

# CHAP 24 : MACHINES THERMIQUES

Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.	<p>Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.</p> <p>Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.</p> <p>Définir un rendement ou une efficacité et les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.</p> <p>Justifier et utiliser le théorème de Carnot.</p> <p>Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.</p> <p>Expliquer le principe de la cogénération</p>
--	--

## Rapport de Jury :

Énergie interne ou enthalpie sont souvent confondues et l'étude des changements d'état régulièrement mal menée. Il est alors évident que les candidats qui savent citer et utiliser correctement les théorèmes du cours sont valorisés

## I Grandeurs caractérisant les échanges d'énergie avec l'extérieur

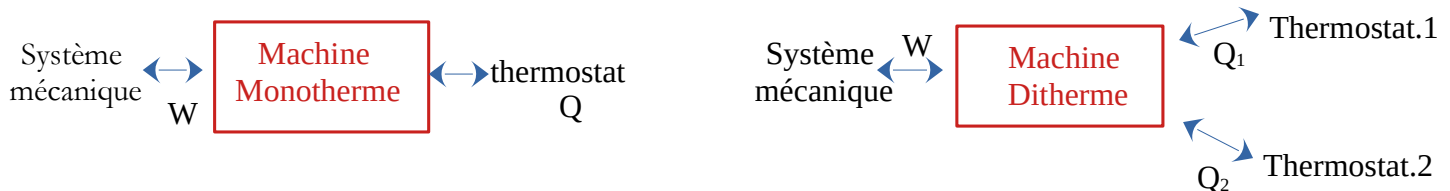
### I.1) Définition d'une machine thermique

On considère un système qui effectue une **transformation cyclique** (c-a-d l'état final est le même que l'état initial) . On dit que le système est une machine si le cycle peut recommencer et se poursuivre à l'infini.

Lorsque la machine reçoit de l'énergie **uniquement sous forme de travail et de chaleur** on la qualifie de **thermique** ( **À la différence des machines électromagnétiques comme les moteurs à courant continu** )

Remarque :

On distingue souvent deux types de machine en fonction du nombre de thermostat en contact avec la machine :



### I.2) Nature algébrique du travail et du transfert thermiques

**Par convention :**

- $W_{\text{cycle}} > 0$  si la machine reçoit réellement de l'énergie sous forme de travail  
ex : réfrigérateur et Pompe à chaleur
- $W_{\text{cycle}} < 0$  si la machine fournit/cède réellement de l'énergie sous forme de travail à l'extérieur  
ex : moteur
- La convention est identique pour le transfert thermique Q

**Rappel :** le travail et le transfert thermique ne sont pas des fonctions d'état, W et Q ne sont pas défini à un instant donné on écrit donc **jamais**  $\Delta W$  ou  $\Delta Q$  mais W et Q

Très souvent , le seul travail à prendre en compte et et le travail des forces pressantes

### I.3). Bilan du travail des forces de pression sur un cycle complet

Pour un machine constitué d'un G.P avec une évolution cyclique :

- si le cycle est parcouru dans le **sens trigonométrique** , le gaz **reçoit réellement** de l'énergie sous forme de travail  
 $W_{\text{cycle}} > 0$
- si le cycle est parcouru dans le **sens horaire**, le gaz **fournit réellement** de l'énergie sous forme de travail

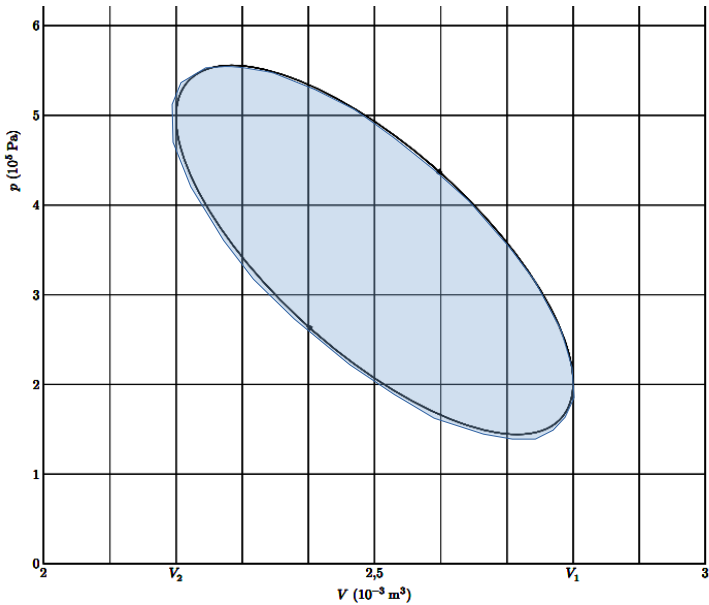
$$W_{\text{cycle}} < 0$$

**I.4) Travail reçu lors d'un cycle**

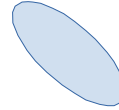
La valeur absolue du travail de la résultante des forces pressantes sur un cycle  $|W_{cycle}|$  correspond à l'aire du cycle dans le diagramme de Watt (  $P=f(V)$  )

$$|W_{cycle}| = \left| - \oint_{cycle} p_{ext} dV \right|$$

Exemple question concours : Donner un ordre de grandeur du travail



Aire du cycle :



environ 2 + 2 + 3 + 3 + 3 + 2 = 15 carreaux

1carreau =  $10^5 Pa \times (0,1 \times 10^{-3})^2 = 10 J$

ainsi  $W_{cycle} = - 15 \times 10 = -150 J$

Signe moins car cycle moteur ( dans le sens horaire)

**II Application des deux principes aux machines thermiques**

**II.1) Premier principe de la thermodynamique appliqué à la machine thermique (sur un cycle)**

$$\Delta U_{cycle} + \Delta E_{c macro} = W_{cycle} + Q_{cycle}$$

ici  $W_{cycle}$  correspond aux travaux de toutes les forces **extérieures** ( conservatives **et** non conservatives ) souvent seulement le travail des forces pressantes

→ On suppose que le système n'a pas de mouvement macroscopique →  $\Delta E_{c macro} = 0$

→ Lors d'une transformation cyclique l'état du système à la fin du cycle est le même que l'état initial comme la valeur de l'énergie interne est fixée pour un état donné du système, on a forcément  $U(E.I) = U(E.F)$

$$\Delta U_{cycle} = U(E.F) - U(E.I) = 0 \quad (U \text{ est une fonction d'état})$$

Le premier principe donne donc :

$$0 = W_{cycle} + Q_{cycle} \quad \text{soit}$$

$$W_{cycle} = - Q_{cycle}$$

**1<sup>er</sup> principe pour une machine cyclique**

**Rmq : Pour une machine en contact avec 2 thermostats ( machine ditherme) :**  $Q_{cycle} = Q_1 + Q_2 = Q_{chaud} + Q_{froid}$

**II.2) Deuxième principe appliqué à la machine thermique (sur un cycle):**

$$\Delta S_{cycle} = S_{ech} + S_{créé}$$

Comme S est aussi une fonction d'état , pour une transformation cyclique :  $\Delta S_{cycle} = S(E.F) - S(E.I) = 0$

ainsi  $S_{ech} + S_{créé} = 0 \rightarrow S_{ech} = - S_{créé}$

Entropie échangée :  $S_{ech} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i}$  (si le système est en contact avec N thermostat )

De plus  $S_{créé} \geq 0$

ainsi  $- S_{créé} \leq 0$  donc  $\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0 \rightarrow$  Pour machine ditherme le 2<sup>ème</sup> principe s'écrit :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$$

**II.3) Autre formulation du deuxième principe : Énoncé de Clausius****Énoncé :**

**Il n'existe pas de processus dont le seul effet serait le transfert d'énergie d'une source froide vers une source chaude**

