

T5 - MACHINES THERMIQUES

Travaux Dirigés

Exercice 1 : Cycle Diesel

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/moteurD.html>

Simulation : <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/diesel.html>

Une mole de gaz parfait subit les transformations réversibles suivantes :

(1) → (2) : compression adiabatique

(2) → (3) : échauffement isobare

(3) → (4) : détente adiabatique

(4) → (1) : refroidissement isochore.

Chaque état est défini par la pression P_i , la température T_i et le volume V_i (i variant de 1 à 4).

On appelle γ le rapport des chaleurs molaires $\gamma = C_{pm} / C_{vm}$. On définit $a = \frac{V_1}{V_2}$ et $b = \frac{V_4}{V_3}$.

- 1) Représenter sommairement le cycle sur un diagramme de Clapeyron.
- 2) Déterminer l'expression du rendement en fonction de T_1, T_2, T_3, T_4 .
- 3) Donner l'expression du rendement en fonction de γ, a et b .
- 4) Application numérique avec $\gamma = 1,4$; $a = 9$ et $b = 3$.

Exercice 2 : Cycle de Beau de Rochas (moteur à explosion)

Afin de simplifier le problème, on suppose que le moteur étudié est constitué d'un seul cylindre. Les transformations seront considérées comme mécaniquement réversibles.

Les gaz sont supposés parfaits de coefficient de Laplace $\gamma = 1,4$; ils subissent le cycle suivant :

- O → A : Phase d'admission isobare à la pression P_A dans le cylindre. La soupape d'admission est refermée.

Le mélange air-carburant se trouve alors dans les conditions $V_A = 1$ L, $P_A = 1$ bar, $T_A = 20^\circ\text{C}$

Le gaz subit alors la suite de transformations suivantes :

- A → B : compression adiabatique réversible. $V_B = \frac{V_A}{8}$. On notera $\tau = \frac{V_A}{V_B} = 8$
- B → C : une étincelle provoque la combustion isochore, instantanée, de toute l'essence.
- C → D : détente adiabatique réversible ;
- D → A : refroidissement isochore (la pression chute à cause de l'ouverture du cylindre vers l'extérieur).
- A → O : refoulement isobare des gaz vers l'extérieur à la pression P_A . C'est l'échappement.

- 1) Représenter l'ensemble des transformations sur un diagramme (P, V) . Indiquer en justifiant brièvement s'il s'agit d'un cycle moteur ou récepteur.

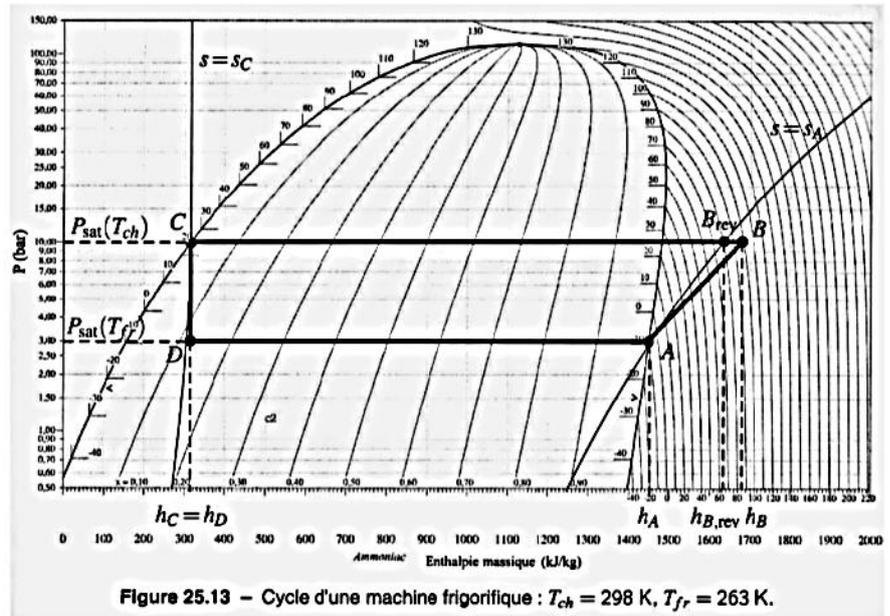
Les étapes d'admission et de refoulement se compensent et on raisonnera donc sur le système fermé effectuant le « cycle » ABCD ; on suppose donc constant le nombre total de moles gazeuses.

- 2) Déterminer la pression et la température du mélange dans l'état B.
- 3) La combustion du carburant amène à une température $T_c = 2100$ K ; calculer P_c . En réalité la pression maximale est légèrement inférieure. Proposer une justification.
- 4) Calculer la température en D.

- 5) Exprimer le travail W_f **fourni** par le gaz au système mécanique au cours d'un cycle en fonction de la capacité thermique molaire à volume constant du mélange gazeux $C_{v,m}$, du nombre de moles n et des températures puis en fonction de n, R, γ et des températures. Le calculer.
- 6) Exprimer le rendement r du cycle en fonction des différentes températures, puis en fonction de γ et τ .
- 7) Le moteur effectue 2500 cycles par minute. Quelle est sa puissance ? Combien le piston effectue-t-il d'allers-retours par minute ?

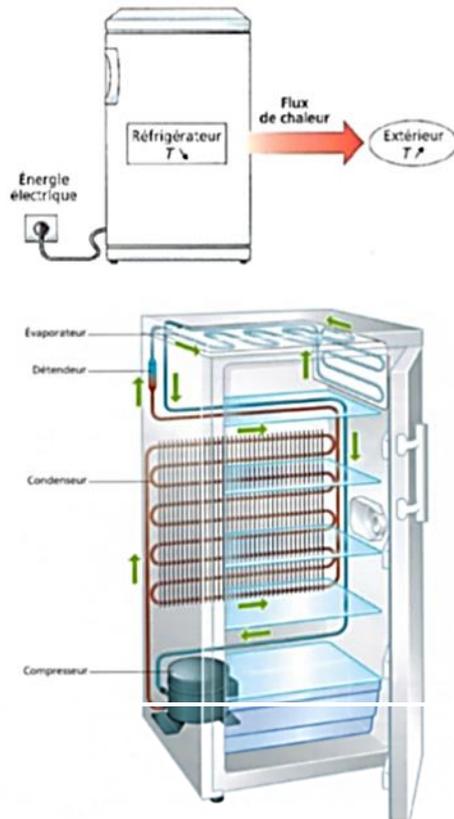
Exercice 3 : Machine frigorifique

Le diagramme ci-dessous représente le cycle de fonctionnement d'une machine frigorifique réelle. Déterminer l'efficacité réelle de cette machine ainsi que l'efficacité de Carnot d'une machine frigorifique réversible travaillant entre les mêmes températures : $T_c = 298\text{ K}$ et $T_f = 263\text{ K}$.



