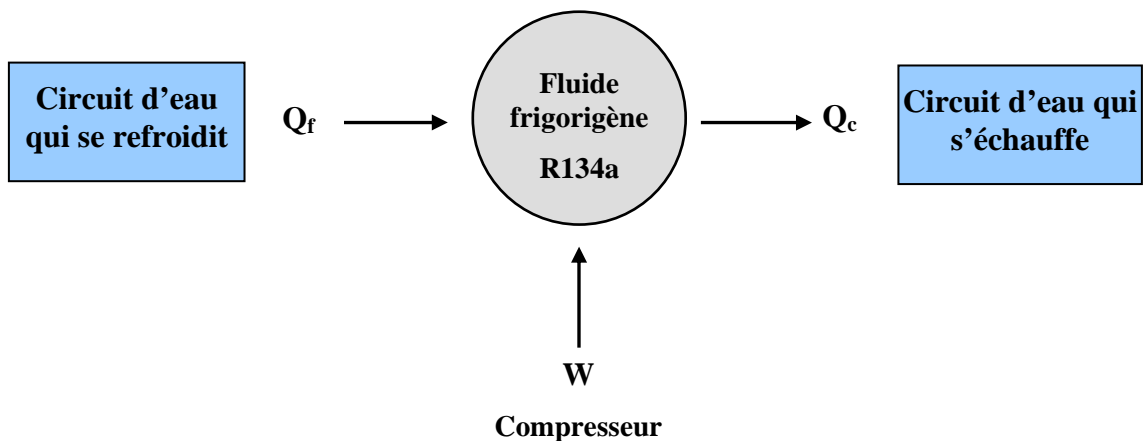


## Etude d'un cycle frigorifique avec compresseur

Le principe de la pompe à chaleur est ancien (Thomson 1852), mais il a fallu attendre 1927 pour voir la première pompe à chaleur fonctionner en Ecosse. Le début de la commercialisation aux Etats-Unis date des années 1950. L'utilisation de pompes à chaleur en France comme moyen de chauffage domestique a démarré dans les années 1970 à la suite du premier choc pétrolier : le grand public découvre une machine miraculeuse qui restitue plus d'énergie qu'elle n'en consomme .....

La *pompe à chaleur* est un système thermodynamique comprenant 2 sources de chaleur (chaude et froide) entre lesquelles un *fluide caloporteur*, le **R134a**, subit un cycle de transformations, provoquant un transfert de chaleur entre les 2 sources.



Le **R134a**, (Hydro-Fluoro-Carbone : HFC) de formule  $\text{CF}_3\text{-CFH}_2$ , tétrafluoroéthane, n'a pas d'action sur la couche d'ozone.

### Mise en marche

Dès le début de la séance de Travaux Pratiques :

- Ouvrir le robinet d'eau et régler les 2 débitmètres à **1 litre par minute**.
- Mettre sous tension le compresseur.

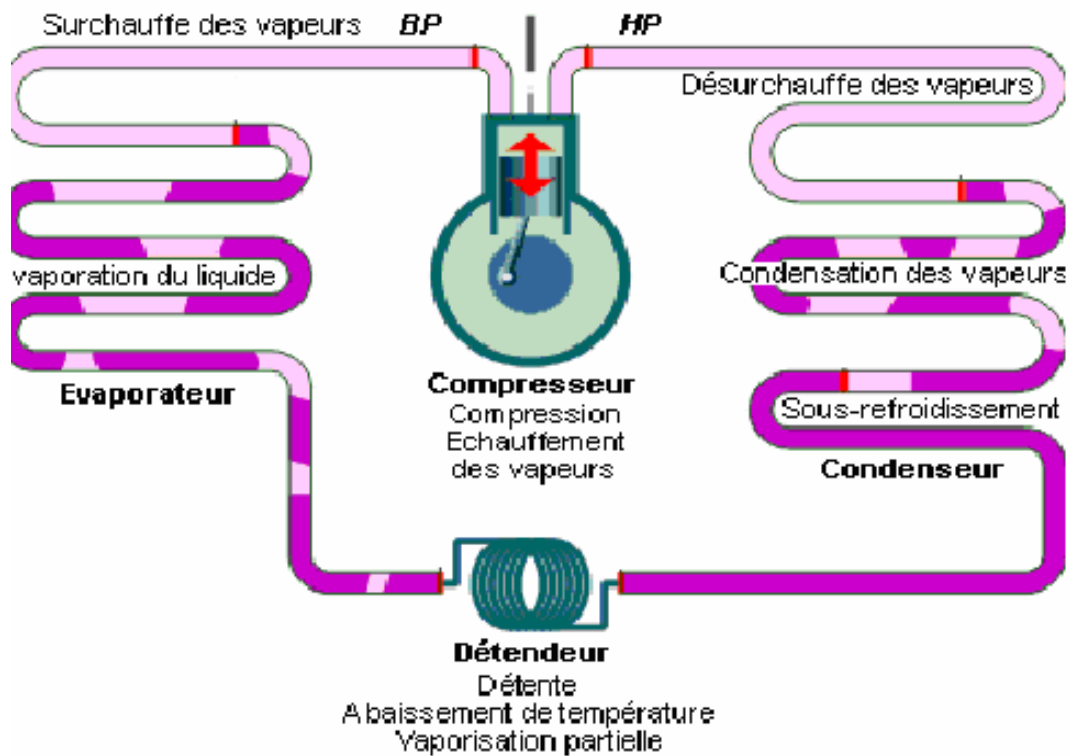
Le temps de mise à l'équilibre est de l'ordre de 10 minutes.