**Démo :** Pas d'énergie échangé sous forme de travail( car le processus aurait un autre effet qui serait de récupérer du travail )  $\rightarrow$  donc  $W = 0$ Deux sources qui échangent respectivement des énergies  $Q_C$  et  $Q_F$ le premier principe sur un cycle donne donc  $0 = - ( Q_C + Q_F )$ 

soit  $Q_F = -Q_C$  (1)

De plus d'après le deuxième principe donne  $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$  (2)

en réinjectant (1) dans (2)

$$\frac{Q_C}{T_C} - \frac{Q_C}{T_F} \leq 0 \Rightarrow Q_C \left( \frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_F} \right) \leq 0 \quad (3)$$

Comme par définition la température du thermostat chaud est plus importante que celle du thermostat froid

$$T_C > T_F \Rightarrow \frac{1}{T_C} < \frac{1}{T_F} \Rightarrow \left( \frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_F} \right) \leq 0 \quad \text{si } Q_C \leq 0 \text{ on ne peut pas avoir } Q_C \left( \frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_F} \right) \leq 0$$

**Ainsi il faut forcément  $Q_C \geq 0$  et  $Q_F \leq 0$** ce qui signifie **qu'en l'absence de travail :**la machine thermique **reçoit de l'énergie** de la source chaude ( donc la **source chaude donne de l'énergie** )la machine thermique **cède de l'énergie** à la source froide ( donc la source froide **reçoit de l'énergie** )**II.4) Autre formulation du deuxième principe : énoncé de Kelvin-Planck****Énoncé de Kelvin-planck :**

**Il n'existe pas de moteur** thermique cyclique dont le seul effet serait de produire du travail à partir du transfert thermique échangé **avec un seul thermostat**

*Moteur  $\rightarrow W_{\text{cycle}} < 0$*

**Démo :**Raisonnement par l'absurde : Cherchons à créer du travail ( c-a-d en fournir à l'extérieur donc  $W_{\text{cycle}} < 0$  ) à partir d'**une seule source de transfert thermique ( $Q > 0$ ) (machine monotherme)****Ex :** bateau qui avant tout seul simplement en prenant de l'énergie de la mer en laissant une traînée de glace**On veut donc  $W_{\text{cycle}} < 0$  et  $Q_{\text{cycle}} > 0$  Or 1<sup>er</sup> principe :  $W_{\text{cycle}} = - Q_{\text{CYCLE}}$** 

**2<sup>ème</sup> principe pour machine ici monotherme :  $\frac{Q_{\text{cycle}}}{T_{\text{thermostat}}} \leq 0$**

Comme  $T_{\text{thermostat}}$  (en K)  $> 0$  le 2<sup>ème</sup> principe implique nécessairement  **$Q_{\text{cycle}} < 0$** Mais comme d'après le 1<sup>er</sup> principe  $W_{\text{cycle}} = -Q_{\text{cycle}} \rightarrow$  on a forcément  **$W_{\text{cycle}} > 0$** 

La machine ne peut donc pas fournir de travail à l'extérieur

### III Étude de machines thermiques dithermes usuelles

#### III.1) Quantifier les performances d'une machine : rendement et efficacité

Pour un moteur on définit le rendement :

De manière général  $\eta = \left| \frac{\text{une grandeur physique que l'on cherche à obtenir}}{\text{grandeur physique que l'on a dépensé}} \right|$

On a toujours pour un rendement  $\eta > 0$  et  $\eta < 1$

Pour une machine frigorifique ou une pompe à chaleur on parle plutôt d'efficacité e qui possède la même définition

$$e = \left| \frac{\text{une grandeur physique intéressante}}{\text{grandeur coûteuse}} \right|$$

**e peut être supérieure ou inférieure à 1 ( mais toujours supérieur à 0)**

**Remarque : Pourquoi un nom différent ?**

En général on parle de **rendement** quand **l'énergie intéressante sort réellement** du système qui réalise une conversion et si **l'énergie coûteuse y rentre réellement**.

On parle d'efficacité si ce n'est pas le cas

#### III.2) Moteur thermique ditherme

Moteur de stirling : c'est un bon exemple des systèmes que l'on étudie à la différence des moteurs de voiture qui sont ouverts (mais fermé sur un cycle)



Source chaude qui est souvent un thermostat à la température  $T_c$

Source froide qui est souvent un thermostat à la température  $T_F$

**a) Schéma de principe**



**b) Preuve du signe des transferts thermiques**

1<sup>er</sup> principe  $\rightarrow W_{\text{cycle}} = - Q_{\text{cycle}} \rightarrow W_{\text{cycle}} = - (Q_c + Q_F)$

comme  $W_{\text{cycle}} < 0$  on a forcément  $-(Q_c + Q_F) < 0$  en divisant par  $T_c$ :  $\frac{-Q_c}{T_c} - \frac{Q_F}{T_c} \leq 0 \Rightarrow -\frac{Q_c}{T_c} \leq \frac{Q_F}{T_c}$  (1)

2<sup>ème</sup> principe :  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_F}{T_F} = -S_{\text{créé}}$  avec  $S_{\text{créé}} \geq 0$  donc  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$  soit  $\frac{Q_c}{T_c} \leq \frac{-Q_F}{T_F}$  (2)

en sommant (1) + (2) :  $\frac{Q_c}{T_c} - \frac{Q_c}{T_c} \leq \frac{-Q_F}{T_F} + \frac{Q_F}{T_c} \Rightarrow Q_F \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_F} \right) \geq 0$

Comme  $T_c > T_F$   $\left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_F} \right) \leq 0 \Rightarrow Q_F \leq 0$

comme  $Q_c = - Q_F - W_{\text{cycle}}$  et que  $W_{\text{cycle}}$  et  $Q_F$  sont négatifs, on a forcément  $Q_c > 0$

**c) Expression du rendement du moteur**

grandeur dépensée :  $c'$  est le transfert thermique réellement reçue par le moteur donc le transfert thermique compté positivement ;  $Q_c > 0$  ( ce qu'on paye c'est l'essence à la pompe qui permet la combustion )

Grandeur intéressante : un travail  $W_{cycle} < 0$  car on veut faire rouler la voiture

Comme le rendement doit être positif et que  $W_{cycle} < 0$  :

$$\eta = \frac{-W_{cycle}}{Q_c} \quad \text{On peut aussi écrire} \quad \eta = \left| \frac{W_{cycle}}{Q_c} \right|$$

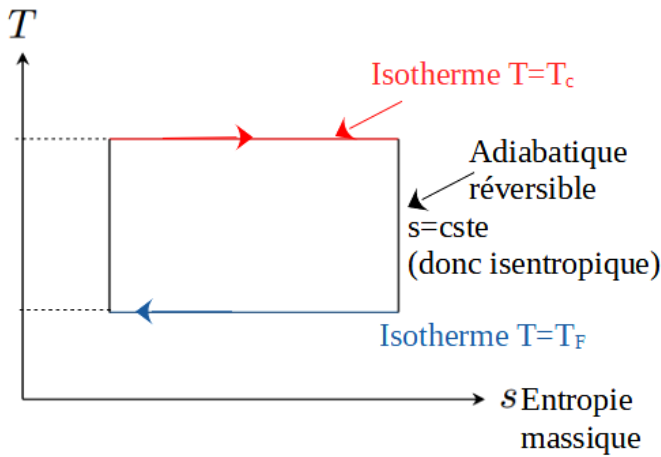
**d) Moteur de Carnot**

**Def :** le moteur thermique qui possède le meilleur rendement est celui qui évolue selon le cycle de Carnot

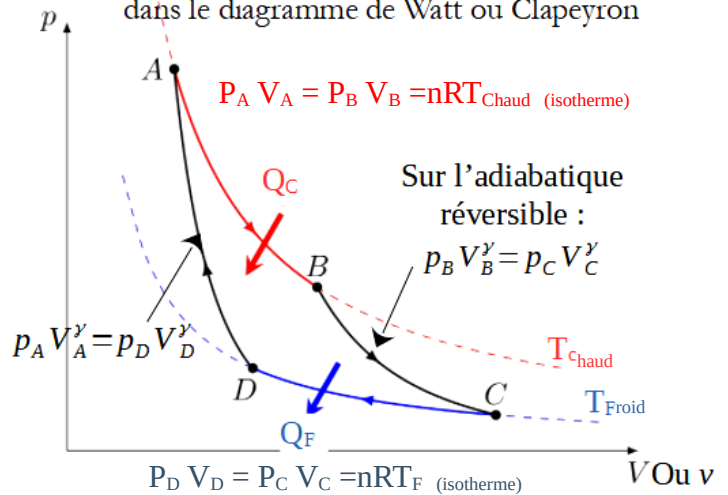
**Nature des transformations :**

Le cycle est caractérisé par **deux isothermes réversibles** (aux températures des sources de chaleur) reliés par deux **adiabatiques réversibles (donc isentropiques)**

