

# LP 14 : Machines thermiques réelles

**Rapport du jury:** 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. Les diagrammes thermodynamiques, exploités dans les programmes de CPGE, sont trop rarement présentés et utilisés. Les moteurs thermiques ne sont pas réalisés en visant uniquement un rendement optimal. Les applications ne se limitent pas au moteur de Stirling et doivent rester concrètes. Il faut discuter les causes d'irréversibilité : s'agit-il de frottements mécaniques ou de problèmes de diffusion thermique ? Par ailleurs, les moteurs réversibles ont forcément un fonctionnement lent : comment peut-on alors récupérer de la puissance avec une telle machine thermique ?

**Niveau :** Licence / CPGE (MPSI/PTSI/PCSI)

## Pré-requis :

- 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique
- Diagrammes thermodynamiques (P,V) , (T,S) ...
- Changements d'état

## Bibliographie :

- François MARTIN. «Le réfrigérateur». In : Bulletin de l'union des professeurs de physique et de chimie 832 (2001)
- Théorie générale des machines – P. Arques
- <https://sites.google.com/site/laurentlepetitdescartes/cours2013> (Chap 3 et 4 de thermo, pour la théorie)
- [https://www.banquept.fr/documents/2019/ph\\_b\\_th\\_2019\\_pt.pdf](https://www.banquept.fr/documents/2019/ph_b_th_2019_pt.pdf) (certaines valeurs viennent de là)

## Introduction :

Les machines thermiques, par leur conception et la recherche d'améliorations, sont à l'origine de l'émergence de la thermodynamique. Elles ont marqué l'une des plus grandes révolutions de l'histoire humaine : celle de la révolution industrielle où l'on cherchait à construire les machines les plus performantes.

En effet, ce sont Carnot, Clausius et Kelvin qui ont posé les bases de la thermodynamique en énonçant les 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique à l'issue de leurs travaux sur l'étude des machines thermiques.

Désormais, on utilise les machines thermiques à différentes fins : pour se chauffer, pour apporter de la fraîcheur, pour nous déplacer...Elles sont ainsi devenues indispensables à notre quotidien.

Dans cette leçon, nous allons voir le fonctionnement de ces machines thermiques et mener l'étude de leurs performances. Pour cela, on va s'intéresser, plus particulièrement à la machine frigorifique.

## I. Théorie des machines thermiques

### 1) Généralités

### Définition de machine thermique :

Dispositif fonctionnant en cycles dans lequel un fluide échange de l'énergie par transfert thermique et/ou travail

### **Rôle : Convertir une forme d'énergie en une autre.**

- Un moteur convertit de l'énergie thermique en travail
- Réfrigérateur/pompe à chaleur convertissent du travail en énergie thermique

Rappel des conventions de signe des échanges :

On considère  $Q$ , le transfert thermique

$W$ , le travail

- $> 0$ , si l'énergie est reçue par le système
- $< 0$ , si le système donne de l'énergie vers l'extérieur

On étudie un système mis successivement en contact avec plusieurs thermostats de températures  $T_i$ . Entre chaque thermostat, on attend que le système ait atteint l'équilibre thermique.

On appelle  $Q_i$ , le transfert thermique reçu par le système de la part du thermostat  $T_i$ .

On considère que le système effectue un cycle.

### **On applique le 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> principe :**

Au cours d'un cycle de transformation :

**1<sup>er</sup> principe** : l'énergie interne  $U$  est une fonction d'état

$$\Rightarrow \Delta U_{\text{cycle}} = 0$$

$$\Rightarrow W + \sum Q_i = 0$$

(Préciser qu'on considère qu'on peut négliger  $E_c$  et  $E_p$ , c'est pourquoi on applique le 1<sup>er</sup> principe uniquement sur  $U$ )

**2<sup>nd</sup> principe** : L'entropie  $S$  est une fonction d'état

$$\Rightarrow \Delta S_{\text{cycle}} = 0$$

$$\Rightarrow S_{\text{éch}} + S_{\text{créé}} = 0$$

$$\text{D'où : } S_{\text{éch}} = -S_{\text{créé}}$$

$$\text{Par ailleurs } S_{\text{éch}} = \sum_i \frac{\int \delta Q_i}{T_i} = \sum_i \frac{1}{T_i} \int \delta Q_i = \frac{\sum Q_i}{T_i}$$

### **Important**

On peut simplifier ainsi l'expression de  $S_{\text{éch}}$  car on considère que notre système est en contact avec des thermostats ie les  $T_i$  sont constantes !

