

Devoir surveillé n°2

Physique

Problème n°1 : quelques phénomènes de changement de phase
(d'après concours G2E 2024 et banque PT 2025)

Ce problème comporte deux parties totalement indépendantes.

Pour l'ensemble de ce problème on négligera l'influence de la pression sur le potentiel chimique de référence d'une phase condensée.

Données

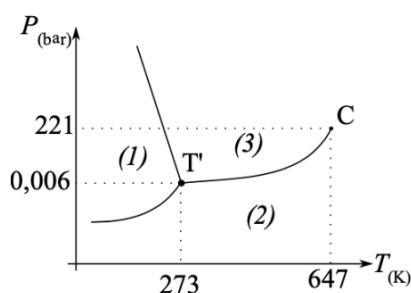


Diagramme de phase de l'eau

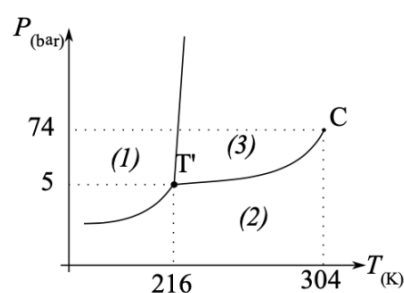


Diagramme de phase de CO₂

I/ L'humidité dans l'air

Chacun de nous a déjà pu observer par un matin d'automne un peu frais, ces gouttelettes d'eau de condensation sur une toile d'araignée (figure 1).



Figure 1

1. Reproduire le diagramme de phase de l'eau dans le plan P, T (pression en fonction de la température) et préciser les états du système dans les domaines 1, 2 et 3.

On adopte les notations suivantes :

- $\mu_{gp}^{\circ}(T)$: potentiel chimique standard du gaz parfait à la température T .
 - $\mu_{pcp}^{ref}(T, P)$: potentiel chimique de référence de la phase condensée pure à la température T et à la pression P .
2. En un point quelconque de la courbe de l'équilibre de vaporisation de l'eau du diagramme P, T quelle est la relation entre les potentiels chimiques de l'eau liquide notée $\mu_{liq}(T, P_{sat})$ et celui de la vapeur d'eau noté $\mu_{vap}(T, P_{sat})$ (P_{sat} étant la pression de vapeur saturante à la température T) ?
En déduire l'expression de la différence : $\mu_{liq}^{ref}(T, P_{sat}) - \mu_{vap}^{\circ}(T)$ en fonction de T et de la pression de vapeur saturante P_{sat} .

On donne quelques valeurs supplémentaires de $P_{sat}(T)$:

T (en °C)	100	80	30	10	0
P_{sat} (kPa)	100	47	4,3	1,2	0,62

- On dispose d'un mélange eau-liquide/eau-vapeur à $T = 10\text{ °C}$ et à la pression $P = 3,6\text{ kPa}$. Ce mélange peut-il être en équilibre ?
Exprimer le potentiel chimique de la phase liquide, puis celui de la phase vapeur à (T, P) .
Exprimer alors la différence $\mu_{liq}(T, P) - \mu_{vap}(T, P)$ en fonction de T , P et P_{sat} .
Calculer cette différence à $T = 10\text{ °C}$ et à $P = 3,6\text{ kPa}$. Prévoir l'évolution du système.
- Expliquer maintenant, en termes de potentiels chimiques, pourquoi des gouttes de rosée peuvent se déposer, durant la nuit, sur les toiles d'araignée. Représenter, directement sur votre diagramme de la question 1., le trajet représentant la transformation associée à ce processus.

II/ Détente des bulles de champagne lors de l'ouverture de la bouteille

A l'ouverture d'une bouteille de champagne, un panache blanc qui fait penser à des microgouttelettes, se forme. Nous allons proposer une interprétation à ce phénomène. Le gaz présent dans la bouteille est composé principalement de dioxyde de carbone mais contient aussi de l'eau. Il est initialement sous une pression d'environ $P_i = 6,0\text{ bar}$ et au moment de l'éjection du bouchon, il subit une détente adiabatique jusqu'à la pression atmosphérique $P_f = 1,0\text{ bar}$ environ.

