

Correction du DS

Tout moyen de communication est interdit

Les téléphones portables doivent être éteints et rangés dans les sacs

Les calculatrices sont autorisées

Au programme

Toute la thermodynamique de MPSI.

Sommaire

E1	Cycle thermodynamique rectangulaire (<i>D'après ENAC 2024</i>)	2
E2	Cycle de BRAYTON	4
P1	Processus d'extraction du lithium (<i>D'après banque agro filière TB 2021</i>)	6
P2	Étude d'une pompe à chaleur (<i>D'après banque PT 2024</i>)	10

Les différentes questions peuvent être traitées dans l'ordre désiré. **Cependant**, vous indiquerez le numéro correct de chaque question. Vous prendrez soin d'indiquer sur votre copie si vous reprenez une question d'un exercice plus loin dans la copie, sous peine qu'elle ne soit ni vue ni corrigée.

Vous porterez une attention particulière à la **qualité de rédaction**. Vous énoncerez clairement les hypothèses, les lois et théorèmes utilisés. Les relations mathématiques doivent être reliées par des connecteurs logiques.

Vous prendrez soin de la **présentation** de votre copie, notamment au niveau de l'écriture, de l'orthographe, des encadrements, de la marge et du cadre laissé pour la note et le commentaire. Vous **encadrerez les expressions littérales**, sans faire apparaître les calculs. Vous ferez apparaître cependant le détail des grandeurs avec leurs unités. Vous **soulignerez les applications numériques**.

Ainsi, l'étudiant-e s'expose aux malus suivants concernant la forme et le fond :

Malus

- ◇ A : application numérique mal faite ;
- ◇ N : numéro de copie manquant ;
- ◇ P : prénom manquant ;
- ◇ E : manque d'encadrement des réponses ;
- ◇ M : marge non laissée ou trop grande ;
- ◇ V : confusion ou oubli de vecteurs ;
- ◇ L : absence de connecteur logique (\Leftrightarrow) ;
- ◇ Q : question mal ou non indiquée ;
- ◇ C : copie grand carreaux ;
- ◇ U : mauvaise unité (flagrante) ;
- ◇ H : homogénéité non respectée ;
- ◇ S : chiffres significatifs non cohérents ;
- ◇ φ : loi physique fondamentale brisée.

/31 E1 Cycle thermodynamique rectangulaire (D'après ENAC 2024)

Un gaz, supposé parfait de n moles, suit le cycle de transformations réversibles (E_1, E_2, E_3, E_4) suivantes, Figure D10.2. On désigne par p_k , V_k et T_k les pressions, volumes et températures des états E_k , où $k = 1, 2, 3$ ou 4.

On note respectivement \mathcal{W}_{ij} et \mathcal{Q}_{ij} le travail et la chaleur (transfert thermique) algébriquement reçus par le gaz lors de la transformation menant de l'état E_i à l'état E_j . On désigne par \mathcal{W} le travail algébriquement reçu par le gaz sur le cycle. Les températures T_1 et T_3 sont égales, et on pose $\kappa = p_1/p_3$.

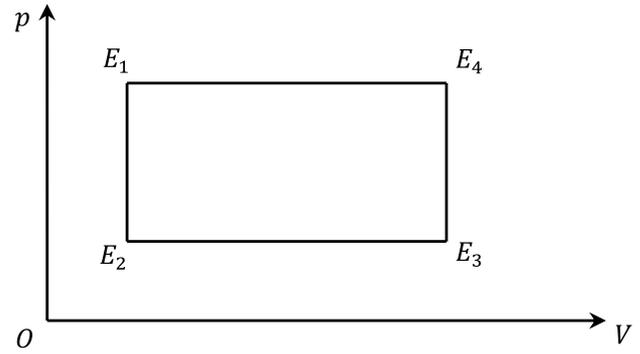


FIGURE D10.1



Pour les questions suivantes, indiquer la ou les bonnes réponses clairement et en toutes lettres (« Réponse X »), en **justifiant entièrement votre choix**.

/5 1 Exprimer T_2 et T_4 en fonction de κ et T_1 :

- A) $T_2 = \kappa T_1$ B) $T_2 = T_1/\kappa$ C) $T_4 = \kappa T_1$ D) $T_4 = T_1/\kappa$

Réponse

Réponses B et C. Puisque $1 \rightarrow 2$ est isochore, on a

$$\frac{nRT_2}{p_2} = V_2 \stackrel{\textcircled{1}}{=} V_1 = \frac{nRT_1}{p_1} \Leftrightarrow T_2 \stackrel{\textcircled{1}}{=} T_1 \frac{p_2}{p_1}$$

Or, $2 \rightarrow 3$ isobare, donc

$$p_2 = p_3 \Rightarrow T_2 = T_1 \frac{p_3}{p_1} \Leftrightarrow T_2 \stackrel{\textcircled{1}}{=} T_1/\kappa$$

Réponse B

De même,

$$\frac{nRT_3}{p_3} = \frac{nRT_1}{p_3} = V_3 \stackrel{\textcircled{1}}{=} V_4 = \frac{nRT_4}{p_4} = \frac{nRT_4}{p_1}$$

$$\Leftrightarrow T_4 = T_1 \frac{p_1}{p_3} \Leftrightarrow T_4 \stackrel{\textcircled{1}}{=} \kappa T_1$$

Réponse C

/6 2 Exprimer \mathcal{W}_{12} et \mathcal{Q}_{12} :

- A) $\mathcal{W}_{12} = 0$ B) $\mathcal{W}_{12} = -p_1 V_1$ C) $\mathcal{Q}_{12} = \frac{n\gamma RT_1(\kappa - 1)}{(\gamma - 1)\kappa}$ D) $\mathcal{Q}_{12} = \frac{nRT_1(1 - \kappa)}{(\gamma - 1)\kappa}$

Réponse

Réponses A et D. Puisque $1 \rightarrow 2$ est isochore, on a

$$\mathcal{W}_{12} \stackrel{\textcircled{1}}{=} - \int_{V_1}^{V_2} p_{\text{ext}} dV \stackrel{\textcircled{1}}{=} 0$$

Réponse A

Loi de JOULE et premier principe : $\Delta u_{12} \stackrel{\textcircled{1}}{=} C_V(T_2 - T_1) \stackrel{\textcircled{1}}{=} \mathcal{Q}_{12} + \underbrace{\mathcal{W}_{12}}_{=0}$

$$\Leftrightarrow \mathcal{Q}_{12} \stackrel{\textcircled{1}}{=} \frac{nRT_1}{\gamma - 1} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = \frac{nRT_1}{\gamma - 1} \left(\frac{1}{\kappa} - 1 \right)$$

$$\Leftrightarrow \mathcal{Q}_{12} \stackrel{\textcircled{1}}{=} \frac{nRT_1(1 - \kappa)}{(\gamma - 1)\kappa}$$

Réponse D

/5 3 Exprimer \mathcal{W}_{23} :

- A) $\mathcal{W}_{23} = 0$ B) $\mathcal{W}_{23} = -\frac{nRT_1(\kappa - 1)}{\kappa}$ C) $\mathcal{W}_{23} = \frac{nRT_1(\kappa - 1)}{\kappa}$ D) $\mathcal{W}_{23} = -\frac{nRT_1}{\kappa}$

Réponse

Réponse B. Le cycle étant réversible, on a $p = p_{\text{ext}} \textcircled{1}$, et ici $p = \text{cte} = p_2 = p_3 \textcircled{1}$, d'où

$$W_{23} = - \int_{V_2}^{V_3} p dV \stackrel{\textcircled{1}}{=} - p_3 (V_3 - V_2)$$

$$\Leftrightarrow W_{23} = -nRT_3 + p_2 V_2 \stackrel{\textcircled{1}}{=} nR(T_2 - T_3)$$

