

ETUDE D'UNE POMPE A CHALEUR

OBJECTIFS :

- Revenir sur les fondements théoriques du fonctionnement d'une pompe à chaleur.
- Identifier les divers constituants d'une pompe à chaleur ou d'un réfrigérateur.
- Réaliser des mesures permettant d'accéder aux valeurs des efficacités théoriques et globales des divers dispositifs.

PREPARATION : Répondre aux diverses questions signalées en italiques.

I- ETUDE THEORIQUE.

1- Machines dithermes.

On sait depuis l'énoncé du second principe qu'une machine thermique ne peut fonctionner avec une seule source.

Les machines dithermes fonctionnent donc avec deux sources thermiques de températures différentes.

L'étude de ces machines se fait sur des énergies massiques c'est à dire ramenées à 1 kg de fluide.

On note ces grandeurs massiques en minuscules :

$q_c = \frac{Q_c}{m} (J.kg^{-1})$: Chaleur massique échangée par le fluide à la source chaude à la température T_2 .

$q_f = \frac{Q_f}{m} (J.kg^{-1})$: Chaleur massique échangée par le fluide à la source froide à la température T_1 .

$w = \frac{W}{m} (J.kg^{-1})$: Travail massique échangé par le fluide avec le milieu extérieur.

($w < 0$ pour un moteur et $w > 0$ pour une pompe à chaleur).

2- Bilans énergétique et entropique.

a- Bilan énergétique (1^{er} principe).

$\Delta(u + e_c + e_p) = w + q$, où u , e_c , e_p sont les énergies interne, cinétique et potentielle massiques en $J.kg^{-1}$.

Lorsque l'écoulement du fluide se fait lentement sans variation notable de hauteur : $\Delta e_c = 0$ et $\Delta e_p = 0$ alors le premier principe s'écrit en grandeurs massiques : $\Delta u = w + q$,

Or le travail peut se décomposer en $w = w_e + w_i + w_d$.

$w_e = -\int P.dv$: Travail échangé entre le fluide et le milieu extérieur.

w_i : Travail indiqué ou utile.

w_d : Travail dissipé dû aux frottements.

De même la chaleur peut se décomposer en $q = q_e + q_d$.

q_e : Chaleur échangée entre le fluide et le milieu extérieur.

q_d : Chaleur due aux frottements ou plus largement aux phénomènes dissipatifs.

Le travail des frottements étant entièrement converti en chaleur : $w_d + q_d = 0$

Ainsi $\Delta u = w_e + w_i + q_e$, or $\Delta h = \Delta u - w_e \Rightarrow \Delta h = w_i + q_e$ (1)

b- Bilan entropique (2nd principe).

Pour une évolution élémentaire : $ds = \frac{\delta q_e}{T} + \frac{\delta q_d}{T}$.

Où l'entropie produite : $\delta s^p = \frac{\delta q_d}{T} = 0$ si l'évolution est réversible.

$\delta s^p = \frac{\delta q_d}{T} > 0$ si l'évolution est irréversible.

Ainsi pour une machine échangeant de façon réversible les chaleurs q_f à T_1 et q_c à T_2 , nous pouvons écrire: $\Delta s = \frac{q_f}{T_1} + \frac{q_c}{T_2} = 0$ (2)

3- Cycle de Carnot.

On appelle cycle de Carnot, du nom de l'ingénieur français S.Carnot, le cycle réversible, décrit par une machine ditherme, constitué de deux portions d'isothermes, de températures égales aux températures des sources, et de deux portions d'adiabatiques séparant les deux isothermes.

Représenter un cycle de Carnot en coordonnées (P ; v) puis (T ; s).

Plus généralement, pour tout cycle thermodynamique, on peut écrire puisque h et s sont des fonctions d'état :

$$\Delta h = w_i + q_c + q_f = 0 \quad \text{et} \quad \Delta s = \frac{q_f}{T_1} + \frac{q_c}{T_2} = 0$$

4- Efficacités.

On appelle efficacité e d'une machine thermique le rapport des deux transferts d'énergie, celui qui est utile, compte tenu de la vocation de la machine, sur celui qui est dépensé pour la faire fonctionner.

Pour une pompe à chaleur, on s'intéresse à la chaleur q_c (< 0) fournie par le fluide à la source chaude alors que le compresseur fournit au fluide le travail w_i (> 0), ainsi :

$$e_p = \frac{-q_c}{w_i}$$

Pour un réfrigérateur, on s'intéresse à la chaleur q_f (> 0) reçue par le fluide à la source froide

alors que le compresseur fournit au fluide le travail w_i (> 0), ainsi :

$$e_r = \frac{q_f}{w_i}$$

Exprimer les efficacités de la pompe et du réfrigérateur e_{cp} et e_{cr} pour le cycle théorique de Carnot en fonction des températures des sources : T_1 et T_2 .