Allure du cycle d'un moteur de Carnot dans le diagramme  $T = f(s)$



Allure du cycle d'un moteur de Carnot dans le diagramme de Watt ou Clapeyron



**d) Théorème de Carnot**

**Parmi tous les moteurs ditherme, ceux qui opèrent selon un Cycle de Carnot possèdent le plus grand rendement c'est à dire que pour tout moteur  $\eta_{moteur} < \eta_{carnot}$**

**e) Valeur du rendement du moteur de Carnot en fonction des températures des thermostats**

**Démonstration à savoir faire :**

1<sup>er</sup> principe appliqué au moteur  $\rightarrow W_{cycle} = - Q_{cycle} \rightarrow W_{cycle} = - (Q_c + Q_f)$

*On isole la grandeur qui n'intervient pas dans le deuxième principe pour l'éliminer*

2<sup>ème</sup> principe  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = -S_{créé}$  et comme l'évolution est réversible :  $S_{créé} = 0$  donc  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$

on a  $\eta_{carnot} = \frac{-W_{cycle}}{Q_c} = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$

Or  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0 \Rightarrow \frac{Q_c}{T_c} = -\frac{Q_f}{T_f} \Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} = -\frac{T_f}{T_c}$

Ainsi  $\eta_{carnot} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \Rightarrow \eta_{carnot} = \frac{T_c - T_f}{T_c}$



(températures en Kelvin!)

Rmq : comme  $T_c > T_f$  on a bien  $\eta > 0$  et  $\eta < 1$  ce qui est nécessaire

**f) Preuve du théorème de Carnot**

**Démonstration à savoir faire**

$$\eta_{moteur} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} \text{ or d'après le deuxième principe } \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \text{ (égalité si cycle réversible) donc } \frac{Q_C}{T_C} \leq \frac{-Q_F}{T_F}$$

Comme  $Q_C > 0$  et  $T_F > 0$   $\frac{T_F}{T_C} \leq \frac{-Q_F}{Q_C} \Leftrightarrow \frac{Q_F}{Q_C} \leq \frac{-T_F}{T_C}$  on ajoute 1 de chaque côté  $1 + \frac{Q_F}{Q_C} \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}$

conclusion  $\eta_{moteur} \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}$  avec égalité si cycle réversible

**Le rendement d'un moteur est donc bien inférieur au rendement de Carnot, et égale dans le cas réversible**

*Rmq : le théorème de Carnot est un théorème révolutionnaire car il montre que ce qui limite le rendement des moteurs (toujours <100%) ce n'est pas la capacité des ingénieurs à fabriquer un moteur parfait, c'est la thermodynamique*

ODG : Rendement de Carnot d'un moteur essence : 36 % rendement de carnot d'un moteur Diesel:42 %

**III.3) Machines frigorifiques**

exemples : réfrigérateur, climatisation de voiture ou maison

**a) sens des échanges**

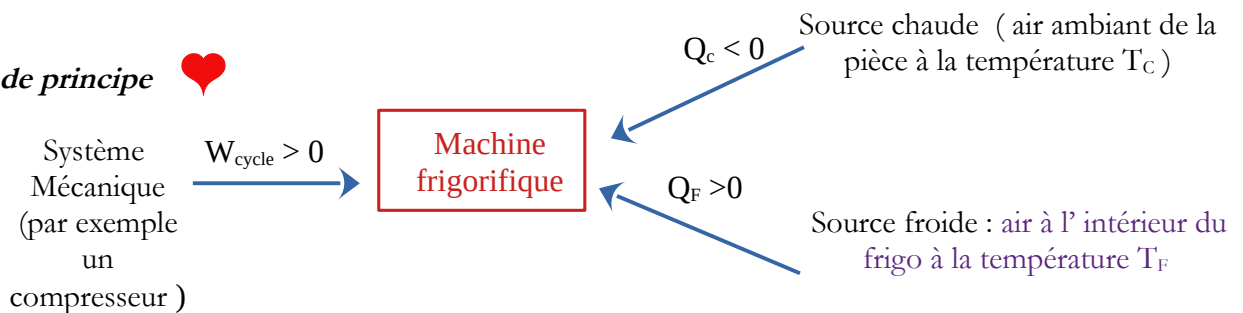
- On doit **fournir** de l'énergie sous forme de travail à un réfrigérateur pour qu'il fonctionne :  $W_{cycle} > 0$   
*( en pratique on fournit l'énergie sous forme électrique, mais un compresseur transforme cette énergie en énergie mécanique qui est reçue par le gaz frigorigène )*

- une machine frigorifique **a pour but de récupérer** de l'énergie sous forme de transfert thermique provenant d'une source froide (**cette source froide peut donc devenir encore plus froide**)  $\rightarrow Q_F > 0$

- Une machine frigorifique **cède** de l'énergie à la source chaude en quantité supérieur à celle qu'elle reçoit de la source froide.

$\rightarrow Q_C < 0$

**b) schéma de principe** 




**Attention : (Ne pas confondre la machine et le système que l'on souhaite refroidir!)**

L'air dans le réfrigérateur ne fait pas partie de la machine { réfrigérateur } c'est un autre système !  
**{air dans le frigo}={ le thermostat froid}**

**c) Efficacité d'une machine frigorifique (ou COP pour COefficient de Performance)**

$\rightarrow$  On cherche à refroidir la source froide, donc la grandeur intéressante est  $Q_F$

$\rightarrow$  La grandeur coûteuse c'est celle qui provient d'un autre système que l'on doit alimenter en énergie :  $W_{cycle}$

ainsi  $e = \left| \frac{Q_F}{W_{cycle}} \right|$  ou encore  $e_{frigo} = \frac{Q_F}{W_{cycle}}$  

**d) Efficacité d'une machine frigorifique de Carnot en fonction de  $T_c$  et  $T_F$**

Premier principe :  $W_{cycle} = - (Q_c + Q_F)$  donc  $e = \frac{Q_F}{W_{cycle}} = \frac{-Q_F}{Q_c + Q_F} = \frac{-1}{\frac{Q_c}{Q_F} + 1}$

Deuxième principe  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_F}{T_F} = -S_{crée}$  comme  $-S_{crée} \leq 0 \rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \Rightarrow \frac{Q_c}{Q_F} \leq -\frac{T_c}{T_F} \Rightarrow \frac{Q_c}{Q_F} + 1 \leq \frac{T_F - T_c}{T_F}$

*En gardant l'inégalité on démontre que l'efficacité de Carnot est bien la meilleure efficacité*

En passant à l'inverse :  $\frac{1}{\frac{Q_c}{Q_F} + 1} \geq \frac{T_F}{T_F - T_c}$  et en multipliant pas -1 :  $\frac{-1}{\frac{Q_c}{Q_F} + 1} \leq \frac{-T_F}{T_F - T_c}$

Finalement on obtient l'inégalité :  $e \leq \frac{T_F}{T_c - T_F}$

La meilleur efficacité correspond à un cycle réversible pour la machine frigorifique ( $S_{crée} = 0$ )  
(on parle alors de machine frigorifique de Carnot)

