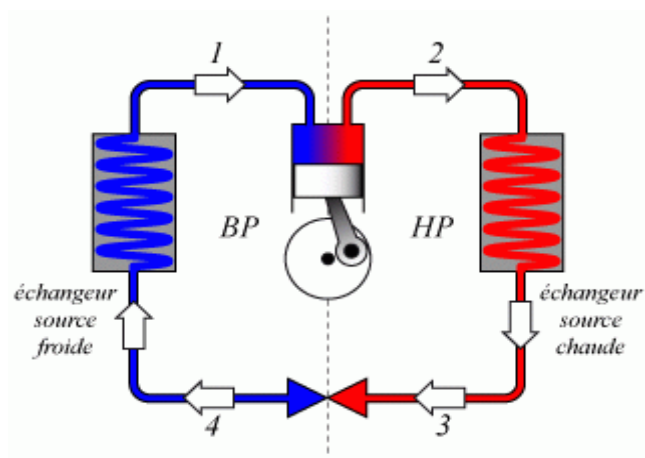


Série d'exercices

Machines frigorifiques et pompes à chaleur 3Année Licence Énergétique

Dr BELGHAR N
08/03/2020



SERIE D'EXERCICES

Exercice N°01 :

On souhaite faire l'étude d'un cycle simple fonctionnant au R134a, défini par :

BP : 2 bars, HP : 10 bars, un surchauffe de : 5K, un sous-refroidissement de : 10K, le débit massique $q = 0,3 \text{ kg/s}^{-1}$

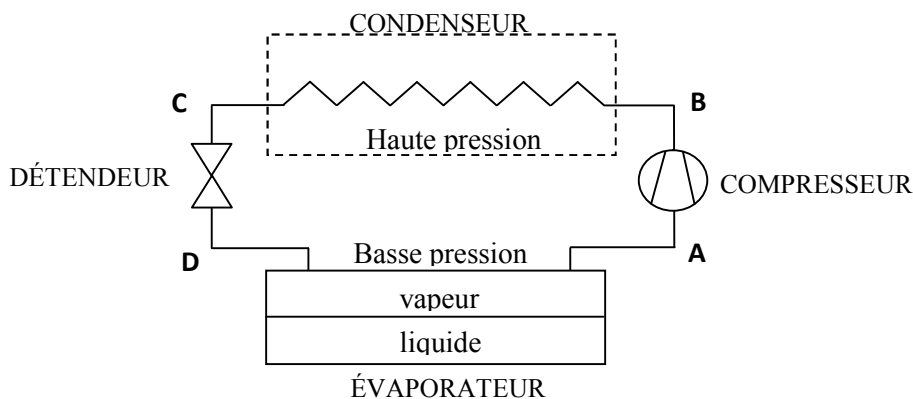
La compression de 1 vers 2 est considérée isentropique.

Questions

1. Sur le diagramme des frigoristes du R134a, placer : les isobares du cycle, les points 1 à 4.
2. Relever les enthalpies massiques des points, calculer la puissance de réfrigération, la puissance indiquée par le compresseur, puissance évacuée au condenseur.
3. Calculer le COP du cycle.

Exercice N°02 :

On réalise une machine frigorifique réversible dont le schéma simplifié est donné ci-dessous :



Le fluide frigorigène subit les transformations réversibles suivantes :

en A, la vapeur saturée, est à la température $T_1 = 243 \text{ K}$ et à la pression $p_1 = 1,51 \text{ bar}$. Elle est comprimée adiabatiquement jusqu'à la pression $p_2 = 5,67 \text{ bar}$ (trajet A-B sur le schéma ci-dessus). On note T_2 la température du fluide en B.

La vapeur sèche subit une transformation isobare dans le condenseur jusqu'à liquéfaction totale (trajet B-C).

En C, le fluide est à l'état de liquide saturé à la température $T_3 = 293 \text{ K}$. Il est détendu de manière isenthalpique jusqu'à la pression p_1 (trajet C-D).

Enfin, le fluide entre dans l'évaporateur où le liquide restant se transforme en vapeur saturée à la température $T_1 = 243 \text{ K}$ (trajet D-A).

Données :

Le fluide dans son état gazeux se comporte comme un gaz parfait.

Rapport des chaleurs massiques : $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1,2$.

