

LP13 - Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques

Jeudi 17 Octobre 2013

Binôme : *Celindano Christophe*, Clément Beaufile

Correcteur : Pierre Vilain

Remarque : Le texte en italique est énoncé à l'oral.

Bibliographie :

- Thermodynamique, *fondements et applications*, J-P. Perez
- Thermodynamique, M.Bertin, JP.Faroux et J.Renault.
- Cap Prépa, *Physique MPSI-PCSI-PTSI*, sous la direction de Jérôme Perez.
- Thermodynamique appliquée, Van Wylen, Sonntag et Desrochers.

Prérequis :

- 1er et 2ème principes (CP1, L1),
- Notion de thermostat, pressostat (CP1, L1).
- Transition de phase¹

Plan du cours

1	Introduction	2
2	Bilans énergétique, entropique - Différents types de machines thermiques	2
2.1	Application des deux premiers principes	2
2.2	Machines monothermes	3
2.3	Machines dithermes - Diagramme de Raveau	3
3	Moteurs dithermes	5
3.1	Fonctionnement	5
3.2	Rendement - Cas de Carnot	5
3.3	Cycle de Carnot	6
3.4	Application 1 de machine ditherme	6

1. Dépend de l'orientation de la leçon, qui sera explicitée plus loin.

4 Récepteurs dithermes	6
4.1 Fonctionnement	6
4.2 Réfrigérateur/Climatiseur - Efficacité frigorifique	6
4.3 Pompe à chaleur - Efficacité thermique	7
4.4 Application 1 de récepteur ditherme	7
5 Remarques de Pierre Vilain	7
6 Modifications en conséquence	8

1 Introduction

Le 18 ème siècle marque l'apparition des machines à vapeur qui vont révolutionner le transport et plus généralement l'industrie. On cherche à les améliorer afin d'en tirer le plus de profit. Au 19 ème siècle naît la thermodynamique, créée en majeure partie à cette fin et des principes qui pourraient expliquer leur fonctionnement sont postulés. Il s'agit en réalité du premier et deuxième principe de la thermodynamique.

Qu'est qu'une machine thermique :

Dispositif qui par l'intermédiaire d'un fluide (*appelé agent thermique*) échange de l'énergie avec le milieu extérieur (i.e. reçoit algèbriquement un travail ou de la chaleur).

Utilité d'un machine thermique

Pour la mettre en évidence, on se propose de comparer la travail fourni par un homme soulevant une $m = 10\text{kg}$ sur une hauteur de $h = 1\text{m}$ à l'énergie emmagasinée dans 1kg d'eau à $T = 100^\circ\text{C}$ de capacité calorifique massique $c_{eau} = 4.22\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ dont on varie la température d'un $^\circ\text{C}$. Pour soulever la masse, l'homme doit fournir un travail supérieur à son énergie potentielle, soit :

$$W_{homme} = |mgh| \approx 10 \times 10 \times 1 = 100\text{J} \qquad W_{eau} = c_{eau} \times 1^\circ\text{C} \times 1\text{kg} = 4220\text{J}$$

Soit un travail 42 fois plus important avec un fluide comme de l'eau. On voit donc l'intérêt énergétique d'utiliser un fluide.

2 Bilans énergétique, entropique - Différents types de machines thermiques

2.1 Application des deux premiers principes

Comme les fluides considérés décrivent des cycles et que l'énergie, l'entropie sont des fonctions d'états, leur variations sur un cycle sont nulles. Ce qui se traduit en écrivant le premier et deuxième principe en négligeant $\Delta E_{c_{macro}}$ et $\Delta E_{p_{macro}}$ ² :

2. Pour des systèmes macroscopiquement au repos et non soumis à un champ extérieur.

$$\Delta U = W + Q = 0 \qquad \Delta S = S_{echangee} + S_{cree} = \sum_{i=0}^N \frac{Q_i}{T_i} + S_{cree} = 0$$

Or $S_{cree} \geq 0$ d'où l'inégalité de Clausius : $\sum_{i=0}^N \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$.

2.2 Machines monothermes

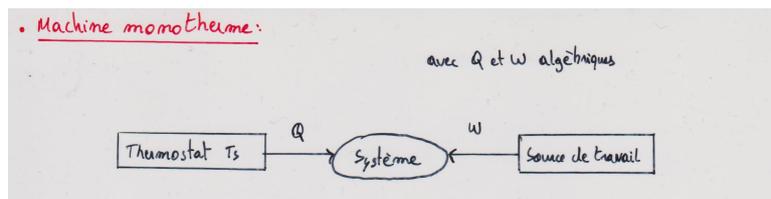


FIGURE 1 – Fonctionnement d'une machine monotherme.