$e \leq e_{rev}$  avec  $e_{rev} = \frac{T_F}{T_c - T_F}$  (températures en Kelvin!) ( $e_{rev} > 1$  possible)

**ODG : Climatiseurs de fenêtre**  $e = 2,8$  ( dépend de la saison ) **réfrigérateur de qualité moyenne** :  $e = 2,4$

**Question :**

Supposons qu'on soit capable de construire un réfrigérateur idéal (donc réversible) Mieux vaut-il placer le réfrigérateur dans une pièce chaude ou une pièce froide pour maximiser l'efficacité ?

si  $T_c$  diminue en restant supérieure à  $T_F$  on a donc  $T_c - T_F$  qui augmente donc l'efficacité maximale

$e_{rev} = \frac{T_F}{T_c - T_F}$  augmente  $\rightarrow$  mieux si il fait froid à l'extérieur (logique)

**III.4) Pompe à chaleur ( abrégée en PAC)**

**a) sens des échanges énergétiques**

Analyse du nom de la machine :



« Pompe » : on s'attend à ce qu'un dispositif mécanique transfère de l'énergie sous forme de travail à la machine  $\rightarrow W_{cycle} > 0$

« Chaleur » : attention **chaleur  $\neq$  température**

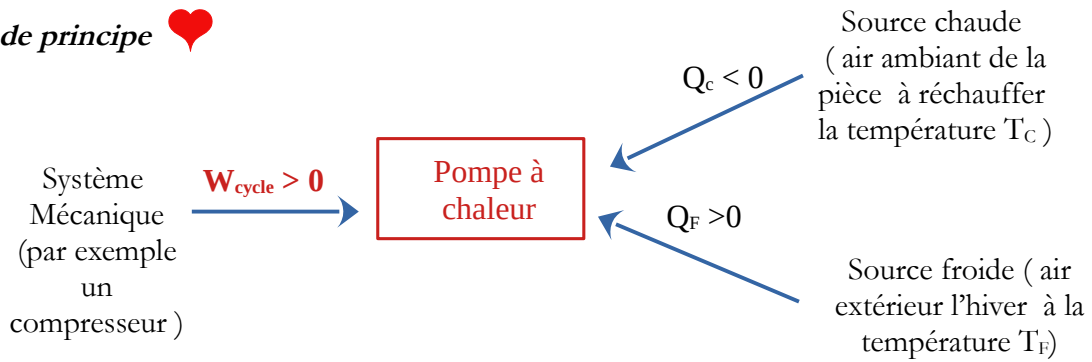
Une pompe à chaleur permet de transférer de l'énergie sous forme de chaleur d'une source froide vers une source chaude ( donc dans le sens **non spontanée du transfert**).

Ainsi  $Q_c < 0$  ,  $Q_F > 0$   $W_{cycle} > 0$  pour une pompe à chaleur

Rmq : **les sens des transferts pour la pompe à chaleur sont les mêmes que pour la machine frigorifique par contre la grandeur d'intérêt est différente !**

Pour une pompe à chaleur, on cherche à réchauffer ( maintenir une haute température ) de la source chaude ( l'air de la pièce à réchauffer) **donc la grandeur d'intérêt est  $Q_c$**

**b) schéma de principe** ❤️



**c) efficacité (ou COP pour COefficient de Performance) d'une pompe à chaleur**

$$e = \left| \frac{Q_c}{W_{cycle}} \right| = \frac{-Q_c}{W_{cycle}}$$

Rmq : signe - car  $Q_c < 0$  du point de vue de la machine

**d) efficacité maximale (Pompe à chaleur de Carnot)**

Premier principe :  $W_{cycle} = - (Q_c + Q_f)$  donc  $e = \frac{-Q_c}{W_{cycle}} = \frac{Q_c}{Q_c + Q_f} = \frac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}}$

Deuxième principe  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = -S_{créé}$  comme  $-S_{créé} \leq 0 \rightarrow \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} \geq -\frac{T_f}{T_c} \Rightarrow \frac{Q_f}{Q_c} + 1 \geq \frac{T_c - T_f}{T_c}$

en passant à l'inverse :  $\frac{1}{\frac{Q_f}{Q_c} + 1} \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$  finalement on obtient l'inégalité :  $e \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$

La meilleure efficacité correspond à un cycle réversible pour la PAC ( $S_{créé} = 0$ )

$$e \leq e_{rev} \text{ avec } e_{rev} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

(températures en Kelvin!)

COP dans le commerce = 3 à 6

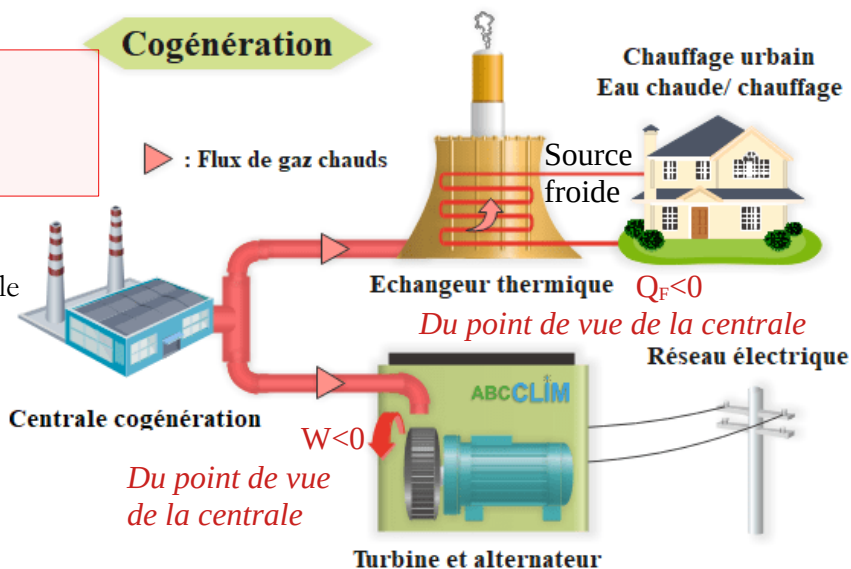
Remarque : d'un point de vue de consommation d'énergie la pompe à chaleur est plus avantageuse qu'un simple radiateur. En effet la chaleur transmise à la pièce est au maximum égale à l'énergie électrique pour le radiateur alors qu'elle est multipliés par 3 à 6 (valeur du COP) pour la pompe à chaleur. L'énergie électrique permet d'alimenter seulement le compresseur dans la pompe à chaleur, il y a un surplus d'énergie liée au transfert thermique avec la source froide qu'on ne paye pas.

**III.5) Cogénération**

La cogénération consiste à la production simultanée de deux formes d'énergie utiles différentes dans la même centrale

Par exemple, dans une centrale à combustible qui fonctionne sur le même principe que le moteur (objectif principale avoir  $W < 0$ ) on peut récupérer le transfert thermique cédé à la source froide  $Q_f < 0$  pour chauffer des habitations : le rendement devient alors :

$$\eta_{cogene} = \frac{-W_{cycle} - Q_{Futisable}}{Q_c}$$



## IV Machines thermiques réelles

### IV.1) Importance du fluide de travail

Jusqu'à maintenant on a considéré que le système étudié était la « machine thermique » mais qu'est ce qu'on entend par là ? En effet quand on dit que la machine reçoit de l'énergie sous forme de travail ou de chaleur, parle-t-on de toute la machine ? C'est la carcasse du moteur qui reçoit l'énergie sous forme de chaleur ?

