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.	Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. Définir un rendement ou une efficacité et les relieraux énergies échangées au cours d'un cycle. Justifier et utiliser le théorème de Carnot. Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération

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

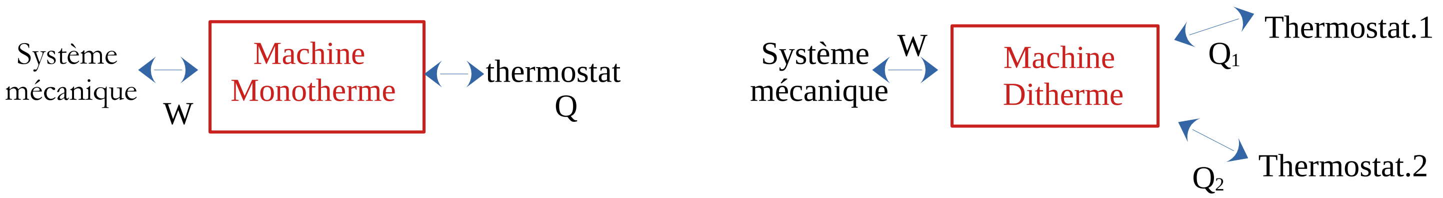
I Grandeurs caractérisant les échanges d'énergie avec l'extérieur

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_{cycle} >0 si la machine reçoit réellement de l'énergie sous forme de travail**
  ex : réfrigérateur et Pompe à chaleur

- **W_{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 ΔW ou ΔQ 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_{cycle} >0**
- si le cycle est parcouru dans **le sens horaire,** le gaz **fournit réellement** de l'énergie sous forme de travail

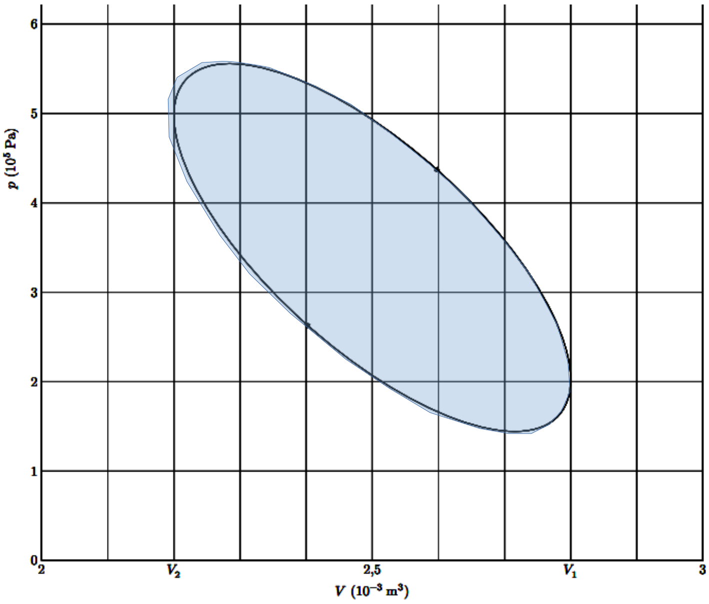
$W_{cycle} <0$

I.4) Travail reçu lors d'un cycle

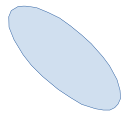
La valeur absolue du travail de la résultante des forces pressantes sur un cycle $|W_{cycke}|$ correspond **à l'aire du cycle dans le diagramme de Watt (P=f(V))**

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

Exemple question concours : Donner un ordre de grandeur du travail



Aire du cycle :



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

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

ainsi W_{cycle} = - 15 x 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 forcement U(E.I) =U(E.F)

ΔU_{cycle} =U(E.F) - U(E.I) =0 (U est une fonction d'état)

Le premier principe donne donc :

$0 = W_{cycle} + Q_{cycle}$ soit **$W_{cycle} = -\, Q_{cycle}$**

1er 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):

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

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

ainsi

$S_{ech} + S_{crée} = 0$ → $S_{ech} = -\, S_{crée}$

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

De plus $S_{crée} \geq 0$

ainsi $-\, S_{crée}$ ≤ 0 donc $\sum_i^N \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$ → Pour machine ditherme **le 2ème 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) ⟶ donc $W = 0$

Deux sources qui échanges 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

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

Ainsi il faut forcement $Q_C \geq 0$ 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 échangée **avec un seul thermostat**

Moteur → $W_{cycle} < 0$

Démo :

Raisonnement par l'absurde : Cherchons à créer du travail (c-a-d en fournir à l'extérieur donc $W_{cycle} < 0$) 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 $W_{cycle} < 0$ et $Q_{cycle} > 0$ **Or 1er principe : $W_{cycle} = -Q_{CYCLE}$**

