

TP 4C – Etude d'une pompe à chaleur (PAC)

D'après CCS TSI 2016

Introduction :

Dans le cadre du développement durable, la pompe à chaleur (PAC) est une machine thermique particulièrement intéressante en raison de son efficacité supérieure à un. Elle permet ainsi de diviser la consommation énergétique par ce même coefficient.

Une PAC est une machine thermique comportant deux sources de chaleur (froide et chaude) entre lesquelles un fluide caloporteur subit des cycles de transformation. Le fluide utilisé dans les PAC étudiées est soit le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane $C_2H_2F_4$ (référéncé R134a), soit le dichlorodifluorométhane CCl_2F_2 (référéncé R12).

Objectif et cadre de l'étude :

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 température de la source chaude va augmenter au cours du temps et celle de la source froide va diminuer. Malgré cela et compte tenu du nombre de cycles effectués par le fluide pendant la durée de l'expérience, on considérera des transformations cycliques de durées infinitésimales au cours desquelles on supposera que le régime est stationnaire.

Problématique :

Comment étudier expérimentalement le fonctionnement d'une PAC avec deux pseudo-sources ?

Compétences expérimentales au programme :

Thermodynamique Mesurer une pression. Mesurer une température.	Mettre en œuvre un capteur, en distinguant son caractère différentiel ou absolu. Mettre en œuvre un capteur de température.
Machines thermiques	Mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme.

Rotation TP4 :

	01-oct	08-oct	15-oct
Laura - Romain - Antony	C	B	A
Albin - Aubin - Nolann	C	B	A
Loane - Roman - Raphaël A.	B	A	C
Nathan - Max - Salahaddin	A	C	B
Eglantine - Nolan - Raphaël B.	A	C	B

A faire pour la séance de TP :

- Lire entièrement le sujet et répondre aux questions ✍.

NB : On note θ les températures exprimées en $^{\circ}C$ et T celles exprimées en K .

1) Description du dispositif expérimental

a) Organes traversés par le fluide :

Le dispositif comprend les différents organes mentionnés figure 2.

Le fluide R134a ou R12 est contenu dans un tuyau de cuivre parfaitement fermé.

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. Sous forme gazeuse à la sortie du compresseur (point 2), il subit une liquéfaction au niveau du condenseur : le tuyau de cuivre prend la forme d'un serpentin plongé dans le seau de droite contenant de l'eau. Le fluide perd de l'énergie au profit de la source chaude, ce transfert thermique est noté $Q_c < 0$. Le liquide subit ensuite une détente au niveau du détendeur (évolution de 4 à 5). Sa température devient alors inférieure à celle de la source froide. Au niveau de l'évaporateur (seau de gauche contenant de l'eau), le fluide se réchauffe et se vaporise en recevant de l'énergie de cette source, ce transfert thermique est noté $Q_F > 0$. En régime stationnaire, le fluide retourne dans le compresseur dans le même état (point 1) pour suivre un nouveau cycle.

