissance est : } \mathcal{P} = \frac{W}{4\Delta t} = \frac{Q_c}{4\Delta t}\eta.$$

On en déduit la puissance du cycle très sensible à Δt via $T_c - T'_c$ (réversibilité est l'ennemi de la puissance) et l'entropie.

Pleins de discussions physiques à faire. Sur notre cycle : c'est pas tout à fait pareil... Mais le principe est le même, on n'atteint pas les températures voulues + on balance de la chaleur dans l'autre thermostat directement.

Idée : On trace la courbe théorique de notre Stirling sous Python (source froide à 273 K, source chaude à la température de la flamme, 1000 K ?, et on prend les volumes extrémaux du cycle, le nombre de moles (GP)). On obtient la puissance théorique. On compare à l'expérience. Wow, tellement de pertes!

Voilà pour le moteur, mais il n'existe pas que ça :

3 Réfrigérateurs réels

Le principe est le même mais il y a des subtilités :

3.1 Fluide caloporteur

Source : BUP 832

Comporte un fluide caloporteur. Dans les centrales nucléaires, c'est de l'eau. Dans nos frigos, du fréon... Pourquoi ?

On utilise deux propriétés du fluide. Chauffage et changement d'état $\rightarrow$ emmagasine de l'énergie de ces deux manières là, ce qui se manifeste par l'enthalpie (changement d'état : cette enthalpie dépend de P).

A.N. : Pour 1kg d'eau, l'élévation de 1 K, c'est 4.18 kJ. Pour le changement d'état de toute cette masse d'eau, c'est 540 fois plus : 2260 kJ. Moyen d'emmagasiner un max d'énergie! Du coup ça rajoute une variable : $h(S,P,x)$

Pour les centrales nucléaires, on peut faire passer l'eau de 20 °C à 100 °C (334 kJ/kg), puis changement d'état (2260 kJ/kg). C'est ce qui stocke le plus (et si c'était le Nutella qui stockait le plus, les centrales utiliseraient du Nutella).

Pour les frigos, on va pas avoir des circuits à 100 °C... Ce qui stocke le plus d'énergie

c'est le changement d'état. Hé bien prenons qqch qui vaporise vers T_{amb} : le fluide R134a. Il est évaporé, ce qui le fait récupérer de l'énergie de l'intérieur du frigo.

Ca nous donne ce système : slide.

3.2 Premier principe industriel

Source : J'intègre p.979

On fait le dessin (slide ?). $\Delta U = mu(t + dt) - mu(t) = mu_s - mu_e$. $W_p = P_e(mv_e) - P_s(mv_s)$, $W_u + Q = mw_u + mq$.

Bilan des courses :

$$(u_s + P_s v_s) - (u_e + P_e v_e) + \Delta E_{meca} = w_u + q$$

Premier principe industriel : $\Delta h + \Delta E_{meca} = w_u + q$
--

En quoi est-ce important ? Peut prendre en compte l'enthalpie de changement d'état. Exemple : dans un détendeur, pas de variation de E_{meca} pour simplifier, pas de pièce mobile donc $w_u = 0$, pas de transfert thermique car adiabatique, donc $\Delta h = 0$, on est isenthalpique à pression variable...

C'est pour cela qu'on utilise le diagramme des frigoristes (pris du Archambault, slide).

3.3 Application

Source : BUP 832, Archambault p. 9

On représente la transfo sur un diagramme des frigoristes/de Mollier. Bien le présenter, cf. Archambault, insérer les 4 transformations en les détaillant + photos du Archambault ? Il y a des petites subtilités (sous-refroidissement, surchauffe), tout est détaillé dans le cours de Archambault. Le diagramme peut être présenté sur Coolpack mais je doute que le logiciel soit installé.

L'énergie intéressante, c'est Q_{evap} et le coût c'est W_{comp} . Tout ça c'est fait dans le BUP.

A.N. si on a le temps.

A nouveau, la transfo est réelle. Le gaz parfait, c'est corrigé avec ce diagramme, mais les transfo ne sont pas idéales (cf. diagramme final du BUP, slide).

Si on a le temps, on décrit pourquoi la transfo est réelle pour un compresseur, cf. Archambault.

Conclusion

Voilà voilà, c'était les machines thermiques. Pleins de subtilités qui font que toutes nos modélisations ne sont pas parfaites, mais globalement ça marche bien (passer d'un cycle carré de Stirling à la machine présentée, c'est culotté mais ça marche pas si mal!).

De plus, il faut considérer la source énergétique (bois, pétrole, électricité... On peut mentionner le rendement exergetique, il existe un BUP : "Notion de qualité de l'énergie", mais le Wiki concentre l'esprit du truc). Largement utilisé, après on a des pertes inévitables. Pertes limitées dans le cas des moteurs électriques.