2 ème principe pour machine ici monotherme : $\frac{Q_{cycle}}{T_{thermostat}}\leq 0$

Comme $T_{thermostat}$ (en K) >0 le 2ème principe implique nécessairement $Q_{cycle} < 0$

Mais comme d'après le 1er principe $W_{cycle} = -Q_{cycle}$ ⟶ on a forcement $W_{cycle} > 0$

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

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

$$e = \left| \frac{\text{une grandeur physique interessante}}{\text{grandeur couteuse}} \right|$$

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

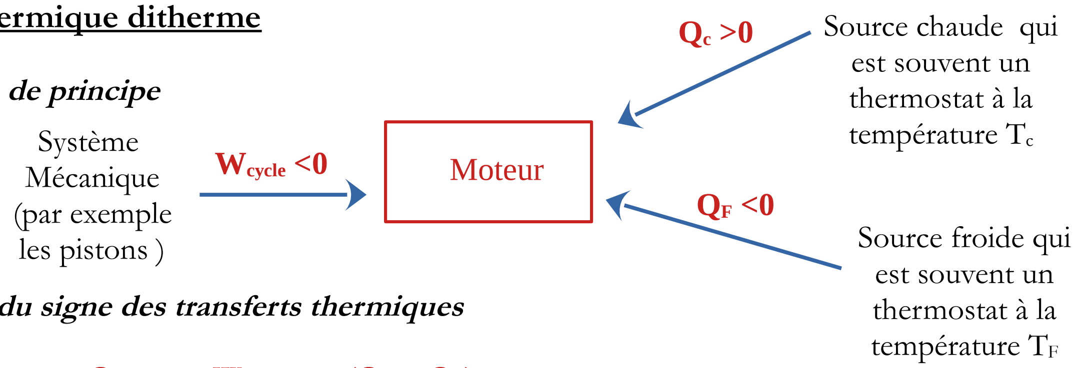
Remarque : Pourquoi un nom différent ?

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

a) Schéma de principe



b) Preuve du signe des transferts thermiques

1er principe $\rightarrow$ $W_{cycle} = -\ Q_{cycle}$ $\rightarrow$ $W_{cycle} = -\ (Q_c + Q_F)$

comme $W_{cycle} < 0$ on a forcement $-(Q_c + Q_f) > 0$ en divisant par T_c : $\dfrac{-Q_c}{T_C} - \dfrac{Q_F}{T_C} \leq 0 \Rightarrow -\dfrac{Q_C}{T_C} \leq \dfrac{Q_F}{T_C}$ **(1)**

2ème principe : $\dfrac{Q_c}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F} = -S_{crée}$ avec $S_{crée} \geq 0$ donc $\dfrac{Q_c}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F} \leq 0$ soit $\dfrac{Q_c}{T_C} \leq \dfrac{-Q_F}{T_F}$ (2)

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

Comme $T_C > T_F$ $\left(\dfrac{1}{T_C} - \dfrac{1}{T_F}\right) \leq 0 \Rightarrow \boldsymbol{Q_F \leq 0}$

comme $Q_C = -\ Q_F - W_{cycle}$ et que W_{cycle} et Q_F sont négatifs, on a forcement **$Q_C > 0$**

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 cédé (on veut faire rouler la voiture)

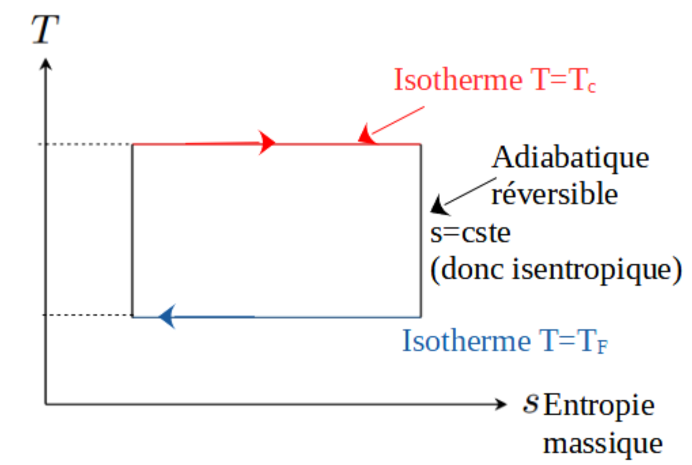
Comme le rendement doit être positif et que W_{cycle} <0 :

