

Chapitre 3 Machines thermiques

Une **machine thermique** est un système fermé (noté souvent Σ) capable de

.....

.....

 **Relire les chapitres 0, 1 et 2** 

Principes physiques :

Principe	Expression	Unité (Unité du S.I.)	Dimension
1 ^{er}	$\Delta U + \dots = \dots + \dots$	J (kg.m ² .s ⁻²)	
2 nd	$\Delta S = \sum_i \frac{\dots}{\dots} + \dots$	J.K ⁻¹ (.....)	

I. Machine motrice

Lors d'un cycle de transformation, le système, souvent un liquide ou un gaz, subit plusieurs transformations puis revient à son état initial : \Leftrightarrow **lors du cycle.**

Le 1^{er} principe donne : $\Delta U_{cycle} =$

Le transfert thermique **total** est égal et opposé au travail **total** des forces extérieures

Le travail total est la somme algébrique de tous les travaux échangés par le système :

$$W = \sum_{forces} W(\overline{F}_{ext}) \text{ et de même pour le transfert thermique total } Q = \sum_i Q_i.$$

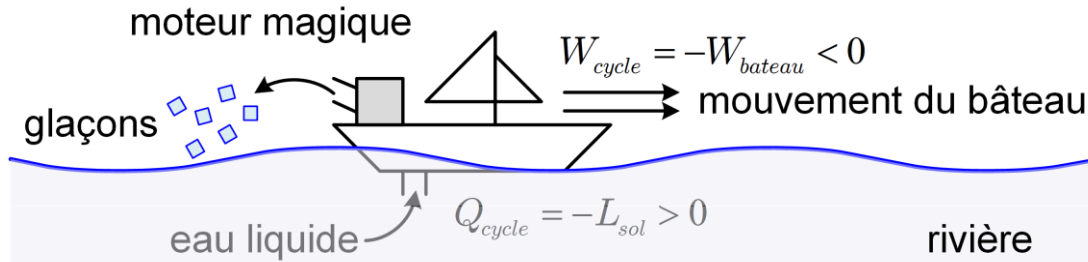
-----► sens réel de déplacement d'énergie
 —————► sens conventionnel pour le système

➤ Dans le cas d'un **moteur**, de voiture par exemple, le système un transfert thermique **total** $Q > 0$ apporté ou **en partie** par la combustion du carburant et ou ou un travail **total** $W < 0$ qui sert **en partie** au

➤ Dans le cas d'un **récepteur**, un réfrigérateur par exemple, le système un travail **total** $W > 0$ apporté **en partie** par une prise électrique et ou un transfert thermique **total** $Q < 0$, chaleur **en partie** venant de

A. Moteur monotherme ?

Soit un bateau qui avancerait grâce à un moteur transformant l'eau d'une rivière sur laquelle il navigue en glace. Ce moteur récupérerait de la rivière une chaleur $Q > 0$, la transformerait en travail $W < 0$ qu'il fournirait au bateau pour avancer en mettant en route une hélice sous l'eau ou sur le bateau s'il est à voiles.



Le système est en contact avec, la rivière.

L'eau se solidifie à $T_{sol} = \dots \text{K}$. Elle libère une énergie : $\Delta H_{sol} = L_{sol} > 0$, une énergie libérée lors de la formation de liaisons hydrogène dans la glace. Du point de vue du bateau, il reçoit $Q_s = \dots$ (s pour source). En appliquant le 1^{er} principe :

...

Ce travail peut être fourni au bateau $W_{bateau} = -W < 0$. Du point de vue du bateau, le travail mécanique est (chapitre 1 page 11) donc il peut servir à faire avancer le bateau.

D'après le 1^{er} principe, ce type de moteur est envisageable alors pourquoi ça n'existe pas ?

2nd principe :

Le système subit plusieurs transformations puis revient à son état initial :

\Leftrightarrow **lors du cycle donc**

Précédemment, on a vu que $Q > 0$ donc on aboutit à $W < 0$.

D'après le 2nd principe, l'entropie de création ne peut que croître : $S_{cr} \geq 0$ or on constate le contraire pour ce moteur monotherme donc Ce bateau n'existe pas tout comme on ne peut pas construire de réfrigérateur avec un système en échange thermique avec seulement une source extérieure. Puisque $S_{cr} \geq 0$, il faut donc que $W > 0$ et que $Q < 0$.

