

## TP : Pompe à chaleur.

La technologie des pompes à chaleur a beaucoup évolué ces dernières années. Leur installation est de plus en plus fréquente dans des constructions neuves. Leur intérêt est d'utiliser une énergie que l'on considèrerait auparavant comme dénuée d'intérêt car stockée dans un réservoir d'énergie possédant une température basse. Le terme *pompe* doit être compris par analogie avec celui de la pompe à eau habituelle qui est destinée à amener de l'eau là où elle n'irait pas naturellement, c'est-à-dire aller contre la gravité. De la même façon, la pompe à chaleur prend de l'énergie à basse température pour en donner à un système à haute température. Un tel transfert thermique est tout à fait contre-nature puisque tout le monde sait que les transferts thermiques s'effectuent du chaud vers le froid. Évidemment, comme pour la pompe à eau, le fonctionnement de la pompe possède un coût. Mais grâce à l'ingéniosité du dispositif technique, le coût de fonctionnement sera vu comme modéré en regard du bénéfice procuré. Cette évaluation est réalisée par le calcul de l'efficacité de la pompe à chaleur :

$$e = \frac{\text{Énergie utile fournie à la source chaude}}{\text{Énergie coûteuse fournie au fluide de la pompe par le biais du moteur}} = \frac{-Q_c}{W}$$

L'efficacité d'une pompe à chaleur est, généralement, comprise entre 3 et 7. Prenons comme exemple une pompe à chaleur d'efficacité  $e = 5$ . Cela signifie que pour chaque kilowattheure payé pour  $W$ , on bénéficie d'un apport énergétique pour chauffer une maison, une entreprise de 5 kWh. Le prix d'un kilowattheure électrique - car le moteur de la pompe à chaleur est très souvent électrique - est d'environ 0,14 €. S'il avait fallu payer l'intégralité des 5 kWh comme dans le cas d'un chauffage électrique, la facture aurait été de 0,70 €. Ce coût est à projeter dans le cadre de la consommation moyenne en électricité d'une famille qui est de l'ordre 7 000 kWh. Cette réflexion suppose que l'accès à l'énergie de la source froide est gratuit, ce qui est généralement le cas puisque l'énergie est prélevée dans l'air environnant ou dans l'eau d'un cours d'eau ou d'un lac.

## 1 Objectifs

Ce TP a pour but de tester le fonctionnement d'une pompe à chaleur en le confrontant à un modèle théorique. Cette machine ditherme sera étudiée dans le cadre d'un régime non permanent dû au fait que la source chaude va voir sa température augmenter au cours du temps. La source froide va constituer un thermostat à 0,0 °C puisqu'au départ, elle sera constituée d'un mélange eau-glace à la pression atmosphérique. Malgré le fait que la température de la source chaude évolue et compte tenu du nombre de cycles effectués par le fluide pendant la durée de l'expérience, on considèrera des transformations cycliques de durées infinitésimales au cours desquelles le régime permanent est supposé.

## 2 Matériel

### 2.1 Première approche

Le dispositif expérimental est présenté sur la photographie de la figure 1. Les échangeurs thermiques présents au niveau de la source froide et de la source chaude sont visibles. Le fluide circulant dans la pompe est comprimé par le compresseur. Il a reçu de l'énergie sous forme de travail  $W > 0$ . Le fluide possède alors une température plus élevée que la source chaude. Il perd de l'énergie au profit de celle-ci, ce transfert thermique est noté  $Q_c < 0$ . Malgré ce transfert énergétique, le fluide est encore chaud. Il subit alors une détente brutale que l'on peut modéliser par une transformation isenthalpique. Sa température devient alors inférieure à celle de la source froide. Il se réchauffe en recevant de l'énergie de cette source, ce transfert thermique est noté  $Q_f > 0$ . En régime permanent, le fluide de la pompe revient au niveau du compresseur dans le même état que celui qui était le sien avant d'effectuer le cycle que nous venons de décrire.

### 2.2 Approche plus détaillée

On reprend la photographie de la figure 2 afin de mieux percevoir les différentes étapes du cycle effectué par le fluide de la pompe à chaleur.

