

Devoir d'entraînement de physique n° 1

Cet énoncé comporte deux problèmes.

Problème 1**Thermodynamique dans la cuisine**

Le jeune Toto, physicien en herbe, applique ses connaissances à diverses situations rencontrées lors de la préparation de son repas. Les trois parties de ce problème sont indépendantes.

On notera T la température thermodynamique (exprimée en kelvins), et θ la « température Celsius ».

Données :

- capacité thermique massique de l'eau liquide $c_e = 4,2 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- capacité thermique massique de la glace $c_g = 2,1 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- capacité thermique massique du fer $c_f = 450 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- température de fusion de la glace $\theta_{\text{fus}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ à la pression $P_a = 1,0 \text{ bar}$;
- température de vaporisation de l'eau $\theta_{\text{vap}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ à la pression P_a ;
- enthalpie de fusion de la glace $l_{\text{fus}} = 334 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ à la pression P_a ;
- enthalpie de vaporisation de l'eau $l_{\text{vap}} = 2260 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ à la pression P_a .

A. Réchauffer la sauce au four à micro-ondes

Le four à micro-ondes de Toto a une puissance \mathcal{P} réglable entre 100 W et 1000 W ; cette puissance est entièrement transférée aux aliments placés à l'intérieur.

Toto l'utilise pour réchauffer $m_s = 200 \text{ g}$ de sauce tomate, contenue dans un bocal de capacité thermique négligeable. La capacité thermique massique de la sauce sera assimilée à celle de l'eau.

A1. Calculer la durée t_1 nécessaire pour réchauffer la sauce de sa température initiale θ_0 à la valeur souhaitée θ_1 . Faire l'application numérique avec $\mathcal{P} = 500 \text{ W}$, $\theta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Il est possible d'aller deux fois plus vite avec la puissance maximale, mais quel est l'inconvénient pratique de chauffer trop vite ?

A2. Pouvez-vous expliquer en une ou deux phrases la différence entre le principe de fonctionnement d'un four à micro-ondes et celui d'un four électrique classique ? Pourquoi l'utilise-t-on uniquement pour les aliments (et pas par exemple dans l'industrie pour faire fondre des minerais ou des métaux) ?

B. Faire chauffer l'eau des pâtes

Toto a versé une masse $m_e = 2,0 \text{ kg}$ d'eau dans une casserole en fer de masse $m_f = 300 \text{ g}$. Il souhaite faire bouillir l'eau pour faire cuire des pâtes, au moyen d'une plaque chauffante électrique de puissance $\mathcal{P}_e = 1500 \text{ W}$. Le chauffage est suffisamment lent pour que la température de l'ensemble {eau, casserole} soit toujours uniforme. L'air environnant est à la pression constante $P_a = 1,0 \text{ bar}$ et à la température constante $T_0 = 293 \text{ K}$. Lorsque l'eau et la casserole sont à une température T , les fuites thermiques vers l'air environnant sont de la forme $\delta Q = -k(T - T_0) dt$ avec $k = 5,0 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$.

B1. Montrer que la température $T(t)$ de l'eau liquide et de la casserole obéit à l'équation différentielle :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{k}{m_e c_e + m_f c_f} T = \frac{\mathcal{P}_e + k T_0}{m_e c_e + m_f c_f}.$$

B2. Donner sa solution, sachant que l'ensemble est initialement à T_0 , et en déduire la valeur asymptotique T_{lim} de la température ; faire l'application numérique. En réalité, jusqu'à quelle température T_2 est valable l'expression trouvée ? Calculer la durée t_2 nécessaire pour atteindre cette température.

B3. On a conseillé à Toto de mettre un couvercle sur la casserole pour chauffer plus vite. Lequel des paramètres précédents se trouve modifié par l'ajout du couvercle ? Tracer sur un même graphe les courbes $T(t)$ obtenues pour deux valeurs différentes de ce paramètre, en faisant bien apparaître les

différentes températures citées précédemment ; il sera utile de calculer la pente initiale de la courbe. En déduire dans quelles conditions l'ajout du couvercle permet d'accélérer le chauffage de façon importante.

B4. Quelques secondes après l'ajout des pâtes, l'eau se remet à bouillir. Déterminer la masse δm d'eau qui se vaporise pendant une durée dt , et en déduire l'équation différentielle vérifiée par la masse $m(t)$ d'eau restant dans la casserole. Au bout de combien de temps l'eau serait-elle entièrement vaporisée ?