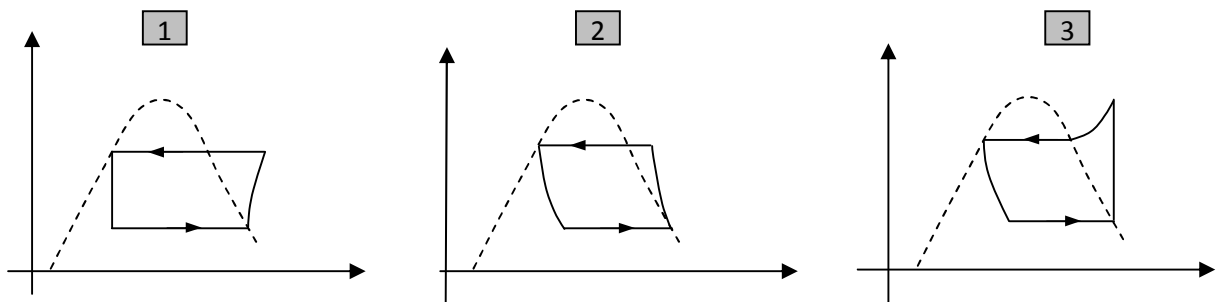
Capacité thermique massique à pression constante du gaz : $c_p = 480 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Point	A	B	C	D
T (K)	$T_1 = 243 \text{ K}$	T_2	$T_3 = 293 \text{ K}$	$T_1 = 243 \text{ K}$
p (bar)	1,51	5,67	5,67	1,51
h (kJ.kg ⁻¹)	338	h_B	219	h_D

1. Sur la figure du document annexe, choisir les couples de grandeurs (p,v) ; (p,h) et (T,s) adaptés à chaque graphe et placer les grandeurs sur les axes correspondants. Placer les points A, B, C et D sur chacun des trois graphes.
2. La pression de la vapeur sèche à la sortie du compresseur est $p_2 = 5,67 \text{ bar}$.

Montrer que la température T_2 du fluide en fin de compression est égale à 303 K.

3. En utilisant le premier principe de la thermodynamique, établir l'expression du travail massique fourni par le compresseur au fluide (travail de transvasement) en fonction de c_p , des températures T_1 et T_2 puis faire l'application numérique.
4. En déduire la valeur de l'enthalpie massique du fluide au point B.
5. Exprimer littéralement la quantité de chaleur massique cédée par le fluide, entre les points B et C, en fonction de c_p , T_2 , T_3 et L (chaleur latente de liquéfaction à la température T_3). Faire l'application numérique en prenant $L = -143 \text{ kJ.kg}^{-1}$.
6. On donne l'enthalpie massique du liquide saturé à la pression $p_1 = 1,51 \text{ bar}$ et à la température $T_1 = 243 \text{ K}$: $h_{\text{liq}} = 173 \text{ kJ.kg}^{-1}$.
 - a) Déterminer l'enthalpie massique du fluide au point D.
 - b) Déterminer le titre vapeur x_v en ce point.
7. Exprimer l'efficacité de ce système réfrigérant en fonction des enthalpies massiques h_A , h_B et h_D . Faire l'application numérique.



Exercices N°0 3

Le cycle d'un réfrigérateur à compression est schématisé dans le diagramme entropique, où est représenté en pointillés la courbe de saturation; (l'entropie S en abscisse, la température T en ordonnée). Le système fonctionne selon un cycle réversible et le fluide utilisé est l'ammoniac.

1. Le fluide sort de l'évaporateur dans l'état 1 (température $T_1 = 263\text{K}$, pression $P_1 = 2,9 \times 10^5 \text{Pa}$) sous forme de vapeur saturante.
Il passe alors dans le compresseur où il subit une compression adiabatique réversible.
Il sort du compresseur (à l'état de vapeur sèche) dans l'état 2 (température T_2 et pression $P_2 = 10,2 \times 10^5 \text{Pa}$).
En assimilant l'ammoniac gazeux à un gaz parfait, calculer la température T_2 en fin de compression.
2. De 2 en 2', l'ammoniac se refroidit de manière isobare, de la température T_2 à la température $T_3 = 298\text{K}$.
Calculer la quantité de chaleur Q_2 échangée par 1kg de fluide avec le milieu extérieur au cours de ce refroidissement. **Commenter son signe.**
3. L'ammoniac est dans l'état 2' sous forme de vapeur saturante. Il pénètre alors dans le condensateur où il se liquéfie à la pression $P_3 = P_2$ et à la température T_3 . A la sortie du condenseur en 3, le fluide est à l'état de liquide de saturation. **Calculer le quantité de chaleur Q_3** échangée par 1 kg de fluide avec le milieu extérieur au niveau du condenseur. **Commenter son signe.**
4. Le liquide pénètre alors dans le détendeur. De 3 à 4, il subit une détente adiabatique et réversible, au cours de laquelle une partie du liquide se vaporise. Ainsi, à son entrée en 4 dans l'évaporateur, la masse d'ammoniac sous forme vapeur est égale à **15%** de la masse totale d'ammoniac (liquide+vapeur). La vaporisation du liquide restant va se terminer dans l'évaporateur à la pression P_1 et la température T_1 . **Calculer la masse de liquide** qui va se vaporiser, dans l'évaporateur pour 1 kg de fluide. **Calculer la quantité de chaleur Q_1** échangée par 1 kg de fluide avec le milieu extérieur au niveau de l'évaporateur
5. **Calculer la quantité de chaleur totale échangée** par 1 kg de fluide avec le milieu extérieur au cours du cycle. **Déduire W** échangée par 1 kg de fluide avec le milieu extérieur au cours du cycle.
6. **Calculer l'efficacité de la machine frigorifique.**

Données :