**La plupart des machines thermiques réelles contiennent un fluide (liquide ou gaz) qui s'écoule au sein de la machine. C'est ce fluide qui échange l'énergie sous forme de chaleur ou de travail en passant par différents éléments actifs( aussi appelés organes) de la machine**

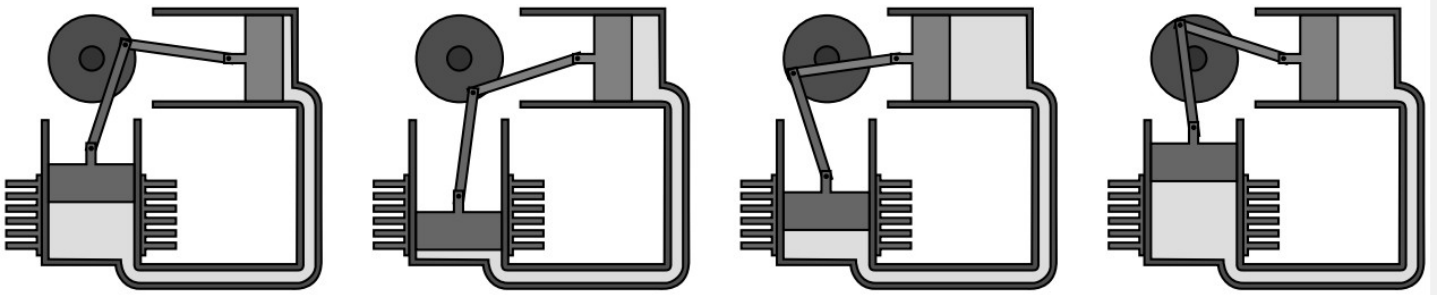
Vocabulaire :

- le fluide de travail dans une machine **hydraulique** est un **liquide**
- le fluide de travail d'une machine **pneumatique** est un **gaz**.

Remarque : Dans certains système, le fluide change d'état pour transférer une plus grande quantité d'énergie aux parties extérieures. Dans ce cas on ne parle pas de machine hydraulique ou pneumatique.

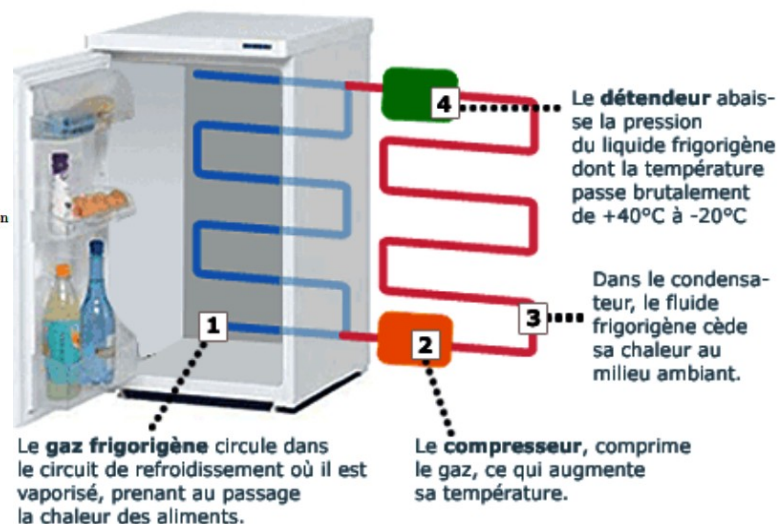
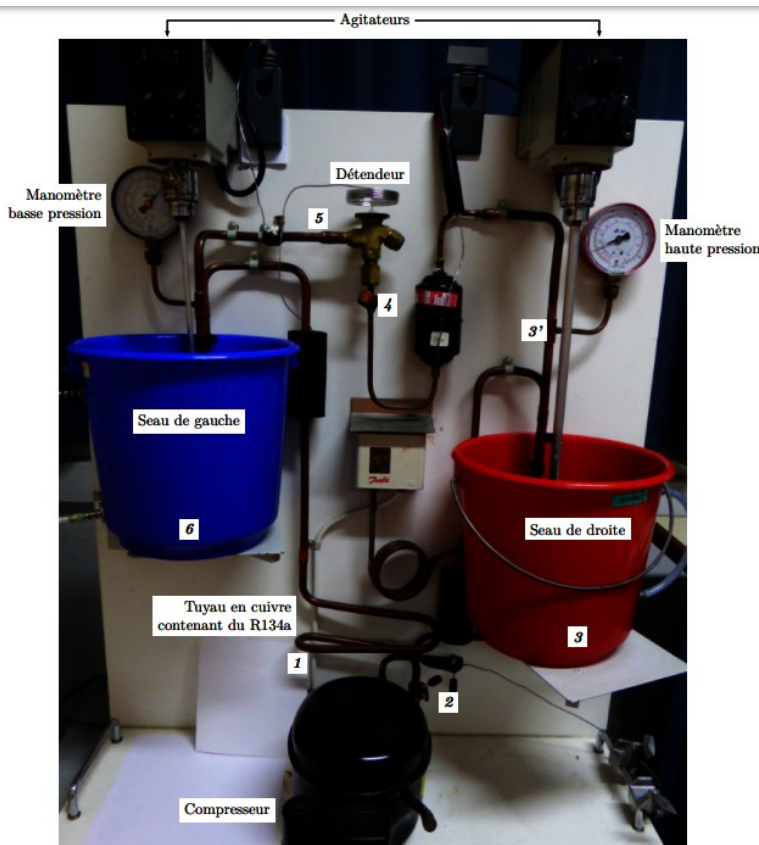
### IV.2) Exemples de machines thermiques avec circulation de fluide

Exemple 1 Moteur Stirling de type alpha :



Exemple 2 : Pompe à chaleur

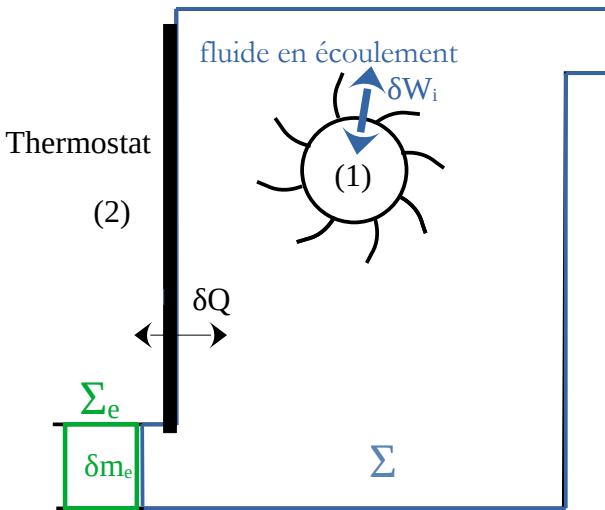
Exemple 3 : machine frigorifique



réfrigérateur

### IV.3 ) Expression du premier principe pour un fluide en écoulement

a) **Système étudié :**



$\Sigma_s$  Le système délimité par  $\Sigma_s$  contient le fluide de volume  $\delta V_s$ , et de masse  $\delta m_s$  sortant de  $\Sigma$  pendant  $dt$ .  
On peut lui associer des grandeurs massiques :

- le système (1) échange de l'énergie sous forme de travail (indiqué) avec le fluide en écoulement étudié
- le Thermostat (2) échange de l'énergie sous forme de transfert thermique avec le fluide en écoulement étudié

**b) Travail indiqué**

Le travail **élémentaire** indiqué algébriquement reçu par le fluide contenu dans le système délimité par  $\Sigma$  de la part de (1) pendant  $dt$  est noté  $\delta W_i$

Un travail indiqué existe seulement si (1) possède des pièces mobiles (des pales, des soupapes etc.)

