

LP14 - MACHINES THERMIQUES RÉELLES (L1)

21 juin 2019

Clémentine Rouvière & Corentin Pacary

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.
- **2014** : Les moteurs thermiques ne sont pas réalisés en visant uniquement un rendement optimal.
- **2009** : Les applications ne se limitent pas au moteur de Stirling et doivent rester concrètes.
- **2003** : Au delà de l'exposé classique que l'on trouve toujours, il faut discuter les causes d'irréversibilité. Par ailleurs, les moteurs réversibles ont forcément un fonctionnement lent : comment peut-on alors récupérer de la puissance avec une telle machine thermique ? Il est intéressant d'évoquer également la nature des fluides subissant les cycles.

Bibliographie

- ⚡ *Thermodynamique, une approche pragmatique*, **Cengel** → Très complet sur les aspects pratiques
- ⚡ *Thermodynamique*, **Diu** → Point théorie
- ⚡ *Le réfrigérateur*, **BUP 832, Martin** → Partie sur les machines frigorifiques
- ⚡ *Diagrammes thermodynamiques de fluides purs*, **BUP 894, Picard** → moins essentiel mais intéressant
- ⚡ *Physique PCSI*, **Grécias** → Point prépa

Prérequis

- Transformations
- Capacité calorifique, chaleur latente
- Gaz parfait
- Premier et deuxième principes (en système fermé et en système ouvert)

Table des matières

1	La notion de Machine Thermique	2
1.1	Définition du système	2
1.2	Utilisation des principes de la thermodynamique	2
1.3	Rendements et Coefficients de performance (COP)	3
2	Réfrigérateur	4
2.1	Principe de fonctionnement	4
2.2	Diagramme de Mollier et efficacité idéale	4
2.3	Processus irréversibles et conséquences	5
3	Les moteurs thermiques	6
3.1	Le moteur à essence	6
3.2	Le Cycle diesel	7
3.3	Centrales thermiques	7
4	Commentaires	9
5	Questions	10

Introduction

Au cours du XIXe siècle, l'essor de la thermodynamique a permis l'exploitation de sources de chaleur pour faire tourner des roues. C'est l'essor des machines à vapeur et le début de la révolution industrielle qui a tout accéléré. Depuis, on a améliorés ces procédés mais les machines thermiques font toujours partie de notre quotidien (moteurs, réfrigérateurs). Il est donc important de s'intéresser à leur fonctionnement, et cela permet de mettre en application les notions vues précédemment en thermodynamique.

1 La notion de Machine Thermique

1.1 Définition du système

Une machine thermique est un dispositif possédant des pièces mobiles effectuant des transformations cycliques (*machine*) mettant en jeu des échanges thermiques et du travail (*thermique*).

C'est souvent un fluide qui circule en circuit fermé qui subit ces transformations. Le système que l'on considère est donc les N molécules de ce fluide parcourant les tuyaux et les organes de la machine. Sur un cycle, comme le système est revenu à son état initial et que l'énergie interne et l'entropie sont des fonctions d'état :

$$\Delta U = 0 \qquad \Delta S = 0 \qquad (1)$$

1.2 Utilisation des principes de la thermodynamique

On écrit les deux premiers principes de la thermodynamique pour notre système subissant uniquement un travail total W et des échanges thermiques Q_i successifs avec des thermostats à température T_i .

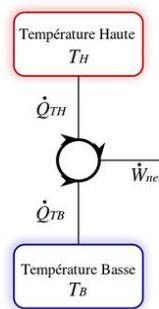


FIGURE 1 – Schéma général d'une machine ditherme. (Source : commons.wikimedia.org, libre de partage et d'utilisation)

$$\Delta U = W + \sum_i Q_i \qquad \Delta S \geq \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \qquad (2)$$

Machines monothermes

On note alors que pour une machine monotherme (en contact avec une seule source de chaleur) : $Q \leq 0$ et $W = -Q$ donc $W \geq 0$. Une machine monotherme ne peut pas être motrice, c'est l'énoncé de Kelvin du second principe.¹

Machines dithermes

On va donc s'intéresser à des machines dans lesquels les transformations mettent en jeu du travail W et deux échanges thermiques Q_C et Q_F avec deux thermostats tels que $T_F < T_C$. On a alors :

$$0 = W + Q_F + Q_C \qquad \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} \leq 0 \qquad (3)$$

On peut alors tracer deux droites dans un diagramme (Q_F, Q_C) , dit diagramme de Raveau, la droite $Q_C = -Q_F$ et $Q_C = -\frac{T_C}{T_F} Q_F$.