5- Cycle frigorifique à changement d'état.

Sachant que l'évolution 1-2 du fluide se fait dans le compresseur de façon adiabatique et réversible.

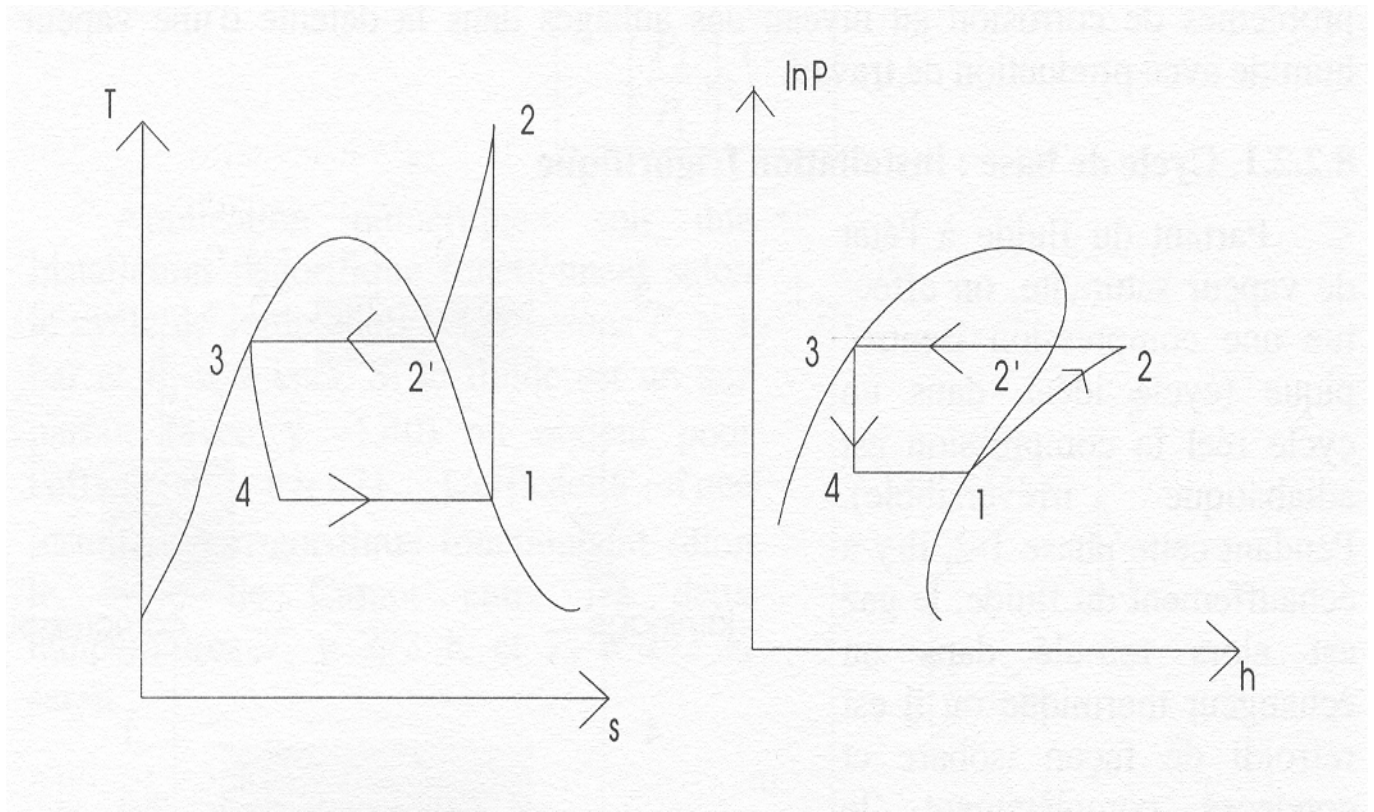
L'évolution 2-3 est une condensation isobare à P_2 sans w_i .

L'évolution 3-4 est une détente de type Joule-Thomson, adiabatique sans travail utile.

Enfin la vaporisation 4-1 du liquide se fait à P_1 sans w_i .

Exprimer h_2-h_1 , h_3-h_2 , h_4-h_3 et h_1-h_4 en fonction de w_b , q_c ou q_f .