### But de la manipulation

- Identification de tous les composants de la machine
- Vérification du premier principe de la Thermodynamique :  $Q_c + Q_f + W = 0$
- Etude du **Coefficient de Performance : COP**
- Tracé des diagrammes de Clapeyron et de Mollier.

L'ensemble des résultats sera reporté page 87.

## Description du cycle du fluide frigorigène : cycle de Hirn



**a) Dans le compresseur** : le fluide frigorigène arrive à l'entrée du compresseur à l'état gazeux, sous basse pression et basse température. La compression permet d'élever sa pression et sa température. En théorie, la compression est adiabatique (ou isentropique) ; mais elle ne l'est pas en pratique.

Un compresseur réel présente des *pertes importantes*.

- D'une part ce sont les *pertes volumétriques*, dues :
  - à la dilatation du gaz d'aspiration à son entrée dans le compresseur dont les parois sont plus chaudes (enroulement du moteur, pistons, cylindre, etc.)
  - aux fuites entre le piston et le cylindre,
  - aux fuites dans les soupapes à l'espace mort du cylindre ; le surplus de gaz qui se dilate lors de l'aspiration empêche le remplissage complet avec du fluide frigorigène nouvellement aspiré.
- D'autre part, ce sont les *pertes mécaniques* dues aux frictions entre les pièces mobiles,

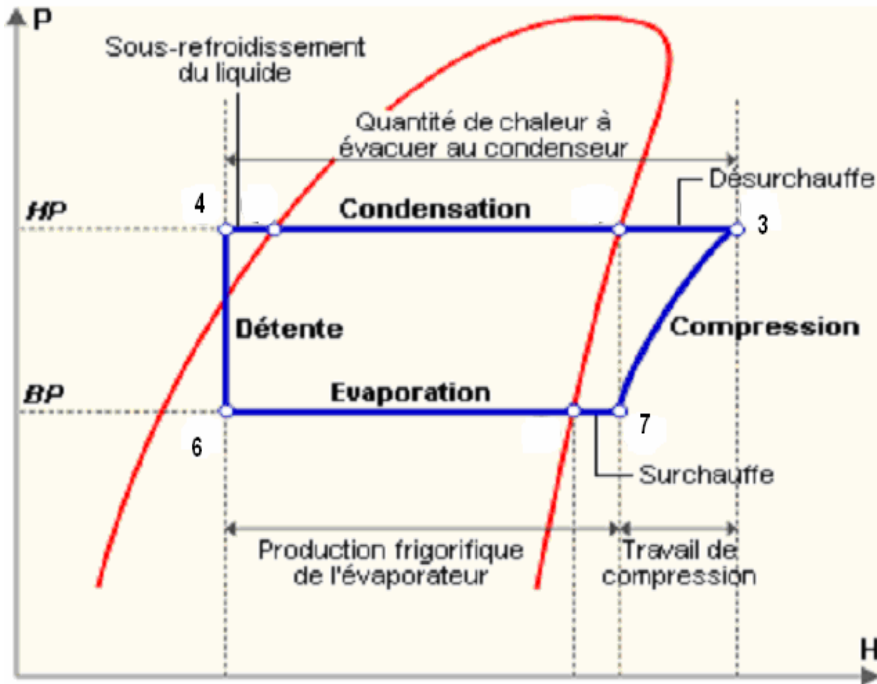
**b) Dans le condenseur**, le gaz chaud cède sa chaleur à l'eau du circuit extérieur. Les vapeurs de fluide frigorigène se refroidissent ("*désurchauffe*"), puis le fluide se condense. Le fluide liquide se refroidit de quelques degrés (*sous-refroidissement*) avant de quitter le condenseur.

**c) Dans le détendeur, le fluide subit une détente isenthalpique**. Le fluide frigorigène se vaporise partiellement, ce qui abaisse sa température.