C. Rafrâchir une boisson

Toto souhaite rafrâchir une boisson de volume 330 mL, soit $m_b = 330$ g, à la température ambiante $\theta_0 = 20$ °C. Pour cela il verse dans le verre (de capacité thermique négligeable) quatre glaçons de 5,0 g chacun, sortis du congélateur à la température $\theta_g = -18$ °C.

C1. En supposant négligeables les échanges thermiques entre le contenu du verre et l'extérieur, déterminer l'état final obtenu (température et état physique).

Problème 2

Étude d'un climatiseur

On s'intéresse au fonctionnement d'un appareil de climatisation, dont le but est de maintenir une température constante ($T_0 = 20$ °C) dans un local été comme hiver. Le climatiseur fonctionne donc en pompe à chaleur l'hiver, en machine frigorifique l'été. Les transferts thermiques du climatiseur se font avec 2 sources :

- L'intérieur de la pièce (à T_0).
- L'atmosphère extérieure (on prendra $T_1 = 0$ °C en hiver ; $T_2 = 40$ °C en été afin de prévoir des conditions « extrêmes »).

Le fluide caloporteur qui effectue des cycles dans l'appareil est l'ammoniac. Ses caractéristiques thermodynamiques sont résumées dans le diagramme entropique $T(S)$ où sont représentées :

- les isenthalpiques (H est donné en kJ/kg) ;
- les isobares (représentées par $\cdots\cdots\cdots$ dans le domaine « vapeur sèche »).

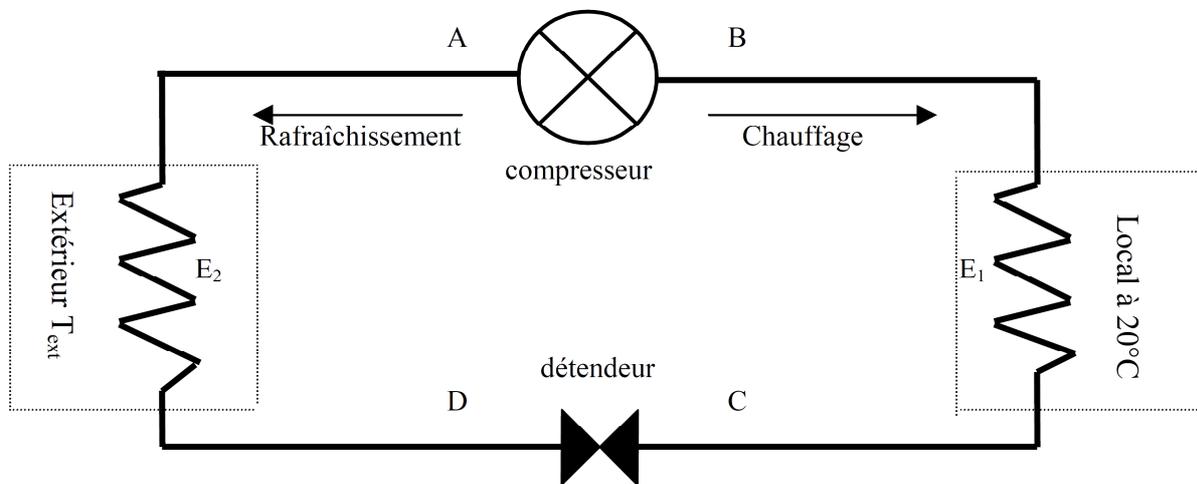
On donne, par ailleurs, les pressions de vapeur saturante $P_s(T)$ aux trois températures d'étude :

$$P_s(0^\circ\text{C}) = 4,3 \text{ bars}$$

$$P_s(20^\circ\text{C}) = 8,2 \text{ bars}$$

$$P_s(40^\circ\text{C}) = 15 \text{ bars}$$

On se limitera à l'étude du climatiseur en **régime permanent**. Par un jeu de vannes adéquat, le fluide peut circuler dans un sens pour chauffer la pièce (A, B, C, D, A) ; dans l'autre sens pour la rafrâchir (B, A, D, C, B).



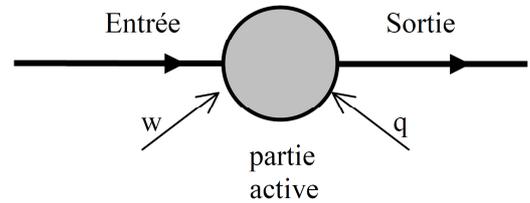
Le circuit comporte 2 parties isobares :

- L'une à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à 20°C (côté local) ;
- L'autre à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à T_{ext} (côté atmosphère extérieure).

