

DS SCIENCES PHYSIQUES N°2
NIVEAU 2 type Centrale- Mines
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 $S^\circ \text{ à } 298\text{K}$ $\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Capacité calorifique molaire isobare $C_p (\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1})$
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(\text{l})}$	-276,5	172,2	
$\text{O}_{2(\text{g})}$		205	29,5
$\text{N}_{2(\text{g})}$			30,6
$\text{CO}_{2(\text{g})}$	-393,5	213,7	38,7
$\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})}$	-285,8	70	
$\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$			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 2) type Centrale - Mines

Problème 1: Dimensionnement d'une installation de liquéfaction

Dans ce problème, on se propose de dimensionner une installation de production en continu de diazote N_2 liquide, fonctionnant en régime permanent (procédé Linde). Le schéma de principe de l'installation est proposé sur la figure 1. Le problème débute par une description complète de l'installation ; les réponses aux questions exigent la prise en compte de *l'ensemble des données* décrivant l'installation ainsi que du diagramme enthalpique du diazote fourni en annexe.

Du diazote gazeux entre en continu dans la machine avec un débit massique D_m dans les conditions $p_E = 1 \text{ bar}$, $T_E = 300 \text{ K}$. Il atteint un mélangeur où on le mélange avec du diazote gazeux de débit D' dans les mêmes conditions p_E, T_E . En sortie du mélangeur (M), le débit massique de diazote gazeux est donc $D = D_m + D'$ toujours dans les conditions (p_E, T_E) .

Après passage par le mélangeur, le diazote traverse une série d'étages de compression ; chacun de ces étages est constitué d'un *compresseur adiabatique* (C) suivi d'un *réfrigérant isobare* (R) à circulation d'eau froide ; en sortie du réfrigérant, le diazote gazeux est ramené à une température de sortie égale à T_E .

Les N étages compresseur-réfrigérant sont identiques ; ainsi le rapport de compression $r = \frac{p_{\text{sortie}}}{p_{\text{entrée}}}$ est le même pour chacun des N compresseurs. Après la traversée du dispositif, le diazote atteint donc le point A à la pression $p_A = r^N p_E = 100 \text{ bar}$ et à la température $T_A = T_E = 300 \text{ K}$.

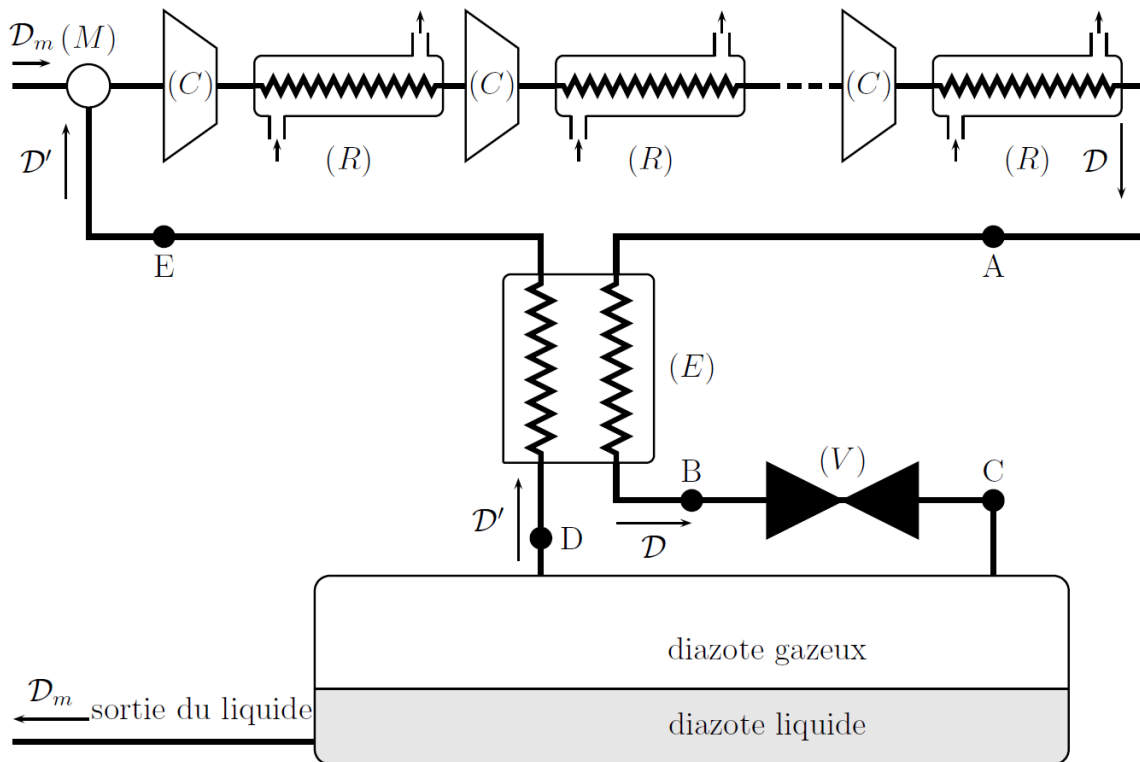


Figure 1 – Schéma de principe d'une installation de liquéfaction de diazote

L'eau liquide utilisée dans chacun des réfrigérants circule à la pression constante de 1,00 bar ; la température de l'eau à l'entrée du dispositif de refroidissement est $T_e = 280 \text{ K}$. On note $c_e = 4,19 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ la capacité thermique massique de l'eau liquide, considérée comme une constante.

