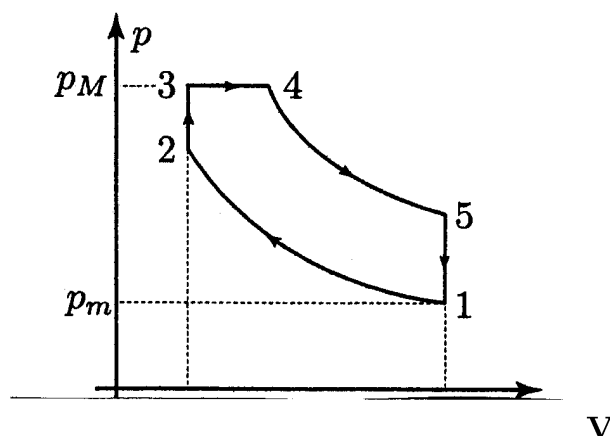


Moteur Diesel

Dans les moteurs Diesel à double combustion, le cycle décrit par l'air est celui représenté en coordonnées de Clapeyron (p , V) par le diagramme de la figure ci-contre.

- Après la phase d'admission qui amène l'air au point 1 du cycle, celui-ci subit une compression adiabatique réversible jusqu'au point 2.
- Après injection du carburant en 2, la combustion s'effectue d'abord de façon isochore de 2 à 3 puis se poursuit de façon isobare de 3 à 4.
- La phase de combustion est suivie d'une détente adiabatique réversible de 4 à 5 puis d'une phase d'échappement isochore de 5 à 1.



Au point 1 du cycle, la pression $p_m = 1$ bar et la température $T_m = 293$ K sont minimales.

La pression maximale (aux points 3 et 4) est $P_M = 60$ bar et la température maximale (au point 4) est $T_M = 2073$ K.

On suppose que l'air est un gaz parfait diatomique et on notera respectivement C_p et C_v ses capacités thermiques molaires à pression et à volume constants.

On donne :

Le rapport volumétrique de compression : $\beta_v = \frac{V_M}{v_m} = 17$ avec V_M le volume maximal (points 1 et 5)

et v_m

La masse molaire de l'air : $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$

La constante des gaz parfaits : $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$ et $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$

1. Calculer la température T_2 au point 2 du cycle.
2. Calculer la température T_3 au point 3 du cycle.
3. Calculer la température T_5 au point 5 du cycle.
4. Quelle est, en kJ.kg^{-1} , la quantité de chaleur Q_c reçue par un kg d'air au cours de la phase de combustion entre les points 2 et 4 ?
5. Quelle est, en kJ.kg^{-1} , la quantité de chaleur Q_f échangée avec le milieu extérieur par un kg d'air entre les points 5 et 1 ?
6. En déduire, en kJ.kg^{-1} , le travail W échangé par un kg d'air avec le milieu extérieur au cours d'un cycle.
7. En déduire le rendement r de ce dispositif.

Etude d'un appareil de climatisation.

On s'intéresse au fonctionnement d'un appareil de climatisation, dont le but est de maintenir une température constante ($T_o = 20^\circ\text{C}$) 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_o)
- L'atmosphère extérieure (on prendra $T_{ext} = T_1 = 0^\circ\text{C}$ en hiver ; $T_{ext} = T_2 = 40^\circ\text{C}$ en été afin de prévoir des conditions « extrêmes »).

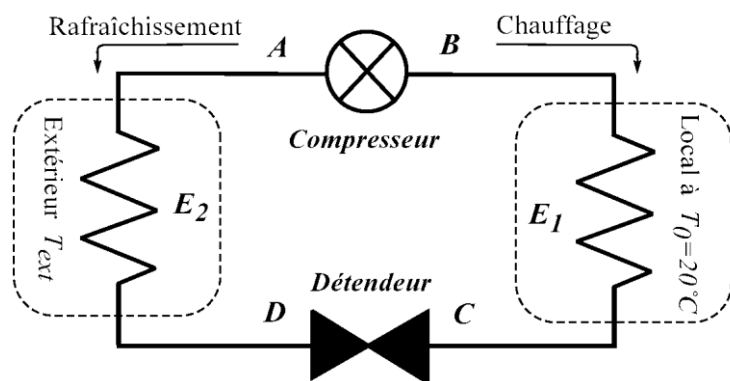
Le fluide caloporteur qui effectue des cycles dans l'appareil est l'ammoniac. Ses caractéristiques thermodynamiques sont résumées dans le diagramme entropique $T(s)$ où sont représentées :

- Les isenthalpiques (« H » est donné en kJ/kg [il s'agit donc de l'enthalpie massique h])
- Les isobares (représentées par $_ \cdot _ \cdot _ \cdot _ \cdot _ \cdot _$ dans le domaine « vapeur sèche »).

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

$$P_1 = P^*(0^\circ\text{C}) = 4,3 \text{ bars} \quad P_o = P^*(20^\circ\text{C}) = 8,2 \text{ bars} \quad P_2 = P^*(40^\circ\text{C}) = 15 \text{ bars}$$

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 rafraîchir (B, A, D, C, B).



