

C4. La pompe à chaleur

I. BUT DE LA MANIPULATION

Se familiariser avec le fonctionnement d'une pompe à chaleur et en déterminer le coefficient de performance sous différentes conditions d'utilisation.

II. INTRODUCTION:

II.1. Éléments de thermodynamique.

La thermodynamique étudie les rapports entre les phénomènes thermiques et mécaniques. Dans la plupart des problèmes thermodynamiques, on considère un système, c'est-à-dire un ensemble de corps qui subissent des transformations. Ces transformations peuvent être causées par des transferts de chaleur ou de travail entre systèmes ou entre les parties d'un même système. Il en résulte alors une modification de la température ou de la pression, un changement de phase ou plus généralement une évolution des variables thermodynamiques.

Premier principe:
$$\Delta U = \Delta W + \Delta Q$$

où ΔU représente la variation d'énergie totale entre deux états du système (indépendant du chemin) et ΔW et ΔQ correspondent au travail et à la chaleur échangés entre ces deux états, selon un "chemin" qu'il faut préciser. Même si cette loi de conservation de l'énergie ne peut pas se démontrer directement, de nombreuses expériences et conclusions scientifiques basées sur elle prouvent sa validité. Le premier principe n'exclut pas qu'au sein d'un même système, une quantité de chaleur puisse être transformée *intégralement* en travail $\Delta U = 0$ donc $\Delta W = -\Delta Q$). Ceci est contraire à l'expérience.

Second principe :
$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

Le second principe limite les possibilités de transformation de la chaleur en travail. En particulier, il tient compte de l'impossibilité de transmettre de la chaleur d'un corps à un autre possédant une température plus élevée sans l'aide de travail extérieur. Autrement dit et en accord avec l'expérience, un système tend naturellement à l'équilibre thermique en transférant la chaleur de la source chaude vers la source froide (fig. 1), alors que pour effectuer le transfert inverse, il faut une source d'énergie extérieure (fig. 2): c'est le cas de la *pompe à chaleur*.

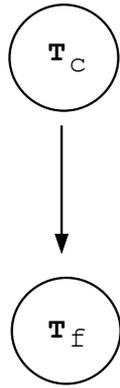


Fig. 1 : Si les sources sont mises en contact, il y a naturellement transfert de la source chaude à la source froide $T_c > T_f$.

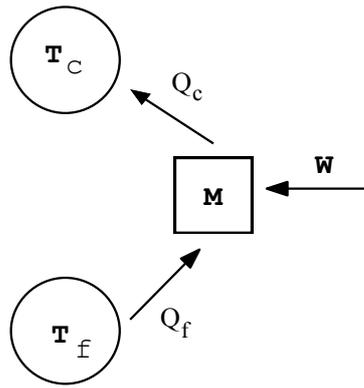


Fig. 2 : Si l'on veut qu'il y ait transfert de la source froide à la source chaude ($T_c > T_f$), il faut une machine qui fournit un travail W .

II.2. Principe de la pompe à chaleur.

Le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur est le suivant: un fluide frigorigène condensable circule dans un système fermé. Il va effectuer des échanges de chaleur avec le milieu extérieur et subir des **transformations de phase liquide/vapeur** successivement dans un sens et dans l'autre. S'il s'évapore, il absorbe des calories, s'il se condense, il en cède. Afin de réaliser ces transformations à la température des deux échangeurs, appelés respectivement de ce fait **condenseur** (source chaude T_c) et **évaporateur** (source froide T_f), il faut d'une part comprimer le gaz entre les deux échangeurs, puis le détendre d'autre part.

Le choix du fluide est fonction des températures à atteindre, des caractéristiques du compresseur, des dimensions des échangeurs, du coefficient de transfert thermique du fluide réfrigérant, de sa chaleur latente et de son volume spécifique. Comme source froide (l'évaporateur d'où l'on pompe la chaleur) on peut utiliser un cours d'eau, le sol ou encore l'air ambiant.

III. DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

Dans la pompe à chaleur à disposition on utilise comme liquide du "Fréon 12" dont le point d'ébullition est à 243.37 K et la chaleur latente est de 39.94 cal/g à une atmosphère.