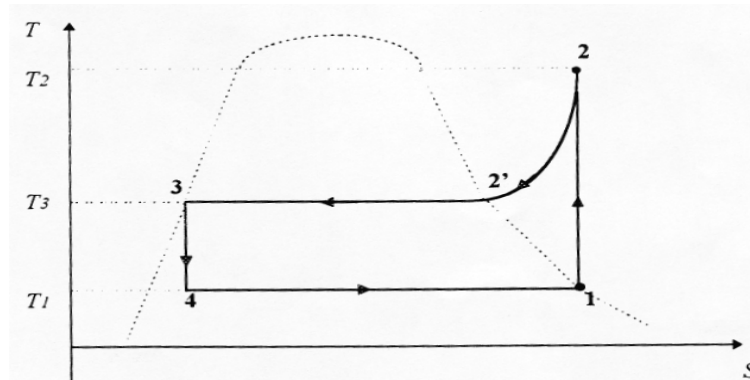
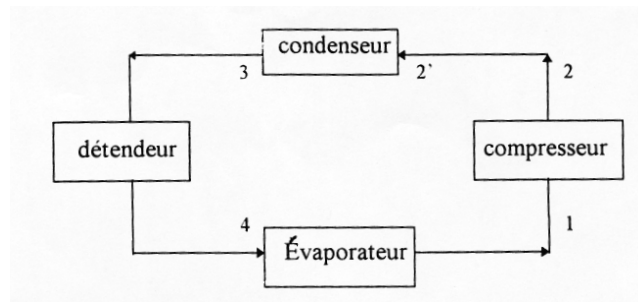
$-c_p = 2,12 \text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ Capacité thermique massique moyenne de l'ammoniac gazeux, à pression Constante, entre les températures T_2 et T_3 . **$PV^\gamma = \text{constante}$,**

$PV = nRT$, $1 \text{Pa} = 0.000010 \text{bar}$

$\gamma = 1,30$ (rapport des capacité thermiques massiques du gaz à pression et volume constants)

-Enthalpie massique de vaporisation de l'ammoniac à $T_1 = 263\text{K}$: $L_1 = 1,30.10^3 \text{kJ.kg}^{-1}$

-Enthalpie massique de vaporisation de l'ammoniac à $T_3 = 298 \text{K}$: $L_3 = 1,16.10^3 \text{kJ.kg}^{-1}$



Exercice N04

Une installation frigorifique fonctionne à l'ammoniac (R717), au régime nominal $-10^{\circ}\text{C}/+30^{\circ}\text{C}$. Elle développe une puissance frigorifique brute de 100 kW . La compression et la détente du R717 sont supposées respectivement parfaitement isentrope et isenthalpe. La surchauffe des vapeurs aspirées par le compresseur est de 10°C , et le sous-refroidissement du fluide frigorigène à l'état liquide en sortie de détendeur atteint la température 25°C . Par ailleurs, on admettra que les changements d'état et de température du fluide caloporteur ont entièrement lieu à l'intérieur des échangeurs thermiques.

5. Tracer le schéma de l'installation en faisant figurer ses composants principaux, et tracer le cycle frigorifique sur le diagramme de Mollier du R717, et faire le lien entre les deux.
6. Indiquer l'intérêt de la surchauffe et du sous-refroidissement du fluide frigorigène.
7. Consigner dans un tableau les valeurs des pressions, températures, enthalpies et titres aux différents points du cycle.
8. Déterminer les grandeurs caractéristiques de cette installation frigorifique :
 - Débit massique du fluide frigorigène;
 - Puissance mécanique théorique du compresseur;
 - Puissance mécanique réelle du compresseur;
 - Coefficient de performance (COP) théorique (de Mollier) et réel de l'installation;
 - Efficacité par rapport au cycle de Carnot de la machine;

9. Calculer la puissance calorifique à évacuer au condenseur.

Données:

- Le diagramme de Mollier du R717 ci-dessous.
- Le travail de compression réel du compresseur vaut son travail de compression théorique divisé par les rendements indiqué η_I et mécanique η_m du compresseur. On considérera que le rendement indiqué η_I est égal au rendement volumétrique η_V du compresseur. Celui-ci s'exprime par $\eta_V = 1 - 0.05 \frac{P_c}{P_e}$, avec P_c et P_e les pressions respectivement au condenseur et à l'évaporateur. Le rendement $\eta_m = 0.90$.

