

## Physique - Devoir Maison 10

10/06/2025

Ce sujet comporte 7 pages et doit être traité en intégralité. Ce DM peut être traité, au choix, seul ou en binôme. Si vous le traitez seul, essayez de ne pas recopier sur quelqu'un d'autre, afin que la correction soit pertinente !

Si vous avez des questions, n'hésitez pas à les poser par mail.

**Le lundi 9 juin étant férié, je vous invite à me rendre le DM le mardi 10 juin, idéalement à 8h ou 10h au plus tard, afin que je puisse le corriger pour le jeudi 12 juin.**

## I Pompe à Chaleur

Le réchauffement climatique s'est imposé comme un défi majeur pour notre société. Dans le cadre du développement durable, la pompe à chaleur 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. La détermination de cette efficacité est l'objet principal de cette étude.

Si le principe de la pompe à chaleur est ancien (Thomson 1852), sa commercialisation a débuté dans les années 1950 aux États-Unis et se développa comme moyen de chauffage dans les années 1970 en France.

Une pompe à chaleur est une machine thermique comportant deux sources de chaleur (froide et chaude) entre lesquelles un fluide caloporteur subit des cycles de transformation. Afin de protéger la couche d'ozone, les fluides caloporteurs contenant du chlore (appelés CFC : chloro-fluoro-carbone) ont été interdits au niveau international par le protocole de Montreal en 1985. Le fluide utilisé dans la pompe à chaleur du laboratoire est le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane  $C_2H_2F_4$  (fluide HFC référencé R134a) est sans effet destructeur pour la couche d'ozone. Notons que ce fluide, très utilisé dans l'industrie, présente toutefois un impact non négligeable sur l'effet de serre.

Le dispositif comprend les différents organes mentionnés dans la figure I.1. Le fluide R134a est contenu dans un tuyau de cuivre parfaitement fermé. 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 liquide subit ensuite une détente au niveau du détendeur (évolution de **4** à **5**) avant de se vaporiser complètement au niveau de l'évaporateur : le tuyau de cuivre prend la forme d'un serpentin plongé dans le seau de gauche contenant de l'eau. Il retourne à nouveau dans le compresseur (point **1**) pour suivre un nouveau cycle.

On dispose de deux manomètres (basse pression  $P_b$  et haute pression  $P_h$ ) permettant une mesure de pression.

On utilise un système d'expérimentation assistée par ordinateur afin de suivre l'évolution des températures  $T_i$  aux différents points et de la puissance  $\mathcal{P}$  consommée par le compresseur.

On peut schématiser le fonctionnement de la pompe à chaleur sur le schéma d'ensemble donné figure I.2.

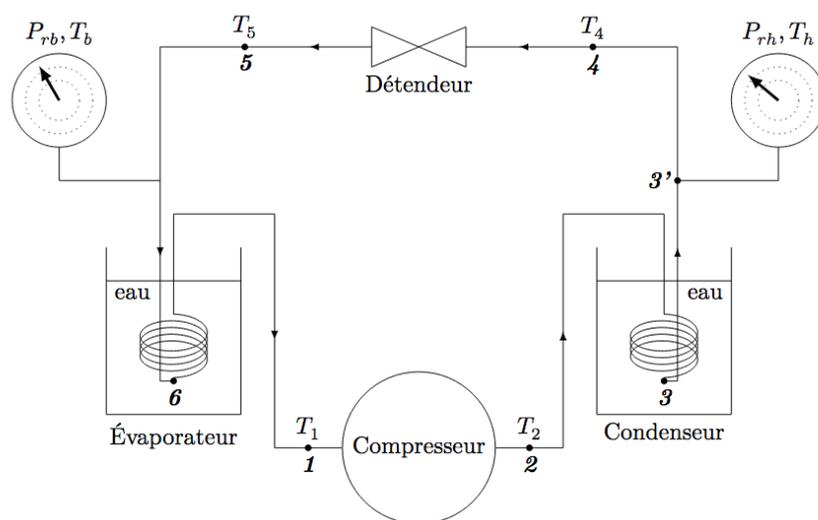


FIGURE I.2 – Schéma de principe de la pompe à chaleur.