Regardons maintenant les différents stades du cycle, en nous servant du schéma de la pompe à chaleur (Fig. 3):

Les vapeurs de fréon sont comprimées dans un compresseur (1), ce qui augmente fortement la température du gaz. Dans le condenseur, le fréon se liquéfie, cédant sa chaleur latente au liquide du dewar (2). Le fréon liquéfié passe alors dans un purificateur pour éliminer les bulles de vapeur qu'il contient encore (3). Le liquide passe la vanne d'expansion (4) qui jette une certaine quantité de liquide dans un évaporateur (5). Le fréon s'évapore et pompe la chaleur de vaporisation au contenu du dewar (5). La pression basse dans l'évaporateur est produite par l'aspiration du compresseur. Le réglage de la vanne d'expansion est commandé par un thermocouple (6) qui mesure la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur. Lorsque cette différence n'est pas suffisante, la vanne réduit son débit. Le fréon vaporisé entre dans le compresseur et le cycle recommence.

La quantité de chaleur transférée de l'évaporateur au condenseur est à peu près trois fois plus élevée que la quantité d'énergie électrique consommée par le compresseur. Pourtant ce n'est pas contraire à la conservation de l'énergie. Les deux tiers restants ont justement été pompés dans l'évaporateur.

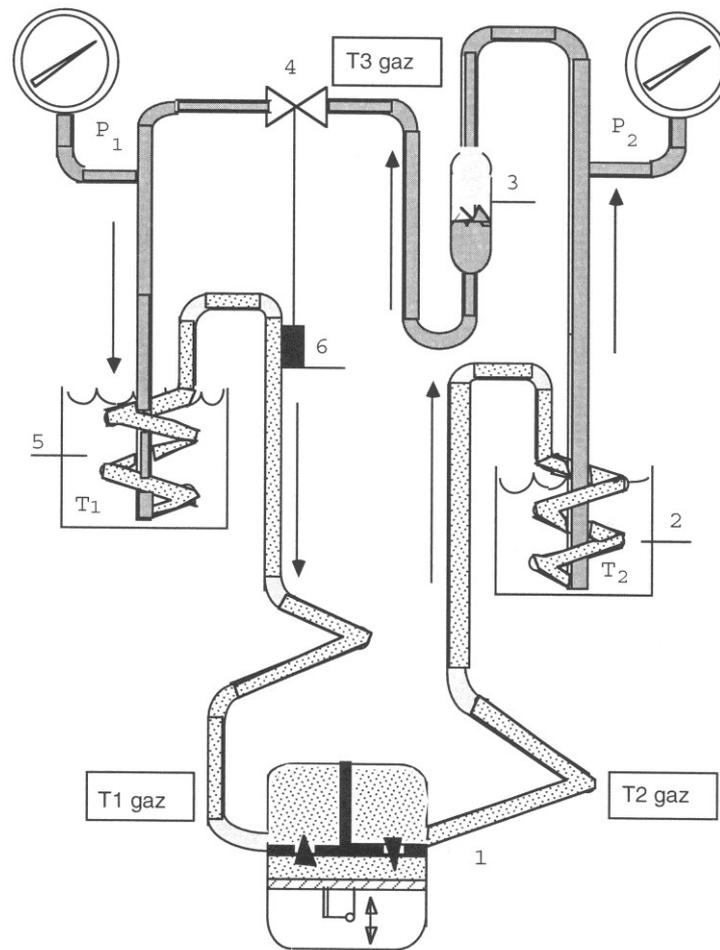


Fig. 3: Schéma de la pompe à chaleur

Pour évaluer le fonctionnement d'une pompe à chaleur, on définit un **coefficient de performance ou d'efficacité** ε égal au quotient de la chaleur transférée à la source chaude par le travail fourni au système.

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W} < \varepsilon_{th} = \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad \varepsilon > 1$$

W est le travail fourni au système et Q_c la chaleur transférée à la source chaude durant un cycle. T_c et T_f sont les températures absolues des sources respectivement chaudes et froides.

Le coefficient de performance réel ε est notablement plus faible que la valeur théorique ε_{th} par suite des phénomènes d'irréversibilité qui apparaissent le long du cycle thermodynamique réel.

IV. DIAGRAMMES THERMODYNAMIQUES

A basse température, les gaz doivent être considérés comme des fluides réels dont le comportement peut être analysé par un **diagramme de Clapeyron** (Fig. 4).

