

Changements d'état

-  Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
-  Difficulté technique et calculatoire ;
-  Exercice important.

Flasher ou cliquer
pour accéder
au corrigé



Se préparer

Applications de cours

Ces applications de cours sont des briques élémentaires des raisonnements à mener dans les exercices : les maîtriser est incontournable. Elles sont toutes traitées de manière exhaustive dans le cours.

T5.1 - Représenter l'allure du diagramme de phase (P, T) et du diagramme de Clapeyron (P, v) d'un corps pur, en nommant les points particuliers. Représenter dans chaque diagramme l'allure d'une isotherme menant du domaine liquide au domaine de la vapeur. Justifier son allure dans le diagramme de Clapeyron à partir des modèles de la phase condensée indilatable et incompressible et du gaz parfait.

T5.2 - Une masse $m = 100$ g d'eau est introduite dans une enceinte de volume V initialement vide. Cette enceinte est maintenue à une température constante telle que le volume massique du liquide saturant et de la vapeur saturante valent respectivement $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ et $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. Déterminer l'état du fluide et le cas échéant le titre en vapeur pour $V = 1$ L et $V = 50$ L. Expliquer/justifier la réponse à partir d'un diagramme de Clapeyron.

T5.3 - Dans un calorimètre de valeur en eau μ , on verse une masse m_0 d'eau chaude. Après quelques minutes, on mesure une température T_0 . On ajoute alors un glaçon de masse m et de température T_{fus} . Déterminer la température finale une fois le glaçon entièrement fondu et l'entropie créée.

Cahier d'Entraînement



Le *Cahier d'Entraînement* est un projet collaboratif mené par des enseignants de CPGE, proposant aux étudiants des entraînements leur permettant de travailler en autonomie sur des techniques et « réflexes » utiles dans les exercices, en particulier calculatoires. Il est librement téléchargeable en scannant ou cliquant sur le QR-code ci-contre.

↪ pour ce chapitre : seulement 19.10 et 20.11.

Analyse de corrigé

Exercice 1 : De la glace qui fond



▷ Bilan d'enthalpie.

Dans un calorimètre aux parois calorifugées et de capacité thermique négligeable, on introduit une masse $m_{\text{liq}} = 1,00 \text{ kg}$ d'eau liquide initialement à $T_1 = 20^\circ\text{C}$. On y ajoute une masse $m_{\text{gl}} = 0,50 \text{ kg}$ de glace à $T_2 = 0^\circ\text{C}$.

Données : enthalpie massique de fusion de l'eau $\Delta_{\text{fus}}h = 3,3 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ et capacité thermique massique de l'eau liquide $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1 - On suppose qu'à l'état final l'eau est entièrement sous forme liquide. Déterminer sa température T_F . Conclure.

2 - On suppose maintenant qu'à l'état final l'eau est présente sous forme d'un mélange solide et liquide. Que peut-on dire sans calcul sur l'état final ? Déterminer la composition du mélange, c'est-à-dire la masse de chaque phase.

Correction — Le système sur lequel on raisonne est constitué de toute l'eau (liquide + glace) contenue dans le calorimètre. Il n'échange clairement aucun travail avec l'extérieur, et comme les parois du calorimètre sont calorifugées il n'échange pas non plus de transfert thermique. La transformation étant monobare avec équilibre mécanique, on travaille en enthalpie.

Question d'analyse 1 - Pourquoi la transformation est-elle monobare ?

1 - Au cours de cette transformation,

- ▷ la température de l'eau liquide passe de T_1 à T_F ;
- ▷ la glace fond et se réchauffe, ce que l'on décompose comme la succession de deux transformations élémentaires :
 - d'abord, la glace fond totalement de manière isobare isotherme ;
 - ensuite, « la glace » est liquide et sa température passe de T_{fus} à T_F .

Le bilan d'enthalpie s'écrit donc :

$$\Delta H \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{=} 0 + 0 \underset{\substack{\uparrow \\ \text{transf}}}{=} \underbrace{m_{\text{liq}} c (T_F - T_1)}_{\text{liquide}} + \underbrace{m_{\text{gl}} \Delta_{\text{fus}} h + m_{\text{gl}} c (T_F - T_{\text{fus}})}_{\text{glace}}$$

Question d'analyse 2 - Pourquoi peut-on décomposer en deux étapes successives la transformation subie par la glace, alors qu'en réalité les deux phénomènes ont lieu simultanément ?