**Rappel, définition thermostat** : Un thermostat est un système : de température  $T_{th}$  constante, qui n'échange que du transfert thermique (et donc pas de travail) et qui est toujours en équilibre thermodynamique interne.

Pour pouvoir être considéré comme thermostat par rapport à un système, le thermostat doit avoir une capacité thermique beaucoup plus grande que celle du système. Comme le thermostat est toujours à l'équilibre, toute évolution peut être considérée comme réversible de son point de vue à lui.

On a donc :  $\frac{\sum_i Q_i}{T_i} = -S_{crée} \Rightarrow \frac{\sum_i Q_i}{T_i} \leq 0$  **Inégalité de Clausius**

## 2) Machines dithermes

### a) Nécessité

Diapo p2 : un seul thermostat  $T_0$  recevant  $Q_0$

1<sup>er</sup> principe :

$$\Delta U = W + Q_0 = 0 \Rightarrow W = -Q_0$$

2<sup>nd</sup> principe :

$$\Delta S = S_{éch} + S_{crée} = S_{crée} + \frac{Q_0}{T_0} = 0$$

$$\Rightarrow S_{crée} = \frac{-Q_0}{T_0} \geq 0 \Rightarrow Q_0 \leq 0$$

$$\text{Et } \Rightarrow W = -Q_0 \geq 0$$

Diapo p3 : pour récapituler le sens des échanges.

Ainsi, une machine thermique monotherme ne peut QUE recevoir du travail et fournir à l'extérieur du transfert thermique. (On retrouve ce fonctionnement, par ex pour les radiateurs électriques)  
Mais, cela est très restrictif □ Nécessaire d'avoir une machine thermique ditherme.

### b) Généralités

2 catégories de machines dithermes :

- Moteurs thermiques
- Machines dithermes réceptrices (machines frigorifiques, pompes à chaleur..)

Diapo p4

Dithermes = reliées à deux thermostats

- Thermostat de T + élevée = source chaude de T constante  $T_c$
- Thermostat de T + basse = source froide de T constante  $T_F$

$$\Rightarrow T_c > T_F$$

$Q_c$ ,  $Q_F$  et  $W$  sont les échanges réalisés pendant un cycle.

Inégalité de Clausius pour une machine thermique ditherme :  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$

## 3) Efficacité : Cas d'une machine frigorifique

Définition de l'efficacité :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}}$$

Ici, on s'intéresse à une machine ditherme réceptrice : elle fonctionne entre deux sources (une froide, une chaude) et reçoit du travail du milieu extérieur.  
Plus particulièrement, au cas d'une machine frigorifique.

### Diapo p5 : sens des échanges

Machine frigorifique : Elle utilise du travail ( $W > 0$ ) pour prélever du transfert thermique à la source froide (intérieur du frigo) d'où  $Q_F > 0$  et rejette du transfert thermique à la source chaude (cuisine par exemple) d'où  $Q_C < 0$ .

Ainsi,  $\eta = \frac{Q_F}{W}$

1<sup>er</sup> principe sur un cycle :  $W = -Q_C - Q_F$

$$\Rightarrow \eta = \frac{Q_F}{-Q_C - Q_F} = \frac{-1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}}$$

Inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$$

$$\Rightarrow \frac{Q_C}{Q_F} \leq \frac{-T_C}{T_F}$$

$$\Rightarrow \frac{-1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} \leq \frac{-1}{1 - \frac{T_C}{T_F}}$$

