

Epreuve de Physique C - Thermodynamique

Durée 2 h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est autorisé.

AVERTISSEMENT

La **présentation**, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la **rédaction**, la **clarté et la précision** des raisonnements entreront pour une **part importante** dans l'**appréciation des copies**. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats de leurs calculs.

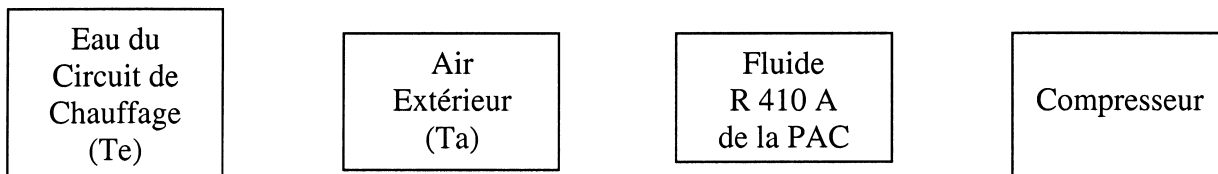
L'épuisement progressif des réserves de pétrole et de gaz, le coût du chauffage électrique, amènent à envisager des solutions de chauffage, qui, dans certains cas, s'avèrent plus économiques, entre autres les PAC (pompes à chaleur). On préconise néanmoins de les utiliser « en relèvement de chaudière » car nous allons voir qu'en-dessous d'une certaine température extérieure, le COP (coefficient optimal de performance ou efficacité) de la PAC chute fortement et la chaudière doit alors prendre le relais.

Nous allons étudier les caractéristiques d'une PAC air/eau qui extrait un transfert thermique de l'air extérieur et en fournit à l'eau du circuit de chauffage (il existe aussi des PAC air/air et eau/eau).

La PAC contient un fluide en écoulement permanent qui est amené à subir des changements d'état (liquéfaction ou vaporisation). Le fluide échange de la chaleur avec les deux sources en traversant des échangeurs appelés condenseur ou évaporateur, selon la source avec laquelle s'effectue l'échange.

I. COP D'UNE POMPE A CHALEUR (20% des points)

1/ Sur UN schéma de principe, identifier les différents transferts énergétiques à l'œuvre dans une PAC, entre les différents éléments ci-dessous et les représenter au moyen d'une flèche ; identifier, en le justifiant, la source chaude et la source froide.



2/ Redémontrer l'inégalité de Clausius en appelant T_1 la température de la source chaude et T_2 la température de la source froide.

3/ On considère une PAC idéale ; rappeler ce qu'on entend par « idéale » et déterminer l'expression du coefficient de performance ou COP . Comment serait modifié le COP pour une PAC réelle ? Pourquoi ?

4/ D'après vous, le COP augmente-t-il ou diminue-t-il avec la différence des températures intérieure et extérieure de l'habitation ? Pourquoi ?

5/ Doit-on placer le condenseur au contact de la source froide ou de la source chaude ? Pourquoi ?

6/ Enfin a-t-on intérêt à rechercher un COP le plus élevé possible ou le plus faible possible ? Sur quels paramètres peut-on jouer pour modifier le COP ?

7/ Les PAC air/eau ont un meilleur COP que les PAC air/air. Pouvez-vous fournir une explication ?

II. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT (33% des points)

La PAC réchauffe l'eau du circuit de chauffage d'une habitation afin de maintenir sa température à 20°C , en lui fournissant une puissance thermique de 8 kW. L'eau du circuit de chauffage pénètre dans l'échangeur à 30°C et en ressort à 35°C . On rappelle la valeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide : $c = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \text{K}^{-1}$.