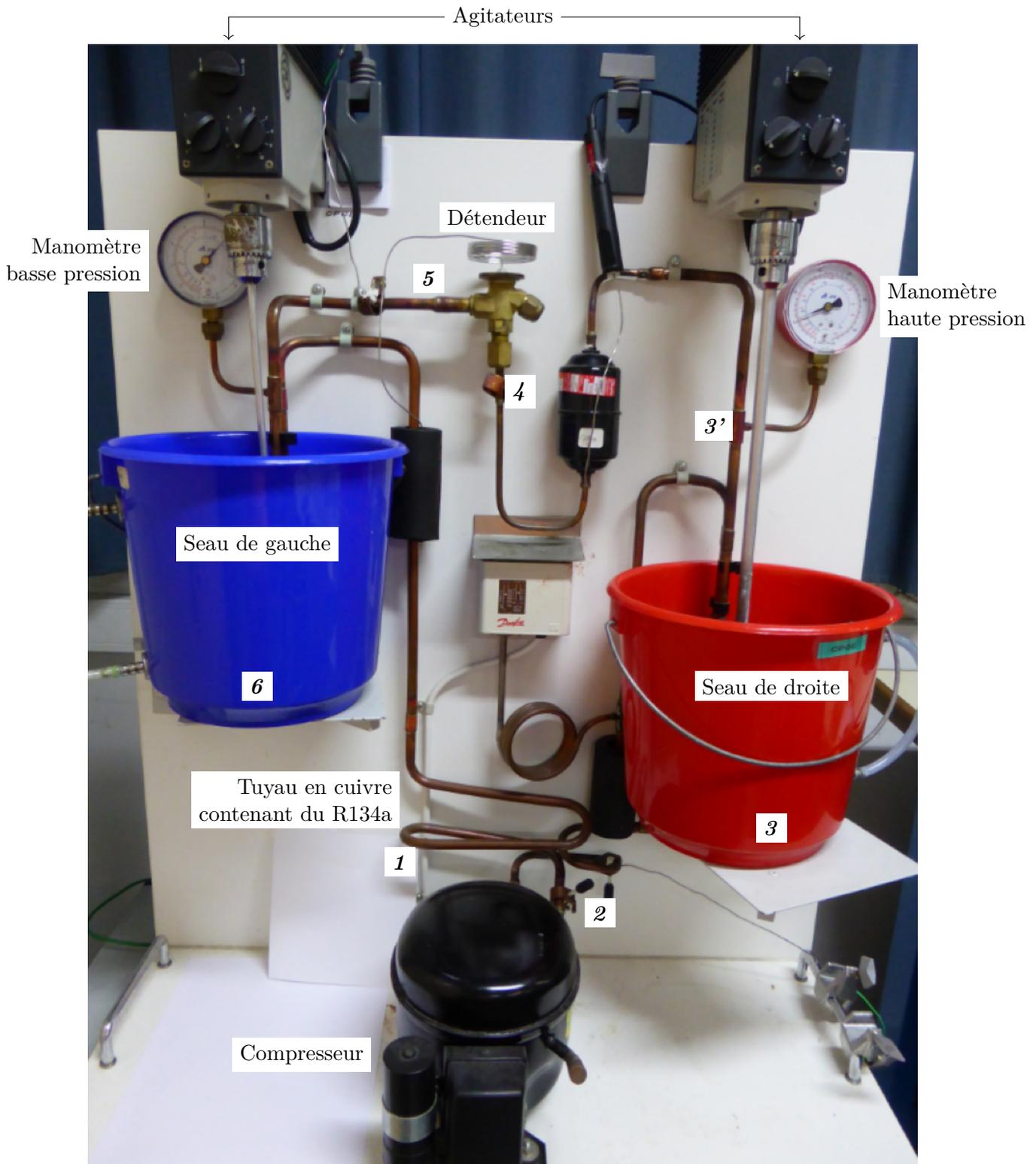


FIGURE I.1 – Vue d'ensemble de la pompe à chaleur

## I.A Modèle de Carnot

Dans cette partie, on modélise la pompe à chaleur par une machine cyclique réversible ditherme de Carnot : au cours d'un cycle le fluide R134a reçoit le transfert thermique  $Q_f$  de la part de la source froide (à la température  $T_f$ ), le transfert thermique  $Q_c$  de la part de la source chaude (à la température  $T_c$ ) et le travail  $W$  de la part du compresseur. On suppose que toutes les évolutions sont réversibles.