Le diazote gazeux aborde entre A et B un échangeur thermique à contre-courant le long duquel il subit un refroidissement isobare ; à sa sortie, le fluide est dans l'état $p_B = p_A = 100 \text{ bar}$, T_B .

Ce refroidissement est suivi d'une détente isenthalpique dans une vanne de détente (V).

A la sortie du robinet, le diazote est au point C : c'est un mélange liquide-vapeur dont la fraction massique de liquide est notée x , à la pression atmosphérique $p_C = p_E = 1 \text{ bar}$, et à la température $T_C = T_{eb}(p_C) = 77 \text{ K}$. A cette température, la densité du diazote liquide est $d = 0,81$.

La fraction massique x de diazote liquéfié est faible, on extrait seulement du réservoir un débit massique modeste D_m de diazote liquide dans les conditions (p_C, T_C) ; le diazote gazeux recyclé est renvoyé, avec un débit massique D' , vers l'échangeur (E). Ce courant du diazote gazeux entre dans (E) aux conditions $p_D = 1 \text{ bar}$, $T_D = 77 \text{ K}$.

Dans l'échangeur (E), le diazote se réchauffe à pression constante et arrive au point E dans les conditions $p_E = 1 \text{ bar}$, $T_E = 300 \text{ K}$, avant d'être renvoyé vers le mélangeur (les parois extérieures de l'échangeur sont calorifugées).

Pour des raisons techniques, on impose deux limites de fonctionnement :

- la température du diazote ne doit, en aucun point du dispositif, dépasser $T_{\max} = 400 \text{ K}$;
- la température de l'eau de refroidissement ne doit pas dépasser $T'_{\max} = 350 \text{ K}$ en sortie des réfrigérants (R).

Le diazote gazeux est diatomique, sa masse molaire vaut $M = 28,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$. On notera h_k son enthalpie massique en un point K du schéma de la figure 1.

La constante molaire des gaz parfaits est $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

A- Dimensionnement des étages de compression

Dans cette seule partie A- le diazote est assimilé à un gaz parfait.

- 1- Que vaut le rapport $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ des capacités thermiques du diazote ? On admet que les compresseurs fonctionnent de manière réversible. Déterminer et calculer la valeur minimale de N compatible avec les exigences décrites ci-dessus. On adoptera cette valeur dans la suite. Donner r et T_{sortie} dans ce cas.
- 2- On note D_{eau} le débit massique du courant d'eau liquide circulant dans chaque réfrigérant (R). Déterminer l'expression et calculer la valeur minimale du rapport $\frac{D_{\text{eau}}}{D}$ compatible avec les exigences ci-dessus.

B- Diagramme enthalpique du diazote

Dans cette partie B et la suivante C, le diazote n'est plus assimilé à un gaz parfait. La figure 5 fournie en annexe, représente le diagramme enthalpique du diazote sous la forme d'un réseau de courbes.

- 3- Identifier la grandeur conservée le long de la courbe $\mathcal{C}_1$. En justifiant votre réponse, déterminer l'asymptote de cette courbe à basse pression.
- 4- Identifier la grandeur conservée le long de la courbe $\mathcal{C}_2$. Justifier le sens de variation de cette courbe. On redonne la deuxième identité thermodynamique $dh = Tds + vdp$.
- 5- Identifier et nommer les états possibles du diazote sur la courbe $\mathcal{C}_3$.
- 6- Identifier la grandeur conservée le long de la courbe $\mathcal{C}_4$. On considère la transformation amenant le diazote de l'état représenté par le point M_1 à celui représenté par le point M_2 suivant le segment $[M_1M_2]$. Décrire l'état du diazote en M.