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

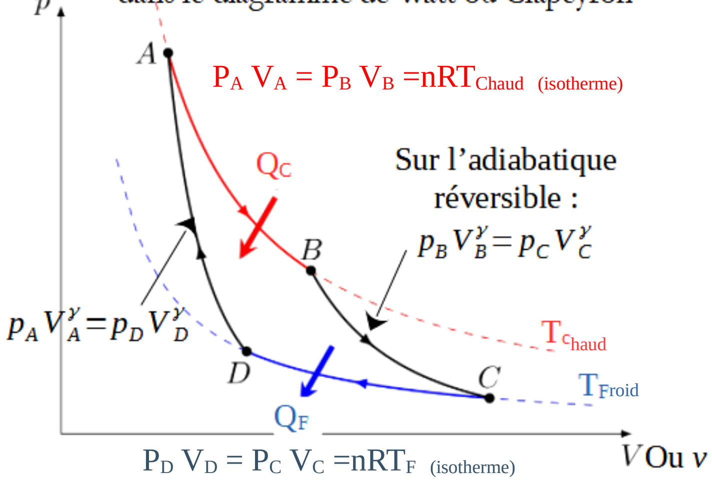
d) Moteur de Carnot

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 :

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

1er principe appliqué au moteur → $W_{cycle} = - Q_{cycle}$ → $W_{cycle} = - (Q_c + Q_F)$

2^{éme} principe $\frac{Q_c}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}=-S_{crée}$ et comme l'évolution est réversible : $S_{crée}=0$ donc $\frac{Q_c}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}=0$

$$\text{on a} \quad \eta_{carnot}=\frac{-W_{cycle}}{Q_C}=\frac{Q_c+Q_F}{Q_C}=1+\frac{Q_F}{Q_C}$$

$$\text{Or} \quad \frac{Q_c}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}=0 \Rightarrow \frac{Q_C}{T_C}=\frac{-Q_F}{T_F} \Rightarrow \frac{Q_F}{Q_C}=-\frac{T_F}{T_C}$$

$$\text{Ainsi} \quad \eta_{carnot}=1+\frac{Q_F}{Q_C}=1-\frac{T_F}{T_C} \Rightarrow \boxed{\eta_{carnot}=\frac{T_C-T_F}{T_C}}$$

(températures en Kelvin!)

Rmq : comme $T_C > T_F$ on a bien η >0 et η < 1 ce qui est nécessaire

e) Preuve du théorème de Carnot
Démonstration à savoir faire

$\eta_{moteur} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$ or d'après le deuxième principe $\frac{Q_c}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$ (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 $\boldsymbol{\eta_{moteur} \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}}$ 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 fabriqué un moteur parfait , c'est la thermodynamique

ODG : **Rendement d'un moteur essence :** environ 36 % **rendement d'un moteur Diesel:** environ 42 %

III.3) Machines frigorifiques

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 reçu 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)** → $\boldsymbol{Q_F > 0}$

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

→ $\boldsymbol{Q_C < 0}$

b) schéma de principe

Système Mécanique (par exemple un compresseur) —$W_{cycle} > 0$→ Machine frigorifique

Source chaude (air ambiant de la pièce à la température T_C) —$Q_c < 0$— Machine frigorifique

Source froide : air à l' intérieur du frigo à la température T_F —$Q_F > 0$→ Machine frigorifique

> ***Attention : (Ne pas confondre la machine et le système que l'on souhaite refroidir!)***
> L'air dans le réfrigérateur ne fait p**artie de la machine { réfrigérateur} c'est un autre système !**
> **{ le thermostat froid}**

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

→ On chercher à refroidir la source froide, donc la grandeur intéressante est Q_F

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

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

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 $\frac{Q_c}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}=-S_{créée}$ comme - $S_{créée} \leq 0$ $\rightarrow$ $\frac{Q_c}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}\leq 0 \Rightarrow \frac{Q_C}{Q_F}\leq -\frac{T_C}{T_F} \Rightarrow \frac{Q_C}{Q_F}+1\leq \frac{T_F-T_C}{T_F}$

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 $\boxed{e_{rev}=\frac{T_F}{T_C-T_F}}$ (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 transfert de l'énergie sous forme de travail à la machine $\rightarrow$ W_{cylce} **>0**

« Chaleur » : attention ***chaleur ≠ 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 chercher à réchauffeur (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

Source chaude (air ambiant de la pièce à réchauffer la température T_C)

$Q_c < 0$

Système Mécanique (par exemple un compresseur) $\xrightarrow{W_{cycle} > 0}$ Pompe à chaleur

$Q_F > 0$

Source froide (air extérieur l'hiver à la température T_F)

