

Machines thermiques



Questions de cours

Pour apprendre le cours : vérifiez que vous savez répondre à chaque question.

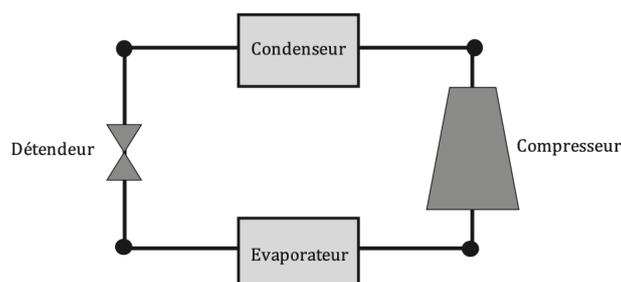
1. Démontrer pourquoi il est impossible de construire un moteur monotherme.
2. Donner et démontrer l'inégalité de Clausius.
3. Pour un moteur OU un réfrigérateur OU une pompe à chaleur (au choix de l'interrogateur), indiquer le sens réel (signe) des échanges énergétiques, par exemple sur un schéma. Définir le rendement (l'efficacité) en fonction des énergies échangées au cours du cycle, puis établir l'expression du rendement (efficacité) de Carnot.
4. Etablir le premier principe industriel. Quelle est la différence avec le premier principe "classique" ?
5. Comment écrire le premier principe industriel pour un système à plusieurs entrées et sorties ?
6. Donner le second principe industriel.
7. Donner le rôle et l'adaptation du premier principe industriel (en justifiant les hypothèses) pour un ou deux dispositifs choisis parmi : compresseur / pompe, turbine, détenteur, tuyère, échangeur double ou simple flux, mélangeur, séparateur.



Exercices de cours - Savoirs-Faire

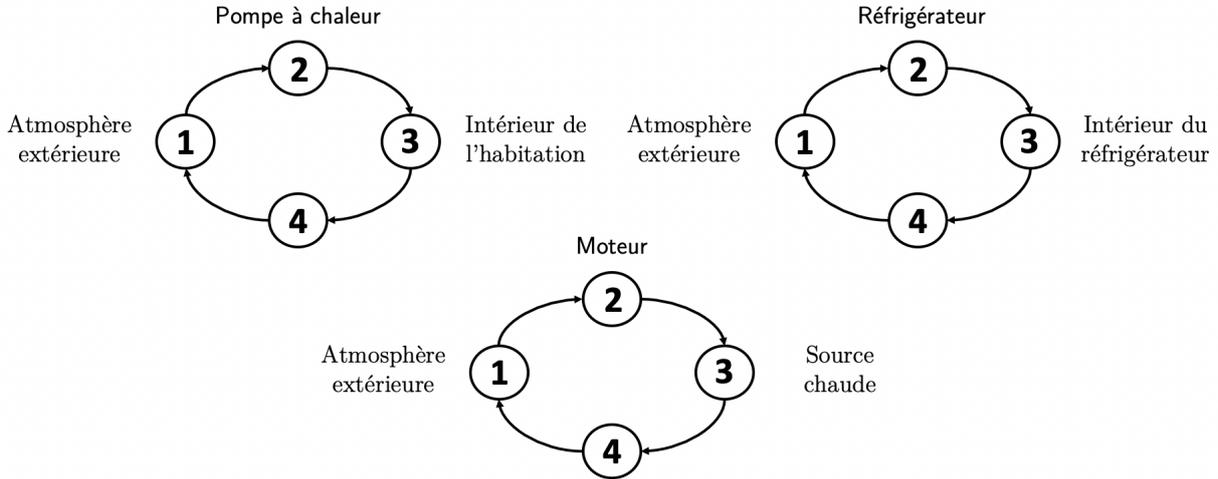
SF 1 - Identifier les sources chaude et froide d'une machine

Pour le réfrigérateur schématisé ci-dessous (B 2019), indiquer le sens de parcours, repérer les sources chaude et froide et les échanges d'énergie (thermiques et mécaniques).