- 1 est le compresseur qui comprime le fluide alors à l'état gaz. On notera  $P$  la puissance fournie au fluide. Cette puissance provient de la puissance électrique qui sera mesurée avec un wattmètre.
- 2 est le condenseur. En effet, le fluide a été comprimé. Sa température est supérieure à la température  $T_c(t)$  de la source chaude constituée par l'eau mise dans le seau rouge. Le fluide cède de l'énergie à l'eau de façon isobare en passant de l'état gaz à l'état liquide.

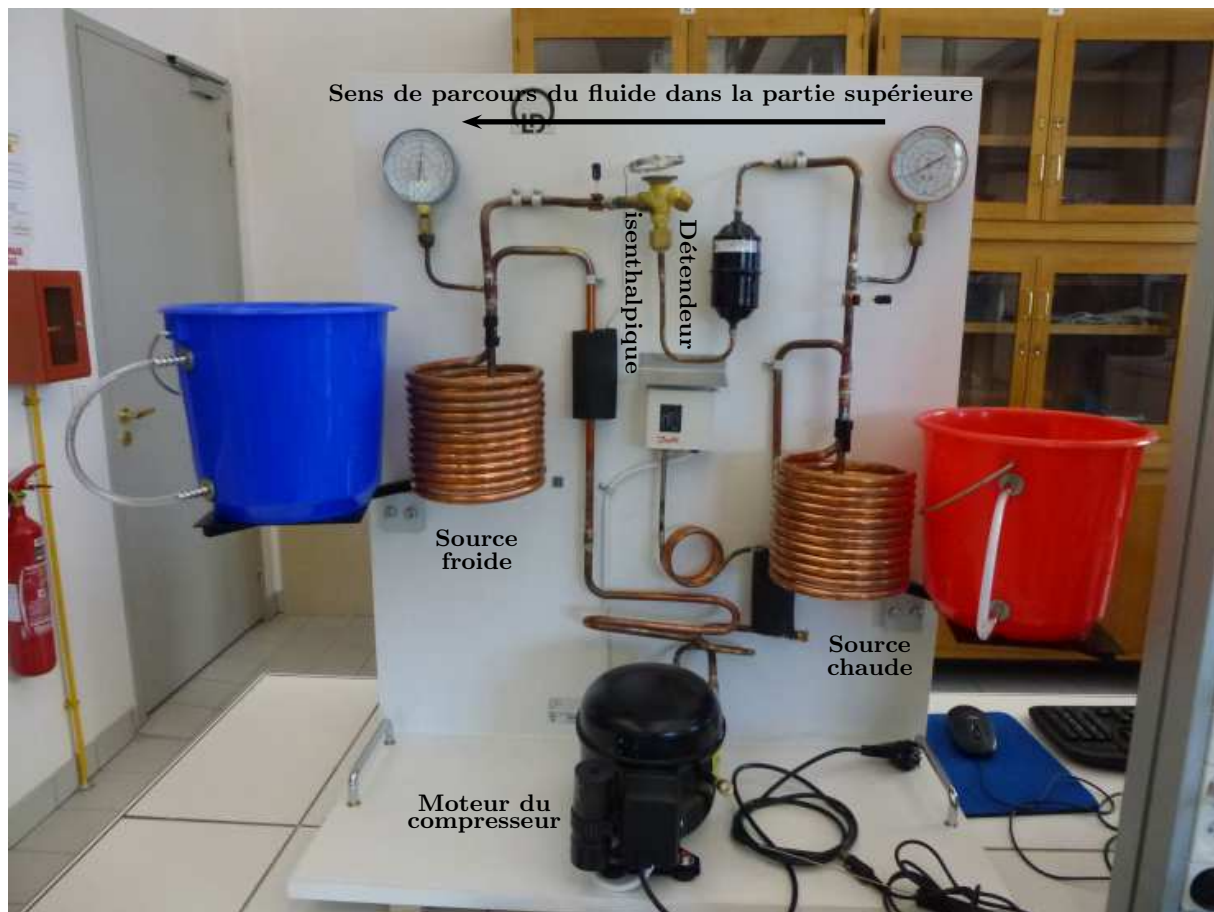


FIGURE 1 – La pompe à chaleur

- 3 est un épurateur-collecteur. Il assure une arrivée de liquide sans bulles de gaz à l'entrée de 4 qui est la vanne de détente. Il peut être considéré comme neutre sur le plan du bilan énergétique. On pourra oublier sa présence dans le cadre de l'étude théorique de la pompe à chaleur.
- 4 est la vanne de détente comme indiqué dans le point précédent. Elle réalise une opération de laminage qui est une détente isenthalpique ramenant le fluide à basse pression et basse température. Sa température est alors inférieure à la température  $T_f = T_0 = 273\text{ K}$  de la source froide constituée par le mélange eau-glace contenu dans le seau bleu. Le fluide est alors un mélange diphasé liquide-vapeur.
- 5 est l'évaporateur. Le fluide sortant de la vanne de détente arrive donc au niveau de la source froide à laquelle il va prélever de l'énergie tout en transformant progressivement sa phase liquide en phase gaz. Cette opération est isobare. À la sortie de la source froide, le fluide est entièrement à l'état gaz et retourne dans le compresseur. Un nouveau cycle peut recommencer.
- 6 est le manomètre qui indique la valeur de la pression haute au niveau de la source chaude. Comme nous allons le voir plus loin, c'est un manomètre un peu particulier car il comporte aussi des échelles de température.
