

2024/2025

Thème : Bilans d'énergie thermodynamique

APPLICATIONS DIRECTES**1. Etude d'un turboréacteur**

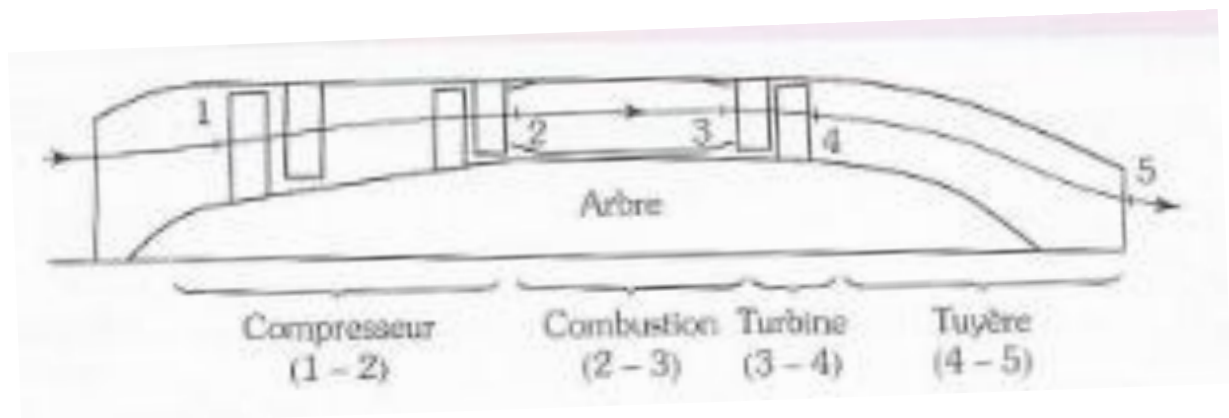
1. Rappeler l'expression du 1er principe de la thermodynamique appliqué à un fluide en écoulement stationnaire au travers d'une machine thermique.
2. Exprimer la variation massique de l'enthalpie d'un gaz parfait.
3. Rappeler les conditions d'application de la loi de Laplace, l'énoncer puis l'exprimer en fonction des variables T et P .

La fonction d'un turboréacteur est de transformer de l'énergie thermique fournie à l'air lors d'une combustion en énergie cinétique.

On se place en régime permanent de débit massique d'air $\dot{m} = 1 \text{ kg.s}^{-1}$ et on suppose que l'air est un gaz parfait de capacité thermique massique à pression constante $c_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$ constante et $\gamma = 1,4$.

La tuyère est horizontale, la vitesse de l'écoulement est supposée constante et faible, sauf à la sortie de la tuyère.

Les évolutions à l'intérieur des compresseurs, turbines et tuyère sont adiabatiques et réversibles, les évolutions dans les chambres de combustion sont isobares.



Le compresseur axial aspire l'air ambiant :

$P_1 = 1 \text{ bar}$ et $T_1 = 288 \text{ K}$. Son taux de compression $P_2/P_1 = 6,15$.

Après compression l'air est chauffé dans la chambre de combustion jusqu'à la température $T_3 = 1250 \text{ K}$. Après détente partielle dans la turbine axiale, l'air est envoyé dans la tuyère où la détente s'effectue à pression ambiante $P_5 = 1 \text{ bar}$.

Le compresseur est uniquement entraîné par la turbine qui lui transmet intégralement la puissance mécanique que lui fournit l'écoulement.

4. Noter sur le schéma de principe de fonctionnement du turboréacteur les valeurs connues des températures et pression. Placer ces points sur un diagramme de Clapeyron (P , v). On représentera les isothermes du problème.

