

## **TP N°15**

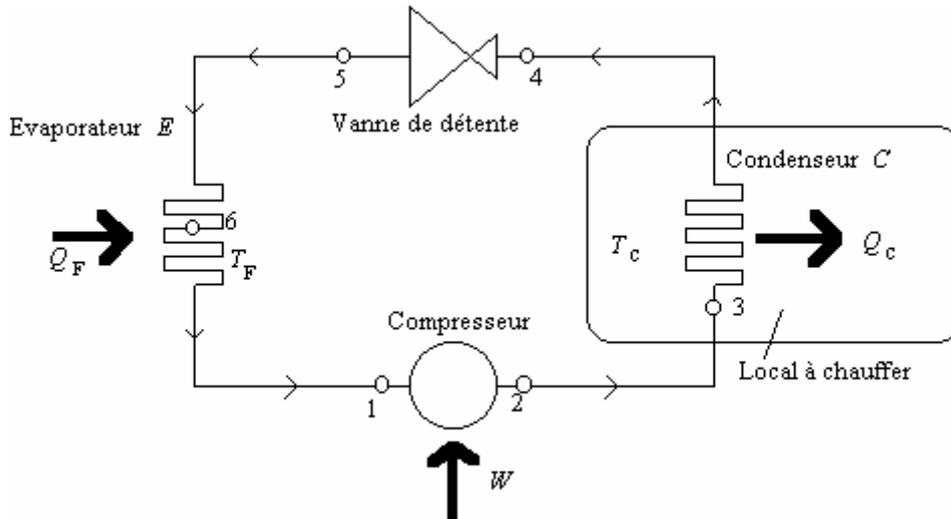
# Étude d'une pompe à chaleur

# ÉTUDE D'UNE POMPE A CHALEUR

## 1. FONCTIONNEMENT THÉORIQUE

Une pompe à chaleur est une machine thermique dans laquelle le fluide qui subit une transformation cyclique est du fréon R12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ).

### 1.1. Schéma de principe



### 1.2. Description du cycle

- Le fluide caloporteur sort à l'état gazeux du serpentin de l'évaporateur  $E$  (pression  $p_D$  et température  $T_F$  de la source froide) ⑥.
- Il passe alors dans le compresseur ① qui le comprime à la pression  $p_c$ . Cette compression rapide est isentropique (adiabatique) : le fréon gazeux s'échauffe ②.
- Quand le fréon gazeux arrive dans le serpentin du condenseur  $C$ , il se refroidit jusqu'à la température  $T_C$  de la source chaude et se liquéfie sous la pression  $p_C$  ③.
- Il passe alors dans une vanne de détente (capillaire) ④ qui le ramène à la pression  $p_D$  ⑤. La détente est isenthalpique.
- A l'arrivée dans le serpentin de l'évaporateur  $E$ , le fluide se vaporise sous la pression  $p_D$  et à la température  $T_F$  de la source froide ⑥.