Le système reçoit algébriquement un travail de la part de la source de travail et de l'énergie thermique du thermostat. En appliquant les deux premiers principe, on obtient :

$$W = -Q \qquad \Delta S = S_{echangee} + S_{cree} = \frac{Q}{T_{surface}} + S_{cree} = 0$$

Grâce à l'inégalité de Clausius généralisée précédemment on peut écrire :

$$\frac{Q}{T_{surface}} + S_{cree} \leq 0 \qquad Q \leq 0 \qquad W = -Q \leq 0$$

On retrouve le second principe de la thermodynamique selon Kelvin :

Un système en contact avec une seule source de chaleur, ne peut, au cours d'un cycle que recevoir un travail et fournir un transfert thermique.

Ce qui démontre l'impossibilité de réaliser un cycle moteur avec une machine monotherme. Ce type de machine caractérise par exemple un radiateur électrique.

2.3 Machines dithermes - Diagramme de Raveau

On introduit ici un deuxième thermostat³ et on les distingue en en nommant une 'source froide' et la deuxième 'source chaude'. De même en réalisant un bilan :

3. D'où ditherme.

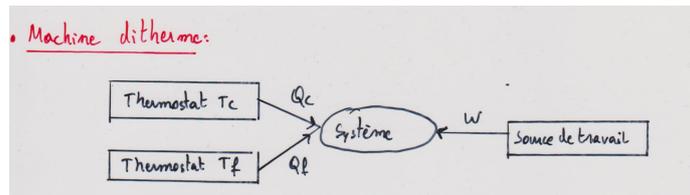


FIGURE 2 – Fonctionnement d’une machine ditherme.

$$W = -Q_f - Q_c \qquad \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0$$

Nous allons maintenant étudier un diagramme qui permet de décrire les zones de fonctionnement d’une machine ditherme.

Diagramme de Raveau :

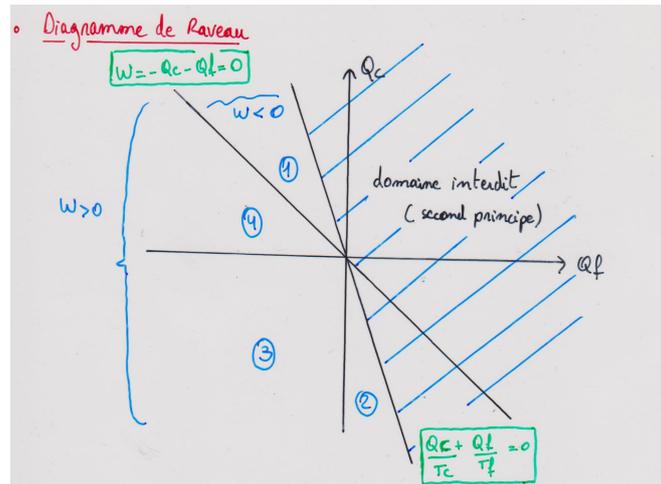


FIGURE 3 – Diagramme de Raveau d’une machine ditherme.

- **Zone 1** : $W < 0, Q_c > 0, Q_f < 0 \Rightarrow$ régime moteur ditherme. Le système reçoit un transfert thermique d’une source chaude et fournit un travail en réchauffant une source froide.
- **Zone 2** : $W > 0, Q_c < 0, Q_f > 0 \Rightarrow$ régime récepteur ditherme. Le système reçoit un travail et un transfert thermique d’une source froide qui se refroidit et réchauffe la source chaude. Ce sont les récepteurs qui modélisent à la fois les réfrigérateurs/climatiseurs et pompes à chaleur en choisissant judicieusement, la source froide et la source froide dans les deux cas.
- **Zone 3** : $W > 0, Q_c < 0, Q_f < 0 \Rightarrow$ régime récepteur ditherme. Ici, l’utilisation est la même que pour une machine monotherme, les deux thermostats n’en faisant finalement qu’un.
- **Zone 4** : $W > 0, Q_c < 0, Q_f > 0 \Rightarrow$ régime récepteur ditherme. Cette zone représente ce qui se passe dans la nature, une source chaude (rayonnement solaire) réchauffe une source froide (atmosphère).