Une machine monotherme i.e. un système fermé n'échangeant de l'énergie qu'avec une seule source, un seul thermostat

.....

B. Etude du cycle Diesel, 2^{ème} partie

Le **moteur Diesel** comme tous les moteurs à est une **machine** *i.e.* une machine dont le système qui subit le cycle des transformations est en contact avec une source et une source Dans le cas du moteur Diesel, la **source** à une température fixe $T_c \approx 1000\text{ K}$ n'est pas proprement définie mais elle correspond à la combustion du carburant fournissant une **chaleur** 0 au système. La **source** est l'air extérieur à une température ambiante $T_f \approx 293\text{ K}$ retirant une **chaleur** 0 au système lors du refroidissement du moteur. Le moteur fournit vers l'extérieur un **travail** W compté négativement car du système.

*Schéma de principe d'une machine ditherme motrice (à connaître **par cœur**)*

1. Théorème de Carnot

On définit le rendement η d'un moteur par l'expression suivante :

$$\boxed{\hspace{15em}} \quad (\eta < 1)$$

Pour obtenir une valeur **positive** du rendement, on prend la valeur absolue du travail puisqu'il est négatif : $|W| = \dots$ car $W < 0$, c'est bien l'énergie qui sera utile pour faire tourner les roues d'une voiture par exemple. L'énergie Q_c associée à la combustion correspond à ce qu'il a fallu fournir à la machine pour la faire fonctionner.

Le 1^{er} principe donne :

Le 2nd principe donne :

D'où $\eta =$ (les f en haut, les c en bas)

Pour une transformation réversible, $S_{cr} =$

Théorème de Carnot :

.....
 :

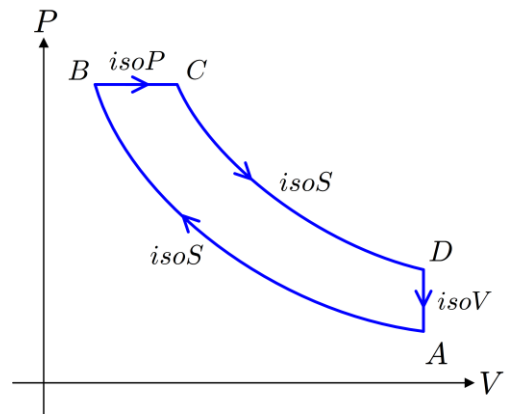
et si le cycle est réversible,

2 . Rendement du moteur Diesel

Ayant rarement accès aux valeurs des températures des 2 sources T_c et T_f , il faut très souvent repartir de la définition du rendement :

$\eta =$

Dans le cycle Diesel d'un gaz parfait, on rappelle que les transformations AB et CD sont donc le système n'échange pas de chaleur.



➤ Réchauffement isobare BC, 2^{ème} loi de Joule + 1^{er} principe :

...

➤ Refroidissement isochore DA, 1^{ère} loi de Joule + 1^{er} principe :

...

D'où $\eta =$ pour le cycle Diesel d'un **gaz parfait**.

