

I] Classification des machines thermiques**1. Par leurs fonctions** ★

- Les **moteurs thermiques** qui fournissent un travail mécanique à leur environnement.

Exemples :

- Moteur d'avion ou de voiture.
- Centrale thermique (la détente de vapeur d'eau permet la mise en rotation d'un alternateur produisant de l'électricité).

- Les **machines frigorifiques** qui réalisent un transfert thermique effectif de sens contraire au sens naturel (« sens naturel » = De la température la plus chaude vers la plus froide).

Exemples :

- Un réfrigérateur a pour but de refroidir son compartiment intérieur mais... il réchauffe la cuisine dans laquelle il se trouve.
- Une pompe à chaleur est destinée à réchauffer la maison ... mais elle refroidit le jardin.

Remarques :

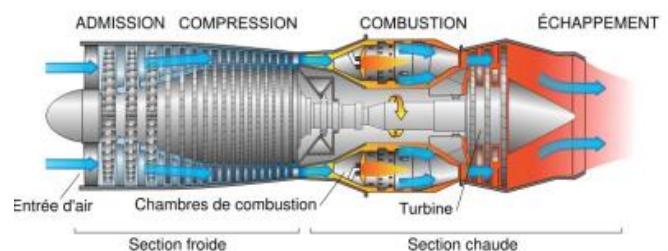
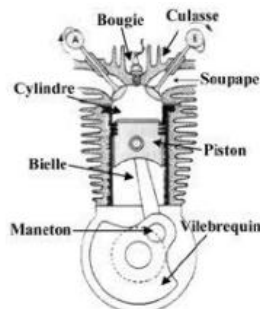
- Selon la finalité de la machine, le fluide peut être dit **caloporteur** ou **frigorigène**... mais ça ne change rien sur sa nature : un même fluide peut être utilisé dans une pompe à chaleur ou un réfrigérateur.
- De nombreuses autres fonctions sont possibles : liquéfier un gaz (production d'oxygène liquide, ou de gaz naturel liquéfié GNL), extraire un composé (captage de CO₂)...

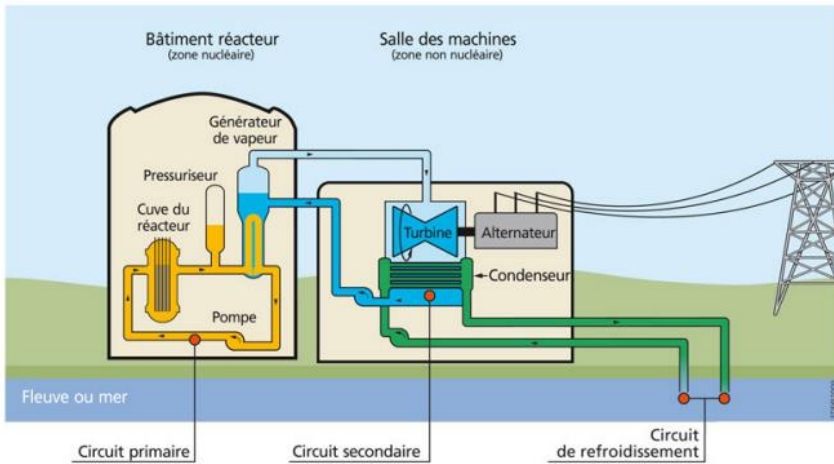
2. Par leurs structures

- Les **machines à pistons** : Les transformations ont lieu successivement dans une même chambre cylindrique, dont le volume varie grâce à un piston mobile. Plusieurs chambres peuvent être montées en parallèle (« moteur quatre cylindres »).