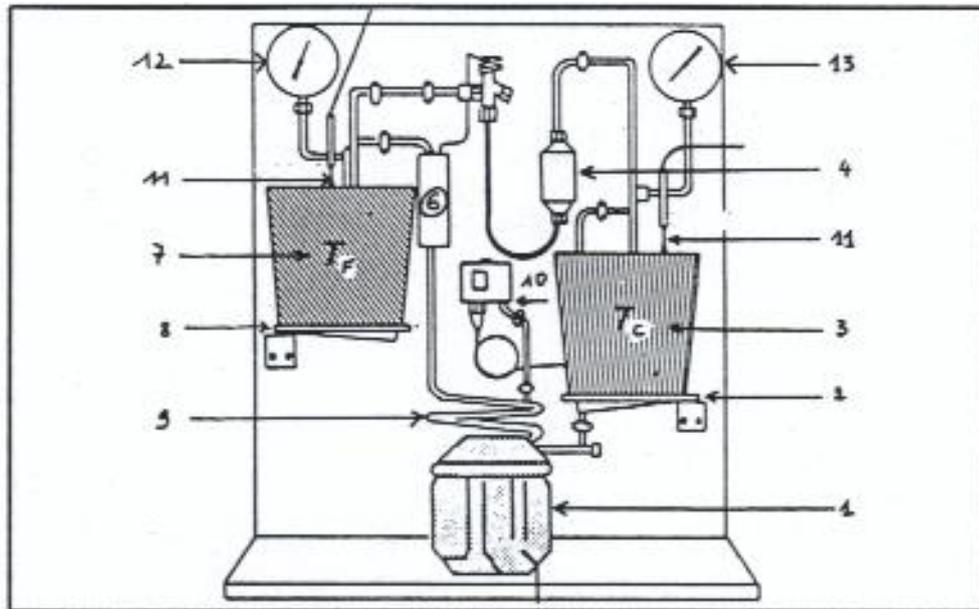
### 1.3. Bilan énergétique

Le fluide :

- reçoit le travail  $W$  du compresseur ;
- cède à la source chaude la chaleur  $Q_C$  dans le condenseur où il se liquéfie ;
- reçoit de la source froide la chaleur  $Q_F$  dans l'évaporateur pour se vaporiser.

## 2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

### 2.1. La pompe à chaleur



#### Légende :

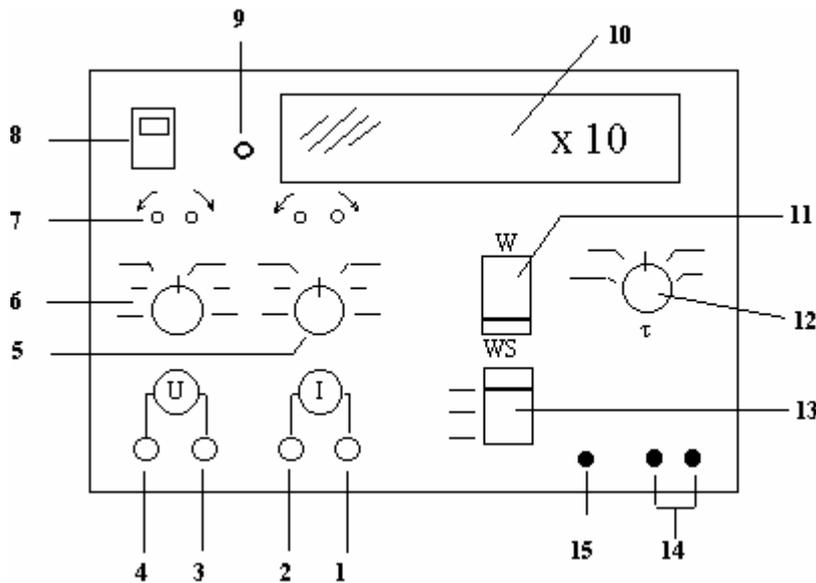
1. Compresseur.
2. Support pivotant du réservoir rouge d'eau de la source chaude.
3. Condenseur.
4. Épurateur : Filtre le fréon liquide des bulles de gaz qu'il contient.
5. Détendeur.
6. Capteur de température du détendeur avec isolation thermique.
7. Évaporateur.
8. Support pivotant du réservoir bleu d'eau de la source froide.
9. Serpentin qui empêche la transmission des vibrations du compresseur à l'ensemble du montage.
10. Pressostat : Arrête le compresseur quand la pression côté condenseur dépasse 16 bar.
11. Capteurs de température au niveau des tuyaux en cuivre du circuit.
12. Manomètre côté basse pression. Graduation intérieure pour la mesure des pressions (relatives) de -1 à +10 bar. Graduation extérieure de -60 à +45°C avec température du point de rosée du fréon R12 (les deux graduations centrales sont des échelles prévues pour d'autres fluides).
13. Manomètre côté haute pression. Graduation intérieure pour la mesure des pressions (relatives) de -1 à +30 bar. Graduation extérieure de -70 à +95°C avec température du point de rosée du fréon R12 (les deux graduations centrales sont des échelles prévues pour d'autres fluides).