➤ *Ordres de grandeur de rendement :*

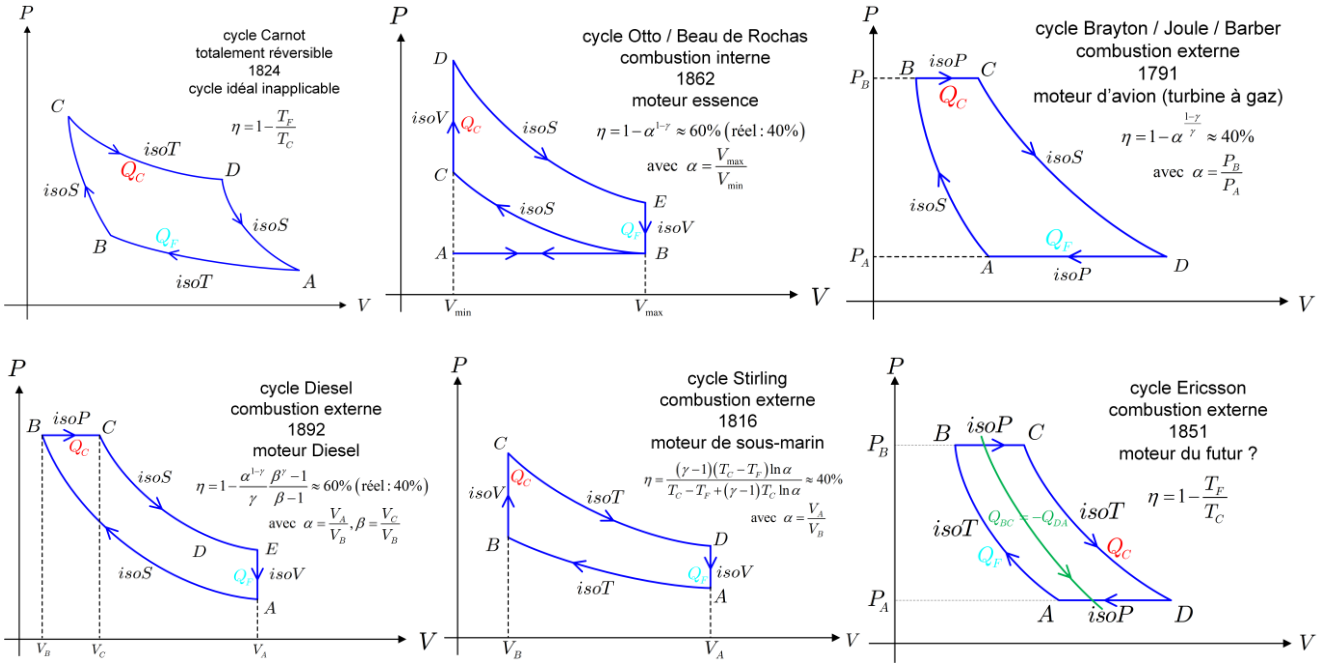
$T_A \approx 320 \text{ K}, T_B \approx 970 \text{ K}, T_C \approx 2285 \text{ K}, T_D \approx 1425 \text{ K}, \gamma = 1,4$ d'où $\eta \approx \dots = \dots\%$

Les rendements des moteurs à combustion interne vont

Le théorème de Carnot donne la limite réversible :

Air ambiant : $T_f \approx 25^\circ\text{C}$, Combustion : $T_c \approx 1000 \text{ K}$ donc $\eta^{\text{rév}} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \approx \dots = \dots\%$

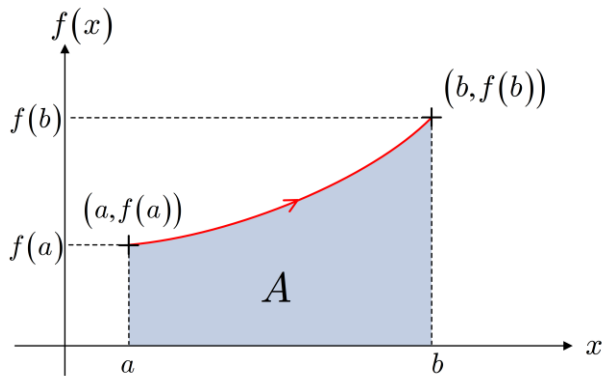
➤ Exemples de machines motrices théoriques :



3. Aire dans le diagramme TS

Il est intéressant de travailler dans le diagramme TS appelé **diagramme**

- Transformation quelconque : $\delta Q =$
- Transformation réversible : $\delta Q^{\text{rev}} =$



L'intégrale correspondant à l'aire sous la courbe s'écrit : $A = \int_a^b f(x) dx$

Dans le diagramme, $A =$

Pour une transformation réversible, la chaleur Q échangée vaut :

-
-
-

4. Cycle dans le diagramme TS

Une transformation isotherme correspond à un dans le diagramme TS mais il n'y pas de transformation isotherme dans le cycle Diesel. Une adiabatique réversible *i.e.* une isentropique correspond à un

➤ Isochore DA : identité thermodynamique + 1^{ère} loi de Joule (chapitre 2 page 5) :

...

On passe à l'exponentiel : ...

En prenant une référence T_0 correspondant à S_0 , $T_0 =$ d'où :

$$\boxed{} \text{ avec la référence } T(S_0) = T_0$$

Une isochore correspond à une dans le diagramme TS .

➤ Isobare BC : identité thermodynamique + 2^{ème} loi de Joule (chapitre 2 page 5) :

...

On passe à l'exponentiel : ...

et en posant $T(S_0) = T_0$,

$$\boxed{}$$

Une isobare correspond aussi à une dans le diagramme TS .