- 7 est le manomètre qui indique la valeur de la pression basse au niveau de la source froide. Comme le précédent, il comporte aussi des échelles de température.
- 8 est un manostat qui régule le fonctionnement du compresseur afin d'éviter tout phénomène de surpression inévitablement associé à un phénomène de surchauffe. C'est un élément de sécurité important pour le fonctionnement de la pompe à chaleur.

## 2.3 Le fluide et les manomètres

Le fluide utilisé dans cette pompe à chaleur porte le nom de R134A. C'est un nom de code correspondant au tétrafluoroéthane de formule chimique  $\text{CF}_3 - \text{CFH}_2$ . Il décrit dans la machine le cycle  $1 - 2 - 3 - 4 - 1$ . Afin de suivre son évolution, il est intéressant de se reporter à son diagramme des frigoristes fournissant  $\ln p = f(h)$ , c'est-à-dire le logarithme de sa pression en fonction de son enthalpie massique. Ce diagramme est évidemment limité à l'étude de l'équilibre liquide-vapeur. On peut le voir sur le schéma de la figure 4.



FIGURE 2 – Le cycle du fluide dans la pompe à chaleur

Sur les photographies de la figure 3, on peut voir les échelles de température. En fait, elles sont basées sur le fait que si la pression est fixée alors, pour un corps pur en équilibre liquide-vapeur, la température est nécessairement déterminée, c'est le palier du changement d'état. Les manomètres sont construits pour être montés sur des pompes à chaleur utilisant plusieurs fluides. Pour chaque fluide, il y a une échelle de température. On peut retrouver parmi elles, l'échelle du R134A qui est représentée en bleu. La correspondance entre la pression et la température se retrouve sur le diagramme des frigoristes de la figure 4.