Exercice 4 : Etude d'un réfrigérateur (extrait écrit ATS 2018)

Le principe du réfrigérateur est simple : il assure un transfert de chaleur depuis ses compartiments internes, qui se refroidissent, vers la pièce où il se trouve, qui se réchauffe. Ce transfert consomme de l'énergie électrique. [...]. Le compresseur comprime le fluide réfrigérant, alors froid et sous forme gazeuse, ce qui augmente sa température et sa pression. A la sortie du compresseur, le fluide est donc chaud et à haute pression. [...]. Ce gaz chaud et à haute pression circule ensuite à travers le condenseur, où il cède de la chaleur par diffusion vers l'extérieur et subit un changement d'état : le gaz se transforme en un liquide chaud sous haute pression. La condensation (plus exactement la liquéfaction) peut se produire à température élevée car la pression est importante. [...]. En poursuivant son chemin dans le circuit frigorifique, le liquide passe ensuite à travers un détendeur qui abaisse sa pression et sa température, ([...] la détente adiabatique s'effectue dans un fin capillaire). On obtient un mélange liquide-gaz à l'équilibre. Après cette chute de pression, le mélange liquide-gaz froid traverse l'évaporateur où il absorbe la chaleur de l'intérieur du réfrigérateur pour subir un second changement d'état : le liquide se met à bouillir, c'est-à-dire qu'il se vaporise. On obtient alors un gaz froid et à basse pression, qui repart dans le compresseur pour un nouveau cycle.



A) Principe de fonctionnement du réfrigérateur à compresseur

Le réfrigérateur est supposé être une machine cyclique et ditherme. Pour un cycle complet, on note Q_1 le transfert thermique reçu par le fluide réfrigérant de la part du milieu extérieur, Q_2 le transfert thermique reçu par le fluide réfrigérant de la part de l'intérieur du réfrigérateur et W le travail de compression permettant de faire fonctionner le réfrigérateur.

- 1) Identifier le nom des organes (compresseur, détendeur, condenseur ou évaporateur) dans lesquels les transferts d'énergie Q_1 , Q_2 et W s'opèrent.
- 2) Préciser si Q_1 , Q_2 et W sont positifs ou négatifs.
- 3) Le compresseur met en jeu une compression rapide que l'on peut supposer adiabatique. Proposer une explication de l'augmentation de la température du gaz supposé parfait à l'issue de cette compression.
- 4) Dessiner l'allure du diagramme $P(T)$ pour le seul équilibre liquide / gaz et préciser les phases dans chaque partie du diagramme et sur la courbe $P(T)$. A quelle condition une liquéfaction peut-elle s'observer à « température élevée » ?
- 5) Définir le coefficient de performance, noté CoP , du réfrigérateur puis l'exprimer en fonction de Q_1 et Q_2 .

On suppose le régime stationnaire atteint : la température T_{ext} de l'extérieur et la température de consigne T_{int} à l'intérieur du réfrigérateur sont constantes.

- 6) Déterminer l'expression du coefficient de performance maximal du réfrigérateur, noté CoP_c , en fonction de T_{int} et T_{ext} .
- 7) Calculer ce CoP_c si $T_{ext} = 25\text{ °C}$ et $T_{int} = 5\text{ °C}$.

B) Etude du cycle du fluide réfrigérant dans un diagramme entropique $T(s)$

Nous allons étudier plus précisément les différentes transformations que le fluide réfrigérant subit. L'écoulement du fluide réfrigérant est stationnaire, de débit massique D_m . Les variations d'énergies cinétique et potentielle du fluide seront négligées. Nous supposons également que le fluide réfrigérant décrit le cycle suivant (on note $\{T_i, P_i\}$ le couple température-pression relatif à l'état i du fluide) :

- Avant d'entrer dans le compresseur, le fluide est un gaz surchauffé (état $A\{T_A, P_A\}$). Le compresseur impose une compression adiabatique et irréversible. Le fluide reste à l'état gazeux (état $B\{T_B, P_B\}$).
- Le fluide circule ensuite dans le condenseur où il opère un refroidissement isobare puis une liquéfaction complète isobare (et donc isotherme) à la pression P_B . On obtient un liquide saturant (état $C\{T_C, P_C\}$).
- Le liquide subit une détente isenthalpique (détente de type Joule-Thomson sans travail indiqué et sans transfert thermique) faisant apparaître un mélange diphasé après avoir traversé le détendeur (état $D\{T_D, P_D\}$).
- Le fluide pénètre dans l'évaporateur et évolue de manière isobare jusqu'à l'état A .

On prendra les valeurs suivantes : $P_A = 2\text{ bar}$, $P_B = 7\text{ bar}$, $T_A = 5\text{ °C}$, $T_B = 55\text{ °C}$ et $D_m = 10^{-2}\text{ kg.s}^{-1}$. Une tolérance de $\pm 2\text{ kJ.kg}^{-1}$ sur la lecture de l'enthalpie massique sera acceptée. Une tolérance de $\pm 1\text{ °C}$ sur la lecture des températures sera acceptée.

