

# Thermodynamique industrielle

## 5 Exercices

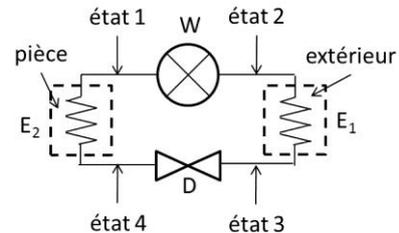
### 5.1 Fonctionnement d'une climatisation

On s'intéresse au fonctionnement d'un appareil de climatisation domestique à fluide caloporteur R134-a, dont le but est de maintenir une température moyenne constante dans une pièce en été.

#### Hypothèses :

Dans toute l'étude, on suppose l'écoulement du fluide permanent et unidimensionnel, on néglige toute variation d'énergie cinétique massique et d'énergie potentielle massique.

Le compresseur W aspire le fluide sous une basse pression, le comprime en lui fournissant un travail et le refoule à haute pression. Pour simplifier, on considère que la compression est adiabatique et réversible. Le détendeur D, calorifugé, et sans pièce mécanique mobile, est muni d'un pointeau qui permet de réguler le débit du fluide. La chute de pression est due aux variations de section dans cet élément.



Les échangeurs thermiques  $E_1$  et  $E_2$  sont isobares (suivant le fonctionnement il s'agit d'un évaporateur ou d'un condenseur), dépourvus de pièce mécanique mobile. Ils ressemblent à des radiateurs, offrant ainsi une grande surface de contact thermique avec l'air du local à climatiser (pour l'un) et l'air extérieur (pour l'autre). On suppose que les pressions sont uniformes dans chacune des deux parties du circuit (la partie haute pression où la pression est fixée à 10 bar et la partie basse pression où elle vaut 2 bar). Cela revient à négliger les pertes de charge, sauf dans le détendeur.

#### Question préliminaire

Préciser et justifier la nature des transformations du fluide (isobare, isotherme, isenthalpique ou isentropique) au cours du cycle.

#### Fonctionnement du climatiseur

On désire refroidir la pièce en contact avec l'échangeur  $E_2$ . Dans ce cas, l'échangeur  $E_1$  est un condenseur : le fluide y entre en (2) à haute pression sous forme de vapeur sèche, il en ressort sous forme de liquide saturant en (3), à la température  $T_3$ .  $E_2$  est un évaporateur : le fluide y est admis à basse pression sous forme de mélange liquide-vapeur en (4) et se vaporise totalement pour ressortir sous forme de vapeur sèche saturante en (1) à la température  $T_1$ .

1) Tracer, en justifiant son orientation et en expliquant la nature de chaque étape, l'allure du cycle du fluide en diagramme entropique ( $T,s$ ). Montrer que le fonctionnement correspond bien à un refroidissement de la source froide en contact avec l'air de la pièce.