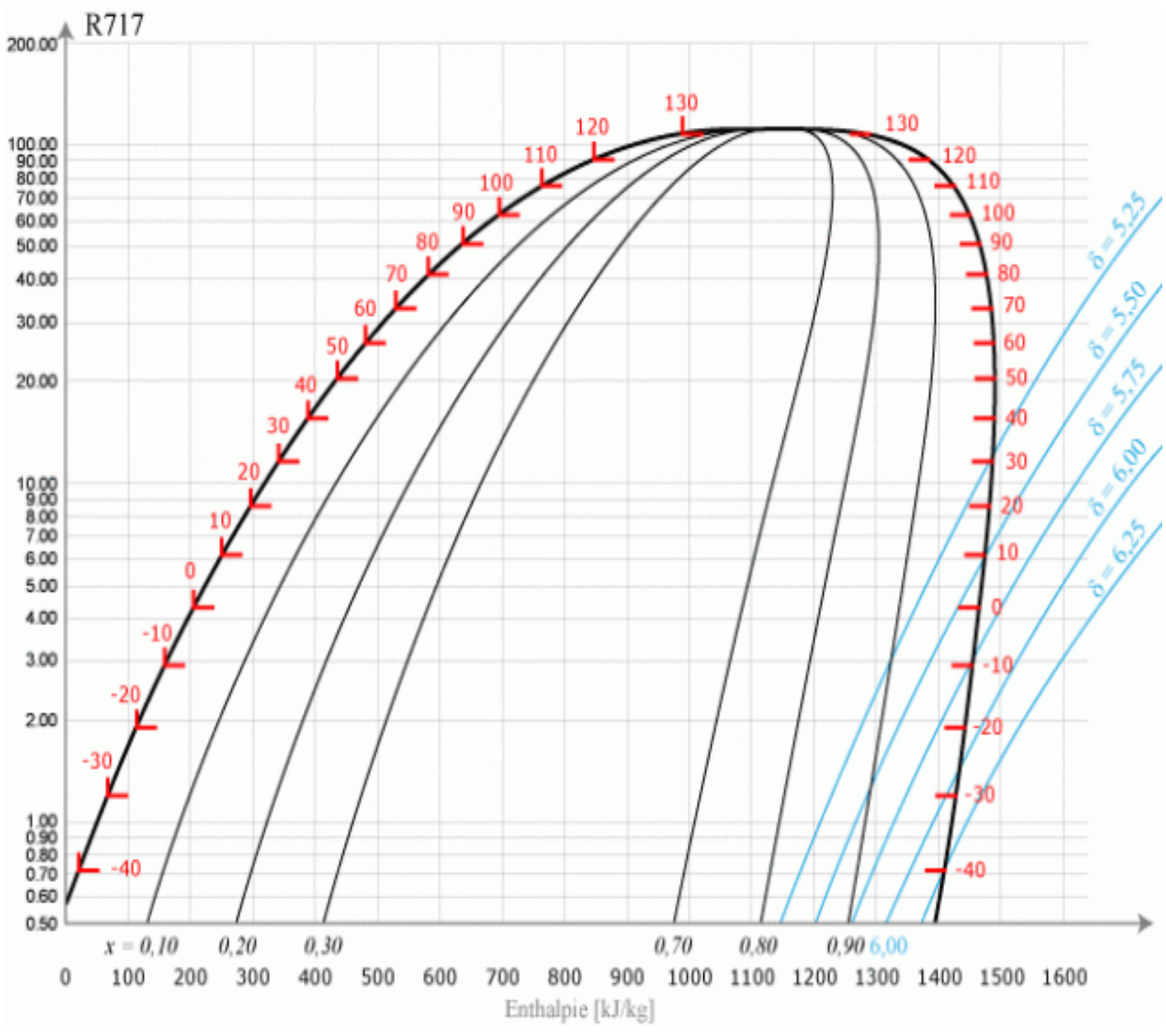


Diagramme de Mollier du R717

Exercice N05

Un système frigorifique est équipé en fluide R134a avec un compresseur sanden Sv :

Température sortie du compresseur : +62° C

Température entrée du compresseur : +10 °C

Température sortie du condenseur : +41° C

Pression aspiration : 2 bars

Pression de refoulement : 16 bars

1. Donner le schéma de l'installation en remplaçant les éléments et en décrivant leurs rôles

A partir du graphe enthalpique /pression du R134a

2. Calculer le travail du compresseur
3. Calculer l'énergie cédée au condenseur
4. Trouver sur le graphique le % vapeur/liquide du frigorigène détendu
5. Calculer la chaleur absorbée
6. Tracer le cycle frigorifique théorique sur le diagramme

Exercice N06

Une pompe à chaleur utilisée pour le chauffage d'une maison individuelle fonctionne suivant un cycle supposé réversible (deux isothermes de deux isotropes) et est reliée à deux sources : l'eau d'une rivière souterraine à la température $T_2 = 10^\circ\text{C}$ constante pendant toute l'année, et l'eau circulant dans un plancher chauffant à la température de $T_1 = 35^\circ\text{C}$. Le cycle est décrit sur la figure suivante :

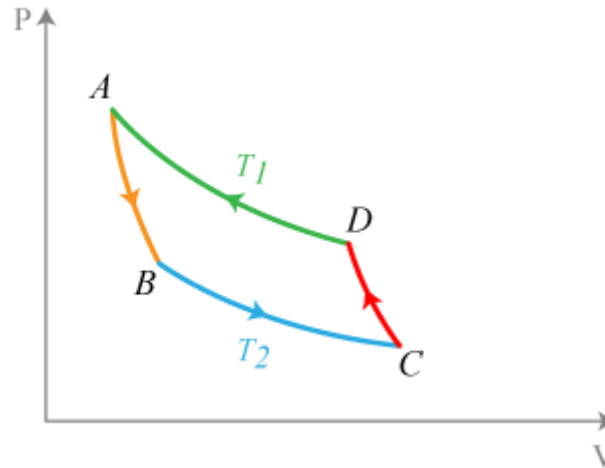


Diagramme (P,V)

