

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 relier aux 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 :

Machine

Machine

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

Par convention :

- $W_{\text{cycle}} > 0$ si la machine
ex : r
- $W_{\text{cycle}} < 0$ si la machine
ex :
- 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 :

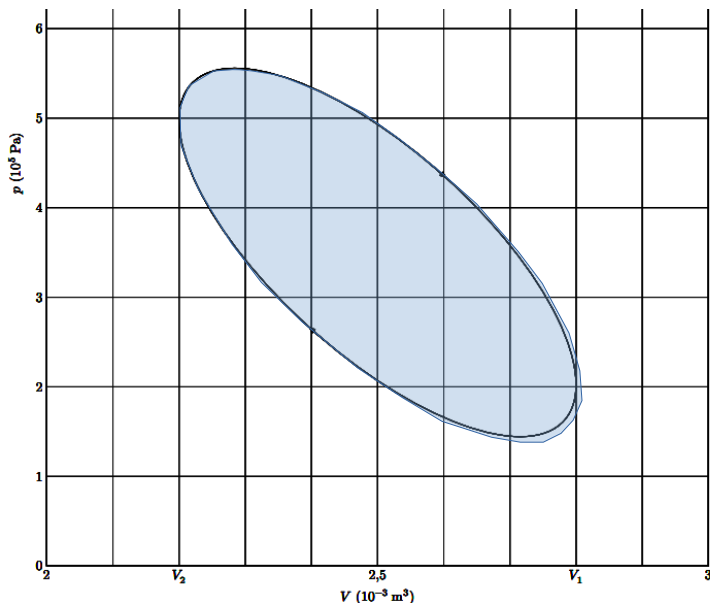
- si le cycle est parcouru dans le **sens trigonométrique** , le gaz

- si le cycle est parcouru dans **le sens horaire**, le gaz

I.4) Travail reçu lors d'un cycle

La valeur absolue du travail de la résultante des forces pressantes sur un cycle $|W_{\text{cycle}}|$ correspond

Exemple question concours : Donner un ordre de grandeur du travail



Aire du cycle :

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

ainsi $W_{\text{cycle}} =$

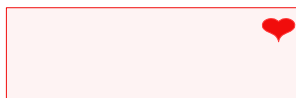
II Application des deux principes aux machines thermiques**II.1) Premier principe de la thermodynamique appliqué à la machine thermique (sur un cycle)**

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 →

→ 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

Le premier principe donne donc :



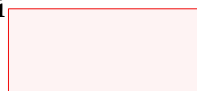
1^{er} principe pour une machine cyclique



Rmq : Pour une machine en contact avec 2 thermostats (machine ditherme) :

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

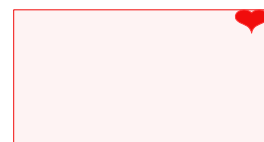
Comme S est aussi une fonction d'état , pour une transformation cyclique : $\Delta S_{\text{cycle}} =$
ainsi



Entropie échangée :

De plus $S_{\text{créé}}$

Pour machine ditherme le 2ème principe s'écrit :



II.3) Autre formulation du deuxième principe : Énoncé de Clausius**Énoncé :****Démo :** Pas d'énergie échangé sous forme de travail(car le processus aurait un autre effet qui serait de récupérer du travail) $\rightarrow$ donc $W =$ Deux sources qui échangent respectivement des énergies Q_C et Q_F

le premier principe sur un cycle donne donc

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)

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

$$T_C > T_F \Rightarrow$$

ce qui signifie **qu'en l'absence de travail :**

la machine thermique

la machine thermique

II.4) Autre formulation du deuxième principe : énoncé de Kelvin-Planck**Énoncé de Kelvin-planck :****Démo :**

Raisonnement par l'absurde : Cherchons à créer du travail

Ex : bateau qui avant tout seul simplement en prenant de l'énergie de la mer en laissant une traînée de glace

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 :



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



Remarque : Pourquoi un nom différent ?

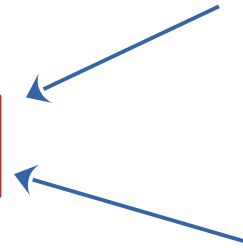
En général on parle de **rendement** quand **l'énergie intéressante sort réellement** du système qui réalise une conversion et si **l'énergie coûteuse y rentre réellement**.