Or, $T_3 = T_1$ et $T_2 = T_1/\kappa$ soit $W_{23} = nRT_1 \left(\frac{1}{\kappa} - 1 \right) \Leftrightarrow W_{23} = \frac{nRT_1(1-\kappa)}{\kappa}$

Réponse B

/4 [4] Exprimer Q_{23} :

A) $Q_{23} = 0$ B) $Q_{23} = \frac{nR}{\gamma-1} \ln \kappa$ C) $Q_{23} = \frac{nRT_1\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)$ D) $Q_{23} = \frac{nRT_1}{\gamma-1} \left(\frac{1-\kappa}{\kappa} \right)$

Réponse

Réponse C. Puisque $2 \rightarrow 3$ est isobare, on a

Loi de JOULE et premier principe : $\Delta \mathcal{H}_{23} \stackrel{\textcircled{1}}{=} C_P(T_3 - T_2) \stackrel{\textcircled{1}}{=} Q_{23}$

$T_3 = T_1 \Rightarrow Q_{23} \stackrel{\textcircled{1}}{=} \frac{nR\gamma T_1}{\gamma-1} \left(1 - \frac{1}{\kappa} \right) \Leftrightarrow Q_{23} \stackrel{\textcircled{1}}{=} \frac{nRT_1\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)$

Réponse C

/5 [5] Que vaut W ?

A) $W = 0$ B) $W = nRT_1 \frac{\kappa-1}{\kappa}$ C) $W = nRT_1 \frac{(\kappa-1)^2}{\kappa}$ D) $W = nRT_1 \kappa^2$

Réponse

Réponse C. On commence par déterminer W_{41} , de la même manière que W_{23} avec $p = \text{cte} = p_1 = p_4$:

$$W_{41} \stackrel{\textcircled{1}}{=} -p_1(V_1 - V_4) = -nRT_1 + nRT_4$$

Or, $T_4 \stackrel{\textcircled{1}}{=} \kappa T_1$ soit $W_{41} \stackrel{\textcircled{1}}{=} nRT_1(\kappa - 1)$

Par somme : $W \stackrel{\textcircled{1}}{=} \sum_i W_i = 0 + \frac{nRT_1(1-\kappa)}{\kappa} + 0 + nRT_1(\kappa - 1)$

$$\Leftrightarrow W = nRT_1(\kappa - 1) \left(-\frac{1}{\kappa} + 1 \right) \Leftrightarrow W \stackrel{\textcircled{1}}{=} nRT_1 \frac{(\kappa-1)^2}{\kappa}$$

Réponse C

/6 [6] Quels sont les signes de Q_{34} et de Q_{41} ?

A) $Q_{34} > 0$ B) $Q_{34} < 0$ C) $Q_{41} > 0$ D) $Q_{41} < 0$

Réponse

Réponses A et D. À volume constant, une augmentation de pression implique une augmentation de température $\textcircled{1}$, donc d'énergie interne. Or, pour une isochore $W_p = 0 \textcircled{1}$, donc forcément $Q_{34} > 0 \textcircled{1}$.

À pression constante, une diminution de volume implique une diminution de température $\textcircled{1}$ et donc d'enthalpie $\textcircled{1}$, et ainsi une libération de chaleur ; on en déduit $Q_{41} < 0 \textcircled{1}$.



/42 **E2** Cycle de BRAYTON

On considère une turbine à gaz schématisée sur le dessin ci-contre. Le gaz qui décrit le cycle est l'air considéré comme un gaz parfait. On ne tient pas compte de l'écoulement du gaz (ce dernier est donc supposé à l'équilibre macroscopique).

Partant de l'état 1 ($P_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = 300 \text{ K}$), le gaz passe dans un turbocompresseur dans lequel il subit une compression adiabatique réversible (état 2 : $P_2 = 6,5 \text{ bar}$, T_2).

Ensuite il passe dans une chambre de combustion (E_1), où il est mélangé avec une petite quantité de carburant dont on néglige la masse. Le gaz subit alors une transformation isobare (la combustion) et passe à l'état 3 (P_3 , $T_3 = 1300 \text{ K}$).

Le gaz subit ensuite une détente adiabatique réversible dans une turbine (T) pour arriver à l'état 4 (P_4 , T_4). Enfin, il se refroidit de manière isobare en retournant à l'état 1.

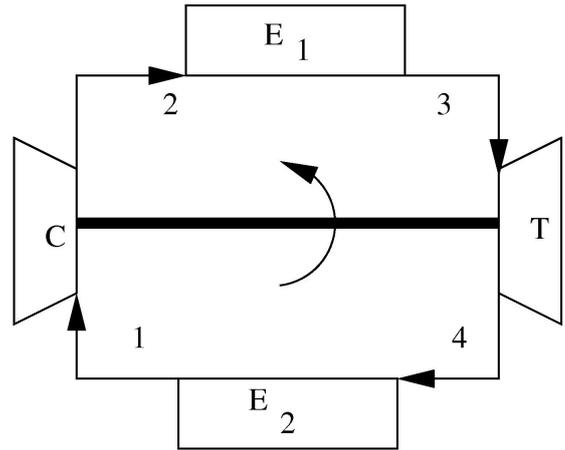


FIGURE D10.2

On donne pour l'air : $\gamma = 1,4$, masse molaire $M = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$.
On raisonnera sur une masse de 1 kg de gaz.

- /7 1 Déterminez l'expression de T_2 et de T_4 en fonction de T_1 , P_1 , P_2 et T_3 . Effectuez ensuite les applications numériques.

Réponse

La transformation entre l'état 1 et l'état 2 est adiabatique réversible, et l'air est considéré comme un gaz parfait : on peut appliquer la loi de LAPLACE ①

$$P_1^{1-\gamma} T_1^\gamma = P_2^{1-\gamma} T_2^\gamma \Leftrightarrow T_2^\gamma = T_1^\gamma \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1-\gamma}$$

$$\Leftrightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \Rightarrow \text{A.N. : } T_2 = 512 \text{ K}$$

De même entre 3 et 4,

$$P_3^{1-\gamma} T_3^\gamma = P_4^{1-\gamma} T_4^\gamma \Leftrightarrow T_4^\gamma = T_3^\gamma \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{1-\gamma}$$

Or, $P_2 = P_3$ et $P_4 = P_1$ ①

$$\Leftrightarrow T_4 = T_3 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \Rightarrow \text{A.N. : } T_4 = 762 \text{ K}$$



- /6 2 Représentez le cycle dans un diagramme de WATT ($P = f(V)$, sans respecter l'échelle). S'agit-il d'un cycle moteur ou récepteur ?

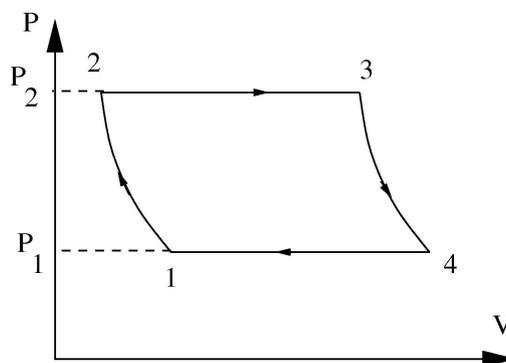
Réponse

FIGURE D10.3 – ① axes, ① courbure LAPLACE, ① position des points, ① sens de parcours.

Le cycle est parcouru dans le sens horaire, donc $\mathcal{W} < 0$ ① : c'est un cycle **moteur** ①.



- /8 [3] Déterminez les expressions des transferts thermiques reçus par le gaz entre les états 2 et 3 (Q_{23}) et entre les états 4 et 1 (Q_{41}). Effectuez les applications numériques, puis commenter le signe de ces transferts thermiques en lien avec le type de la machine.

