

## TP 4C – Etude d'une pompe à chaleur (PAC) & Refroidissement de cylindres

### Problématiques :

- Comment étudier expérimentalement le fonctionnement d'une PAC avec deux pseudo-sources ?
- Comment comparer quantitativement les transferts conducto-convectif naturel et forcé ?

### Compétences expérimentales au programme :

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

### Rotation TP4 :

|                       | 02-oct | 09-oct | 16-oct |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| Térence - Charles     | A      | B      | C      |
| Bastien - Lubin       | A      | B      | C      |
| Salahaddin - Baptiste | A      | B      | C      |
| Alexis - Ethan        | A      | B      | C      |
| Mathilde - Laura      | B      | C      | A      |
| Mathis - Adrien       | B      | C      | A      |
| Jules - Quentin       | B      | C      | A      |
| Zinedine - Laila      | C      | A      | B      |
| Pauline - Nolann      | C      | A      | B      |
| Noah - Robin          | C      | A      | B      |

### A faire pour la séance de TP :

- Lire entièrement le sujet et répondre aux questions ✍.

### Organisation de la séance :

|                   | Gpes i et i'                                        | Gpes j et j'                                        |
|-------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 14h-15h / 16h-17h | 1 <sup>e</sup> partie. PAC                          | 2 <sup>e</sup> partie. Transfert conducto-convectif |
| 15h-16h / 17h-18h | 2 <sup>e</sup> partie. Transfert conducto-convectif | 1 <sup>e</sup> partie. PAC                          |