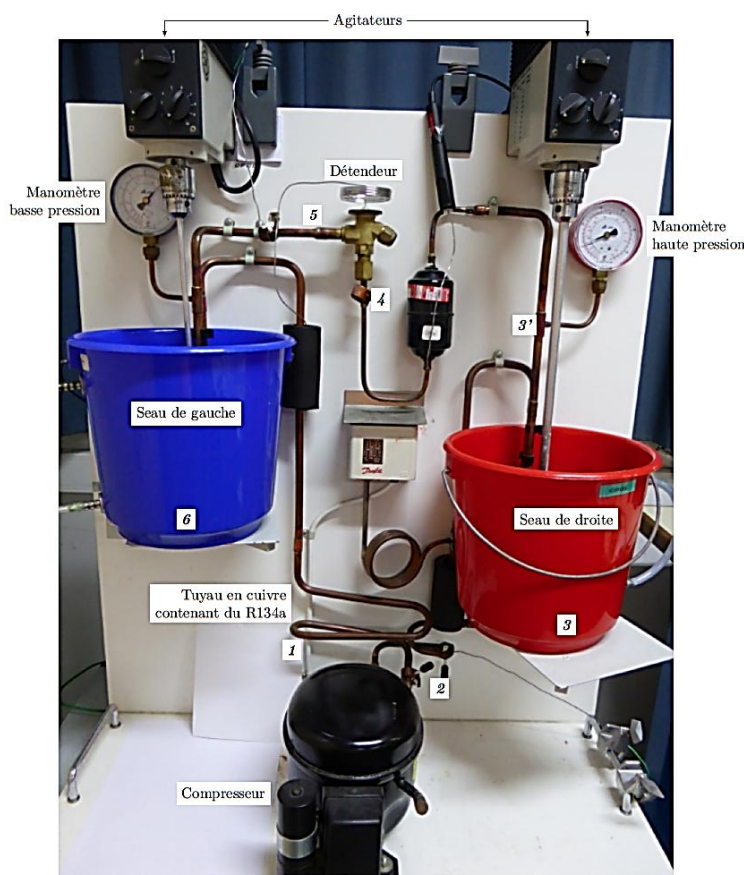


Figure 2 Vue d'ensemble de la pompe à chaleur

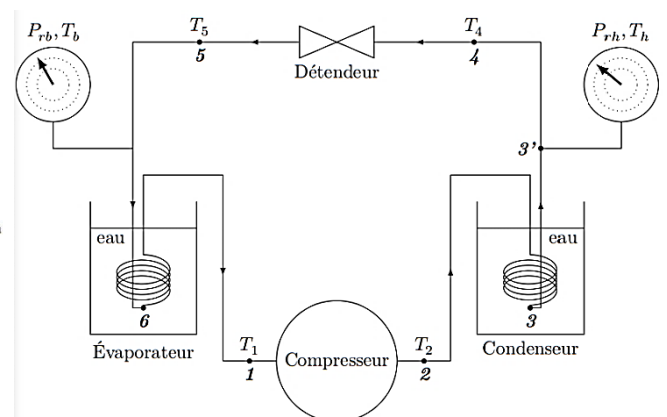
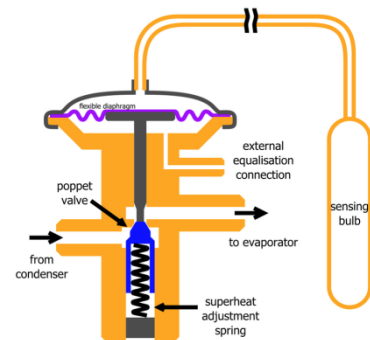


Figure 5 Schéma d'ensemble de la pompe à chaleur



Détendeur : Vanne de détente à régulation thermostatique

Rq : Le dispositif comprend également

- Un épurateur-collecteur (il assure une arrivée de liquide sans bulles de gaz à l'entrée du détendeur 4). Il peut être considéré comme neutre sur le plan du bilan énergétique.
- Un manostat qui régule le fonctionnement du compresseur afin d'éviter tout phénomène de surpression.

Cf <https://www.leybold-shop.fr/physique/equipement/chaleur/chaleur-et-travail/pompe-a-chaleur/pompe-a-chaleur-389521.html>

b) Instruments de mesure :

♦ On dispose de deux manomètres (basse pression et haute pression) permettant une mesure de **pression relative** (P_{rb} et P_{rh}) ; **pour obtenir la pression absolue on doit ajouter 1 bar**. Ces manomètres présentent une double graduation pression relative et température (cf figure 3). Elles sont basées sur le fait que si la pression est fixée alors, pour un corps pur en équilibre liquide-vapeur, la température est fixée.

Rq : Les manomètres sont construits pour être montés sur des PAC utilisant plusieurs fluides. Pour chaque fluide, il y a une échelle de température. On peut retrouver parmi elles, l'échelle du R134a / R12.



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

♦ Les températures des sources chaude et froide sont mesurées automatiquement à intervalle régulier (toutes les 60 s) par des sondes que l'on place au milieu des seaux. Leur acquisition par l'ordinateur va utiliser le logiciel Cassy Lab : télécharger fichier « TP4C_PAC_cassy sans énergie » sur Cahier de Prépa. A la fin de l'acquisition, enregistrer le fichier avant de copier-coller et d'exploiter les mesures sous Excel (ou Latis Pro).

On dispose aussi d'une double sonde pour mesurer la température du fluide R134a / R12.

♦ Par ailleurs, l'énergie électrique consommée par le compresseur en fonction du temps sera mesurée par un contrôleur numérique « cost-control » (cf figure 4) qui possède notamment la fonction joulemètre (remise à zéro nécessaire au début de l'expérience).