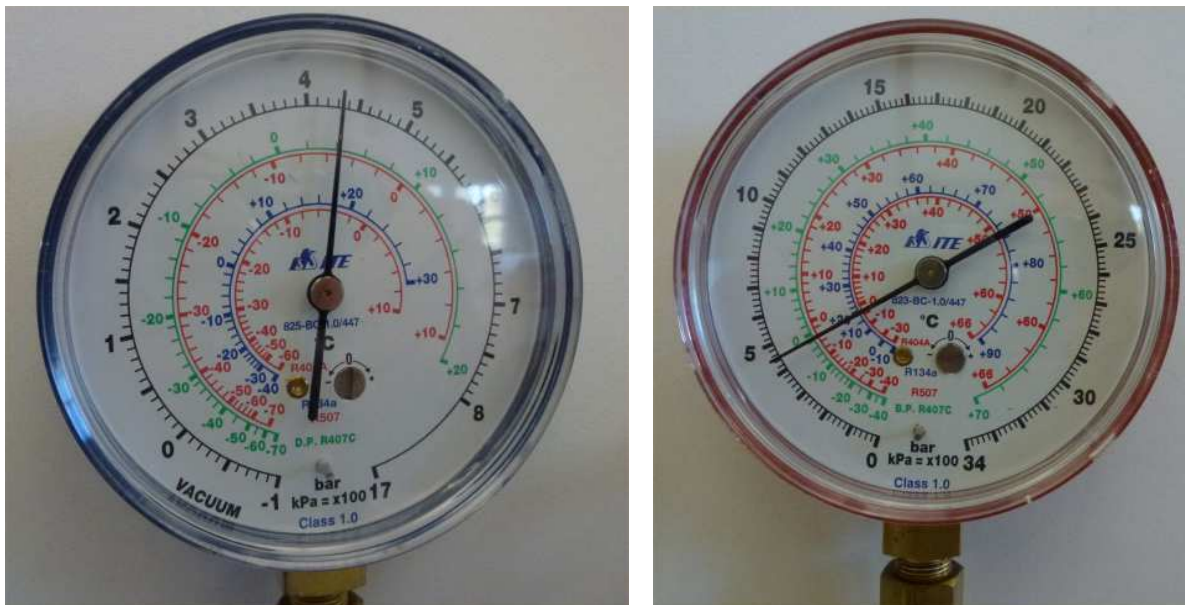
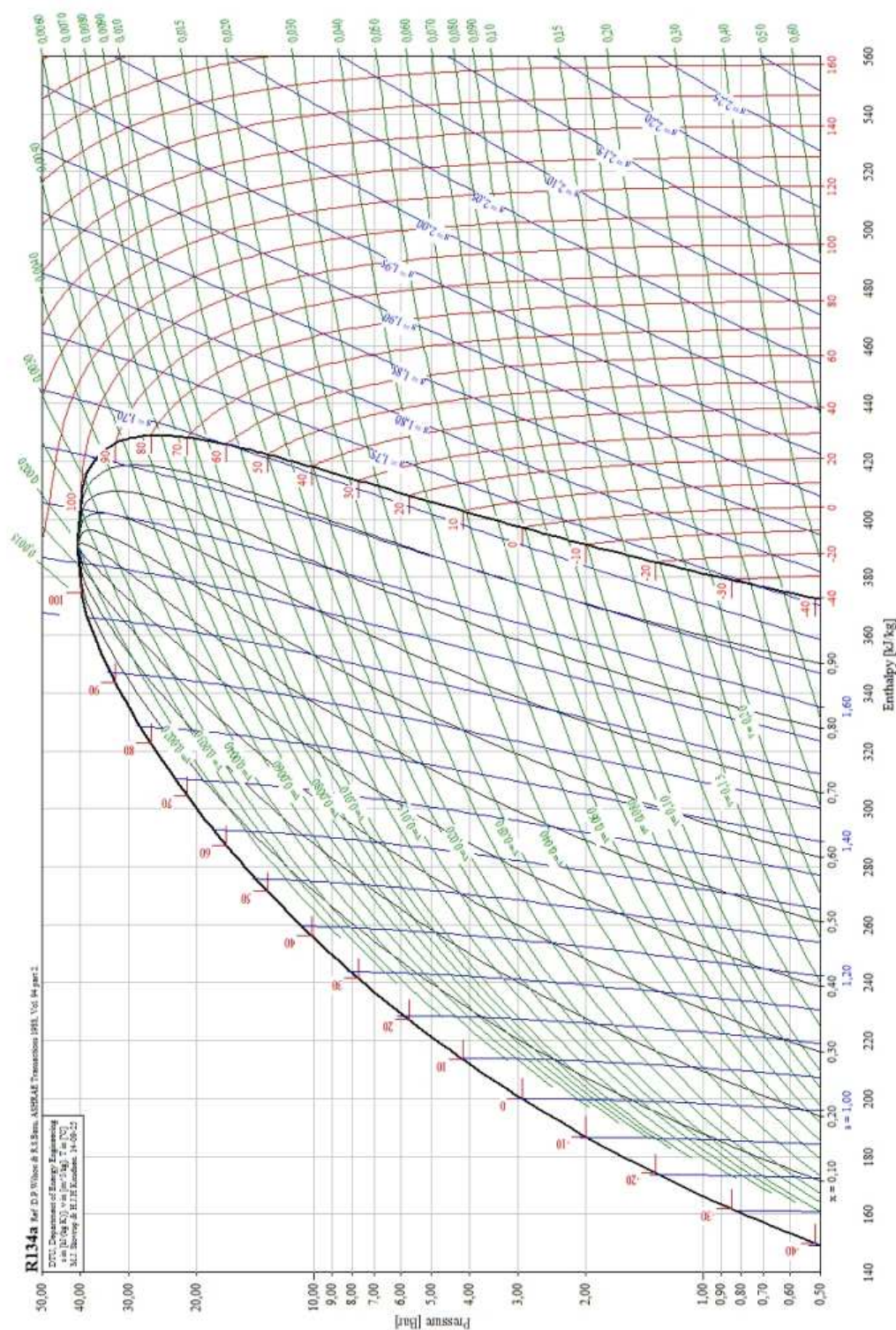