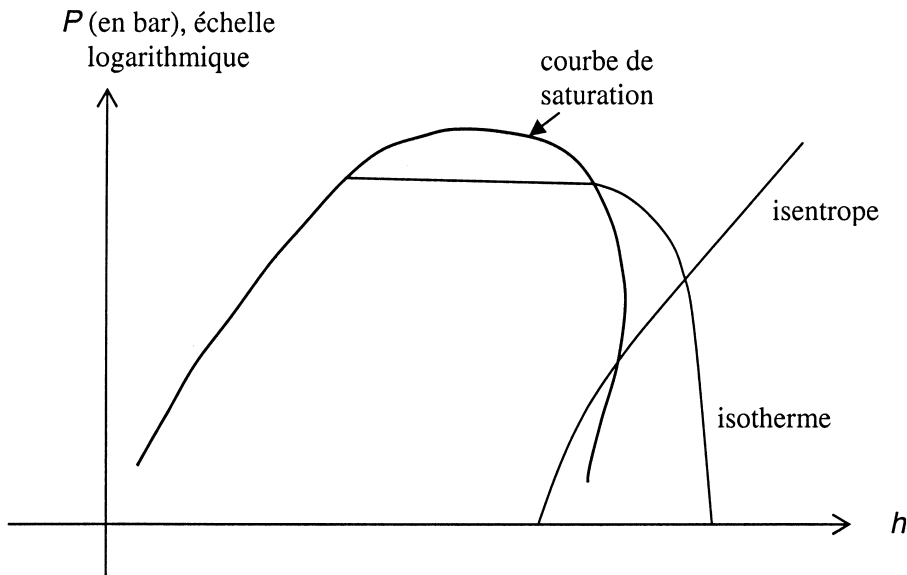
En fin de l'énoncé figure le cycle décrit par le fluide dans un diagramme : h (en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) en abscisse, et P (en bar) en ordonnée avec échelle logarithmique.

L'échelle des enthalpies massiques h est reportée **en bas et en haut** du diagramme, pour faciliter la lecture.

Sont également représentées sur ce diagramme les courbes isotitres (x est le titre massique en vapeur), isothermes (la température est ici indiquée en $^{\circ}\text{C}$), et isentropes.

Quelques-unes des courbes isentropes sont repérées en bas du diagramme par des flèches.

L'utilisation de ce diagramme demandant une familiarisation préalable, on indique ci-dessous l'allure sommaire, dans ce diagramme, de la courbe de saturation, de celle d'une isotherme et de celle d'une isentrope.



Allure sommaire du diagramme enthalpique

On exploitera le diagramme fourni en annexe p.6 pour répondre aux questions posées. **Il est demandé de ne pas rendre ce diagramme avec la copie.**

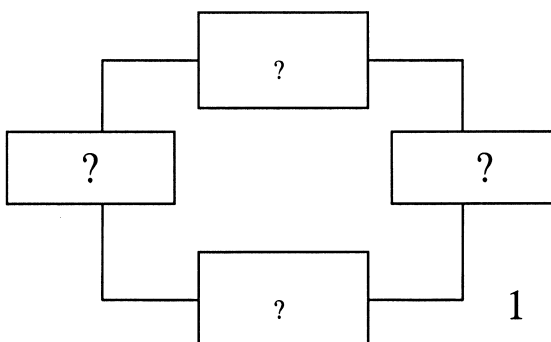
Le compresseur est le seul élément de la PAC comportant des pièces mécaniques mobiles.

Le passage du fluide dans le compresseur est supposé réversible.

Le détendeur et le compresseur sont calorifugés : l'évolution du fluide y est adiabatique.

8/ Reproduire et compléter le schéma ci-dessous en identifiant la nature des différents blocs (compresseur – condenseur – détendeur – évaporateur).

Numéroter sur ce schéma les états (1 – 2 – 3 – 4), à partir de l'état 1 défini sur le diagramme $\ln(P),h$, en tenant compte du sens effectif de parcours du cycle par le fluide (on s'appuiera notamment sur la réponse apportée à la question 5).



9/ Redémontrer le premier principe de la thermodynamique, appliqué aux grandeurs massiques, pour un fluide en écoulement permanent. On s'attachera à détailler toutes les étapes et préciser les hypothèses qui permettent d'arriver à l'énoncé simplifié $\Delta h = w_i + q$, en précisant le statut de w_i et q .
Montrer que l'évolution du fluide dans le détendeur est isenthalpique.

10/ Dans quel élément du circuit le fluide échange-t-il du travail avec des pièces mécaniques mobiles de la PAC ? Quel est, du point de vue du fluide, le signe de ce travail ? Quelle en est, numériquement, la valeur massique ? Justifier.

11/ Dans quel élément du circuit le fluide rejette-t-il de la chaleur vers le milieu extérieur ? Quelle est la nature de ce milieu extérieur ?

Quelle est, numériquement, la valeur massique de ce transfert thermique ? Justifier.

12/ Dans quel élément du circuit le fluide reçoit-il de la chaleur du milieu extérieur ? Quelle est la nature de ce milieu extérieur ? Quelle est, numériquement, la valeur massique de ce transfert thermique ? Justifier.

13/ Quel doit être le débit massique du fluide de la PAC pour assurer une puissance de chauffage de 8 kW ? Quel doit être celui de l'eau du circuit de chauffage ? Quel est alors son débit volumique en $L \cdot h^{-1}$?