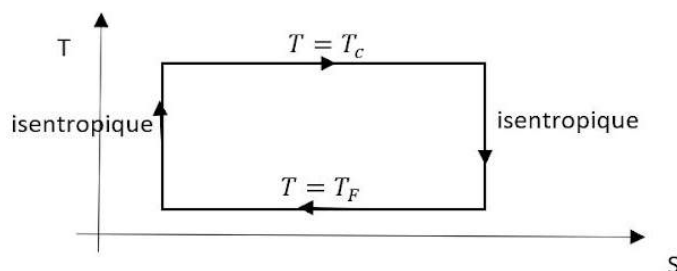
D'où :  $\eta \leq \frac{T_F}{T_C - T_F} = \eta_{carnot}$

L'efficacité de Carnot est l'efficacité obtenue pour un cycle réversible (si  $S_{crée} = 0$ ), càd dans le cas d'une machine idéale.

En effet, on obtient une efficacité max dans le cas d'un cycle réversible, ce qui implique que la température du système soit uniforme (même que celle du thermostat) d'où une transformation isotherme.

Entre ces transformations durant lesquelles on a des échanges thermiques, on doit avoir des transformations sans échanges thermiques = transformations adiabatiques (on rappelle que adiabatique + réversible = isentropique)

Diagramme (T,S) :



### Transition :

En réalité, il existe de nombreuses sources d'irréversibilité. Il est impossible d'être dans ce cas idéal, le modèle est trop simpliste.

Pour mener une étude plus efficace des machines thermiques réelles, on doit utiliser les lois de la thermodynamique et des outils tels que le diagramme des frigoristes.

On va s'intéresser ici au cas de la machine frigorifique.

---

## II. Etude d'une machine frigorifique réelle

### 1) Choix du fluide frigorigène

But d'une machine frigorifique : refroidir les aliments et les maintenir à une température constante. Disons  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Pour refroidir le local, on doit lui extraire de l'énergie. Ici, on doit utiliser l'importance énergétique des changements d'état, c'est pourquoi on va provoquer la vaporisation d'un fluide. En effet, au cours de sa vaporisation, le fluide absorbe de l'énergie sous forme de chaleur ce qui refroidira le local.

Pour que les échanges d'énergie se fassent dans de bonnes conditions, le fluide, qu'on appelle fluide frigorigène, doit se vaporiser à une température plus basse que celle que doit avoir le local, donc moins de  $-10^{\circ}\text{C}$ .

(par exemple le  $\text{NH}_3$ ,  $T_{\text{vap}} = -30^{\circ}\text{C}$ , mais dangereux)

En outre, pour que l'énergie soit cédée à l'air ambiant, le fluide doit être à une  $T > T_{\text{amb}}$  ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ )

Autres critères à prendre en compte :

- Inflammabilité : Certaines substances susceptibles de faire d'excellents frigorigènes ont été rejetés en raison de leur caractère combustible.
- Corrosion des métaux et matières plastiques
- Stabilité avec la température et dans le temps
- Environnement : Influence sur couche d'ozone et effet de serre (ex : on ne doit pas utiliser de composés chlorés)

Finalement, on retient le R134a 1,1,1,2 tétrafluoroéthane ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ )

(attention, il n'affecte pas la couche d'ozone mais affecte le réchauffement climatique donc pas terrible non plus!)

#### Diapo p6 : caractéristiques du R134a

On va utiliser une température de vaporisation  $T_{\text{vap}} = -15^{\circ}\text{C}$  avec une pression de  $1.64 \text{ bar}$

Pour recondenser le fluide (on veut  $T > 20^{\circ}\text{C}$ ) : donc, on prend :  $T_{\text{cond}} = 25^{\circ}\text{C}$  ce qui correspond à une pression de  $6.65 \text{ bar}$ .

### 2) Principe de fonctionnement

#### Diapo p7 : Schéma du fonctionnement

On vaporise le fluide R134a initialement à la pression de  $1.64 \text{ bar}$ .

Le fluide absorbera de l'énergie provenant du local et le refroidira □ on le fait circuler dans un échangeur de chaleur appelé évaporateur.