Par ailleurs, on rappelle qu'à la traversée d'une partie active (compresseur, détendeur ou échangeur) l'énergie reçue par le fluide circulant en régime permanent vérifie :

$$\Delta h = h_s - h_e = w + q$$

si h_e et h_s sont les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie ; w et q étant le travail et la chaleur **utiles** reçus (c'est-à-dire échangés avec l'**extérieur** du circuit, excluant le travail des forces de pression) par kilogramme de fluide traversant la partie active.



Le fluide subit des échanges de chaleur isobares (sans recevoir de travail utile) dans les échangeurs E_1 et E_2 avec les 2 sources de chaleur (local et atmosphère extérieure). Un système de ventilation permet d'améliorer les échanges thermiques : la température du fluide est celle de la source d'échange à la sortie de chacun d'entre eux.

Le compresseur comprime de manière adiabatique le fluide à l'état gazeux de la plus faible à la plus forte pression. L'unité de masse de fluide traité y reçoit le travail utile w .

Le fluide subit une détente adiabatique, sans échange de travail utile, dans le détendeur (la détente est donc isenthalpique).

1. Généralités :

- 1-1- Comment réalise-t-on un détendeur (détente isenthalpique d'un fluide) ? Quel autre nom porte une telle détente ?
- 1-2- Le premier principe de thermodynamique est bien vérifié dans une partie active ; c'est pourtant Δh (et non Δu) qui est égal à $(w + q)$... Expliquer qualitativement (sans entrer dans le détail d'une démonstration) cette différence.
- 1-3- En supposant que l'ammoniac, à l'état gazeux dans le compresseur, est assimilable à un gaz parfait de coefficient adiabatique γ constant, exprimer le rapport T_s/T_e (des températures absolues de sortie et d'entrée dans le compresseur) en fonction de γ et P_s/P_e (rapport des pressions de sortie et d'entrée du compresseur).
- 1-4- Par lecture du graphe, déduire les enthalpies massiques de vaporisation de l'ammoniac à 0°C , 20°C et 40°C .

2. Fonctionnement hivernal du climatiseur (chauffage) :

Dans ce cas :

- l'échangeur E_1 est un condenseur : l'ammoniac y entre en B sous forme de vapeur sèche ; il en ressort sous forme de liquide saturant en C, à la température T_0 du local ;
- l'échangeur E_2 est un évaporateur : le mélange liquide vapeur qui entre en D se vaporise totalement pour ressortir sous forme de vapeur saturante en A à la température de l'atmosphère extérieure $T_1 = 0^\circ\text{C}$.

- 2-1- Tracer le cycle (en l'orientant) de l'ammoniac sur le diagramme entropique. Trouver graphiquement sa température T_B à la sortie du compresseur.
- 2-2- Déterminer (graphiquement), pour 1kg d'ammoniac traité (on rappelle que E_1 , E_2 et le compresseur sont des parties actives) :
 - Le travail w fourni par le compresseur au fluide ;
 - La chaleur q_c reçue par le fluide (de la part du local) lors du passage dans l'échangeur E_1 ;
 - La chaleur q_f reçue par le fluide (de la part de l'extérieur) lors de son passage dans E_2 .
 Faire un bilan énergétique du cycle.
- 2-3- Définir et calculer le coefficient de performance η du climatiseur. Quel intérêt présente une telle installation par rapport à un chauffage par chaudière ? Quel serait le coefficient si le fluide effectuait des cycles de Carnot en effectuant les échanges thermiques avec les mêmes sources de chaleur ? En quoi le cycle effectué diffère-t-il d'un cycle de Carnot ?
- 2-4- Quelle est la fraction massique de vapeur X_D à la sortie du détendeur ?
- 2-5- En utilisant le résultat de la question 1-3-, évaluer l'indice adiabatique γ du gaz ammoniac.