Nous nous intéressons par la suite uniquement aux deux premières zones de fonctionnement.

3 Moteurs dithermes

3.1 Fonctionnement

Comme énoncé précédemment, le système reçoit un transfert thermique d'une source chaude (combustion d'essence) et fournit un travail en réchauffant une source froide (atmosphère). Nous allons désormais définir le rendement et voir ce qu'il devient grâce au bilan énergétique et entropique obtenu pour une machine ditherme.

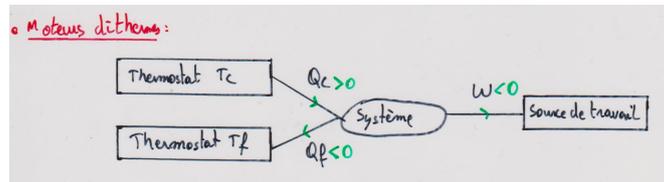


FIGURE 4 – Fonctionnement d'une machine ditherme.

3.2 Rendement - Cas de Carnot

Définition : $\eta = \frac{\text{grandeur desirée}}{\text{grandeur coûteuse}}$, soit ici $\eta = \frac{-W}{Q_c}$.

1^{er} principe : $\Rightarrow W = -Q_c - Q_f \Rightarrow \eta = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$

Inégalité de Clausius : $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \Leftrightarrow \frac{Q_f}{Q_c} \leq -\frac{T_f}{T_c}$

$\Rightarrow \eta = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \leq \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$.

On en déduit le **Théorème de Carnot** :

Le rendement η_{Carnot} est le rendement maximal d'un moteur ditherme, atteint dans le cas où le fluide décrit un cycle réversible.

Une chose intéressante que l'on peut remarquer est que ce rendement ne dépend que des températures des sources et pas du type du fluide/moteur utilisé !

ODG(Moteur à essence) : On suppose la combustion de l'essence se déroulant à $T_c = 1000K$ et l'atmosphère à $T_f = 300K$.

On obtient : $\eta_{Carnot} = 0.7$

Dans la pratique un tel rendement n'est jamais atteint, en majeure partie pour deux raisons :

- Phénomènes irréversibles⁴
- Seule 40% de l'énergie chimique est extractable sous forme mécanique.

4. Diffusions, frottements, discontinuités aux frontières, réactions chimiques, phénomènes d'hystérésis.

3.3 Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot représente le cycle que réalise une machine ditherme réversible. C'est à dire qu'une machine ayant un rendement de Carnot, mais dont le fluide ne décrit pas le cycle de Carnot n'est pas ditherme⁵. On remarque la présence de deux adiabatiques réversibles et de deux isothermes réversibles. On représente ce cycle dans un diagramme (T,S) qui est vraiment utile car le cycle est ici décrit par un rectangle ABCD et un diagramme de Watt (P,V) . On peut montrer l'égalité entre les travaux/transferts thermiques et l'aire du cycle. Un cycle moteur est représenté en se déplaçant dans le sens horaire et à l'inverse dans le sens trigonométrique pour un récepteur.

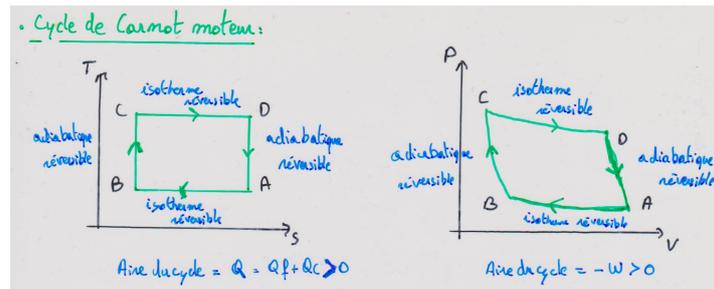


FIGURE 5 – Cycle de Carnot d'un moteur réversible.

3.4 Application 1 de machine ditherme

4 Récepteurs dithermes

4.1 Fonctionnement

Le système reçoit un travail et un transfert thermique d'une source froide qui se refroidit et réchauffe la source chaude.

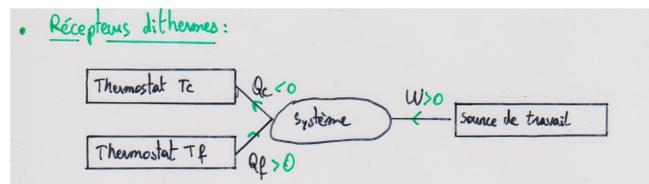


FIGURE 6 – Fonctionnement d'un récepteur ditherme.