Figure 4

Le fluide utilisé dans cette pompe à chaleur décrit le cycle 1 – 2 – 3 – 5 – 1. Afin de suivre son évolution, il est intéressant de se reporter à son diagramme des frigoristes fournissant $\ln p = f(h)$.

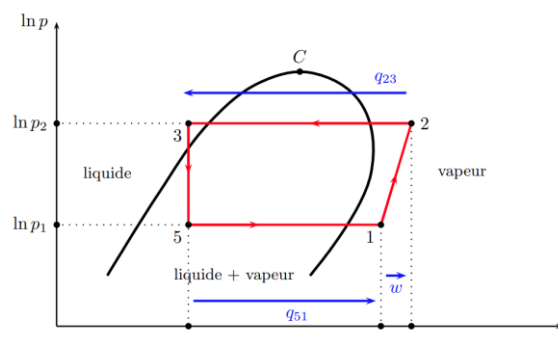


FIGURE 6 – Modèle du cycle du fluide circulant dans la pompe à chaleur

2) Manipulations

a) Préparation du dispositif

✎ Vérifier que la PAC est bien débranchée.

Les sources chaude et froide correspondent au même volume d'eau : $V = 4,5 \text{ L}$.

✎ Remplir **alternativement** les seaux à l'aide des éprouvettes graduées de 1 L (1 L dans le seau bleu puis 1 L dans le seau rouge, puis 1 L dans le seau bleu puis 1 L dans le seau rouge...) de sorte qu'à l'instant initial, les températures des deux sources soient égales.

✎ Placer les agitateurs au milieu des serpentins des échangeurs thermiques puis les mettre en marche.

✎ On vérifiera que les deux sondes indiquent la même température dans les deux sources, sans quoi, on ajoutera un offset à l'une d'elles.

✎ Faire une remise à zéro du boîtier cost-control en appuyant simultanément sur « power » et « cost » quelques secondes.

b) Mesures à effectuer - Etude n°1

On va étudier la PAC pour une montée en température de $+10^\circ\text{C}$ pour la source chaude.

✎ Après validation,

- relever la température initiale des sources
- connecter la prise du compresseur au boîtier cost-control 🌑 Ne pas relier directement le compresseur au secteur !
- lancer l'acquisition des températures θ_C et θ_F : période d'échantillonnage = 60 s
- relever l'énergie électrique E_e consommée toutes les minutes

✎ Une fois que la température de la source chaude a augmenté de $+10^\circ\text{C}$ (au bout d'environ 11 min) :

- attendre une dernière acquisition des températures
- relever une dernière fois l'énergie consommée (proche de 20 Wh)
- laisser la PAC branchée et appeler le professeur avant d'enchaîner avec l'étude n°2.

c) Mesures à effectuer - Etude n°2

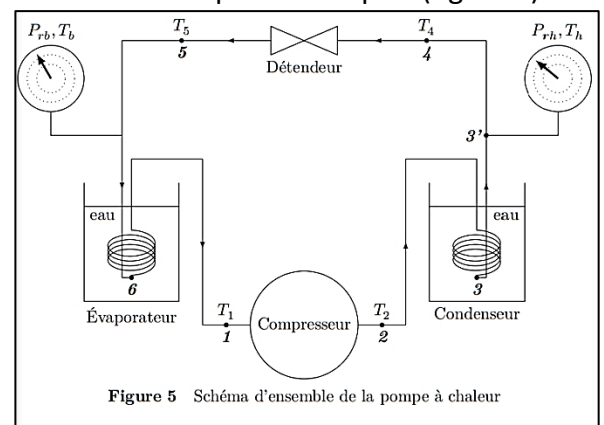
On relève une série de températures en différents points de la PAC. Ce ne seront pas exactement les températures du R134a/R12 car on ne peut pas introduire de capteurs à l'intérieur du circuit. Vous mettrez les sondes de température en contact avec les tuyaux en cuivre aux différents points indiqués (figure 5).

✎ Relever, tant que faire se peut, **simultanément** :

- La pression P_{rb} côté évaporateur sur le manomètre correspondant ;
- La pression P_{rh} côté condenseur sur le manomètre correspondant ;
- Les températures θ_1 à l'entrée du compresseur (point 1) et θ_4 à l'entrée du détendeur (point 4) avec les deux sondes de température connectées au même boîtier ;
- La température θ_C de la source chaude et la température θ_F de la source froide avec les sondes de température reliées à la carte d'acquisition.

✎ Relever également sur les manomètres, les températures du point de rosée de R134a/R12 correspondant à P_{rb} et à P_{rh} .

