

DS SCIENCES PHYSIQUES N°2
NIVEAU 1 type CCINP – E3A POLYTECH
Samedi 12 octobre 2024

Les résultats doivent être encadrés, votre copie soignée .

Toute réponse doit être justifiée .

Vos copies doivent être numérotées sous la forme 1/4 , 2/4 , 3/4

Un résultat numérique sans unité ne rapporte aucun point .

CHIMIE :

Données :

→ Composition molaire de l'air : 20 % de dioxygène et 80 % de diazote.

→ Capacité calorifique massique à pression constante de l'eau liquide : $c_{p,\text{eau}} = 4\,180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

→ Chaleur latente de vaporisation de l'eau : $L_{\text{vap}} = 40,7 \text{ kJ.mol}^{-1}$, température de vaporisation $T_{\text{vap}} = 100^\circ \text{C}$.

→ L'échangeur de chaleur est isobare ($P = P^\circ = 1 \text{ bar}$).

→ Tous les gaz (ou vapeurs) sont parfaits.

→ Masse molaire de l'éthanol : 46 g.mol^{-1} .

→ $T (\text{K}) = \theta (^\circ\text{C}) + 273 \text{ K}$

Composé	Enthalpie standard de formation $\Delta_f H^\circ(T_0=298 \text{ K})$ kJ.mol^{-1}	Entropie molaire standard absolue S° à 298K $\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Capacité calorifique molaire isobare $C_p (\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1})$
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(l)}$	-276,5	172,2	
$\text{O}_{2(g)}$		205	29,5
$\text{N}_{2(g)}$			30,6
$\text{CO}_{2(g)}$	-393,5	213,7	38,7
$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	-285,8	70	
$\text{H}_2\text{O}_{(g)}$			37,7

1- a- Ecrire l'équation bilan de la réaction de combustion, en présence de dioxygène gazeux, de l'éthanol liquide ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) en dioxyde de carbone gazeux et en eau liquide (on écrira cette réaction avec un coefficient stoechiométrique en éthanol valant 1 en valeur absolue) .

b- Déterminer l'enthalpie standard $\Delta_r H_1^\circ$ de la réaction supposée indépendante de la température . Commenter .

c- Déterminer l'entropie standard $\Delta_r S_1^\circ$ de la réaction supposée indépendante de la température . Le signe de celle-ci était-il prévisible ?

2- a- Ecrire l'équation bilan de la réaction de combustion, en présence de dioxygène gazeux , de l'éthanol liquide ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) en dioxyde de carbone gazeux et en eau gazeuse (on écrira cette réaction avec un coefficient stoechiométrique en éthanol valant 1 en valeur absolue) .

b- Déterminer l'enthalpie standard $\Delta_r H_2^\circ$ de la réaction supposée indépendante de la température .

c- Déterminer l'entropie standard $\Delta_r S_2^\circ$ de la réaction supposée indépendante de la température. Le signe de celle-ci était-il prévisible ?

3- On appelle pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'un combustible, la chaleur libérée, à 25°C et 1 bar, lors de la réaction de combustion quand l'eau est formée à l'état vapeur. Calculer le PCI de l'éthanol exprimé en kJ.kg^{-1} .

4- Un brûleur est alimenté à pression constante ($P^0 = 1 \text{ bar}$) et à 25°C par 4 moles d'éthanol liquide et par 100 moles d'air. La réaction de combustion est totale et conduit à la formation de dioxyde de carbone gazeux et de vapeur d'eau.

a- Calculer le nombre de moles de chaque composé dans le mélange sortant du brûleur. Calculer la pression partielle de l'eau dans ce mélange.

b- En considérant que l'intégralité de la chaleur de combustion est reçue par les gaz de combustion (ce qui revient à considérer le réacteur comme adiabatique), déterminer la température T_1 des gaz sortant du brûleur.

c- A la sortie du brûleur les gaz circulent dans un échangeur de chaleur d'où ils ressortent à 110°C et au sein duquel ils cèdent de la chaleur à de l'eau liquide dont la température augmente de 15°C à 40°C Calculer la quantité de chaleur échangée par les gaz de combustion.

Calculer la masse d'eau liquide chauffée par les gaz de combustion.

PHYSIQUE : (niveau 1) type CCINP / E3A-Polytech

Problème 1: autour de l'eau

Ce problème comporte trois parties s'articulant autour d'un thème commun : l'eau.