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

III.2) Moteur thermique ditherme

a) Schéma de principe

Système
Mécanique
(par exemple
les pistons)



b) Preuve du signe des transferts thermiques

1^{er} principe →

comme $W_{\text{cycle}} < 0$ on a forcément $-(Q_c + Q_f)$ en divisant par T_c :

2^{ème} principe :

c) Expression du rendement du moteur

grandeur dépensée :

Grandeur intéressante :

**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 :****d) Théorème de Carnot****e) Valeur du rendement du moteur de Carnot en fonction des températures des thermostats****Démonstration à savoir faire :**1^{er} principe appliqué au moteur →2^{ème} principeRmq : comme $T_C > T_F$ on a bien $\eta > 0$ et $\eta < 1$ ce qui est nécessaire

e) Preuve du théorème de Carnot**Démonstration à savoir faire**

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 d'un moteur essence :**

rendement d'un moteur Diesel:

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 :

(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**) → **Q**

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

b) schéma de principe

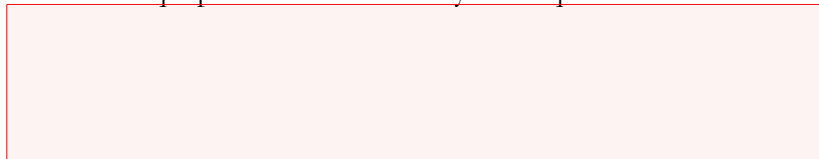
Attention : (Ne pas confondre la machine et le système que l'on souhaite refroidir!)

L'air dans le réfrigérateur ne fait partie 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 cherche 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}

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

Premier principe :

Deuxième principe

Finalement on obtient l'inégalité :

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



ODG : Climatiseurs de fenêtre

réfrigérateur de qualité moyenne :

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 ?

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

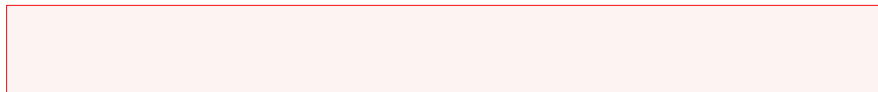
a) sens des échanges énergétiques

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

« 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**).



Rmq :

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

b) schéma de principe ♥



c) efficacité (ou **COP** pour **C**oefficient de **P**erformance) d'une pompe à chaleur

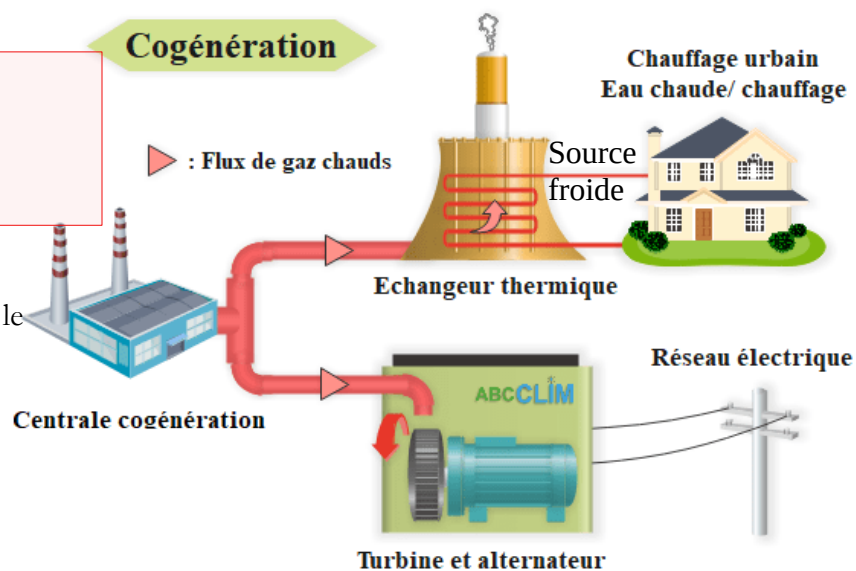


d) efficacité maximal (Pompe à chaleur de Carnot)

III.5) cogénération

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 :