Après évaporation, le fluide est recyclé pour des raisons de non pollution et d'économie : il doit donc être ramené dans son état initial (il doit restituer l'énergie emmagasinée lors de la vaporisation et il faut le condenser)

**Condenseur** :  $25^{\circ}\text{C}$  à la pression  $6.65 \text{ bar}$  .

Cependant le fluide sort de l'évaporateur sous forme gazeuse à  $P = 1.64 \text{ bar}$  . Or, il faut l'amener au condenseur à la pression de  $6.65 \text{ bar}$  □ **Compresseur** pour comprimer le gaz.

Une fois sorti du condenseur, le fluide liquide est à la pression de  $6.65 \text{ bar}$  . Pour boucler le cycle, on doit le ramener à l'évaporateur à  $1.64 \text{ bar}$  □ **Détendeur** pour diminuer la pression.

On va désormais suivre l'évolution du fluide à partir du diagramme des frigoristes  $\log(P) = f(H)$  .

### 3) Diagramme des frigoristes

Ce diagramme est diagramme très complet relatif au R134a où apparaissent les courbes isothermes, isentropiques, isovolumiques et isotitres (titre en vapeur constant).

*Important : bien décrire où apparaissent les différentes courbes et comment lire le diagramme !!(voir diapo p8)*

Rappel du bilan énergétique du fluide après la traversée d'un élément de machine en écoulement permanent (avec un échangeur thermique et une partie mécanique mobile)

$$h_s - h_e = w + q$$

Avec :

$w$  = travail massique de la partie mobile

$q$  = échange thermique dû à l'échangeur thermique

#### Diapo 9 à 13

- Compression 1 □ 2 : On passe de  $1.64 \text{ bar}$  à  $6.65 \text{ bar}$  .

Pour se placer au niveau de l'enthalpie, on se place sur la courbe de rosée car on suppose que tout est gazeux.

Les phénomènes sont si rapides qu'on peut supposer que la compression se fait sans échanges thermiques avec l'extérieur : transformation adiabatique  $\Rightarrow q_{comp} = 0$

Bilan : Le compresseur fournit de l'énergie au fluide :  $\Delta h_{1 \rightarrow 2} = w_{comp} > 0$

De plus, on néglige la viscosité du fluide, les frottements et la conduction thermique. Dans ces conditions, la transformation peut être considérée comme réversible.

Adiabatique + réversible = isentropique ( $\Delta S = 0$ )

On suit l'isentropique jusqu'à l'intersection avec l'isobare à  $6.65 \text{ bar}$  .

- Condensation 2 □ 3

L'échangeur ne comporte pas de parties mobiles donc l'échange d'énergie se fait que sous forme de transfert thermique (pas de  $w$ )

Bilan :  $\Delta h_{2 \rightarrow 3} = q_{condensateur}$

On néglige dans la tuyauterie, les pertes de pression dues à la viscosité du fluide et aux frottements. La transformation peut être considérée comme isobare.

On suit l'isobare à 6.65 bar, on va jusqu'à  $x = 0$  (ie jusqu'à l'intersection avec la courbe d'ébullition.)

- Détente 3→4

On fait chuter la pression de 6.65 bar à 1.64 bar.

Pas de partie mobile :  $w_{dét} = 0$

Ce n'est pas dans un détendeur que le fluide doit échanger de l'énergie sous forme de chaleur. On l'isole thermiquement de l'extérieur.  $q_{dét} = 0$

Bilan :  $\Delta h_{3 \rightarrow 4} = 0$  (isenthalpique)

On descend verticalement jusqu'à l'isobare à 1.64 bar. On remarque que cela entraîne une vaporisation partielle (35% de vapeur, 65% de liquide)

- Evaporation 4→1

Echangeur (idem que pour la condensation)

Bilan :  $\Delta h_{4 \rightarrow 1} = q_{\text{évaporateur}}$

La vaporisation peut être considérée comme isobare.