Dans la première partie du problème, on s'intéresse à quelques propriétés générales de l'eau.

Dans la seconde partie, on étudie un échangeur, organe présent dans de nombreuses installations utilisant les propriétés thermiques de l'eau.

Dans la troisième partie, on s'intéresse à l'étude d'une partie d'un réacteur à eau pressurisée .

Les trois parties sont indépendantes .

Partie A- Propriétés physiques de l'eau

I- Quelques propriétés de la glace

1- Dessiner le diagramme de phase $p(T)$ de l'eau en plaçant les domaines solide, liquide et gaz ainsi que les points triple et critique.

2- On donne :

— les coordonnées du point triple de l'eau : $T_T = 273,16 \text{ K}$; $p_T = 611 \text{ Pa}$;

— la pression de fusion à $T_0 = 273,15 \text{ K}$: $p_0 = 101\,325 \text{ Pa}$.

En assimilant la courbe de fusion de l'eau à une droite d'équation $p_{\text{fus}}(\text{en MPa}) = a T + b$, déterminer les expressions de a et b en fonction de p_T , p_0 , T_T et T_0 ainsi que leur valeur numérique.

3- Application : la glace d'une patinoire est à - 5 °C. La pression exercée par un patineur est-elle suffisante pour former un film de liquide sur lequel les patins vont glisser ? On attend une réponse se basant sur un raisonnement quantitatif, mettant en jeu des ordres de grandeur réalistes. Le cas échéant, expliquer qualitativement par quel(s) phénomène(s) physique(s) se forme le film d'eau liquide.

II- Quelques propriétés de la vapeur d'eau

1- Donner l'équation d'état des gaz parfaits qui relie la pression p , le volume massique v , la masse molaire M , la température T et la constante des gaz parfaits R .

2- Afin de quantifier le caractère compressible de l'eau, on définit le coefficient de compressibilité isotherme

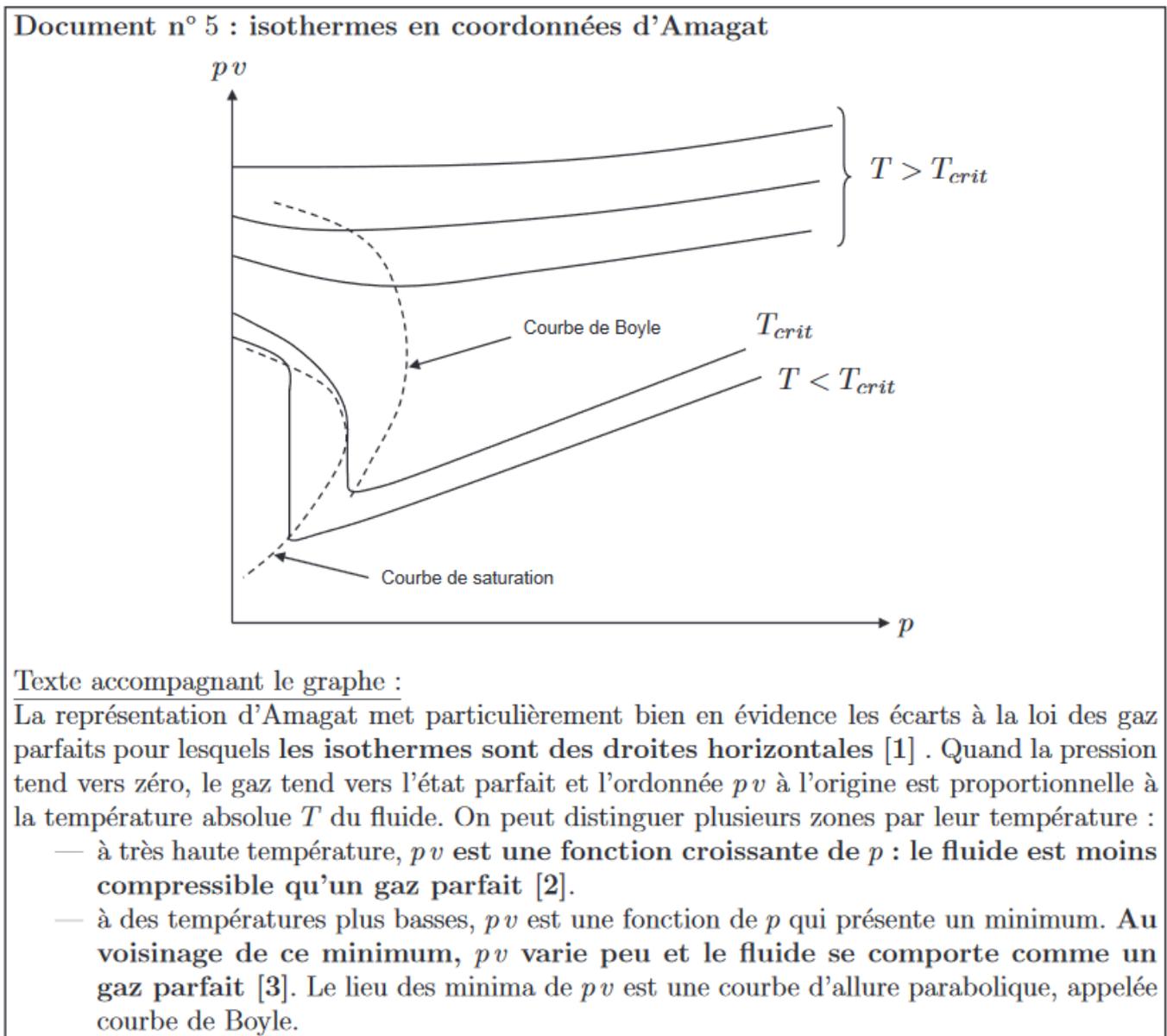
$\chi_T = \frac{-1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$. Montrer que pour un gaz parfait le coefficient de compressibilité isotherme est donné par