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

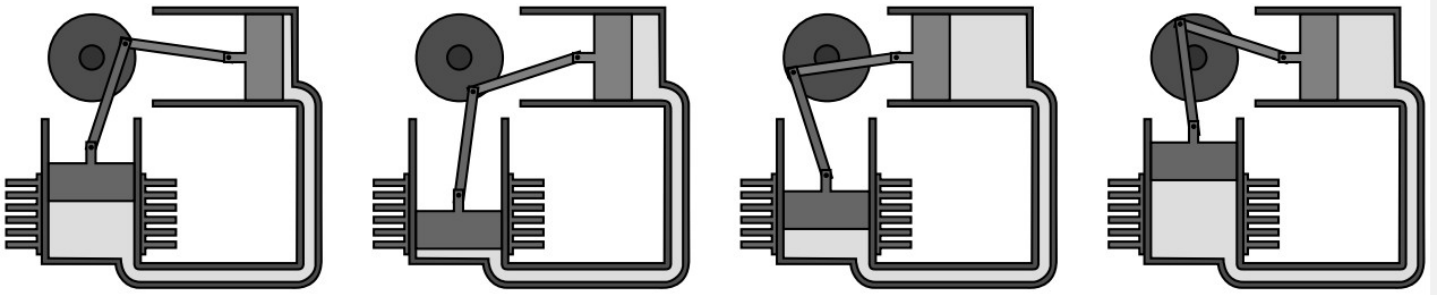
Vocabulaire :

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

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.

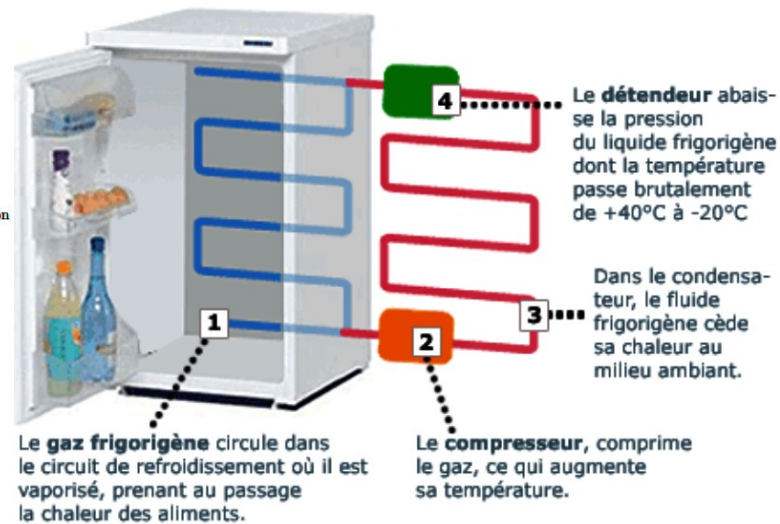
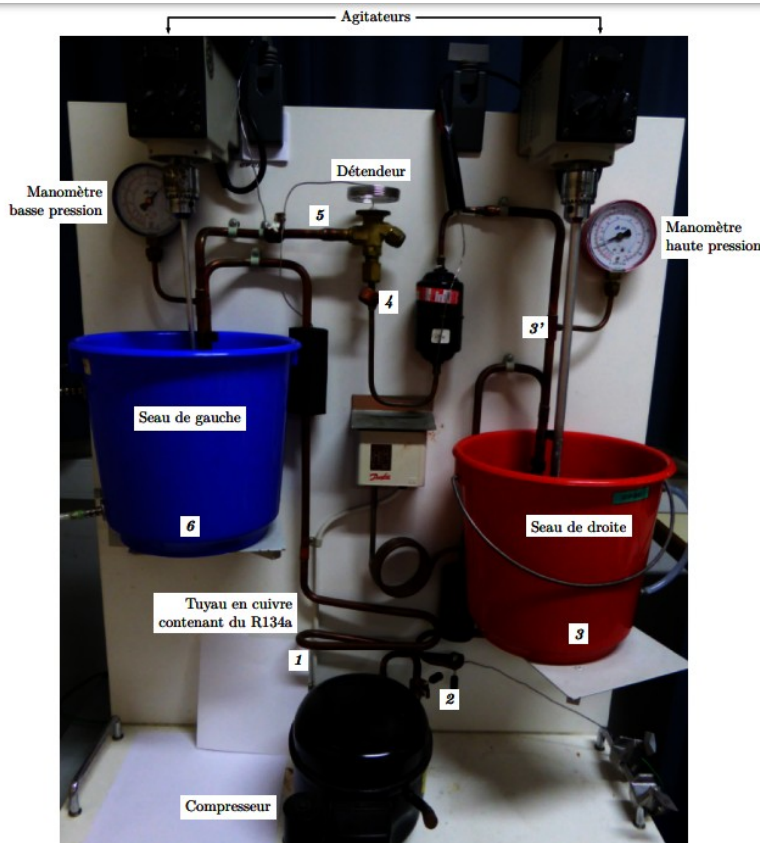
IV.2) Exemples de machines thermiques avec circulation de fluide