## 2.2. La mesure du travail mis en jeu: le joule mètre / wattmètre

### a. Principe

Utilisé en wattmètre, il indique la puissance électrique  $P_e$  consommée par le compresseur : les signaux de courant et de tension sont multipliés entre eux. Le résultat de l'opération est une tension  $u_p(t)$  proportionnelle à la puissance instantanée. C'est la valeur moyenne qui est affichée.

Utilisé en joule mètre, il indique le travail électrique  $W_e$  consommé pendant la durée de fonctionnement  $t$ .



### b. Schéma

### c. Légende

**1 - 2 - 3 - 4** - Bornes de raccordement au compresseur par l'intermédiaire d'une boîte de raccordement : voir schéma de montage au § 3.5.

**5** - Sélecteur de gamme de courant.

**6** - Sélecteur de gamme de tension.

**7** - Diodes lumineuses pour la visualisation de sous ou sur modulation des préamplis pour le courant et la tension, avec flèches de sens de rotation pour les sélecteurs de gamme **5** et **6**.

**8** - Interrupteur avec voyant.

**9** - Bouton de remise à zéro (Reset) pour l'affichage des mesures de puissance (commutateur **11** sur la position "W").

**10** - Afficheur à LED.

**11** - Commutateur de fonction :

- Position supérieure "W" : affichage de la puissance  $P$  en watt.
- Position inférieure "WS" : affichage de l' énergie électrique  $E_e$  en watt-seconde ou joule.

**12** - Sélecteur de gamme pour le coefficient de temps de l'intégrateur.

**13** - Commutateur de commande de l'intégrateur :

- "RUN" : mesure de l' énergie électrique

- "STOP" : interruption de la mesure avec blocage de l'affichage.
- "RESET" : remise à zéro de l'intégrateur et de l'affichage.

14 - Sortie analogique.

15 - Remise à zéro pour la sortie analogique.

### 3. MONTAGE ET RÉGLAGES

#### 3.1. Alimentation du wattmètre

☞ Relier le wattmètre au secteur et le mettre sous tension.

#### 3.2. Remplissage des sources de chaleur

- ☞ Enlever les réservoirs en faisant pivoter les supports.
- ☞ Les remplir avec 4 L d'eau mesurés à l'éprouvette.
- ☞ Remettre en place les réservoirs sur les supports.

#### 3.3. Mise en place des sondes de température

- ☞ Vérifier la présence des deux sondes de température dans les sources froide et chaude.
- ☞ Les connecter à l'indicateur de température.

#### 3.4. Réglage du wattmètre / joule mètre

Tourner les commutateurs 5 et 6 jusqu'aux positions 300 V et 3A.

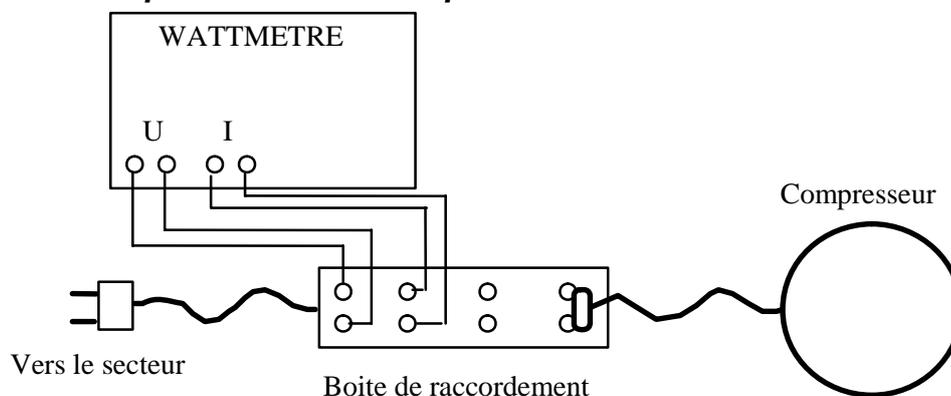
**Remise à zéro de l'affichage du joule mètre position "WS" : mesure de l'énergie électrique :**