$$\chi_T = \frac{1}{p} .$$

3- Le document n°5 ci-dessous donne l'allure des isothermes de l'eau en coordonnées d'Amagat, c'est-à-dire le graphe portant le produit pv en fonction de p , pour différentes températures.

On se propose de justifier certaines affirmations données dans le texte accompagnant le graphe, marquées en gras.

Justifier les affirmations [1] et [2] du document n°5 (ci-dessous).



Partie B : Echangeur thermique

L'échangeur thermique est un organe fréquemment utilisé dans les installations thermiques. On le trouve dans des pompes à chaleur, des machines à froid ou certains cumulus d'eau chaude.

Le principe d'un échangeur thermique est de permettre le transfert d'énergie thermique entre deux fluides. Dans l'étude menée ici, ce sont :

- l'eau glycolée circulant dans un cumulus d'eau chaude d'une part ;
- l'eau à usage domestique d'une habitation d'autre part.

Ces deux liquides, supposés indilatables et incompressibles, sont mis en contact thermique au sein de l'échangeur via des canalisations dans lesquelles ils se déplacent en sens opposé. C'est dans la zone active de l'échangeur, représentée sur les figures 7 et 8 ci-dessous, que s'opère le transfert thermique entre les deux fluides. Hormis sur leur surface commune, les canalisations sont calorifugées.

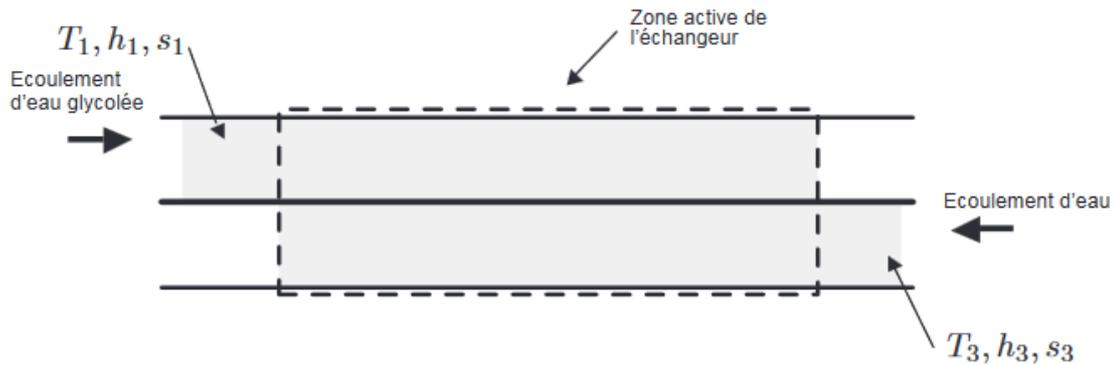


FIGURE 7 – Echangeur à l'instant initial.