1. Voir Diu p104 pour d'autres compléments intéressants (échange entre sources de chaleur, impossibilité des mouvements perpétuels)

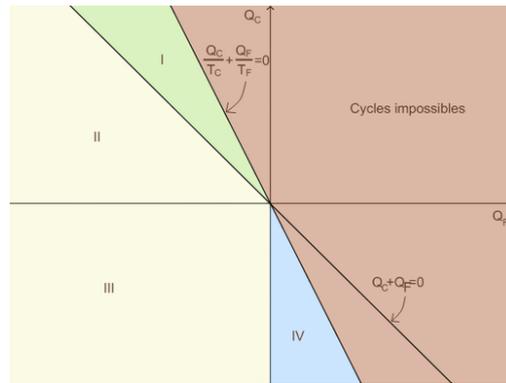


FIGURE 2 – Diagramme de Raveau (source Wikipédia, libre de partage et d'utilisation)

Interprétation

- Zone rouge : Impossible, ne respecte pas le second principe
- Zone I : $Q_F < 0$, $Q_C > 0$, $Q_C + Q_F > 0$ donc $W < 0$, On prend de la chaleur à la source chaude pour fournir du travail, Cas des moteurs
- Zone II : $Q_F < 0$, $Q_C > 0$, $W > 0$, peu intéressant car peut être réalisé sans fournir de travail (mais peut permettre de l'accélérer)
- Zone III : $Q_F < 0$, $Q_C < 0$, $W > 0$. On fournit du travail pour fournir de la chaleur, peu intéressant, se rapproche des moteur monothermes
- Zone IV : $Q_F > 0$, $Q_C < 0$, $W > 0$. On fournit du travail pour chauffer la source chaude et refroidir la source froide. Principe de la pompe à Chaleur ou du réfrigérateur.

1.3 Rendements et Coefficients de performance (COP)

On définit par ces termes, le rapport entre ce que l'on fournit et ce que que l'on récupère :

Pour un moteur : $\eta = \frac{|W|}{Q_C}$

Pour une pompe à chaleur : $COP = \frac{|Q_C|}{W}$

Pour un réfrigérateur : $COP = \frac{|Q_F|}{W}$

On utilise alors le premier principe : $W = -Q_C - Q_F$, et on a l'inégalité de Clausius-Carnot due au second principe : $\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} \leq 0$ donc on obtient que $\eta \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}$. L'égalité correspond au cas où il n'y a pas d'entropie créée, soit une transformation réversible. Pour une pompe à chaleur, on obtient $COP < COP^{rev} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$ et pour un frigo $COP < COP^{rev} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$. Il est à noter que le coefficient de performance ainsi obtenu est l'efficacité maximale de la machine ais que des phénomènes dissipatifs (frottements, diffusion thermique) vont encore diminuer le rendement.

Les machines thermiques ont donc une efficacité maximum qui est atteinte pour une série de transformations réversibles. C'est un cas idéal, le fluide peut par exemple parcourir le cycle de Carnot composé de deux isothermes et de deux isentropiques (fig 3). Cependant parcourir ce type de cycle est très long (pour avoir des transformations réversibles) et ne développe donc que peu de puissance. Les cycles décrits réellement correspondent à des machines dont le rendement maximal est nécessairement inférieur à celui de Carnot. On va donc voir comment décrire une machine thermique un peu plus réelle.

De plus, on a ici parlé du premier principe de la thermodynamique pour un système fermé, mais lorsque l'on étudiera une machine, on la décomposera en étapes et on appliquera à chacun le premier principe en réacteur ouvert : $\Delta h = w + q$.