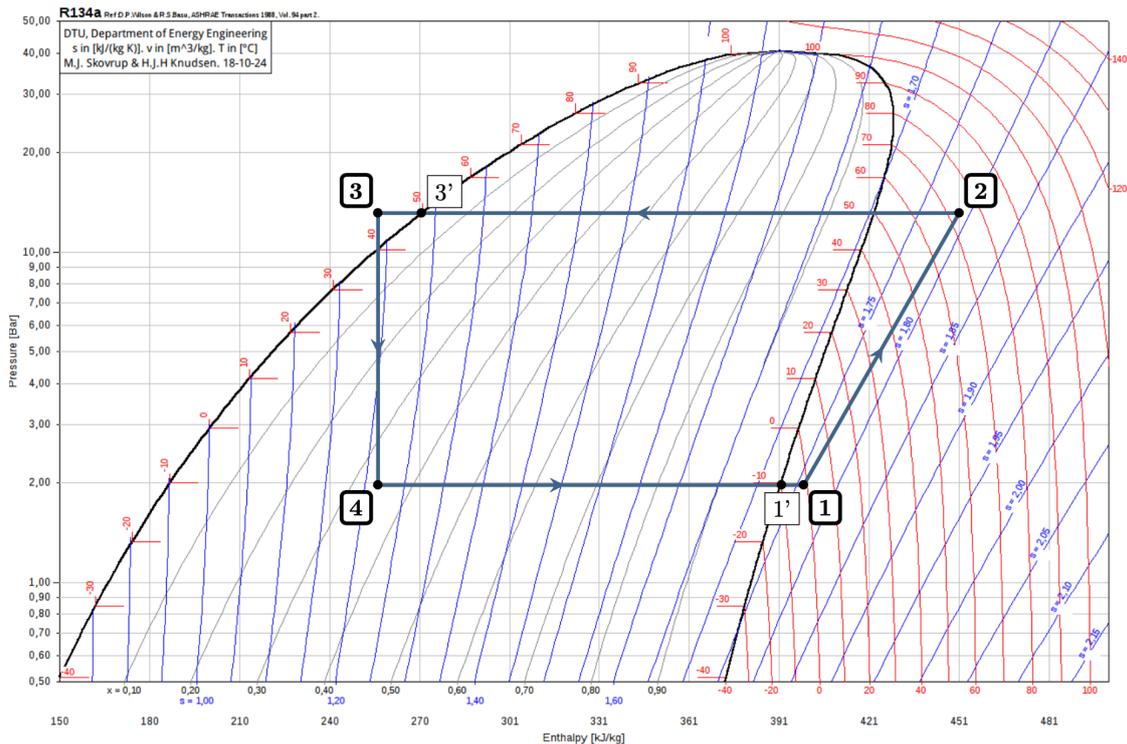
SF 2 - Identifier les dispositifs dans une machine thermique

Pour les machines suivantes, toutes constituées d'un compresseur (ou pompe), un détendeur (ou turbine), un évaporateur et un condenseur, indiquer à quel composant correspondent les éléments 1 à 4. Repérer les échanges d'énergie (thermiques et mécaniques).



SF 3 - Identifier les étapes sur un diagramme d'états

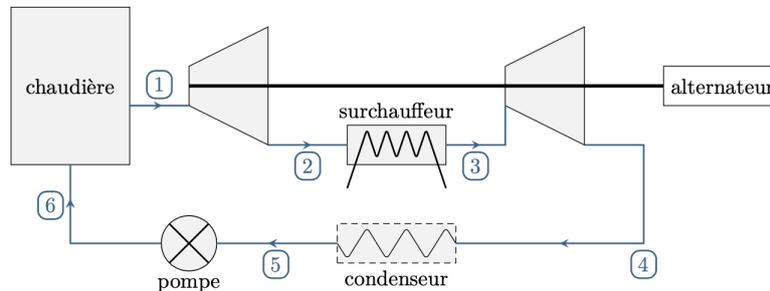
Sur le diagramme suivant a été tracé le cycle d'une pompe à chaleur. Justifier sa fonction réceptrice, identifier la position des dispositifs compresseur, détendeur, évaporateur et condenseur, déterminer l'efficacité.





Exercice phare

Exercice 1 - Cycle de Hirn d'une centrale thermique



On s'intéresse à l'installation représentée ci-dessus, qui modélise une centrale thermique à flamme (gaz ou charbon). Le fluide thermodynamique est de l'eau, qui suit un cycle de Hirn avec resurchauffe.

L'eau liquide est chauffée par une chaudière thermique, qui débite de la vapeur d'eau à 550°C et 100 bar (état 1). Cette vapeur subit une détente adiabatique réversible dans une première turbine dite haute pression, d'où elle sort à la pression de 10 bar (état 2). Un surchauffeur isobare, lui aussi relié à la chaudière, ramène la vapeur à la température initiale (état 3). La vapeur passe ensuite dans la seconde turbine, dite basse pression, d'où sort de l'eau à la température de 40°C (état 4). Cette eau est envoyée dans un condenseur d'où elle sort à l'état de liquide juste saturant (état 5), puis elle est pompée de manière adiabatique réversible (état 6) et renvoyée en entrée du générateur de vapeur où elle subit un échauffement isobare. Les arbres des deux turbines sont liés entre eux.