Question d'analyse 3 - Pourquoi le transfert thermique fourni par l'eau liquide à la glace n'apparaît-il pas dans le bilan d'enthalpie ?

On en déduit alors

$$T_F = \frac{m_{\text{gl}} c T_2 + m_{\text{liq}} c T_1 - m_{\text{gl}} \Delta_{\text{fus}} h}{(m_{\text{gl}} + m_{\text{liq}}) c} = 260 \text{ K} = -13^\circ\text{C}.$$

Il y a donc une contradiction : l'eau est supposée liquide, et pourtant à la température trouvée elle devrait être solide. **L'hypothèse d'eau complètement liquide est donc fausse.**

2 - Si l'eau est présente à la fois sous forme liquide et solide, alors la température finale est forcément

$$T_F = T_{\text{fus}} = 0^\circ\text{C}.$$

Question d'analyse 4 - Pourquoi la température finale ne peut-elle pas valoir autre chose que T_{fus} ?

La transformation se décompose cette fois de la façon suivante :

- ▷ la température de l'eau liquide passe de T_1 à T_{fus} ;
- ▷ une masse $x m_{\text{gl}}$ ($0 < x < 1$) de glace fond, mais sa température ne varie pas.

Le bilan d'enthalpie s'écrit donc :

$$\Delta H \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er } P}}{=} 0 + 0 \underset{\substack{\uparrow \\ \text{transf}}}{=} \underbrace{m_{\text{liq}} c (T_F - T_{\text{fus}})}_{\text{liquide}} + x \underbrace{m_{\text{gl}} \Delta_{\text{fus}} h}_{\text{glace}}$$

Question d'analyse 5 - Pourquoi x apparaît-il dans le terme associé à la glace et pas dans celui associé à l'eau liquide ?

On en déduit

$$x = \frac{m_{\text{liq}} c (T_1 - T_{\text{fus}})}{m_{\text{gl}} \Delta_{\text{fus}} h} = 0,51 .$$

Cette valeur est physiquement acceptable : on en déduit que l'hypothèse est validée. Ainsi, dans l'état final, le calorimètre contient 1,25 kg d'eau liquide et 0,25 kg de glace, le tout à 0 °C.

Question d'analyse 6 - Quelles auraient été les valeurs de x qui auraient donné lieu à une contradiction entre l'hypothèse faite et le résultat ?

Attention à la cohérence physique des hypothèses lors de la construction de la transformation auxiliaire : si l'eau liquide refroidit, alors pour conserver l'enthalpie il faut nécessairement que de la glace fonde. Ceci étant, dans le cas où vous auriez supposé que l'eau refroidissait puis gelait, vous auriez abouti à une contradiction.

Exercice 2 : Sorbet fait maison



- ▷ Bilan d'enthalpie ;
- ▷ Transitoire thermique.



Une sorbetière est une machine permettant de fabriquer des glaces faites maison. La préparation (basiquement fruits, eau et sucre), sortie du réfrigérateur, est versée dans un bol sorti du congélateur. Ce bol contient une solution saline dont la fusion progressive permet de récupérer une grande quantité d'énergie à basse température¹, et donc de refroidir efficacement la préparation. Un petit moteur fait tourner une pale qui agite le mélange, jusqu'à la prise en glace.

On modélise l'ensemble de la façon suivante :

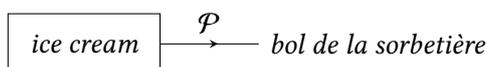
- ▷ la préparation de masse m est initialement liquide à 0 °C, elle commence à solidifier dès qu'elle est versée ;
- ▷ le bol de la sorbetière demeure à température constante $T_0 = -15$ °C ;
- ▷ la température T du mélange est uniforme ;
- ▷ la puissance thermique échangée entre le mélange et le bol de la sorbetière s'écrit $\mathcal{P} = \alpha(T - T_0)$;
- ▷ les échanges thermiques avec l'air sont négligés pour simplifier.

On note c la capacité thermique massique de la glace, et $\Delta_{\text{fus}} h$ son enthalpie de fusion.

1 - Quelle est la durée nécessaire à ce que le mélange solidifie complètement ?

2 - La glace est meilleure à déguster à $T^* = -8$ °C. Combien de temps supplémentaire faudra-t-il patienter une fois la glace totalement solidifiée avant de se régaler ?