5. Donner les expressions littérales puis numériques de :

- a) la température T_2 et de la puissance mécanique reçue par le fluide au cours de la compression.
- b) la puissance thermique fournie à l'air lors de la combustion.
- c) la puissance mécanique reçue par l'air lors de son passage dans la turbine.
- d) la température T_4 , puis la pression P_4 à la sortie de la turbine.
- e) la température T_5 et de la vitesse c_5 à la sortie de la tuyère.
- e) l'énergie cinétique massique de l'air à la sortie de la tuyère.
- f) Définir, puis calculer la valeur du rendement thermique de ce turbocompresseur.

On souhaite modéliser ce turbocompresseur par une machine cyclique ditherme idéale.

6. Représenter le schéma de principe d'une telle machine. Identifier les sources chaudes et froides et donner leurs températures. Définir son rendement puis démontrer son expression en fonction des températures des sources. AN et conclure.

2. Efficacité d'un réfrigérateur à ammoniac : diagramme (P, h)

1. Rappeler l'expression de la variation d'enthalpie lors d'une vaporisation. Quel est son signe ? En déduire la relation d'ordre entre l'enthalpie d'un liquide et d'un gaz.

On donne en annexe le diagramme P (pression), h (enthalpie massique) de l'ammoniac.

Les isothermes sont représentées en rouge.

Les isentropiques sont représentées en bleu.

Les isochores massiques en vert.

Les isotitres massiques en vapeur en noir.

2. Représenter l'allure du diagramme (P, h) puis, préciser, en justifiant, la position de l'état d'équilibre liquide vapeur, le domaine de l'état liquide, le domaine de l'état gazeux.
3. Quelle est la forme des isothermes dans le domaine de l'équilibre liquide vapeur ?
4. Si on assimile la vapeur sèche à un gaz parfait, quelle relation lie l'enthalpie massique et la température ? En déduire l'allure des isothermes dans le diagramme (P, h).
D'après l'allure du diagramme réel dans quel domaine peut-on assimiler la vapeur sèche à un gaz parfait ?

On étudie le cycle décrit par l'ammoniac dans le réfrigérateur :

En D, l'ammoniac est sur la courbe de rosée à la pression $P = 1$ bar.

L'ammoniac est ensuite comprimé réversiblement et adiabatiquement jusqu'au point A où il atteint une pression de 20 bar.

Puis il subit une liquéfaction totale à pression constante, jusqu'au point B, qui est sur la courbe d'ébullition.