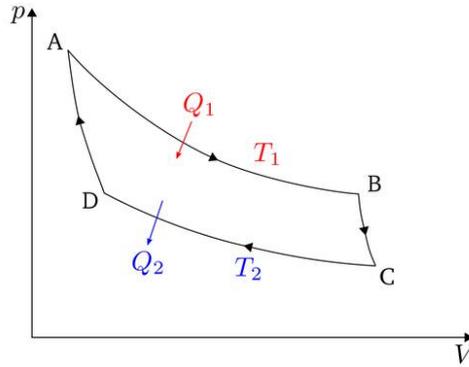


FIGURE 3 – Cycle de Carnot dans le diagramme de Clapeyron. (source : Wikipédia, libre de partage et d'utilisation)

2 Réfrigérateur

2.1 Principe de fonctionnement

On étudie ici les machines thermiques dithermes, on va donc rester dans ce cadre.

On cherche à faire un réfrigérateur, on souhaite donc se placer dans la partie IV du diagramme de Raveau : $Q_F > 0$, $Q_C < 0$, $W > 0$. On va fournir du travail pour refroidir l'intérieur du réfrigérateur et évacuer cette énergie dans l'air extérieur.

Or on sait que pour l'eau, il faut 4.18 kJ pour chauffer 1 kg d'eau, mais 2265 kJ pour en évaporer la même quantité. Ce résultat est assez général : le changement d'état permet un plus grand échange d'énergie qu'une élévation de température. L'évaporation est endothermique, la liquéfaction exothermique, le fluide doit donc s'évaporer au contact de la source froide et se condenser au contact de la source chaude.

Pour cela, il faut un fluide qui puisse s'évaporer à -10°C et se condenser à 25°C . Or on sait que les températures de vaporisation de de liquéfaction sont strictement égales à Pression donnée, il va donc falloir changer la pression entre les deux échangeurs thermiques, c'est la que l'on va fournir du travail. Il faut un compresseur avant le condenseur et un détendeur avant l'évaporateur.

On choisi le fluide calorifique R134a, qui est le 1,1,1,2-Tétrafluoroéthane ($F_3C - CH_2F$) car il se vaporise à -10°C à 1.64 bar et se liquéfie à 25°C à 6.65 bar, possède une capacité calorifique ($\simeq 1.3 \text{ kJ}$)² et une enthalpie de liquéfaction ($\simeq 225 \text{ kJ}$) relativement élevées, et ne détruit pas la couche d'ozone (mais est à effet de serre).

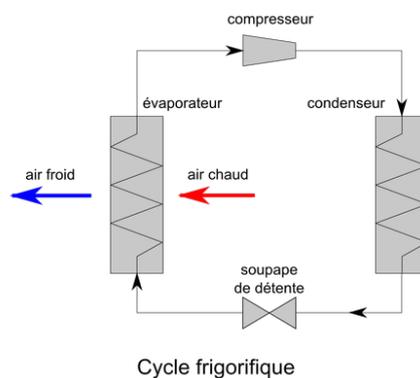


FIGURE 4 – Schéma de fonctionnement d'un cycle frigorifique. (Source : Wikipédia, libre de partage et d'utilisation)

2.2 Diagramme de Mollier et efficacité idéale

- 1 : On a une compression isentropique de 1.64 bar à 6.65 bar.
- 2 : Puis une liquéfaction à pression constante dans le condenseur.
- 3 : À la sortie du condenseur, le fluide subit une détente isenthalpique de 6.65 bar à 1.64 bar.

2. ref : THERMODYNAMIC PROPERTIES OF R134a (1,1,1,2-TETRAFLUOROETHANE) Marcia L. Huber and Mark O. McLinden

- 4 : On a évaporation à pression constante qui permet de refroidir le réfrigérateur. On cherche à retourner à l'état initial, et surtout à bien évaporer tout le fluide car le liquide (incompressible) pourrait endommager le compresseur.

On peut représenter le cycle parcouru par le fluide dans un diagramme de Mollier (H,ln(P)), qui permet de visualiser les différentes transformations.

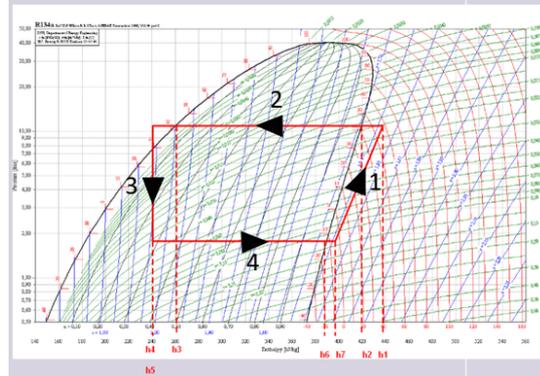


FIGURE 5 – Cycle idéal d'un réfrigérateur. (Source : <http://ecoconstruction.rpn.univ-lorraine.fr/res/R134correction.png>, libre de modification, de partage et d'utilisation.)