- ☞ Mettre le sélecteur de gamme 12 sur la position  $\tau = 1$  s.
- ☞ Placer le commutateur de fonction 11 sur "WS" et le commutateur de commande 13 de l'intégrateur sur "RESET", puis sur "RUN".
- ☞ Arrêter l'affichage numérique à l'aide du potentiomètre 9 et ne plus le bouger.

**Réglage du temps d'intégration convenable pour la mesure :**

- ☞ Remettre le commutateur de commande 13 sur "RESET".
- ☞ Régler le temps d'intégration  $\tau$  à la valeur  $10^3$  s en utilisant le sélecteur de gamme 12.

#### 3.5. Liaison électrique wattmètre / compresseur



**Ne pas relier au secteur pour le moment : le compresseur commencerait à fonctionner**

## **NE JAMAIS RELIER DIRECTEMENT LE COMPRESSEUR DE LA POMPE A CHALEUR AU SECTEUR !**

### **3.6. Mise en marche des agitateurs**

Mettre en marche les agitateurs dans les deux réservoirs d'eau.

## **4. ÉTUDE DE L'EFFICACITÉ DE LA POMPE A CHALEUR**

On décide de faire des mesures avec la pompe à chaleur fonctionnant pendant une quinzaine de minutes. Pendant ce temps, vous relèverez, toutes les minutes :

- La température  $\theta_F$  de l'eau de la source froide où se trouve le serpentin "évaporateur" ;
- La température  $\theta_C$  de l'eau de la source chaude où se trouve le serpentin "condenseur" ;
- L'énergie électrique  $E_e$  et la puissance  $P_e$  consommées par le compresseur.

### **4.1. Températures initiales**

☞ Relever les températures des deux réservoirs : elles doivent être sensiblement égales.

### **4.2. Mise en marche**

☞ Relier la boîte de raccordement au secteur et déclencher un chronomètre. Le compresseur commence à fonctionner.

☞ *Immédiatement*, mettre le commutateur de commande **13** du joule mètre sur "RUN" la mesure de l'énergie électrique consommée débute.

### **4.3. Tableau des mesures**

☞ Toutes les minutes, relever  $\theta_F$ ,  $\theta_C$ ,  $E_e$  et  $P_e$ .

☞ Dresser un tableau des mesures.

☞ Que constate-t-on ?

☞ Au bout de quinze minutes, arrêter le fonctionnement de la pompe à chaleur en déconnectant la boîte de raccordement du secteur.

### **4.4. Évolution de la température en fonction du temps**

☞ Tracer sur un même graphe les deux courbes  $\theta_F = f(t)$  et  $\theta_C = f(t)$ .

☞ Conclusion ?

### **4.5. Calcul de l'efficacité réelle $\eta$**

On se propose de calculer l'efficacité réelle (ou indice de performance) pour chaque intervalle de temps  $\Delta t = 1$  min.

À chaque instant, la quantité de chaleur  $dQ_C$  cédée par le fréon au réservoir d'eau chaude est opposée à la quantité de chaleur  $dQ$  reçue par l'eau :

$$dQ = m c_{\text{eau}} d\theta_C \quad \text{avec} \quad m = 4 \text{ kg}, c_{\text{eau}} = 4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Dans le même esprit, la puissance électrique apportée s'exprime par :

$$P_e = \frac{dE_e}{dt}$$

La puissance thermique reçue par la source chaude s'exprime par :

$$P_{th} = \frac{dQ}{dt} = mc \frac{d\theta}{dt}$$

L'efficacité réelle est donc le rapport :

$$\eta = \frac{P_{th}}{P_e}$$

- ☞ Créer les variables convenables.
- ☞ Dresser un tableau des résultats.