FIGURE 3 – Pressions et températures de l'équilibre liquide-vapeur



FIGURE 4 – Diagramme  $h - \ln(p)$  du fluide R134A

## 2.4 Wattmètre-Joulemètre

Afin de pouvoir étudier la pompe à chaleur, on dispose d'un contrôleur numérique qui possède les fonctions de wattmètre et de joulemètre. Son branchement particulier demande de l'attention pour deux raisons : on effectue les mesures à la source, c'est-à-dire au niveau de la prise de courant EDF et, donc, on travaille sur du 220 V ce qui n'est pas très habituel dans nos TP. Ensuite, pour mesurer la puissance il faut mesurer simultanément la

tension, l'intensité et le déphasage entre les deux puisque la puissance moyenne est  $P = UI \cos \varphi$  où  $U$  et  $I$  sont les tensions et intensités efficaces. À partir de la puissance, en effectuant une intégration au cours du temps, on accède à l'énergie totale consommée par le moteur électrique du compresseur. Voir les photographies de la figure 5.

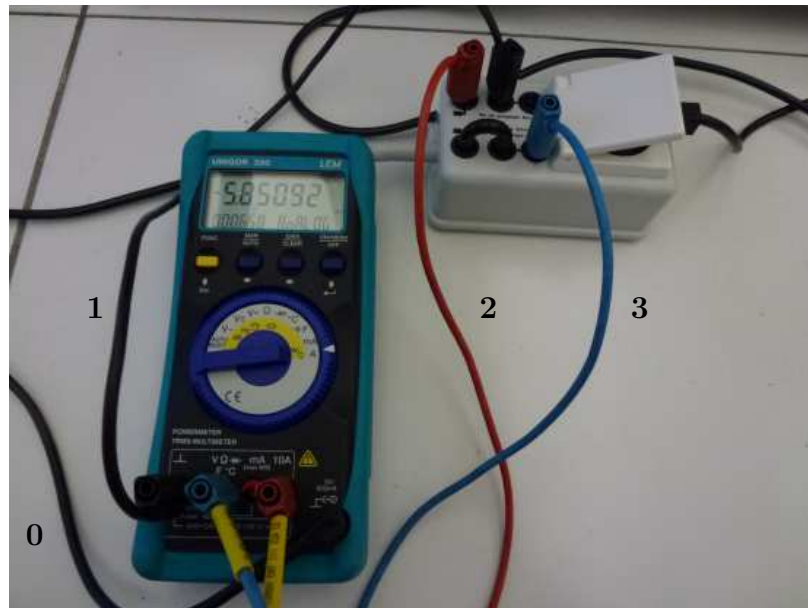


FIGURE 5 – Branchement du wattmètre

Le fil (double) 0 correspond à l'alimentation du contrôleur numérique, cela nous évite d'utiliser des piles ou des accumulateurs. La puissance moyenne donnée par  $UI \cos \varphi$  se calcule à partir de  $U \simeq 220 \text{ V}$  puisque la pompe à chaleur est branchée sur le réseau EDF en régime sinusoïdal à la fréquence de 50 Hz. Cette tension est mesurée entre les fils 1 (noir) et 3 (bleu). Pour la mesure de l'intensité, on utilise les fils 1 (noir) et 2 (rouge). L'électronique de l'appareil permettra d'obtenir le déphasage entre les deux. On peut utiliser le contrôleur numérique en joulemètre en sélectionnant la bonne fonction grâce à la touche jaune présente à gauche sous l'écran du contrôleur.