C- Dimensionnement de l'échangeur (E)

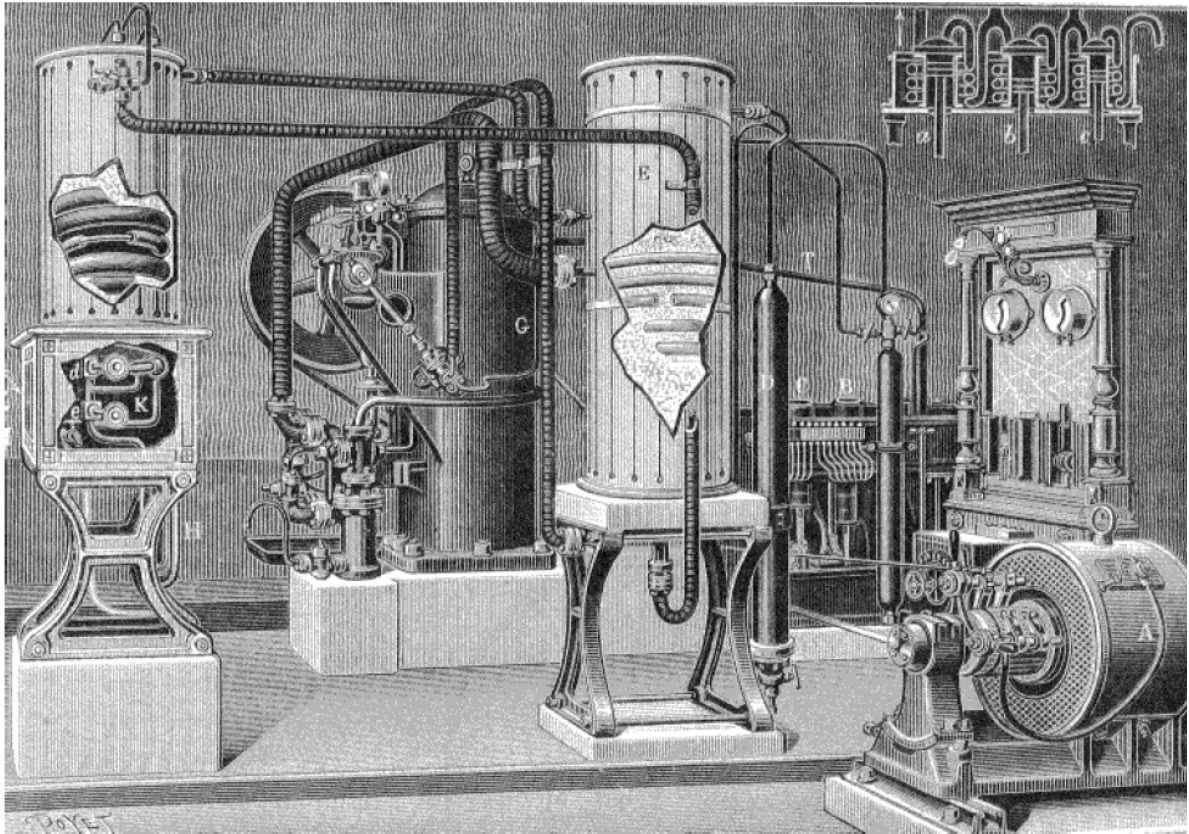
- 7- Exprimer h_C en fonction de x et des enthalpies massiques du diazote liquide et gazeux, notées h_{liq} et h_{vap} dans le réservoir.
- 8- Le réservoir utilisé en sortie de l'appareil fonctionne aussi en régime permanent ; relier x, D et D_m puis x , D' et D .
- 9- Par un bilan que l'on précisera pour le fonctionnement de (E), déterminer x en fonction de h_A , h_E , h_{liq} et h_{vap} .
- 10- En exploitant le diagramme enthalpique du diazote fourni en annexe, déterminer les valeurs de h_A , h_E , h_{liq} et h_{vap} . Evaluer x avec 2 chiffres significatifs. Quelle valeur aurait-on obtenue en considérant que le diazote gazeux vérifie la loi des gaz parfaits ?
- 11- Reproduire sommairement le diagramme enthalpique du diazote en y faisant figurer la courbe $\mathcal{C}_3$ et l'isobare à la pression du point B du dispositif. En déduire la valeur de la température et l'état du diazote en ce point.
- 12- La production de diazote liquide s'effectue avec un débit $D_m = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}$. Dans le cadre du modèle du gaz parfait, évaluer la puissance mécanique qui est nécessaire au fonctionnement de l'ensemble des N compresseurs (C).

Comparer votre résultat à la citation suivante, publiée lors de l'exposition universelle de 1900 :

Nous avons immédiatement décrit le principe de l'appareil de M. le Dr. Carl Linde ; quelques mois plus tard, M. le Dr. d'Arsonval faisait installer dans son laboratoire du Collège de France une petite machine de 3 chevaux destinée à fournir un litre d'air liquide par heure.

L'illustration ci-dessus accompagnait l'article cité.

On notera que $3,0 \text{ hp} \approx 2,2 \text{ kW}$; hp est le symbole de l'unité «cheval-vapeur».



Problème 2: autour de la douche

Certaines questions peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Leur énoncé est repéré par une barre en marge. Il est alors demandé d'explicitier clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

I- Arrivée d'eau

Dans une salle de bain, l'eau est délivrée par deux types de robinets : le mitigeur mécanique pour les lavabos et le mitigeur thermostatique pour la douche ou la baignoire (figure 1).