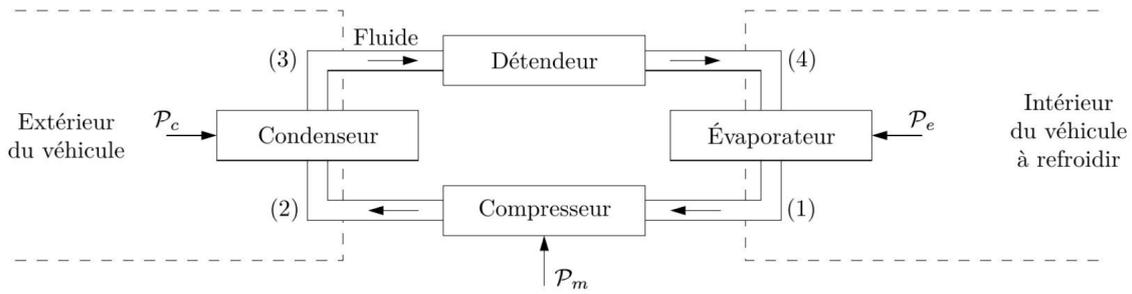
1. Tracer le cycle parcouru par l'eau dans le diagramme entropique de la figure 6. Pourquoi le point 6 est-il confondu avec le point 5 ? Commenter son sens de parcours.
2. En déduire la température de l'eau dans l'état 2 et l'état de l'eau dans l'état 4.
3. Déterminer les enthalpies massiques de l'eau aux six points du cycle. Comment interpréter physiquement l'égalité $h_5 = h_6$?
4. Déterminer le travail massique disponible sur l'arbre des turbines.
5. Si on considère que l'alternateur a un rendement électromécanique de 90%, déterminer le débit d'eau à imposer pour obtenir une puissance électrique de 400 MW.
6. Quelle est la quantité de chaleur massique dépensée au surchauffeur ?
7. Calculer le rendement thermodynamique de l'installation.



Exercices en plus

Exercice 2 - Climatiseur d'une voiture

La quasi-totalité des véhicules neufs sont aujourd'hui équipés d'une climatisation. Pour refroidir l'air intérieur du véhicule, un fluide frigorigène effectue en continu des transferts énergétiques entre l'intérieur, l'extérieur du véhicule et le compresseur, comme schématisé ci-dessous. Les anciens véhicules utilisaient majoritairement le R134a, désormais remplacé par le R1234yf compte tenu de son fort pouvoir de réchauffement.



1. Justifier que le condenseur se trouve à l'extérieur du véhicule alors que l'évaporateur se trouve à l'intérieur.
2. Indiquer sur le diagramme les domaines liquide, vapeur et équilibre liquide-vapeur du fluide. Dans quel domaine du diagramme le fluide à l'état gazeux peut-il être considéré comme un gaz parfait ? Justifier.

On étudie l'évolution du fluide au cours d'un cycle en régime permanent avec un débit massique $D_m = 0,1 \text{ kg/s}$.

- ▷ La puissance thermique P_e reçue par le fluide dans l'évaporateur permet la vaporisation isobare complète du fluide venant de (4) et conduit au point (1) à de la vapeur à température $T_1 = 5^\circ\text{C}$ et pression $P_1 = 3 \text{ bar}$.
 - ▷ Le compresseur aspire la vapeur (1) et la comprime de façon isentropique avec un taux de compression $r = P_2/P_1 = 6$.
 - ▷ Le fluide sortant du compresseur entre dans le condenseur dans lequel il est refroidi de manière isobare jusqu'à la température $T_3 = 60^\circ\text{C}$.
 - ▷ Le fluide sortant du condenseur traverse un détendeur isenthalpique jusqu'à la pression de l'évaporateur P_1 , ce qui constitue l'état (4).
3. Placer les points (1) à (4) sur le diagramme, et donner pour chaque point la température, la pression, l'enthalpie massique et l'entropie massique. Lorsque le fluide est diphasé, relever également le titre en vapeur.

On rappelle l'écriture du premier principe appliqué à un système ouvert traversé par un fluide en écoulement permanent, en négligeant les variations d'énergie mécanique : $D_m(h_s - h_e) = \mathcal{P}_w + \mathcal{P}_q$

4. Donner la signification de chaque terme dans l'équation ci-dessus.
5. Déterminer la valeur de la puissance mécanique \mathcal{P}_m reçue par le fluide lors de son passage dans le compresseur. Commenter le signe de \mathcal{P}_m .
6. Déterminer la puissance thermique \mathcal{P}_e échangée par le fluide lors de son passage à travers l'évaporateur entre (4) et (1). L'air intérieur du véhicule est-il bien refroidi ?
7. Définir l'efficacité e , ou coefficient de performance, du climatiseur. Calculer sa valeur.
8. Comparer cette valeur à celle d'un climatiseur de Carnot fonctionnant entre la température de l'évaporateur et la température de liquéfaction du fluide sous la pression P_2 . Commenter le résultat obtenu.