Correction — Notre système est la préparation qui prend en glace, qui solidifie puis refroidit en cédant une puissance \mathcal{P} au bol de la sorbetière.



1. Exactement comme les blocs bleus que vous emmenez en pique-nique.

Question d'analyse 1 - Pourquoi est-on ici certain du sens d'algèbrisation de \mathcal{P} ?

1 - Pendant toute la durée Δt_{sol} de la solidification, la puissance \mathcal{P} est constante : on peut donc procéder à un bilan d'enthalpie global.

Question d'analyse 2 - Justifier que \mathcal{P} est constante.

Ce bilan s'écrit

$$\Delta H \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er } \mathcal{P}}}{=} -\mathcal{P} \Delta t_{\text{sol}} = -\alpha(T_{\text{fus}} - T_0) \Delta t_{\text{sol}} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{transf}}}{=} -m \Delta_{\text{fus}} h \quad \text{d'où} \quad \boxed{\Delta t_{\text{sol}} = \frac{m \Delta_{\text{fus}} h}{\alpha(T_{\text{fus}} - T_0)}}.$$

Question d'analyse 3 - Justifier le signe \ominus dans l'expression de ΔH fournie par le premier principe.

Question d'analyse 4 - Même question pour celle impliquant l'enthalpie de changement d'état.

Question d'analyse 5 - Proposer deux tests de vraisemblance sur les dépendances en m et T_0 .

2 - Cette fois, la température de la glace varie donc \mathcal{P} n'est plus constante : il va falloir passer par une équation différentielle. On procède à un bilan d'enthalpie pour une durée infinitésimale dt , qui s'écrit

$$dH \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er } \mathcal{P}}}{=} -\mathcal{P} dt = -\alpha(T - T_0) dt \underset{\substack{\uparrow \\ \text{solide}}}{=} mc dT.$$

En divisant de part et d'autre par dt et en réorganisant, on en déduit l'équation différentielle

$$\frac{dT}{dt} + \frac{\alpha}{mc} T = \frac{\alpha}{mc} T_0$$

Question d'analyse 6 - Pourquoi le bilan enthalpique ne fait-il plus apparaître l'enthalpie de fusion ?

En posant $\tau = mc/\alpha$, cette équation différentielle se résout en

$$T(t) = A e^{-t/\tau} + T_0,$$

avec à l'instant initial

$$T(t=0) \underset{\substack{\uparrow \\ \text{CI}}}{=} T_{\text{fus}} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{expr}}}{=} A + T_0 \quad \text{soit} \quad A = T_{\text{fus}} - T_0$$

et ainsi

$$T(t) = (T_{\text{fus}} - T_0) e^{-t/\tau} + T_0.$$

Maintenant que vous savez bien faire, il est inutile voire contre-productif de sur-rédiger les résolutions d'équation différentielle en détaillant solution homogène, etc. : la solution particulière s'affirme sans démonstration, et vous pouvez/devez donner directement la solution complète. Seul la condition initiale mérite une ligne de calcul.

Question d'analyse 7 - Justifier la condition initiale.

La température de la glace est égale à T^* au bout d'une durée t telle que

$$(T_{\text{fus}} - T_0) e^{-t/\tau} + T_0 = T^* \quad \text{soit} \quad e^{-t/\tau} = \frac{T^* - T_0}{T_{\text{fus}} - T_0}$$

et ainsi

$$\boxed{t = \tau \ln \frac{T_{\text{fus}} - T_0}{T^* - T_0}}.$$

Bilans thermodynamiques

Exercice 3 : Détente isochore d'une vapeur d'eau

3 | ✂ 1



- ▷ Table thermodynamique;
- ▷ Principes de la thermodynamique.

Un récipient fermé et indéformable, de volume $V = 1,00 \text{ L}$, contient dans l'état initial I de la vapeur d'eau saturante à $T_I = 485 \text{ K}$. On le met en contact avec un thermostat à température $T_0 = 373 \text{ K}$. L'équilibre atteint est l'état F .

Donnée : extrait de table de la vapeur saturante.