Puisque $C_p =$ $> C_v$ car $\gamma > 1$ alors $\frac{1}{\dots}$ $\frac{1}{\dots}$ donc :

Une isochore croît qu'une isobare dans le diagramme entropique.

Pour l'allure, on respecte que $T_D > T_B$.

Pour l'isochore, $dS < 0$ donc $Q_f =$

Pour l'isobare, $dS > 0$ donc $Q_c =$

L'aire du cycle Diesel A_{cycle} est tel que :

$$A_{\text{cycle}} =$$

La chaleur du cycle vaut : (chapitre 1 page 11)

$$Q_{\text{cycle}} =$$

$$=$$

Or $W_{\text{cycle}} = -Q_{\text{cycle}}$ donc < 0 , on retrouve bien un cycle

Dans le diagramme TS, les cycles sont parcourus dans le même sens que dans le diagramme PV :

II. Machine frigorifique

Objectif : Déterminer les éléments nécessaires à la construction d'un réfrigérateur en respectant le 1^{er} et le 2nd principe de la TH des systèmes fermés (P. Archambault, lycée St Louis, Paris 6^{ème}).

Le but d'un réfrigérateur est de maintenir des aliments à une certaine température T_F **inférieure** à celle l'extérieure notée T_C .

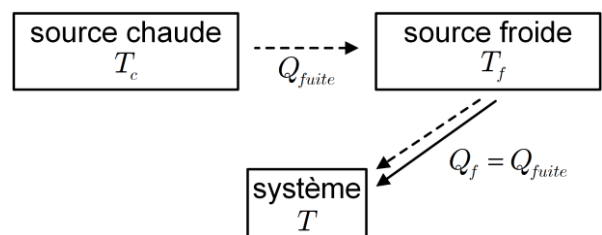


La zone où se trouvent les aliments appelée **source froide (SF)** ne peut pas avoir de parois parfaitement donc il va exister un transfert thermique spontané ou chaleur de fuite Q_{fuite} du ou **source chaude (SC)** vers la source froide qui va augmenter son énergie interne, d'après le 1^{er} principe :

Puisque la pression et le volume ne varient pas, la source froide voit sa température, il faut trouver le moyen d'extraire cette chaleur de fuite de la source froide afin de maintenir la zone des aliments à une température constante T_f .

A. Construction théorique

On considère un certain **système** capable d'extraire la chaleur de fuite de la SF.



➤ Du point de vue de la source froide :

...

D'après le 1^{er} principe, elle $Q_{fuite} > 0$ et $-Q_f < 0$ de sorte que ces chaleurs soient et que la SF reste à la température T_F .

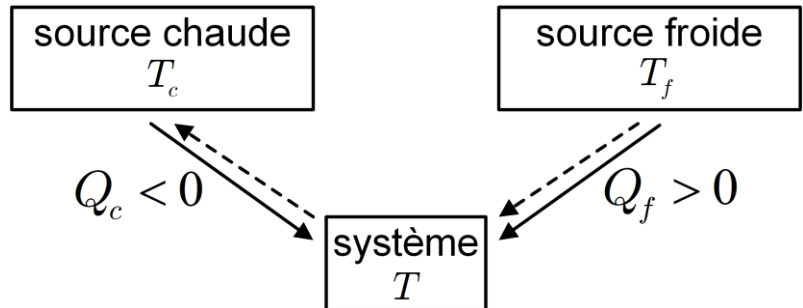
➤ Du point du vue du système, il reçoit $Q_f = Q_{fuite} > 0$. D'après le 1^{er} principe, $\Delta U = Q_f + W$. Dans le cas d'un cycle, il faut que $\Delta U_{cycle} = 0 \Rightarrow$ or on se retrouve dans le cas d'une machine où le système n'échange qu'avec la source froide.

D'après le 2nd principe, on a vu que (page 2). Pour que $S_{cr} \geq 0$, il faut que la SC échange une chaleur Q_c avec le système tel que d'après le 2nd principe :

...

...

Comme toutes les grandeurs dans la parenthèse sont , $Q_c < 0$, le système va de la chaleur à la source chaude *i.e.* au milieu extérieur. De plus :



$|Q_c| =$

Or $T_c > T_f$ donc

Salviati : Selon les conventions, les flèches indiquent parfois le point de vue, parfois le sens réel de l'énergie mais peu importe leur sens, cela ne change rien aux signes des grandeurs.