FIGURE 8 – Echangeur à l'instant final.

On note d_e et d_g respectivement le débit massique d'eau et d'eau glycolée. On note également T_i, h_i, s_i respectivement : la température, l'enthalpie massique, l'entropie massique du fluide désigné par $i \in \{1; 2; 3; 4\}$, sachant que :

- $i = 1$ fait référence à l'entrée d'eau glycolée dans la zone active.
- $i = 2$ fait référence à la sortie d'eau glycolée de la zone active.
- $i = 3$ fait référence à l'entrée d'eau dans la zone active.
- $i = 4$ fait référence à la sortie d'eau de la zone active.

Les écoulements sont supposés horizontaux et en régime stationnaire. On néglige la variation d'énergie cinétique des fluides lors de leur passage dans l'échangeur.

I- Bilan d'enthalpie par seconde

On donne l'expression du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert en écoulement permanent :

$$\sum_{k' \in \text{Sorties}} d_{k'} h_{k'} - \sum_{k \in \text{Entrées}} d_k h_k = p_u + p_{th} \quad (E)$$

où p_u désigne la puissance massique échangée entre le système et les parois mobiles qui le délimitent et p_{th} est la puissance massique échangée entre le système et l'extérieur par transfert thermique.

1- Donner la signification physique des termes du membre de gauche de l'égalité (E) .

2- On note c_e et c_g respectivement la capacité thermique massique de l'eau et de l'eau glycolée. Déterminer la relation entre : $c_g, c_e, d_g, d_e, T_1, T_2, T_3$ et T_4 . Il est attendu de définir très clairement le système d'étude.

3- On donne : $c_g = 3,29 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $c_e = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $d_g = 10,0 \text{ kg.s}^{-1}$, $T_1 = 10,0 \text{ °C}$, $T_2 = 15,0 \text{ °C}$, $T_3 = 15,0 \text{ °C}$ et $T_4 = 12,0 \text{ °C}$. Calculer numériquement le débit massique d'eau d_e .

II- Bilan d'entropie par seconde

1- Ecrire une relation analogue à (E) traduisant le second principe de la thermodynamique, en entropie par seconde, pour un système ouvert en écoulement permanent et donner la signification physique de chacun des termes intervenant dans cette relation.

2- Déterminer l'expression du taux de création d'entropie par unité de temps dans l'échangeur. Effectuer l'application numérique .

Donnée : l'entropie d'un corps indilatable et incompressible, de capacité thermique massique c et de température T , est donnée, à une constante additive près, par : $s(T) = c \ln T + \text{cte}$.

Partie C : thermodynamique dans un REP

Les réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP) exploitent l'énergie libérée par la fission de noyaux d'uranium 235 provoquée par des flux de neutrons pour chauffer l'eau d'un premier circuit appelé circuit primaire. Ce dernier va transférer son énergie thermique, via un échangeur appelé générateur de vapeur, à un deuxième circuit : le circuit secondaire. L'eau du secondaire subit un cycle thermodynamique qui consiste en une vaporisation au niveau de la source chaude, une détente de la vapeur dans une turbine (reliée à un alternateur qui va produire de l'électricité), une condensation de la vapeur sortant à basse pression de la turbine et une compression de l'eau condensée afin de ramener cette eau à la pression initiale.

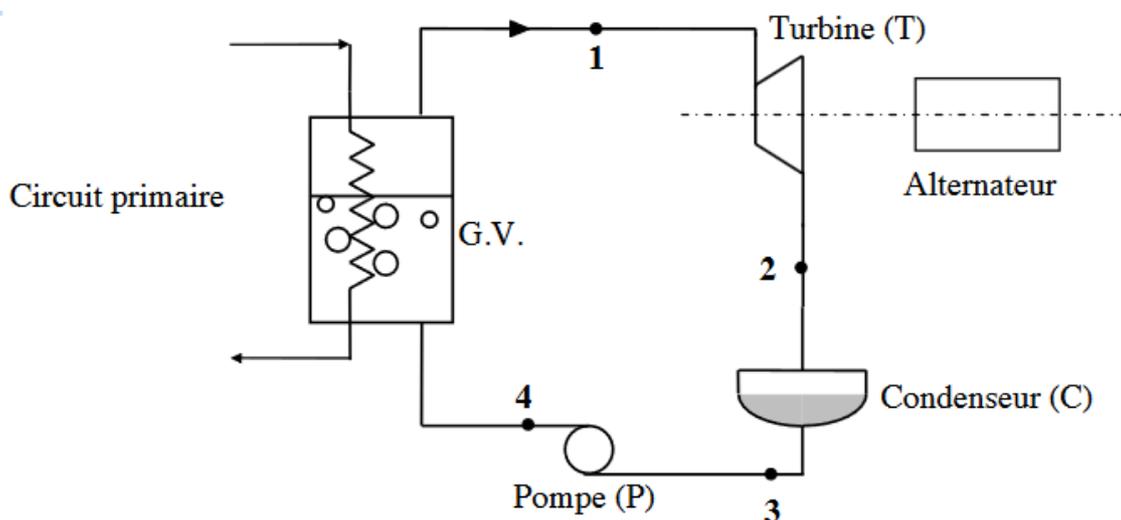
Cette partie a pour objectif d'étudier des aspects thermodynamiques du circuit secondaire et ce, systématiquement, en régime permanent.