Pour interpréter simplement le panache, on se place dans le modèle d'une détente adiabatique réversible. Le gaz est supposé parfait, les capacités thermiques du gaz sont supposées indépendantes de la température. On donne l'expression de la variation d'entropie de n mol d'un gaz parfait lors d'une transformation le conduisant d'un état initial (P_i, T_i) à un état final (P_f, T_f) :

$$\Delta S = C_p \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) - nR \ln\left(\frac{P_f}{P_i}\right)$$

où C_p est la capacité thermique à pression constante du gaz.

- Énoncer le second principe de la thermodynamique. Que vaut la variation d'entropie du gaz lors d'une détente adiabatique réversible ?
- Calculer la température T_f du gaz à l'issue de la détente. On donne pour le gaz dans la bouteille : température initiale $T_i = 293\text{ K}$; capacité thermique molaire à pression constante : $C_{pm} = 37\text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$; constante des gaz parfaits : $R = 8,31\text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.
- En s'appuyant sur les diagrammes de phase P, T du dioxyde de carbone, indiquer dans quel état physique se trouve le CO_2 dans le panache de fumée. (un agrandissement du diagramme P, T de CO_2 est donné en annexe 1).
- Pourquoi le modèle proposé n'est-il pas satisfaisant ?

Problème n°2 : bilan thermique d'une piscine

(d'après concours CCINP TSI 2025, ATS 2024, Centrale Supélec TSI 2018)

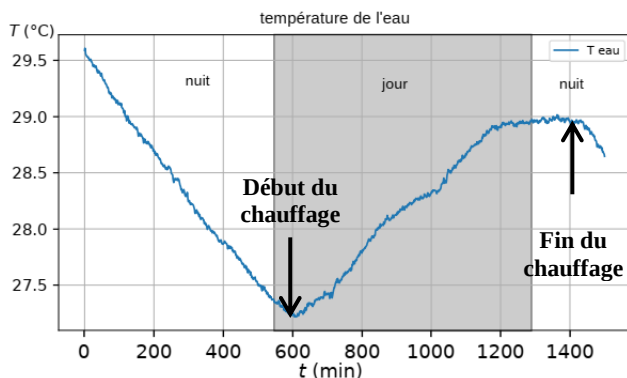
Données générales

- Dimensions du bassin : 12,5 m de large et 25 m de long. On retiendra une surface S d'environ 300 m^2 et un volume V d'environ 500 m^3 .
- Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_{eau} = 4,2 \times 10^3\text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- Enthalpie massique de vaporisation de l'eau : $\Delta h_{vap} = 2,3 \times 10^6\text{ J.kg}^{-1}$
- Masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1,0 \times 10^3\text{ kg.m}^{-3}$

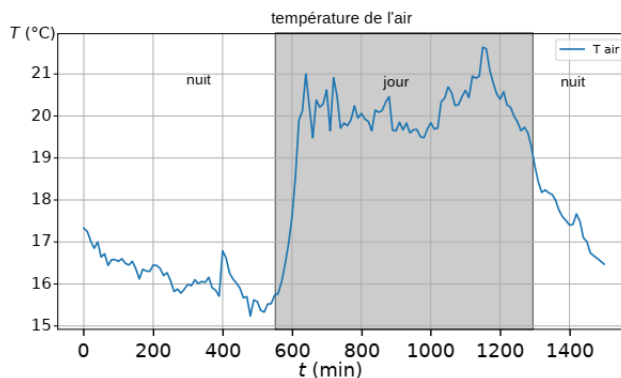
Ce sujet étudie différents aspects physiques qui concernent une piscine. Il est constitué de trois parties indépendantes.

I/ Modélisation des courbes de refroidissement et de chauffage

Les documents 1 et 2 suivants donnent des modèles de l'évolution de la température de l'eau du bassin et de l'air extérieur le jour et la nuit.



Document 1 : évolution de la température de l'eau.
L'eau n'est pas chauffée la nuit, alors qu'elle l'est le jour



Document 2 : évolution de la température de l'air sur la même période que pour le document 1

On considère pour ce modèle les échanges thermiques suivants :

- Pendant les heures d'ouverture de la piscine (approximativement le jour), l'eau du bassin, est chauffée par une source de chauffage. On note P_0 , la puissance supposée constante de cette source de chauffage.
- Le jour et la nuit, l'eau du bassin échange avec l'air extérieur. On modélise ces échanges par une puissance reçue par l'eau du bassin, notée $P_{\text{air-eau}}$, dont l'expression est la suivante :

$$P_{\text{air-eau}} = h S (T_{\text{air}} - T)$$

avec T la température de l'eau et T_{air} celle de l'air, S la surface du bassin, $h = 5 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-2}$ un coefficient constant.