#### 4.6. Évolution de l'efficacité $\eta$ en fonction des températures

- ☞ Tracer la courbe  $\eta = f(\theta_C - \theta_F)$ .
- ☞ Conclure.

#### 4.7. Comparaison de l'efficacité réelle $\eta$ avec l'efficacité idéale $\eta_{max}$

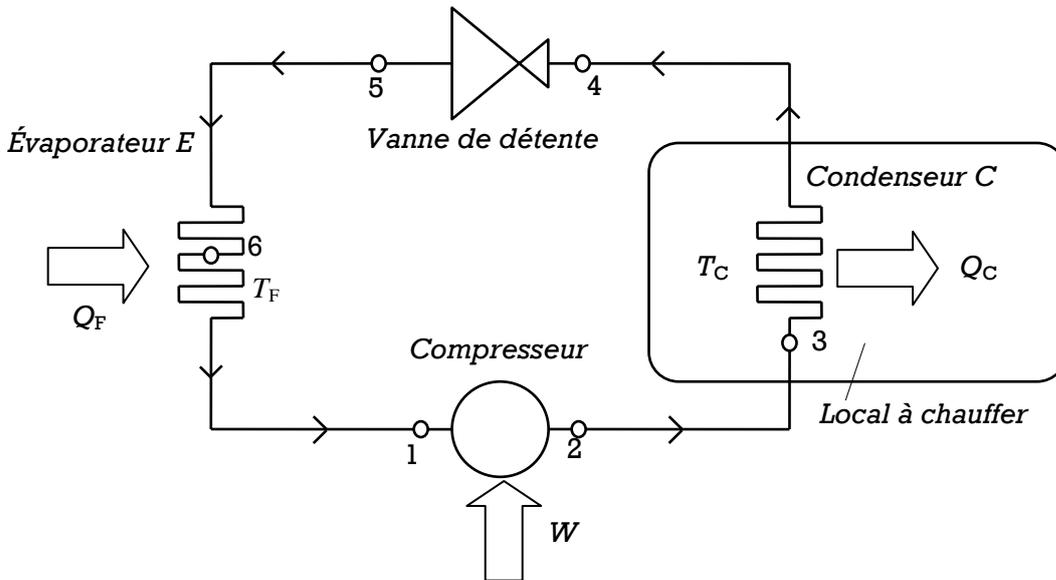
Pour une pompe à chaleur fonctionnant de façon idéale, donc réversible, entre une source froide à la température  $T_F$  (en K) et une source chaude à la température  $T_C$  (en K), on aurait :

$$\eta_{max} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

- ☞ Dresser un tableau des valeurs et tracer la courbe correspondante, en la superposant à la courbe  $\eta = f(\theta_C - \theta_F)$  du § 4.6.
- ☞ Conclure.

## 5. ETUDE DU FONCTIONNEMENT SUR LE DIAGRAMME DE MOLLIER

### 5.1. Rappel du fonctionnement de la pompe à chaleur



**État 1 :** Le fréon arrive à l'entrée du compresseur à l'état gazeux à la pression  $p_E$  et température  $\theta_1$ .

**État 2 :** Il passe alors dans le compresseur qui le comprime à la pression  $p_C$ . Cette compression rapide est supposée adiabatique : le fréon gazeux s'échauffe jusqu'à la température  $\theta_2$ .

**État 3 :** Dans le serpentin du condenseur C, le fréon se refroidit jusqu'à la température  $\theta_C$  de la source chaude et commence à se liquéfier sous la pression  $p_C$  à la température  $\theta_C$ .