La chaleur cédée par le système à la SC doit être (en valeur absolue) que la chaleur reçue de la SF. Exemple : $Q_f = 150 \text{ kJ}$ et $Q_c = \dots \text{ kJ}$ sont des valeurs possibles.

D'après le 1^{er} principe appliqué pour le moment au système : $\Delta U_{\text{cycle}} = Q_c + Q_f$
<0 >0

Mais $\Delta U_{\text{cycle}} = \dots$ or $Q_c \neq -Q_f$ donc il manque une grandeur dans le bilan énergétique :

...

Il est **nécessaire** de à la machine ditherme *i.e.* au système pour compenser en terme d'énergie la chaleur cédée à la SC telle que $Q_c =$


B. Construction pratique



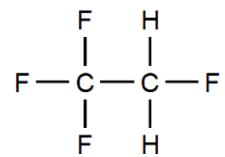
Quel est concrètement ce système dont on peut contrôler les échanges ?

Un système capable de “prendre la chaleur de la SF pour la donner à la SC” ne peut être qu’un

Comme un glaçon prend naturellement de l’énergie à l’air ambiant pour devenir liquide, la SF doit naturellement “chauffer” le fluide qui est un Il va se au contact de la SF. L’air ambiant est à 20°C et c’est parce que le glaçon se change en eau à une température plus faible de 0°C que cela est possible. Dans un congélateur, $T_f \approx -18^{\circ}\text{C}$, il faut donc un fluide qui se vaporise en dessous de T_f donc tel que $T_b >$

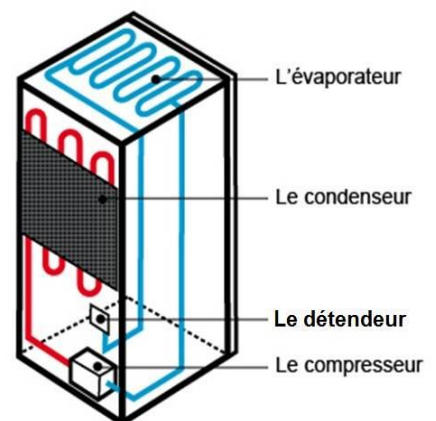
 **Culture scientifique :** L’eau n’est pas utilisable comme fluide ici

puisque sa température d’ébullition est de 100°C mais il existe plusieurs fluides ayant une température de vaporisation très basse comme le R134a



ou dans la nomenclature officielle : 1,1,1,2-tétrafluoroéthane. C’est un dérivé fluoré avec 4 fluors. Il est **inoffensif** pour la couche d’ozone car il ne contient pas de chlore : les dérivés chlorés sont des catalyseurs de la réaction de dismutation de l’ozone O_3 en dioxygène O_2 . Toutefois, c’est un car 1 kg de R134a libéré dans l’atmosphère est équivalent à 1300 kg de CO_2 libérés participant au réchauffement climatique. Le R134a se vaporise à $T_{eb} \approx$ $^{\circ}\text{C}$ à $P = P_{vap} \approx 0,85 \text{ bar}$, il s’agit d’une température d’ébullition.

Les serpentins intérieurs en contact avec la SF et invisibles de l’extérieur forment l’..... là où le fluide qui y circule se vaporise. Les serpentins extérieurs forment le, là où le fluide sous forme gaz va se liquéfier pour redonner du liquide et retrouver son état initial *i.e.* terminer le cycle thermodynamique.



Comme de la vapeur d’eau donne naturellement de l’énergie à l’air ambiant pour devenir liquide, la SC doit naturellement “refroidir” le fluide qui est un gaz.

Le fluide sous forme gaz va se au contact de la SC.

L’air ambiant est à 20°C et c’est parce que la vapeur d’eau se change en eau à une température plus élevée de 100°C que cela est possible. Pour une cuisine, $T_c \approx 20^{\circ}\text{C}$, il faut donc un fluide qui se liquéfie de T_c donc tel que $T_b >$

A pression atmosphérique, T_{\dots} T_{\dots}

On ne peut avoir T_{\dots} T_{\dots} qu'en modifiant la du gaz après l'évaporateur et avant son arrivée dans le **condenseur**.

Sur la courbe diphasée de l'équilibre liquide/gaz du diagramme PT , si ...