✎ Couper l'alimentation du compresseur, arrêter l'acquisition et enregistrer le fichier puis extraire les échangeurs des seaux d'eau (laisser les serpentins s'égoutter dans les seaux avant de vider les seaux).



3) Exploitation des mesures

a) Exploitation de l'étude n°1

♦ Évolution de la température en fonction du temps

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

♦ Calcul de l'efficacité réelle e

On se propose de calculer l'efficacité réelle pour chaque intervalle de temps $\Delta t = 1 \text{ min}$.

✎ ➡ 2. Montrer que la chaleur $-Q_C$ fournie par R134a/R12 à la source chaude pendant Δt peut s'écrire :

$$-Q_C = m \cdot c_{eau} \cdot \Delta T_C$$

avec m la masse d'eau correspondant à la source chaude et $c_{eau} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Ainsi, la puissance thermique fournie par R134a/R12 à la source chaude vaut :

$$\mathcal{P}_{th,c} = m \cdot c_{eau} \cdot \frac{\Delta T_C}{\Delta t}$$

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

$$\mathcal{P}_e = \frac{\Delta E_e}{\Delta t}$$

L'efficacité réelle est donc le rapport :

$$e = \frac{\mathcal{P}_{th,c}}{\mathcal{P}_e}$$

✎ Créer les variables convenables sous Excel ou autre tableur.

♦ Évolution de l'efficacité e en fonction des températures

➡ 3. Tracer la courbe $e = f(\theta_C - \theta_F)$. Commenter.

♦ Comparaison de l'efficacité réelle e avec l'efficacité idéale e_{max}

✎ ➡ 4. Rappeler l'expression de l'efficacité d'une PAC de Carnot.

✎ Calculer e_{max} pour chaque intervalle de temps $\Delta t = 1 \text{ min}$ sous Excel ou Latis Pro.

➡ 5. Tracer la courbe correspondante, en la superposant à la courbe $e = f(\theta_C - \theta_F)$. Commenter.

♦ Modèle des pseudo-sources

✎ ➡ 6. On veut montrer que la courbe $\sqrt{T_C \cdot T_F} = f(t)$ est proche d'une constante. Pour cela, appliquer le second principe au fluide R134a/R12 pour un cycle infinitésimal supposé réversible, utiliser l'expression des transferts thermiques reçus par le fluide au niveau des pseudo-sources : $\delta Q_C = -m \cdot c_{eau} \cdot dT_C$ établie à la question 2 et une expression similaire pour δQ_F .

✎ Tracer $\sqrt{T_C \cdot T_F} = f(t)$. Commenter.

b) Exploitation de l'étude n°2

♦ Tracé et exploitation du cycle sur le diagramme des frigoristes

➡ 7. A l'aide des mesures réalisées au § 3.c et d'approximations légitimes concernant les transformations ayant lieu au niveau du compresseur et du détendeur, placer sur le diagramme fourni p.9 ou 10, les points correspondants aux états 1, 2, 4 et 5 de R134a/R12.

Point 1 :

➡ 8. Relever l'enthalpie massique h_1 du gaz.

Point 2 :

➡ 9. Relever la température θ_2 et l'enthalpie massique h_2 correspondant au point 2. Comparer à la température du point de rosée de R134a/R12 correspondant à P_{rh} . Commenter.

Point 4 :

➡ 10. Relever l'enthalpie massique h_4 du liquide avant la détente.

➡ 11. Comparer θ_4 à θ_C .

Point 5 :

➡ 12. Relever la fraction massique x de vapeur qui s'est formée au cours de la détente.

➡ 13. Relever sur le diagramme la température θ_5 à laquelle se déroule la vaporisation. Comparer à la température du point de rosée de R134a/R12 correspondant à P_{rb} .

➡ 14. Comparer, respectivement, les températures des points de rosée lues sur les manomètres avec les températures θ_C et θ_F . Commenter.

♦ Étude de l'efficacité

➡ 15. Pour les valeurs relevées, calculer :

- L'efficacité maximale d'une pompe à chaleur réversible fonctionnant entre deux sources aux températures θ_C et θ_F des deux réservoirs d'eau.

- Déterminer le travail massique reçu par le fluide au niveau du compresseur et le transfert thermique fourni par le fluide à la source chaude au niveau du condenseur.

En déduire la valeur théorique de l'efficacité de la PAC. Commenter.