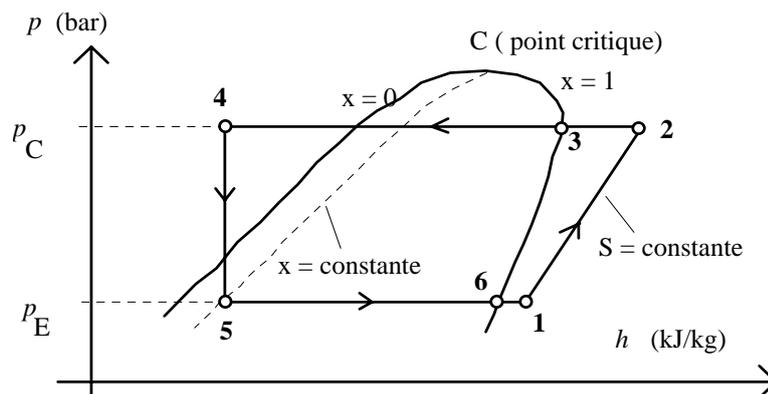
**État 4 :** Le fréon, sorti du condenseur à la température  $\theta_C$  et à la pression  $p_C$ , se refroidit sur son trajet jusqu'au point 4 où il est à la température  $\theta_4$  tout en restant à la pression  $p_C$ .

**État 5 :** Dans une vanne de détente, il subit une détente isenthalpique qui le ramène à la pression  $p_E$  en subissant un début de vaporisation à la température  $\theta_5$ .

**État 6 :** A l'arrivée dans l'évaporateur E, le fréon finit sa vaporisation sous la pression constante  $p_E$  et à la température  $\theta_5$ . Au contact de la source froide, il se réchauffe jusqu'à la température  $\theta_6 = \theta_F$ .

**Retour à l'état 1 :** Entre la source froide et le compresseur, le gaz se réchauffe légèrement de  $\theta_F$  à  $\theta_1$ .

### 5.2. Représentation du cycle



### 5.3. Mesures à effectuer

Elles doivent être effectuées lorsque la pompe à chaleur fonctionne déjà depuis environ 15 minutes (tout de suite après l'étude du § 4).

Vous allez relever une série de températures. Ce ne seront pas exactement les températures du fréon dans les différents états précédemment décrits, car on ne peut pas introduire de capteurs à l'intérieur du circuit.

☞ Placer les sondes de température avec les tuyaux en cuivre aux différents points indiqués.

Aux points 1, 2, 4 et 5, il faut peut-être fixer des sondes thermométriques à l'aide de ruban adhésif de sorte que le contact thermique soit le meilleur possible.

☞ Relever, tant que faire se peut, simultanément :

- La pression  $p_E$  côté évaporateur sur le manomètre **13** et, sur le même manomètre, la température du point de rosée correspondant du fréon ( $\theta_{eb/E}$ ) ;
- La pression  $p_C$  côté condenseur sur la manomètre **14** et, sur le même manomètre, la température du point de rosée correspondant du fréon ( $\theta_{vC}$ ).
- La température  $\theta_1$  à l'entrée du compresseur (point 1) ;
- La température  $\theta_2$  à la sortie du compresseur (point 2) ;
- La température  $\theta_4$  à l'entrée du détendeur (point 4) ;
- La température  $\theta_5$  à la sortie du détendeur (point 5) ;
- La température  $\theta_C$  de la source chaude ;
- La température  $\theta_F$  de la source froide ;

Attention, **les manomètres indiquent des pressions relatives** : il faut donc ajouter 1 bar à la lecture pour obtenir des pressions absolues.