4.2 Réfrigérateur/Climatiseur - Efficacité frigorifique

De même que le rendement d'un moteur ditherme, on peut, pour un récepteur définir de manière analogue l'efficacité. Pour un réfrigérateur ou un climatiseur, on parlera d'efficacité frigorifique e_f .

$$e_f = \frac{Q_f}{W} = -\frac{Q_f}{Q_f + Q_c} \text{ d'après le 1er principe.}$$

5. Par exemple le moteur de Stirling de rendement de Carnot mais polytherme (4 thermostats).

$e_f = -\frac{Q_f}{Q_f+Q_c} = -\frac{1}{1+\frac{Q_c}{Q_f}} \leq e_{f-Carnot} = \frac{1}{\frac{T_c}{T_f}-1} = \frac{T_f}{T_c-T_f}$ d'après Clausius. L'égalité est obtenue dans le cas réversible.

ODG(Réfrigérateur) : On suppose que la température de la pièce est $T_c = 293K$ et que pour le réfrigérateur à $T_f = 277K$. On trouve $e_{f-Carnot} = 17.3$.

4.3 Pompe à chaleur - Efficacité thermique

On parle ici d'efficacité thermique e_t que l'on définit :

$$e_t = \frac{-Q_c}{W} \leq e_{t-Carnot} = \frac{T_c}{T_c-T_f} \text{ ce que l'on montre de la même manière qu'avant.}$$

ODG(Pompe à chaleur) : On suppose que la température de la pièce est $T_c = 293K$ et que pour l'extérieur⁶ $T_f = 277K$. On trouve $e_{t-Carnot} = 19.5$.

Remarque : Dans le cas d'un récepteur ditherme l'efficacité peut être ≥ 1 contrairement au rendement pour un moteur ou une machine monotherme. Donc une pompe à chaleur est beaucoup plus efficace qu'un radiateur électrique. En pratique l'efficacité est de l'ordre de 4 ou 5, ce qui est toujours mieux que 1.

4.4 Application 1 de récepteur ditherme

5 Remarques de Pierre Vilain

- Initialement nous avons introduit après les récepteur ditherme (à 35 min à peu près) la présentation du moteur de Stirling + utilisation de la maquette + Calcul du travail fourni et rendement. On atteint le rendement de Carnot mais pas pour un moteur ditherme . Aussi ce moteur est peu utilisé donc à exclure.
- A la place présenter deux⁷ exemples concrets de moteur ditherme (Essence, Diesel), récepteur ditherme (réfrigérateur, chambre froide ou centrale thermique) et leurs cycles associés. La remarque sur les transitions de phase en prérequis prend ici du sens, car si l'on parle de cycle réfrigérant, centrale thermique il faut introduire un cycle basés sur des transitions de phase⁸, i.e. Rankine ou Hirn.
- Peut-être exclure le diagramme de Raveau⁹.
- Si l'orientation de la leçon se fait ainsi, on met en avant le côté pratique de la thermodynamique et il faut s'attendre à des questions en conséquence¹⁰.
- Les Ordres de grandeurs, notamment en introduction doivent être conservés.
- Ce qui a été fait excepté le diagramme de Raveau doit être conservé par nécessité dans cette leçon, on ne peut donner d'exemple sans donner les définitions. Peut-être que la partie théorique peut être optimisée après. Par exemple j'ai vu dans les anciennes leçons, que diagramme de Raveau, rendement, efficacité sont fusionnés et que des ODG sont donnés simultanément.

6. Ou un lac, piscine par exemple. Ces valeurs sont celles utilisées par les constructeurs.

7. Trois paraît un peu trop ambitieux.

8. Proposition perso : Pourquoi pas en même temps que Carnot ?

9. J'ai passé à peu près 5 min dessus, ça aide à la compréhension, mais on peut faire le reste sans.

10. C'est pas plus mal je trouve.

6 Modifications en conséquence

Donner des applications utilisés d'ouvrages de thermodynamique pratiques. Pierre vilain nous a conseillé le livre de Van Wylen, Sonntag, Desrochers (Thermodynamique appliqué) et c'est vrai que le chapitre 9 - Cycles de puissance et de réfrigération contient je pense tous les exemples d'applications mais après il faut faire un choix.