Figure 1 Exemples de mitigeurs

Dans le mitigeur mécanique, l'eau froide et l'eau chaude sont mélangées dans des proportions réglables par une position angulaire de la poignée et le débit réglable indépendamment par l'inclinaison de la poignée. L'écoulement est étudié en régime stationnaire et on note D_C et D_F les débits massiques respectifs de l'eau chaude (température T_C) et de l'eau froide (température T_F) à l'entrée dans le mélangeur et D_S le débit massique de l'eau en sortie (température T_S).

On suppose que la capacité thermique massique de l'eau est indépendante de sa température.

1- Parmi les quatre valeurs proposées ci-dessous, quel débit D_S en sortie du mitigeur correspond à un fonctionnement normal ? Argumenter.

a- $2,0 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$

b- $2,0 \times 10^1 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$

c- $2,0 \times 10^2 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$

d- $2,0 \times 10^3 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$

2- Relier D_S à D_F et D_C .

3- Pourquoi peut-on faire l'hypothèse que l'eau dans le corps du mélangeur ne reçoit aucune puissance thermique de la part de l'air environnant ?

4- Détailler le raisonnement qui aboutit à $D_S h_S = D_C h_C + D_F h_F$ où h_S, h_C et h_F sont les enthalpies massiques respectives de l'eau en sortie, chaude et froide.

5- En déduire l'expression de T_S en fonction des deux températures d'entrée et des débits massiques.

La légionellose est une maladie infectieuse due à une bactérie qui se développe dans les réseaux d'eau douce dont la température est comprise entre 25 et 45 °C. À 50 °C, sa croissance est stoppée, mais la bactérie survit ; à 55 °C, le temps de destruction est de plusieurs heures, à 60 °C il est de 32 minutes, à 70 °C de une minute (source : DRASS/DASS). Dans les logements où la production d'eau chaude est individuelle, il est donc recommandé de maintenir l'eau du ballon de stockage à une température de plus de 55 °C et une fois par semaine de produire une eau à 70 °C. La température d'eau chaude à l'arrivée au robinet doit être au moins de 50 °C.

La gravité d'une brûlure est fonction de la température de l'eau et du temps de contact avec la peau. Une brûlure au troisième degré survient lors d'une exposition de la peau d'une seconde à 70 °C, 7 secondes à 60 °C pour l'adulte et 3 secondes pour l'enfant, 8 minutes à 50 °C, pour l'adulte, 60 secondes pour l'enfant. (source : http://www.porcher.com/normes_et_reglementation/risque_de_brulure.html).

Un mitigeur mécanique est réglé pour que la température de sortie soit de 42 °C lorsque $T_C = 50 °C$ et $T_F = 18 °C$.

La manette est alors abaissée en position robinet fermé. Durant la nuit, l'eau chaude sanitaire est produite à une température de 70 °C.

6- Y a-t-il un risque de brûlure à l'ouverture du mitigeur le matin si on lève simplement la manette sans la tourner ni à gauche ni à droite ?

Un mitigeur thermostatique contient un élément dilatable, par exemple une cartouche de cire. Si la température de l'eau chaude augmente brusquement, la régulation de température de l'eau de sortie est alors effectuée sans agir sur le réglage de la manette.

7- L'eau chaude arrive-t-elle sur l'entrée 1 ou l'entrée 2 du schéma de la figure 2 ? Justifier.

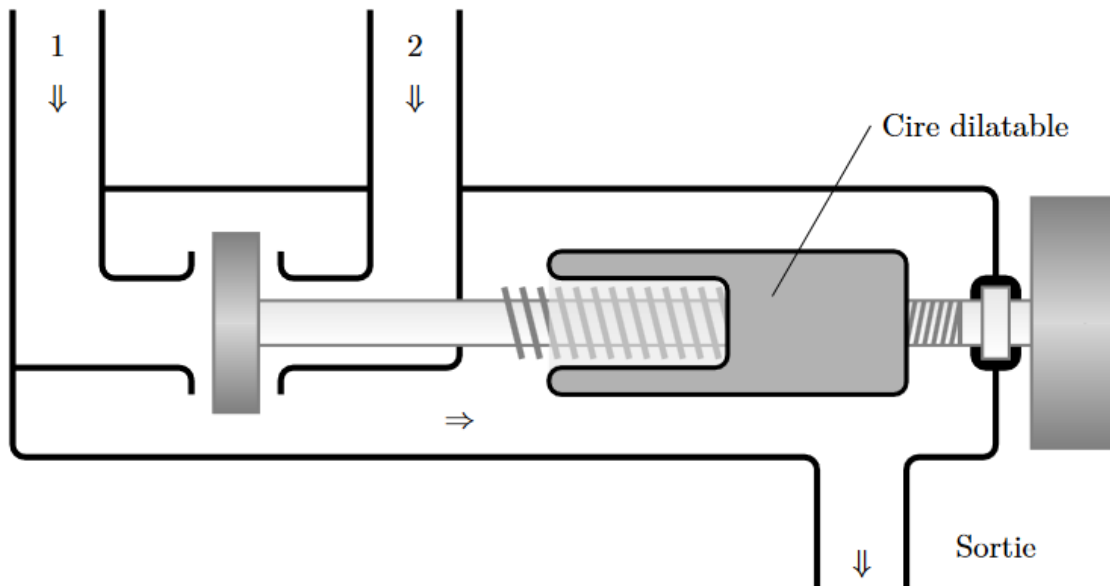


Figure 2 Mitigeur thermostatique schématique

II- L'air humide

A- Grandeurs caractérisant un air humide

L'air renferme toujours une proportion d'eau sous forme vapeur. On le qualifie d'air humide et on le caractérise par