————— Réponse —————

2 → 3 isobare :

$$\Delta \mathcal{H}_{23} = C_P \Delta T = Q_{23}$$

$$\Leftrightarrow Q_{23} = \frac{\gamma m R}{M(\gamma - 1)} (T_3 - T_2) \Rightarrow \text{A.N. : } Q_{23} = 791 \text{ kJ}$$

Ce transfert thermique est positif, cohérent étant donné le principe de fonctionnement d'un moteur, il s'agit du contact avec la source chaude. ①

4 → 1 isobare :

$$Q_{41} = \frac{\gamma m R}{M(\gamma - 1)} (T_1 - T_4) \Rightarrow \text{A.N. : } Q_{41} = -464 \text{ kJ}$$

Ce transfert thermique est négatif, cohérent étant donné le principe de fonctionnement d'un moteur il s'agit du contact avec la source froide. ①



- /5 [4] Déterminez l'expression du travail total reçu par le gaz \mathcal{W} sur le cycle en fonction des transferts thermiques. Effectuer l'application numérique puis commenter son signe.

————— Réponse —————

Étant adiabatiques, on a $Q_{12} = 0$ et $Q_{34} = 0$ ①. Ainsi, sur un cycle

$$\Delta U_{\text{cycle}} = \mathcal{W} + Q_{23} + Q_{41} = 0$$

$$\Leftrightarrow \mathcal{W} = -Q_{23} - Q_{41} \Rightarrow \text{A.N. : } \mathcal{W} = -327 \text{ kJ}$$

On a bien $\mathcal{W} < 0$, ce qui confirme le fonctionnement moteur de ce dispositif. ①



- /8 [5] Une partie du travail fourni par la turbine sert à entraîner le turbocompresseur par l'intermédiaire d'un arbre. Déterminez le travail nécessaire à l'entraînement du compresseur et la part que cela représente dans le travail total fourni par la turbine.

————— Réponse —————

Le travail fourni par la turbine se fait durant l'étape 3 → 4, durant laquelle le système reçoit un travail \mathcal{W}_{34} . Or,

$$\Delta U_{34} = \frac{nR}{\gamma - 1} (T_4 - T_3) = \mathcal{W}_{34} + \underbrace{Q_{34}}_{=0}$$

$$\Leftrightarrow \mathcal{W}_{34} = \frac{mR}{M(\gamma - 1)} (T_4 - T_3) \Rightarrow \text{A.N. : } \mathcal{W}_{34} = -386 \text{ kJ} \quad \text{soit} \quad \mathcal{W}_T = 386 \text{ kJ} \quad \text{le travail fourni par la turbine.}$$

Le passage par le turbocompresseur se fait durant l'étape 1 → 2 durant laquelle le gaz reçoit un travail $\mathcal{W}_{12} > 0$. Or, on a de même $Q_{12} = 0$, soit

$$\mathcal{W}_{12} = \frac{mR}{M(\gamma - 1)} (T_2 - T_1) \Rightarrow \text{A.N. : } \mathcal{W}_{12} = 152 \text{ kJ} \quad \text{soit} \quad \mathcal{W}_{TC} = 152 \text{ kJ} \quad \text{le travail reçu par le turbocompresseur.}$$

Soit $r = \frac{\mathcal{W}_{TC}}{\mathcal{W}_T} = 39,4\%$ la part de ce travail par rapport au travail fourni par la turbine.



- /8 [6] Déterminez finalement l'expression du rendement η en fonction des températures. Effectuez l'application numérique. Rappeler sans démonstration l'expression du rendement de CARNOT d'un moteur, effectuez l'application numérique et commenter.

————— Réponse —————

Pour un moteur, on a

$$\eta = -\frac{\mathcal{W}}{Q_c} = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_{41}}{Q_{23}}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\eta = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}} \Rightarrow \text{A.N. : } \underline{\eta = 0,414}$$

Or,

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c} \Leftrightarrow \boxed{\eta_C = 1 - \frac{T_1}{T_3}} \Rightarrow \text{A.N. : } \underline{\eta_C = 0,769}$$

On a bien sûr $\eta_C > \eta$, puisque la combustion et le refroidissement isobares ne sont pas réversibles. ①

/44 P1 Processus d'extraction du lithium (D'après banque agro filière TB 2021)

Le lithium est un élément chimique important que l'on retrouve dans de nombreux dispositifs électroniques et électrotechniques. Il va constituer une ressource clé de la transition énergétique à venir. En effet, c'est, entre autres choses, le principal constituant des panneaux photovoltaïques.

Le lithium est principalement extrait des déserts de sel présents en Amérique du Sud (Bolivie, Chili et Argentine). Des solutions aqueuses riches en lithium (0,16% en masse), appelée saumures, sont pompées à 20 mètres de profondeur et placées dans des grands bassins d'évaporation pouvant faire 1 km de long afin de les concentrer (à environ 6% en masse). Divers traitements vont ensuite permettre de récupérer le lithium sous forme de carbonate de lithium Li_2CO_3 . Celui-ci est ensuite transformé en chlorure de lithium LiCl , puis enfin en lithium solide par électrolyse. Dans cette partie, nous nous intéressons exclusivement au processus d'évapo-concentration des saumures.

Le salar d'Atacama au Chili est le principal gisement de lithium au monde pour l'exploitation des saumures. La société chilienne SQM envisage de passer sa production annuelle de [70 000 ; 148 000] tonnes de Li_2CO_3 d'ici 2022. Situé dans le désert d'Atacama, le plus sec de la planète et à 2500 m d'altitude, le lac salé est situé sous une croûte de sel. Le procédé le plus simple utilise l'évaporation naturelle et requiert la construction de bassins en série (Figure D10.4) dans lesquels circule la saumure afin de la concentrer par évaporation de l'eau par l'action combinée du vent et du soleil. C'est un processus lent qui se déroule à l'échelle de l'année, qui ne permet pas d'obtenir un fort rendement, mais son coût est faible.



FIGURE D10.4 – Bassins de la société chilienne SQM

Données

- ◇ Masse volumique de la saumure : $\rho_s = 1,3 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- ◇ Masse molaire de l'air : $M_{\text{air}} = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
- ◇ Accélération de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- ◇ Constante des gaz parfaits : $R = 8,3 \text{ USI}$

Les trois parties sont très largement indépendantes.

I/A Pompage de l'eau souterraine

- /3 ① Le premier bassin d'évaporation est un parallépipède rectangle de longueur $L = 6,0 \times 10^2 \text{ m}$, de largeur $l = 5,0 \times 10^2 \text{ m}$ et de profondeur $h = 4,0 \times 10^{-1} \text{ m}$. Exprimer le volume V_s de la saumure que peut contenir le bassin lorsqu'il est plein. En déduire l'expression de la masse m_s et faire l'application numérique.

Réponse

$$\boxed{V_s = L \times l \times h} \quad \text{et} \quad m_s = \rho_s \times V_s \quad \text{donc} \quad \boxed{m_s = \rho_s \times L \times l \times h} \Rightarrow \text{A.N. : } \underline{m_s \approx 1,6 \times 10^8 \text{ kg}}$$

- /4 [2] La saumure est pompée dans une nappe souterraine à $p = 20$ m sous la surface du sol. Pour l'amener dans le bassin, il faut apporter de l'énergie à la saumure, grâce à une pompe. Soit $\mathcal{W}_{\text{pompe}}$ le travail mécanique que la pompe a fourni lors de ce processus. Appliquer le théorème de l'énergie mécanique à la masse d'eau m_s lorsque l'on fait passer ce volume de la nappe souterraine au bassin afin de déterminer l'expression de $\mathcal{W}_{\text{pompe}}$ en fonction des variables m_s , g et p .

Indication : le travail fourni par la pompe est suppose associé à des actions non conservatives.