Cette représentation nous permet de calculer le COP du réfrigérateur. L'énergie utile est celle qui est reçue dans l'évaporateur : $q_F = \Delta h(4) = 158 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Le travail fourni est celui fourni au compresseur et au détendeur (ici seulement au compresseur) : $w = \Delta h(1) = 28 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Soit une efficacité $e = \frac{q_F}{w} = 5.64$. Pour 1 kJ d'énergie dépensée, on soutire 5.64 kJ à l'intérieur du réfrigérateur. Cependant cette valeur est à comparer avec l'efficacité maximale suivant un cycle de Carnot, elle est : $e^{rev} = \frac{T_F}{T_C - T_F} = 6.45$. On en est pas trop éloigné.

2.3 Processus irréversibles et conséquences

On a fait des hypothèses pour pouvoir écrire le cycle précédent. On a notamment négligé la perte de pression lors du passage du fluide dans la tuyauterie, le fait que le compresseur ne soit pas isentropique : il y des frottements donc diffusion de température et donc irréversibilité. On doit alors modifier le cycle obtenu. On constate alors une augmentation du travail à fournir pour obtenir le même refroidissement.

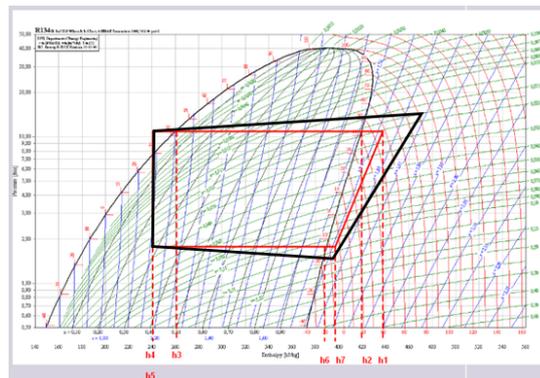


FIGURE 6 – Modification du cycle frigorifique en prenant en compte certaines causes d'irréversibilité. On devrait aussi avoir disparition des points anguleux. (Source : <http://ecoconstruction.rpn.univ-lorraine.fr/res/R134correction.png>, libre de modification, de partage et d'utilisation.)

Il est à noter qu'il existe de nombreuses améliorations possibles (Cengel parle de cycles frigorifiques innovants) comme la réfrigération en cascade ou la réfrigération à compression étagée.

↓ Nous avons étudié le fonctionnement d'un réfrigérateur réel simplifié. L'autre partie intéressante du diagramme de Paveau est la zone I, où l'on utilise l'énergie de la source chaude pour produire un travail. Il existe de nombreux types de telles machines : Moteur de Stirling, centrales thermiques (cycle de Rankine), propulsion par jet, cycle de Brayton (turbine à gaz), moteurs à combustion. (voir Cengel). Nous allons maintenant étudier un cycle utilisé pour les moteurs à combustion, le cycle du moteur essence.

3 Les moteurs thermiques

Mettre pas mal d'ODG par rapport aux voitures

3.1 Le moteur à essence

On va partir du fonctionnement du moteur à 4 temps : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Beau_de_Rochas