1. Appliquer le premier principe au fluide R134a sur un cycle. L'écriture obtenue dépend-elle du caractère réversible des évolutions ? Faire de même pour le second principe.
2. Donner, en le justifiant, le signe des grandeurs  $Q_f$ ,  $Q_c$  et  $W$ . Comparer ensuite  $|Q_f|$  et  $|Q_c|$ . Commenter.
3. *La pompe à chaleur est utilisée ici comme un réfrigérateur.*  
Définir l'efficacité  $\eta_{fc}$  de cette machine et l'exprimer en fonction des températures des sources. Réaliser ensuite l'application numérique avec  $\theta_c = 26 \text{ °C}$  et  $\theta_f = 0 \text{ °C}$ .
4. *La pompe à chaleur est utilisée ici comme un dispositif de chauffage.*  
Définir l'efficacité  $\eta_{cc}$  de cette machine et l'exprimer en fonction des températures des sources. Réaliser ensuite l'application numérique avec  $\theta_c = 26 \text{ °C}$  et  $\theta_f = 0 \text{ °C}$ .

## I.B Modèle des pseudo-sources (facultatif)

Dans cette partie, on considère que les températures des sources, constituées des masses d'eau  $m_e$  contenues dans les seaux en plastique, varient au cours de l'expérience. On suppose également que toutes les évolutions sont réversibles. À la date  $t = 0$ , on met en marche la pompe à chaleur alors que les deux seaux contiennent chacun  $m_e = 4 \text{ kg}$  d'eau à la même température  $T_0$ . On note  $c_e$  la capacité thermique massique de l'eau.

5. Exprimer le transfert thermique élémentaire  $\delta Q_f$  reçu par le fluide de la part de la source froide en fonction de  $m_e$ ,  $c_e$  et  $dT_f$ , où  $dT_f$  est la variation élémentaire de température de la source froide lors de la durée  $dt$ .
6. De même, exprimer le transfert thermique élémentaire  $\delta Q_c$  reçu par le fluide de la part de la source chaude en fonction de  $m_e$ ,  $c_e$  et  $dT_c$ , où  $dT_c$  est la variation élémentaire de température de la source chaude.

On admet que dans le cas d'une évolution cyclique réversible infinitésimale, les principes de la thermodynamique appliqué au fluide R134a s'écrivent

$$0 = \delta Q_c + \delta Q_f + \delta W \quad \text{et} \quad 0 = \frac{\delta Q_c}{T_c} + \frac{\delta Q_f}{T_f} \quad (\text{I.1})$$

avec les températures des sources froides et chaudes qui peuvent alors évoluer au cours du temps.

7. En déduire une relation entre  $T_f$ ,  $dT_f$ ,  $T_c$  et  $dT_c$

Lors de l'expérience, on obtient les tracés de la figure I.3 avec  $\theta_0 = 17 \text{ °C}$ , où  $\theta_0$  représente la température initiale commune des deux seaux.