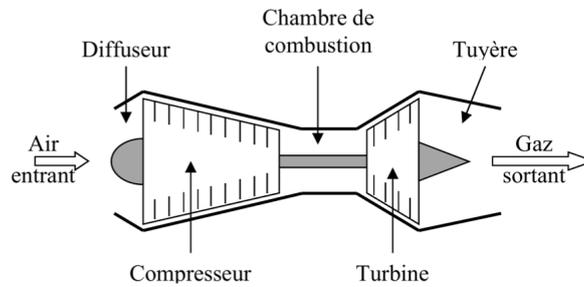
Exercice 3 - Turboréacteur simple flux

On qualifie de turbomachines les machines transférant de l'énergie entre un fluide et un axe en rotation. Elles présentent deux grands avantages par rapport aux moteurs à piston : d'une part,

leur conception nécessite moins de pièces et permet une masse plus légère ; d'autre part le fluide caloporteur peut être directement utilisé comme moyen de propulsion en le laissant se détendre dans une tuyère. En revanche, leur rendement chute drastiquement à faible puissance et leur temps de réponse est conséquent. Ainsi, les turbomachines sont omniprésentes en aéronautique mais complètement absentes, par exemple, du secteur automobile.

Cet exercice propose d'étudier un modèle simple de turbomachine : un turboréacteur à simple flux. Ces turboréacteurs étaient très utilisés au milieu du XXe siècle, mais ils sont fortement consommateurs de carburant et très bruyants, si bien qu'ils sont aujourd'hui réservés à quelques avions militaires. On considère un avion volant à une vitesse de croisière $V = 260$ m/s par rapport à l'air considéré au repos. À cette altitude, l'air est à 34,5 kPa et -40°C (état A). L'objectif est de calculer la force de poussée produite par le turboréacteur, donnée par $F = D_m(v_e - V)$, avec D_m le débit d'air au sein du turboréacteur et v_e la vitesse d'éjection des gaz en sortie de tuyère, exprimée dans le référentiel lié à la tuyère.

Le turboréacteur est schématisé ci-dessous. L'air y traverse les cinq composants suivants, avec un débit massique constant $D_m = 45$ kg/s.



- ▷ Le diffuseur permet de ralentir le flux d'air de manière adiabatique réversible, de sorte qu'en sortie du diffuseur (état B) l'énergie cinétique du gaz est négligeable.
- ▷ Le compresseur comprime l'air avec un rapport de compression $r = P_C/P_B = 10$. Le compresseur étant imparfait, la compression n'est pas parfaitement isentropique : en sortie du compresseur (état C), on a $T_C = 230^\circ\text{C}$.
- ▷ L'air est mélangé de manière isobare à du carburant enflammé dans la chambre de combustion, ce qui permet de porter la température du mélange à 1200°C (état D).
- ▷ La turbine a pour rôle de prélever juste assez d'énergie pour alimenter le compresseur. Le mélange de gaz y subit une détente adiabatique réversible (état E).
- ▷ Enfin, l'air subit également une détente adiabatique réversible dans la tuyère, sans échange de travail mais en augmentant fortement sa vitesse. À la sortie de la tuyère (état F), le mélange gazeux est rejeté dans l'atmosphère à la pression atmosphérique.

Toute l'étude est menée dans le référentiel lié au turboréacteur. Le mélange gazeux est assimilé à un gaz parfait d'exposant adiabatique $\gamma = 1,35$ et de capacité thermique isobare $c_p = 1,1$ kJ.K⁻¹.kg⁻¹ constants. Les variations d'énergie potentielle sont négligées. L'énergie cinétique du fluide est négligeable entre l'entrée du compresseur et la sortie de la turbine.

1. Représenter le cycle suivi par le mélange gazeux dans un diagramme (T, s) qualitatif. On rappelle qu'une isobare s'y représente par une branche d'exponentielle croissante.
2. Déterminer la température T_B en fonction de T_A , V et c_p ; puis la pression P_B en fonction de P_A , T_A , T_B et γ .
3. Déterminer le travail massique w_{comp} fourni à l'air par le compresseur.

4. Que vaudrait la température T'_C si la compression était idéale, c'est-à-dire isentropique avec le même rapport de compression? Quel serait alors le travail massique w'_{comp} fourni par le compresseur. En déduire son rendement isentropique.
5. Déterminer la puissance P_{ch} reçue par le mélange gazeux dans la chambre de combustion.
6. Sachant que le travail fourni par la détente du gaz dans la turbine est intégralement reçu par le compresseur, exprimer la température T_E en fonction de T_B, T_C et T_D . En déduire la valeur de la pression P_E .
7. Déterminer la température T_F à laquelle le mélange gazeux sort de la tuyère. En déduire la vitesse v_e d'éjection des gaz.
8. Déterminer la puissance P fournie au turboréacteur par la force propulsive. En déduire son rendement thermodynamique. Commenter la valeur obtenue en la comparant au rendement d'autres installations motrices.