On rappelle, en tenant compte de nos hypothèses de travail, le premier principe de la thermodynamique appliqué à un fluide en écoulement dans une conduite, recevant une puissance thermique P_{th} et une puissance mécanique P_{mecc} (mise en jeu par les éventuelles parties mobiles d'une machine présente dans la conduite) avec h_e et h_s les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie de la conduite :

$$D_m(h_s - h_e) = P_{th} + P_{mecc}$$

En effet, le premier principe, pour un système étudié en système ouvert, peut s'écrire :

$$\Delta h = h_s - h_e = q + w_{\neq P} = q + w_{méca} \text{ (unités : J.kg}^{-1}\text{)}$$

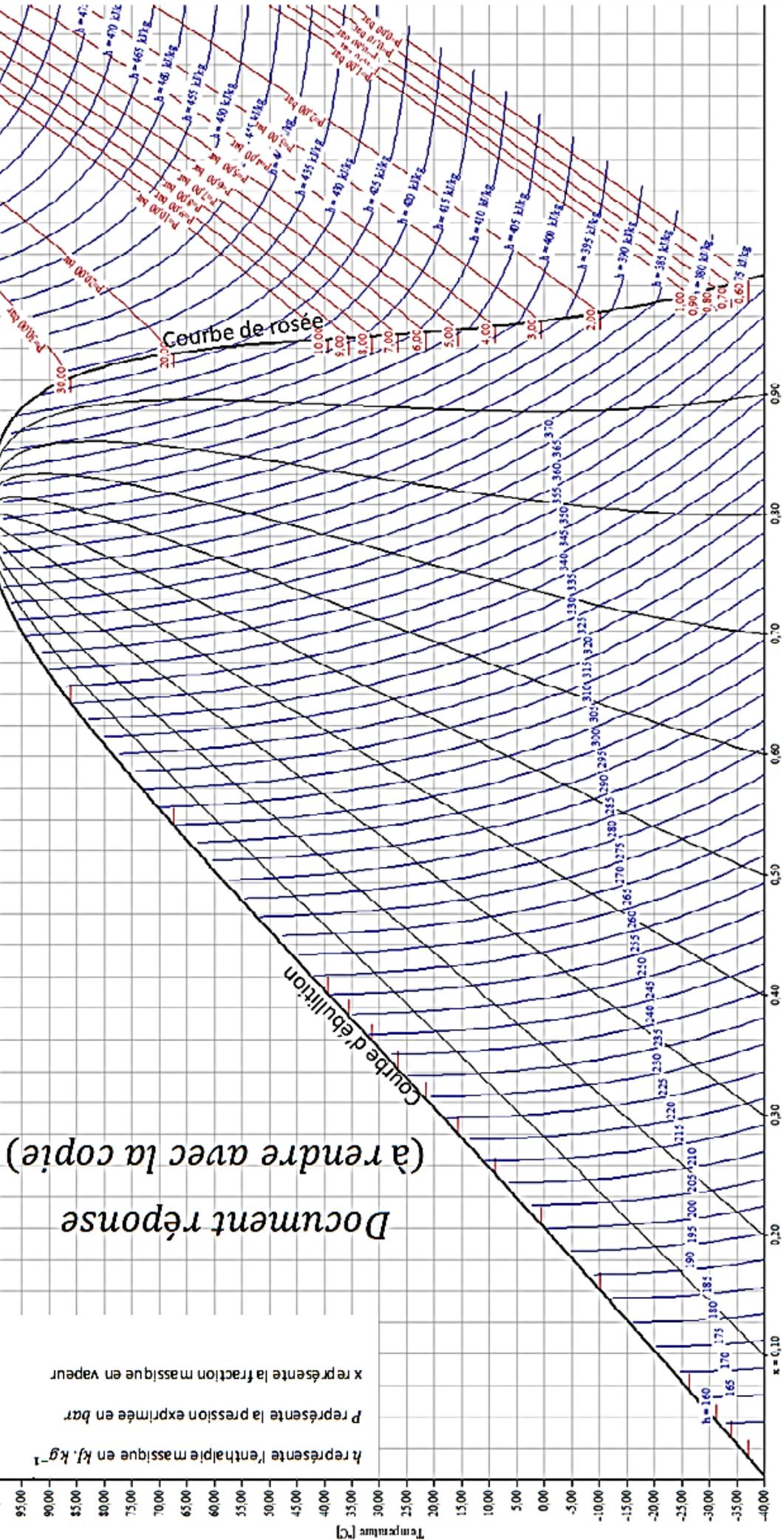
En multipliant par le débit massique D_m du fluide (kg.s^{-1}), on obtient :

$$D_m(h_s - h_e) = P_{th} + P_{méca} \text{ (unités : W)}$$

- 8) Repérer sur le diagramme entropique fourni en document-réponse les domaines liquide, diphasique et gazeux.

(Diagramme entropique (T,s) fourni)

- 9) Reporter la position des points A, B, C et D sur le document-réponse fourni en annexe et à rendre avec la copie.
- 10) Donner, par lecture sur le diagramme entropique, la température T_l de liquéfaction du fluide réfrigérant observée pour le cycle étudié.
- 11) Donner, par lecture sur le diagramme entropique, la température T_v de vaporisation du fluide réfrigérant observée pour le cycle étudié.
- 12) Exprimer puis calculer la puissance $P_{th,2}$ reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état D à l'état A .
- 13) Exprimer puis calculer la puissance P_{meca} reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état A à l'état B .
- 14) Exprimer puis calculer la puissance $P_{th,1}$ reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état B à l'état C .
- 15) Les résultats précédents, aux incertitudes de lecture près, permettent d'écrire $P_{meca} \approx -(P_{th,1} + P_{th,2})$. Commenter cette relation.
- 16) En déduire l'expression puis une estimation de la valeur du coefficient de performance CoP_{vrai} (un seul chiffre significatif sera accepté pour la valeur de CoP_{vrai}).
- 17) Les résultats précédents impliquent que $CoP_{vrai} < CoP_c$. Interpréter ce résultat.
- 18) Lors d'un processus adiabatique, on peut déterminer, à l'aide du diagramme entropique, le travail massique w_f des forces de viscosité du fluide car $w_f = - \int_{Etat\ ini \xrightarrow{adia} Etat\ final} T ds$. Estimer la puissance P_f associée à ces forces de viscosité lors de la compression (pour ce calcul la représentation de la transformation menant de l'état A à B sera linéarisée et donc assimilée à un simple segment reliant les points A et B). Commenter ce dernier résultat.
- 19) Reporter la position des points A, B, C et D sur le diagramme des frigoristes (P, h) fourni.
- 20) Retrouver la valeur du coefficient de performance à partir de déductions graphiques sur ce diagramme.