- son humidité absolue $x = \frac{m_v}{m_{as}}$ où m_v et m_{as} sont respectivement les masses de vapeur d'eau et d'air sec dans un volume V quelconque d'air humide ;

- son humidité relative HR (ou degré hygrométrique) à la température T : $HR = \frac{p_v(T)}{p_{sat}(T)}$ où p_v est la pression partielle en vapeur d'eau et p_{sat} la pression de vapeur saturante dont la dépendance avec la température est donnée par la figure 3.

Dans la suite, l'air humide sera étudié comme un mélange de deux gaz parfaits : l'air sec (indice as) et la vapeur d'eau (indice v). La pression totale p de l'air humide sera considérée constante et égale à $p = 1,013$ bar.

On note respectivement M_{as} et M_e les masses molaires de l'air sec et de l'eau.

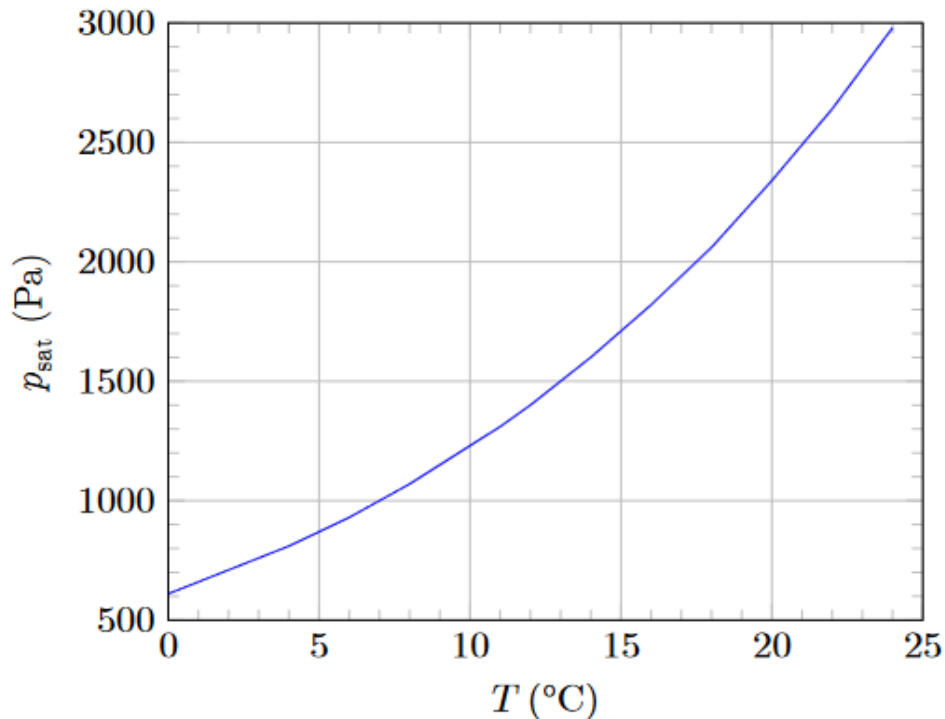


Figure 3 Pression de vapeur saturante en fonction de la température

8- Montrer que $x = d \frac{p_v}{p - p_v}$ où $d = \frac{M_e}{M_{as}}$.

9- Calculer la valeur maximale de l'humidité absolue x_{sat} de l'air humide à la température $T_0 = 20^\circ C$.

On considère une chambre hermétiquement fermée de volume $V = 40m^3$ occupée par une personne qui se couche à 22 h. La température de la pièce est de $18^\circ C$ et l'humidité relative est de 50 %. La chambre n'est pas chauffée et la température au lever à 8 h le lendemain matin est de $16^\circ C$. On trouvera en fin d'énoncé quelques exemples de sources d'eau vapeur, ainsi que leur débit de production.

10- Au lever, l'occupant de la chambre constate-t-il une condensation de l'eau ? La réponse doit s'appuyer sur un raisonnement quantitatif.

Le problème de la condensation peut être résolu en aérant les pièces du logement suffisamment et régulièrement. Certaines personnes sont réticentes à aérer lors des journées humides où l'air extérieur est froid et saturé en vapeur d'eau.