Exemple 1 Moteur Stirling de type alpha :



Exemple 2 : Pompe à chaleur

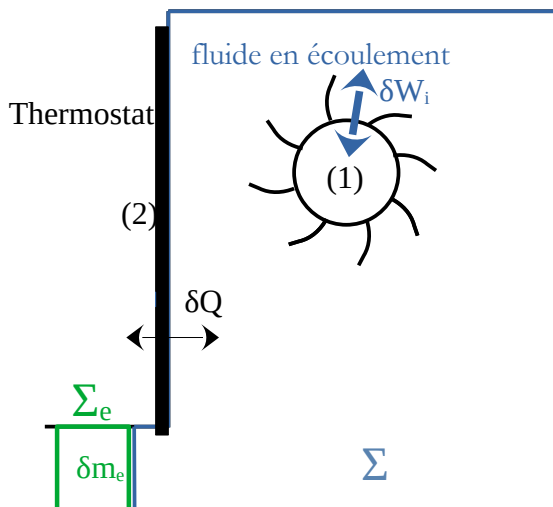
Exemple 3 : machine frigorifique



réfrigérateur

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

a) Système étudié :



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 :

$e_{pe}, e_{ce}, u_e, h_e, s_e$

Σ_s 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

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

$\delta W_i > 0$ si (1)

$\delta W_i < 0$ si (1)



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 Σ_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

Transfert thermique massique

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 Σ_e pour e_{ce}) et en sortie (dans le système Σ_s pour e_{cs})

énergie cinétique du fluide en entrée $dE_{ce} = 1/2 \delta m_e v_e^2 \rightarrow e_{ce} = dE_{ce} / \delta m_e$

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

$$E_p = \delta m g z + \text{cte} \rightarrow$$

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 :

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

on peut réarranger les termes :

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

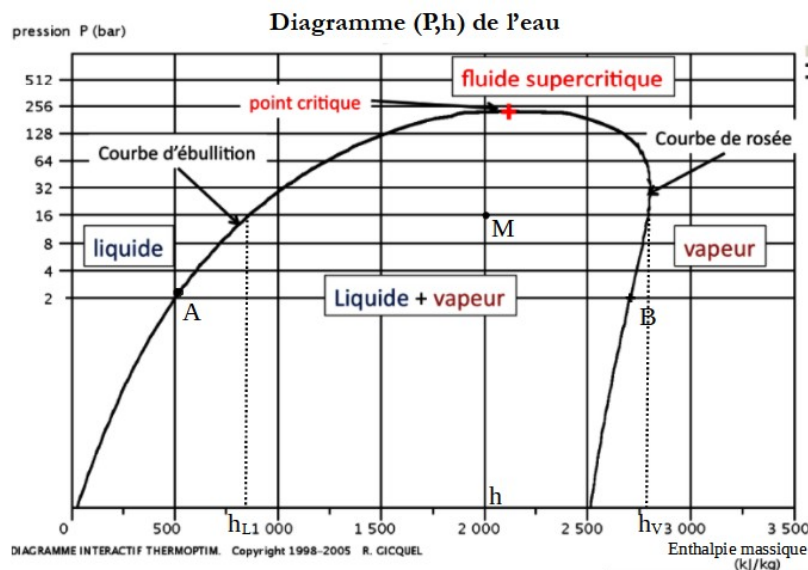
Enthalpie de Σ_s :
 $\delta m h_s$

Enthalpie de Σ_e :
 $\delta m h_e$

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

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

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

IV.4) Diagramme des frigorigènes (P, h) (aussi appelé diagramme enthalpique)*Très fréquent à l'écrit et à l'oral !***a) Présentation**

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 $T_{sat}(P)$.

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 ?