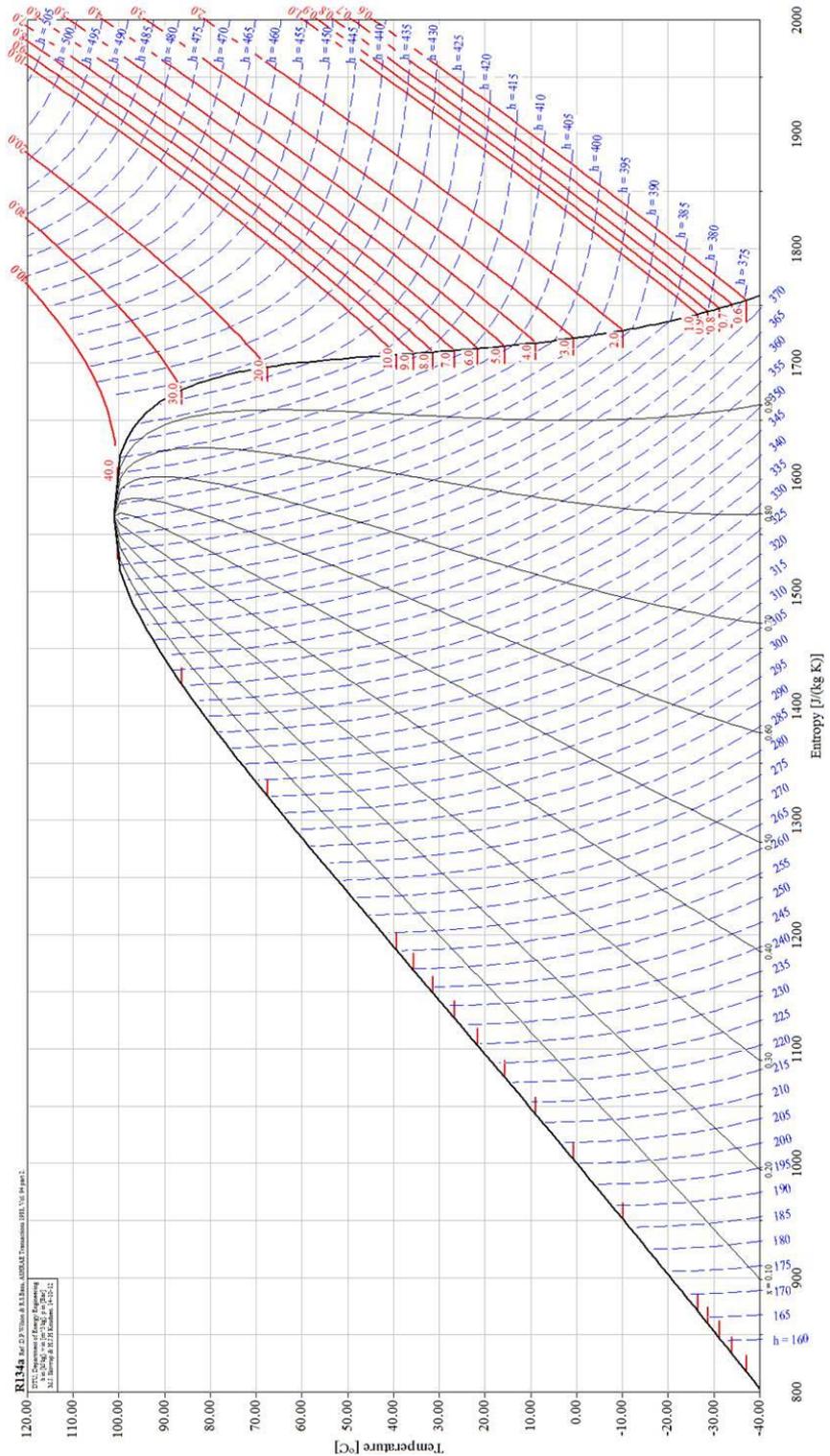
2) On dispose du diagramme ( $T,s$ ) du fluide R134-a. Evaluer graphiquement la chaleur latente de vaporisation de fluide R134-a pour une pression de 2 bar, quel intérêt présente, de ce point de vue, l'utilisation de ce fluide ?

Reporter dans un tableau les valeurs relevées sur ce diagramme de la pression, température, enthalpie massique et titre en vapeur aux différents points remarquables du cycle (correspondant aux différents états du fluide de 1 à 4).

3) Déterminer les expressions littérales et numériques des transferts énergétiques massiques  $w_i$  et  $q_i$  en fonction des enthalpies massiques aux points remarquables du cycle. Appliquer le premier

principe au système fermé constitué d'une unité de masse de fluide décrivant le cycle complet. Commenter.

4) Définir et calculer le coefficient de performance (noté COP) du climatiseur. Quel serait ce coefficient (noté  $COP_{Carnot}$ ) si le fluide décrivait un cycle de Carnot en effectuant les échanges thermiques avec les mêmes sources de chaleur ? En quoi le cycle étudié diffère-t-il d'un cycle de Carnot ? Evaluer le rendement du cycle par rapport au cycle de Carnot :  $\eta = \frac{COP}{COP_{Carnot}}$ .



## 5.2 Pompe à chaleur avec pseudo-source

Une pompe à chaleur fonctionne entre l'air de la pièce de température  $T_p(t)$  à un instant  $t$  et de capacité thermique  $C = 125,8 \times 10^3 \text{ J.K}^{-1}$  et l'atmosphère à la température  $T_{\text{ext}} = 275 \text{ K}$ . A  $t = 0$ ,  $T_p(0) = T_{\text{ext}} = 275 \text{ K}$ . On souhaite amener la pièce à la température  $T_f = 298 \text{ K}$ . La pièce est supposée parfaitement isolée. La pression vaut  $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$ . Données :  $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ ;  $\gamma = 1,4$ .

1) Préciser le sens des échanges énergétiques de la pompe à chaleur. On se place en régime permanent. La pompe à chaleur reçoit le travail électrique  $W$ . La température de la pièce vaut  $T_{\text{pièce}} = 298 \text{ K}$  et la température de l'air extérieur vaut :  $T_{\text{ext}} = 275 \text{ K}$ . Calculer l'efficacité de la pompe à chaleur en supposant le cycle réversible.