### 5.4. Tracé du cycle sur le diagramme de Mollier et commentaires

Sur le diagramme fourni :

- Point 1 :** ☞ Placer le point 1 correspondant à la pression  $p_E$  et à la température  $\theta_1$  : il se trouve à l'intersection de la droite horizontale  $p_E = \text{constante}$  et de la courbe isotherme d'équation  $\theta_1 = \text{constante}$ .
- ☞ Lire en abscisse l'enthalpie massique  $h_1$  du gaz (ou utiliser la table fournie).
- Point 2 :** ☞ La compression étant supposée isentropique (adiabatique réversible), il se trouve à l'intersection de la droite horizontale correspondant à  $p_C = \text{constante}$  et de la courbe  $s = \text{constante}$  passant par le point 1.
- ☞ Sur le diagramme, lire la température  $\theta'_2$  et l'enthalpie massique  $h_2$  correspondant au point 2.
- ☞ Comparer la température  $\theta'_2$  lue sur le diagramme et la température  $\theta_2$  relevées sur le tuyau en cuivre à la sortie du compresseur.
- ☞ Que constate-t-on ?
- Point 3 :** ☞ Dans le condenseur, le gaz se refroidit sous la pression constante  $p_C$  et va commencer à se liquéfier.
- ☞ Sur le diagramme, lire la température  $\theta'_3$  à laquelle le gaz commence à se liquéfier.
- Point 4 :** ☞ Dans le condenseur, la liquéfaction se poursuit jusqu'à être totale ; le liquide formé se refroidit jusqu'à la température  $\theta_C$  de la source chaude ; il continue à se refroidir sur son trajet vers le détendeur jusqu'à la température  $\theta_4$  : il se trouve à l'intersection de la droite horizontale  $p_C = \text{constante}$  et de la courbe isotherme d'équation  $\theta_4 = \text{constante}$ .
- ☞ Lire l'enthalpie massique  $h_4$  du liquide avant sa détente.

**Point 5 :** ☞ La transformation 4 → 5 peut-être assimilée à une détente de Joule-Thomson. Le fluide suit alors une isenthalpique et le point 5 se trouve à l'intersection de la droite verticale  $h_4 = \text{constante}$  avec la droite horizontale  $p_E = \text{constante}$ .

☞ Lire la fraction massique  $x$  de vapeur qui s'est formée au cours de la détente.

☞ Lire sur le diagramme la température  $\theta'_5$  à laquelle se déroule la vaporisation.

☞ Comparer  $\theta'_5$  et  $\theta_5$ .

**Point 6 :** ☞ Placer le point 6 auquel la vaporisation de termine sous la pression  $p_E$  et noter la température  $\theta_6$  correspondante.

☞ **Tracer le cycle.**

☞ **Dresser un tableau récapitulatif des mesures et des relevés sur le diagramme.**

Température de la source chaude :  $\theta_C =$

Température de la source froide :  $\theta_F =$

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
Températures mesurées	$\theta_1 =$	$\theta_2 =$		$\theta_4 =$	$\theta_5 =$	$\theta_6 =$
Températures lues sur le diagramme		$\theta'_2 =$	$\theta'_3 =$		$\theta'_5 =$	
Pression	$p_E =$	$p_C =$			$p_E =$	$p_E =$
Enthalpies massiques	$h_1 =$	$h_2 =$		$h_4 =$	$h_5 =$	
Titre					$x =$	

### 5.5. Observations à partir le cycle

☞ Comparer, respectivement, les températures des points de rosée lues sur les manomètres avec les températures  $\theta_C$  et  $\theta_F$ . Conclusion ?

☞ Comparer  $\theta_1$  avec  $\theta_F$  et  $\theta_4$  avec  $\theta_C$ . Qu'observe-t-on ?

☞ A quels moments les conversions d'énergies les plus importantes ont-elles lieu ?

### 5.6. Étude de l'efficacité

Pour les valeurs relevées, calculer :

☞ L'efficacité **maximale** d'une pompe à chaleur réversible fonctionnant entre deux sources aux températures  $\theta_C$  et  $\theta_F$  des deux réservoirs d'eau.

☞ L'efficacité d'une pompe à chaleur qui convertit en chaleur toute l'énergie apportée par le compresseur (l'échange thermique avec la source chaude est parfait) est donné par :

$$\eta = \frac{h_2 - h_4}{h_2 - h_1}$$

- L'efficacité réelle de la pompe étudiée (voir § 4).