Réponse

La masse de saumure est au repos dans la nappe souterraine comme dans le bassin, soit $\Delta\mathcal{E}_c = 0$ (1), mais est montée d'une hauteur p , soit $\Delta\mathcal{E}_{p,p} = m_s gp$ (1). Ainsi, par TEM :

$$\Delta\mathcal{E}_m \stackrel{(1)}{=} \mathcal{W}_{\text{pompe}} \Leftrightarrow \boxed{\mathcal{W}_{\text{pompe}} \stackrel{(1)}{=} m_s gp}$$

- /3 [3] Les pompes disposent d'une puissance mécanique $\mathcal{P}_{\text{pompe}}$ de valeur égale à 100 kW. Déterminer la durée Δt du fonctionnement de ces pompes pour remplir totalement le bassin d'évaporation, préalablement vidé. Application numérique.

Réponse

Puissance constante $\mathcal{W}_{\text{pompe}} \stackrel{(1)}{=} \mathcal{P}_{\text{pompe}} \Delta t \Leftrightarrow \boxed{\Delta t \stackrel{(1)}{=} \frac{m_s gp}{\mathcal{P}_{\text{pompe}}}}$ avec $\begin{cases} m_s = 1,6 \times 10^8 \text{ kg} \\ g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \\ p = 20 \text{ m} \\ \mathcal{P}_{\text{pompe}} = 100 \times 10^3 \text{ W} \end{cases}$

A.N. : $\Delta t \stackrel{(1)}{\approx} 3,1 \times 10^5 \text{ s} \approx 3,6 \text{ jours}$

- /3 [4] Les pompes de remplissages fonctionnent grâce à un moteur diesel de rendement global $\eta = 25\%$. Notons \mathcal{Q}_{ch} le transfert thermique réalisé par ce moteur avec la source chaude. Quel lien peut-on faire entre η , $\mathcal{W}_{\text{pompe}}$ et \mathcal{Q}_{ch} ? En déduire l'expression de \mathcal{Q}_{ch} nécessaire au pompage en fonction de m_s , g , p et η . Application numérique.

Réponse

$$\eta \stackrel{(1)}{=} \left| \frac{\mathcal{W}_{\text{pompe}}}{\mathcal{Q}_{\text{ch}}} \right| \Leftrightarrow \boxed{\mathcal{Q}_{\text{ch}} \stackrel{(1)}{=} \frac{m_s gp}{\eta}}$$

A.N. : $\mathcal{Q}_{\text{ch}} \stackrel{(1)}{\approx} 1,3 \times 10^{11} \text{ J}$

- /3 [5] On suppose que ce transfert thermique \mathcal{Q}_{ch} est obtenu par combustion de carburant, de pouvoir calorifique $p_c = 3,7 \times 10^{10} \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$. Le pouvoir calorifique du carburant est défini comme étant l'énergie thermique récupérable (en Joule) à partir de la combustion d'un mètre cube de carburant. En déduire le volume V_c de carburant nécessaire au pompage. On donnera le résultat en litres.

Réponse

Par définition : $\mathcal{Q}_{\text{ch}} \stackrel{(1)}{=} p_c V_c \Leftrightarrow \boxed{V_c \stackrel{(1)}{=} \frac{\mathcal{Q}_{\text{ch}}}{p_c}}$

A.N. : $V_c \stackrel{(1)}{\approx} 3,4 \text{ m}^3 = 3,4 \times 10^3 \text{ L}$

I/B Pression atmosphérique en altitude

- /3 [6] Expliquer pourquoi l'air peut être considéré comme un gaz diatomique. Rappeler ensuite l'équation d'état du gaz parfait en indiquant les noms et les unités des grandeurs physiques présentes dans cette loi.

Réponse

L'ai est très essentiellement composé de deux gaz diatomiques, le diazote N_2 et le dioxygène O_2 (1). On peut donc considérer l'air comme un gaz parfait diatomique.

$$\boxed{PV \stackrel{(1)}{=} nRT} \text{ avec } \begin{cases} P & \text{pression en Pa} \\ V & \text{volume en m}^3 \\ n & \text{quantité de matière en mol} \\ R & \text{constante des gaz parfaits en J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \\ T & \text{température en K} \end{cases} \quad (1)$$

- /2 [7] L'air est donc assimilé à un gaz parfait de masse molaire M_{air} . Exprimer alors sa masse volumique ρ_{air} en fonction de P , de sa masse molaire, de R et de T .

————— Réponse —————

$$\text{Loi GP} \div m \Rightarrow P \frac{V}{m} \stackrel{\textcircled{1}}{=} \frac{n}{m} RT \Leftrightarrow \frac{P}{\rho_{\text{air}}} = \frac{RT}{M_{\text{air}}} \Leftrightarrow \rho_{\text{air}} \stackrel{\textcircled{1}}{=} \frac{PM_{\text{air}}}{RT}$$



La pression atmosphérique au niveau de la mer (altitude $z = 0$) est égale à $P_0 = 1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$. On admet que la pression P varie avec l'altitude selon l'équation fondamentale de l'hydrostatique :

$$\frac{dP}{dz} = -\rho_{\text{air}}g$$

avec g l'accélération de la pesanteur et z l'altitude prise sur un **axe vertical ascendant**. On suppose par ailleurs que l'atmosphère est isotherme, c'est-à-dire que sa température est homogène et égale à $T_0 = 300 \text{ K}$ à toute altitude.

- /4 [8] Montrer que l'équation fondamentale de l'hydrostatique devient une équation différentielle de la forme

$$\frac{dP}{dz} + \frac{P}{h_0} = 0$$

Donner l'expression de h_0 en fonction de R , T_0 , g et M_{air} . Quelle est l'unité de h_0 ? Déterminer sa valeur numérique.

————— Réponse —————

D'après la question précédente avec une atmosphère isotherme, on a :

$$\rho_{\text{air}} = \frac{PM_{\text{air}}}{RT_0} \quad \text{et} \quad \frac{dP}{dz} \stackrel{\textcircled{1}}{=} -\frac{PM_{\text{air}}g}{RT_0}$$

$$\Leftrightarrow \frac{dP}{dz} + \frac{P}{h_0} = 0 \quad \text{avec} \quad h_0 \stackrel{\textcircled{1}}{=} \frac{RT_0}{M_{\text{air}}g} \quad (\text{unité : m}) \quad \textcircled{1}$$

$$\text{A.N. : } h_0 \approx 8,4 \times 10^3 \text{ m} \stackrel{\textcircled{1}}{=} 8,4 \text{ km}$$



- /3 [9] Résoudre alors l'équation différentielle précédente. Calculer alors la pression à l'altitude $z_A = 2500 \text{ m}$ du désert d'Atacama.

————— Réponse —————

La solution de cette équation différentielle du premier ordre à coefficient constant est

$$P(z) \stackrel{\textcircled{1}}{=} Ae^{-\frac{z}{h_0}} \quad \text{or} \quad P(0) = P_0 = A \quad \text{donc} \quad P(z) \stackrel{\textcircled{1}}{=} P_0 e^{-\frac{z}{h_0}}$$

$$\text{A.N. : } P(z_A) \approx 7,5 \times 10^4 \text{ Pa}$$



I/C Évaporation de l'eau

On représente le diagramme d'équilibre pression-température de l'eau pure Figure D10.5.

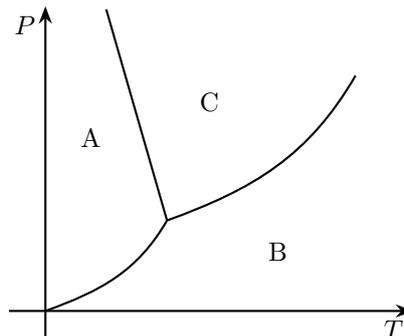


FIGURE D10.5

- /5 **10** Associer l'état physique de l'eau aux domaines A, B et C du diagramme. Nommer le point d'intersection des trois courbes et expliquer succinctement ce qu'il se passe à ces coordonnées. Justifier précisément, à l'aide du diagramme, que la température de vaporisation de l'eau diminue lorsque l'altitude augmente.