## 2.5 Mesure des températures

Les températures de la source chaude et de la source froide vont être mesurées par des sondes que l'on place au milieu des seaux. Leur acquisition par l'ordinateur va utiliser le logiciel *Cassy Lab* qui est accessible par un raccourci dans le répertoire physique-chimie. La version du logiciel est une version minimale gratuite qui ne nécessite pas d'enregistrement même si cela est malgré tout demandé au départ. Fermer la fenêtre correspondante et s'assurer que les températures sont bien acquises par l'ordinateur. On pourra les enregistrer automatiquement à des intervalles de temps réguliers.

Les données obtenues dans *Cassy Lab* devront être rapidement sauvegardées et pourront être récupérées sous la forme d'un tableau par copié-collé. Ce tableau de valeurs sera utilisé pour travailler dans le logiciel *Latix Pro*.

## 3 Aspects théoriques

### 3.1 Modèle du cycle effectué par le fluide

Dans l'étape 1-2, le fluide subit une compression que l'on suppose adiabatique réversible, par conséquent isentropique. Sur 2-3, la condensation supposée totale est isobare. La détente 3-4 qui suit est isenthalpique. Enfin sur 4-1, l'évaporation isobare est supposée totale. Le cycle réel est proche du cycle représenté sur le schéma de la figure 6.

La pompe à chaleur ayant un fonctionnement cyclique et de nombreux cycles s'effectuant chaque seconde, on peut écrire que pour tout intervalle de temps de fonctionnement grand devant la durée d'un cycle, le bilan énergétique est nul. En effet, l'état initial étant identique à l'état final, on pourra écrire :

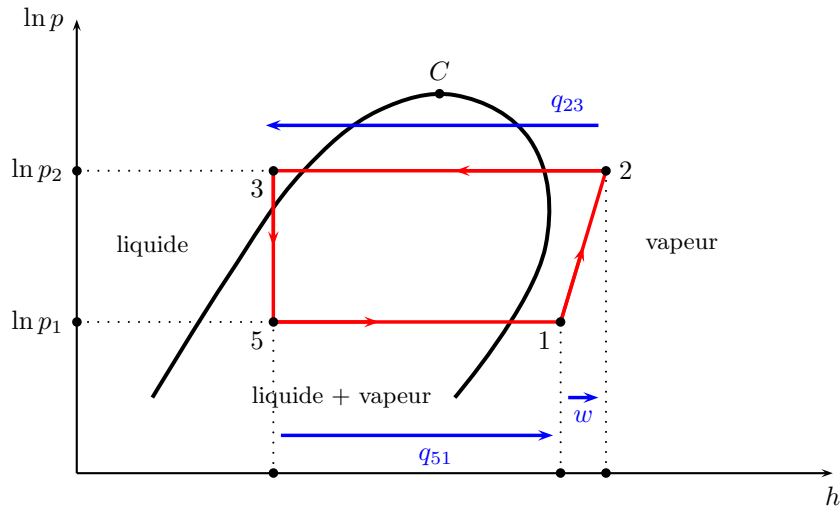


FIGURE 6 – Modèle du cycle du fluide circulant dans la pompe à chaleur

$$\Delta U_{\text{cycle}} = 0 = W + Q_c + Q_f$$

Afin de pouvoir étudier l'évolution au cours du temps de la température de la source chaude  $T_c(t)$ , il est indispensable de conduire une étude entre les dates  $t$  et  $t + dt$ . On suppose toujours que la transformation subie par le fluide est cyclique même si elle met en jeu des transformations infinitésimales. On écrit le bilan énergétique sous la forme :