***c) efficacité** (ou **COP** pour **CO**efficient de **P**erformance) 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 maximal (Pompe à chaleur de Carnot)

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

Q_c <0 donc ≥ (il faut changer le sens)

Deuxième principe $\frac{Q_c}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}=-S_{crée}$ comme- $S_{crée} \leq 0$ → $\frac{Q_c}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}\leq 0 \Rightarrow \frac{Q_F}{Q_C}\geq -\frac{T_F}{T_C}\Rightarrow \frac{Q_F}{Q_C}+1\geq \frac{T_C-T_F}{T_C}$

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 ($S_{crée} = 0$)

$$e\leq e_{rev} \quad \text{avec} \quad e_{rev}=\frac{T_C}{T_C-T_F}$$

(températures en Kelvin!)

COP dans le commerce = 3 à 6

.

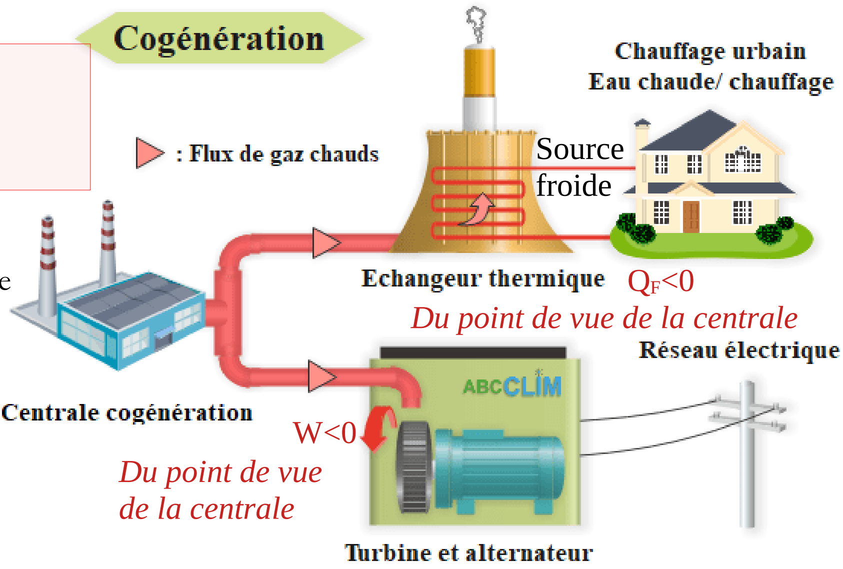
III.5) Cogénération

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 :

$$\eta_{cogene}=\frac{-W_{cycle}-Q_{Futilisable}}{Q_C}$$



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

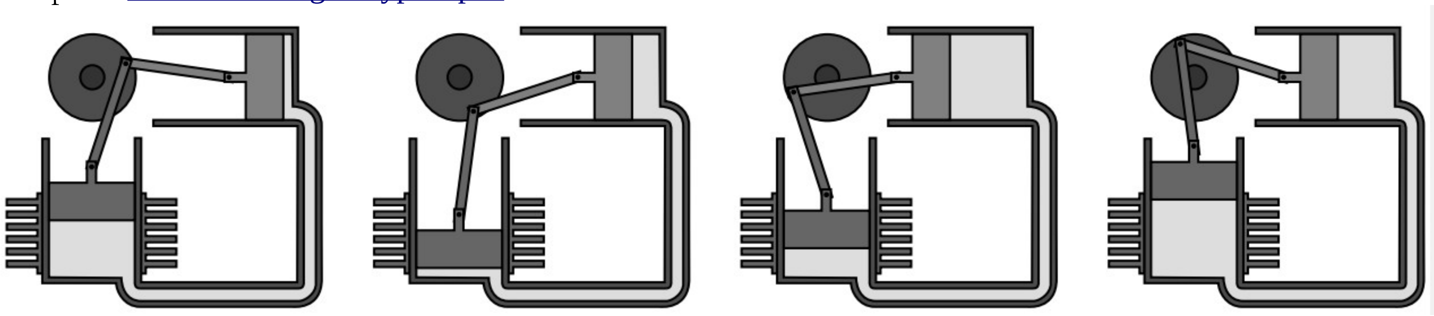
Vocabulaire :

