
[θ] TP n°2 – 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 (chaleur contenue dans l'air extérieur) 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 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 :

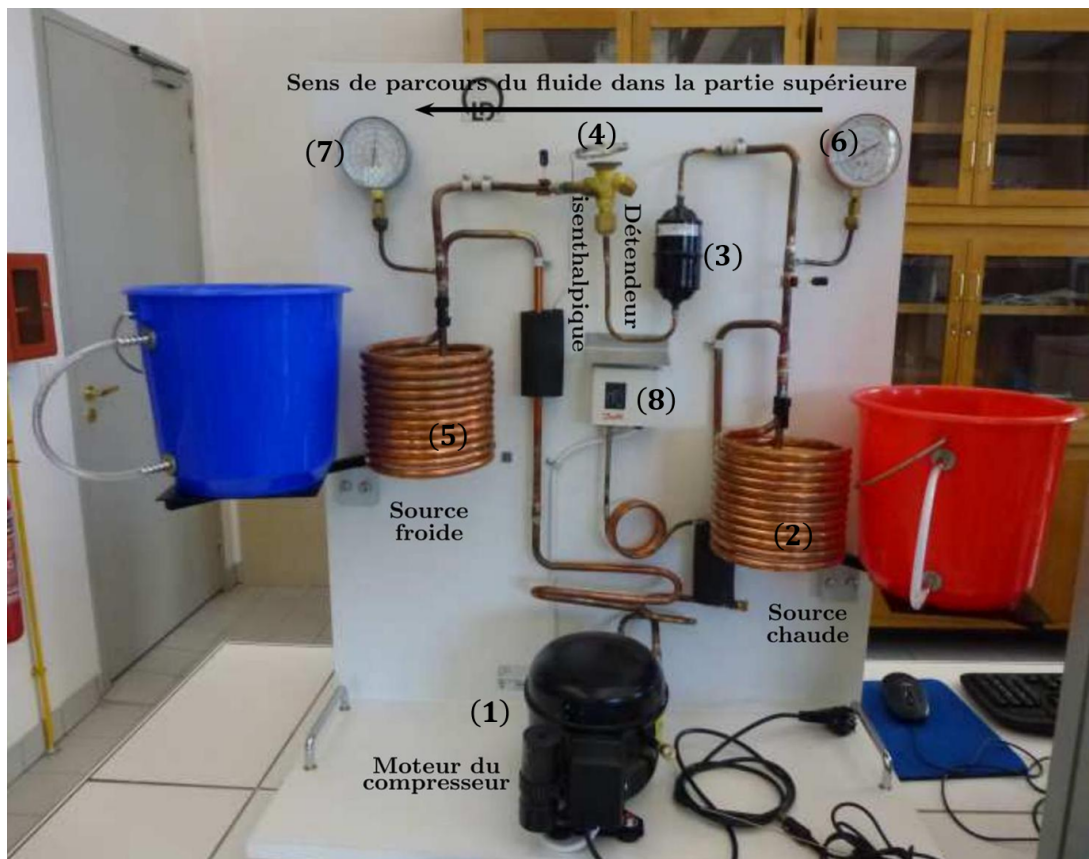
$$e = \frac{\text{Énergie utile}}{\text{Énergie coûteuse}} = \frac{-Q_c}{W}$$

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 sera un thermostat à 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 atteint.

📄 Un compte-rendu est à rendre pour ce TP

I) Présentation du dispositif

1) Première approche



Le dispositif expérimental est présenté ci-dessus.

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) Approche plus détaillée

On reprend la photographie ci-dessus 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 \mathcal{P} la puissance utile 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.

(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 $T_f = T_{\text{fus}} = 0 \text{ °C} = 273 \text{ K}$ 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.