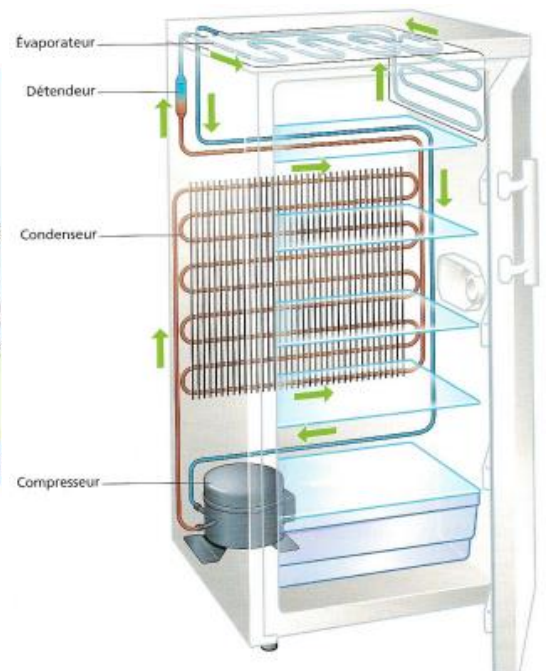
- Les **machines à écoulement de fluide** : Un fluide circule dans la machine et traverse les différents composants élémentaires dans lesquels il subit des transformations. Le fluide utilisé est qualifié selon les situations de fluide caloporteur ou de fluide frigorigène. Une machine à écoulement de fluide peut aussi bien être un moteur qu'une machine frigorifique.

- Les **machines cycliques** : Lorsque le même fluide en circuit fermé reproduit la même suite de transformations indéfiniment. De nombreuses machines à écoulement sont cycliques, c'est rarement (jamais) le cas pour les machines à pistons. Cependant, de nombreuses machines, même à pistons, peuvent être modéliser par des machines cycliques.

Moteur à explosion (4 cylindres)Turboréacteur



Centrale nucléaire REP



Réfrigérateur domestique

II] Généralité sur les machines dithermes cycliques

1. Source chaude et source froide

Une machine thermique est dite **ditherme** lorsque le fluide y échange du transfert thermique avec deux milieux de températures différentes, appelés **source chaude** et **source froide** modélisées par deux thermostats de température T_c et T_f .

Le fluide dans une machine ditherme échange aussi du travail, par l'intermédiaire de pièces en mouvement.

Une machine ditherme peut être aussi bien motrice que frigorifique.

Application : Pour les exemples discutés ci-dessus, identifier le fluide qui subit les transformations, les deux sources, et les pièces en mouvement permettant l'échange de travail.

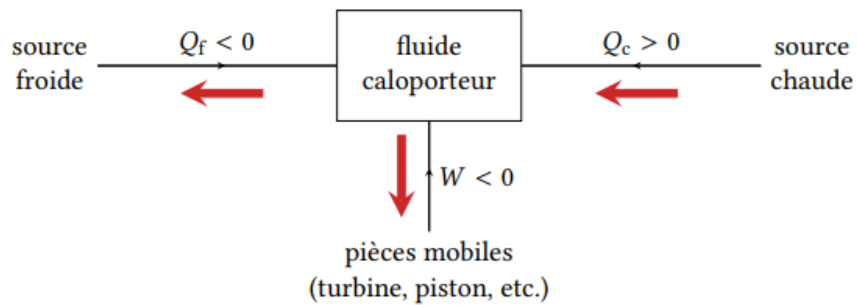
Machine	Fluide	Source chaude	Source froide	Pièces en mouvement
Moteur à essence	Mélange air + carburant	Modèle pour la réaction de combustion	Modèle pour le renouvellement du mélange	Piston
Centrale nucléaire	Eau du circuit secondaire	Eau du circuit primaire	Eau du circuit de refroidissement	Turbine
Réfrigérateur	Fluide frigorigène (isobutane R600a)	Air intérieur au frigo	Air de la cuisine	Compresseur
Turboréacteur	Mélange air + carburant	Modèle pour la réaction de combustion	Atmosphère	Compresseur et turbine

2. Diagramme d'échange

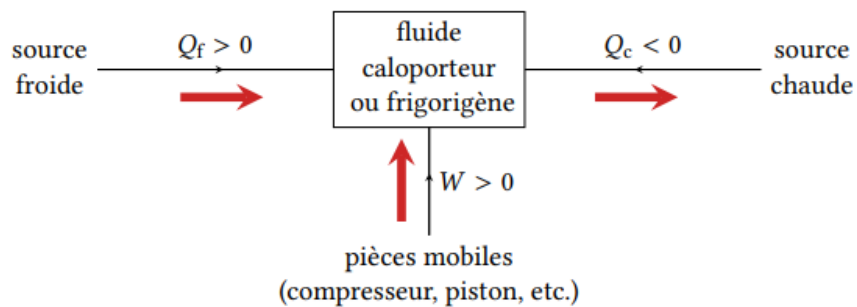


Le sens des échanges entre le fluide d'une machine et les sources dépend de sa fonction :