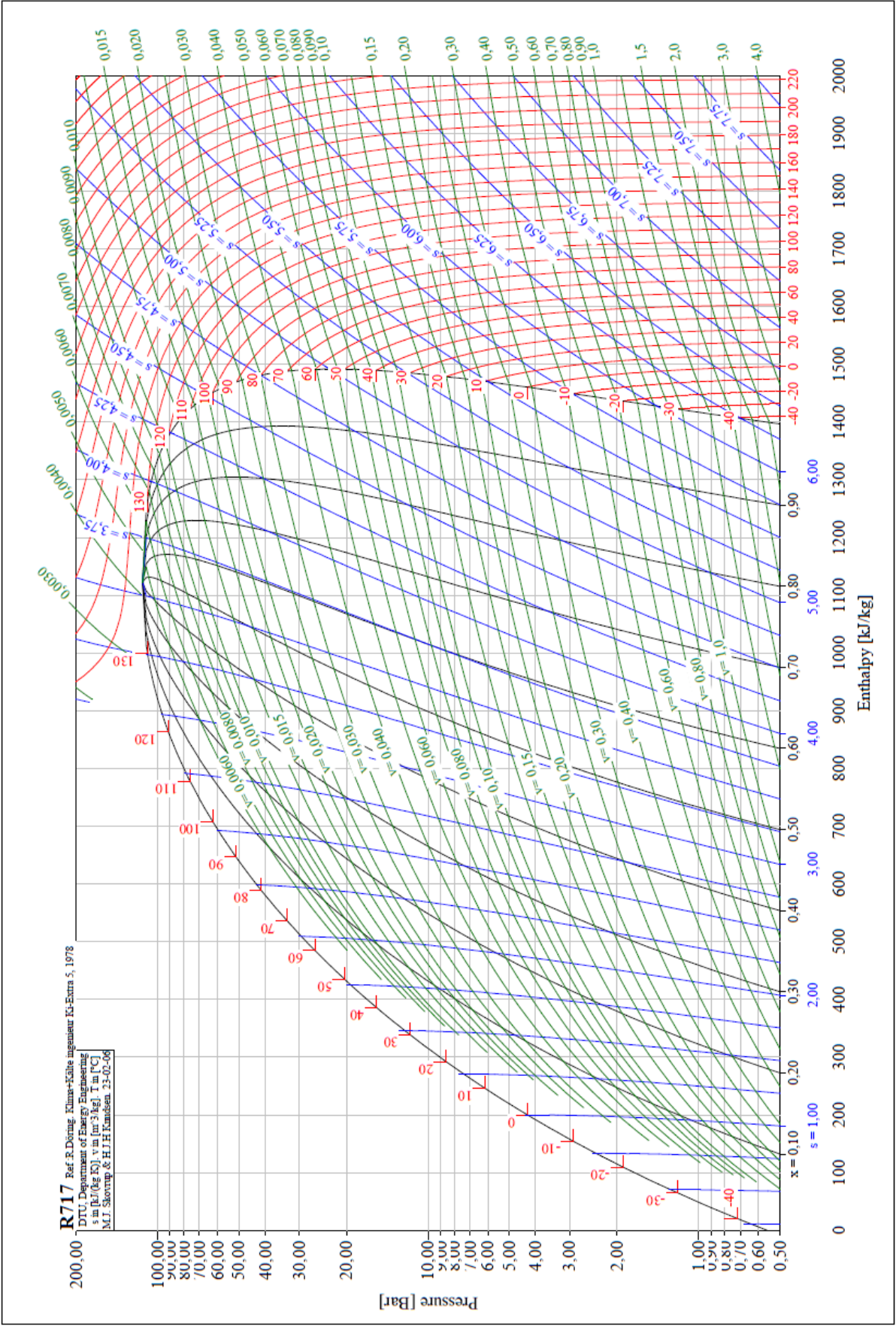
Ensuite le liquide passe dans une vanne calorifugée, où il se vaporise partiellement jusqu'à atteindre la pression atmosphérique, point C.

Le reste du liquide se vaporise alors totalement pour atteindre le point D.

5. Rappeler l'expression du 1er principe de la thermodynamique appliqué à un fluide parfait en écoulement stationnaire au travers d'une machine thermique. En déduire la variation d'enthalpie du fluide au cours de la transformation BC
 - a. Placer les points A, B, C et D sur le diagramme. Préciser la valeur de la température en chaque point.
 - b. Exprimer le transfert thermique reçu par une unité de masse de fluide au cours de chaque transformation.
 - c. Donner le titre massique en vapeur en C.
 - d. Définir l'efficacité de ce réfrigérateur et la calculer numériquement.

On souhaite modéliser ce turbocompresseur par une machine cyclique ditherme idéale.

6. Représenter le schéma de principe d'une telle machine. Identifier les sources chaudes et froides et donner leurs températures. Définir son efficacité puis démontrer son expression en fonction des températures des sources. AN et conclure.



EXERCICES

I. Calorimétrie et serpentins :

Dans un calorimètre parfaitement calorifugé, de capacité thermique $C = 1700 \text{ J.K}^{-1}$ on immerge un serpentín de capacité thermique négligeable, parcouru par un liquide de capacité thermique massique constante $c = 1700 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ avec un débit massique $\dot{m} = 10^{-3} \text{ kg.s}^{-1}$ et une vitesse constants.

Le liquide entre dans le calorimètre à la température $\theta_1 = 80^\circ\text{C}$ et ressort, en équilibre thermique avec le calorimètre à la température $\theta(t)$. La température initiale du calorimètre est $\theta_0 = 15^\circ\text{C}$.