14/ Calculer le COP de la PAC à partir des grandeurs énergétiques déduites de la lecture du cycle. Quelle est la puissance consommée par le compresseur ?

III. ETUDE DU CYCLE THERMODYNAMIQUE (29% des points)

15/ Dans quel état se trouve le fluide en sortie de compresseur ? Quelle est sa température ? Dans cette partie du diagramme, quelle serait l'allure d'une isotherme pour un gaz parfait ? Pourquoi ? Justifier alors l'allure des isothermes.

En considérant le fluide comme un gaz parfait, démontrer la relation qui relie les pressions et températures du fluide à l'entrée et à la sortie du compresseur, et γ , rapport des chaleurs massiques du fluide supposé constant, lors de la compression isentropique. Calculer γ .

16/ Dans le condenseur, la transformation dégage-t-elle de la chaleur ou en absorbe-t-elle ? Pourquoi ? Quelle est la température du fluide à la sortie du condenseur ?

17/ Déterminer la fraction massique en vapeur du fluide en sortie du détendeur. Que vaut sa température ? On rappelle que le passage du fluide dans le détendeur est isenthalpique.

18/ Dans l'évaporateur, le fluide se vaporise entièrement et subit une surchauffe. En quoi, d'après vous, cette surchauffe est-elle nécessaire ?

19/ Quelle est l'équation d'une isentrope, pour un gaz parfait, dans un diagramme $\ln(P)$, h ? Est-elle en accord avec sa courbe sur le diagramme ?

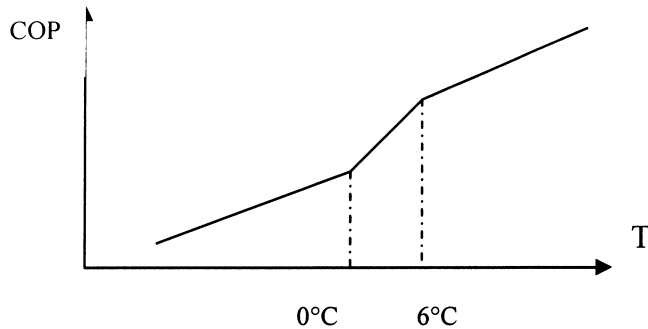
20/ Ce cycle peut-il être celui d'un climatiseur ?

21/ Pourquoi cette installation ne peut-elle pas fonctionner si la température extérieure est inférieure à -9°C ? Pourquoi, en pratique, requiert-elle l'apport d'un chauffage électrique ou d'une chaudière si la température extérieure est inférieure à -5°C ?

IV. TRANSFERT THERMIQUE AVEC L'ECHANGEUR EXTÉRIEUR (17% des points)

Le principal inconvénient avec les PAC air/eau est le givrage de l'évaporateur : l'eau contenue dans l'air au contact des plaques froides de l'évaporateur se condense pour former une couche de givre.

Cette couche de givre fait fortement chuter le COP, comme le montre le diagramme suivant :



22/ Pourquoi cette couche de givre a-t-elle pour effet de diminuer le transfert thermique entre les plaques de l'évaporateur et l'air ? En quoi est-ce préjudiciable au bon fonctionnement de l'installation ?

23/ D'après vous, pourquoi la chute plus importante de COP cesse-t-elle au-dessous de 0°C ?

Le dégivrage est assuré par inversion de cycle (la chaleur nécessaire au dégivrage est prélevée à l'installation !). On peut, aussi, en plus, augmenter la puissance du ventilateur au niveau de l'évaporateur de la PAC.

24/ Expliquer pourquoi ces deux procédés permettent le dégivrage. Quel est l'effet sur le COP ?

25/ On considère une couche de givre, d'épaisseur e , de conductivité thermique λ_g , recouvrant la paroi de l'évaporateur supposée plane de section S ; déterminer sa résistance thermique R_g .