## 1<sup>e</sup> partie : Etude expérimentale d'une 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.

**NB :** On note  $\theta$  les températures exprimées en °C et T celles exprimées en Kelvin.

# 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.

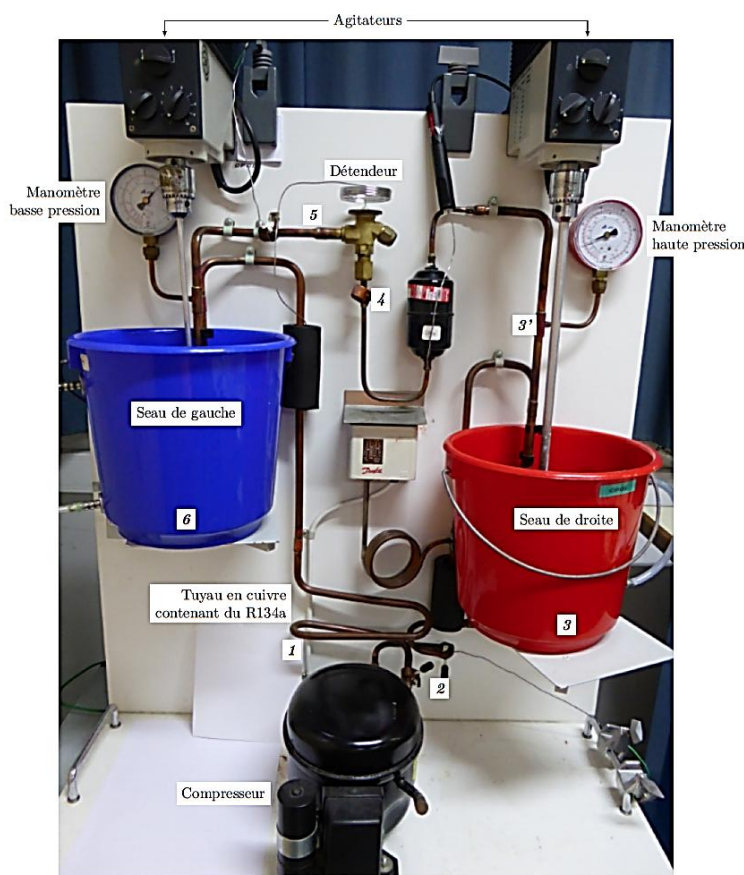


Figure 2 Vue d'ensemble de la pompe à chaleur

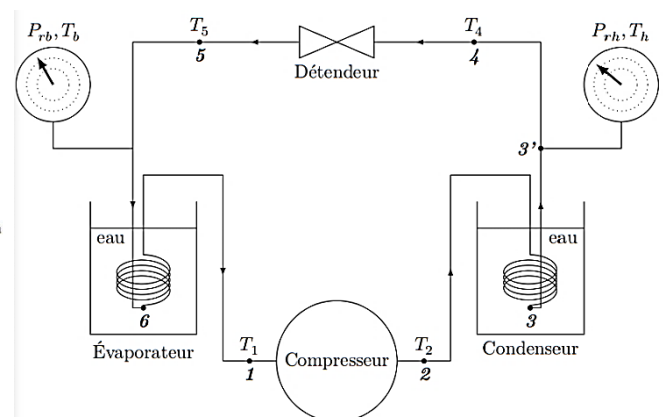
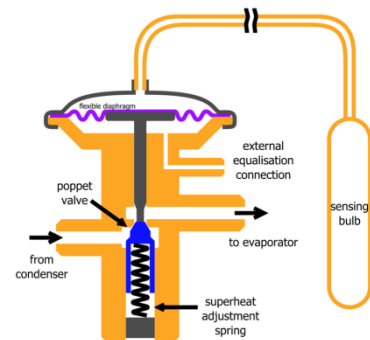


Figure 5 Schéma d'ensemble de la pompe à chaleur



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 avec 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 la carte d'acquisition Cassy.

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  $\ln p = f(h)$ .

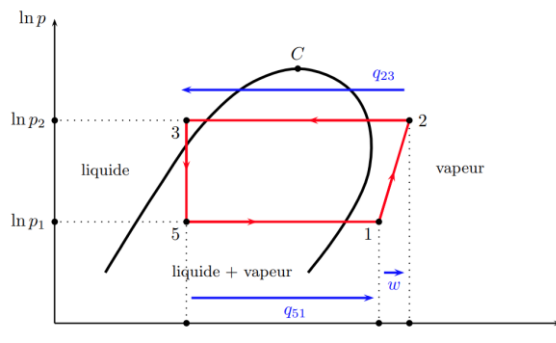


FIGURE 6 – Modèle du cycle du fluide circulant dans la pompe à chaleur

## 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.

### 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 à la boîte d'alimentation Leybold ⚡ Ne pas relier directement le compresseur au secteur !
- lancer l'acquisition des températures  $\theta_c$  et  $\theta_f$  et de l'énergie électrique  $E_e$  : période d'échantillonnage = 60 s

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

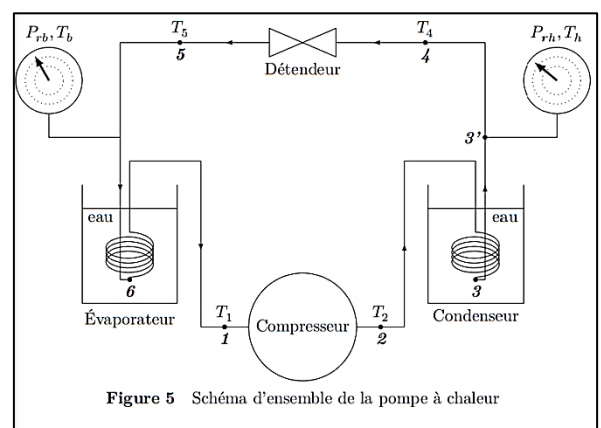
- attendre une dernière acquisition des températures et de l'énergie consommée
- laisser la PAC branchée et appeler le professeur avant d'enchaîner avec l'étude n°2.

### 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  $\theta_1$  à l'entrée du compresseur (point 1) et  $\theta_4$  à l'entrée du détendeur (point 4) avec les deux sondes de température connectées au même boîtier ;
- La température  $\theta_c$  de la source chaude et la température  $\theta_f$  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  $\Delta t = 1$  min.

✎ ➡ 2. Montrer que la chaleur -  $Q_C$  fournie par R134a/R12 à la source chaude pendant  $\Delta t$  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 Latis Pro.

##### ♦ 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  $\Delta t = 1$  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  $\delta Q_F$ .

✎ 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  $\theta_2$  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  $\theta_4$  à  $\theta_C$ .

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  $\theta_5$  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  $\theta_C$  et  $\theta_F$ . 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  $\theta_C$  et  $\theta_F$  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.