Cas d'un moteur :



Cas d'une machine frigorifique :



3. Performances de machines thermiques

De façon très générale, la performance d'une machine thermique est décrite par un nombre sans dimension :

$$performance = \left| \frac{\text{énergie intéressante récupérée}}{\text{énergie coûteuse dépensée}} \right|$$

Remarques :

- Le transfert thermique échangé avec le milieu naturel extérieur est toujours considéré gratuit.
- On note que les performances d'une machine sont définies sur un critère relevant davantage de l'économie que de la physique...

Application : Compléter le tableau ci-dessous à partir de la définition de la performance.

Type de machine	Énergie intéressante	Énergie coûteuse	Performance
Moteur	W	Q_c	Rendement $\eta = -\frac{W}{Q_c}$
Réfrigérateur	Q_f	W	Efficacité $e = \frac{Q_f}{W}$
Pompe à chaleur	Q_c	W	Efficacité $e = -\frac{Q_c}{W}$

Le rendement d'un moteur est toujours inférieur à 1, mais une efficacité peut être supérieure à 1.

Rendement d'installations motrices	Efficacité machines frigorifiques
Moteur voiture essence : $\eta \sim 30\%$	Efficacité pompe à chaleur air-eau : $e \sim 4$
Moteur avion de tourisme : $\eta \sim 20\%$	Efficacité pompe à chaleur air-air : $e \sim 3$
Moteur bateau porte-conteneur : $\eta \sim 50\%$	Efficacité climatiseur : $e \sim 3$
Centrale nucléaire : $\eta \sim 30\%$	Efficacité réfrigérateur : $e \sim 1,5$
Centrale à gaz : $\eta \sim 35\%$	Efficacité congélateur : $e \sim 1$

III] Principes de la thermodynamique appliqués aux machines thermiques cycliques dithermes

1. Premier principe, conséquence du caractère cyclique

★

Dans une machine cyclique, le fluide retrouve exactement son état initial à la fin du cycle. Le premier principe appliqué à l'ensemble du fluide sur un cycle complet s'écrit :

$$\Delta U = W + Q_c + Q_f \underset{\text{Cycle}}{=} 0$$

2. Deuxième principe, théorème de Carnot

★

L'efficacité maximale est atteinte pour un fonctionnement totalement réversible de la machine.

Le deuxième principe s'écrit :

$$\Delta S \underset{\text{Rev}}{=} \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_{\text{irrev}} \underset{\text{Cycle}}{=} 0$$

On peut alors exprimer l'efficacité et le rendement maximal en injectant les expressions du premier et deuxième principes à partir des expressions ci-dessus.

a. Rendement de Carnot d'un moteur

★

On cherche à exprimer le rendement maximum d'un moteur (noté η_c pour rendement de Carnot) en fonction des températures des sources chaude T_c et froide T_f .

En substituant l'expression $Q_f = -W - Q_c$ du premier principe dans le deuxième principe :

$$\frac{Q_c}{T_c} - \frac{W}{T_f} - \frac{Q_c}{T_f} = 0$$

En multipliant par $T_c \times T_f$:

$$T_f Q_c - T_c W - T_c Q_c = 0$$

En divisant par Q_c et en reconnaissant l'expression du rendement d'un moteur $\eta = \frac{-W}{Q_c}$:

$$T_f - T_c \frac{W}{Q_c} - T_c = T_f - T_c \eta_c - T_c = 0$$

Finalement :

$$\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

b. Efficacité de Carnot d'une machine réfrigérante

De même pour une machine réfrigérante, on cherche à exprimer l'efficacité maximum (noté e_c pour efficacité de Carnot) en fonction des températures des sources chaude T_c et froide T_f .