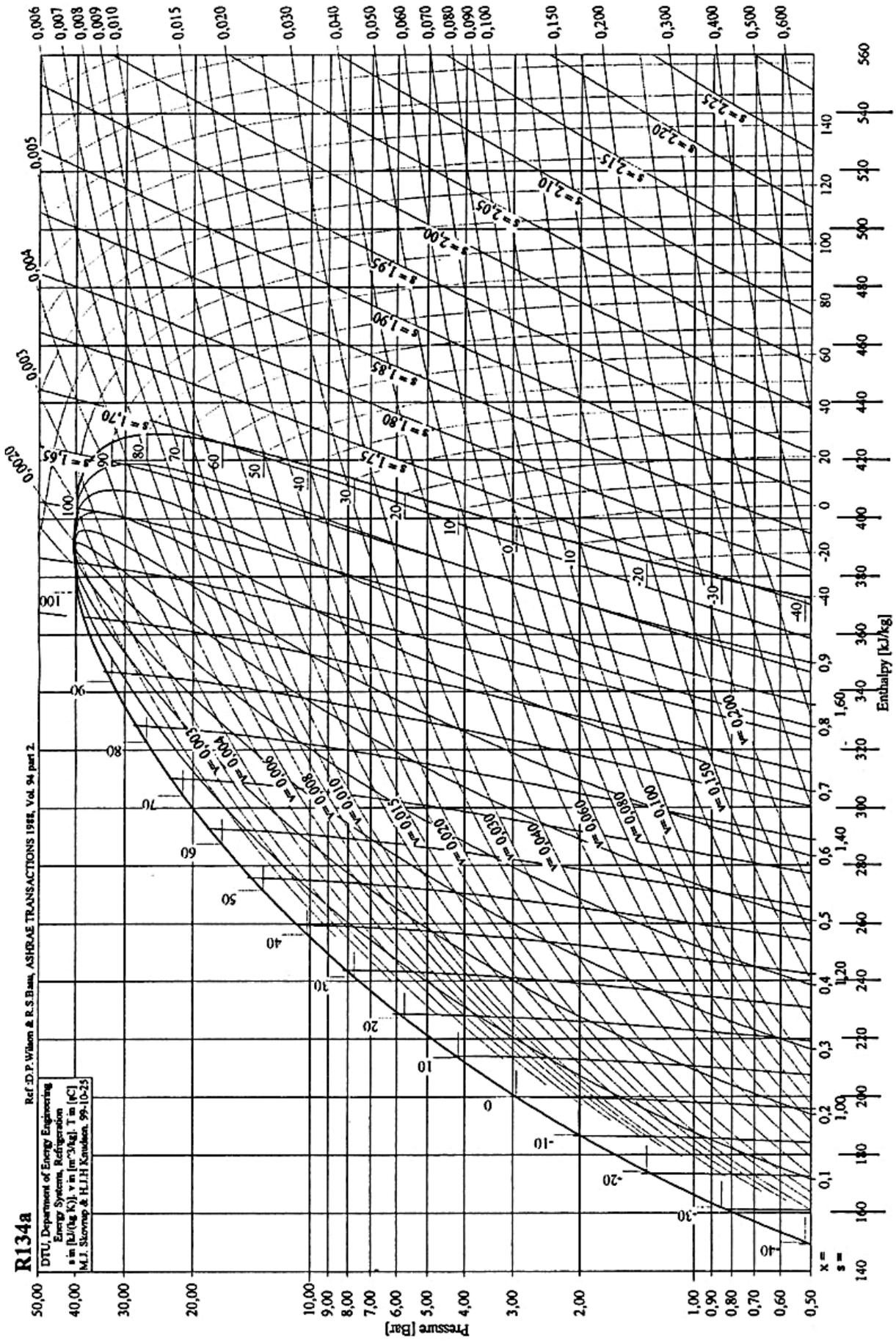
Document réponse
(à rendre avec la copie)

h représente l'enthalpie massique en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
P représente la pression exprimée en bar
x représente la fraction massique en vapeur

R134a

Ref: D.P. Wilam & R.S. Bam, ASHRAE TRANSACTIONS 1981, Vol. 94 part 2.

DTU, Department of Energy Engineering
 Energy Systems, Bldg. 408
 s in [kJ/(kg K)], w in [m³/kg], T in [°C]
 M.J. Stump & H.J.H. Knudsen, 99-10-25



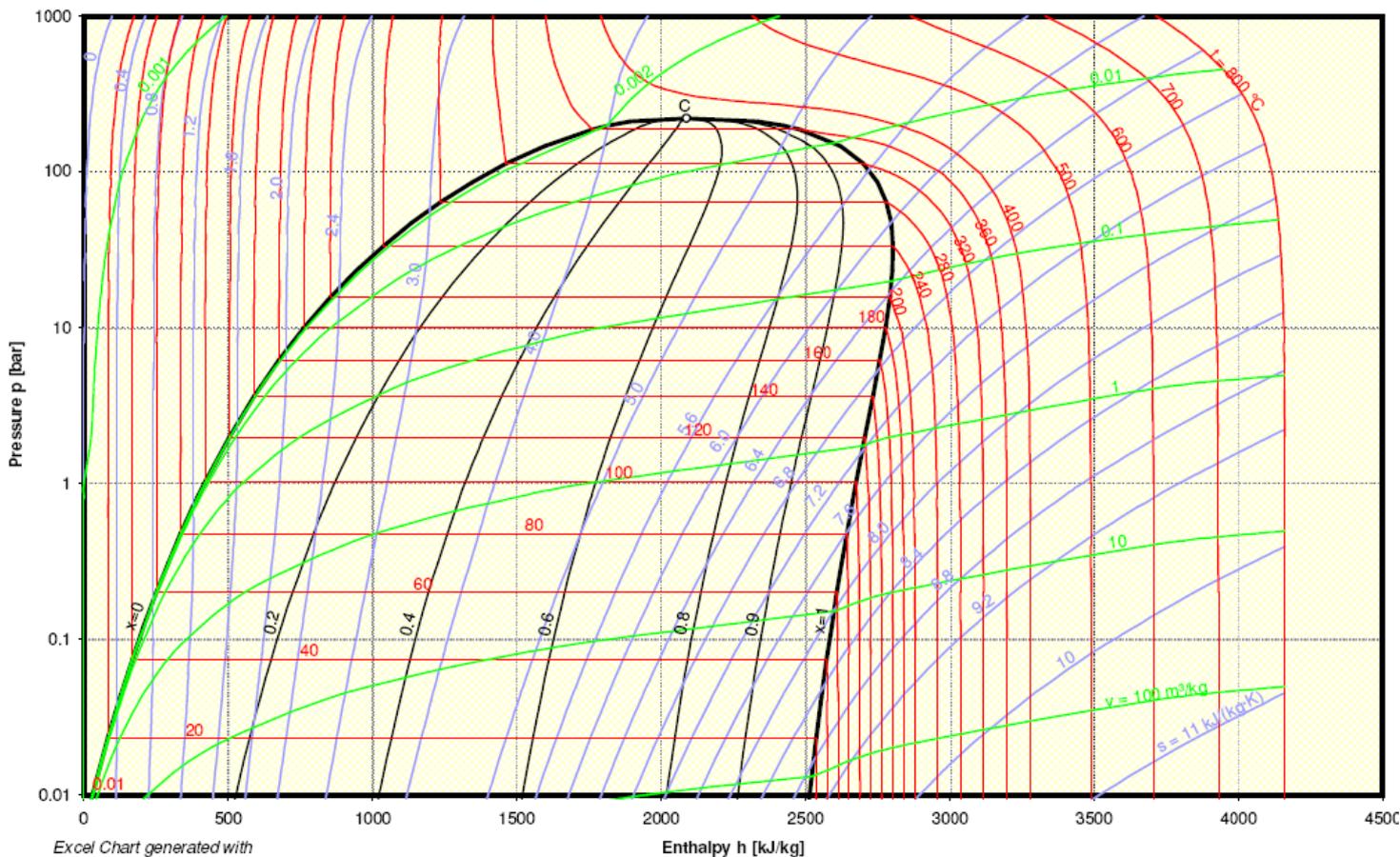
Exercice 5 : Machine à vapeur : Cycle de Rankine