2) On tient maintenant compte de la capacité thermique finie de l'air de la pièce. On considèrera un cycle élémentaire réversible de durée  $dt$ . Calculer la durée  $\Delta t$  de chauffage de la pièce pour l'amener de la température  $T_p(0) = T_{\text{ext}} = 275 \text{ K}$  à la température finale  $T_f = 298 \text{ K}$  sachant que la puissance électrique reçue vaut  $P = 500 \text{ W}$ . Comparer à la durée  $\Delta t_2$  si la pièce avait été chauffée par une résistance de puissance  $500 \text{ W}$ .

3) On suppose maintenant le fonctionnement de la pompe à chaleur irréversible et on appelle  $S_c$  l'entropie créée par irréversibilité lors de la nouvelle durée du chauffage  $\Delta t'$  de la valeur  $T_p(0) = T_{\text{ext}} = 275 \text{ K}$  à  $298 \text{ K}$ . Exprimer  $S_c$  en fonction de  $\Delta t'$ ,  $\Delta t$ ,  $P$  et  $T_{\text{ext}}$ .

## 5.3 Pompe à chaleur

Pour chauffer une maison, on utilise une pompe à chaleur recevant un transfert thermique de l'atmosphère extérieure dont la température est  $T = 283 \text{ K}$ . La machine est constituée d'un détendeur D, d'un évaporateur E, d'un compresseur T et d'un condenseur C. Le fluide utilisé, dit caloporteur, est le fréon, considéré comme un gaz parfait.

1) Le fonctionnement de la machine correspond au cycle suivant :

- Compression adiabatique réversible  $1 \rightarrow 2$ , le fluide passant de l'état de vapeur saturante sèche ( $T = T_1 = 5^\circ\text{C}$ ,  $P = P_1 = 3,6 \text{ bar}$ ) à celui de vapeur sèche sous la pression  $P_2 = 15,2 \text{ bar}$ . Le fluide reçoit de l'extérieur le travail  $w_{\text{ext}}$

- Isobare  $2 \rightarrow 3$ , le fluide sortant du condenseur sous forme de liquide de saturation ( $T = 60^\circ\text{C}$ ,  $P = 15,2 \text{ bar}$ ), le fluide ne reçoit de l'extérieur qu'un transfert thermique  $q_{2 \rightarrow 3}$

- Détente isenthalpique  $3 \rightarrow 4$  dans le détendeur, amenant le fluide dans les conditions ( $T = 5^\circ\text{C}$ ,  $P_1 = 3,6 \text{ bar}$ ), le fluide ne reçoit ni travail extérieur ni transfert thermique

- Isobare  $4 \rightarrow 1$ , le fluide sortant de l'évaporateur sous forme de vapeur saturante sèche ( $T = T_1 = 5^\circ\text{C}$ ,  $P = P_1 = 3,6 \text{ bar}$ ). Le fluide ne reçoit de l'extérieur que le transfert thermique  $q_{4 \rightarrow 1}$

a) Représenter ce cycle dans le diagramme de Clapeyron. Préciser le signe des transferts thermiques et travaux reçus à chaque étape.

b) Définir et déterminer l'efficacité  $e$  de la pompe à chaleur : on utilisera les valeurs numériques fournies dans le tableau ci-après et la capacité thermique massique à pression constante du gaz fréon (pour  $T = 60^\circ\text{C}$ )  $c_p = 0,879 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

$t(^{\circ}\text{C})$	$P(\text{bar})$	$h_l(\text{kJ.kg}^{-1})$	$h_v(\text{kJ.kg}^{-1})$	$s_v(\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$
5	3,6	4,7	157	0,565
60	15,2	61	178	0,552
40	15,2	39	-	-

c) Faire un bilan d'énergie. On déterminera tous les transferts thermiques et travaux et on vérifiera en particulier la valeur de leur somme.

d) Déterminer également la composition du mélange diphasé au point 4.