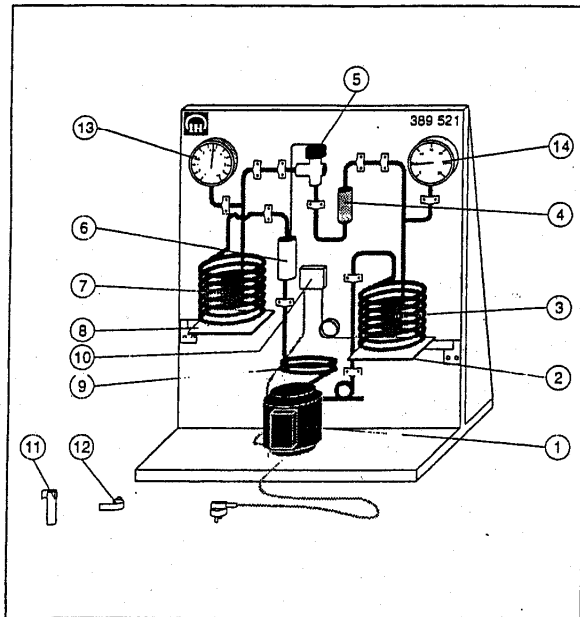
Pour représenter l'évolution des fluides réels, les frigoristes utilisent plutôt les diagrammes (T, s) ou (P, h) représentés ci-dessous.



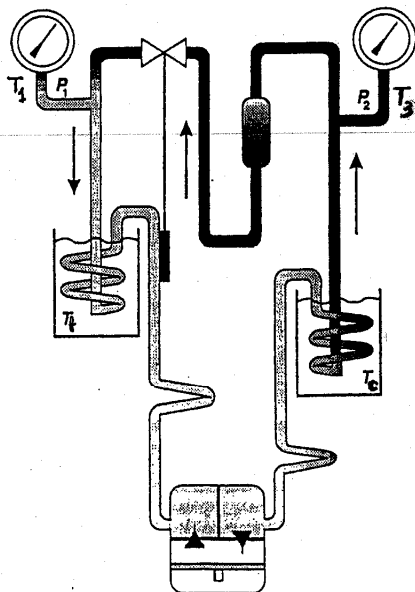
Un tel cycle présente deux inconvénients majeurs : la compression et la détente se font dans la zone du mélange liquide-vapeur, donc avec changement d'état et s'écartent beaucoup des évolutions idéales. La première façon de supprimer cet inconvénient est de comprimer de la vapeur sèche sur 1-2; la deuxième façon (complémentaire de la première) est de ne pas récupérer le travail de détente 3-4.

II ETUDE EXPERIMENTALE.

1- Description.



2- Fonctionnement.



Réfrigérant: R134a (sans gaz propulseur)

- ① Compresseur 230 V; 50/60 Hz.
Puissance absorbée env. 130 W pour 50 Hz.
- ② Plaque pivotante pour le réservoir d'eau chaude marqué d'un trait rouge
- ③ Condenseur, diamètre intérieur d'env. 13 cm
- ④ Collecteur/épurateur
- ⑤ Vanne de détente à régulation thermostatique
- ⑥ Sonde de température de la vanne de détente, isolée thermiquement
- ⑦ Evaporateur, diamètre intérieur d'env. 13 cm
- ⑧ Plaque pivotante pour le réservoir d'eau froide marqué d'un trait bleu
- ⑨ Tuyau en serpentin comme liaison élastique entre le compresseur et l'échangeur thermique
- ⑩ Manostat
- ⑪ Support en plastique (2x) pour thermomètre et sonde de température à fixer au tuyau en cuivre, chacun des deux porte-thermomètres étant constitué d'une pince double et d'un tube en plastique.
- ⑫ Cosse de mesure en cuivre (2x) avec vis de fixation et perçages, $\varnothing$ 2 mm, pour enficher des sondes de température destinées à la mesure de la température sur le tuyau en cuivre pour la circulation du réfrigérant.
- ⑬ Manomètre dans la partie basse pression; échelle intérieure pour la mesure de la pression de -1 à +10 bars, échelle extérieure avec température des points de rosée pour R134a de -60 °C à +40 °C.
- ⑭ Manomètre dans la partie haute pression; échelle intérieure: pression de -1 à +30 bars, échelle extérieure avec température des points de rosée pour R 134a de -60 °C à +85 °C.

Une pompe à chaleur prélève de la chaleur d'un réservoir de température T_f pour la délivrer à un réservoir de température T_c

L'écart de température ($T_c - T_f$) entre les deux réservoirs en est ainsi accentué. Le transfert de chaleur se fait par un réfrigérant R134a qui absorbe de la chaleur en s'évaporant et la délivre à nouveau en se condensant.