$$\delta W + \delta Q_c + \delta Q_f = 0$$

1. Expliquer quelles sont les hypothèses que l'on doit faire pour pouvoir écrire l'équation suivante :

$$\frac{\delta Q_c}{T_c} + \frac{\delta Q_f}{T_0} = 0$$

Quel est le nom porté par cette équation ?

### 3.2 Équation différentielle

On s'intéresse maintenant à l'équation différentielle à laquelle obéit la température de la source chaude  $T_c(t)$ . On note  $\Gamma$  la capacité thermique totale de la source chaude. Celle-ci est constituée d'un seau en plastique et d'une masse  $m_e = 4 \text{ kg}$  d'eau. On rappelle que la capacité thermique massique de l'eau liquide est  $c_e = 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . On a donc  $\Gamma = \Gamma_{\text{seau}} + m_e c_e$  avec  $m_e c_e \gg \Gamma_{\text{seau}}$ . Enfin, on note  $P$  la puissance supposée constante fournie au moteur du compresseur.

2. Expliquer soigneusement pourquoi l'on peut écrire les deux égalités :

$$\delta W = P dt \quad \text{et} \quad \delta Q_c = -\Gamma dT_c$$

3. En déduire que l'équation différentielle vérifiée par  $T_c(t)$  est :

$$\frac{dT_c}{dt} \left( 1 - \frac{T_0}{T_c} \right) = \frac{P}{\Gamma}$$

### 3.3 Solution

On note  $T_{c0} = T_c(t = 0)$  la température de la source chaude au moment où la pompe à chaleur est mise en fonctionnement.

4. Montrer que  $T_c(t)$  vérifie l'équation :

$$\frac{T_c}{T_{c0}} - 1 - \frac{T_0}{T_{c0}} \ln \frac{T_c}{T_{c0}} = \frac{P}{\Gamma T_{c0}} t$$

5. Expliquer en quoi, il est justifié de poser  $\tau = \frac{\Gamma T_{c0}}{P}$  en attribuant à  $\tau$  le statut de durée caractéristique de l'évolution de  $T_c(t)$ .

6. En privilégiant des grandeurs adimensionnées, on pose  $y = t/\tau$ ,  $\theta = T_c/T_{c0}$  et  $\theta_f = T_0/T_{c0}$ . Montrer qu'on a alors :

$$\theta - \theta_f \ln \theta = 1 + y$$

## 4 Expériences

### 4.1 Consignes

Lors de vos activités expérimentales en TP, vous devrez systématiquement :

- \* Élaborer un protocole et m'appeler pour que je le valide.
- \* Mettre en œuvre ce protocole et m'appeler pour que j'évalue vos activités.
- \* Communiquer les résultats dans le compte rendu sous forme de descriptions, de tableaux de mesures, de graphiques. . .
- \* Valider les résultats en comparant les développements théoriques et les résultats expérimentaux en ayant le souci permanent de présenter de façon rigoureuse les résultats avec leur incertitude.
- \* Remettre en fin de séance votre compte-rendu.

Vous serez évalué sur l'ensemble de ces exigences.

### 4.2 Initiative personnelle

7. Prendre des initiatives afin de pouvoir confronter étude théorique et observation expérimentale du fonctionnement de la pompe à chaleur.

8. Analyser les résultats obtenus. Discuter.

9. Proposer un bilan énergétique complet de la pompe à chaleur entre le début et la fin de son fonctionnement. Déterminer son efficacité.

10. Déterminer l'entropie créée au cours de l'ensemble de la phase de fonctionnement que vous aurez réalisé.