Si alors T_{\dots} T_{\dots} , il est donc nécessaire de comprimer le gaz avec un placé entre **l'évaporateur** et le **condenseur**.

Après le **condenseur**, on place un qui ramène le liquide proche de la pression atmosphérique afin qu'il revienne à l'état initial et pour que le cycle recommence :

- ▶ sens réel de déplacement de l'énergie
- ▶ sens conventionnel pour le système
- └——▶ parcours du fluide

Données : air extérieur : $T_c \approx 20^\circ C$, R134a : $T_{liq} \approx \dots^\circ C$, $P_{liq} \approx \dots$ bars

C . Efficacité d'un réfrigérateur

On définit l'efficacité ε d'un frigo par l'expression suivante :

$$\boxed{\hspace{10em}} \quad (\varepsilon > 1)$$

Le 1^{er} principe donne :

donc :

$$\varepsilon =$$

Le 2nd principe donne :

D'où $\varepsilon =$

Pour une transformation réversible, $S_{cr} = 0 \Rightarrow \boxed{\varepsilon^{rév} = \frac{1}{\dots}} =$ avec $\varepsilon \leq \varepsilon^{rév}$

Théorème de Carnot :

.....
 :

et si le cycle est réversible,

Applications numériques : $T_f \approx -18^\circ\text{C}$, $T_c \approx 20^\circ\text{C}$, $q_f = 146 \text{ kJ.kg}^{-1}$, $w = 54 \text{ kJ.kg}^{-1}$

D'où $\varepsilon^{rév} = \frac{\dots}{\dots - \dots} \approx \dots$ et $\varepsilon = \frac{\dots}{\dots} = \frac{\dots}{\dots} \approx \dots$ (grandeurs massiques : $q_f = \frac{Q_f}{m}$, $w = \frac{W}{m}$)

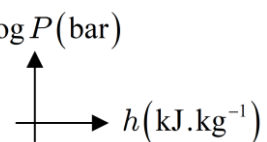
D . Cycle dans le diagramme hP

Le **diagramme de Clapeyron** i.e. diagramme Pv pourrait être intéressant pour tracer le cycle du réfrigérateur puisqu'il fait intervenir la courbe de i.e. la courbe "en cloche" caractéristique d'un changement d'état (chapitre 2 page 17). Cependant, il fait intervenir aussi les volumes massiques or pour la plupart des espèces chimiques, la différence entre v_{liq} et v_{gaz} est très importante :

$$\rho_{liq}(R134a) = 1200 \text{ kg.m}^{-3} \Leftrightarrow v_{liq}(R134a) = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\rho_{gaz}(R134a) = 5,3 \text{ kg.m}^{-3} \Leftrightarrow v_{gaz}(R134a) = 1,9 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ donc } \dots \dots$$

A cause des volumes massiques et de la détente difficile à représenter sur un diagramme Pv , on lui préfère le **diagramme**
 où h du système est portée en abscisse et la pression P est portée en ordonnée.



1 . Transformations pour le gaz parfait

- Pour un gaz parfait (GP), une transformation isotherme est telle que :
 2^{ème} loi de Joule : \Leftrightarrow . Si $T = cste$ alors \dots pour un GP.
 Une **isotherme** est aussi une i.e. une droite pour le GP.
- Pour une phase condensée, d'après le chapitre 2 page 12 : $h =$ =
 Une **isotherme** est aussi une pour la phase condensée.

➤ Pour un mélange diphasé, pendant un changement d'état isotherme et isobare :
 $P = cste$, l'allure d'une **isotherme** est une *i.e.* une droite

Une transformation isentropique pour un GP est d'après la 3^{ème} loi de Laplace :