CCL : Le fluide décrit deux isobares, une isentropique et une isenthalpique

[Diapo p13](#)

#### 4) Efficacité

Dans notre cas, on a :  $\eta = \frac{q_{\text{évaporateur}}}{w}$

Ici, l'énergie utile est l'énergie reçue par le fluide dans l'évaporateur (= celle arrachée au local à refroidir)

On a vu que :  $q_{\text{évaporateur}} = \Delta h_{4 \rightarrow 1} = h_1 - h_4$

Sur le diagramme (voir [diapo p14](#)) :

$$h_4 = 235 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$h_1 = 388 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\Rightarrow q_{\text{évaporateur}} = 153 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Ici, énergie coûteuse est celle mise en jeu au niveau du compresseur.

On a vu que :  $w_{\text{comp}} = \Delta h_{1 \rightarrow 2} = h_2 - h_1$

Sur le diagramme (voir [diapo p14](#)) :

$$h_2 = 417 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$h_1 = 388 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\Rightarrow w_{comp} = 29 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\text{D'où } \eta = \frac{153}{29} = 5.28$$

Pour 1 kJ d'énergie dépensée à entraîner le compresseur, le fluide arrache 5.28 kJ d'énergie à la chambre froide.

### Cas d'un réfrigérateur idéal :

$$\text{On a vu que : } \eta_c = \frac{T_F}{T_c - T_F} = 6.45 \quad (T_F = -15^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad T_c = 25^\circ\text{C})$$

On n'est pas si éloignés !

Discussion : En réalité, la compression subie par le fluide n'est pas réversible !! On n'a pas une isentropique entre 1 et 2.

On peut définir le rendement isentropique  $\eta_{is} = \frac{w_{comp}}{w_{comp \text{ réel}}}$  (qui illustre la création d'entropie)

$$\text{En considérant } \eta_{is} = 0.75 \Rightarrow w_{comp \text{ réel}} = 39 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

On a un nouveau cycle (voir **diapo p15**) et un nouveau rendement plus faible :  $\eta = \frac{153}{39} = 3.9$

De plus, on veut que le fluide se soit complètement vaporisé avant d'entrer dans le compresseur, donc on continue à chauffer le fluide dans l'évaporateur après qu'il ait atteint la courbe de rosée. En effet, le compresseur peut être endommagé en présence de liquide. Cette surchauffe est une sécurité.

On s'assure aussi qu'il soit complètement condensé avant de sortir du condenseur : on continue de refroidir après qu'il ait atteint la courbe d'ébullition (= sous-refroidissement)

On a également des chutes de pression (pertes de charge) dans les échangeurs thermiques.

D'où le nouveau cycle (cycle réel) : **diapo p16**

### Conclusion :

On a vu au cours de cette leçon comment il était possible de décrire le fonctionnement et les performances d'une machine thermique, au travers de l'inégalité de Clausius.

L'étude des cycles et des diagrammes nous permet de tirer des conclusions sur l'efficacité/rendement des machines thermiques notamment concernant la machine frigorifique avec le diagramme des frigoristes.

Attention car pour plus de facilité dans les calculs, on doit faire des approximations nous donnant des rendements + élevées que ceux de la réalité. (le rendement de Carnot est utopiste!!)

En outre, désormais, les machines thermiques doivent faire face à de nouveaux enjeux outre l'efficacité, par exemple l'environnement.

### Questions et remarques :

-Différence entre rendement et efficacité :

On parle d'efficacité car elle peut être supérieure à 1 (contrairement au rendement).



et la raison en est que le travail ne sert qu'à obliger les échanges thermiques à se faire dans un sens anti-naturel.

En effet, en tenant compte du sens réel des échanges :  $W + Q_c + Q_F = 0$  devient :

$(W) + (Q_F) = (Q_c)$ , mais rien n'empêche  $(Q_F)$  d'être plus grand que  $(W)$ .

-Définition d'une fonction d'état : indépendant du chemin suivi.

-Passer assez vite sur la partie I ! Limite on peut la faire dans le cadre de l'étude de la machine frigorifique si manque de temps.

-Éventuellement faire la démo sur le bilan d'enthalpie dans une machine en écoulement permanent. Mais bien le faire attention! (cf biblio n°3)

- Il possible aussi de présenter une pompe à chaleur ou encore les moteurs.

-