Le fluide frigorigène utilisé est le R134a. Le compresseur fournissant du travail au fluide frigorigène a un rendement volumétrique r_v égal à 0.89 et un rendement mécanique et électrique r_{me} égal à 0.8

En hiver, alors que la température extérieure est de -2°C , la maison est maintenue à la température de 18°C . Les besoins calorifiques pour maintenir cette température sont évalués à 6 kW .

1. Déterminer l'expression du flux de chaleur \dot{Q} à fournir à l'habitation en fonction du travail mécanique fourni par le compresseur, les températures T_1 et T_2 , et du nombre **de cycles par seconde effectués par le R134a**.
2. Donner l'expression de la puissance électrique P_e à fournir au moteur. Faire l'application numérique et comparer à celle consommée pour chauffer la maison directement avec des radiateurs électriques.
3. Calculer le nombre de cycles par seconde que doit effectuer le R134a afin de répondre au besoin de chauffage de l'habitation.
4. Question subsidiaire : comment doit être prise en compte le rendement volumétrique du compresseur?

Données :

Le cycle est caractérisé par $V_B = 0.31$, $V_C = 11$. Le R134a est admis sous forme de vapeur à l'entrée du compresseur à la pression $P_C = 4.14\text{ bar}$.

Les machines frigorifiques à absorption liquide sont des machines trithermes qui permettent- en utilisant trois niveaux de températures - de produire du froid à partir de chaleur uniquement. Elles fonctionnent grâce à la faculté de certains liquides d'absorber et de désorber une vapeur. Cette dernière réaction est endothermique et nécessite l'apport de chaleur. Ces machines utilisent comme fluide de travail un mélange binaire, dont l'un des composants est beaucoup plus volatile que l'autre, et constitue le fluide frigorigène, l'autre constitue l'absorbant. Deux couples sont principalement utilisés : Eau+Bromure de Lithium ($H_2O/LiBr$) , l'eau étant le fluide frigorigène; Ammoniac+Eau(NH_3/H_2O), l'ammoniac étant le fluide frigorigène.

On étudie ici les conditions de fonctionnement d'une telle machine frigorifique fonctionnant entre une source chaude à température T_c , une source froide à température T_f , sans apport de travail et avec une source thermique auxiliaire à la température T_a .

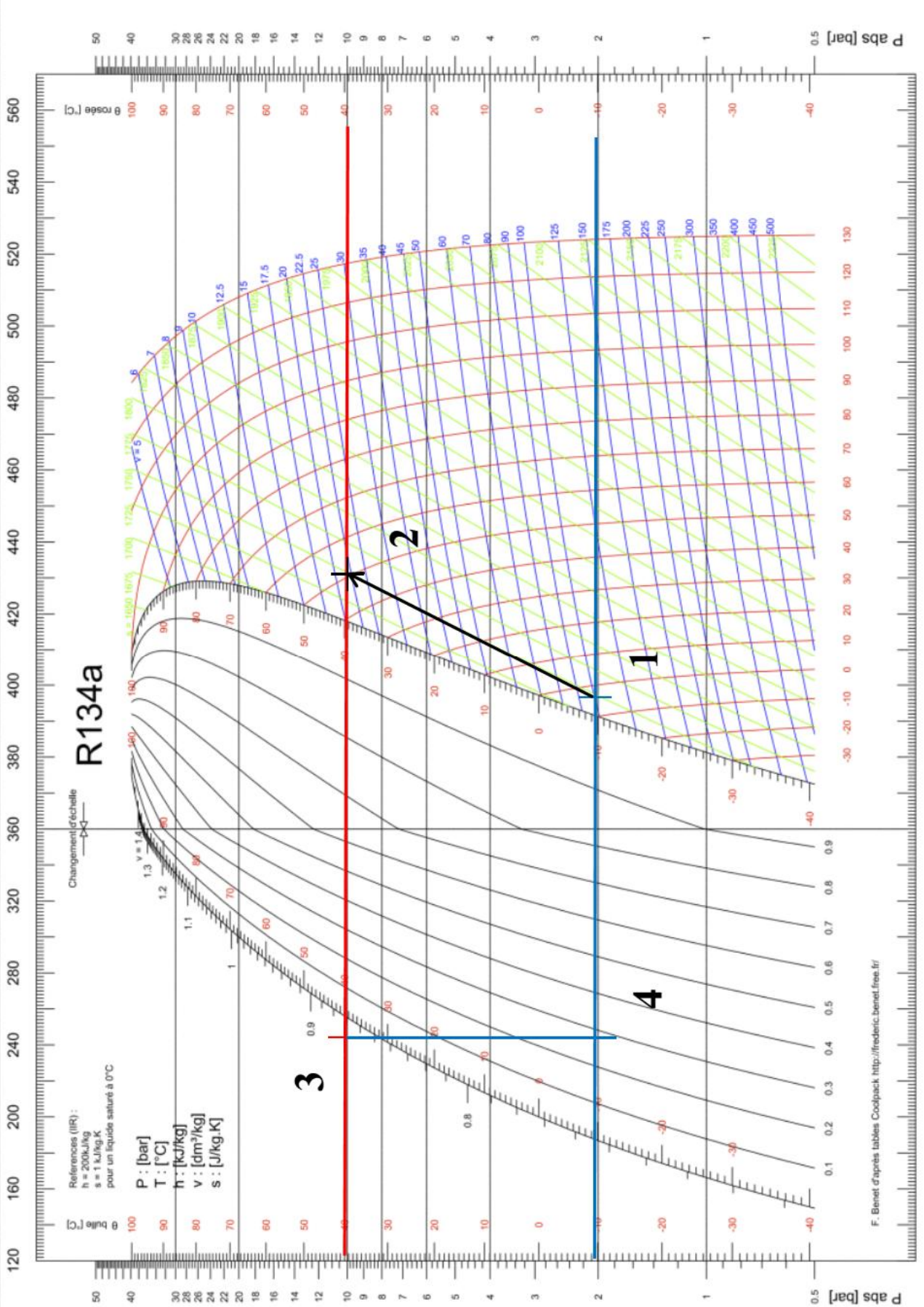
1. Appliquer le premier et le deuxième principe de la thermodynamique au système sur un cycle supposé réversible. Donner la condition sur les trois températures T_c , T_f et T_a pour qu'une production de froid soit possible.
2. Donner l'expression de l'efficacité de cette machine. Analyser cette expression et montrer qu'elle peut s'écrire comme le produit de deux efficacités que l'on peut identifier. Faire l'application numérique.