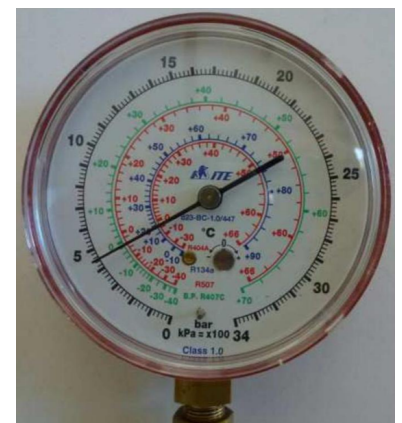
(7) est le manomètre qui indique la valeur de la pression basse au niveau de la source froide. Comme le précédent, il comporte aussi des échelles de température.

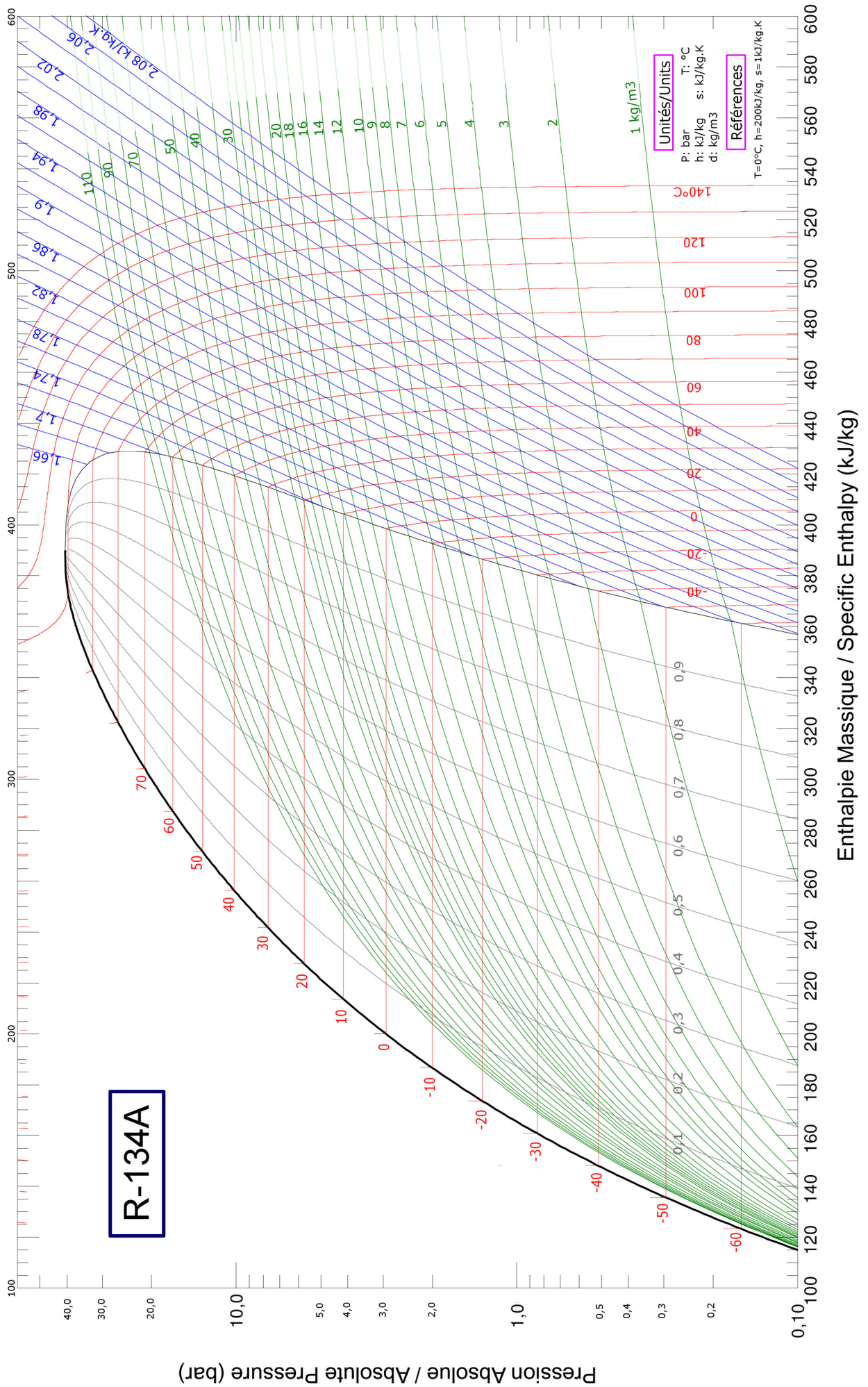
(8) est un manostat qui régule le fonctionnement du compresseur afin d'éviter tout phénomène de surpression inévitablement associé à un phénomène de surchauffe. C'est un élément de sécurité important pour le fonctionnement de la pompe à chaleur.