Considérons une pièce initialement à la température $T_i = 20^\circ C$ et saturée en vapeur d'eau. L'air extérieur est à la température $T_a = 10^\circ C$ et est aussi saturé en vapeur d'eau. On renouvelle entièrement l'air de la pièce avec courant d'air.

- 11- Calculer l'humidité relative de l'air de la pièce après aération une fois que l'air est revenu à la température $T_i = 20^\circ \text{C}$ par contact avec les meubles, le plafond et les parois intérieures de la pièce. Conclure.

B- Étude d'un hygromètre : le psychromètre

Un psychromètre est un instrument comportant deux thermomètres qui permet d'accéder à l'humidité relative de l'air ambiant. Ce dernier circule autour des réservoirs des deux thermomètres par aspiration ou par mouvement des thermomètres pour un psychromètre à fronde (figure 4). Le thermomètre dit « sec » indique la température T_1 de l'air ambiant étudié. Le thermomètre dit « humide » a son réservoir recouvert d'un tissu mouillé et indique la « température humide » T_h .

L'humidité relative HR se déduit alors des mesures de T_1 et T_h .

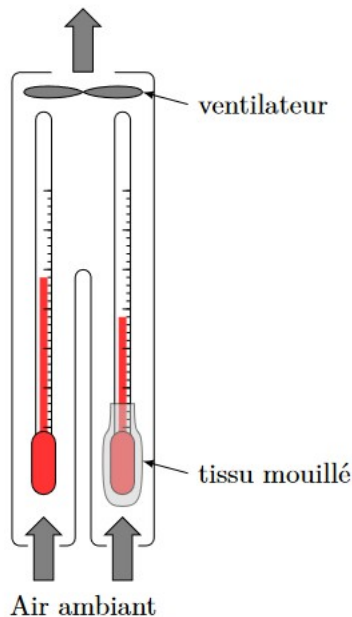


Figure 4 Psychromètres

B-1- Étude du thermomètre humide

La figure 5 schématise le transport de l'air humide sur le thermomètre à bulbe humide. La température de sortie T_h est déterminée à l'aide d'un bilan thermodynamique appliqué à la surface de contrôle (S) représentée sur la figure 5. À l'entrée, la température de l'air vaut T_1 et l'humidité absolue est x_1 . À la sortie, la température est T_h et l'humidité absolue est $x_2 = x_{sat}(T_h)$. Le débit massique d'air sec dans l'écoulement est noté $D_{m,as}$. La pression est uniforme et constante et vaut $p = 1,013$ bar. On néglige tout transfert thermique à travers la surface de contrôle (S).

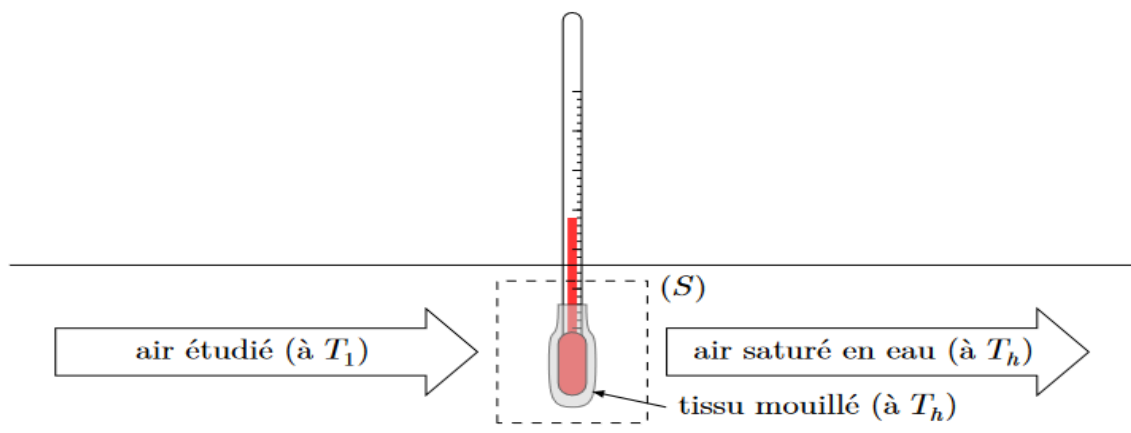


Figure 5 Thermomètre à bulbe humide

12- À l'aide d'un bilan de masse d'eau réalisé entre deux instants t et $t+dt$ sur le système fermé (S_f) , délimité à l'instant t par la surface de contrôle, montrer que la masse d'eau évaporée par unité de temps, notée $\dot{m}_{ev}$, vérifie $\dot{m}_{ev} = D_{m,as}(x_{sat}(T_h) - x_1)$. Il est conseillé de faire un schéma du système (S_f) aux instants t et $t+dt$.