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

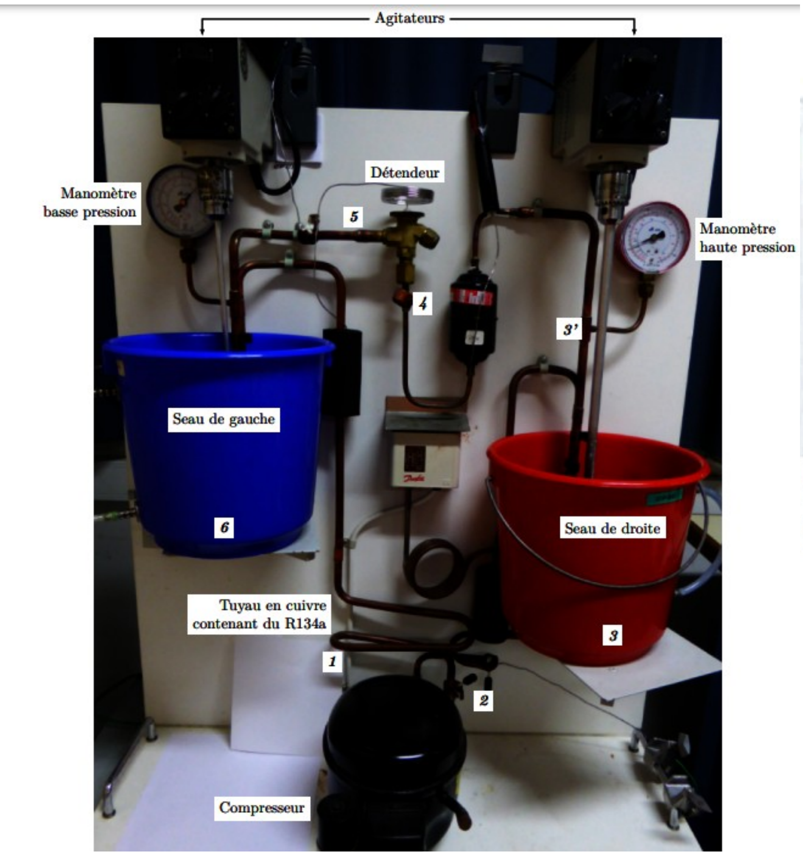
Remarque : Dans certains système, le fluide change d'état pour transférer une plus grande quantité d'énergie aux parties extérieures. Dans ce cas on ne parle pas de machine hydraulique ou pneumatique.

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

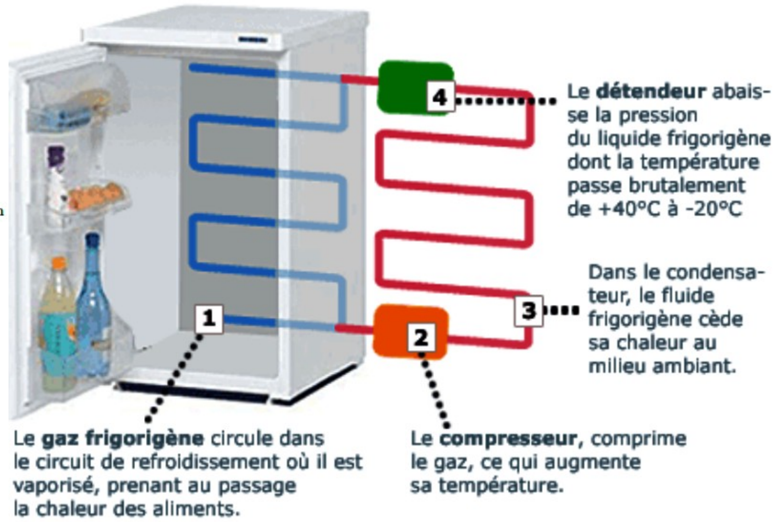
Exemple 1 Moteur Stirling de type alpha :



Exemple 2 : Pompe à chaleur



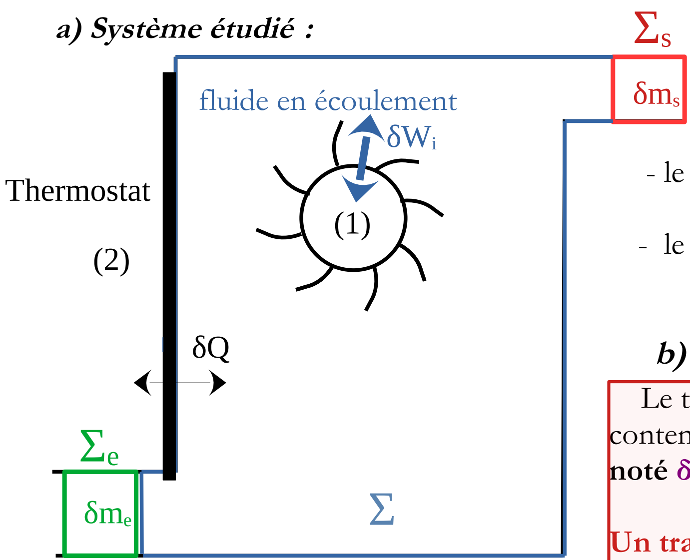
Exemple 3 : machine frigorifique



refrigérateur

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

a) Système étudié :