Réponse

A) État solide (glace); B) État gazeux (vapeur d'eau); C) État liquide (eau); **①**

Le point d'intersection des trois courbes est le **point triple** de l'eau **①** et correspond à la coexistence simultanée des trois phases **①**.

Dans le diagramme (P,T) , la courbe de coexistence liquide-vapeur est une courbe croissante. Ainsi, la **température de vaporisation diminue** quand la **pression diminue** **①**. Or, la pression diminue quand **l'altitude augmente** **①**. Donc, la température de vaporisation diminue quand l'altitude augmente.

La courbe représentant l'évolution de la pression de vapeur saturante ou pression de l'équilibre liquide-gaz en fonction de la température pour l'eau pure est donnée en Figure D10.6.

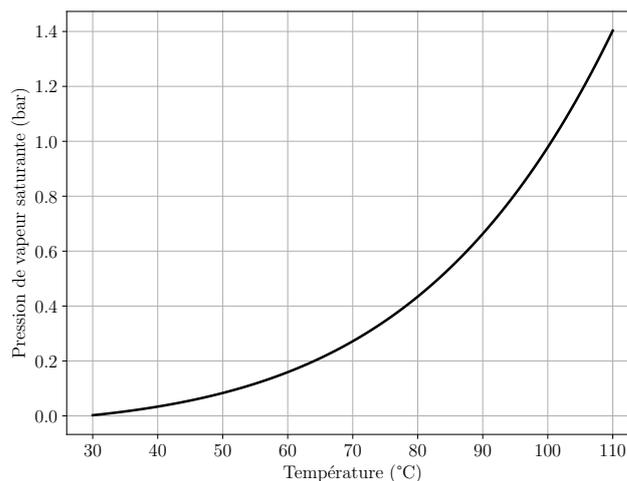


FIGURE D10.6

- /2 **11** La pression à l'altitude $z_A = 2500$ m du salar d'Atacama est de $7,6 \times 10^4$ Pa. Évaluer graphiquement la valeur de la température d'ébullition de l'eau à cette altitude. Sachant que la température dans le désert atteint régulièrement $T_d = 50$ °C, l'eau dans les bassins peut-elle entrer en ébullition ?

Réponse

Par lecture graphique sur la Figure D10.6, la température d'ébullition est $T_{eb} \approx 93$ °C **①**. Elle est bien supérieure à celle atteinte dans le désert : il n'est donc **pas possible** **①** de constater d'ébullition de la saumure de ces bassins dans ces conditions.

Même si l'eau liquide n'entre pas en ébullition, elle peut s'évaporer. On définit la pression partielle P_i d'un constituant gazeux i dans un mélange parfait de gaz à la pression totale P par $P_i = x_i P$, avec $x_i = n_i/n$ sa fraction molaire dans le mélange.

Au-dessus du bassin, à la surface de l'eau, on considère que la pression partielle de la vapeur d'eau est égale à sa pression de vapeur saturante.

- /2 **12** Évaluer graphiquement la valeur de la pression partielle P_{eau} dans la vapeur d'eau à la température $T_d = 50$ °C.

Réponse

Lecture graphique : $P_{eau} = P_{sat}(T_d) = 0,08 \text{ bar} = 8 \times 10^3 \text{ Pa}$

- /2 **13** À la température d'ébullition de l'eau, l'eau liquide se transforme intégralement en vapeur d'eau et l'air contient 100% d'eau vapeur, mais ce n'est plus le cas à une température plus faible (comme c'est le cas ici). Calculer la fraction molaire de vapeur d'eau dans l'air au salar d'Atacama quand la température est égale à $T_d = 50$ °C.

Réponse

Par définition : $x_{eau} = \frac{P_{eau}}{P(z_A)} \Rightarrow \text{A.N.} : x_{eau} \approx 0,11$

- /5 14 Le processus d'évaporation de l'eau se poursuit-il lorsque la pression partielle de la vapeur d'eau est égale à sa pression de vapeur saturante ? Commenter.

Quel phénomène météorologique permet de contrer cette difficulté en renouvelant l'air ? En résumé, quels sont les critères météorologiques qui permettent d'obtenir une bonne évaporation ?

Réponse

Lorsque la pression partielle de la vapeur d'eau est égale à sa pression de vapeur saturante, l'état d'équilibre est atteint : il n'y a alors **plus de vaporisation** ①. On dit alors que l'air est **saturé en humidité**. Ceci n'est **pas une situation souhaitée** par l'entreprise minière qui a besoin d'une évaporation continue ①.

C'est le **vent** qui permet de renouveler l'air à proximité de la surface du bassin. L'air saturé en humidité est alors évacué et remplacé par un air non saturé. Le processus d'évaporation peut alors se poursuivre. Si par ailleurs l'air renouvelé est sec, il pourra accumuler plus de vapeur d'eau avant d'être saturé.

Une bonne évaporation nécessite donc :

- ① ◇ une **température élevée** pour avoir une forte pression de vapeur saturante ;
- ① ◇ un **air sec** pour accumuler plus de vapeur d'eau avant d'atteindre la saturation ;
- ① ◇ un **vent soutenu** pour chasser l'air saturé en humidité.



/79 P2 Étude d'une pompe à chaleur (D'après banque PT 2024)

Dans le cadre de la rénovation énergétique des bâtiments afin de lutter contre le réchauffement climatique, il est préconisé l'installation de pompe à chaleur. En effet, ce dispositif permet d'effectuer des économies d'énergie pour le chauffage des habitations et la production d'eau sanitaire.

II/A Modèle ditherme

- /8 1 Présenter sous forme de schéma annoté, le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur ditherme fonctionnant entre une source chaude thermostatée de température T_C et une source froide thermostatée de température T_F . Préciser et justifier en français les signes des transferts thermiques Q_C et Q_F et du travail W reçu par le fluide de la pompe à chaleur.

Réponse

- ①+① ◇ $Q_C < 0$: on cherche à réchauffer la source chaude, il faut donc lui céder de la chaleur ;
- ①+① ◇ $Q_F > 0$: le fluide de la pompe à chaleur prend pour cela de l'énergie à la source froide ;
- ①+① ◇ $W > 0$: le fluide de la pompe à chaleur reçoit du travail de la part d'un système mécanique pour réaliser ce transfert thermique.

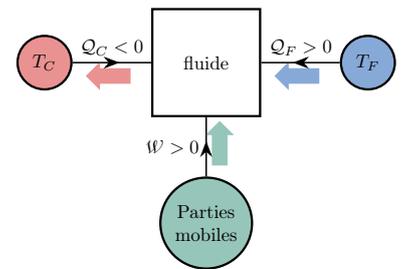


FIGURE D10.7 – ①+①

- /5 2 Définir l'efficacité (ou COP) de cette pompe à chaleur. L'exprimer en fonction uniquement des transferts thermiques Q_C et Q_F .

Réponse

$$e = \left| \frac{\text{production}}{\text{coût}} \right| = - \frac{Q_C}{W}$$

Premier principe :

$$\Delta u_{\text{cycle}} = W + Q_C + Q_F = 0 \Leftrightarrow W = -Q_C - Q_F$$

Ainsi

$$e = \frac{Q_C}{Q_F + Q_C} = \frac{1}{1 + \frac{Q_F}{Q_C}}$$



- /9 **3** Déterminer l'expression de l'efficacité (ou COP) de la pompe à chaleur en fonction de T_C et T_F , de l'entropie créée au cours d'un cycle de fonctionnement que l'on notera \mathcal{S}_c , et de \mathcal{W} . Donner son ordre de grandeur pour une machine réelle.