Données :

Pression de vapeur saturante (bar) 1 bar = 10^5 Pa	enthalpies massiques ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)		entropies massiques ($\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)	
	à l'état de liquide saturant : h'	à l'état de vapeur saturante : h''	à l'état de liquide saturant : s'	à l'état de vapeur saturante : s''
0,05	137,8	2 561,6	0,4763	8,3960
10	762,6	2 776,2	2,1382	6,5828
70	1 267,4	2 773,5	3,1219	5,8162

Tableau 1

Le circuit secondaire est constitué du générateur de vapeur (G.V.), d'une turbine (T) reliée à un alternateur, d'un condenseur (C) et d'une pompe d'alimentation secondaire (P), comme précisé sur la figure ci-dessous .

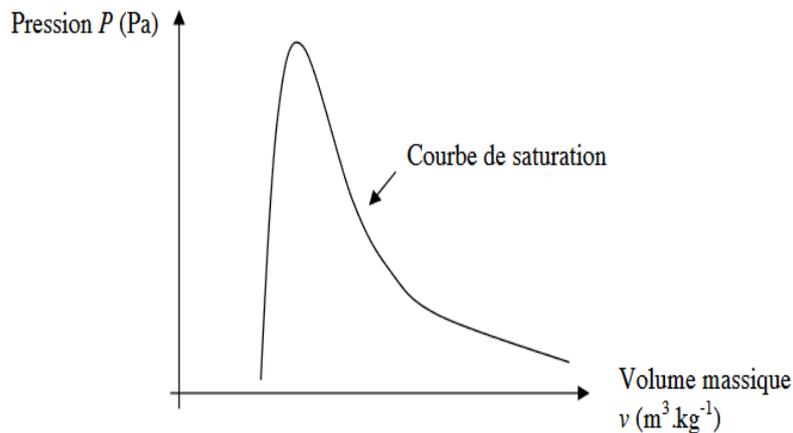


Pour l'ensemble de cette partie, nous négligerons les frottements ainsi que les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle du fluide secondaire. **Dans le condenseur et le générateur de vapeur il n'y a pas de pièce mobile.**

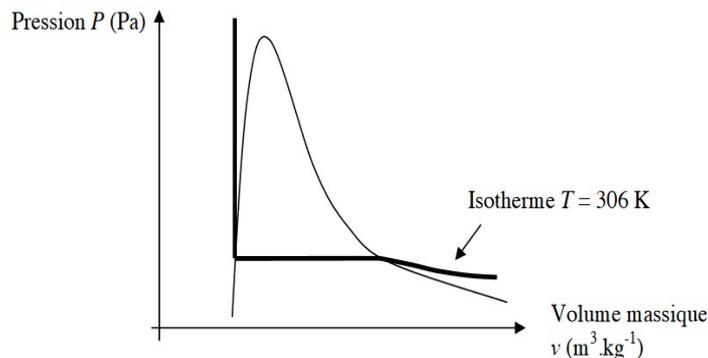
I- Questions préliminaires

1- Donner pour une masse $m = 1$ kg de fluide en écoulement stationnaire au travers d'une machine la relation liant la différence des enthalpies massiques (en kJ.kg^{-1}) du fluide à la sortie et à l'entrée de la machine, le travail massique indiqué w_i , c'est-à-dire le travail massique (en kJ.kg^{-1}) échangé entre une masse $m = 1$ kg de fluide et les parois mobiles de la machine, et q le transfert thermique entre le kilogramme de fluide et la machine (en kJ.kg^{-1})

2- Sur un diagramme de Clapeyron (cf ci-dessous) que vous reproduirez, préciser la position du point critique, les parties courbes de rosée et d'ébullition. Indiquer également les domaines du liquide, du mélange diphasique et de la vapeur surchauffée. Mentionner où se trouve le liquide saturant et la vapeur saturante.