- Exprimer la puissance thermique reçue par le liquide dans le serpentín pendant une durée élémentaire dt , en fonction de $\dot{m}$, c , $\theta(t)$, θ_1 .
- Pendant cette même durée déterminer la puissance thermique reçue par le calorimètre. Quelle relation lie ces deux puissances ?
- En déduire une équation différentielle d'ordre 1 dont $\theta(t)$ est solution.
- Tracer l'allure de $\theta(t)$. On précisera les valeurs particulières
- Quelle est la température atteinte par le calorimètre lorsque 100 g de liquide l'ont traversé ?
- Le serpentín est maintenant parcouru par de l'hydrogène de débit massique $\dot{m} = 10^{-3} \text{ kg.s}^{-1}$ qui entre à la température θ_1 . Au bout de 100 s on note une température $\theta = 52,0^\circ\text{C}$. Déterminer la capacité thermique massique de l'hydrogène.

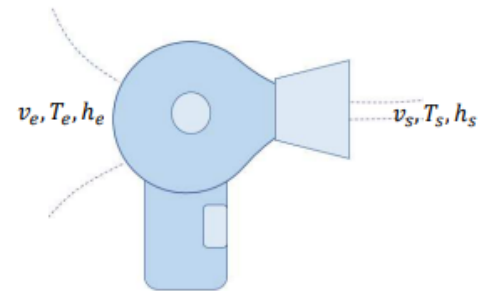
II. Rendement d'un sèche-cheveux

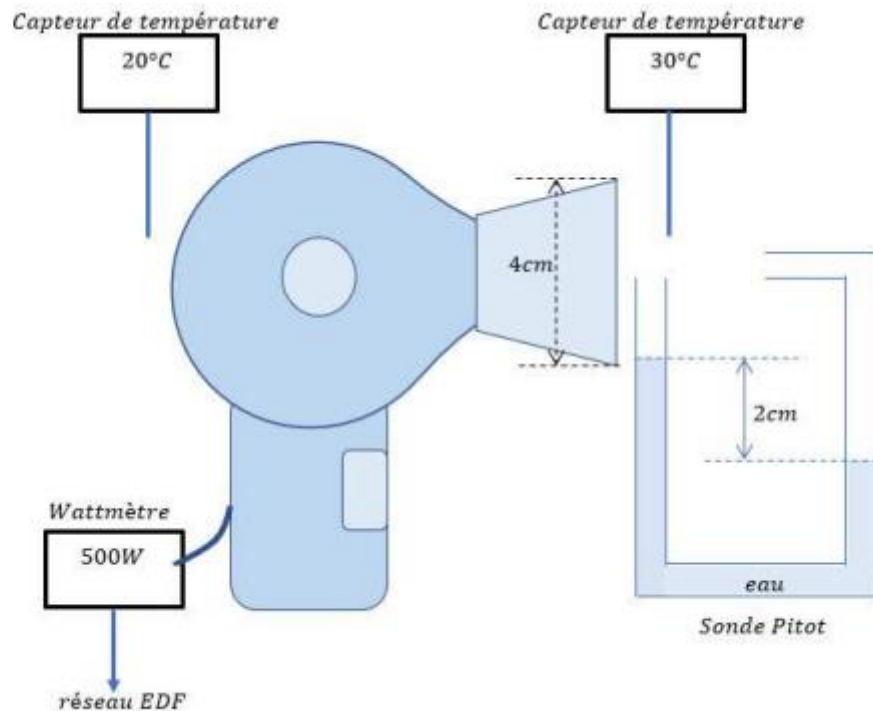
On considère l'écoulement de l'air à travers un sèche-cheveux. L'écoulement est supposé stationnaire, parfait et on va négliger les fluctuations de la masse volumique μ de l'air qui sera alors considérée comme uniforme $\mu \approx 1 \text{ kg.m}^{-3}$. On note $\dot{m}$ le débit massique de l'air circulant à travers le sèche-cheveux. Au cours de cet écoulement, l'air reçoit une puissance thermique P_{th} (par l'intermédiaire d'une résistance chauffante intégrée au sèche-cheveux) et une puissance mécanique $P_{méca}$ (par l'intermédiaire d'une hélice intégrée dans le sèche-cheveux). On note :