Le système délimité par Σ_s **contient le fluide de volume δV_s, et de masse δm_s sortant de Σ pendant dt.**
On peut lui associer des grandeurs **massiques** :
e_{ps} , e_{cs} , u_s , h_s , s_s

- 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

Le système délimité par Σ_e **contient le fluide de volume δV_e et de masse δm_e entrant dans Σ pendant dt.**
On peut lui associer des grandeurs **massiques** :
e_{pe} , e_{ce} , u_e , h_e , s_e

b) Travail indiqué

Le travail **élémentaire** indiqué **algébriquement** reçu par le fluide contenu dans le système délimité par Σ de la part de (1) **pendant dt est noté δW_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 tournée une turbine

On suppose le régime stationnaire :

-P, T ,H ,U ne dépend pas du temps mais seulement de l'espace

- la masse qui rentre dans Σ_e pendant dt sort par Σs 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 un **travail indiqué (ou utile) massique w_i** tel que :

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

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 Σ_0 (en J.kg^{-1})***

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 Σ :

- **e_{ce} et e_{cs}** sont les **énergies cinétiques massiques** du fluide en entrée (dans le système Σe pour e_{ce}) et en sortie (dans le système Σs 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 Σe pour e_{pe}) et en sortie (dans le système Σs pour e_{ps})

$E_p = \delta mgz$ +cste $\rightarrow$ **$e_{p,e} = gz_e$ +cste** **$e_{p,s} = gz_s$ +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 : Σ_s et Σ_e)

e) expression du premier principe pour le fluide en écoulement

le premier principe peut se réécrire :

$$\delta m(u_s-u_e)+\delta m(e_{cs}-e_{ce})+\delta m(e_{ps}-e_{pe})=\underbrace{P_e\delta V_e-P_s\delta V_s}_{\text{Travaux des forces pressantes en entrée et sortie}}+\delta m w_i+\delta m q$$

on peut réarranger les termes :

$$\underbrace{\boxed{(\delta m u_s+P_s\delta V_s)}}_{\text{Enthalpie de }\Sigma s\text{ : }\delta m\, h_s}-\underbrace{\boxed{(\delta m u_e+P_e\delta V_e)}}_{\text{Enthalpie de }\Sigma e\text{ : }\delta m\, h_e}+\delta m(e_{cs}-e_{ce})+\delta m(e_{ps}-e_{pe})=\delta m w_i+\delta m q$$

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 δm on trouve l'expression du premier principe pour un système en écoulement :

$$\boxed{\Delta h+\Delta e_c+\Delta e_p=w_i+q}$$

Δ 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

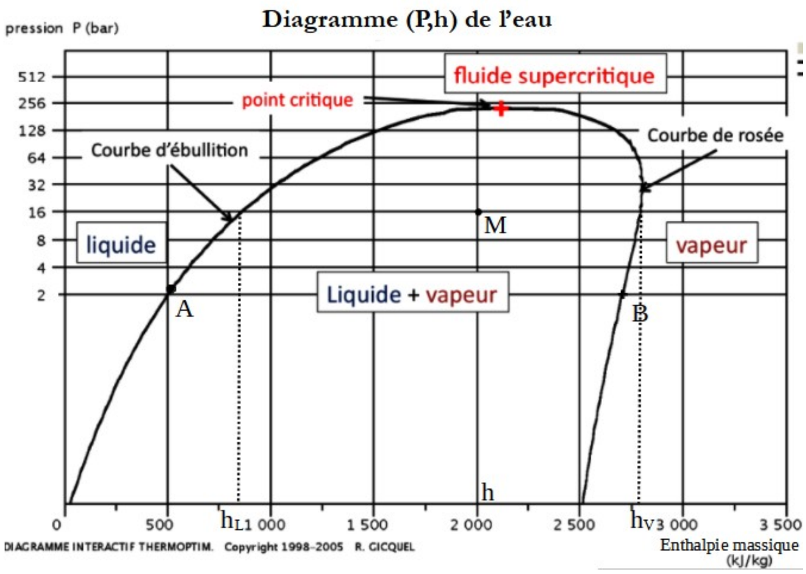
$$h_s - h_e = w_i + q$$

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 Tsat(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 ?