3 - Sur le diagramme de Clapeyron de la figure ci-dessous, l'allure de l'isotherme correspondant à la température $T=306$ K a été représentée. Justifier l'allure de cette isotherme pour chaque domaine. On pourra, dans le domaine de la vapeur surchauffée, se référer au modèle du gaz parfait. Tracer l'allure de l'isotherme correspondant à la température $T= 559$ K sur un diagramme de Clapeyron que vous reproduirez et où apparaît l'allure de l'isotherme correspondant à la température $T = 306$ K.



4- Démontrer qu'une transformation adiabatique réversible est une transformation isentropique.

5- En considérant que l'eau liquide dans une pompe est incompressible et de volume massique $v = 10^{-3} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$, calculer le travail massique indiqué w_{iP} échangé par l'eau circulant dans une pompe, en considérant la transformation adiabatique réversible et une augmentation de pression de $\Delta P = 70$ bar. On rappelle que la variation élémentaire de l'enthalpie massique dh du fluide peut s'écrire : $dh = T ds + v dP$.

Ce travail peut être considéré comme négligeable devant les autres échanges énergétiques ; **dans toute la suite du problème, le travail indiqué échangé par un liquide sera systématiquement considéré comme nul.**

Quelle est la nature de la transformation du fluide dans une pompe ?

II- Etude du cycle thermodynamique simplifié

Le fluide secondaire subit le cycle thermodynamique suivant :

- 1 → 2 : détente adiabatique réversible dans la turbine,
- 2 → 3 : liquéfaction isobare totale dans le condenseur,
- 3 → 4 : compression adiabatique réversible dans la pompe d'alimentation secondaire,
- 4 → 1 : échauffement puis vaporisation isobare dans le générateur de vapeur saturante.

Le tableau suivant précise l'état thermodynamique du fluide secondaire en certains points du cycle :

Point	Pression (bar) 1 bar = 10 ⁵ Pa	Température (K)	Etat du fluide secondaire	Enthalpie massique (kJ.kg ⁻¹)	Entropie massique (kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹)
1	70	559	Vapeur saturante	2 773,5	5,8162
2	0,05	306	Mélange diphasique		
3	0,05		Liquide saturant	137,8	0,4763
4	70		Liquide sous-saturé		

Tableau 2

1- Tracer dans un diagramme de Clapeyron, où figure la courbe de saturation, l'allure du cycle thermodynamique subi par le fluide secondaire. Y placer notamment les points 1, 2, 3 et 4.

2- Calculer, en sortie de turbine, le titre massique en vapeur x_2 et l'enthalpie massique h_2 du fluide. En déduire le travail massique indiqué w_{IT} fourni à l'extérieur par le fluide dans la turbine.

Une vapeur humide est d'autant plus corrosive pour les pales de la turbine que son titre est faible, que pensez-vous de la détente étudiée ?

3- Déterminer la température T_3 et la valeur du titre en vapeur x_3 du fluide en sortie du condenseur. Calculer la chaleur massique q_{eC} reçue par le fluide avec le condenseur, commentez son signe .

4- Calculer la chaleur massique q_{eGV} reçue par le fluide dans le générateur de vapeur. Commenter son signe .

5- Calculer le rendement de ce cycle thermodynamique η_{cycle} puis celui de Carnot η_{Carnot} en utilisant les mêmes sources chaude et froide.

Problème 2 : Étude thermodynamique d'une chambre froide

Le stockage des récoltes s'effectue dans une chambre froide. On se propose dans cette partie d'étudier cette machine thermique. Le fluide réfrigérant étudié est du R134a. Pour les futures constructions, le fluide sera du R1234ze pour sa moindre contribution à l'effet de serre.

A – Généralités :

Le fluide réfrigérant décrit le cycle thermodynamique présenté figure 8.

On modélise la machine frigorifique par une machine ditherme schématisée en figure 9.