		Liquide juste saturé $x_V = 0$			Vapeur saturante $x_V = 1$		
T	p	v_L	h_L	s_L	v_V	h_V	s_V
K	bar	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
485	20	$1,18 \times 10^{-3}$	909	2,45	0,0998	2801	6,35
373	1	$1,04 \times 10^{-3}$	418	1,30	1,70	2676	7,36

- 1 - Déterminer la masse d'eau contenue dans le récipient.
- 2 - Montrer que l'état final est un mélange diphasé. Calculer son titre en vapeur.
- 3 - Quelles sont les caractéristiques de la transformation ? Déterminer la chaleur échangée par l'eau.
- 4 - Calculer l'entropie dans les états I et F . Conclure sur le caractère réversible ou non de la transformation étudiée.

Exercice 4 : Vaporisation adiabatique réversible

2 | ✂ 2



- ▷ Diagramme de Clapeyron;
- ▷ Bilan d'enthalpie.

Une masse $m = 1,0 \text{ kg}$ d'eau est maintenue dans une enceinte calorifugée fermée par un piston pouvant coulisser sans frottement. Elle est initialement à l'état de liquide saturant sous une pression $P_I = 100 \text{ bar}$, sans présence de vapeur. Le piston est alors déplacé jusqu'à ce que la pression dans l'enceinte atteigne $P_F = 1 \text{ bar}$. Son mouvement est supposé suffisamment lent pour que la détente soit réversible.

Données :

Température	Liquide saturant	Vapeur saturante
$T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$h_L = 0,42 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$h_V = 2,68 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
$T' = 311 \text{ }^\circ\text{C}$	$h'_L = 1,40 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$h'_V = 2,73 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

- 1 - Placer les points correspondants aux états initial et final sur le diagramme de Clapeyron de la figure 1, et représenter la transformation.
- 2 - En déduire les températures T_I et T_F et les volumes V_I et V_F .
- 3 - Déterminer le travail reçu par le système. Le calculer numériquement et commenter son signe.

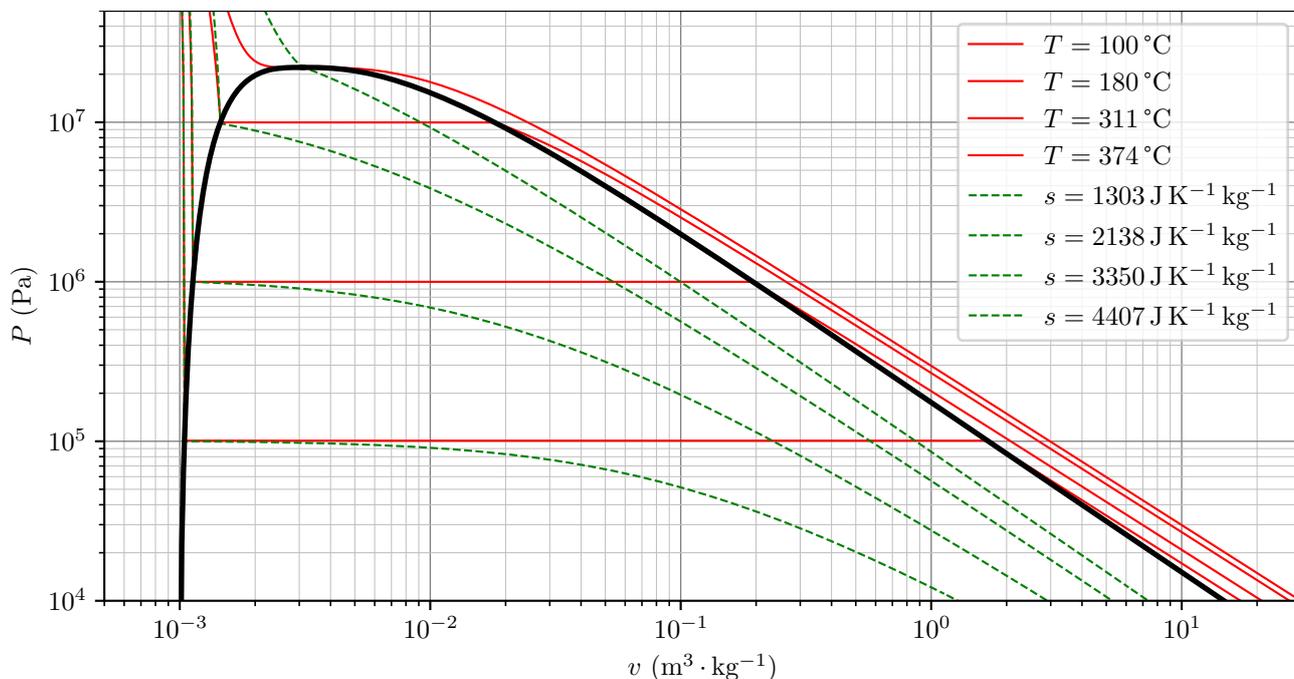


Figure 1 – Diagramme de Clapeyron de l'eau. Les courbes en trait plein sont des isothermes, la température la plus faible correspondant à la courbe la plus basse dans le diagramme. Les courbes en trait pointillé sont des isentropes, l'entropie massique la plus faible correspondant à la courbe la plus basse dans le diagramme.