- $\delta W_i > 0$  si (1) est une pompe,
- $\delta W_i < 0$  si le fluide fait tourner une turbine



Le système délimité par  $\Sigma_e$  contient le fluide de volume  $\delta V_e$  et de masse  $\delta m_e$  entrant dans  $\Sigma$  pendant  $dt$ .  
On peut lui associer des grandeurs massiques :  
 $e_{pe}, e_{ce}, u_e, h_e, s_e$

On suppose le régime stationnaire :

- P, T, H, U ne dépend pas du temps mais seulement de l'espace
- la masse qui rentre dans  $\Sigma_e$  pendant  $dt$  sort par  $\Sigma_s$  pendant  $dt$  :  $\delta m_e = \delta m_s = \delta m$

**c) Grandeurs massiques associées aux transferts d'énergie avec l'extérieur**

**Travail indiqué massique**

- On définit un **travail indiqué (ou utile) massique**  $w_i$  tel que :

$$w_i = \frac{\delta W_i}{\delta m} \quad \text{C'est le travail utile reçu par kilogramme de fluide traversant le système (en J.kg}^{-1}\text{)}$$



**Transfert thermique massique**

On définit un **transfert thermique massique** noté  $q$

-  $q = \frac{\delta Q}{\delta m}$  C'est le transfert thermique reçu par kilogramme de fluide traversant le système  $\Sigma_0$  (en J.kg<sup>-1</sup>)



**Confusion fréquente :** le terme « massique » est à comprendre comme « par unité de masse traversante », et pas « par unité de masse du système ouvert » :

**d) Grandeurs massiques associées au fluide en entrée et en sortie de  $\Sigma$  :**

-  $e_{ce}$  et  $e_{cs}$  sont les **énergies cinétiques massiques** du fluide en entrée (dans le système  $\Sigma_e$  pour  $e_{ce}$ ) et en sortie (dans le système  $\Sigma_s$  pour  $e_{cs}$ )

énergie cinétique du fluide en entrée  $dEc_e = 1/2 \delta m_e v_e^2 \rightarrow e_{c,e} = dEc_e / \delta m_e$

$$e_{c,e} = \frac{1}{2} v_e^2$$

$$e_{c,s} = \frac{1}{2} v_s^2$$



-  $e_{pe}$  et  $e_{ps}$  sont les **énergies potentielles massiques** du fluide en entrée (dans le système  $\Sigma_e$  pour  $e_{pe}$ ) et en sortie (dans le système  $\Sigma_s$  pour  $e_{ps}$ )

$$E_p = \delta mgz + cste \rightarrow e_{p,e} = gz_e + cste \quad e_{p,s} = gz_s + cste$$



Rmq **notation** : ( les grandeurs massiques sont indiquées avec une lettre minuscule) Ce sont des grandeurs intensives, on suppose qu'elles prennent la même valeur partout dans les systèmes dans lesquels elles sont définies (i.e :  $\Sigma_s$  et  $\Sigma_e$ )

e) *expression du premier principe pour le fluide en écoulement*

Travaux des forces  
pressantes en  
entrée et sortie

le premier principe peut se réécrire :

$$\delta m(u_s - u_e) + \delta m(e_{cs} - e_{ce}) + \delta m(e_{ps} - e_{pe}) = P_e \delta V_e - P_s \delta V_s + \delta m w_i + \delta m q$$

on peut réarranger les termes :

$$(\delta m u_s + P_s \delta V_s) - (\delta m u_e + P_e \delta V_e) + \delta m(e_{cs} - e_{ce}) + \delta m(e_{ps} - e_{pe}) = \delta m w_i + \delta m q$$

Enthalpie de  $\Sigma_s$  :  
 $\delta m h_s$

Enthalpie de  $\Sigma_e$  :  
 $\delta m h_e$

Ainsi :  $\delta m(h_s - h_e) + \delta m(e_{cs} - e_{ce}) + \delta m(e_{ps} - e_{pe}) = \delta m w_i + \delta m q$

en divisant par  $\delta m$  on trouve l'expression du premier principe pour un système en écoulement :

$$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = w_i + q$$

$\Delta$  indique la variation d'une grandeur massique (en  $J.kg^{-1}$ ) entre l'entrée et la sortie (Par ex  $\Delta h = h_s - h_e$ )

Souvent dans les moteur, PAC, et réfrigérateur, on néglige  $e_c$  et  $e_p$  devant  $h$

le premier principe pour un fluide en écoulement devient

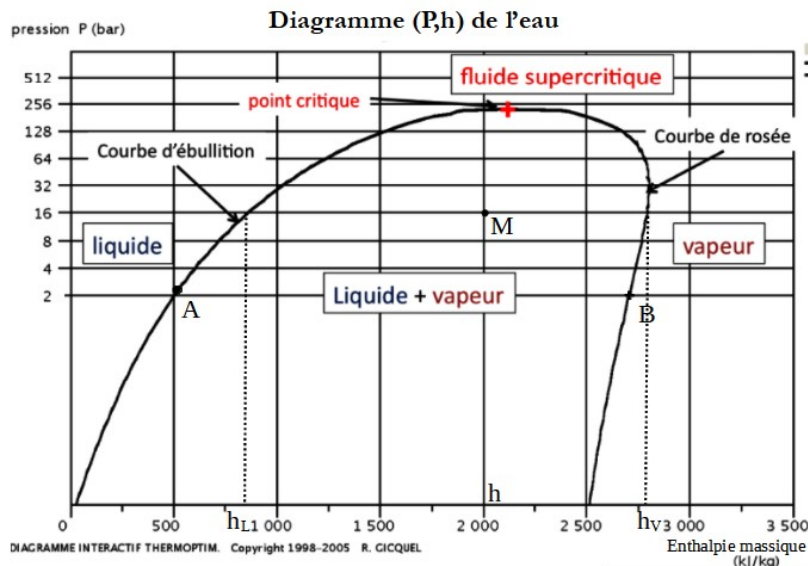
$$h_s - h_e = w_i + q$$

IV.4) Diagramme des frigoristes (P, h) (aussi appelé diagramme enthalpique)

Très fréquent à l'écrit et à l'oral !

a) Présentation

Le diagramme des frigoristes (log P, h) représente la pression, en échelle logarithmique, en fonction de l'enthalpie massique, en échelle linéaire



Sur ce diagramme on peut voir :

- L'espace liquide se trouve à gauche de la courbe d'ébullition (enthalpies faibles)
- L'espace vapeur se trouve à droite de la courbe de rosée
- l'espace diphasé au milieu

Méthode pour s'en souvenir :

transfo du point A vers le point B :  
C'est un changement d'état tel que  $\Delta h = h_B - h_A > 0$  donc **endothermique**

C'est le cas d'une vaporisation.  
Donc en A le fluide est à l'état liquide En B à l'état gazeux

b) Enthalpie massique de vaporisation ( ou chaleur latente de vaporisation )

On appelle enthalpie de vaporisation sous la pression P la différence d'enthalpie massique entre la vapeur saturante et le liquide saturant sous la même pression P, la température à considérer étant nécessairement la température de saturation  $T_{sat}(P)$ .

$$\Delta_{vap}h(P) = h_v(P, T_{sat}(P)) - h_L(P, T_{sat}(P)) :$$

Sur le diagramme il suffit de lire  $h_v$  et  $h_L$  puis faire la différence

**Application** quelle énergie faut-il apporter à deux kilogrammes d'eau liquide pour qu'ils passent totalement à l'état de vapeur sous une pression de 2 bar ?