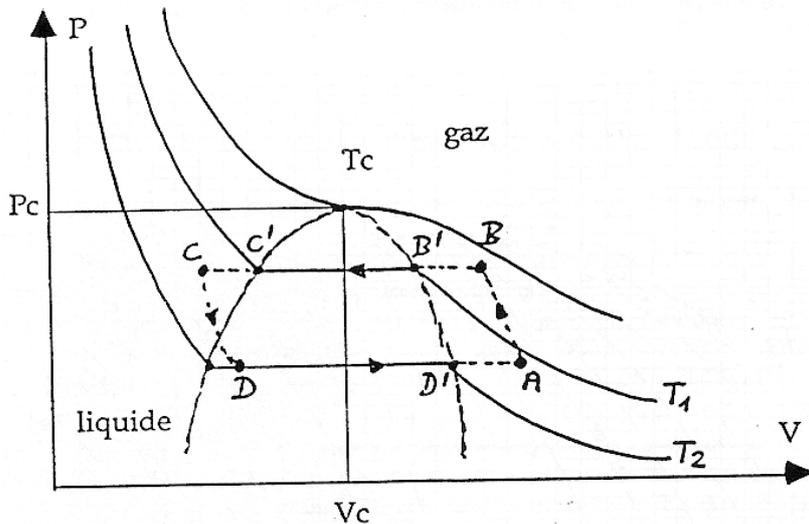


Fig. 4: Diagramme de Clapeyron

Mathématiquement le gaz réel peut être décrit par l'équation de Van der Waals:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \text{ pour une mole de gaz,}$$

où $\frac{a}{V^2}$ traduit l'attraction entre molécules et b représente le volume propre des molécules. On peut calculer T_c , c'est-à-dire la température de l'isotherme présentant un point d'inflexion à tangente horizontale pour $V = V_c$.

$$\left.\frac{\partial P}{\partial V}\right|_{T=T_c} = 0 \Rightarrow -\frac{RT_c}{(V_c - b)^2} + \frac{2a}{V_c^3} = 0 \text{ et } \left.\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right|_{T=T_c} = 0 \Rightarrow -\frac{2RT_c}{(V_c - b)^3} - \frac{6a}{V_c^4} = 0$$

d'où
$$T_c = \frac{8a}{27Rb}, \quad V_c = 3b \quad \text{et} \quad P_c = \frac{a}{27b^2}.$$

La liquéfaction du gaz n'est possible que si $T < T_c$. Dans le cas du diagramme de la figure 4, considérons deux isothermes T_1 et T_2 en-dessous de T_c , et faisons subir au gaz de Van der Waals le cycle de transformations ABCDA: A \rightarrow B compression adiabatique; B \rightarrow B' refroidissement isobare, suivi de liquéfaction sur l'isotherme T_1 (B' \rightarrow C') et refroidissement isobare du liquide (C' \rightarrow C); détente adiabatique C \rightarrow D; évaporation sur l'isotherme T_2 (D \rightarrow D'), suivie d'un réchauffement isobare D' \rightarrow A.

Au cours du cycle, le gaz pompe de la chaleur lors de son évaporation sur l'isotherme T_2 et redonne cette chaleur lors de la liquéfaction sur l'isotherme T_1 . On fournit du travail au gaz lors de la compression adiabatique ($A \rightarrow B$).

Diagramme de Mollier : $\ln P - h$ (Fig. 5).

Dans le cas des pompes à chaleur et des appareils frigorifiques, les changements d'états du gaz sont décrits au moyen des diagrammes de Mollier, où on reporte le logarithme de la pression P en ordonnée et l'enthalpie massique h en abscisse.