Le circuit comporte 2 parties

isobares :

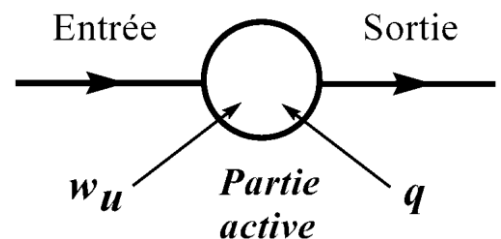
- L'une à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à $T_o = 20^\circ\text{C}$ (côté local) ;
- L'autre à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à T_{ext} (côté atmosphère extérieure).

Par ailleurs, lorsqu'on néglige les variations d'énergie cinétique et les variations d'altitude, 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 :

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

si h_e et h_s , sont les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie ; w_u 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 du fluide en amont et en aval de la partie active) 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 quasi-statique 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_u .

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

1. Généralités.

1.1. En deux phrases de rédaction : 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 $w_u + q$. Faire une démonstration complète et rigoureuse de cette relation.

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 $\frac{T_s}{T_e}$ (des températures absolues de sortie et d'entrée dans le compresseur) en fonction de γ et de $\frac{P_s}{P_e}$, (rapport des pressions de sortie et d'entrée du compresseur).

1.4. Par lecture du graphe, déduire (avec une précision de 10 kJ.kg^{-1}) les enthalpies massiques de vaporisation (= chaleurs latentes de vaporisation) de l'ammoniac à $T_1 = 0^\circ\text{C}$, $T_o = 20^\circ\text{C}$ et $T_2 = 40^\circ\text{C}$.

Les paliers de vaporisation qui viennent d'être considérés permettent de trouver quelles courbes correspondent, dans le domaine « vapeur sèche », aux isobares P_1 , P_o et P_2 : placer les valeurs de ces trois isobares sur le graphe.

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_o 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 et en justifiant) de l'ammoniac sur le diagramme entropique (y faire apparaître les points A , B , C et D).

Trouver graphiquement la température T_B de l'ammoniac à la sortie du compresseur.

2.2. Déterminer (graphiquement), pour 1 kg d'ammoniac traité (on rappelle que E_1 , E_2 et le compresseur sont des parties actives) :

- Le travail w_u 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 ensuite un bilan énergétique du cycle.

2.3. Définir et calculer le coefficient de performance (= efficacité thermique) η du climatiseur.

2.4. Démontrer et calculer quel serait le coefficient de performance η_c 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 ?

2.5. Quelle est la fraction massique de vapeur $x_v(D)$ à la sortie du détendeur ? On demande une démonstration complète et précise.

2.6. En utilisant le résultat de la question 1.3, évaluer l'indice adiabatique γ du gaz ammoniac.

3. Fonctionnement estival du climatiseur (rafraîchissent).

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

La condensation est toujours totale : le fluide à la sortie du condenseur est sous forme de liquide saturant.

3.1. Tracer le cycle (en l'orientant et en justifiant) de l'ammoniac sur le diagramme entropique ; on affectera les points de l'indice ' : $(B' \rightarrow A' \rightarrow D' \rightarrow C' \rightarrow B')$.