- v_e la vitesse de l'air entrant et v_s la vitesse de l'air sortant du sèche-cheveux (ces vitesses étant mesurées par rapport au sèche-cheveux immobile dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen). - T_e la température de l'air entrant et T_s la température de l'air sortant du sèche-cheveux.

- h_e l'enthalpie massique de l'air entrant et h_s l'enthalpie massique de l'air sortant du sèche-cheveux. Dans toute la suite, on négligera les variations d'énergie potentielle de pesanteur et on admettra que $v_e \ll v_s$. L'air sera également assimilé à un gaz parfait dont la capacité thermique massique à pression constante vaut $c_p = 1000 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

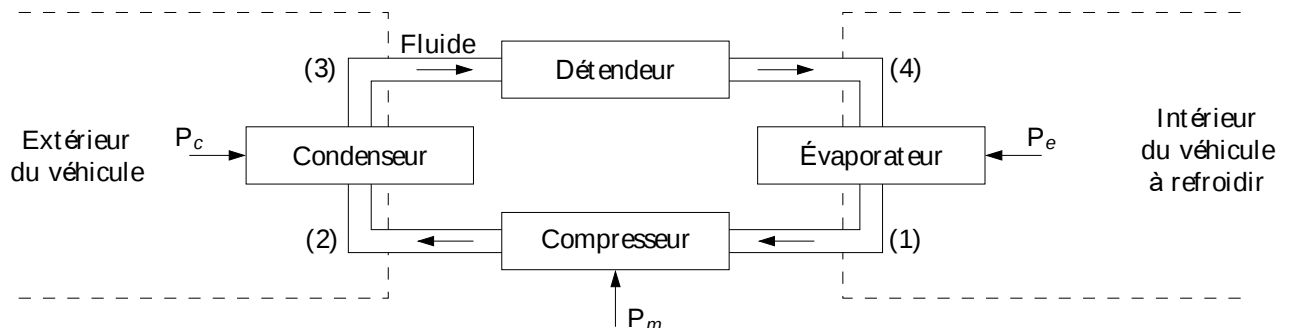
En utilisant les relevés des différents appareils de mesure utilisés pour cette expérience, déterminer le rendement de ce sèche-cheveux.





III. Climatisation d'un véhicule :

La quasi-totalité des véhicules neufs sont aujourd'hui équipés d'une climatisation. Pour refroidir l'air intérieur du véhicule, un fluide frigorigène, l'hydrofluorocarbure HFC connu sous le code R134a, effectue en continu des transferts énergétiques entre l'intérieur, l'extérieur du véhicule et le compresseur.



1. Les chlorofluorocarbures ou CFC comme le fréon, sont des fluides frigorigènes qui ont été très longtemps utilisés. Pourquoi ces fluides ne sont-ils plus utilisés aujourd'hui ? Le HFC, lui aussi sera bientôt interdit, pourquoi ?
2. Sur un schéma de principe d'une machine ditherme, identifier les transferts énergétiques et donner leur signe, entre le fluide R134a, le compresseur, la source froide et la source chaude. Quelle est la source représentant l'intérieur de l'habitacle ? l'extérieur ?