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

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

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

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

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

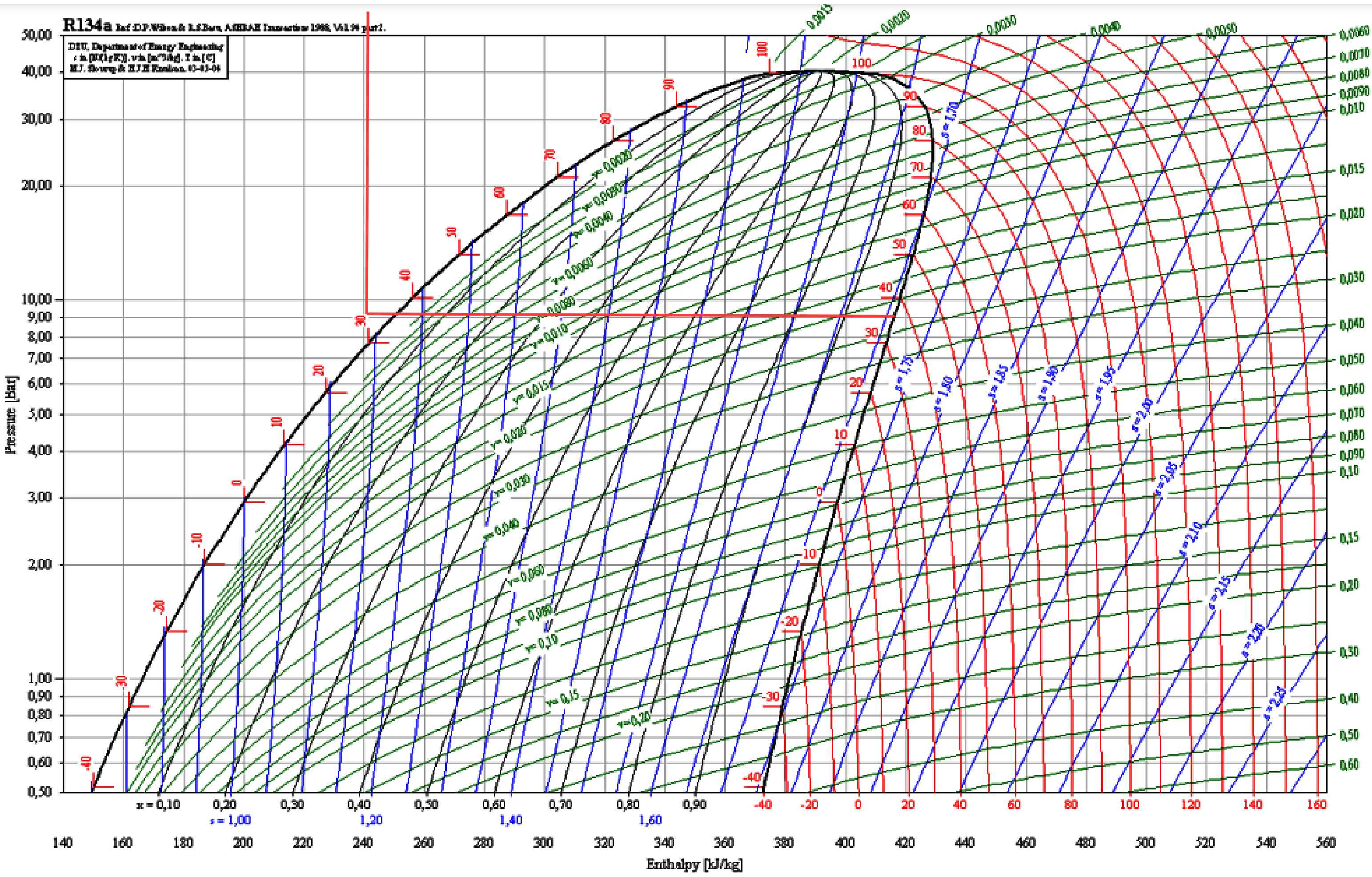
c'est normal car un gaz est plus désordonné qu'un liquide

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 l**es 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 corresponde à un titre en vapeur constant (il est indiqué en bas x= …)