$\Delta_{vap}h(P)=h_B - h_A =2700-500 = 2200\text{kJ/kg}$  il faut donc apporter une énergie  $Q= \Delta H_{vap} = m_{eau} \Delta_{vap}h$

**A.N**  $Q=2 \times 2200=4,4 \times 10^3 \text{ kJ}$

**Remarque d'après l'allure du diagramme**

- l'enthalpie de vaporisation est une fonction **décroissante** de la pression
- l'enthalpie de vaporisation s'annule au point critique

**c) Lien entre entropie massique de changement d'état et enthalpie massique de changement d'état**

$$\frac{\Delta h_{vap}(T)}{T} = \Delta s_{vap}(T)$$

**Remarque sur le signe :**  $\Delta h_{vap} > 0$  car la vaporisation est endothermique donc  $\Delta s_{vap}(T) > 0$

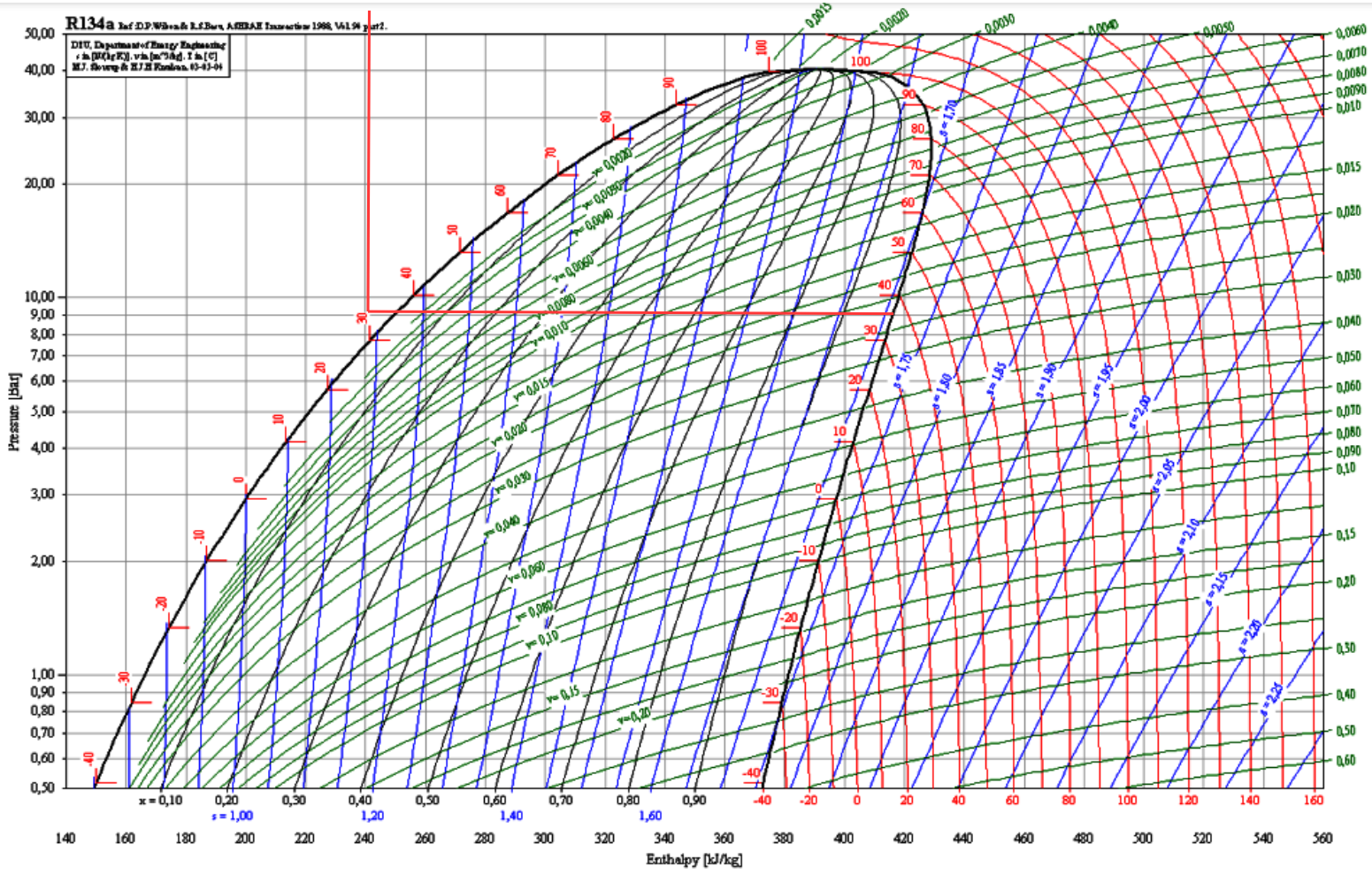
c'est normal car un gaz est plus désordonné qu'un liquide

**c) Théorème des moment avec l'enthalpie :**

le titre massique en liquide pour le système représenté en M est  $x_L = (h_v - h) / (h_v - h_l) = 800/1950=0,45$

**d) Réseau de courbes dans le diagramme des frigoristes**

Diagramme des frigoriste du fluide R134a



**Allure des Isothermes**

Les courbes isothermes sont tracées en rouge. la valeur de la température pour une transformation le long d'une isotherme est indiquée en rouge.

- **À l'état liquide les isothermes sont presque verticales** : l'enthalpie d'un liquide est indépendante de sa pression.

$\Delta h = c_p \Delta T \sim c \Delta T$  avec  $c$  indépendant de  $T$ , si transformation isotherme :  $\Delta T = 0$  donc  $\Delta h = 0$  soit isenthalpe

- **À l'équilibre liquide-vapeur** les isothermes se confondent avec les isobares. **elles sont donc horizontales**
- **À l'état vapeur les isothermes sont décroissantes, et tendent vers des asymptotes verticales à basse pression** : la vapeur se comporte alors comme un gaz parfait, pour lequel l'enthalpie ne dépend que de la température (avec  $c_p$  constant).

Preuve : Pour un G.P lors d'une transformation  $\Delta h = c_p \Delta T$  avec  $c_p$  qui ne dépend ni de  $T$  ni de  $P$

si la transformation est isotherme  $\Delta T = 0 \rightarrow \Delta h = 0$  **ainsi les isotherme se confondent avec les isenthalpes**

**allure des Isochores** : Les courbes isochores sont tracées en vert

**allure des isotitre** les isotitre correspond à un titre en vapeur constant (il est indiqué en bas  $x = \dots$ )

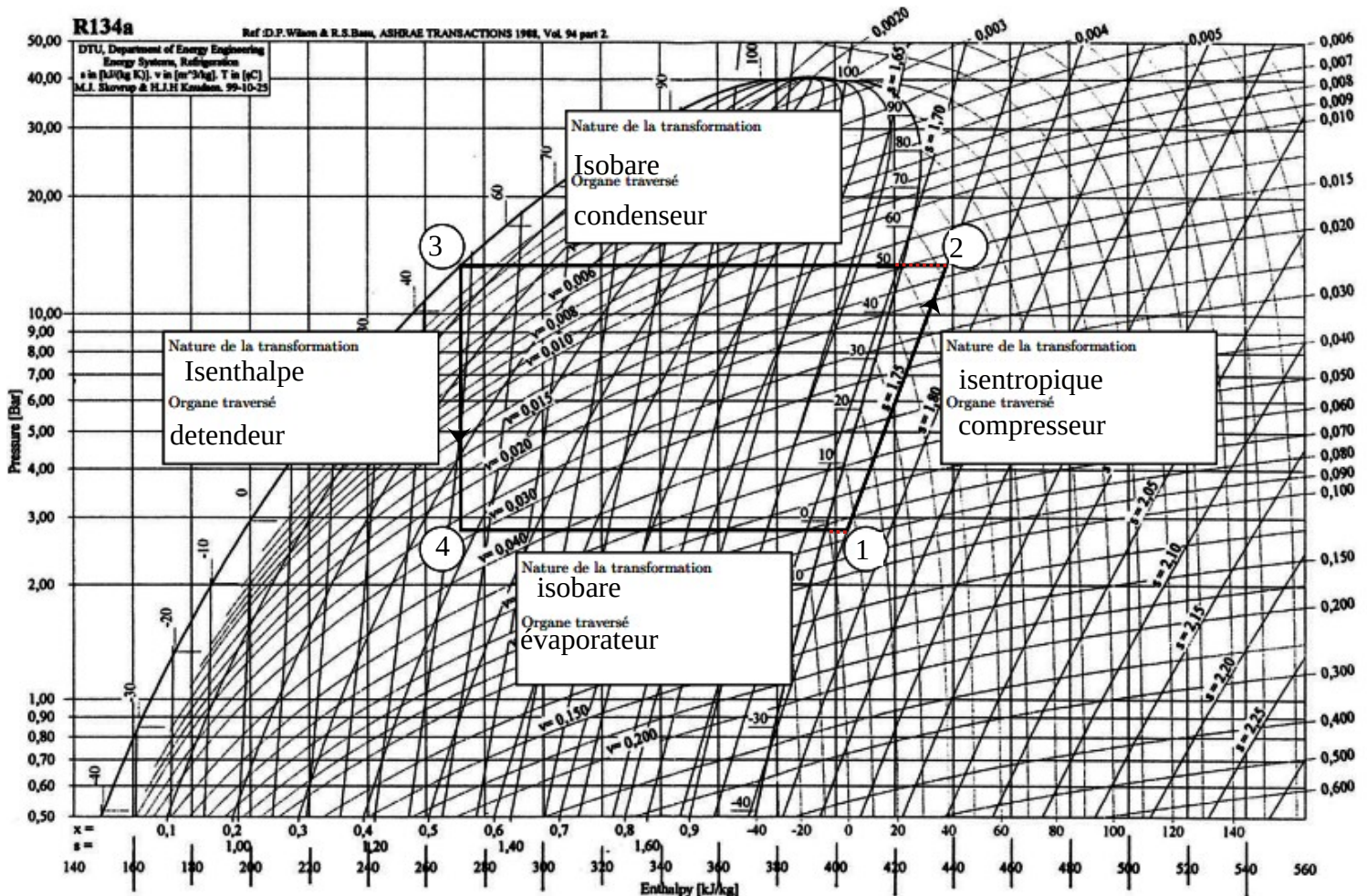
**allure des isentropiques (evolution selon une tranfo adiabatique reversible)**