En substituant l'expression $Q_c = -W - Q_f$ du premier principe dans le deuxième principe :

$$-\frac{W}{T_c} - \frac{Q_f}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$$

En multipliant par $T_c \times T_f$:

$$-WT_f - Q_f T_f + Q_f T_c = 0$$

En divisant par W et en reconnaissant l'expression de l'efficacité d'une machine réfrigérante, $e = \frac{Q_f}{W}$:

$$-T_f - \frac{Q_f T_f}{W} + \frac{Q_f T_c}{W} = 0 \Leftrightarrow -T_f - e_c T_f + e_c T_c = 0$$

Finalement :

$$e_{c,frigo} = \frac{T_f}{T_c} - 1$$

c. Efficacité de Carnot d'une pompe à chaleur

Enfin, le même raisonnement est possible pour le cas d'une pompe à chaleur :

En substituant l'expression $Q_f = -W - Q_c$ du premier principe dans le deuxième principe :

$$\frac{Q_c}{T_c} - \frac{W}{T_f} - \frac{Q_c}{T_f} = 0$$

En multipliant par $T_c \times T_f$:

$$T_f Q_c - T_c W - T_c Q_c = 0$$

En divisant par W et en reconnaissant l'expression de l'efficacité d'une pompe à chaleur $e = -\frac{Q_c}{W}$:

$$-T_f e_c - T_c + T_c e_c = 0$$

Finalement :

$$e_{c,pac} = 1 - \frac{T_c}{T_f}$$

d. Théorème de Carnot

Une moteur thermique (ou une machine frigorifique) fonctionnant entre une source chaude de température T_c et une source froide de température T_f possède un rendement η (ou une efficacité e) inférieur(e) ou égal(e) à celui (celle) d'une machine réversible :

$$\text{Pour un moteur : } \eta \leq \eta_c$$

$$\text{Pour une machine frigorifique : } e \leq e_c$$

IV] Exemple de machine thermique ditherme : la machine frigorifique**1. Outils pour l'étude des machines thermiques** ★

Remarque : Les outils présentés ci-dessous sont au programme de 2^{ème} année. Cette partie est donc présentée à titre de complément, néanmoins ils sont bien utiles pour étudier les machines thermiques.

a. Diagramme des frigoristes

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

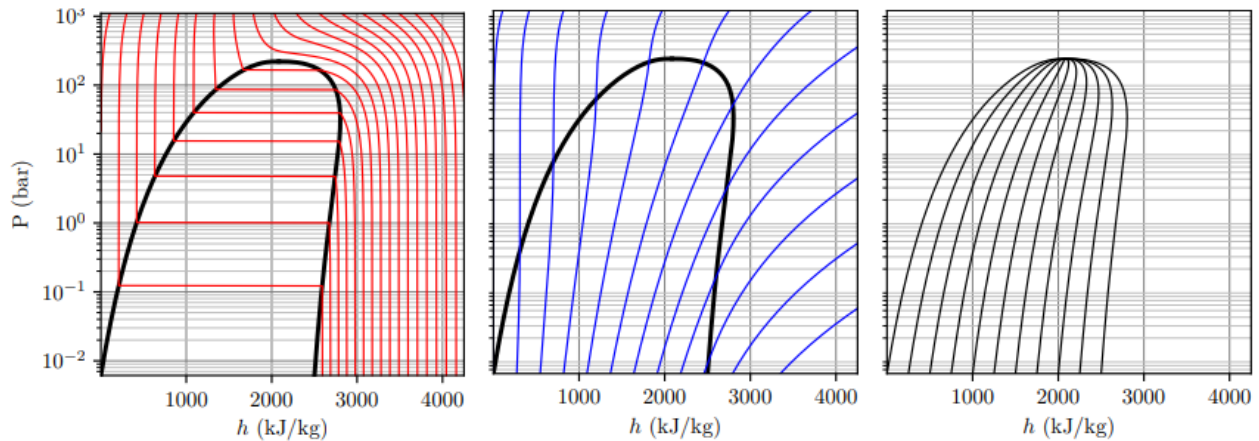


Diagramme des frigoristes de l'eau. Courbe de saturation en trait noir épais. Gauche : réseau de courbes isothermes $T = cte$. Centre : réseau de courbes isentropes $s = cte$. Droite : réseau de courbes isotitres $x = cte$.

- Attribution des domaines : il faut apporter de l'énergie pour passer d'un état liquide à un état de vapeur, donc $h_V > h_L$.
- Les propriétés du liquide saturant se lisent sur la courbe d'ébullition, côté gauche de la courbe de saturation, et celles de la vapeur saturante sur la courbe de rosée, côté droit.
- Le théorème des moments et son interprétation graphique restent valables : plus le point représentant le système est proche de la courbe de rosée, plus le titre en vapeur est élevé.