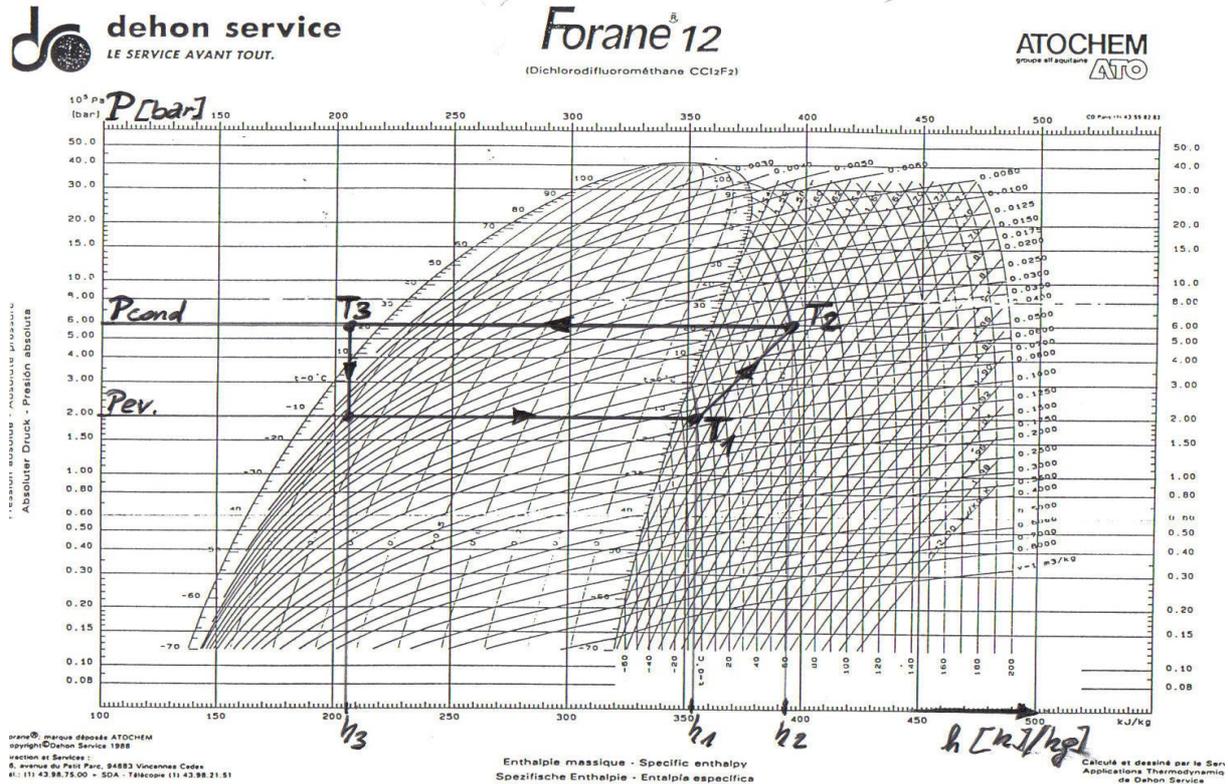


Fig. 5: Diagramme de Mollier ($\ln P - h$) du gaz fréon R12.

Rappelons que l'enthalpie H s'exprime à partir de l'énergie interne U , de la pression P et du volume V , comme : $H = U + PV$.

Dans ce graphe, les courbes isobares sont des droites horizontales et les courbes isenthalpes des droites verticales. Dans le domaine du mélange liquide-vapeur, c'est-à-dire sous la courbe de saturation, les isothermes sont comme les isobares des droites horizontales. Les courbes isotitres (fraction de phase vapeur) découpent les isothermes en une graduation linéaire.

Lors du fonctionnement de la pompe à chaleur, on mesure les pressions de condensation P_{cond} et d'évaporation P_{evap} , ainsi que les températures du gaz à l'aspiration T_1 , après compression T_2 et avant le détendeur T_3 . Ces cinq paramètres permettent de tracer le cycle thermodynamique ($T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3$) sur le diagramme de Mollier (Fig. 5).

On en déduit trois valeurs de l'enthalpie spécifique h_1 avant compression, h_2 après compression et h_3 avant l'évaporation. Ces trois valeurs permettent de déterminer le coefficient de performance maximal pouvant être atteint avec le gaz utilisé. En effet,

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Ex.: Dans le cas du cycle de la figure 5, on a: $\varepsilon = \frac{394 - 206}{394 - 354} = 4.7$

V. EXPERIENCES A REALISER

Mesures du coefficient de performance sous diverses conditions

- 1) Faire fonctionner la pompe à chaleur en mode *réservoir fini* pendant 30 minutes, en relevant chaque minute, les températures dans les deux dewars, les températures du gaz (T_1, T_2, T_3), les pressions de condensation et d'évaporation, ainsi que la puissance électrique fournie au compresseur (au total, 5 températures, 2 pressions, 1 tension et 1 courant).
 - a. Tracer un graphique des température en fonction du temps, et calculer la quantité de chaleur transportée e la source froide à la source chaude.
 - b. Dans le cas stationnaire, établir un diagramme de Mollier (des exemplaires du diagramme sont à disposition). Déterminer le coefficient de performance maximum du gaz.
 - c. Déterminer le coefficient de performance de la pompe à chaleur et comparer le résultat avec ce que l'on pourrait attendre idéalement (cycle de Carnot). Discuter
 - d. Si possible, changer l'eau et recommencer l'expérience maintenant que le compresseur est chaud (faire le point 2) en priorité). La performance est-elle meilleure ?
- 2) Répéter l'expérience dans le cas *réservoir infini* (après avoir changé l'eau des dewars).
- 3) Commenter sur la signification des différents coefficients de performance