Données :

Pour l'application numérique, on suppose que le mélange utilisé est le mélange Ammoniac+Eau (NH_3/H_2O), et que $T_f = -33^\circ C$, $T_c = +25^\circ C$ et $T_a = 120^\circ C$

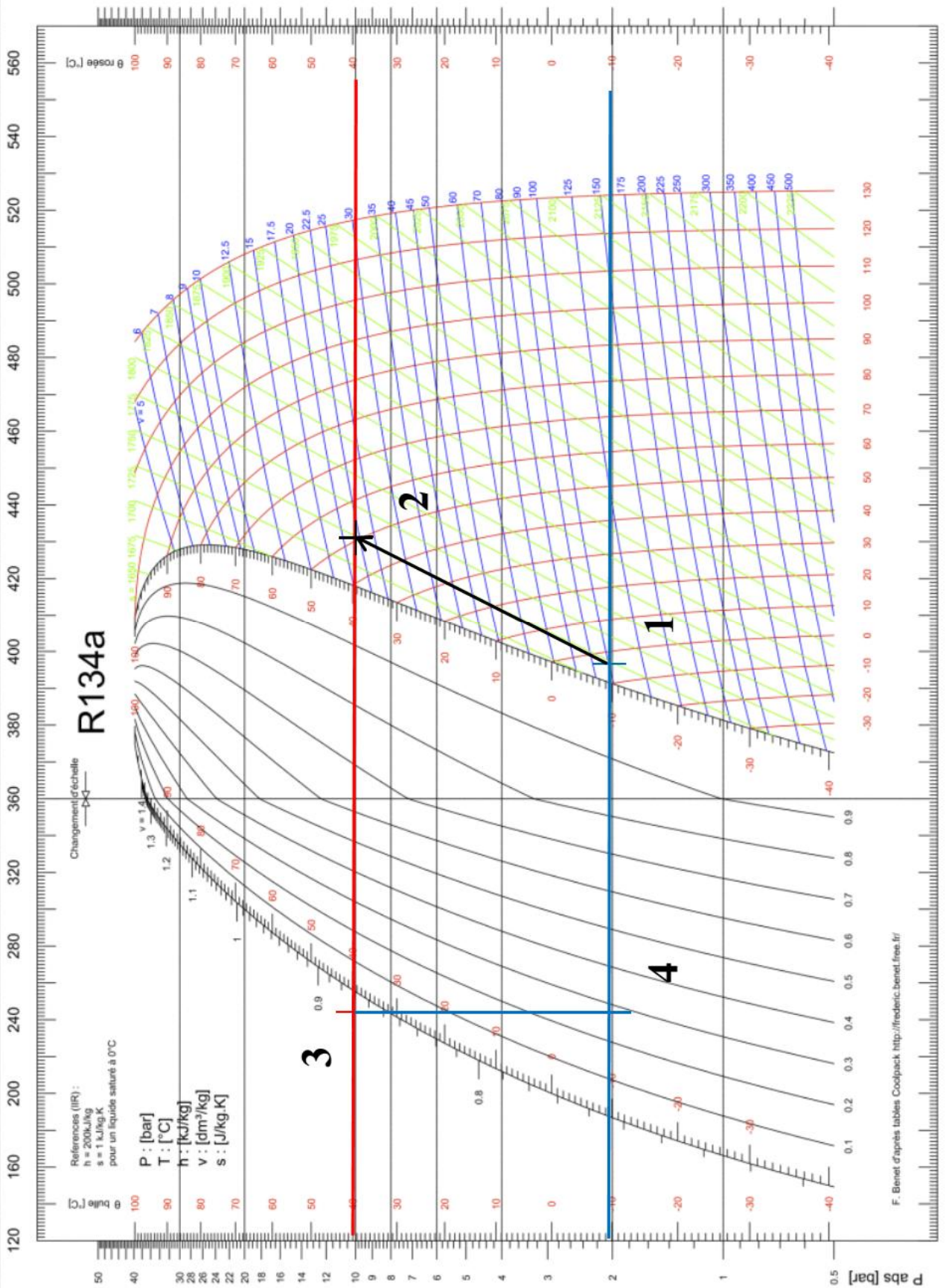
Solution N°01

1. Voir diagramme
2. $Q_f = \Delta h_{41} = h_1 - h_4 = 395 - 245 = 150 \text{ kj/kg}$
3. Puissance frigorifique = $0,3 \times 150 = 45 \text{ kw}$