**d) Dans l'évaporateur**, le fluide frigorigène s'évapore totalement en absorbant la chaleur provenant du circuit d'eau qui se refroidit. Dans un deuxième temps, le gaz formé est encore légèrement réchauffé par le fluide extérieur ; c'est ce qu'on appelle la phase de *surchauffe*.

## Diagramme enthalpique du cycle frigorifique : diagramme de Mollier

Sous la courbe « en cloche » se situe le mélange *liquide-vapeur*. A gauche de la cloche, le fluide est à l'état *liquide* (il se "sous-refroidit"). A droite, le fluide est à l'état *vapeur* (il "surchauffe").



## Fonctionnement de la machine frigorifique en équilibre permanent

Le cycle de fonctionnement de la machine se stabilise en fonction du milieu qu'il faut refroidir ou échauffer. Ainsi, la température d'évaporation du fluide se stabilise quelques degrés en dessous de la température de l'eau refroidie dans l'évaporateur. En fonction du débit de l'eau, le compresseur aspire un débit plus ou moins grand de fluide frigorigène.

<i>Variation des températures dans l'évaporateur</i>	<i>Variation des températures dans le condenseur</i>
<p><i>A = fluide frigorigène</i> <i>B = circuit d'eau</i></p>	<p>Surface d'échange inversée</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- vaporisation du fluide frigorigène</li> <li>- surchauffe des vapeurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- désurchauffe du gaz</li> <li>- condensation du fluide</li> <li>- sous-refroidissement du liquide</li> </ul>

## Manipulation proprement dite

### 1) Identification des éléments essentiels de la machine ; relevé des mesures

- Quel fluide observez-vous ? L'eau ou le fluide frigorigène
- Prendre dans la boîte toutes les étiquettes et les scotcher sur le bâti de l'appareil

### 2) Mesures

Les mesures seront faites pour 3 débits d'eau différents.

Débit circuit eau chaude : $Q_{eauchaude}$	1 L/minute	1 L/minute	0,6 L/minute
Débit circuit eau froide : $Q_{eaufroid}$	1 L/minute	0,6 L/minute	1 L/minute
Débit du fluide R134a liquide			
Tension alimentation compresseur			
Intensité du courant			
Manomètre Basse Pression			
Manomètre Haute Pression			
T <sub>0</sub> Eau entrée échangeur			
T <sub>1</sub> Eau sortie condenseur			
T <sub>2</sub> Eau sortie évaporateur			
T <sub>3</sub> R134a Entrée condenseur			
T <sub>4</sub> R134a Sortie condenseur			
T <sub>5</sub> R134a Entrée détendeur			
T <sub>6</sub> R134a Entrée évaporateur			
T <sub>7</sub> R134a Sortie évaporateur			

**Les manomètres indiquent des pressions relatives. Il faut donc ajouter 1 bar à la lecture pour obtenir des pressions absolues.**

### 3) Vérification du Premier Principe de la Thermodynamique

Pour cette vérification, on ne raisonne pas sur un cycle, mais sur 1 seconde.

a) **Puissance du compresseur** :  $P = UI \cos \varphi$                       On prendra :  $\cos \varphi = 0,85$

b) La **quantité de chaleur  $Q_c$  cédée par le fluide** au circuit d'eau qui s'échauffe est opposée à la quantité de chaleur reçue par l'eau :  $Q_c = - m_c c_{eau} (T_1 - T_0)$ ,

$m_c$  étant égale au débit du circuit eau chaude en 1 seconde :  $m_c = Q_{eauchaude}/60$

$c_{eau} = 4\,180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$$Q_c = - m_c c_{eau} (T_1 - T_0)$$

c) De même, la **quantité de chaleur  $Q_f$  prise par le fluide** au circuit d'eau qui se refroidit est opposée à la quantité de chaleur cédée par l'eau :  $Q_f = - m_f c_{eau} (T_2 - T_0)$ ,

$m_f$  étant égale au débit du circuit eau froide en 1 seconde :  $m_f = Q_{eaufroide}/60$

$$Q_f = - m_f c_{eau} (T_2 - T_0)$$

d) Faire la somme :  $S = Q_c + Q_f + P$

- D'après les résultats trouvés, il semble que le premier principe de la Thermodynamique ne soit pas vérifié. En réalité, il faut tenir compte du *rendement du compresseur* : toute la puissance électrique du moteur ne sert pas à la compression du fluide.
- Il faut également tenir compte des *échanges thermiques* entre le fluide, les tubes de cuivre et l'eau.
- *Que représente S ?*

#### e) COefficient de Performance réel de la pompe à chaleur : COP

Le COP mesure le rendement de la pompe à chaleur dans les conditions expérimentales données.

$$COP_{Réel} = \frac{\text{Energie récupérée au condenseur par le circuit d'eau qui chauffe}}{\text{Energie consommée par le compresseur}} = \frac{-Q_c}{P}$$

Déterminer le  $COP_{Réel}$

f) Si l'installation fonctionnait comme réfrigérateur, quel serait son COP ?