Réponse

$$2^{\text{d}} \text{ ppe } \Delta \mathcal{S}_{\text{cycle}} = \mathcal{S}_{\text{ech}} + \mathcal{S}_c = 0$$

$$\text{Or } \mathcal{S}_{\text{ech}} = \int \frac{\delta \mathcal{Q}_C}{T_C} + \int \frac{\delta \mathcal{Q}_F}{T_F}$$

$$\text{monoT} \Rightarrow \mathcal{S}_{\text{ech}} = \frac{\mathcal{Q}_C}{T_C} + \frac{\mathcal{Q}_F}{T_F}$$

$$\text{Ainsi : } \frac{\mathcal{Q}_F}{T_F} = -\mathcal{S}_c - \frac{\mathcal{Q}_C}{T_C}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\mathcal{Q}_F}{\mathcal{Q}_C} = -\frac{T_F}{T_C} \mathcal{S}_c - \frac{T_F}{T_C}$$

$$\Leftrightarrow 1 + \frac{\mathcal{Q}_F}{\mathcal{Q}_C} = 1 - \frac{T_F}{T_C} \mathcal{S}_c - \frac{T_F}{T_C}$$

$$\Leftrightarrow \underbrace{\frac{1}{1 + \frac{\mathcal{Q}_F}{\mathcal{Q}_C}}}_{=e} = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C} \mathcal{S}_c - \frac{T_F}{T_C}} \times \frac{T_C}{\frac{T_C}{1}}$$

$$\Leftrightarrow e = \frac{T_C}{T_C - T_F - T_F \mathcal{S}_c \frac{T_C}{\mathcal{Q}_C}}$$

$$\Leftrightarrow e = \frac{T_C}{T_C - T_F + T_F \mathcal{S}_c \frac{T_C}{e \mathcal{W}}}$$

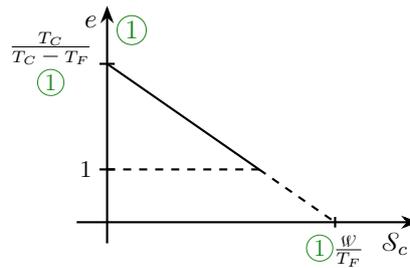
$$\Leftrightarrow e(T_C - T_F) + T_F T_C \frac{\mathcal{S}_c}{\mathcal{W}} = T_C$$

$$\Leftrightarrow e = \frac{T_C}{T_C - T_F} \left(1 - T_F \frac{\mathcal{S}_c}{\mathcal{W}} \right)$$

$$\text{A.N. : } e_{\text{réel}} \approx 3 ; 4$$

- /3 **4** Représenter graphiquement l'évolution du COP en fonction de \mathcal{S}_c , en considérant \mathcal{W} , T_C et T_F constants.

Réponse



- /3 **5** Interpréter physiquement le cas $\mathcal{S}_c = 0$.

Réponse

$\mathcal{S}_c = 0$ correspond à un cycle réversible; on a alors $e = \frac{T_C}{T_C - T_F} = e_{\text{carnot}}$ le rendement maximal atteignable, dans le cas d'absence de frottements et d'inhomogénéités.

II/B Fonctionnement de la pompe à chaleur à fluide R410A

Le schéma de principe d'une telle installation est présenté Figure D10.8.

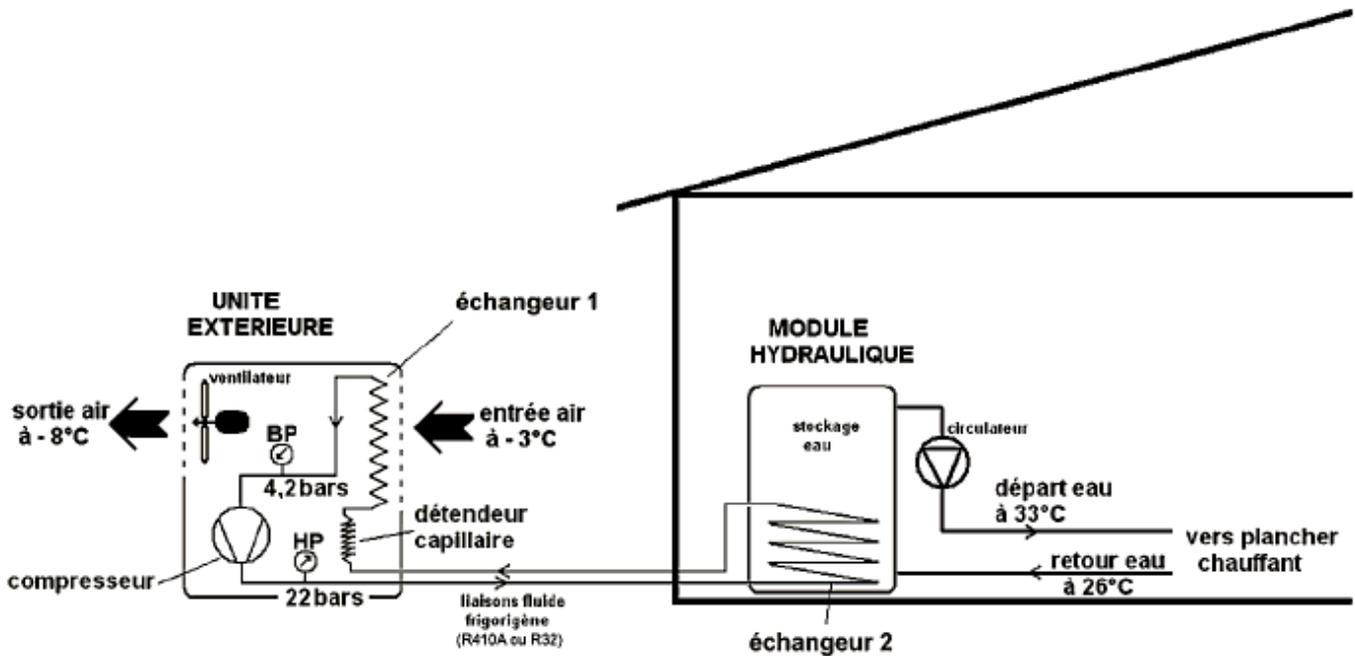


FIGURE D10.8

- /3 6 À l'aide de la figure D10.8, identifier la source chaude et la source froide, ainsi que le système mécanique qui échange un travail avec le fluide de la pompe à chaleur.

Réponse

- ① ◇ **Source chaude** : le stockage d'eau (en contact avec l'échangeur 2) qui va alimenter le circuit du plancher chauffant ($T_{\text{eau}} \nearrow$ dans l'échangeur 2) ;
- ① ◇ **Source froide** : air extérieur qui cède de l'énergie, et voit sa température diminuer.
- ① ◇ **Échange de travail** au niveau du compresseur.



On étudie dans cette partie le fonctionnement réel de la pompe à chaleur fonctionnant avec le fluide R410A. Cette pompe à chaleur est composée des organes thermodynamiques suivants : un compresseur, un condenseur (dans lequel a lieu une liquéfaction), un détendeur et un évaporateur. Le fluide R410A subit alors les transformations suivantes :

- ◇ 1 → 2 : le fluide à l'état gazeux sous la pression $P_b = 4,2$ bars et à la température de -12°C subit une compression isentropique jusqu'à la pression $P_h = 22$ bars dans un compresseur ;
- ◇ 2 → 3 : le gaz entre dans le condenseur où il y subit dans un premier temps un refroidissement isobare selon une désurchauffe, pour atteindre un état de vapeur juste saturante ;
- ◇ 3 → 4 : toujours dans le condenseur, le fluide subit une liquéfaction jusqu'au liquide juste saturé à la pression P_h ;
- ◇ 4 → 5 : le liquide subit alors un sous-refroidissement isobare jusqu'à la température de 30°C et sort du condenseur ;
- ◇ 5 → 6 : le liquide entre dans le détendeur (adiabatique et sans partie mobile) pour y subir une détente jusqu'à la pression P_b ;
- ◇ 6 → 7 : le fluide entre dans l'évaporateur pour y subir une vaporisation totale à la pression P_b pour se retrouver sous forme de vapeur juste saturante ;
- ◇ 7 → 1 : avant de sortir de l'évaporateur, la vapeur juste saturante subit une surchauffe avant de rentrer dans le compresseur.