Application : Sur le diagramme des frigoristes du fluide réfrigérant R22, déterminer :

- 1) L'état du fluide et sa température sous une pression $P_1 = 5 \text{ bar}$ et une enthalpie massique $h_1 = 300 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.
- 2) L'état du fluide, son enthalpie massique et son entropie massique à $P_2 = 3 \text{ bar}$ et $T_2 = 50 \text{ °C}$.
- 3) les mêmes grandeurs lorsque, partant de l'état 2, on fait subir au fluide une compression adiabatique réversible jusqu'à $P_3 = 10 \text{ bar}$.
- 4) la pression de vapeur saturante à 20 °C .

Correction :

- 1) Placer le point ❶ sur le diagramme et lire : diphasé, $T_1 = 0 \text{ °C}$ (attention ce n'est pas de l'eau, donc pas solide)
- 2) Placer le point ❷ sur le diagramme et lire : vapeur sèche, $h_2 = 445 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $s_2 = 1,92 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.
- 3) On suit l'isentrope jusqu'à atteindre la pression de 10 bar et on lit $T_3 = 110 \text{ °C}$ et $h_3 = 482 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.
- 4) On repère l'isotherme et on lit la pression du palier de saturation : $P_{\text{sat}} \approx 9 \text{ bar}$.

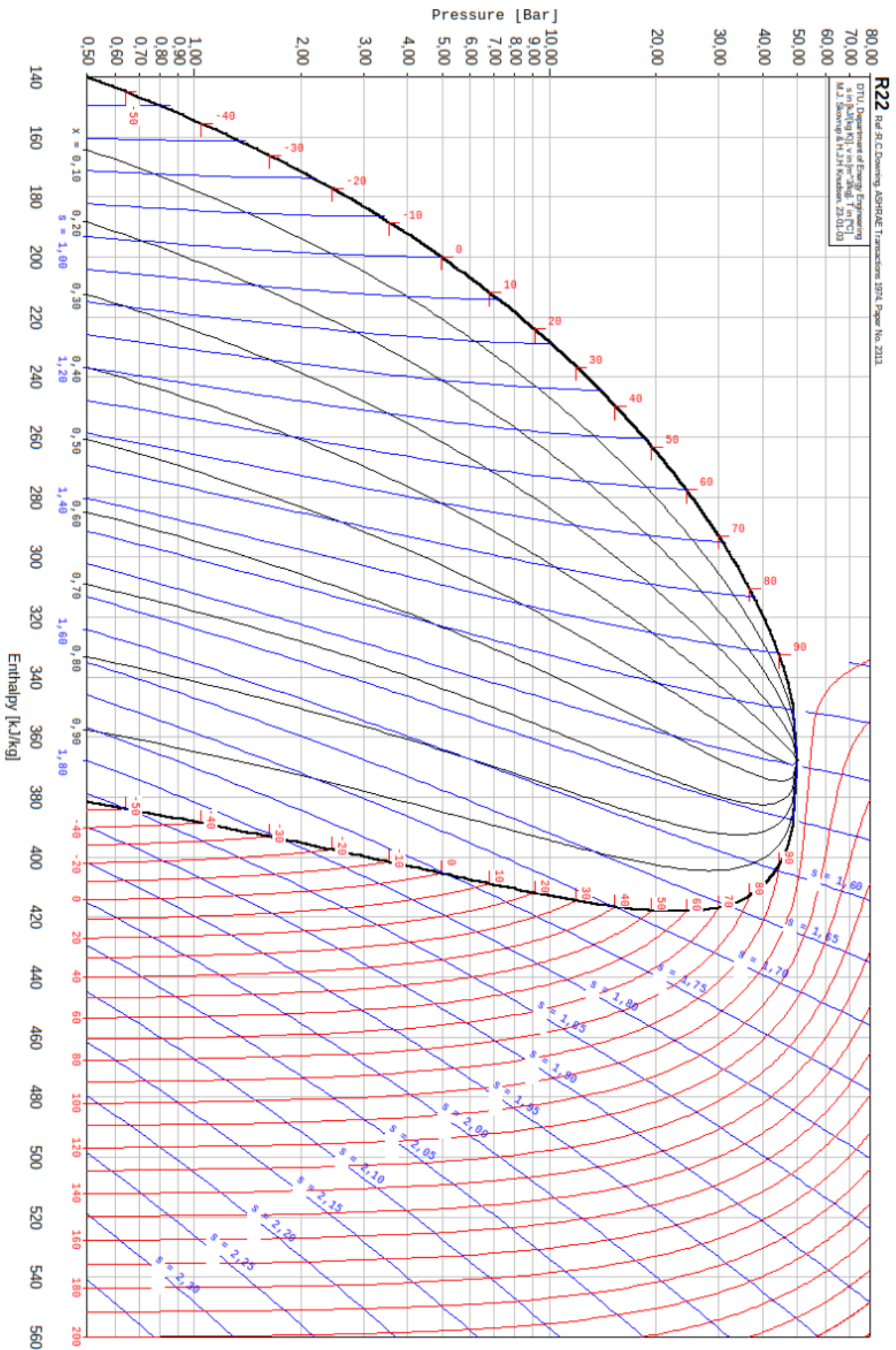


Diagramme des frigorisistes du réfrigérant R22

b. Premier principe pour les systèmes ouverts en régime stationnaire