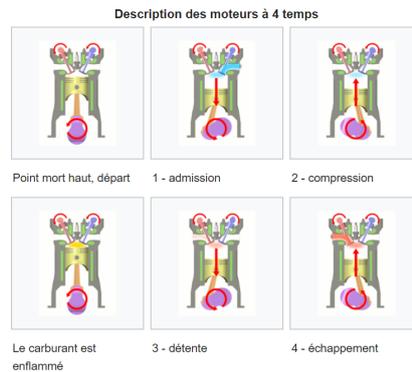
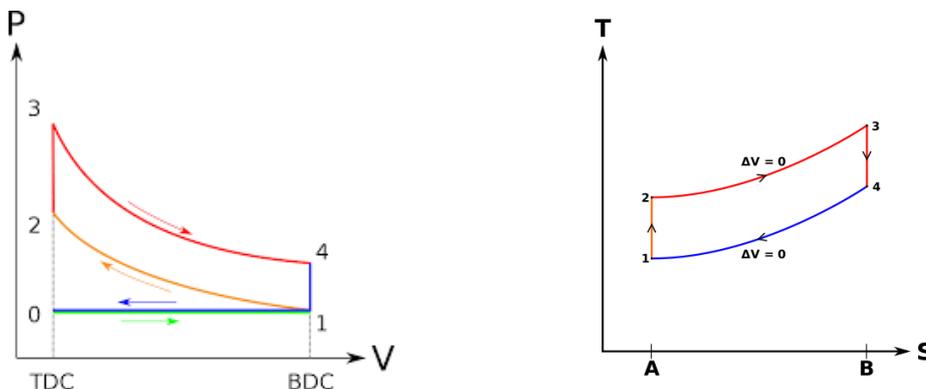


FIGURE 7 – Fonctionnement d'un moteur 4 temps. (source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Beau_de_Rochas, libre de réutilisation) ou voir Cengel p419

On modélise ce cycle en étapes :

- 0-1 : Admission à pression constante, de V_0 à V_1
- 1-2 : Compression supposée adiabatique et réversible (isentropique, on néglige les frottements et la diffusion thermique (temps assez courts))
- 2-3 : Combustion des gaz à volume constant (combustion rapide)
- 3-4 : Détente supposée adiabatique et réversible (isentropique)
- 4-1 : Ouverture de la soupape d'échappement, détente isochore
- 1-0 : Échappement à pression constante

On décrit le cycle :



(a) Cycle de Beau de Rochas ou Cycle Otto. BDC = (b) Cycle de Beau de Rochas ou Cycle Otto dans bottom dead centre (source : commons.wikimedia, le diagramme T-S (source : wikipédia, libre d'utilisation) ou voir Cengel p419

On cherche alors à calculer le rendement sous les hypothèses que l'air est assimilé à un gaz parfait : $\eta = \frac{-W}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$. Et on a :

- 0-1 et 1-0 se compensent
- 1-2 : isentropique, $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_0^{\gamma-1}$
- 2-3 : $Q_C = C_v(T_3 - T_2)$
- 3-4 : isentropique, $T_3 V_0^{\gamma-1} = T_4 V_1^{\gamma-1}$
- 4-1 : $Q_F = C_v(T_1 - T_4)$

donc $\eta = 1 + \frac{C_v(T_1 - T_4)}{C_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$ où $r = \frac{V_1}{V_0}$ est le rapport de compression. Plus ce rapport est grand, plus le rendement est grand³. Pour un moteur à essence typique, $r=8$, soit en prenant $\gamma = 1.4$, $\eta = 0.56$. On peut comparer au rendement du cycle de Carnot en contact avec des thermostats à températures : $T_C = 1200^\circ\text{C}$ et $T_F = 25^\circ\text{C}$, soit $\eta^{rev} = 1 - \frac{T_F}{T_C} = 0.8$. Les moteurs thermiques sont donc peu efficaces.

De même qu'avec le réfrigérateur, il y a des sources d'irréversibilité, ce qui déforme le cycle, le rendement est généralement de 25% à 30% on obtient :

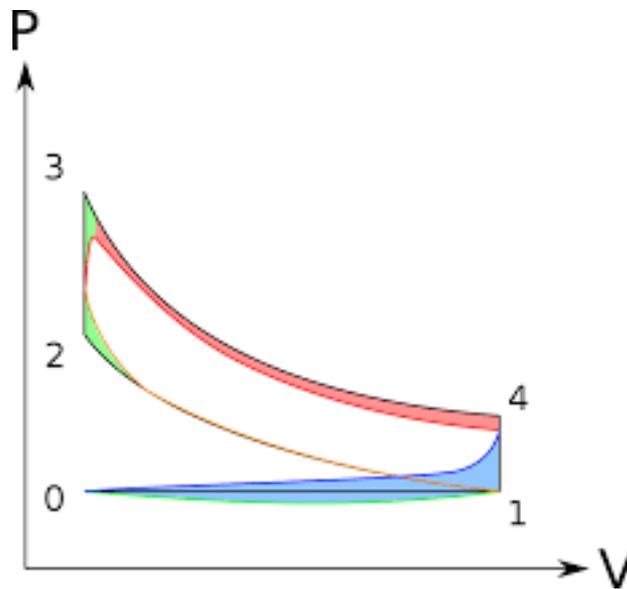


FIGURE 9 – Cycle de Beau de Rochas plus réaliste. (source : commons.wikimedia.org, libre de partage et d'utilisation), voir Cengel p419 pour un schéma plus complet

On voit apparaître un comportement récepteur lors de l'échappement-admission (d'où l'association par paires) et la réduction de l'aire (réduction de travail fourni par les frottements et la création d'entropie) (discussion poussée Cengel p 423).