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 CF_3CFH_2 . Il décrit dans la machine le cycle décrit précédemment. Afin de suivre son évolution, il est intéressant de se reporter à son diagramme de Mollier (page suivante) fournissant $\ln(p)$ en fonction de h , c'est-à-dire le logarithme de sa pression en fonction de son enthalpie massique.

Sur la photographie d'un manomètre ci-contre, 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 frigorigères.





4) Wattmètre – Joulemètre

Afin de pouvoir étudier la pompe à chaleur, on dispose d'un Wattmètre qui renseigne sur la consommation électrique instantanée du compresseur.

On peut utiliser le contrôleur numérique en Joulemètre en sélectionnant la bonne fonction grâce à la touche « W ».



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. On pourra les enregistrer manuellement à des intervalles de temps réguliers.

Les données obtenues pourront être utilisées pour l'étude du cycle.

II) Aspects théoriques

Les calculs théoriques peuvent, dans un premier temps, être pris pour acquis afin de passer le plus rapidement possible à la partie expérimentale. Il faudra néanmoins les inclure dans un compte rendu.

1) Modèle du cycle effectué par le fluide

Dans l'étape 1 → 2, le fluide subit une compression que l'on suppose adiabatique réversible, donc 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 ci-contre.

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 :

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

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 :

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

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

$$\frac{\delta Q_c}{T_c} + \frac{\delta Q_f}{T_{\text{fus}}} = 0$$

Quel est le nom porté par cette équation ?

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 C 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 $c_e = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. On a donc $C = C_{\text{seau}} + m_e c_e$ avec $m_e c_e \gg C_{\text{seau}}$. Enfin, on note \mathcal{P} la puissance supposée constante fournie au moteur du compresseur.

🏠 📖 Expliquer soigneusement pourquoi l'on peut écrire les deux égalités :

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

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

$$\frac{dT_c}{dt} \times \left(1 - \frac{T_{\text{fus}}}{T_c}\right) = \frac{\mathcal{P}}{C}$$

3) Solution

On note $T_0 = T_c(t = 0)$ la température de la source chaude au moment où la pompe à chaleur est mise en fonctionnement.

🏠 📄 Montrer que $T_c(t)$ vérifie l'équation :

$$\underbrace{\frac{T_c}{T_0} - 1 - \frac{T_{\text{fus}}}{T_0} \ln\left(\frac{T_c}{T_0}\right)}_{= y} = \frac{\mathcal{P}}{CT_0} \times t$$

🏠 📄 Expliquer en quoi, il est justifié de poser $\tau = \frac{CT_0}{\mathcal{P}}$ en attribuant à τ le statut de durée caractéristique de l'évolution de $T_c(t)$.

III) Expériences

Lors de vos activités expérimentales dans ce TP, vous devrez systématiquement :

- Élaborer un protocole et m'appeler pour que je le valide.
- Mettre en œuvre ce protocole. M'appeler en cas de besoin.
- 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.

🔧 📄 Prendre des initiatives afin de pouvoir confronter étude théorique et observation expérimentale du fonctionnement de la pompe à chaleur. Analyser les résultats obtenus. Discuter.