13- À l'aide d'un bilan d'enthalpie réalisé sur le système fermé (S_f) entre deux instants t et $t+dt$, montrer que
$$x_1 = \frac{x_{sat}(T_h)L_v(T_h) + c_{p,as}(T_h - T_1)}{L_v(T_h) + c_{p,v}(T_1 - T_h)}$$

où

- $c_{p,as} = 1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ est la capacité thermique massique à pression constante de l'air sec ;
- $c_{p,v} = 2010 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ est la capacité thermique massique à pression constante de la vapeur d'eau ;
- $L_v(T) = 3155 - 2,39 T$ (en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ avec $273 \text{ K} \leq T \leq 323 \text{ K}$), est l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau liquide à la température T .

14- Après comparaison des ordres de grandeur des termes de l'expression de x_1 , montrer que l'humidité absolue de l'air devient $x_1 \approx x_{sat}(T_h) - A(T_1 - T_h)$ où on exprimera A en fonction des données.

On montre alors que l'humidité relative de l'air étudié est
$$HR = \frac{p_{sat}(T_h)}{p_{sat}(T_1)} \left(1 - \frac{\gamma}{p_{sat}(T_h)} (T_1 - T_h) \right)$$
 où

$\gamma = \frac{c_{p,as}}{L_v(T_h)} \frac{M_{as}}{M_e} p$ est la constante psychrométrique.

15- *Application numérique* On mesure $T_1 = 20^\circ \text{C}$ et $T_h = 15^\circ \text{C}$. En déduire l'humidité relative HR de l'air étudié.

16- Le diagramme psychrométrique donné figure A ci-dessous confirme-t-il cette valeur ? Justifier en annotant cette figure à rendre avec la copie.

Données :

Constante des gaz parfaits	$R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
Capacité thermique massique de l'eau liquide	$c_e = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Masse molaire de l'air sec	$M_{as} = 29,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Masse molaire de l'eau	$M_e = 18,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Sources de l'humidité de l'air dans une pièce habitée (débit massique d'eau vapeur en $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$)

Cuisson	400 à 800
Lave-vaisselle	200 à 400
Douche	1500 à 3000
Bain	600 à 1200
Plantes	7 à 20
Être humain (selon son activité)	30 à 200