On utilise les notations suivantes :

→ Q_c : transfert thermique algébriquement reçu par le fluide au cours d'un cycle de la part de la source chaude à la température T_c ;

→ Q_f : transfert thermique algébriquement reçu par le fluide au cours d'un cycle de la part de la source froide à la température T_f ;

→ W : travail algébriquement reçu par le fluide au cours d'un cycle de la part de l'extérieur.

1- Au niveau de quel organe de la machine thermique se trouve la chambre froide ? Justifier votre réponse.

2- Préciser en justifiant les signes de Q_c , Q_f et W .

3- Définir l'efficacité e (également appelé COefficient de Performance COP) de la machine frigorifique.

4- Établir l'expression de l'efficacité de Carnot e_c , en fonction de T_c et T_f . Que peut-on dire l'efficacité réelle e par rapport à l'efficacité de Carnot e_c ?

5- Calculer numériquement e_c avec $T_c = 45^\circ C$ et $T_f = 3^\circ C$. Interpréter le résultat obtenu.

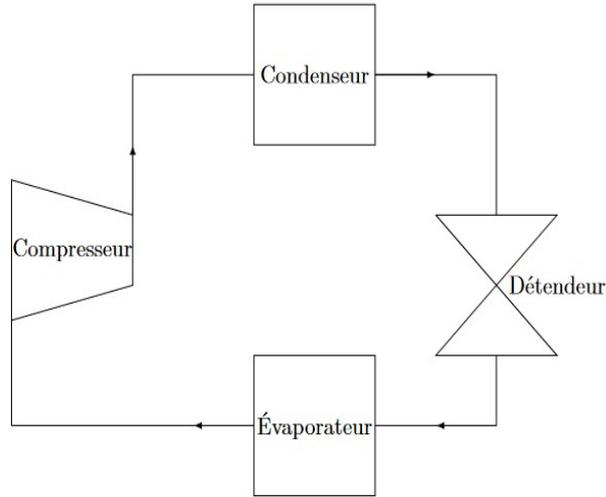


Figure 8

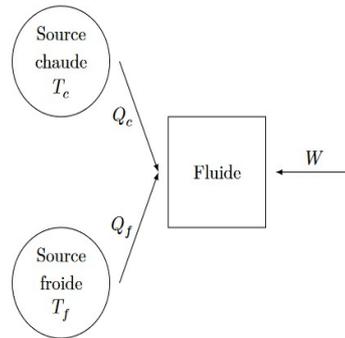


Figure 9

B – Description du cycle :

Le cycle comprend les successions de transformations suivantes :

- 1 → 2 : compression adiabatique réversible en phase gazeuse dans le compresseur ;
- 2 → 3 : refroidissement isobare de la vapeur , on obtient une vapeur saturante en sortie;
- 3 → 4 : compression totale et isobare jusqu'au liquide saturant;
- 4 → 5 : sous-refroidissement isobare ;
- 5 → 6 : détente isenthalpique ;
- 6 → 7 : chauffage isobare jusqu'à l'état de vapeur saturante ;
- 7 → 1 : surchauffe de la vapeur.

Le tableau 2 donne le relevé thermodynamique du fluide aux différents points de ce cycle.

Point du cycle	Pression P (bar)	Température T ($^\circ C$)	Enthalpie massique h ($kJ \cdot kg^{-1}$)	Débit massique D_m ($kg \cdot s^{-1}$)
1	2,7	3,0	402	0,16
2	11,6	63,1	442	0,16
3	11,6	45,0	421	0,16
4	11,6	45,0	264	0,16
5	11,6	40,0	256	0,16
6	2,7	-2,0	256	0,16
7	2,7	-2,0	397	0,16

Tableau 2

6- Représenter le cycle thermodynamique sur le diagramme des frigoristes fourni en fin de problème .

- 7- Lire graphiquement le titre en vapeur x_v du point 6. Calculer x_v à l'aide du théorème des moments .
- 8- Rappeler l'expression du premier principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement stationnaire, dans lequel on néglige les variations d'énergie cinétique massique Δe_c et d'énergie potentielle de pesanteur massique Δe_p devant la variation d'enthalpie massique Δh .
- 9- Exprimer puis calculer numériquement le transfert thermique massique q_f reçu par le fluide dans l'évaporateur.
- 10- Exprimer puis calculer numériquement le transfert thermique massique q_c reçu par le fluide dans le condenseur.
- 11- Exprimer puis calculer numériquement le travail indiqué w_i reçu par le fluide de la part du compresseur.
- 12- En déduire l'efficacité réelle e de la machine frigorifique.
- 13- Exprimer puis calculer numériquement la puissance thermique extraite de la chambre froide $P_{th,f}$.