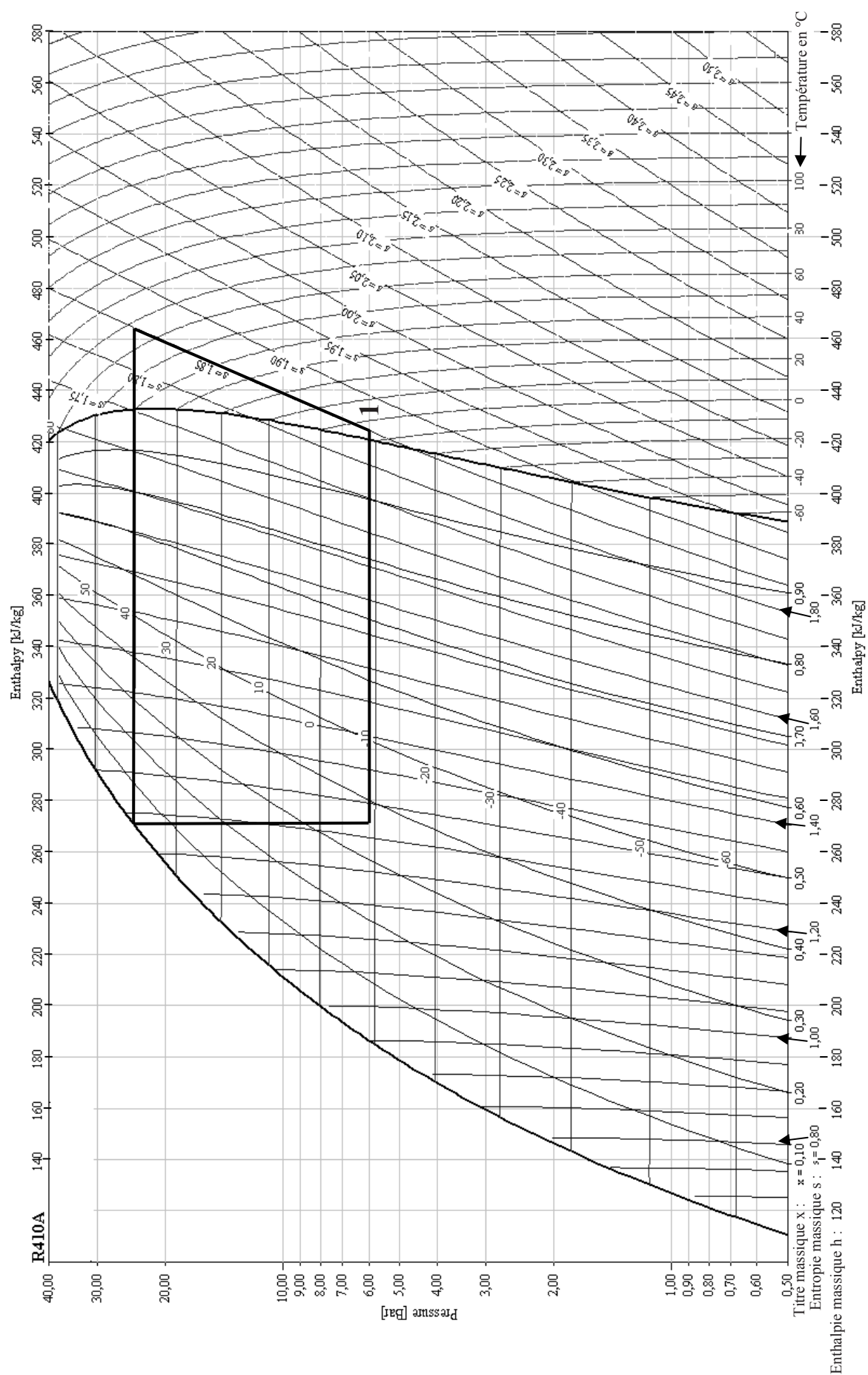
26/ On adopte un modèle dans lequel les échanges thermiques avec l'air l'extérieur sont donnés par la loi de Newton : La puissance P échangée avec l'extérieur à la température T_e , par un élément de surface S d'un corps à la température T , est donnée, en valeur absolue par :

$$|P| = K.S.|T - T_e| \text{ . Le coefficient d'échange } K \text{ est constant.}$$

Déterminer la résistance thermique due à ce transfert.

27/ A l'aide d'une analogie électrique exprimer le rapport P_g / P de la puissance thermique transférée à l'évaporateur en présence de givre à celle de la puissance thermique transférée à l'évaporateur en l'absence de givre, en fonction de K coefficient d'échange entre l'air extérieur et la paroi, K_g coefficient d'échange entre l'air extérieur et le givre, λ_g et e . On suppose fixées les valeurs des températures T_p de la paroi et T_e . On suppose parfait le contact entre la paroi et le givre.

28/ Sachant que $K = 100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $K_g = 20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $\lambda_g = 2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, quelle est la valeur de ce rapport P_g / P dès qu'apparaît la couche de givre ?



FIN DE L'EPREUVE.