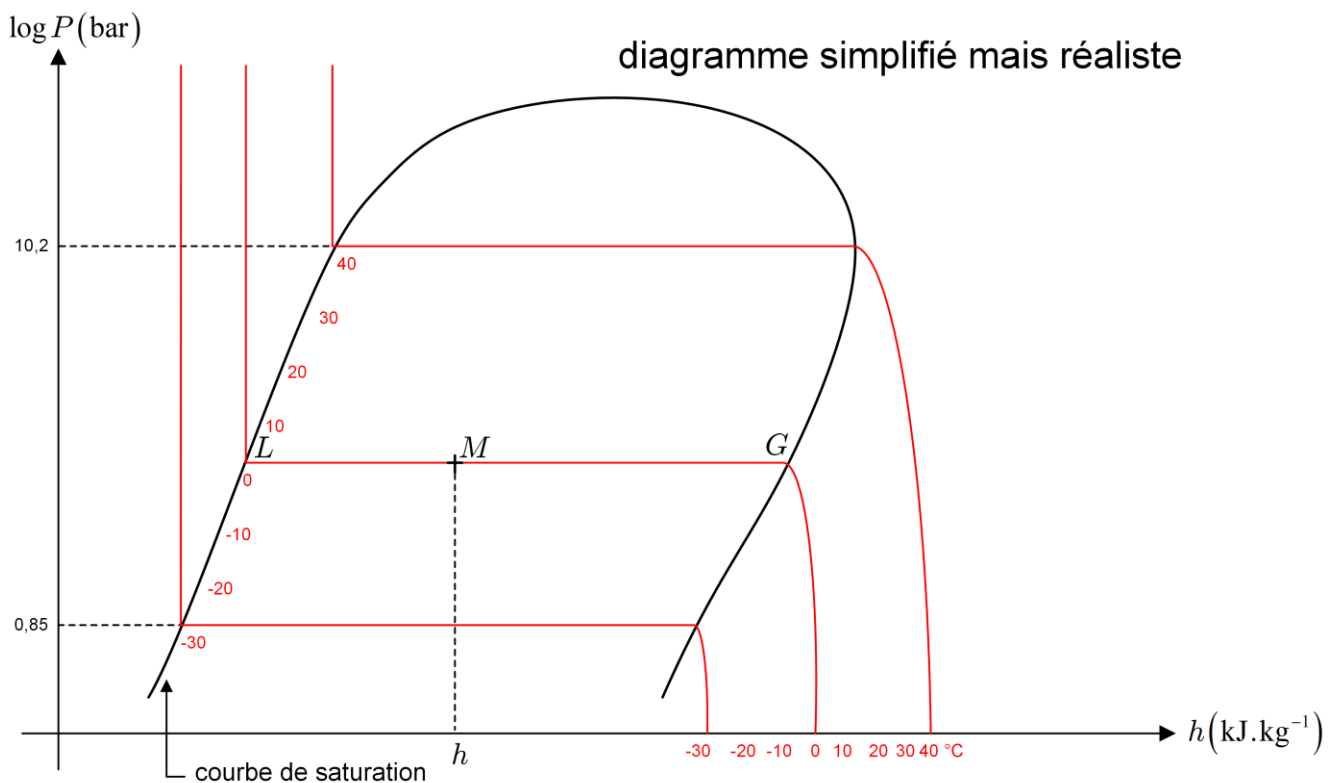
...

Une isentropique *i.e.* une est la courbe d'un
 à condition que l'échelle de pression soit logarithmique *i.e.* qu'on trace $\log P = f(h)$.

2. Allure dans le diagramme enthalpique

Le cycle de la machine frigorifique pour le R134a contient les transformations suivantes :

- La **vaporisation** est ($T_{vap} = -30^\circ\text{C}$), ($P_{vap} = 0,85 \text{ bar}$) mais il se produit une en fin de transformation qui amène le gaz à -20°C (évaporateur, Q_f).
- La **compression** est ($s = 1,78 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$) ce qui conduit le gaz à cause de la à 60°C et à une haute pression P_{liq} (compresseur, W).
- La **liquéfaction** est ($T_{liq} = +40^\circ\text{C}$), ($P_{liq} = 10,2 \text{ bars}$) mais il se produit un qui amène le gaz à 30°C (condenseur, Q_C).
- La **détente** est ($h = 240 \text{ kJ.kg}^{-1}$), le fluide retourne à son état initial en ramenant sa pression proche de la pression atmosphérique puis le cycle recommence.



Le diagramme enthalpique permet en un clin d’œil de savoir si un gaz possède un comportement Sur le diagramme, on reconnaît une zone de pression et de température où les isothermes sont verticales et donc possèdent des allures d’isenthalpique, c’est un comportement de A des pressions plus élevées pour le gaz, les isothermes sont plus ce qui montre un gaz qui n’est plus parfait.