Sur le diagramme enthalpique (p, h) de l'hydrofluorocarbure HFC, de masse molaire $M = 32 \text{ g.mol}^{-1}$ sont représentés :

La courbe de saturation de l'équilibre liquide-vapeur (en trait fort)

Les isothermes pour des températures comprises entre -40°C et 160°C par pas de 10°C

Les isentropiques pour des entropies massiques comprises entre $1,70 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ et $2,25 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ par pas de $0,05 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

Les isotitres en vapeur sous la courbe de saturation pour des titres massiques en vapeur x_v variant de 0 à 1 par pas de 0,1

P est en bar et h en kJ.kg^{-1}

3. Indiquer sur le diagramme les domaines liquide, vapeur, équilibre liquide-vapeur.
4. Dans quel domaine du diagramme le fluide à l'état gazeux peut-il être considéré comme un gaz parfait ?

On étudie dans la suite l'évolution du fluide au cours d'un cycle en régime permanent.

5. Donner la relation entre l'enthalpie massique du fluide à l'entrée d'une machine h_e , celle à la sortie de la machine h_s , et les transferts mécaniques et thermiques massiques reçus par le fluide de la machine.

Dans l'évaporateur, il y a vaporisation isobare totale du fluide et la vapeur, en sortie, se trouve dans l'état (1) où la température est $T_1 = 5^\circ\text{C}$ et la pression $p_1 = 3$ bar.

6. Placer le point (1) sur le diagramme, relever l'enthalpie massique h_1 et l'entropie massique s_1 du fluide au point (1).

Le compresseur aspire la vapeur (1) et la comprime de façon isentropique avec un taux de compression $r = p_2/p_1 = 6$.

7. Déterminer p_2 . Placer le point (2) sur le diagramme, relever la température T_2 , l'enthalpie massique h_2 et l'entropie massique s_2 du fluide au point (2).
8. Déterminer la valeur du travail utile reçu par le fluide lors de son passage dans le compresseur. Commenter le signe.

En sortant du compresseur le fluide est refroidi de manière isobare dans le condenseur jusqu'à la température $T_3 = 60^\circ\text{C}$: point (3).

9. Placer le point (3) sur le diagramme. Relever la valeur de l'enthalpie massique h_3 .

Le fluide sortant du condenseur est détendu dans le détendeur supposé adiabatique jusqu'à la pression de l'évaporateur p_1 : point (4)

10. Montrer que la transformation dans le détendeur est isenthalpique.
11. Placer le point (4) sur le diagramme et tracer le cycle complet. Relever la température T_4 et le titre massique x_4 en sortie du détendeur.
12. En déduire le transfert thermique massique reçue par le fluide lors de son passage dans l'évaporateur. L'air à l'intérieur du véhicule est-il refroidi ?
13. Définir l'efficacité du climatiseur et calculer sa valeur.
14. Comparer à la valeur d'un climatiseur de Carnot fonctionnant entre la température de l'évaporateur et la température de liquéfaction à la pression p_2 . Commenter.