3.2 Le Cycle diesel

On présente succinctement le cycle du moteur diesel, dont la différence principale avec le moteur à essence est que l'on comprime l'air seul, puis qu'on injecte le combustible, la combustion s'effectue en partie pendant la détente. Cela permet d'atteindre des rapports de compression plus élevés (jusqu'à 24). Donc même si il est à rapport égal moins efficace, au prix d'un moteur plus lourd et plus cher, on peut avoir un meilleur rendement avec un moteur diesel. On obtient typiquement des rendements de 35% à 45%. De plus, le diesel peut accepter des hydrocarbures plus lourds grâce à sa pression plus élevée.

3.3 Centrales thermiques

Si on a le temps on peut présenter le cycle de Rankine (Cengel p469, et il y a plein de complexification possible : surchauffe, régénération) où la propulsion jet (système ouvert) en une sorte d'approche documentaire.

3. Il est à noter qu'il existe une valeur maximale à ce taux de compression pour éviter que le mélange ne s'auto-allume pas avant que le piston ne soit en bout de course.

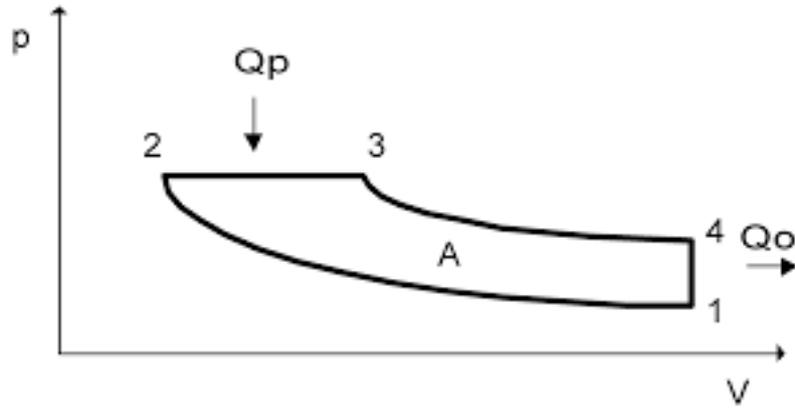


FIGURE 10 – Cycle diesel

Conclusion

Les machines thermiques, qui occupent pour le moment une place centrale dans nos vies peuvent être étudiée à l'aide des deux premiers principes de la thermodynamique. Ces machines peuvent être des pompes à chaleur, des réfrigérateurs ou des moteurs. Toutes ces machines ont une efficacité limitée par les phénomènes irréversibles, et il est à noter que l'utilisation des diagrammes thermodynamiques est très utile pour étudier des machines réelles.

4 Commentaires

Correction 2017 : "le jury souhaite actuellement une étude des systèmes réels, avec une discussion très précise des causes d'irréversibilité, donc du fonctionnement des différents organes constituant une machine réelle. Il est alors impératif de présenter le premier principe généralisé, dit abusivement industriel, valable pour des fluides en écoulement stationnaire et qui privilégie l'emploi de la fonction d'état enthalpie massique. Il en découle alors tout naturellement l'usage et l'explication du digramme de Mollier ($\log P, h$) dits des frigoristes".

Correction 2017 : "Il ne faut alors pas avoir peur de passer à des applications numériques très concrètes afin d'évaluer les contributions des différentes transformations et divers organes ... On peut ainsi discuter très avantageusement de la validité des différentes hypothèses du modèle choisi et de l'optimisation de certains paramètres caractéristiques de la machine."

Etre plus clair sur la notion de système fermé/système ouvert, dans quels cas elles interviennent et comment les traiter. Entrer plus dans les détails pour les débits. Être plus clair sur le passage en système ouvert.