Utilisation de l'appareillage (voir fig. 6)

Remplir les dewars avec 5 litres d'eau, en activant l'interrupteur pour le remplissage. Ensuite, enclencher le brassage. Pour ce faire, mettre les deux commutateurs "brassage-vidange" sur brassage, et activer le pompage dans les deux récipients (à l'aide des interrupteurs pour pompage). Vérifier que la température se soit stabilisée.

Brancher le compresseur de sorte à pouvoir lire la puissance électrique qui lui est fournie. Enclencher le compresseur en même temps que le chronomètre.

Attention à ne pas geler l'eau de la source froide. Arrêter le compresseur avant d'atteindre 0 °C.

Pour le *réservoir infini*, régler le commutateur "brassage-vidange" de la source froide sur vidange, puis laisser couler l'eau (remplissage) de sorte à maintenir un niveau constant.

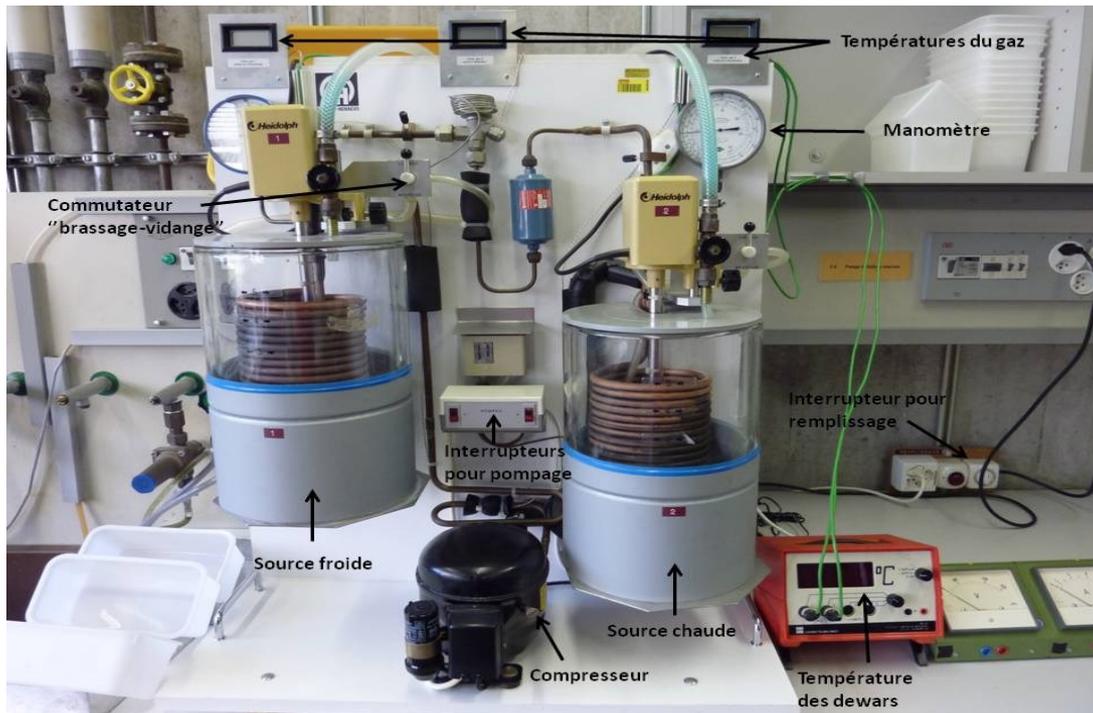


Fig.6 : Image de la pompe à chaleur

VI. BIBLIOGRAPHIE

- 1.FEYNMAN : "Cours de Physique - mécanique 2" (p. 264 et suivantes) - InterEditions, Paris
- 2.A. HOUBER ECHTS : "La thermodynamique technique", tomes 1 et 2. - Vander Editeurs.
- 3.G. BRUHAT : "Cours de Physique Générale - Thermodynamique". - Masson & Cie, Editeurs.