Pour un fluide en écoulement permanent à travers un organe thermodynamique à une entrée et une sortie, on rappelle le premier principe industriel :

$$\Delta_{(e,s)}(h + e_c + e_p) = w_i + q$$

avec h l'enthalpie massique du fluide, e_c son énergie cinétique massique, e_p son énergie potentielle massique, w_i le travail massique et q le transfert thermique reçu par le fluide.

Dans la suite on négligera les variations d'énergies cinétique et potentielle massiques devant la variation d'enthalpie massique. On négligera les pertes de charges dans les canalisations.

Sur la Figure D10.8 figurent les deux échangeurs (échangeur 1 et 2) de la pompe à chaleur : l'un est le condenseur, l'autre est l'évaporateur.

- /3 [7] Au contact de quelle source doit être mis le condenseur ? Identifier l'échangeur concerné présent sur la Figure D10.8 en justifiant la réponse.

Réponse

Dans un condenseur, le fluide se liquéfie et cède de l'énergie ① ($\Delta h_{\text{liq}} < 0$) ; or dans une PAC le fluide cède de l'énergie à la source chaude ① : ainsi c'est le **condenseur** qui est en contact avec la source chaude, c'est l'**échangeur 2**. ①



- /3 [8] Au contact de quelle source doit être mis l'évaporateur ? Identifier l'échangeur concerné présent sur la Figure D10.8 en justifiant la réponse.

Réponse

Dans un évaporateur, le fluide s'évapore en recevant de l'énergie ① ($\Delta h_{\text{vap}} > 0$) ; or dans une PAC le fluide reçoit de l'énergie de la source froide ① : ainsi c'est l'**évaporateur** qui est en contact avec la source froide, c'est l'**échangeur 1**. ①



- /3 [9] En appliquant le premier principe industriel à l'écoulement permanent à travers le détenteur, en déduire la nature de la transformation subie par le fluide.

Réponse

$$\Delta h + \underbrace{\Delta e_c + \Delta e_p}_{=0, \text{négligés}} \stackrel{\textcircled{1}}{=} \underbrace{w_i}_{\substack{\text{parties} \\ \text{mobiles}}_{=0}} + \underbrace{q}_{\substack{\text{adiabatique}}_{=0}}$$

$$\Leftrightarrow \Delta h \stackrel{\textcircled{1}}{=} 0 \qquad \text{donc isenthalpique } \textcircled{1}$$



- /4 [10] La transformation subie par le fluide dans le compresseur est considérée isentropique dans un premier temps. Comment peut-on justifier cette hypothèse ?

Réponse

Le compresseur est **calorifugé** et le passage du fluide y est **rapide**, ce qui assure que l'évolution soit **adiabatique** dans un cas idéal ①. De plus, on veut limiter les irréversibilités pour minimiser \mathcal{S}_c et s'approcher du cycle idéal réversible ①. On a donc

$$\Delta \mathcal{S}_{\text{comp}} \stackrel{\textcircled{1}}{=} \underbrace{\mathcal{S}_{\text{ech}}}_{\substack{\text{adiabatique}}_{=0}} + \underbrace{\mathcal{S}_c}_{\substack{\text{réversible}}_{=0}} = 0 \qquad \text{donc isentropique } \textcircled{1}$$



On fournit Figure D10.9 le diagramme enthalpique du fluide R410A en annexe, à rendre la copie **si complété**. En plus des isothermes côté gaz, dont les températures sont indiquées en bas à droite ($-40, -30 \dots$) ainsi que sur les deux côtés de la courbe en cloche, figurent les isentropiques dont les valeurs sont indiquées en haut à droite (1700, 1725...), suivies des isochores (6, 8...), et pour finir les isotitres à l'intérieur de la courbe en cloche, dont les valeurs sont indiquées en bas au centre (0,1, 0,2...). Les isothermes côté liquides ne sont pas tracées car implicites en considérant le liquide incompressible et indilatable.

- /9 [11] À l'aide des transformations subies par le fluide, placer les différents points et tracer le cycle effectué par le fluide, notés de 1 à 7, sur le diagramme. On précisera et commentera le sens d'évolution le long de ce cycle.

Réponse

- ① ① Intersection isobare 4,2 bars et isotherme -12°C
- ① ② Intersection isobare 22 bars et isentropique de ①
- ① ③ Intersection isobare 22 bars et courbe de rosée
- ① ④ Intersection isobare 22 bars et courbe d'ébullition
- ① ⑤ Intersection isobare 22 bars et isotherme 30°C , **verticale car phase incompressible**
- ① ⑥ Intersection isobare 4,2 bars et isenthalpique de ⑤
- ① ⑦ Intersection isobare 4,2 bars et courbe de rosée

Le cycle est tracé dans le sens direct ①, soit $\mathcal{W} > 0$: c'est un cycle **récepteur**, cohérent avec le fait que ce soit une pompe à chaleur ①.



- /4 12 Déterminer par un calcul le titre massique du seul point du cycle dans un état diphasique. Comparer le résultat avec la position du point par rapport aux isotitres tracées sur le diagramme.

Réponse

On a :

$$x_g = \frac{\text{LM}}{\text{LG}} = \frac{h_6 - h_L}{h_G - h_L} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} h_6 = 249 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \\ h_L = 171 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \\ h_G = 414 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \end{cases}$$

A.N. : $x_g \approx 0,32$

ce qui est cohérent étant donné sa proximité avec l'isotitre $x_g = 0,30$ ①.



- /6 13 Déterminer à l'aide du diagramme :

- ◇ le travail massique indiqué reçu par le fluide de la part du compresseur ;
- ◇ le transfert thermique massique reçu par le fluide à la traversée du condenseur ;
- ◇ le transfert thermique massique reçu pas le fluide à la traversée de l'évaporateur.

Réponse

$$\Delta h_{12} = w_i \Leftrightarrow w_{\text{comp}} = h_2 - h_1 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} h_1 = 421 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \\ h_2 = 470 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \end{cases}$$

A.N. : $w_{\text{comp}} = 49 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

$$\Delta h_{25} = q_C \Leftrightarrow q_{\text{cond}} = h_5 - h_2 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} h_5 = 249 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \\ h_2 = 470 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \end{cases}$$

A.N. : $q_{\text{cond}} = -221 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

$$\Delta h_{61} = q_F \Leftrightarrow q_{\text{évap}} = h_1 - h_6 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} h_6 = 249 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \\ h_1 = 421 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \end{cases}$$

A.N. : $q_{\text{évap}} = 172 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

On retrouve bien

$$\Delta h_{\text{cycle}} = w_{\text{comp}} + q_{\text{cond}} + q_{\text{évap}} = 0$$



- /4 14 Quel est l'intérêt de la surchauffe ?

Réponse

Avec surchauffe, le point 1 est décalé vers la droite et avec lui le point 2 ($1 \rightarrow 2$ isentropique) ; ainsi, $|q_{\text{cond}}| = h_2 - h_5 \nearrow$, donc on **augmente la production** ①, alors que $w_{\text{comp}} \approx \text{cte}$ puisque les abscisses se déplacent ensemble, donc on **garde le même coût** ① ; finalement, l'**efficacité augmente** ①. De plus, on s'assure que la compression s'effectue dans le domaine de la vapeur sèche, ce qui évitera d'endommager le compresseur par éventuelle présence de liquide dans le fluide ①.



- /4 15 Calculer l'efficacité de la pompe à chaleur fonctionnant avec le fluide R410A, en donnant le résultat avec deux chiffres significatifs. Quel est l'intérêt d'une pompe à chaleur par rapport à un chauffage électrique ?

Réponse

$$e = \frac{-q_{\text{cond}}}{w_{\text{comp}}} \Rightarrow \text{A.N. : } e \approx 4,5$$

L'intérêt d'une pompe à chaleur par rapport à un chauffage électrique est que le **coût en énergie est moindre** ① : avec cette PAC, on consommera 4,5 fois moins d'énergie électrique pour chauffer la maison de la même manière qu'on le ferait avec un chauffage électrique ①.