1. Etablir l'équation différentielle qui régit l'évolution de la température de l'eau du bassin le jour, (c'est-à-dire lorsque la source de chauffage est allumée) sous la forme :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_{\infty}}{\tau}$$

Exprimer τ et T_{∞} en fonction du volume du bassin V , de sa surface S , de la puissance P_0 , ainsi que des constantes c_{eau} , ρ_{eau} et h .

2. En exploitant le régime stationnaire atteint par la température de l'eau en fin de journée (document 1), déterminer l'expression puis la valeur numérique de la puissance P_0 nécessaire pour chauffer ce bassin.

En réalité la modélisation précédente qui ne tient compte que des échanges avec l'air est insuffisante : il faut tenir compte d'autres phénomènes comme le rayonnement ou l'évaporation.

L'évaporation est une des causes principales de refroidissement de l'eau d'une piscine. La piscine est instrumentée pour pouvoir suivre son niveau d'eau, qui varie sous l'effet de l'évaporation. Le débit d'évaporation D_v est le volume d'eau qui s'évapore en surface (au contact de l'air) par unité de temps. Entre les instants $t_i = 0$ et $t_f = 500$ min, il est mesuré en moyenne à $D_v = 2 \text{ L.min}^{-1}$.

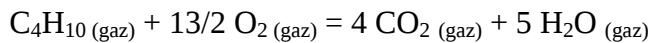
- Donner l'expression de la variation d'enthalpie, ΔH_2 , associée à l'évaporation durant cette période en fonction de D_v , t_i , t_f , ρ_{eau} et Δh_{vap} .
- Faire l'application numérique. On pourra se référer aux données générales.
- Expliquer qualitativement pourquoi le processus d'évaporation entraîne une diminution de la température de l'eau.

En tenant compte de l'ensemble des phénomènes responsables du refroidissement de l'eau du bassin, la puissance nécessaire pour chauffer l'eau pour toute la suite du problème sera prise égale à **100 kW**.

II/ chauffage de l'eau du bassin par une chaudière au butane

Ce bassin doit être maintenu à une température de 28 °C pour le confort des baigneurs. Une première possibilité est d'utiliser une chaudière au butane C_4H_{10} , d'une puissance P de 100 kW.

L'équation de la réaction combustion complète du butane par le dioxygène de l'air est :



Dans cette chaudière à condensation, on estime le Pouvoir Calorifique PC du butane à 50 kJ·g⁻¹ c'est-à-dire que la combustion d'un gramme de butane par le dioxygène de l'air dégage une énergie thermique de 50 kJ.

- Calculer le débit massique $D_{m,\text{but}}$ de butane nécessaire en g·s⁻¹, puis en g·min⁻¹ pour que la combustion fournisse une puissance P de 100 kW.
- En déduire la masse de CO_2 produite par minute de fonctionnement de cette chaudière.

Masses molaires atomiques, en g·mol⁻¹ : $M(\text{C}) = 12$; $M(\text{H}) = 1,0$; $M(\text{O}) = 16$