Considérons un fluide en écoulement stationnaire, c'est-à-dire indépendant du temps, traversant un composant d'une machine, où il échange du travail et du transfert thermique.

Entre l'entrée et la sortie d'un composant thermodynamique en régime d'écoulement stationnaire :

$$\Delta h + \Delta e_m = (h_s + e_{m_s}) - (h_e + e_{m_e}) = w_i + q$$

Avec w_i le travail indiqué massique, q le transfert thermique massique et e_m l'énergie mécanique massique (par unité de masse traversant) algébriques reçus par le fluide dans le composant.

Remarques :

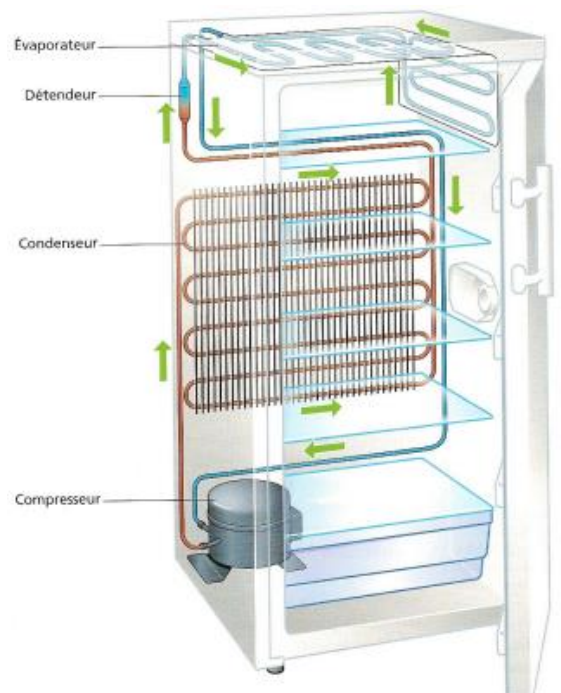
- Les grandeurs « par unité de masse traversant » s'expriment en $J \cdot kg^{-1}$ et s'interprètent comme étant reçues par **1 kg** de fluide entre son entrée et sa sortie du composant.
- En pratique, Δe_m est souvent négligeable devant Δh .
- Ici Δ ne désigne pas les variations des fonctions d'état du fluide entre un instant initial et final. Cela n'a pas d'intérêt, l'écoulement étant stationnaire, elles ne varient pas.

2. Principe d'une machine frigorifique

Une machine frigorifique réalise un transfert d'énergie thermique d'un milieu froid vers un milieu plus chaud, ce transfert est contraire au sens naturel des échanges thermiques et nécessite donc un apport d'énergie, fourni par un compresseur électrique.