Dans une machine à vapeur, l'eau décrit un cycle de Rankine :

- Dans l'état A l'eau est à l'état de liquide saturant seul, dans les conditions de pression et température $P_1 = 0,2 \text{ bar}$ et $T_1 = 60^\circ\text{C}$;
- Transformation AB : l'eau est comprimée de façon adiabatique et isentropique dans une pompe, jusqu'à la pression $P_2 = 15 \text{ bar}$;
- Transformation BC : l'eau est injectée dans la chaudière et s'y réchauffe de manière isobare jusqu'à la température $T_2 = 200^\circ\text{C}$, telle que $P_{\text{sat}}(T_2) = P_2$;
- Transformation CD : l'eau se vaporise entièrement à la température T_2 ;
- Transformation DE : l'eau est admise dans le cylindre à T_2 et P_2 et effectue une détente adiabatique réversible jusqu'à la température T_1 ; on obtient un mélange liquide-vapeur ;
- Transformation EA : le piston chasse le mélange diphasique dans le condenseur où il se liquéfie totalement.

- 1) Représenter ce cycle sur le diagramme des frigorigènes de l'eau représenté ci-dessous.
- 2) En exploitant ce diagramme, déterminer le transfert thermique pour chaque transformation du cycle.
- 3) Calculer le rendement de ce moteur et le comparer au rendement de Carnot. Quelles sont les causes d'irréversibilité ?

logP-h diagram



Exercice 6 : Détente dans une turbine à vapeur

Au sein d'une turbine à vapeur, la vapeur sous haute pression subit une détente au contact de la turbine, au cours de laquelle elle fournit à la turbine de l'énergie mécanique. Données sur la turbine :

	Amont	Aval
Pression	$p_1 = 6 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	$p_2 = 9,5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$
Enthalpie massique	$h_1 = 3,28 \text{ MJ/kg}$	$h_2 = 2,67 \text{ MJ/kg}$
Vitesse	$v_1 = 160 \text{ m/s}$	$v_2 = 80 \text{ m/s}$
Débit massique	$D_{m1} = 20 \text{ kg/s}$	$D_{m2} = 20 \text{ kg/s}$

- 1) Déterminer la puissance FOURNIE par la vapeur traversant la turbine en négligeant le transfert thermique.
- 2) Comparer la variation d'énergie cinétique massique à la variation d'enthalpie de la vapeur.

Exercice 7 : Chauffage et refroidissement d'une maison

Un récepteur thermique est utilisé pour assurer le chauffage (l'hiver) et le refroidissement (l'été) d'une maison, en fonctionnant en pompe à chaleur l'hiver et en climatiseur l'été.

Le fluide moteur est du fréon. Il parcourt un circuit dans lequel, étant sous forme de vapeur, il est comprimé par un compresseur C et se condense dans un liquéfacteur (ou condenseur) L ; puis il subit une détente au niveau d'une valve V et finit de se vaporiser dans l'évaporateur E avant de retourner dans le compresseur.

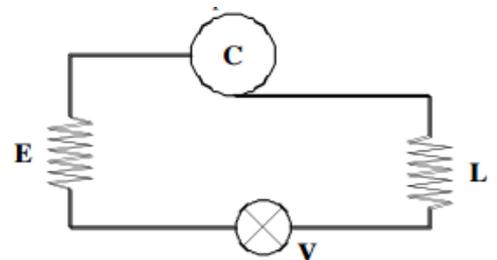


Schéma de principe de l'installation

- 1) Pour un récepteur thermique, lequel des deux organes L ou E faut-il mettre en contact avec la source chaude et la source froide respectivement ?
En hiver, la température extérieure moyenne est de 0°C et la température intérieure est maintenue à 20°C .
- 2) Calculez la quantité de chaleur maximale qui peut être fournie à la maison au bout d'une heure si la puissance du compresseur électrique est de $4,0 \text{ kW}$.
- 3) En été, la température extérieure moyenne est de 35°C et la température intérieure est maintenue à 20°C . Quel est le coefficient de performance maximal du récepteur thermique ?