Diagramme de la pression en fonction de l'enthalpie massique pour le R134a

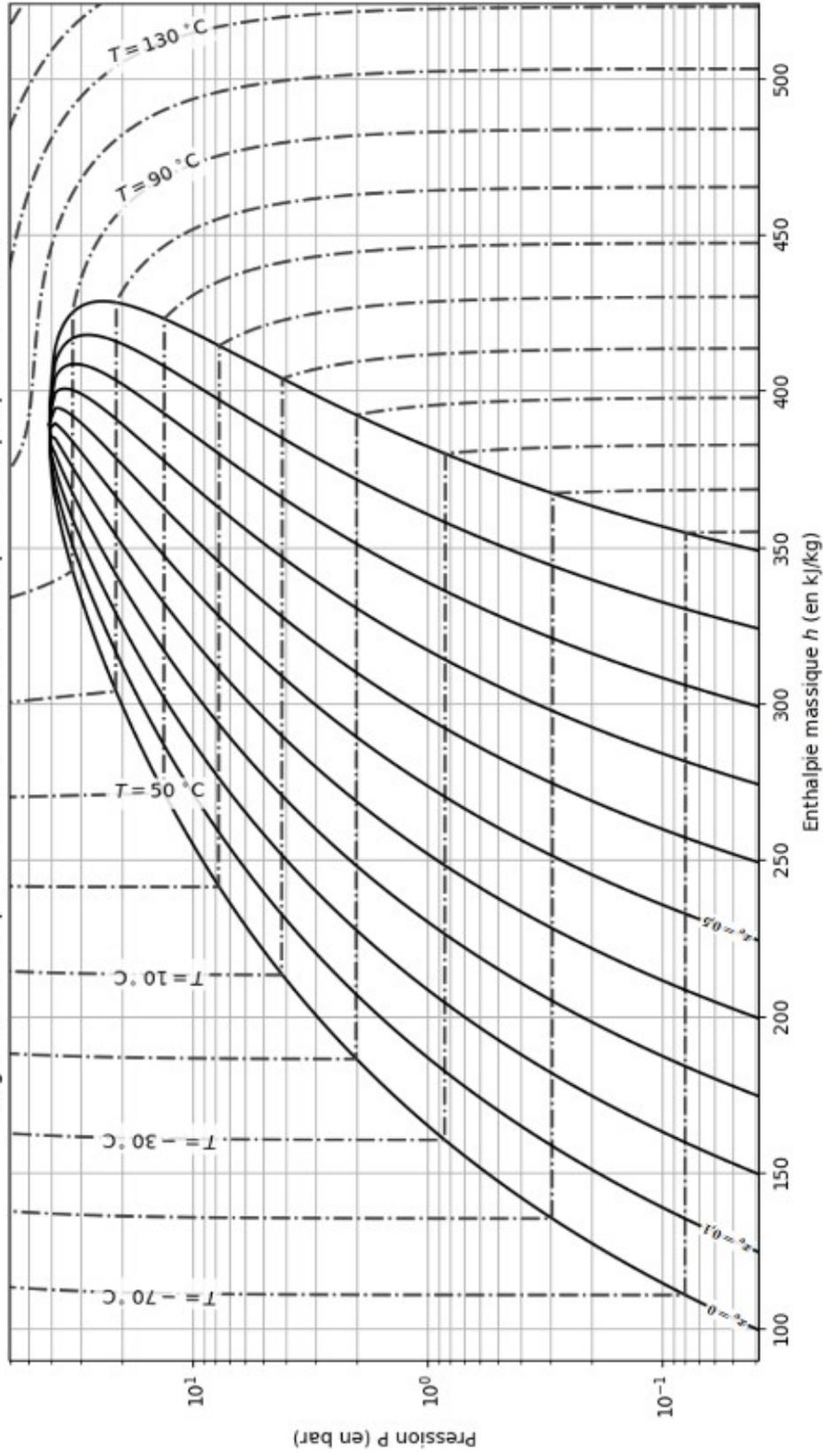


Figure A