4. Le travail de compression $W_c = \Delta h_{21} = h_2 - h_1 = 430 - 395 = 35 \text{ kj/kg}$
5. La puissance de compression = le débit \times travail de compression = $0,3 \times 35 = 10,5 \text{ kw}$
6. $Q_c = \Delta h_{23} = h_3 - h_2 = 245 - 430 = -180 \text{ kj/kg}$
7. Puissance calorifique = $0,3 \times 180 = 54 \text{ kw}$



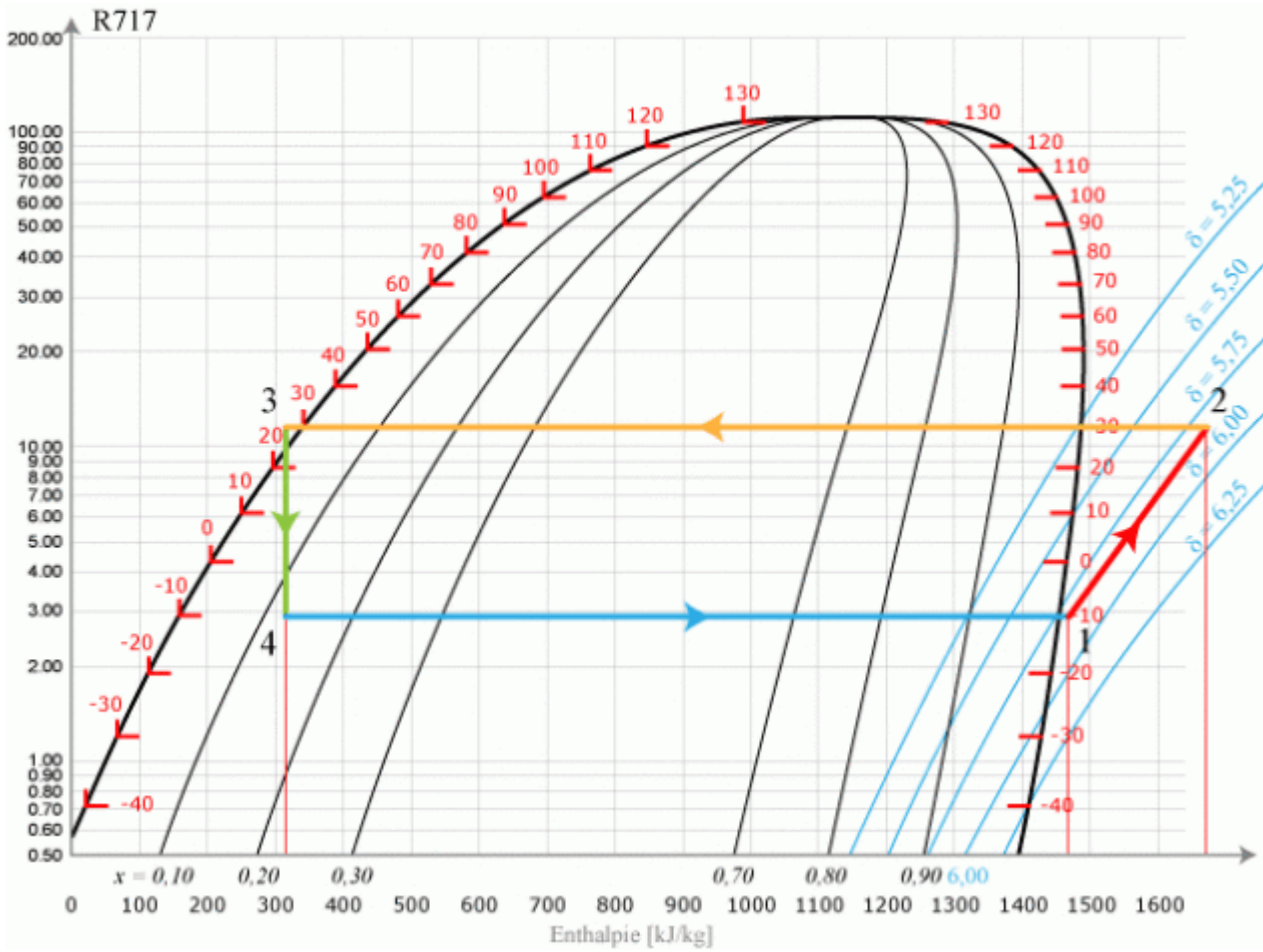
120 160 200 240 280 320 360 380 400 420 440 460 480 500 520 540 560