Exercice 8 : PAC pour chauffer l'eau d'une piscine

Données :

- Température air extérieur : $T_a = 7^\circ\text{C}$
- Température eau piscine : $T_p = 20^\circ\text{C}$
- Volume de la piscine : $V = 30 \text{ m}^3$
- Capacité thermique de l'eau : $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Pour une variation de la température de l'eau de $\Delta T = 1\text{K}$, il faut $\Delta t = 1000 \text{ s}$

1. Donner le schéma thermodynamique de la PAC. Signe des échanges d'énergie à justifier.
2. Calculer le coefficient de performance.
3. Calculer la puissance électrique de l'installation.

Exercice 9 : Cycle réfrigérant au CO₂ [oral banque PT]

Le CO₂ (R744) est un fluide frigorigène de plus en plus utilisé car il est considéré comme un fluide écologique : son impact sur la couche d'ozone est nul et son impact sur l'effet de serre est faible. Ses caractéristiques thermodynamiques sont excellentes et permettent d'envisager un bel avenir pour ce fluide, malgré les pressions de service beaucoup plus élevées que celles des HFC qui peuvent poser des problèmes de sécurité.

On s'intéresse à un cycle réfrigérant, parcouru par du CO₂, selon les étapes suivantes :

- une compression adiabatique réversible d'un état 1 ($P_1 = 35$ bar, vapeur saturante sèche) jusqu'à $P_2 = 90$ bar ;
- un refroidissement isobare jusqu'à $T_3 = 40$ °C ;
- une détente adiabatique jusqu'à la pression $P_4 = P_1$;
- une transformation isobare jusqu'à retrouver l'état de départ.

Le diagramme des frigoristes du CO₂ est représenté ci-dessous.

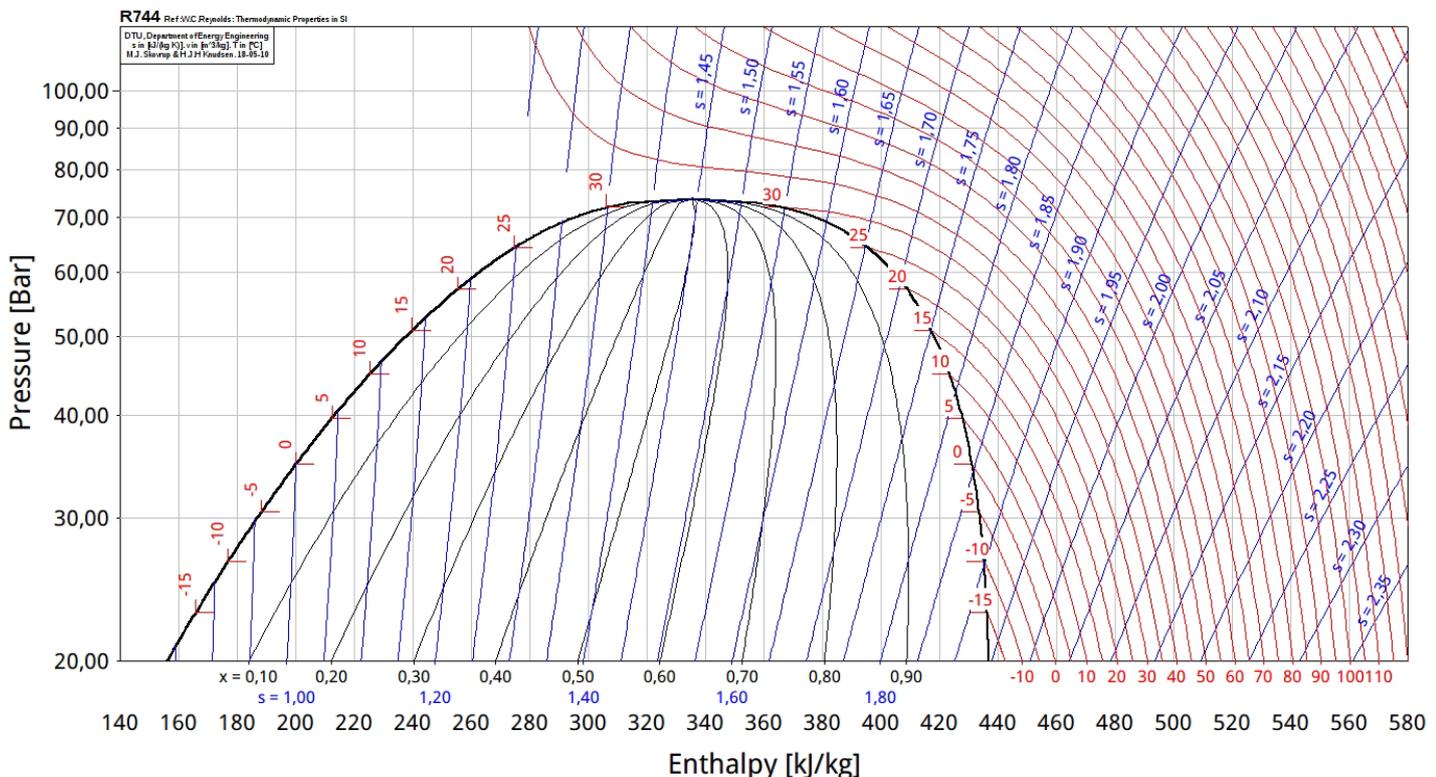


Figure 1 – Diagramme des frigoristes du CO₂.

- 1 - Justifier l'allure des courbes isothermes en utilisant les cas limites.
- 2 - Dessiner le cycle sur le diagramme.
- 3 - On utilise cette machine en fonctionnement frigorifique. Dans quel sens le cycle est-il parcouru ?
- 4 - Calculer la chaleur échangée avec la source froide.
- 5 - Calculer l'efficacité du cycle. Comment l'améliorer ?

Exercice 10 : Climatisation d'une voiture (ATS 2012)

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.