Les réservoirs de chaleur sont des récipients remplis d'eau dans lesquels sont immergés les deux «échangeurs thermiques» ③ et ⑦.

Le réfrigérant gazeux est comprimé par le compresseur ① tout en étant fortement chauffé. Il refroidit dans le serpentin en cuivre ③ du condenseur et se condense tout en délivrant sa chaleur de condensation à l'eau du réservoir d'eau chaude.

Le réfrigérant liquéfié mais encore traversé de bulles de gaz est filtré dans l'«épurateur» ④. Celui-ci agit simultanément comme «collecteur»: il se forme à l'intérieur un niveau de liquide qui assure une alimentation en liquide sans bulles pour la vanne de détente ⑤.

La vanne de détente est le pendant du compresseur: elle dose le réfrigérant délivré à l'évaporateur ⑦ où il est à basse tension superficielle, s'évapore tout en refroidissant considérablement et en prélevant ainsi de la chaleur du réservoir d'eau froide. Le réfrigérant désormais à nouveau gazeux est aspiré par le compresseur où tout recommence depuis le début. La vanne de détente ⑤ protège le compresseur contre les «Attaques du liquide», c.-à-d. l'aspiration d'un réfrigérant liquide à laquelle succède la destruction du compresseur. L'amenée du réfrigérant à l'évaporateur est en effet régulée par une sonde de température ⑥ (d'où la désignation plus précise de «vanne de détente thermostatique»).

3-Mesures.

Introduire précisément 4 litres d'eau dans chaque réservoir, jusqu'au repère sur le seau.

Vérifier que T_c et T_f sont voisines de 17°C .

Dans le cas contraire chauffer l'eau des réservoirs grâce à la bouilloire électrique.

Immerger ensuite l'échangeur gauche dans le seau bleu placé sur son support et l'échangeur droit dans le seau rouge.

Les sondes de températures seront disposées entre la paroi du seau et l'échangeur de façon à pouvoir agiter sans abîmer les sondes.

Les mesures de T_c et T_f ne seront correctes que si l'agitation est suffisante.

La date $t=0$ sera définie par le branchement électrique du compresseur.

Compléter le tableau en relevant toutes les deux minutes les températures des réservoirs T_c et T_f , puis les températures et pressions T_1 , P_1 , T_3 et P_2 du fluide R 134a, à lire sur les manomètres 13 et 14.

4- Interprétation.

a- Efficacités Carnot.

On note e_{cp} et e_{cr} les efficacités Carnot de la pompe et du réfrigérateur.

Compléter le tableau en calculant ces efficacités.

b- Efficacités globales.

On note W , Q_c et Q_f le travail et les chaleurs échangées par le fluide **durant 3 minutes.**

Les efficacités globales de la pompe et du réfrigérateur valent : $e_{gp} = \frac{-Q_c}{W}$. et $e_{gr} = \frac{Q_f}{W}$

Les valeurs des chaleurs Q_c et Q_f échangées par le fluide peuvent être calculées à partir des chaleurs Q'_c et Q'_f échangées par l'eau introduite dans les réservoirs.

En effet, lorsque l'agitation est convenable, on peut considérer que la chaleur cédée par le fluide est intégralement reçue par l'eau : $Q_c = -Q'_c$ et de même : $Q_f = -Q'_f$.

La masse d'eau m , et la capacité thermique massique de l'eau $c = 4185 \text{ J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}$ sont connues.

On relève régulièrement $T_c(t)$ et $T_f(t)$.

Exprimer la chaleur Q_c échangée entre les instants t_1 et t_2 en fonction de m , c , $T_c(t_1)$, $T_c(t_2)$.

Même question pour Q_f .

La puissance électrique du compresseur est connue : $P = 130 \text{ W}$.

Exprimer le travail électrique W reçu par le fluide entre les instants t_1 et t_2 .

c- Tracé du cycle (endiagramme (P,h)).

Grâce aux valeurs de T_1 , P_1 , T_3 et P_2 et en tenant compte des propriétés de chaque évolution, tracer le cycle du fluide sur le diagramme (P, h) à **$t = 12 \text{ mn}$** .

On remarquera que les points 1 et 2 se trouvent dans la zone de vapeur sèche et que le point 3 appartient à la courbe d'ébullition.

Placer w'_i , q'_c et q'_f sur les évolutions correspondantes.

d- Efficacités déduites du tracé du cycle.

Exprimer w'_i , q'_c et q'_f en fonction des enthalpies convenables.

En déduire les valeurs numériques de w'_i , q'_c et q'_f ainsi que celles de e_p et e_r .