III/ chauffage de l'eau du bassin par une pompe à chaleur

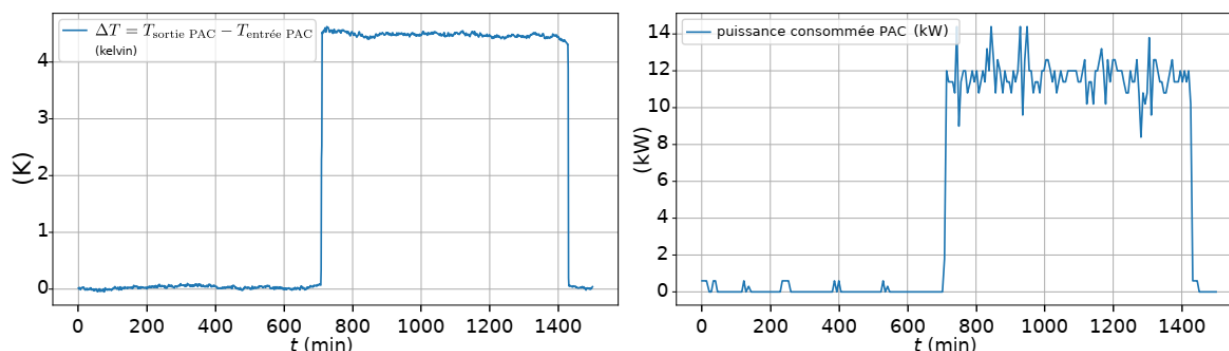
L'eau de la piscine est maintenant maintenue à une température constante $T_c = 28$ °C grâce à une pompe à chaleur (PAC). Cette dernière fonctionne entre la source chaude {eau} à T_c et la source froide {air atmosphérique} à température constante $T_f = 20$ °C.

On considère un cycle de fonctionnement de la pompe à chaleur. On note :

- Q_c le transfert thermique reçu par le fluide la PAC de la part de la source chaude
- Q_f celui reçu par le fluide la PAC de la part de la source froide
- W le travail reçu par le fluide de la PAC depuis le réseau électrique.

- Donner les signes de Q_c , Q_f et W .
- On considère un **fonctionnement réversible** d'une PAC entre les deux sources de chaleur. Etablir, à l'aide des deux principes de la thermodynamique, l'expression de l'efficacité de la PAC en fonction de T_c et T_f , puis calculer cette efficacité.

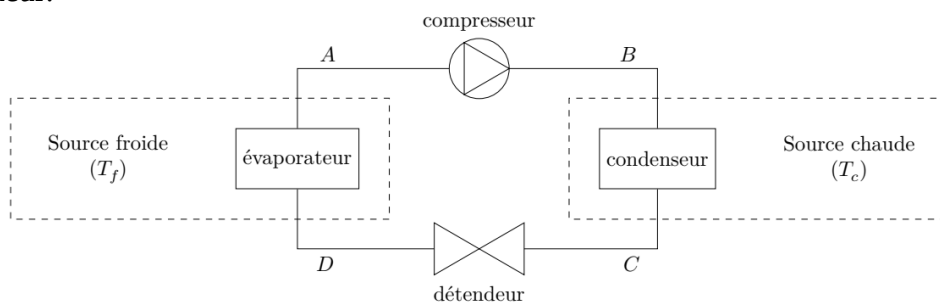
On étudie une première PAC, notée PAC 1, en conditions réelles, sans l'hypothèse de réversibilité du cycle. L'eau de la piscine s'écoule dans un échangeur thermique, où elle reçoit un certain transfert thermique massique. Entre l'entrée et la sortie de cet échangeur, sa température s'élève de ΔT (document 3, graphique de gauche). Le débit volumique est $D_v = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. La puissance électrique consommée par la pompe est tracée sur le document 3 (graphique de droite).



Document 3 : relevés expérimentaux pour la PAC 1

10. Rappeler l'expression de premier principe de la thermodynamique pour un écoulement stationnaire unidimensionnel d'un système à une entrée et une sortie (dit également premier principe industriel). On se placera dans le cas usuel pour lequel toute variation d'énergie potentielle et cinétique est négligeable. On notera D_m le débit massique du fluide en écoulement, P_{th} la puissance thermique qu'il reçoit et P_{utile} la puissance reçue dans le cas du mouvement macroscopique de pièces mécaniques.
11. En exploitant le graphique de gauche, déterminer une estimation de la puissance thermique reçue par l'eau dans l'échangeur thermique.
12. En déduire une estimation de la valeur numérique de l'efficacité, notée e_1 , de cette PAC.

On étudie maintenant une deuxième PAC réelle, notée PAC 2. Au contact de la source froide de température T_f , le fluide se vaporise complètement, il est ensuite comprimé par le compresseur et se liquéfie dans le condenseur, au contact de la source chaude de température T_c . Il est ensuite détendu dans le détendeur.



L'annexe 2 présente, dans le diagramme des frigoristes, le cycle de la PAC 2 pour un fonctionnement nominal typique en période froide (janvier-février). Le fluide frigorigène est du tétrafluoroéthane R134a.