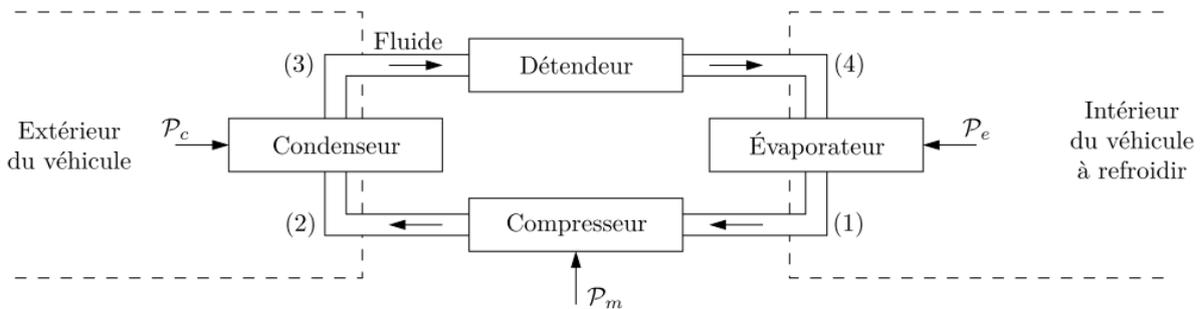


Figure 10 - Structure de la climatisation

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 ?

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

- la courbe de saturation de l'équilibre liquide vapeur de l'hydrofluorocarbure HFC (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}

Lors de l'exploitation du diagramme, les mesures seront faites avec les incertitudes suivantes :

Δh $\pm 5 \text{ kJ.kg}^{-1}$	Δs $\pm 50 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$	Δx $\pm 0,05$	ΔT $\pm 5 \text{ °C}$	Δp $\pm 5\%$
--	--	--------------------------	----------------------------------	-------------------------

2. Indiquer sur le diagramme (document réponse) les domaines liquide, vapeur, équilibre liquide-vapeur du fluide.
3. 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. Le débit massique est $D_m = 0,1 \text{ kg.s}^{-1}$.

4. Rappeler l'expression du premier principe appliqué à un système ouvert en régime permanent (expression en terme de puissances) en définissant les différents termes introduits.

La puissance thermique P_e reçue par le fluide dans l'évaporateur permet la vaporisation isobare complète du fluide venant de (4) et conduit à de la vapeur à température $T_1 = 5 \text{ °C}$ et pression $p_1 = 3 \text{ bar}$: point 1.

- Placer le point (1) sur le diagramme (document réponse). Relever la valeur de l'enthalpie massique h_1 et de 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 $r = p_2/p_1 = 6$.

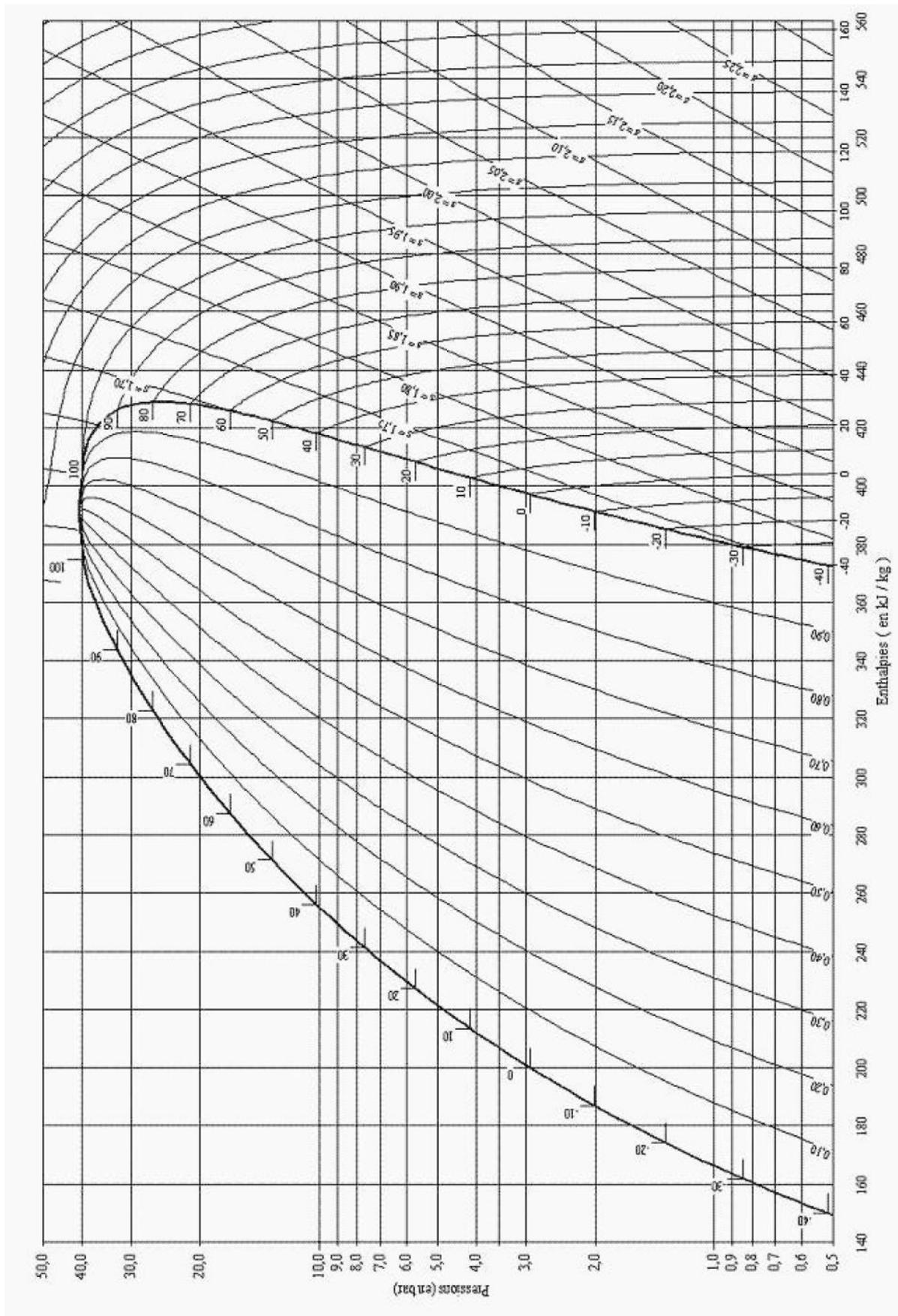
- Déterminer p_2 . Placer le point (2) sur le diagramme (document réponse). Relever la valeur de la température T_2 et celle de l'enthalpie massique h_2 en sortie du compresseur.
- Déterminer la valeur de la puissance P_m du travail mécanique reçu par le fluide lors de son passage dans le compresseur. Commenter le signe de P_m .