Le fonctionnement repose sur la circulation d'un fluide frigorigène dans différents éléments du circuit :

- **L'évaporateur**, situé à l'intérieur du réfrigérateur, où le fluide s'évapore en absorbant de la chaleur aux aliments. (thermostat à T_f).
- **Le compresseur**, qui comprime le fluide frigorigène à l'état gazeux.
- **Le condenseur**, placé à l'arrière de l'appareil, où le fluide se liquéfie en rejetant de l'énergie thermique vers l'air ambiant (thermostat à T_c).
- **Le détendeur**, qui provoque une chute brutale de pression avant le retour dans l'évaporateur.



Le principe essentiel d'une machine frigorifique repose sur l'influence de la pression sur la température de changement d'état du fluide frigorigène.

Lorsque le fluide est comprimé, sa pression augmente et sa température de liquéfaction devient supérieure à la température ambiante : il peut alors se condenser en cédant de l'énergie thermique à l'extérieur.

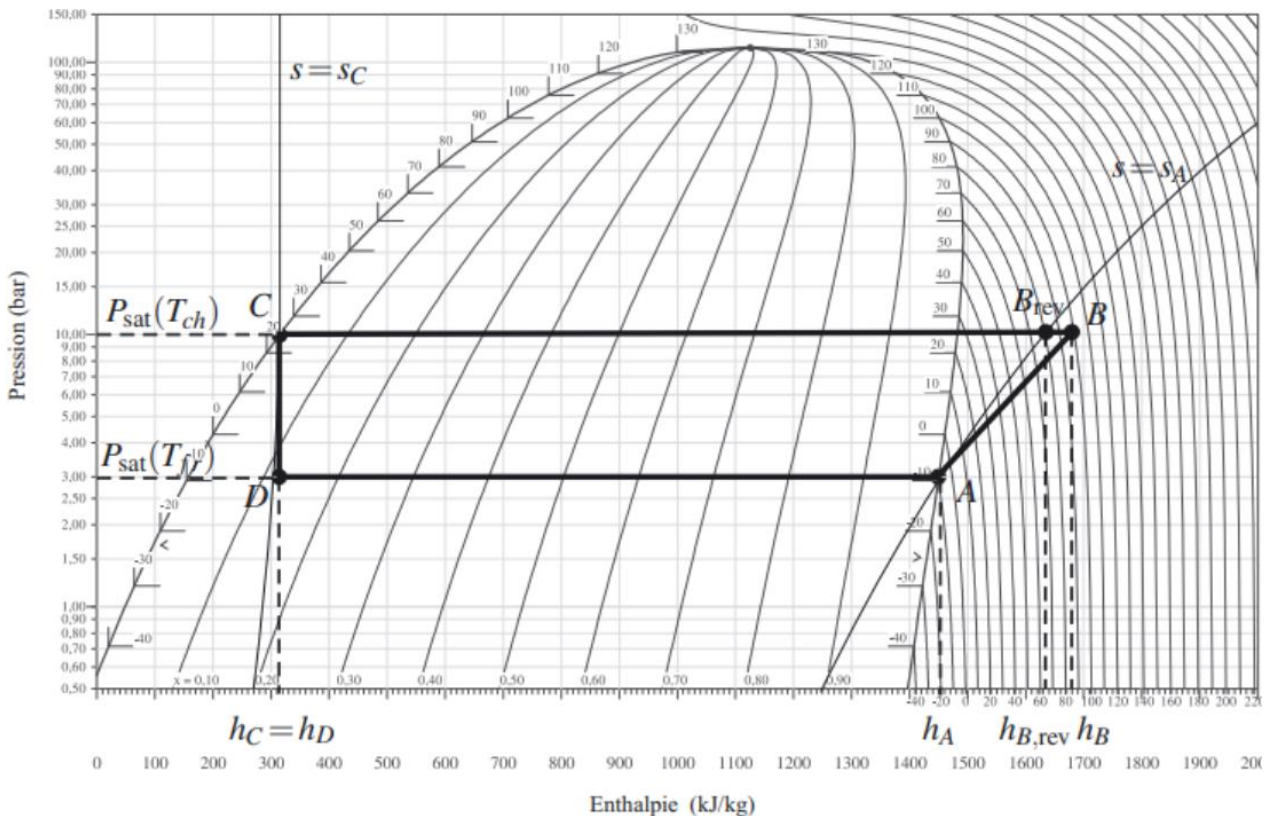
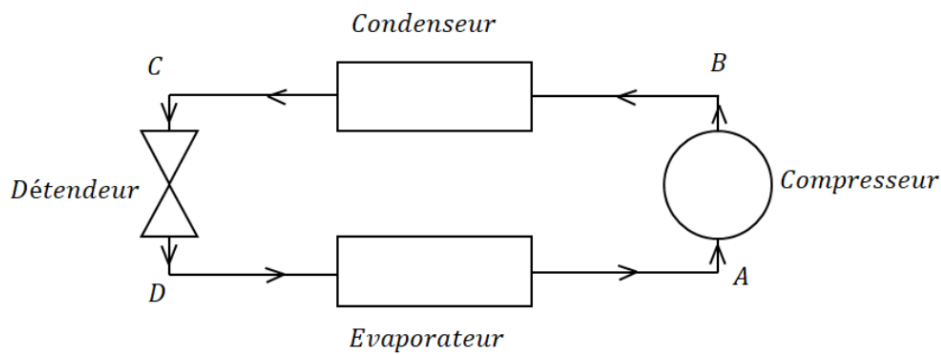
À l'inverse, après la détente, la pression diminue et la température d'évaporation devient très basse : le fluide peut alors s'évaporer dans l'enceinte froide en absorbant de l'énergie thermique.