Préciser les hypothèses de travail.

Marquer la différence entre rendement, efficacité, COP. Expliquer pourquoi on utilise pas le rendement partout.

Attention à la cohérence des notations (sur les schémas, entre les parties).

Exploiter à fond les diagrammes (en particulier le diagramme de Mollier, très important). Montrer toutes les infos qu'on peut en tirer (variation d'entropie, titre avec le théorème des moments...), pas seulement regarder la variation d'enthalpie, sans forcément faire tous les calculs.

Il faut absolument préciser d'où vient l'énergie (intérieur/extérieur)

On ne parle pas de "chaleur" dans les programmes mais de "transfert thermique"

Les profs de prépa sont à fond sur les diagrammes!!!

Mettre des ODG en intro (ou conclu) sur les rendements.

Capacités thermiques : préciser si molaires ou massiques (mettre un n ou m)

Moteur : faire le lien avec des grandeurs concrètes (chevaux, cylindrée, tour/min...)

Manques : rigueur sur explications des transferts énergétiques ; démontrer ou justifier le premier principe en système ouvert et l'utilisation industrielle, préciser les hypothèses (hypothèses sur un transparent), le domaine d'application. Bien faire la distinction fermé/ouvert. Faire directement le premier et deuxième principe en système ouvert.

Le Dunod est bien!!

5 Questions

Causes d'irréversibilité : s'agit-il de frottements mécaniques ou de problèmes de diffusion thermique ?

Les moteurs réversibles ont forcément un fonctionnement lent : comment peut-on alors récupérer de la puissance avec une telle machine thermique ?

Pourquoi certaines machines utilisent-elles des fluides subissant des changements d'état ?

Vous avez dit qu'une machine thermique est un modèle thermodynamique de transformations cycliques. Est-ce que c'est toujours le cas ?

Comment on peut faire en pratique pour s'approcher d'un cycle réversible ?

Expliquer le principe d'un réfrigérateur. Pourquoi il y a besoin de fournir du travail ?

Écrire le 1er principe en écoulement permanent.

Comment fonctionnent les moteurs électriques ? Connaissez-vous des modèles ?

Le rendement est-il le seul moyen d'étudier l'intérêt d'une machine thermique ? Quels sont autres moyens ?

Est-il vraiment intéressant pédagogiquement de parler des cycles réels par rapport aux théoriques ? Vaut-il mieux commencer par les cycles réels pour amener ou théoriques ou l'inverse ?

Dans le diagramme de Raveau, détailler le cas $W < 0, Q < 0$ (ni moteur, ni réfrigérateur). Est-ce vraiment inutile ? Dans quel cas ça peut être intéressant ?

Pourquoi le rendement maximal est-il inférieur à 1 ? Quels autres moteurs n'ont pas cette limitation ?

Industriellement, préfère-t-on des cycles rapides ou lents ?

La durée des transferts thermiques est-elle à minimiser ou bien maximiser ?

Peut-on faire une machine frigorifique en l'absence d'un travail extérieur : $W = 0$? Quel doit être le signe de l'échange avec la troisième source ? C'est possible en pratique ou ça n'existe que sur le papier ? oui, il suffit de remplacer par une troisième source de 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) Système en contact avec le système étudié, beaucoup plus grand et avec une énergie plus grande.

Est-ce qu'il y a des sources d'irréversibilité au niveau du thermostat ? Oui, c'est en fait une des sources d'irréversibilité les plus importantes, car le système n'est jamais à la même température que le thermostat, donc échanges d'énergie, visible sur le cycle de Mollier.

définition du rendement/efficacité : pour les récepteurs, comment se fait-il qu'elle soit supérieure à 1 ? rapport de 2 grandeurs effectivement reçues (Q_f et W pour le frigo), et non une grandeur fournie et une grandeur reçue comme on en a l'habitude.

Comment définit-on la température thermodynamique ? y en a-t'il d'autres ?

Définition de la chaleur ? Quantité d'énergie thermique échangée entre une source chaude et une source froide ;

Discuter de l'importance du nombre de tour/min pour un fonctionnement périodique des machines ?

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 ?

Les courbes iso-titres sont-elles indispensables ?

Sur les cycles réels donner la signification des transformations de « déchauffe », « surchauffe »...