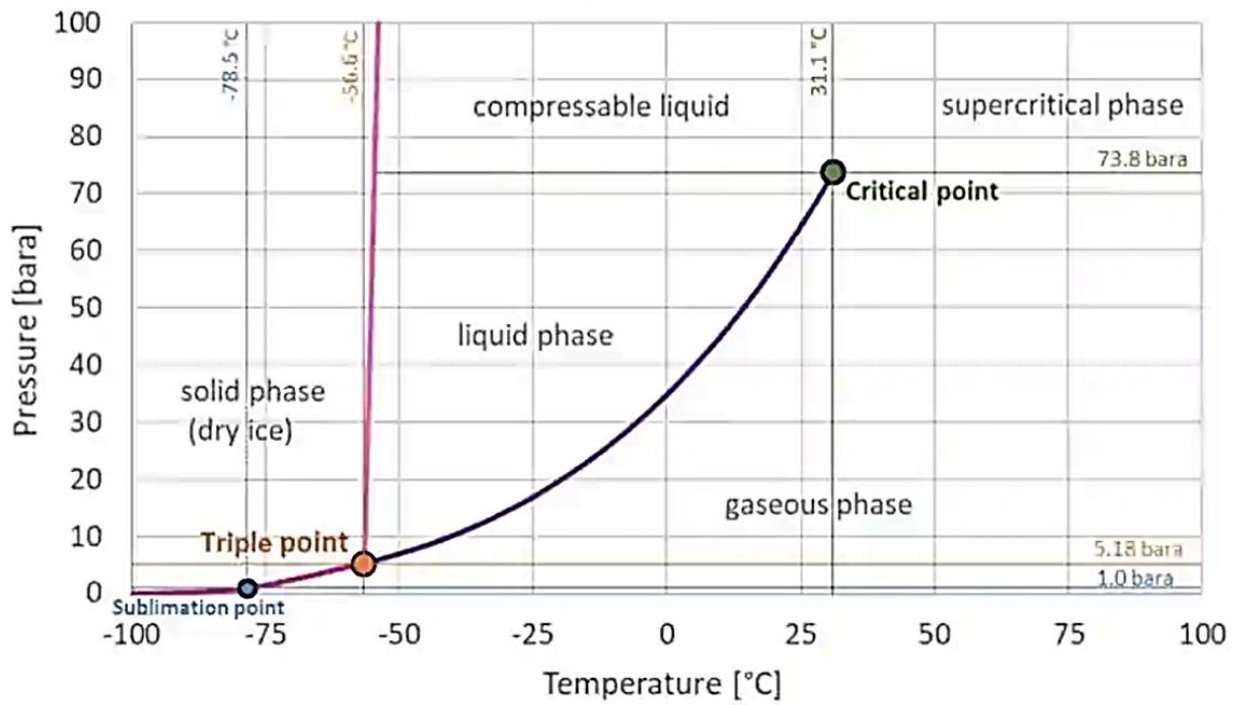
Les isothermes sont gradués en $^{\circ}\text{C}$; les isochores sont repérés par v en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; les isentropiques sont marqués avec s en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; les isotitres x sont gradués sur l'échelle des abscisses. *Aucune connaissance sur les isotitres n'est nécessaire pour les questions suivantes puisqu'il ne sera pas nécessaire d'exploiter cette information dans le diagramme de l'annexe 2.*

La puissance prélevée à la source froide est $P_f = 80 \text{ kW}$.

13. Identifier dans quel organe de la PAC se déroule chacune des quatre transformations $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 5$, $5 \rightarrow 6$ et $6 \rightarrow 1$ du cycle.
14. En appliquant le premier principe industriel au fluide traversant l'évaporateur, calculer le débit massique D_m du fluide caloporteur de la pompe à chaleur.
15. Déterminer la valeur numérique de l'énergie thermique massique échangée avec la source chaude (lorsque le fluide traverse le condenseur), ainsi que celle du travail utile massique reçu au niveau du compresseur calorifugé. Calculer l'efficacité, notée e_2 , de cette PAC

ANNEXE 1

Carbon dioxide phase diagram



ANNEXE 2