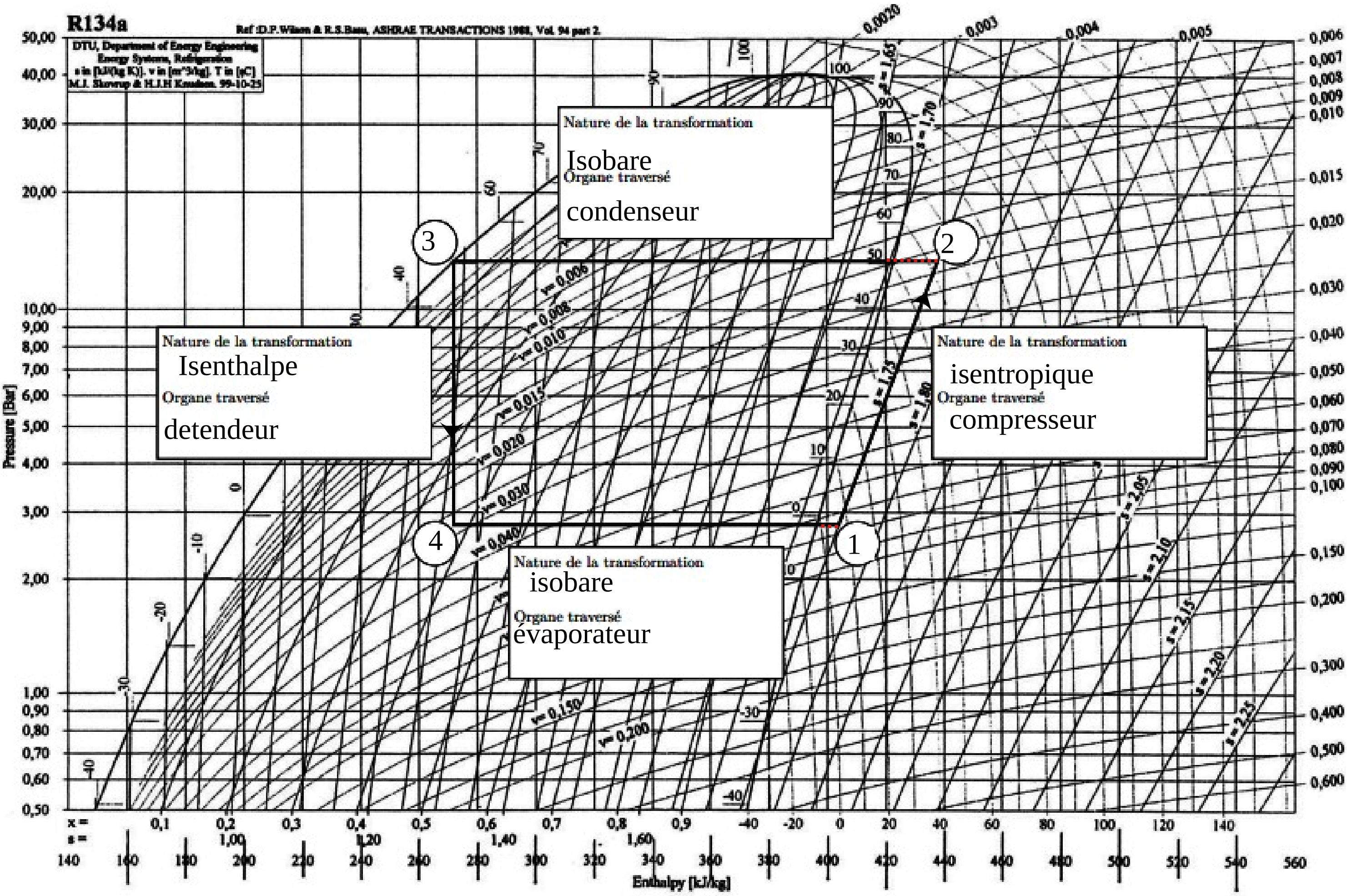
allure des isentropiques (evolution selon une tranfo adiabatique reversible)

$\Delta s=0$ 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 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 détendeur 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 détendeur est calorifugé et pas de pièces mobiles.**

On peut montrer que la transformation du fluide dans le détendeur 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 détendeur. La seul 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 → Δh>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 → Δh<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⁻¹)	405	438	270	270
Titre en vapeur	1 Fluide totalement gazeux	1 Fluide totalement gazeux	0 Fluide totalement liquide	0,35

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 → q=0

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

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 :

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

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 $\boldsymbol{e = \frac{q_f}{w_{ic}}}$ A.N $\boldsymbol{e = \frac{135}{33} = 4{,}1}$

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

2ème principe $s_{crée} = 0$ (Carnot reversible) et $\Delta s = 0$ → $q_c / T_C = -q_F / T_F$

$e_{carnot} = -1\,(1 - T_C/T_F) = T_F/(T_C - T_F)$

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

$$e_{carnot} = \frac{270}{(323-270)} = 5{,}1$$

on a $e < e_{carnot}$ 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)