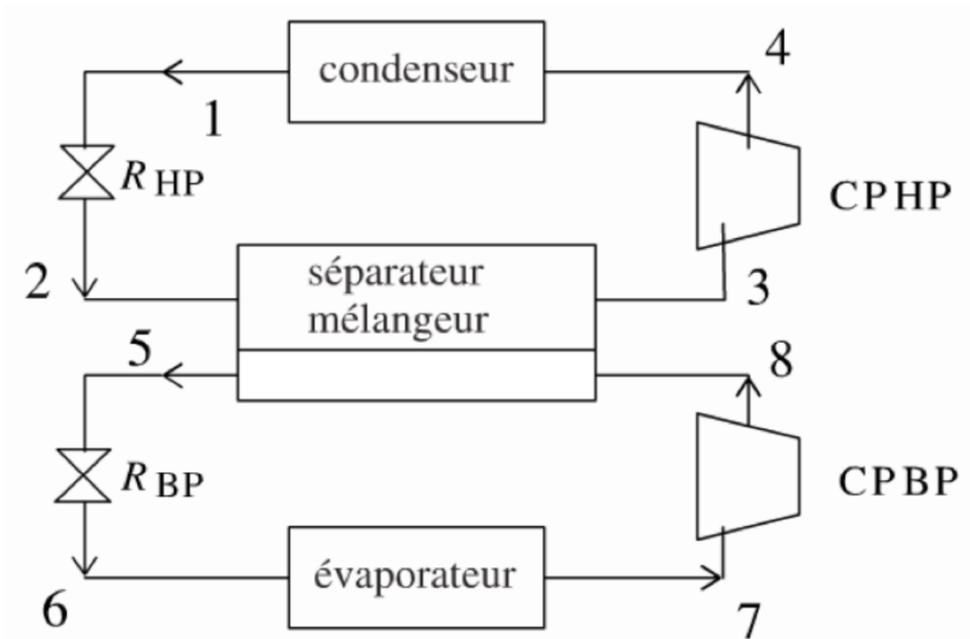
Exercice pour aller plus loin ***

Exercice 4 - Optimisation de cycles industriels de réfrigération

Extrait du sujet 2004 - pas plus difficile que les exercices en plus mais plus long

La réfrigération est le procédé permettant d'obtenir et de maintenir un système (local, produit, etc.) à une température inférieure à celle de l'environnement. Il existe différentes façons d'obtenir du « froid ». Le principe réside toujours en un transfert de chaleur, à partir du système à refroidir et vers l'environnement.

Les deux technologies les plus répandues à grande échelle sont les systèmes à absorption et les systèmes à compression, dont un exemple est étudié dans cet exercice.



Le condenseur (CO) et l'évaporateur (EV) sont des échangeurs isobares permettant respectivement la condensation et l'évaporation totale du fluide qui les traverse ; dans les états 1 et 7, le fluide est respectivement à l'état de liquide juste saturant et de vapeur saturante sèche. Les

évolutions du fluide frigorigène y sont supposées réversibles.

R_{HP} et R_{BP} sont des robinets de laminage, respectivement Haute et Basse Pression, qui assurent, sans partie mobile, des détentes supposées adiabatiques :

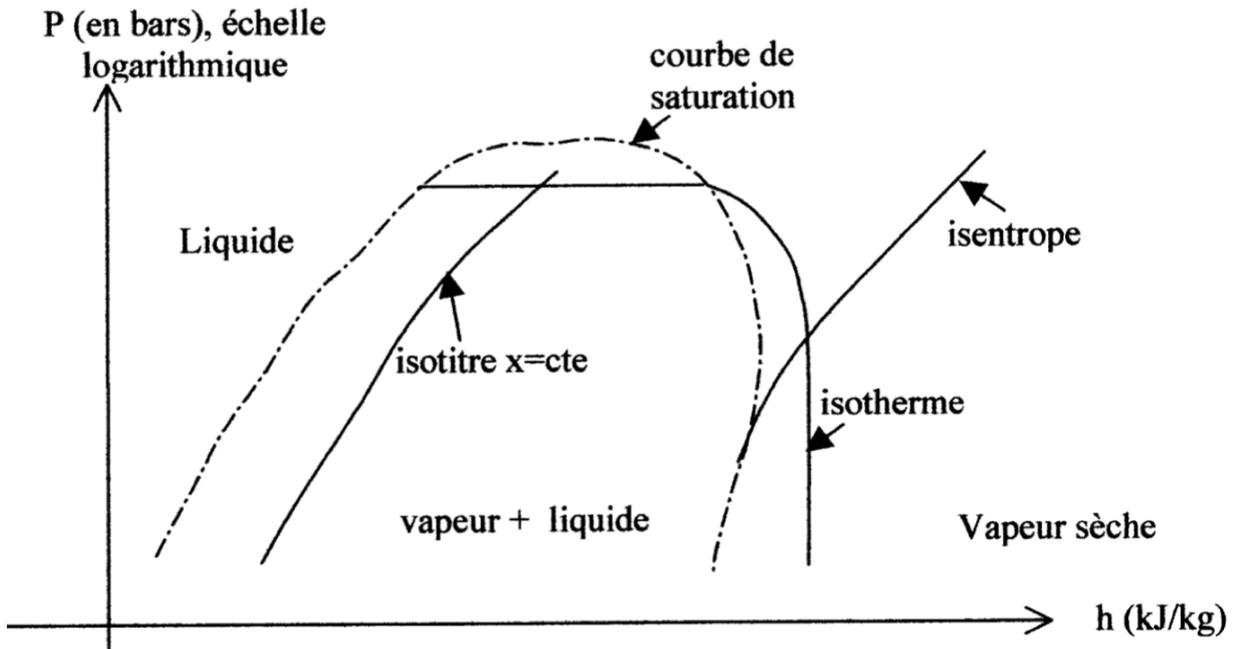
- ▷ Le fluide pénètre dans R_{HP} sous une haute pression égale à P_1 (état 1) et en ressort sous une pression intermédiaire P_2 (état 2).
- ▷ Le fluide pénètre dans R_{BP} , sous la pression intermédiaire égale à P_5 (état 5) et en ressort sous une basse pression P_6 (état 6).