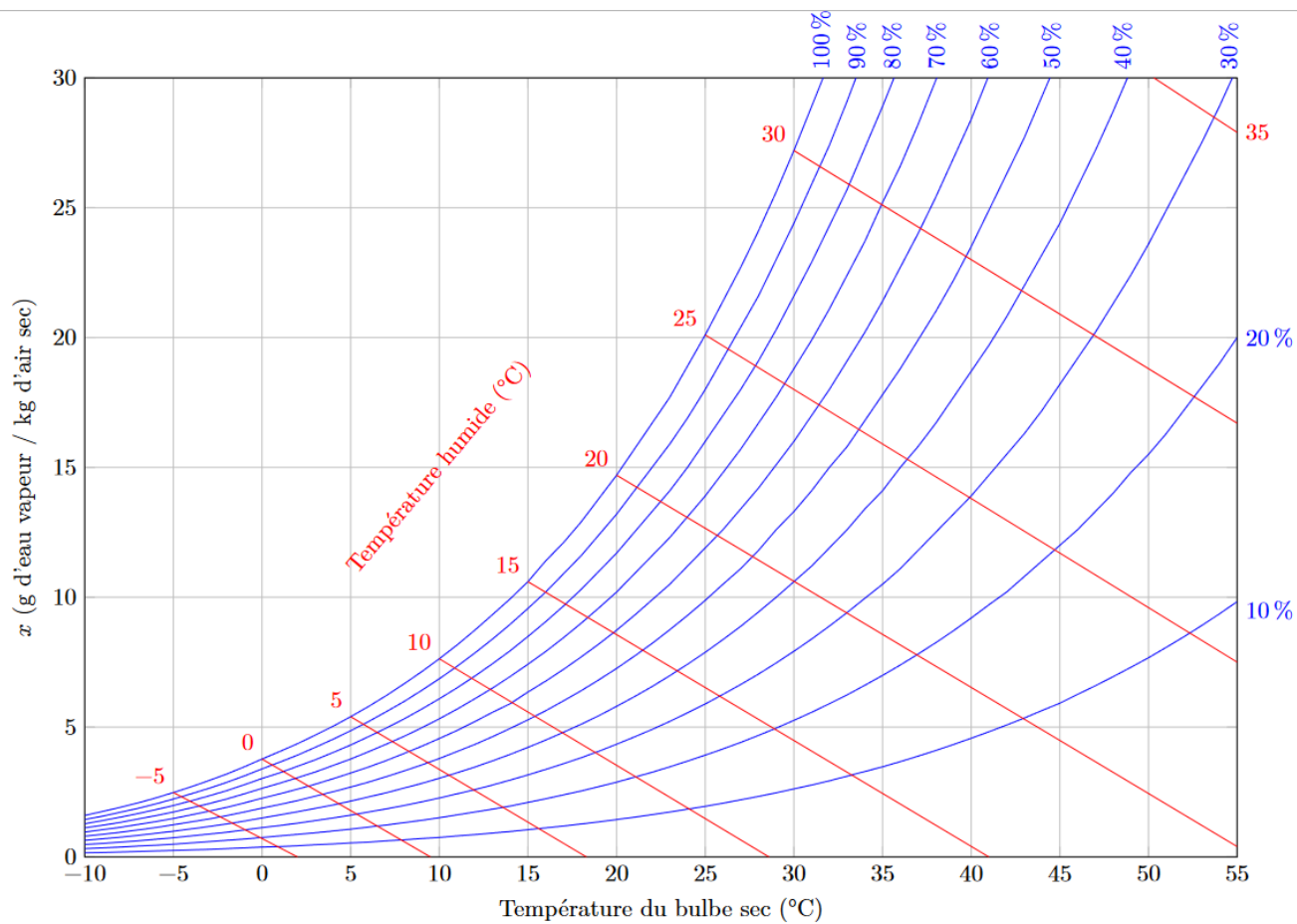


Figure A Diagramme psychrométrique

Annexe

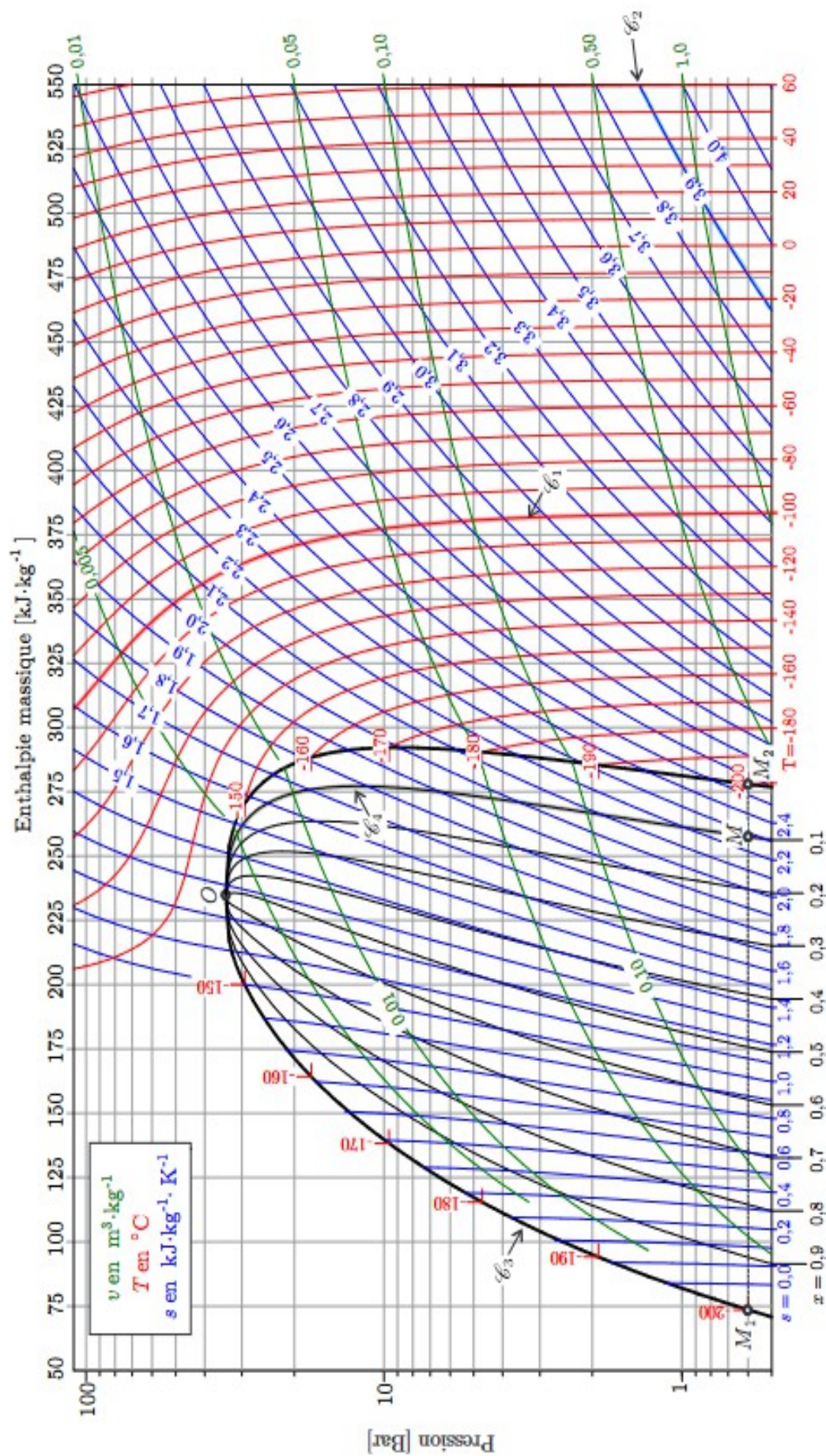


FIGURE 5 – Diagramme enthalpique du diazote