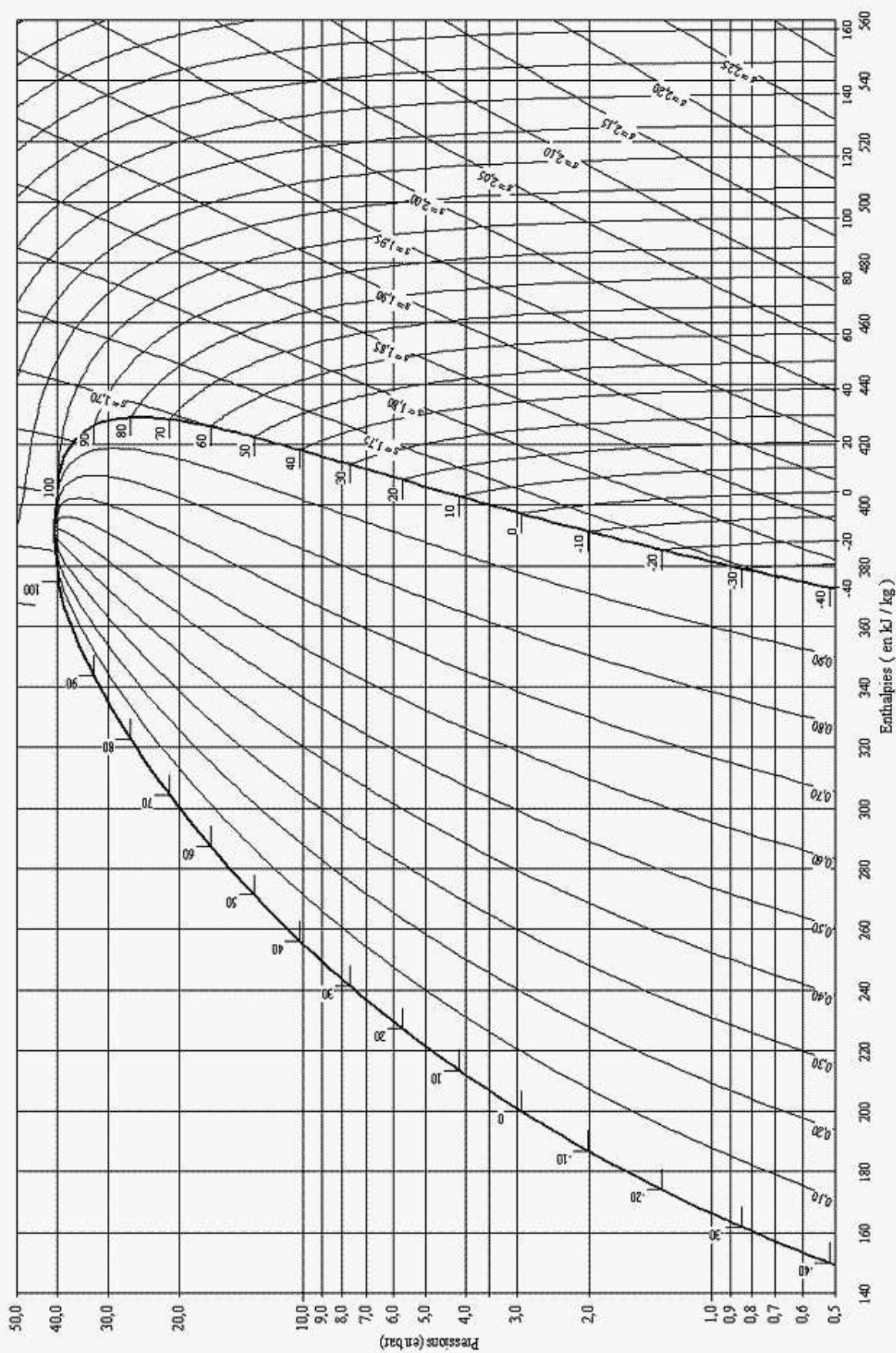


FIGURE 6 – Diagramme enthalpique de l'hydrofluorocarbhone HFC - R134a

IV. Procédé de Linde de liquéfaction du diazote (E3A MP 2019)

On étudie le processus de Linde-Hampson de liquéfaction du diazote.

Le principe de la machine est représenté en figure 10.

- Au repère 1, le diazote entre dans le compresseur, noté C, dans l'état 1 à la pression $P_1 = 1$ bar et à la température $T_1 = 290$ K.
- Dans le compresseur, le diazote subit une compression isotherme réversible qui l'amène au repère 2 à la pression $P_2 = 200$ bar.
- Le diazote sortant du compresseur passe dans l'échangeur thermique E (repère 3) où il y est refroidi à pression constante.
- Le détendeur D détend le gaz jusqu'à la pression atmosphérique P_1 . Le détendeur est un simple robinet et ne comporte donc pas de parties mobiles. À sa sortie, le diazote est un mélange de gaz et de liquide.
- Le liquide formé est extrait au niveau du séparateur S et la vapeur saturée (repère 6) est renvoyée dans l'échangeur thermique E. Le repère 5 ne fait pas partie du cycle. Le diazote gazeux est ramené à l'état 1 à la sortie de l'échangeur E.
- Le détendeur D, le séparateur S, l'échangeur E et tous les circuits de liaison sont supposés parfaitement calorifugés. Lors du passage dans le séparateur et l'échangeur thermique, les transformations sont considérées comme isobares.