CPHP et CPBP sont des compresseurs, respectivement Haute et Basse pression, qui assurent des compressions supposées adiabatiques et réversibles du fluide à l'état gazeux :

- ▷ Le fluide pénètre dans CPHP sous une pression intermédiaire P_3 (état 3) et en ressort sous la haute pression P_4 (état 4).
- ▷ Le fluide pénètre dans CPBP sous basse pression P_7 (état 7) et en ressort sous la pression intermédiaire P_8 (état 8).

A la sortie de R_{HP} (état 2), et à la sortie de CPBP (état 8), le fluide pénètre dans le mélangeur-séparateur (MS), parfaitement calorifugé, dépourvu de partie mobile, où les évolutions du fluide y sont supposées réversibles. Le fluide en ressort à l'état de vapeur sèche saturante (état 3) vers CPHP et à l'état de liquide saturant (état 5) vers RBP.

Etude du diagramme des frigoristes



La figure ci-dessus facilite la lecture des diagrammes fournis en fin de sujet, qui seront utilisés ultérieurement dans l'étude du problème. L'abscisse est l'enthalpie massique h du fluide étudié, exprimée en kJ/kg, avec une échelle linéaire. L'ordonnée est la pression P , exprimée en bars avec une échelle logarithmique. On note x le titre massique en vapeur dans un état donné.

1. Quelle est la forme des isothermes à l'intérieur de la courbe de saturation ? On justifiera précisément la réponse fournie.

On s'intéresse maintenant au cas particulier d'un gaz parfait ; on note c_p et c_v les capacités thermiques massiques de ce gaz, supposées constantes.

2. Trouver l'équation d'une isotherme de ce gaz dans le diagramme étudié; y a-t-il accord avec les isothermes du diagramme réel du fluide Forane 502, représentées en annexe 1? Discuter.

Données : $P_1 = 15$ bars, $P_2 = P_8 = 4$ bars, $P_6 = 1,5$ bars.

Débit du cycle basse pression : $D_{BP} = 1,5$ kg/s

Puissance thermique de réfrigération $\mathcal{P} = 240$ kW (reçue par le fluide au niveau de l'évaporateur).

Etude du cycle haute pression (1-2-3-4)

3. Tracer le cycle ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$) sur le diagramme fourni en annexe.
4. Présenter, sous forme de tableau, les caractéristiques (h, P, T, x) de chacun des états 1, 2, 3 et 4, soit par lecture directe sur le diagramme, soit par copies des données fournies dans l'énoncé.
5. Retrouver le titre en vapeur x du fluide dans l'état 2 par un calcul dont la démarche doit être clairement explicitée.

Etude du cycle basse pression (5-6-7-8) Le fluide frigorigène est toujours le Forane 502.

On représentera, au fur et à mesure de la progression, le cycle 5,6,7,8 toujours sur le diagramme fourni en annexe.

6. Déterminer les valeurs de P, T, x et h pour les états 5 et 6.
7. Faire de même pour le fluide dans l'état 7; en déduire les valeurs pour l'état 8. Présenter sous forme de tableau les caractéristiques (h, P, T, x) de chacun des états 5,6, 7 et 8.
8. A l'aide d'un bilan énergétique justifié au niveau du mélangeur-séparateur, déterminer la valeur du débit massique D_{HP} du fluide qui décrit le cycle haute pression.