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 $\Delta s_{vap}(T) > 0$

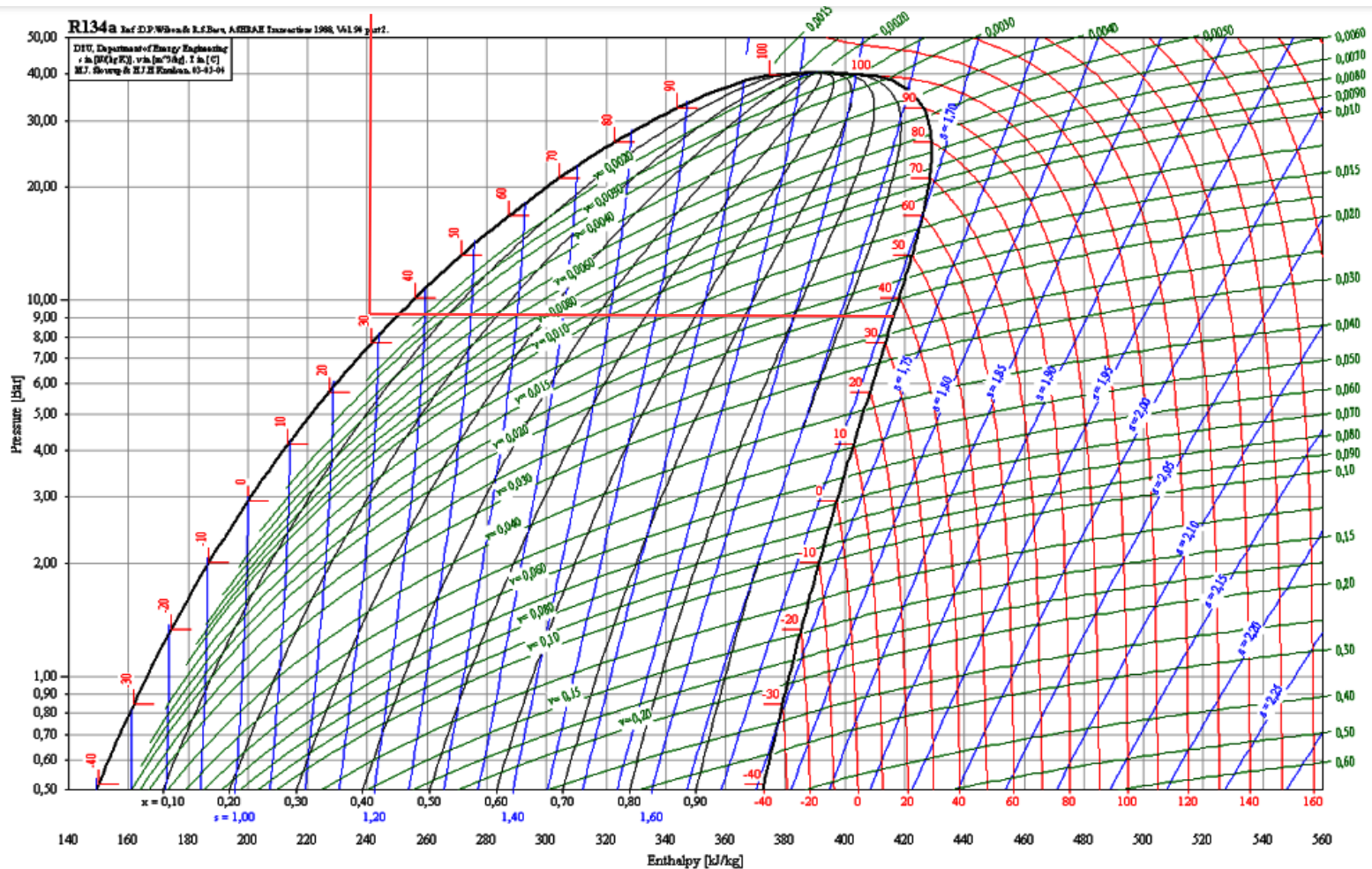
c'est normal car un gaz est plus désordonné qu'un liquide

c) Théorème des moment avec l'enthalpie :

le titre massique en liquide pour le système représenté en M est

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** 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**
- **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