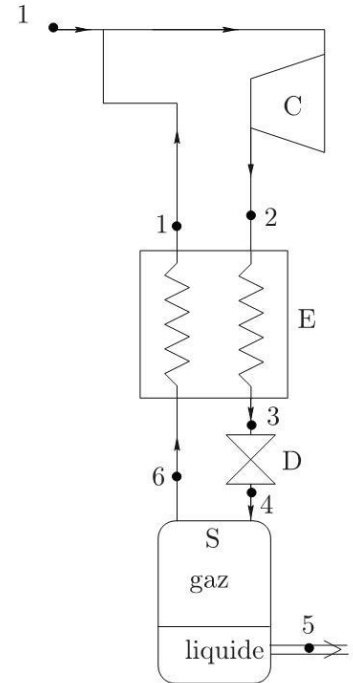


FIG. 10 - Cycle de Linde-Hampson

On néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle.

Le diagramme enthalpique (P, h) est donné ci-dessous.

1. Placer les points 1, 2, 5 et 6 sur le diagramme (P, h) du document réponse.
2. Par lecture graphique, déterminer pour ces points leurs enthalpies et entropies massiques.

On s'intéresse à la validité du modèle du gaz parfait.

3. Pour un gaz parfait, comparer les isothermes et les isenthalpes dans un diagramme (P, h).
4. En déduire à partir du diagramme, dans quel domaine de pression on peut considérer le diazote comme un gaz parfait.

On étudie maintenant la transformation $1 \rightarrow 2$ dans le compresseur.

5. Comment se simplifie le deuxième principe pour une transformation isotherme réversible ? En déduire l'expression du transfert thermique massique q_{12} . Faire l'application numérique.
6. En déduire le travail massique w_{12} fourni par le compresseur au système.

On s'intéresse à l'étude du détendeur (transformation $3 \rightarrow 4$) et du séparateur (transformation $4 \rightarrow 6$). On rappelle que l'étape 5 ne fait pas partie du cycle.

7. Déterminer la nature de la transformation $3 \rightarrow 4$.
8. On note y la fraction massique en **diazote liquide**. À partir du point 4, le diazote est

séparé en deux : le liquide d'enthalpie massique h_5 est extrait et le gaz d'enthalpie massique h_6 est envoyé dans l'échangeur thermique. Déterminer l'expression de h_4 en fonction de y , de l'enthalpie massique du liquide h_5 et celle du gaz h_6 .

On regarde maintenant l'échangeur thermique E (transformation $2 \rightarrow 3$ et $6 \rightarrow 1$).

9. Montrer en utilisant le premier principe que $h_3 - h_2 + (1 - y)(h_1 - h_6) = 0$.

10. En déduire l'expression de y en fonction des enthalpies massiques h_1 , h_2 et h_5 .
Faire l'application numérique.

11. Calculer numériquement le travail pour extraire 1 kg d'azote liquide.

12. En utilisant la question 9, placer le point 4 sur le diagramme (P, h) . En déduire l'enthalpie massique h_4 et l'entropie massique s_4 .

13. Placer alors le point 3 sur le diagramme (P, h) . En déduire l'enthalpie massique h_3 et l'entropie massique s_3 .

14. Calculer la différence entre les entropies à l'entrée et à la sortie du détendeur.

En déduire l'entropie massique créée. Préciser l'origine de l'irréversibilité si elle existe.

15. Sachant que le prix du kWh (kilowatt-heure) en France en 2017 est de 0,15 euros, déterminer l'énergie nécessaire et le coût pour liquéfier un volume de 10 L de diazote.

DONNÉES

- Masse volumique du diazote liquide : $\rho(\text{N}_2) = 8,1 \times 10^2 \text{ kg.m}^{-3}$;