50 40 30 28 26 24 22 20 18 16 14 12 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0.5

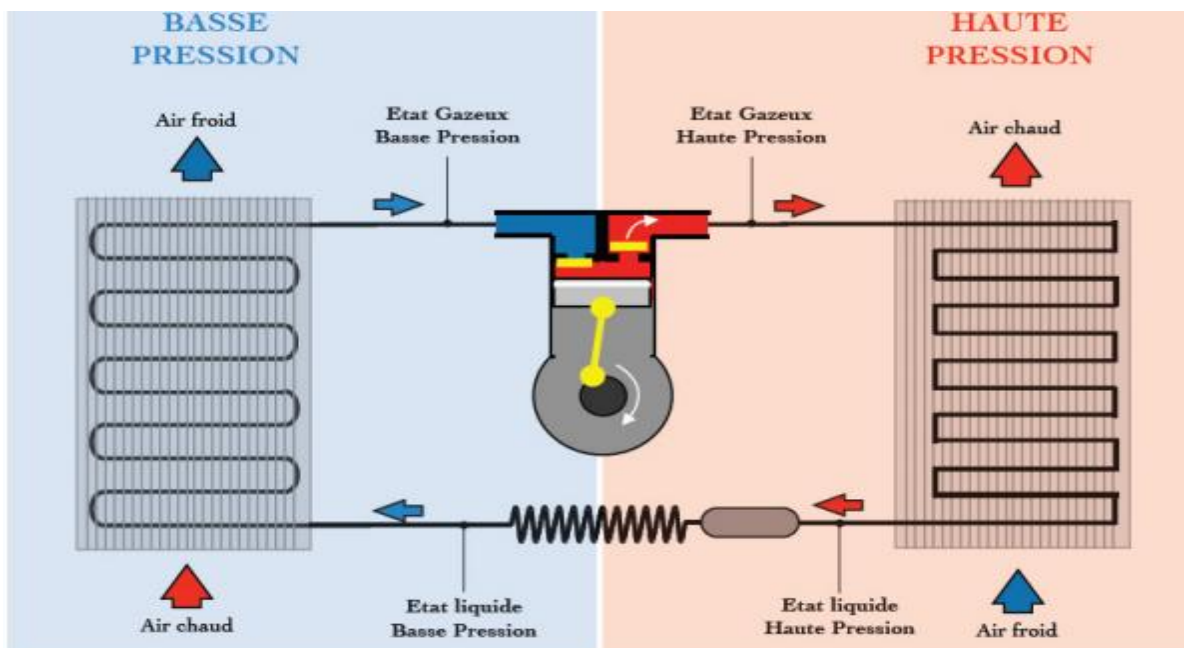


560 540 520 500 480 460 440 420 400 380 360 320 280 240 200 160

Solution N°04



- 1) Le schéma de l'installation est donné sur la figure ci-dessous. Le cycle frigorifique est décrit sur le diagramme de Mollier sur la figure ci-dessus.



2) La surchauffe et le sous-refroidissement du fluide frigorigène sont intéressants car ils décalent respectivement à droite le point 1 et à gauche le point 4. Ces décalages permettent d'augmenter la production frigorifique car elle est proportionnelle à $h_1 - h_4$.

De plus, la surchauffe opérée permet de garantir un bon fonctionnement du compresseur en évitant la présence de fluide frigorigène sous forme liquide (régime sec).

3. Valeurs des pressions, températures, enthalpies et titres du R717 aux différents points du cycle :

	1	2	3	4
Pression	3	12	12	12
Température	0	100	25	- 10
Enthalpie	1470	1665	320	320
Titre de vapeur	1	1	0	0,12

1. La production frigorifique massique Q_f est égale à la variation d'enthalpie de l'ammoniac entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur, soit $h_1 - h_4$ que l'on peut lire sur le diagramme de

Mollier: $Q_f = \Delta h_{41} = h_1 - h_4 = 1470 - 320 = 1150 \text{ kJ.Kg}^{-1}$

2. Le travail massique théorique W_{th} fourni par le compresseur est égal à la variation d'enthalpie du fréon entre l'entrée et la sortie de celui-ci :

$W_{th} = \Delta h_{12} = h_2 - h_1 = 1665 - 1470 = 195 \text{ kJ.Kg}^{-1}$