## 2<sup>e</sup> partie : Refroidissement de cylindres par transfert conducto-convectif

### Objectif :

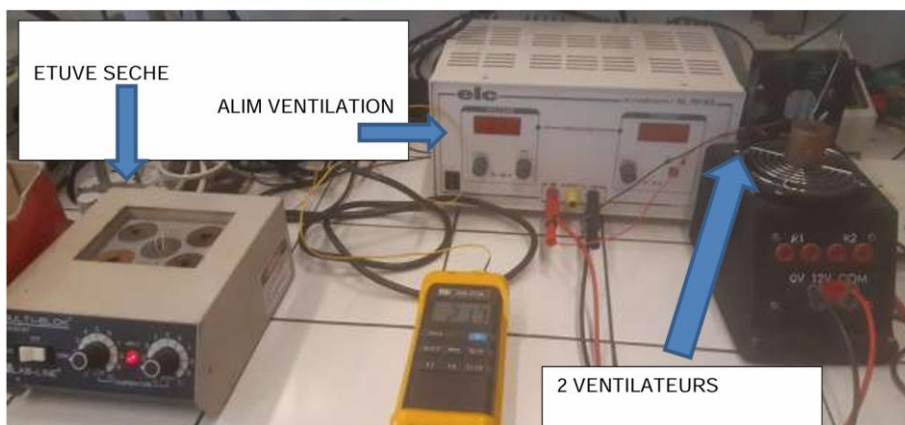
On s'intéresse au refroidissement d'un cylindre de cuivre, de hauteur  $L$ , de diamètre  $d$ , chauffée initialement dans une étuve sèche. On cherche à mesurer le coefficient de transfert conducto-convectif  $h$  entre le cylindre et l'air, qui intervient dans la loi de Newton.

On donne pour le cuivre :  $\lambda = 380 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  (conductivité thermique),  $c = 385 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$  (capacité thermique massique) et  $\rho = 8960 \text{ kg.m}^{-3}$  (masse volumique).

### 1) Description du dispositif et du protocole expérimentaux

Deux cylindres de cuivre identiques sont à disposition dans l'étuve sèche, à une température d'environ  $80^\circ\text{C}$  : **🔥\* il faudra donc utiliser les pinces fournies pour manipuler les cylindres (risque de brûlures).**

On sort le cylindre de cuivre de l'étuve et on le place sur la paillasse ou sur le système de ventilation alimenté par l'alimentation stabilisée ( $U = 12 \text{ V}$ ,  $I = 0,4 \text{ A}$ ). Un trou percé dans le cylindre permet d'insérer une sonde de température reliée à la carte d'acquisition pour relever la courbe  $T = f(t)$  sous Latis Pro. On note  $T_i$  température initiale du cylindre et  $T_\infty$  la température de l'air ambiant.



### 2) Etude théorique

On note  $V$  le volume du cylindre et  $S$  la surface d'échange. On admet que l'on peut utiliser l'approximation de la température uniforme au sein du cylindre si le nombre de Biot  $Bi = \frac{hL_c}{\lambda} < 0,1$  avec  $L_c$  une longueur caractéristique du cylindre.

✎ ➡ 16. Justifier que le nombre de Biot est adimensionné.

➡ 17. Justifier que dans la situation étudiée on peut considérer que  $T(M,t) = T(t)$ . On prendra  $h = 20 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$  (ordre de grandeur qui devra être discuté en fonction des résultats expérimentaux obtenus).

✎ ➡ 18. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par  $T(t)$ . Introduire une constante de temps  $\tau$  caractéristique de l'évolution temporelle de la température. Résoudre cette équation différentielle.

### **3) Etude expérimentale**

Les groupes i et j s'intéresseront au refroidissement d'un cylindre sans ventilation (convection naturelle).  
Les groupes i' et j' s'intéresseront au refroidissement d'un cylindre avec ventilation (convection forcée).

✎ Mesurer et noter la température  $T_\infty$  de l'air ambiant.

✎ Paramétrer Latis Pro pour relever la température  $T$  chaque seconde pendant 30 min.

✎ Mettre en œuvre le protocole décrit dans § 1 puis replacer les cylindres dans l'étuve pour que les groupes suivants aient des cylindres à la température  $T_i \approx 80^\circ\text{C}$ .

➡ 19. Exploiter les résultats expérimentaux pour en déduire une valeur de la constante de temps  $\tau$  puis du coefficient de transfert conducto-convectif  $h$  entre le cylindre et l'air.

➡ 20. Confronter vos résultats à ceux obtenus par l'autre groupe pour comparer convections naturelle et forcée.