Commentaires pendant la prépa aux oraux

- Pas mal de liens à faire avec la LP11 sur les gaz réels.
- Cycle de Beau-de-Rochas et cycle diesel à connaître sur le bout des doigts (pages wiki + J'intègre).
- Le cycle de Carnot est le seul réversible ! Donc le rendement de Carnot pour stirling, c'est non. (infos intéressantes [ici](#))
- Savoir à quoi ressemblerait le cycle d'une pompe à chaleur là-dessus. → C'est la même tête.
- "Réaliser une discussion très précise des sources d'irréversibilité". (temps d'évolution plus rapide que le temps d'équilibre ? Chauffage des thermostats ? Mise en contact des deux thermostats ?...)
- "Faire des A.N. très concrètes, notamment un calcul d'efficacité frigo ou de rendement."
- Discuter les marges de manoeuvre pour diminuer les pertes irréversibles.
- Ne pas parler de "chaleur" ! Mais bien de transfert thermique.

Questions

- Comment définit-on la température thermodynamique ? y en a-t-il d'autres ?
- Définition de la chaleur ?
- Comment définit-on un thermostat idéal ? comment, en pratique, le réaliser ? Qu'est-ce qui change si la température des sources varie lentement ? (notion de pseudo-sources)
- Discuter de l'importance du nombre de tour/min pour un fonctionnement périodique des machines ? (retour sur le II je pense)
- Pourquoi emploie-t-on des échelles log pour la pression dans le diagramme de Mollier ?
- A l'aide de ce diagramme peut-on fixer une limite de validité du modèle gaz parfait pour la vapeur sèche ? (regarder quand est-ce que les isothermes ne sont plus isenthalpes)
- Les courbes iso-titres sont-elles indispensables ? (non, on veut Δh)
- Sur les cycles réels donner la signification des transformations de « déchauffe », « surchauffe »...
- Qu'est-ce qui est arrivé en premier : machines ou thermo ? Les machines. C'est Carnot qui a tout théorisé.

Remarques Éric Brillaux :

- J'ai un peu du mal avec l'idée des "bonnes variables" en thermo : de ce que j'ai compris le second principe c'est à partir de $S(U, V, N)$ et dès qu'on prend pas ça, ça marche plus. Mais dans ce cas pourquoi dans la LP44 sur les capacités calorifiques on est content quand on trouve $S(T, V)$? C'est le troisième principe qui permet de s'en sortir ? Parce que j'ai l'impression que si on a trouvé la différentielle de S c'est bon, quelles que soient les variables utilisées. → comme $C > 0$ il y a une bijection entre U et T donc ça pose pas de souci
- Ça veut dire quoi que certaines grandeurs sont pas définies hors équilibre ? C'est une question d'homogénéité dans le système qu'on regarde ? Par exemple la pression est pas la même partout juste après avoir bougé un piston, c'est ça qu'on veut dire ? Parce que dans ce cas j'ai du mal avec le fait que l'énergie interne ne soit pas définie : le Hamiltonien du système est toujours défini et on peut toujours trouver l'énergie correspondante → L'équilibre thermo c'est homogène et stationnaire. Le Hamiltonien identifié à U à l'équilibre seulement car on fait une moyenne statistique du Hamiltonien qui n'a un sens que à l'équilibre
- Thermostat : réservoir d'énergie ou d'entropie ? → On sent déjà que ça va être compliqué : pour un x -ostat on a un réservoir de X avec $\frac{x}{T} = \frac{\partial S}{\partial X}$ (pressiostat par ex). Pour la température c'est juste $\frac{1}{T} = \frac{\partial S}{\partial U}$ donc compliqué... Ça semble quand même bien de prendre l'entropie comme quantité dans le réservoir, parce que finalement tous les réservoirs échangent de l'énergie... Il faut quand même faire attention à l'entropie créée, mais bon comme on suppose que les transferts se font de manière réversible entre le système et le réservoir ça passe (le système total n'a cependant pas une entropie totale conservée les transformations peuvent être non réversibles)
- Température microcanonique vs canonique ? → On regarde la température microcanonique du thermostat, celle-ci dépend très peu de l'énergie du système (réservoir très grand) donc on identifie ça à la température canonique
- Diagrammes des frigoristes : expérimental ou théorique ? → On peut s'en sortir analytiquement avec des équations de gaz un peu exotiques mais généralement c'est expérimental. On obtient h à partir de la mesure d'échanges de chaleur : sur une isobare on a $dh = \delta Q$ et donc on mesure h . Ensuite pour trouver s il faut utiliser $\frac{\partial h}{\partial s} = T$ puis intégrer pour trouver s