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

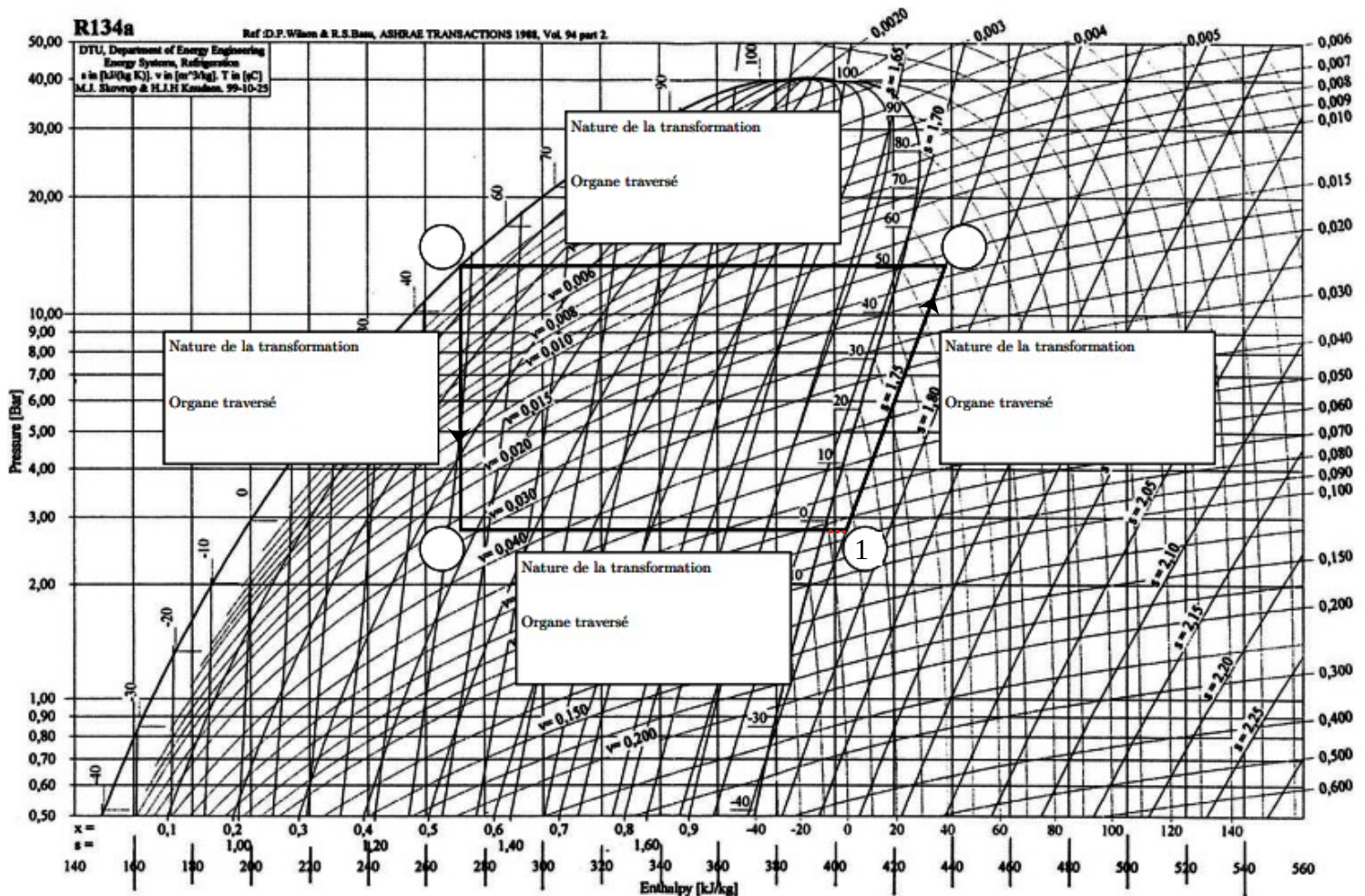
allure des isentropiques

$\Delta s = 0$ 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

Pour simplifier, on considère la compression adiabatique et réversible ($q=0$)

Dans le condenseur

Dans l'évaporateur

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

Dans le détendeur une chute de pression et de température se produit sans pièces mobiles

a) Justification de la nature de chaque transformation

-Horizontales →

-Verticale →

- Évolution selon courbe

b) Justification des organes traversés et sens de parcours

→ on sait que la transformation dans le compresseur est adiabatique réversible → elle est donc la transformation correspondante est la courbe qui suit

→ 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

→ De plus d'après l'énoncé il y a une baisse de pression dans le détendeur. 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**

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

→ la transformation va de gauche à droite dans le diagramme (P,h) → **c'est l'isobare**

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

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

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

État du fluide	1	2	3	4
Pression (bar)				
Température (°C)				
Enthalpie massique ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)				
Titre en vapeur				

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

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 $w_i =$

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

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

Pour une machine de Carnot (sur un cycle complet)