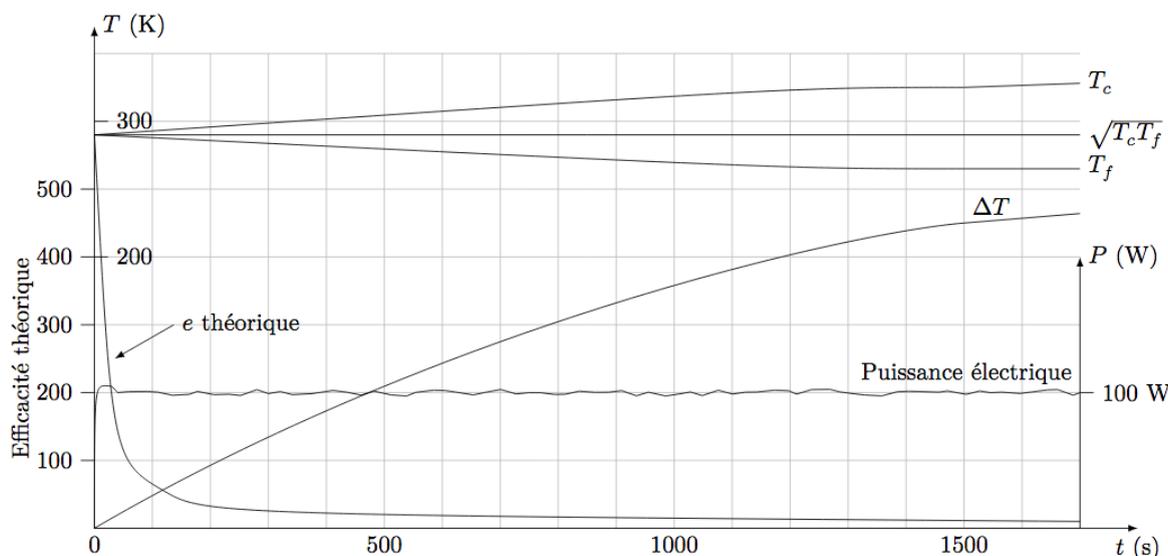


FIGURE I.3 – Courbes expérimentales

8. Commenter l'allure des trois courbes du haut donnant les variations de  $T_c(t)$ ,  $T_f(t)$  et  $\sqrt{T_c(t)T_f(t)}$ . On justifiera avec rigueur l'allure de cette dernière courbe à l'aide d'un calcul.
9. Expliquer alors pourquoi la température  $T_f$  semble atteindre un plateau lorsque  $t \geq 1500$  s.

Dans la suite, on se place à  $t < 1500$  s.

On définit une efficacité théorique par :  $\eta_t = \left| \frac{\delta Q_c}{\delta W} \right|$  où  $\delta W$  est le travail reçu par le fluide de la part du compresseur au cours d'un cycle infinitésimal.

10. Exprimer  $\eta_t$  à l'aide de  $T_c$  et  $T_f$  uniquement.
11. En notant  $\Delta T = T_c - T_f$ , montrer que l'efficacité théorique  $\eta_t$  de la pompe à chaleur à chaleur s'écrit

$$\eta_t = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{T_0}{\Delta T}\right)^2}$$

Commenter ensuite cette expression. La courbe nommée  $e$  théorique (figure I.3) est-elle en accord avec cette expression ?

## I.C Étude thermodynamique de l'écoulement stationnaire

### I.C.1 Écoulements stationnaires à travers les différents composants

Dans cette partie, on considère cette fois que le fluide est en écoulement stationnaire à travers les différentes machines qui composent la pompe à chaleur (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur, tuyau). De plus, on réalise un écoulement d'eau dans le seau de droite (figure I.4) : de l'eau arrive d'un robinet et s'évacue ensuite dans un évier.



FIGURE I.4 – Pompe à chaleur avec dispositif de refroidissement

Au bout d'une vingtaine de minutes, la température de l'eau du seau de droite (notée  $\theta_3$ ) est constante. Il en va de même pour celle du seau de gauche. Les températures et pressions se stabilisent alors dans l'ensemble du dispositif. Le régime permanent atteint, on effectue alors les mesures de température  $\theta_i$  et de pression  $P_i$  reportées dans le tableau 1.

En régime permanent d'écoulement, le fluide R134a subit les transformations suivantes (on peut se reporter à la figure I.2)

- $1 \rightarrow 2$  : le fluide à l'état gazeux sous la pression  $P_b$  est comprimé dans un compresseur à piston. Il ressort à la pression  $P_h$ . On considère que cette compression est adiabatique ;

	1	2	3	3'	4	5	6
$P$ (bar)	2,9	6,8	6,8	6,8	6,8	2,9	2,9
$\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	12	44	26	26	19	0	0
$T$ (K)	285	317	299	299	292	273	273