Tu as mis des points sur Q et W : qu'es-ce que ça veut dire ? Mais tu n'as jamais parlé de débit, est-ce que c'est une notion importante ? Massiques

On fait des raisonnements sur des systèmes ouverts, comment se ramener à des systèmes fermés ?

Est-ce que les machines monothermes sont utiles ? Différence radiateur/pompe à chaleur ? Oui, radiateur.

Bilan d'entropie et d'énergie : est-ce que ça change quelque chose si le thermostat n'est pas idéal ? s'il y a changement d'état ? Thermostat idéal : il faut intégrer l'entropie d'échange sur tout les thermostat. Changement d'état : il faut prendre en compte la chaleur latente.

Rendement, efficacité, COP : c'est tout pareil ? Nope, efficacité et COP comparent deux quantités récupérées (peuvent être plus grand que 1), alors que rendement = rapport récupérée/fournie.

Pédagogie : pourquoi avoir choisi de présenter en détail le réfrigérateur ? Tout le monde en a un, cycle relativement simple, permet d'illustrer pas mal de notions (échanges d'énergie mis en jeu, COP), et d'introduire le diagramme de Mollier, qui est un diagramme important..

Diagramme de Mollier : que donne l'aire du cycle ? Est-ce que c'est intéressant ? Pas très simple ici, mais un autre diagramme qui est beaucoup utilisé : (T,S), permet de discuter plus finement les variations d'entropie.

Diagramme de Mollier : est-ce que tu peux commenter la forme des isothermes ? Phase gazeuse : quasi des isenthalpiques (verticales)
Gaz réel, à pression faible, on tend vers un gaz parfait, or la loi de Joule dit que l'enthalpie ne dépend que de la température (pour un gaz parfait).

Diagramme de Mollier : détente isenthalpe, quelle information peut-on en tirer ? Exploitation du théorème des moments pour déterminer le titre.

Comment améliorer l'efficacité d'un réfrigérateur ?

Culture gé : pourquoi on appelle l'enthalpie H ? Vient de l'allemand ("température")

Culture gé : qu'est-ce qui est apparu en premier, thermo ou machines thermiques ? Machines thermiques

Culture gé : qui en a parlé en premier ? Carnot (Feynman : un des seul cas où les techniques de l'ingénieur ont dépassé la physique).

Autres cycles ? Rendements associés ? Rankine (centrales thermiques), Brayton (projection par jet), Erikson, Stirling...

Machines avec rendements supérieurs ? Machines électriques, avec effet Peltier/Seebeck.

Moteur à essence ou diesel : lequel est le plus intéressants ? Moteur à essence plus puissant mais plus polluant (deux temps : tondeuse à gazon, quatre temps : voiture), limité par rapport de compression. Diesel : rapport de compression plus faible donc rendement plus élevé, moins besoin de raffiné, mieux de faire des longs trajets pour éviter l'encrassement

Conversion chevaux/kJ (écrit en chevaux sur la carte grise) ?

A quoi correspond la cylindrée ?

Nombre de tour/min pour une voiture ? A quoi ça correspond ? Tour/min : nombre de cycles.

Comment fait-on l'étincelle dans les moteurs ? Bobine, induction

Comment fonctionne les moteurs électriques ?

Moteur de Stirling : Si je vous vend un moteur de Stirling réversible vous êtes contente ? Quelles sont les causes de pertes de rendement pour le moteur de Stirling ? Comment on pourrait améliorer le régénérateur dans le moteur de Stirling pour avoir un meilleur rendement ? Quel est l'intérêt (pédagogique) de présenter le moteur de Stirling ? Pourquoi cette application et pas une autre ? Quelles différences entre le moteur de Stirling et un moteur de voiture ? J'ai dit que le rendement de 0.5 était mauvais. Ordre de grandeur du rendement des machines thermiques usuelles ? Par rapport à quoi 0.5 est-il un mauvais rendement ? Le moteur de Stirling présentait à l'époque de sa découverte le meilleur rendement parmi les autres moteurs. Pourtant il n'a pas eu beaucoup d'applications, à part les américains qui en utilisent dans leurs missions d'explorations spatiales. Pourquoi ? Peut-on facilement modifier le couple fourni par le moteur de Stirling (à puissance fixée) ?