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

- Placer le point (3) sur le diagramme (document réponse). Relever la valeur de l'enthalpie massique h_3 en sortie du condenseur.

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

- Montrer que la transformation dans le détendeur est isenthalpique.
- Placer le point (4) sur le diagramme (document réponse) et tracer le cycle complet. Relever la valeur de la température T_4 et le titre massique en vapeur x_4 en sortie du détendeur.
- En déduire la puissance thermique échangée P_e par le fluide lors de son passage à travers l'évaporateur entre (4) et (1). L'air intérieur du véhicule est-il refroidi?
- Définir l'efficacité e , ou coefficient de performance, du climatiseur. Calculer sa valeur.
- 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 11 : Turboalternateur d'une centrale thermique – cycle de Hirn

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

L'eau liquide est chauffée par une chaudière thermique dans un générateur de vapeur, 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.

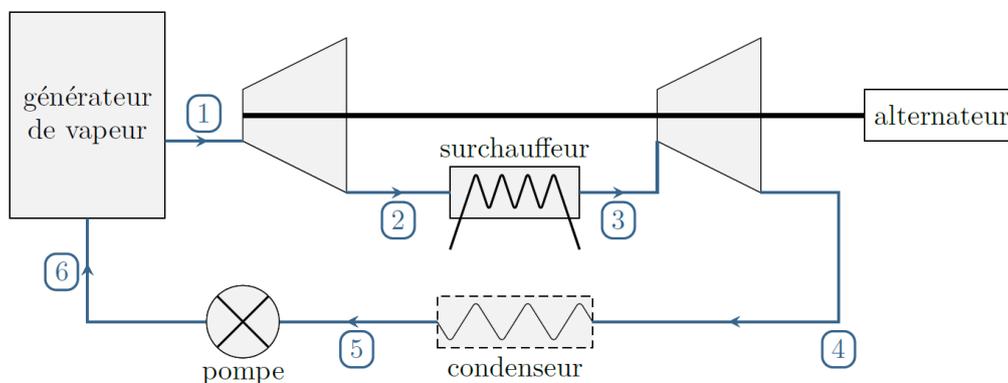


Schéma d'une turbine à vapeur étagée (E. Thibierge)

- 1 - Tracer le cycle parcouru par l'eau dans le diagramme entropique fourni ci-dessous. 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 ce turboalternateur.

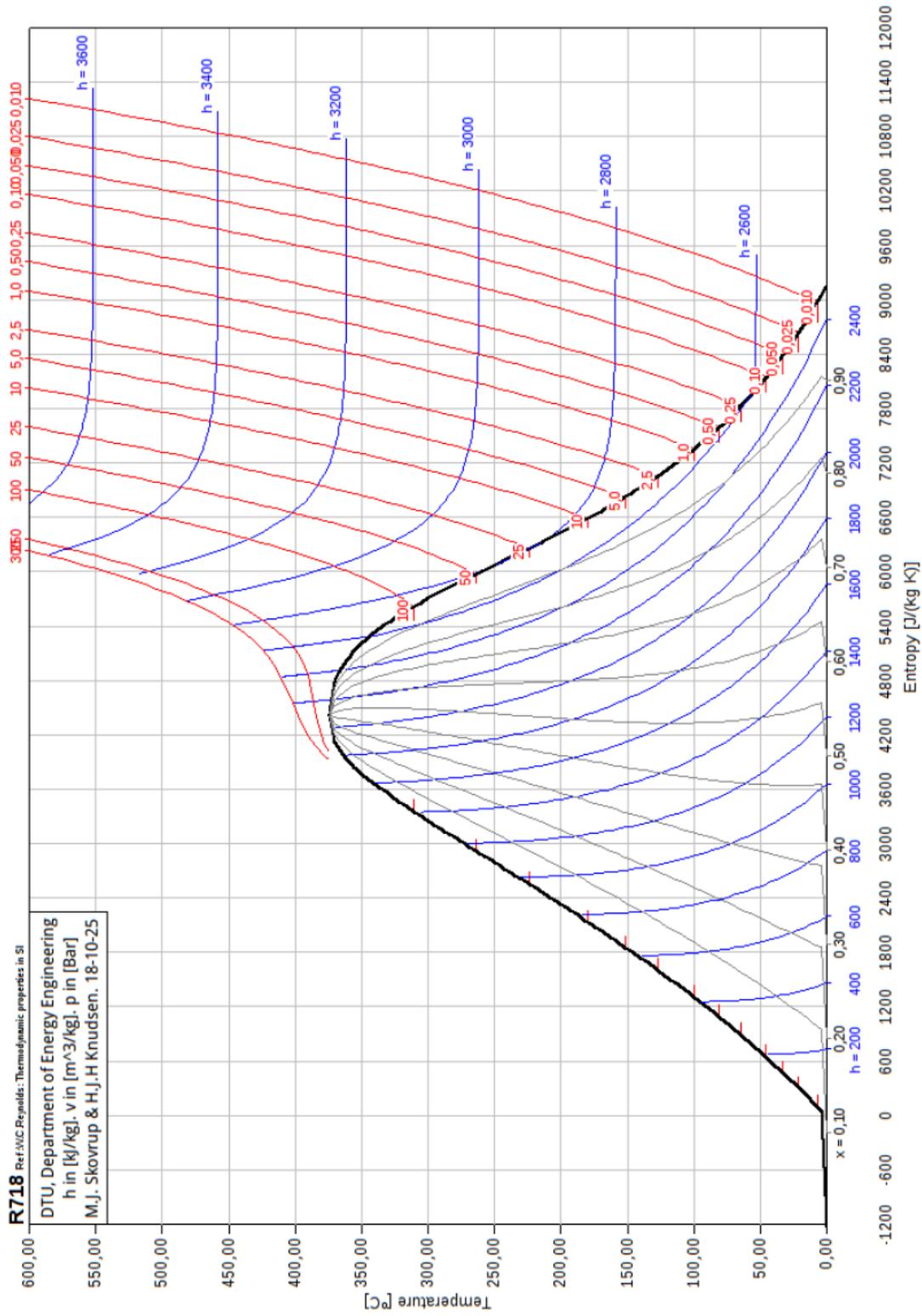


Figure 18 – Diagramme entropique de l'eau.