$\Delta s = 0$  le long d'une isentropique. elles sont croissantes dans le diagramme :

**V Utilisation d'un diagramme (P,h) pour déterminer un rendement ou une efficacité**

**V.1) Exemple de la machine frigorifique industrielle**

On considère une **machine frigorifique** constituée **d'un compresseur, d'un condenseur, d'un détendeur et d'un évaporateur, dans lesquels circule un fluide frigorigène R134a.**



Dans le **compresseur** le fluide reçoit du travail ( $w_i > 0$ )

**Dans le compresseur :** le fluide reçoit du travail indiqué de la part des pièces mobiles, **on suppose la compression adiabatique et réversible ( $q=0$ )**

**Dans le condenseur,** il est en contact avec la source chaude et il **se liquéfie**

**Dans l'évaporateur** il est en contact avec la source froide { air dans le frigo } , il lui prend de l'énergie et **s'évapore**

L'évaporateur et le condenseur sont des échangeurs thermiques isobares.

Dans le condenseur il est en contact avec la source chaude et il se liquéfie

Dans l'évaporateur il est en contact avec la source froide { air dans le frigo } , il lui prend de l'énergie et s'évapore

L'évaporateur et le condenseur sont des échangeurs thermiques isobares.

Dans le détenteur une chute de pression et de température se produit **il est supposé calorifugés**

**a) Justification de la nature de chaque transformation**

-Horizontales → **isobare**

(+ **isotherme dans la zone diphasée** par contre hors de la zone diphasé ( zones ..... ) ce n'est pas isotherme !)

-Verticale → **isenthalpe** ( $h = cste$ )

- Évolution selon courbe  $s=1,75$  → **isentropique**

**b) Justification des organes traversés et sens de parcours**

→ on sait que la transformation dans le compresseur est adiabatique réversible → elle est donc isentropique

la transformation correspondante est la courbe qui suit l'isentropique.

→ D'après l'énoncé on sait que **le détenteur est calorifugé et pas de pièces mobiles.**

On peut montrer que la transformation du fluide dans le détenteur est isenthalpique → la transformation correspondante est l'**isenthalpe ( $h = cste$ )**

→ De plus d'après l'énoncé il y a une baisse de pression dans le détenteur. La seule transformation (hormis l'isentropique) avec une variation de pression est celle présentée par une droite verticale

→ **d'après ces informations on peut déjà en déduire que le cycle est parcouru dans le sens trigonométrique**

Il reste à différencier l'évaporateur du condenseur. Comme on connaît le sens du parcours il est facile de différencier :

**Dans l'évaporateur,** passage de l'état liquide à gazeux → transformation endothermique →  $\Delta h > 0$

→ la transformation va de gauche à droite dans le diagramme (P,h) → **c'est l'isobare à basse pression et basse température** → **contact avec la source froide**

*comme  $\Delta h = q_f$  on a  $q_f < 0$  c'est cohérent car on cherche à refroidir la source froide*

**Dans le condenseur,** passage de l'état gazeux à liquide → transformation exothermique →  $\Delta h < 0$

→ la transformation va de droite à gauche dans le diagramme (P,h) → **c'est l'isobare à haute pression et haute température** → **contact avec la source chaude**

*comme  $\Delta h = q_c$  on a  $q_c > 0$  c'est cohérent car on cherche à refroidir la source froide*

**Compléter le tableau ci-dessous en s'aidant du diagramme.**

État du fluide	1	2	3	4
Pression (bar)	2,8	12	12	2,8
Température (°C)	5	63	50	-3
Enthalpie massique (kJ.kg <sup>-1</sup> )	405	438	270	270
Titre en vapeur	1	1	0	0,35
	Fluide totalement gazeux	Fluide totalement gazeux	Fluide totalement liquide	

**d) Détermination de l'efficacité (ou COP)**

**Q1** Exprimer, puis calculer, le travail massique indiqué  $w_{ic}$  reçu par le fluide (reçu dans le compresseur)

D'après le premier principe industriel  $\Delta h = q + w_{ic}$  comme la transformation est adiabatique  $\rightarrow q=0$

donc  $\Delta h = w_{ic} \Rightarrow w_{ic} = h_2 - h_1$  A.N  $w_{ic} = 438 - 405 = 33 \text{ kJ/kg}$

**Q2.** Exprimer, puis calculer, le transfert thermique massique  $q_f$  reçu par le fluide dans l'évaporateur.

Il n'y a pas de pièce mobile dans l'évaporateur donc  $w_i = 0$

ainsi d'après le premier principe industriel appliqué au fluide lors de la transformation dans l'évaporateur :

$$\Delta h = q_f \Rightarrow q_f = h_1 - h_4 \quad \text{A.N} \quad \Delta h = q_f \Rightarrow q_f = 405 - 270 = 135 \text{ kJ/kg}$$

**Q3.** Exprimer, puis calculer, le coefficient de performance de cette installation frigorifique. Le comparer au coefficient de performance de la machine de Carnot correspondante et interpréter la différence observée.

Pour une machine frigorifique  $e = \frac{q_f}{w_{ic}}$  A.N  $e = \frac{135}{33} = 4,1$

Pour une machine de Carnot ( sur un cycle complet) :  $\Delta h = 0 \rightarrow w_{ic} = - (q_c + q_f)$

2ème principe  $s_{créé} = 0$  (Carnot réversible) et  $\Delta s = 0 \rightarrow q_c / T_C = -q_f / T_F$

$$e_{\text{carnot}} = -1 \left( 1 - T_C / T_F \right) = T_F / (T_C - T_F)$$

Il faut convertir les températures en K !  $T_F = 273 + (-3) = 270 \text{ K}$  et  $T_C = 273 + (50) = 323 \text{ K}$

$$e_{\text{carnot}} = \frac{270}{(323 - 270)} = 5,1 \quad \text{on a } e < e_{\text{carnot}} \text{ ce qui est normal car l'efficacité de Carnot est la meilleure efficacité}$$

possible, le cycle réel n'est donc pas réversible (présence de frottements avec les pièces mécaniques qui sont des processus irréversibles)