### 3) Etude du cycle du fluide frigorigène

#### a) Diagramme de Clapeyron (p, V)

Sur ce *diagramme théorique*,

- Tracer la *courbe de saturation* du fluide (voir TP Isothermes d'un corps pur)
- Tracer 2 droites horizontales représentant la basse pression (BP) et la haute pression (HP)
- Placer les points suivants :
  - fluide à l'entrée du compresseur (gaz)
  - fluide à la sortie du compresseur (gaz)
  - fluide à la sortie du condenseur (liquide)
  - fluide à la sortie du détendeur (liquide + gaz)



#### b) Diagramme de Mollier (h, p) (fourni lors de la séance de Travaux Pratiques)

Sur le *diagramme de Mollier* donné à la dernière page du polycopié du TP, *tracer les 2 cycles*.

- Tracer 2 horizontales correspondant à la basse pression (BP) et à la haute pression (HP).
- Noter ensuite les températures.
- Tracer le cycle.
- Relever les enthalpies massiques  $h$  du fluide aux 4 points.
- Relever la fraction massique  $x$  de vapeur formée au cours de la détente isenthalpique.
- Théoriquement, la compression est isentropique. Placer le point 3' sur le diagramme.

Débit du fluide : $Q_m$	Masse du fluide : $m_{\text{fluide}}$	$h_3 - h_4$	$h_3 - h_7$	$COP_{\text{théorie}}$	Fraction massique de vapeur $x$

$m_{\text{fluide}}$  est la masse de fluide frigorigène circulant dans le circuit en 1 seconde.

$m_{\text{fluide}} = \text{masse volumique du fluide} \times \text{débit du fluide par unité de temps}$

- masse volumique du R134a liquide :  $\rho = 1\,206 \text{ kg.m}^{-3}$

**c) Coefficient de Performance théorique déterminé à partir du diagramme de Mollier**

Le coefficient de performance de la pompe à chaleur qui convertit en chaleur toute l'énergie apportée par le compresseur, si l'échange thermique entre le fluide et le circuit d'eau est parfait, est donnée par :

$$COP_{théorique} = \frac{\text{quantité de chaleur apportée au circuit d'eau qui s'échauffe}}{\text{énergie du compresseur}}$$

Soit :

$$COP_{théorique} = \frac{\text{variation d'enthalpie au cours de la condensation à pression constante}}{\text{variation d'enthalpie au cours de la compression}}$$

$$COP_{théorique} = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_7)}$$

- Comparer le  $COP_{R\acute{e}el}$  et le  $COP_{théorique}$ . Pourquoi observe-t-on une différence ?

**d) Echangeur - Etude à partir du diagramme de Mollier**

La quantité de chaleur apportée par le fluide frigorigène au circuit d'eau chaude dans le condenseur est :

$$Q_{cfluide} = m_{fluide} (h_3 - h_4)$$

$m_{fluide}$  étant la masse de fluide frigorigène circulant dans le circuit en 1 seconde.

Comparer  $Q_{cfluide}$  et  $Q_{ceau}$

- En déduire le rendement de l'échangeur :  $\eta_c = \frac{Q_{ceau}}{Q_{cfluide}}$
- Faire un calcul similaire au niveau de l'évaporateur.

**e) Evolution de la température du fluide et de celle de l'eau dans le condenseur et dans l'évaporateur**

Tracer les courbes :  $T = f(\text{surface d'échange})$  (comme à la page 83)

Noter : - la désurchauffe du gaz dans le condenseur

- le sous refroidissement du liquide

- la surchauffe du gaz dans l'évaporateur

**f) Rendement du compresseur**

$$\eta = \frac{\text{énergie cédée au fluide lors de la compression}}{\text{énergie du compresseur}} = \frac{m_{fluide} (h_3 - h_7)}{\text{puissance du compresseur } P}$$

Calculer le rendement  $\eta$

**Résultats**

Débit eau chaude	$Q_{\text{ceau}}$	Débit eau froide	$Q_{\text{jeau}}$	$P$ compresseur	$COP$ Réel	Débit fluide	Masse du fluide : $m_{\text{fluide}}$	$h_3 - h_4$	$h_3 - h_7$	$COP$ théorie	$Q_{\text{cfluide}}$	$\eta_c$ échangeur condenseur	$\eta$ compresseur	Fraction massique de vapeur $x$

- Commenter les résultats.
- Comparer les 3 expériences.