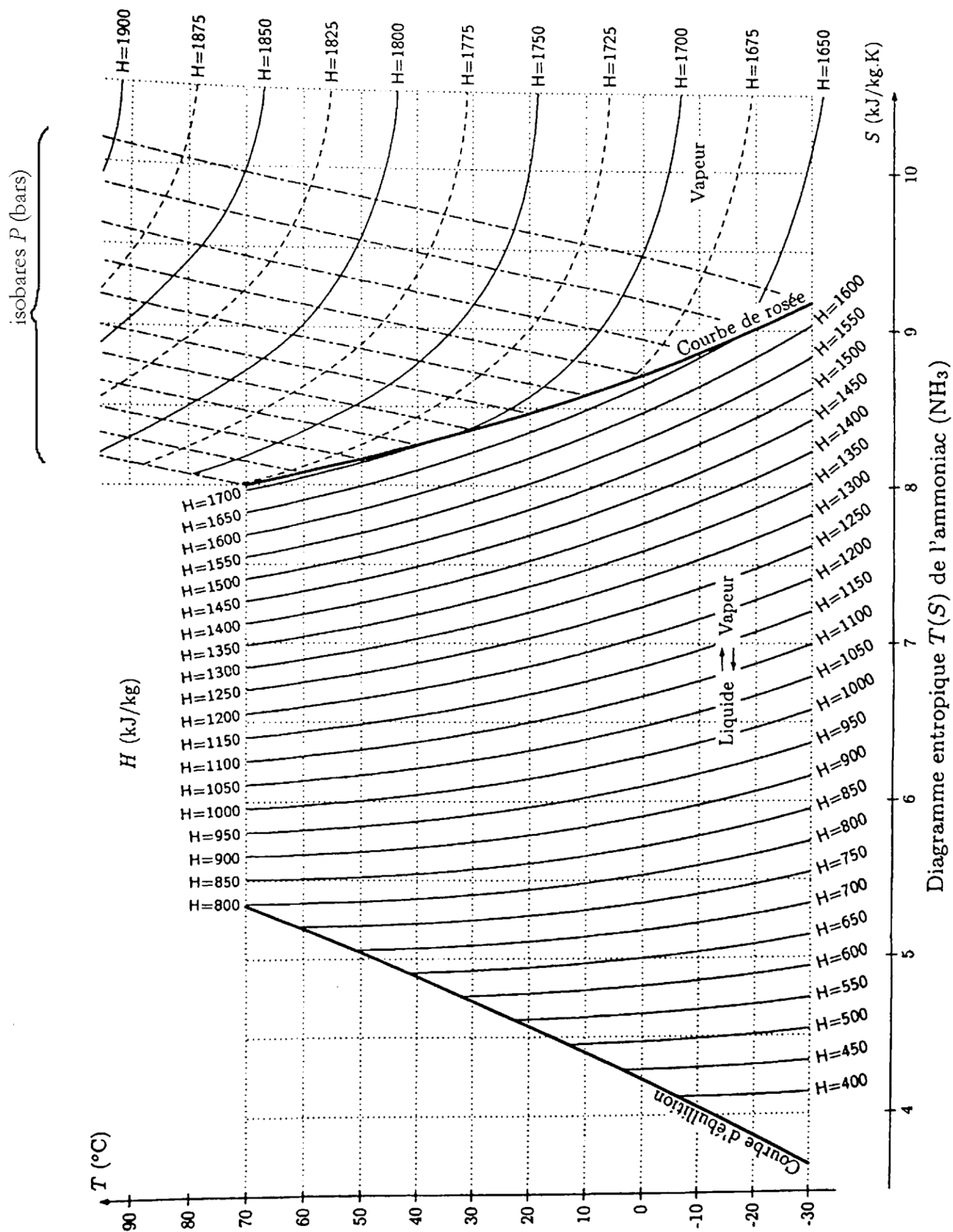
- Préciser les états physiques en chacun des quatre points particuliers du cycle (vapeur saturante ? liquide saturant ? vapeur sèche ? mélange liquide + vapeur ?)
- Déterminer graphiquement les enthalpies massiques $h(A')$, $h(B')$, $h(C')$ et $h(D')$.
- Déterminer graphiquement la température T_A' à la sortie du compresseur.

3.2. Déterminer (graphiquement), pour 1 kg d'ammoniac traité (même remarque qu'en 2.2) :

- Le travail w_u' fourni par le compresseur ;
- La chaleur q_1' reçue par le fluide (de la part de la pièce) lors du passage dans l'échangeur E_1 ;
- La chaleur q_2' reçue par le fluide (de la part de l'extérieur) lors du passage dans E_2 .

3.3. Définir et calculer le nouveau coefficient de performance (= efficacité frigorifique) η' du climatiseur.

3.4. Quel serait le nouveau coefficient de performance η'_C , si le fluide effectuait des cycles de CARNOT en effectuant les échanges thermiques avec les mêmes sources de chaleur ?



Etude d'une machine frigorifique. Diagramme ($\ln p$, h).

On étudie le cycle frigorifique de l'ammoniac qui subit les transformations suivantes :

- Une vapeur saturante dans l'état A est comprimée de manière isentropique jusqu'à un état B .
- De l'état B le fluide est comprimé de façon isobare pour l'amener à un liquide saturant.
- Entre les états C et D on procède à une détente de Joule Kelvin qui est une transformation isenthalpique. Dans l'état D le titre en vapeur est x .
- Entre les états D et A une détente isobare est effectuée.

On note E le point se trouvant à l'intersection de l'isobare p_B et de la courbe de rosée.

Données :

$$T_A = 263 \text{ K} \quad ; \quad T_C = 293 \text{ K} \quad ; \quad p_A = 2,8 \text{ bar} \quad ; \quad p_B = 8,6 \text{ bar}$$

Capacité calorifique massique à pression constante pour l'état gazeux $c_p = 2,12 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Coefficient isentropique $\gamma = 1,29$

Chaleurs latentes de vaporisation : $L(263 \text{ K}) = 1300 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad ; \quad L(293 \text{ K}) = 1180 \text{ kJ.kg}^{-1}$

1. Représenter le cycle dans le diagramme ($\ln p$, h) en faisant figurer les différents points de ce cycle.
2. A l'aide de ce diagramme, déterminer la température T_B du point B . Peut-on retrouver ce résultat par un calcul ?
3. Déterminer graphiquement la température T_E du point E . On pourra par la suite se servir de cette température comme une donnée du texte.
4. En utilisant le diagramme ($\ln p$, h) déterminer le titre en vapeur x au point D .
Retrouver ce résultat en utilisant les données de l'énoncé.
5. Déterminer l'expression des transferts thermiques lors de chaque transformation. Faire les applications numériques.
Retrouver graphiquement les résultats précédents.
6. Déterminer le travail massique w sur le cycle.
Est-il différent du travail utile w_u sur ce même cycle ? Justifier votre réponse.
7. Déterminer l'efficacité frigorifique e du dispositif.