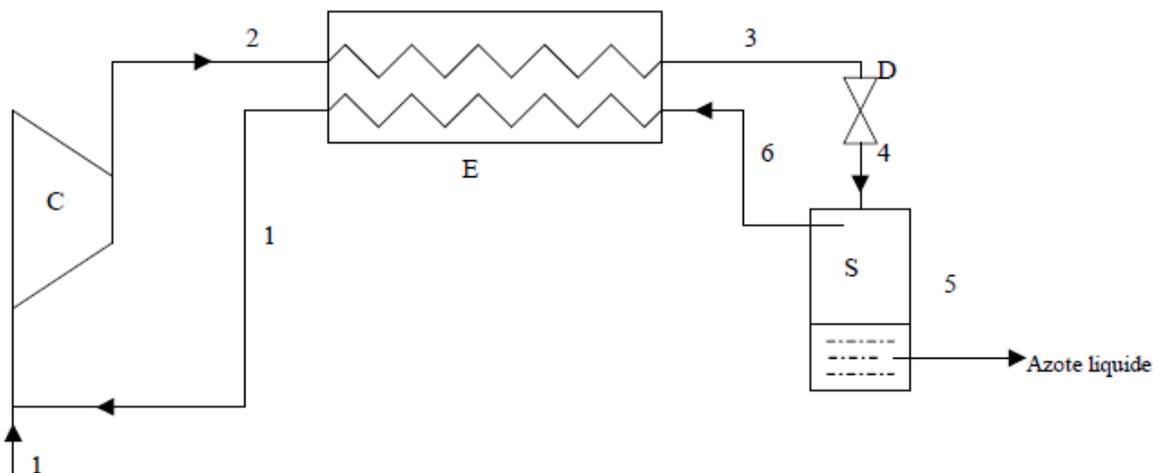
2) Afin d'améliorer l'efficacité de la machine, on modifie l'état final de la transformation 2→3. En 3, le fluide est désormais dans l'état liquide à la température  $T_0 = 40^\circ\text{C}$  et sous la pression  $P = 15,2 \text{ bar}$ . Donner la nouvelle valeur du coefficient  $e$ .

#### 5.4 Procédé de liquéfaction de l'azote

La figure ci-dessous représente le schéma de principe du procédé Linde-Hampson utilisé pour produire de l'azote liquide (état 5). L'azote entre dans le compresseur C dans l'état 1 ( $P_1 = 1,00 \text{ bar}$  ;  $T_1 = 290 \text{ K}$ ) ; il y subit une compression qui l'amène à l'état 2. Il est alors refroidi à pression constante ( $P_3 = P_2$ ) dans l'échangeur E, avant d'être détendu jusqu'à la pression atmosphérique ( $P_4 = P_5 = P_6 = P_1 = 1,00 \text{ bar}$ ) dans le détendeur D. L'azote liquide (état 5) est extrait du séparateur S ; la vapeur saturée sèche d'azote (état 6) est utilisée pour refroidir l'azote dans l'échangeur E ; on admettra que cette vapeur d'azote est ramenée à l'état 1 à la sortie de l'échangeur E.

L'étude de ce procédé de liquéfaction sera effectuée en utilisant les propriétés thermodynamiques réelles lues sur le diagramme entropique fourni avec le sujet.

Dans tout le problème, on négligera les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle de situation.



##### 1) Etude de la compression

On admet que la compression de l'azote s'effectue de façon isotherme et mécaniquement réversible de l'état 1 jusqu'à l'état 2 ( $P_2 = 200 \text{ bar}$ ).

- Placer les points 1 et 2 sur le diagramme entropique de l'azote et déterminer leurs enthalpies et entropies massiques.
- Calculer la quantité de chaleur fournie par le thermostat par kilogramme d'azote comprimé.
- Déterminer le travail échangé entre l'unité de masse d'azote et les parties mobiles du compresseur.

##### 2) Performances du cycle

La détente, qui s'effectue dans le détendeur D, fait passer l'azote de 200 bar à 1,00 bar : le détendeur ne comporte pas de parties mobiles. Le détendeur, le séparateur S, l'échangeur E et tous les circuits de liaison sont supposés parfaitement calorifugés.

Déterminer, en justifiant le résultat, la nature de la transformation dans le détendeur.

Placer les points 5 et 6 sur le diagramme et déterminer leurs enthalpies et entropies massiques. Vérifier la cohérence des lectures en comparant les variations d'enthalpie et d'entropie entre ces deux points.

##### 3) Masse d'azote liquide obtenue et puissance du compresseur

On note  $y$  la masse d'azote liquide obtenue par kilogramme d'azote comprimé.

En écrivant le premier principe de la thermodynamique pour le séparateur et pour l'échangeur, déterminer l'expression littérale de  $y$  en fonction des enthalpies massiques  $h_1$ ,  $h_2$  et  $h_5$ .

En déduire la valeur de  $y$ , puis l'enthalpie massique et l'entropie massique des points 3 et 4 que l'on placera sur le diagramme.

Calculer le travail de compression dépensé par kilogramme d'azote liquide produit. En déduire la puissance du compresseur lorsqu'on produit 50 kilogrammes par heure d'azote liquide.

Diagramme de l'azote