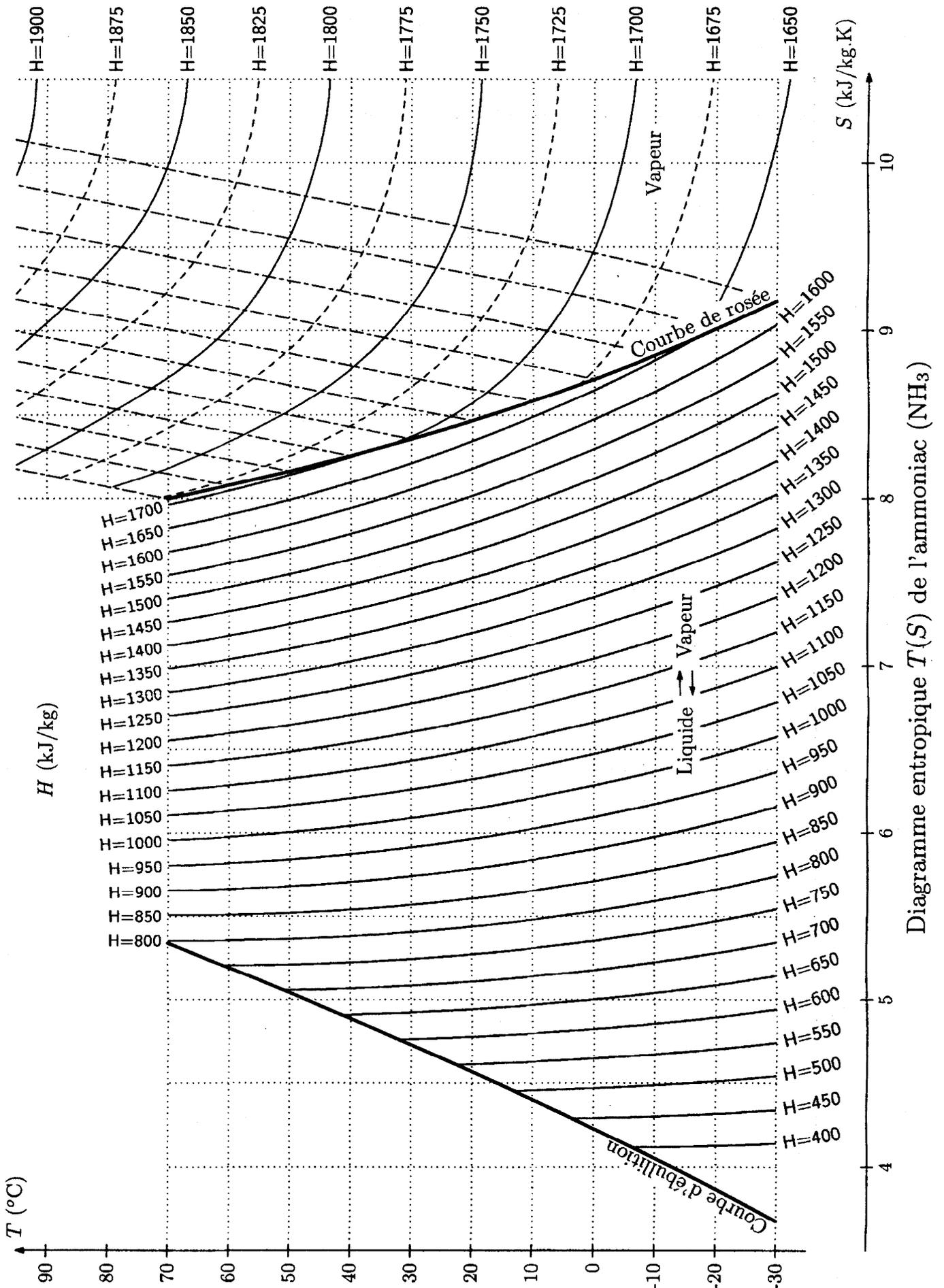
3. Fonctionnement estival du climatiseur (rafraîchissement) :

Les rôles des 2 échangeurs sont inversés : E_1 est un évaporateur ; E_2 un condenseur.

- 3-1- Tracer le cycle (orienté) de l'ammoniac sur le diagramme entropique (on affectera les points de l'indice ')). En déduire sa température T'_A à la sortie du compresseur.
- 3-2- Déterminer (graphiquement), pour 1 kg d'ammoniac traité (même remarque qu'en **2-2-**) :
 - Le travail w' fourni par le compresseur ;
 - La chaleur q'_1 reçue (de la part de la pièce) lors du passage dans l'échangeur E_1 ;
 - La chaleur q'_2 reçue (de la part de l'extérieur) lors du passage dans E_2 .
- 3-3- Définir et calculer le nouveau coefficient de performance η' du climatiseur.

Complément

Tracer également les deux cycles sur le diagramme $P(h)$ de la deuxième page de l'annexe. Retrouver alors les valeurs précédentes.



R717

Ref: R. Döring, Klima+Kälte ingenieur Ki-Extra 5, 1978

DTU, Department of Energy Engineering
Energy Systems, Refrigeration
s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 99-10-25