/5 **16** En réalité, la transformation subie par le fluide à la traversée du compresseur n'est pas isentropique. L'efficacité réelle vaut 90% de l'efficacité calculée à la question précédente, et le reste du cycle est inchangé. Quelle est alors la température en sortie du compresseur ?

Réponse

Soit 2' :

$$\frac{h_{2'} - h_5}{h_{2'} - h_1} \stackrel{\textcircled{1}}{=} e_{\text{réel}} \Leftrightarrow h_{2'} = e_{\text{réel}} h_{2'} - e_{\text{réel}} h_1 + h_5$$

$$\Leftrightarrow h_{2'} (1 - e_{\text{réel}}) = h_5 - e_{\text{réel}} h_1 \Leftrightarrow h_{2'} = \frac{\textcircled{1} h_5 - e_{\text{réel}} h_1}{1 - e_{\text{réel}}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} e_{\text{réel}} = 0,9 \times e \approx 4,0 \\ h_5 = 249 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \\ h_1 = 421 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \end{cases}$$

A.N. : $h_{2'} \approx 478 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

Ainsi, en plaçant le point 2' sur le diagramme $\textcircled{1}$, on estime la température par rapport aux isothermes et on trouve $T_{2'} \approx 75^\circ\text{C}$. $\textcircled{1}$



II/C Remplacement du fluide R410A par le fluide R32

Document 1 – source www.izi-by-edf-renov.fr



Dans la majorité des modèles de pompes à chaleur air/eau, la production de chaleur était réalisée avec un fluide surnommé R410A, un gaz fluoré qui est progressivement retiré du marché, depuis 2016, au bénéfice d'un autre, considéré comme plus compatible avec la question environnementale : le R32.

La réglementation européenne CE 517/2014, ou réglementation F-Gaz, a été mise en place dans l'ensemble de l'Union afin de cadrer l'usage des fluides fluorés. Entrée en vigueur au 1er janvier 2015, elle a pour objectif final de réduire les émissions de gaz à effet de serre à hauteur de 80%, d'ici 2050.

Répondant aux exigences européennes sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le gaz R32 est un atout pour les nouvelles pompes à chaleur arrivant sur le marché. Voici ses différents avantages :

- ◇ Un impact 75% moins élevé sur l'environnement par rapport aux autres fluides frigorigènes tels que le R410A grâce à un PRG (Pouvoir de Réchauffement Global) à 675 kg éq CO₂.
- ◇ Le R32 permet d'obtenir un gain de performance thermique de 6 à 7% par rapport aux équipements alimentés en R410A.
- ◇ Sa performance augmentée permet de réaliser des économies sur votre facture énergétique et de rendre votre habitat moins énergivore.
- ◇ La composition du fluide le rend plus manipulable, avec la possibilité de le charger dans votre système de chauffage à l'état liquide comme gazeux, contrairement au R410A.
- ◇ À composant unique et donc totalement pur, il est plus facilement recyclable et a un impact nul sur la couche d'ozone

On fait l'hypothèse que le cycle subit par le fluide R32 est approximativement le même que celui du fluide R410A. Le tableau suivant donne les valeurs massiques pour les points 1 à 7 :

Points	1	2	3	4	5	6	7
h en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	518	588	512	268	254	254	510

/3 **17** Vérifier le gain de performance annoncé dans le document 1.

Réponse

$$e_{\text{R32}} = \frac{h_2 - h_5}{h_2 - h_1} \Rightarrow \text{A.N. : } e_{\text{R32}} \stackrel{\textcircled{1}}{=} 4,8$$

Comparaison **15** : gain $\stackrel{\textcircled{1}}{=} \frac{e_{\text{R32}} - e_{\text{R410A}}}{e_{\text{R410A}}} \Rightarrow \text{A.N. : gain} \stackrel{\textcircled{1}}{=} 7\%$ cohérent avec le document 1



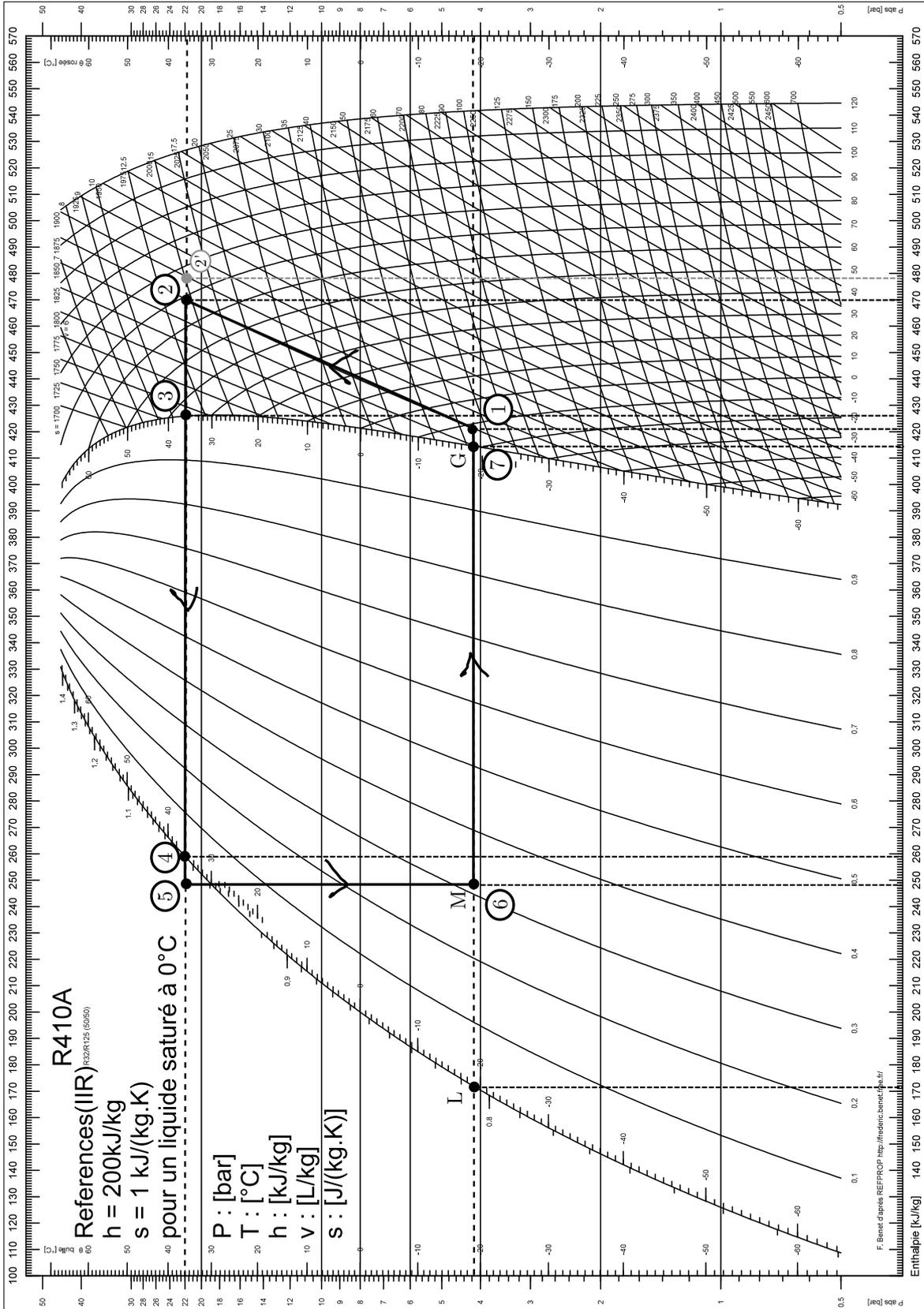


FIGURE D10.9 – Annexe question 11.