L’allure des isothermes de la phase et du mélange dans le diagramme enthalpique sont très ressemblantes à celles du diagramme de : verticales pour le liquide, horizontales pour le mélange. Cependant, en ce qui concerne le gaz parfait, c’est très différent car les isothermes sont ici verticales alors que ce sont des dans le diagramme de ou de Clapeyron.

Dans la réalité, on constate que le système frigorifique n’est jamais liquide à basse pression, en effet, le point correspondant à la fin de la détente correspond à un où la quantité de liquide est et où la pression est de 0,85 bar ici.

Soit m la masse de mélange diphasée, m_ℓ la masse de liquide et m_g la masse de gaz au point M . Soit x la fraction massique en vapeur *i.e.* la proportion de gaz au point M .

D’après l’additivité de l’enthalpie, $H(M) =$ où $H_g(M)$ et $H_\ell(M)$ sont les enthalpies du gaz et du liquide au point M ce qui peut s’écrire : $mh =$ où $h_g = h(G)$ et $h_\ell = h(L)$ les enthalpies massique de gaz et de liquide à température donnée.

En divisant par m : $h =$ donc :

que l’on peut réarranger en : $x = \frac{h - h_\ell}{h_g - h_\ell}$

Le même type de relation existe pour les grandeurs associées au 1^{er} et au 2nd principe :



En posant $w_g = x$ la proportion en gaz, $w_\ell = 1 - x$ la proportion en liquide et en faisant apparaître $w_g + w_\ell = 1$ dans le membre de gauche, on obtient :

...

avec $\overline{LM} = h - h_\ell$ et $\overline{GM} = h - h_g$

On retrouve ici le comme celui du diagramme de Clapeyron (chapitre 2 page 19) mais avec l’enthalpie massique au lieu du massique. A condition que le diagramme ne soit pas qu’une allure et respecte l’échelle, on peut déterminer les proportions de liquide et de gaz au point M avec une simple

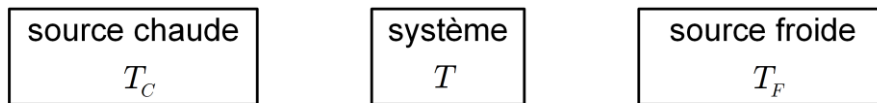
III . Récapitulatif pour les machines thermiques

1 ^{er} principe			
2 nd principe			
théorème de Carnot	machine motrice : (Diesel, Stirling, Joule, Beau de Rochas, etc...) $\eta =$	machine frigorifique (réfrigérateur) : $\varepsilon_f =$	machine calorifique (pompe à chaleur) : $\varepsilon_c =$

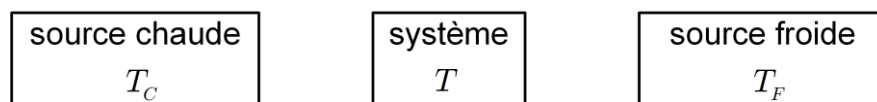
Dans le cas d'un cycle de transformations **réversibles**, les inégalités deviennent des **égalités**.

➤ *Point de vue énergétique :*

Un moteur suit un fonctionnement,, la source chaude donne de l'énergie au système qui donne à la source froide, on peut donc en récupérer un travail :



Un récepteur suit un fonctionnement,, la source froide donne au système qui donne à la source chaude, il faut apporter un travail pour aller dans le “mauvais sens” :



➤ *Diagrammes thermodynamiques :*

diagramme ...	variables	utile pour les ...
de Clapeyron	$P = f(V)$	échanges de travaux
enthalpique	$T = f(S)$ ou $T = f(s)$	changements d'état

Quel que soit le diagramme choisi pour représenter un cycle, un moteur se parcourt dans le sens horaire et un récepteur se parcourt dans le sens trigonométrique.

Table des matières

I . Machine motrice	1
A . Moteur monotherme ?	2
B . Etude du cycle Diesel, 2 ^{ème} partie	3
1 . Théorème de Carnot	3
2 . Rendement du moteur Diesel	4
3 . Aire dans le diagramme TS	5
4 . Cycle dans le diagramme TS	6
II . Machine frigorifique	7
A . Construction théorique	7
B . Construction pratique	9
C . Efficacité d'un réfrigérateur	10
D . Cycle dans le diagramme hP	11
1 . Transformations pour le gaz parfait	11
2 . Allure dans le diagramme enthalpique	12
III . Récapitulatif pour les machines thermiques	14
Table des matières	15