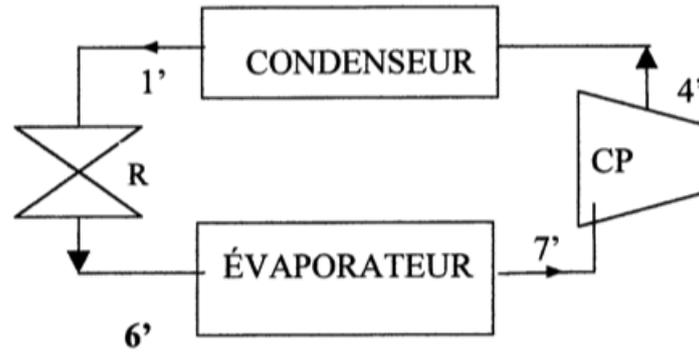
Bilan énergétique

9. Calculer la puissance mécanique échangée dans CPHP et CPBP.
10. Calculer la puissance thermique échangée dans l'évaporateur et dans le condenseur.
11. Calculer le COP (coefficient de performance) de l'installation frigorifique étudiée.
12. Calculer le COP du cycle réfrigérant idéal de Carnot ayant les mêmes températures de source froide et chaude. En déduire le rendement du cycle étudié par rapport au cycle de Carnot : $\eta = \frac{COP}{COP_{Carnot}}$. Commenter.

Optimisation de la compression On propose de dégager l'intérêt d'une compression à deux étages, nécessitant la présence des deux compresseurs CPHP et CPBP.

Pour cela, on envisage un cycle simple de réfrigération à un étage, fonctionnant entre les mêmes pressions extrêmes $P'_1 = P'_4 = 15$ bars et $p'_6 = P'_7 = 1,5$ bars.

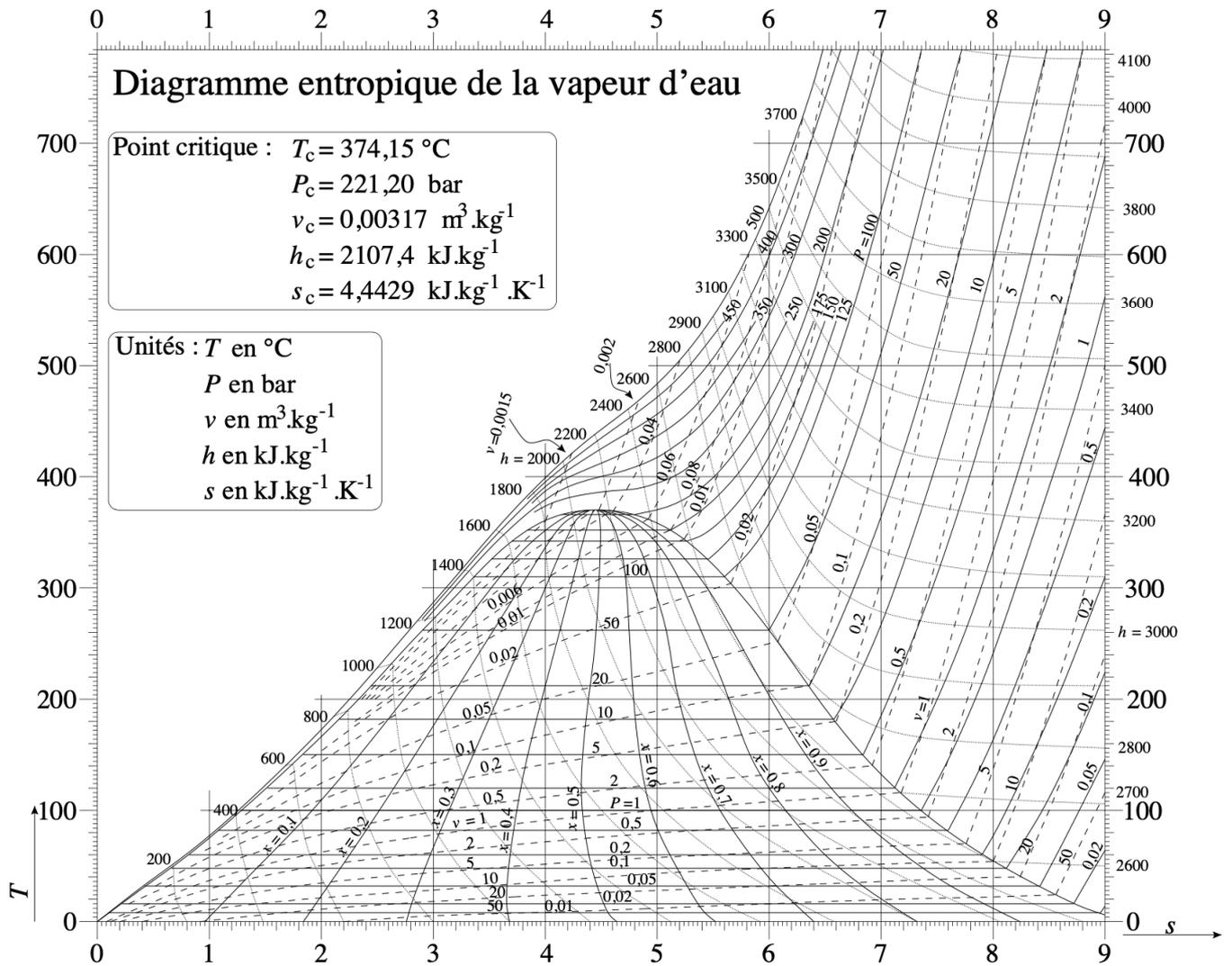
Le point 1' est identique au point 1 de la première figure. De même, 7' est identique au point 7. Les éléments du cycle : compresseur CP, évaporateur, condenseur et robinet de laminage R, ont les mêmes comportements que précédemment.