TABLE 1 – Grandeurs thermodynamiques en régime permanent

- $2 \rightarrow 3$  : le gaz se refroidit de façon isobare jusqu'au condenseur (seau de droite contenant une masse d'eau  $m_e$ ). On parle de désurchauffe. Au point  $3$  le gaz est assimilé à de la vapeur saturante sèche ;
- $3 \rightarrow 3'$  : le gaz se condense au contact thermique de l'eau du condenseur (seau de droite) jusqu'au liquide saturé ;
- $3' \rightarrow 4$  : dans le tuyau de cuivre, le liquide se refroidit de façon isobare jusqu'au détendeur. On parle de sous-refroidissement ;
- $4 \rightarrow 5$  : le liquide subit une détente dans le détendeur ; il commence à se vaporiser tandis que la température va diminuer ; la pression de sortie est  $P_b$  (manomètre de gauche). Cette détente peut être considérée comme adiabatique ;
- $5 \rightarrow 6$  : le fluide poursuit sa vaporisation à la pression  $P_h$  notamment dans le serpentin évaporateur baignant dans de l'eau (seau de gauche contenant une masse d'eau  $m_e$ ) ;
- $6 \rightarrow 1$  : dans le tuyau de cuivre, le gaz se réchauffe de façon isobare jusqu'à l'entrée du compresseur. On parle de surchauffe. Elle permet de s'assurer qu'aucune goutte de liquide ne pénètre dans le compresseur.

On obtient les résultats suivants : On considère une machine (M), présentant une entrée et une sortie, dans laquelle un fluide est en écoulement permanent unidimensionnel. Dans toute la suite du problème, on négligera les variations d'énergies cinétique et potentielle massiques devant les variations d'enthalpie massique.

#### Etude du détendeur :

12. Montrer que l'enthalpie massique se conserve au cours de la transformation ( $4 \rightarrow 5$ ) dans le détendeur.

On considère le diagramme enthalpique (ou diagramme des frigoristes) fourni à la fin du sujet. Sur ce diagramme, on peut identifier la courbe de saturation composée de la courbe d'ébullition (liquide saturé,  $x = 0$ , courbe de gauche) et de la courbe de rosée (vapeur saturante sèche,  $x = 1$ , courbe de droite). On peut également identifier les isotitres, les isothermes, les isentropiques et les isochores.

13. Lors du changement d'état  $A \rightarrow B$  d'un corps pur à la température  $T$ , quelle relation théorique a-t-on entre  $\Delta s_{AB}(T)$  et  $\Delta h_{AB}(T)$  ? Vérifier numériquement cette relation pour  $T = 299$  K.
14. Déterminer graphiquement la valeur de l'enthalpie massique de vaporisation  $l_v(273)$  du fluide R134a pour  $T = 273$  K.
15. On note  $c_e = 1,34$  kJ/kg/K, la capacité thermique (supposée constante) du fluide R314a. Démontrer alors la relation suivante

$$x_5 = c_e \frac{T_4 - T_5}{l_v(273)}$$

puis effectuez l'application numérique.

16. Obtenir ensuite la valeur de  $x_5$  à partir d'une lecture graphique et comparer au résultat obtenu à la question précédente.

#### Etude du compresseur :

17. Calculer le travail massique  $w_{12}$  reçu par le fluide de la part du compresseur à l'aide d'une lecture graphique.
18. Placer les points  $1$ ,  $2$ ,  $3$ ,  $3'$ ,  $4$ ,  $5$  et  $6$  sur le diagramme des frigoristes et tracer le cycle parcouru par le fluide.

#### Etude du condenseur :

19. Exprimer puis calculer le transfert thermique massique  $q_{33'}$  reçu par le fluide caloporteur lors de la phase de condensation  $3 \rightarrow 3'$

### I.C.2 Efficacité de la pompe à chaleur

Dans toute la suite du problème, on prendra comme valeur du débit massique en R134a :  $D_m = 2,12 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  et la pompe à chaleur est utilisée comme chauffage en hiver.

20. Donner le sens de tous les transferts énergétiques ; on s'aidera éventuellement pour cela d'un schéma.
21. Définir l'efficacité  $\eta_c$  de la pompe à chaleur sans tenir compte du rendement  $r$  du compresseur.
22. Faire l'application numérique et comparer-la à l'efficacité  $\eta_{cc}$  de Carnot.
23. Quel est l'intérêt de la désurchauffe ( $2 \rightarrow 3$ ) et de la surchauffe ( $6 \rightarrow 1$ ) ?
24. En pratique ,le wattmètre mesurant la puissance électrique consommée par le compresseur affiche une valeur moyenne  $\mathcal{P} = 60 \text{ W}$ . Déterminer le rendement  $r$  **du compresseur**. En déduire le rendement global de l'installation  $\eta_r$ .