3. Cycle de la machine frigorifique



On étudie ici à l'aide d'un diagramme $(\log(p), h)$ le cycle décrit par le fluide d'une machine frigorifique :

- Partant du point **A** à la pression $P_1 = 3 \text{ bar}$ ou il est dans l'état de vapeur juste saturante ($x_V = 1$) à la température $T_f = 263 \text{ K}$, le fluide subit une compression adiabatique irréversible le menant à l'état **B** à la pression $P_2 = 10 \text{ bar}$. Le fluide est dans un état de vapeur sèche.
- L'évolution **B** → **C** est un refroidissement isobare à P_2 : le fluide voit sa température diminuée dans un premier temps, puis se liquéfie jusqu'à l'état de liquide juste saturant ($x_V = 0$).
- La détente **C** → **D** est une détente isenthalpique, jusqu'à atteindre la pression initiale P_1 .
- L'évolution **D** → **A** est un changement d'état liquide-vapeur isobare jusqu'à l'état **A**. C'est la phase au cours de laquelle l'énergie thermique est prélevée dans le compartiment intérieur du réfrigérateur.



Application : Efficacité d'une machine frigorifique réelle

- 1) Donner, par lecture graphique, les valeurs des variables d'état P , T et x aux points A, B, C et D .
- 2) Pour chaque point, donner aussi par lecture graphique, les valeurs des enthalpies massiques h .
- 3) Par application du premier principe pour les systèmes ouverts, déterminer, pour chaque transformation, les travaux utiles massiques w et les transferts thermiques q massiques reçus.
- 4) Définir et déterminer la valeur de l'efficacité du système. La comparer avec l'efficacité de Carnot.

Correction :

1.

$$A : p_A = P_1 = 3 \text{ bars}, T_A = T_f = 263 \text{ K}, x = 1$$

$$B : P_B = P_2 = 10 \text{ bars}, T_B = T_c = 373 \text{ K}, x = 1$$

$$C : P_C = P_2 = 10 \text{ bars}, T_C = 298 \text{ K}, x = 0$$

$$D : P_D = P_1 = 3 \text{ bars}, T_D = T_A = T_f, x = 0,11$$

2. $h_A = 1450 \text{ kJ.kg}^{-1}$, $h_B = 1680 \text{ kJ.kg}^{-1}$, $h_C = h_D = 310 \text{ kJ.kg}^{-1}$

3.

$$AB : w_{AB} = h_B - h_A > 0, q_{AB} = 0$$

$$BC : w_{BC} = 0, q_{BC} = h_C - h_B < 0$$

$$CD : w_{CD} = 0 = q_{CD} = h_D - h_C$$

$$DA : w_{DA} = 0, q_{DA} = h_A - h_D > 0$$

4. $e = \left| \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}} \right| = \frac{q_{AD}}{w_{AB}} = \frac{h_A - h_D}{h_B - h_A}$. A.N : $e = 5$; $e_{rev} = \frac{T_f}{T_c - T_f} = 7,5$. Le cycle est non réversible, cela se voit sur le graphique.