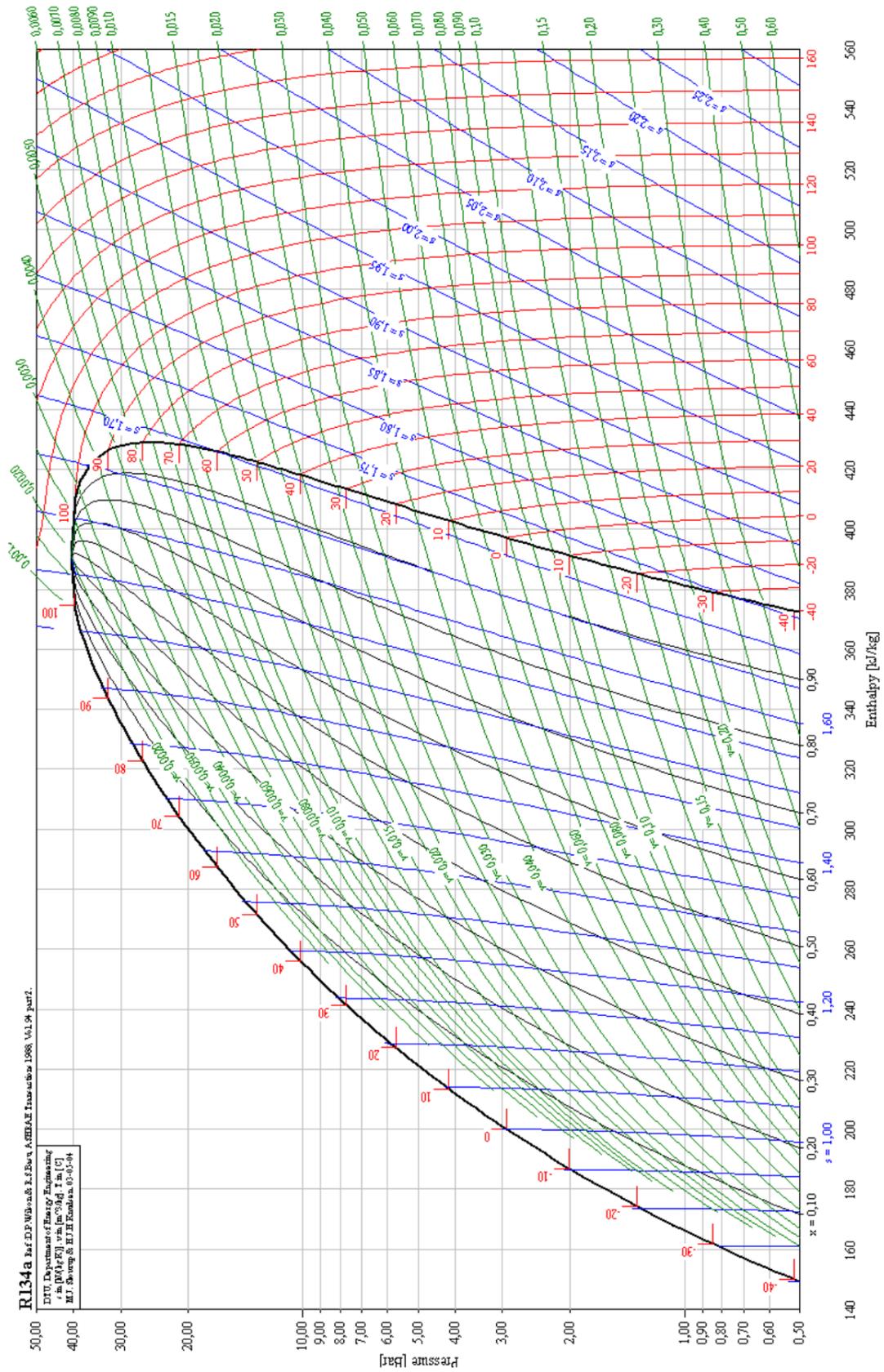
13. Tracer le cycle correspondant sur le diagramme fourni (utiliser une deuxième couleur d'encre).
14. Calculer graphiquement les enthalpies massiques des points 6' et 4'.
15. En déduire le transfert thermique massique de réfrigération de ce cycle, ainsi que le travail indiqué massique au niveau du compresseur.
16. Déterminer le COP de cette installation. Commenter.

Diagrammes

Exercice 1



Exercice 2



Exercice 4

Forane 502