Exercice 5 : Bilan d'entropie oral banque PT | 🧠 1 | ✂️ 2 | ⚙️

- 📈 ▷ Bilan d'enthalpie ;
- 📈 ▷ Bilan d'entropie.

On dispose d'un litre d'eau à 20 °C que l'on met en contact avec un thermostat à 100 °C pour le vaporiser. Le thermostat est idéal et évolue de façon réversible.

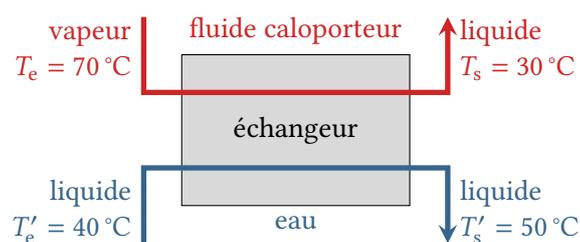
- 1 - Calculer la variation d'entropie de l'eau, du thermostat et l'entropie créée.
- 2 - Reprendre la question si l'opération est réalisée en deux temps en commençant par un thermostat intermédiaire à 60 °C. Comparer les résultats obtenus pour les deux transformations.

Données :

- ▷ capacité thermique massique de l'eau liquide : $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ enthalpie de vaporisation de l'eau : $\Delta_{\text{vap}}h = 2,26 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Exercice 6 : Condenseur d'une pompe à chaleur 🧠 3 | ✂️ 2 | ⚙️

- 📈 ▷ Bilan d'enthalpie.



Cet exercice s'intéresse à l'un des composants d'une pompe à chaleur, le condenseur, dont le principe est schématisé ci-contre. Un fluide caloporteur à l'état gazeux, préalablement porté à la température T_e par compression, y est mis en contact avec l'eau liquide à réchauffer, initialement à la température T'_e . Le fluide caloporteur se refroidit et se liquéfie au sein de l'échangeur, tandis que l'eau se réchauffe. L'évolution de chaque fluide est isobare. L'ensemble est thermiquement isolé de l'environnement.

Question : Le volume d'eau à réchauffer de la sorte est de 1,5 m³ par heure de fonctionnement de la PAC. Déterminer la masse de fluide caloporteur qu'il faut refroidir pendant cette durée.

Données : en considérant le R410a sous 22 bar comme fluide caloporteur,

- ▷ température de vaporisation : $T_{\text{vap}} = 35\text{ °C}$;
- ▷ enthalpie de vaporisation : $\Delta_{\text{vap}}h = 170\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ capacités thermiques du R410a : $c_{\text{vap}} = 0,8\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $c_{\text{liq}} = 1,7\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ capacité thermique de l'eau liquide : $c' = 4,2\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Exercice 7 : Canon à neige

oral Centrale PSI |  3 |  2



▷ *Transitoire thermique.*

La neige artificielle est obtenue en pulvérisant de fines gouttes d'eau liquide à $T_0 = 10\text{ °C}$ dans l'air ambiant à $T_a = -15\text{ °C}$. Ces gouttelettes sont supposées sphériques de rayon $R = 0,2\text{ mm}$. Le déplacement dans l'air soumet chaque goutte à une perte thermique modélisée par la loi de Newton,

$$\phi = h(T - T_a)S,$$

où ϕ est le flux thermique cédé par la goutte d'eau, T sa température, h un coefficient constant et S l'aire de la surface au travers de laquelle a lieu l'échange.

1 - Établir l'équation différentielle régissant l'évolution temporelle de la température de la goutte $T(t)$.

2 - En déduire l'instant t_1 au bout duquel la goutte d'eau atteint une température $T_1 = -5,0\text{ °C}$.

À cet instant, la goutte est toujours liquide alors même qu'elle devrait être solide compte tenu de sa température, phénomène appelé **surfusion**. On suppose qu'à l'instant t_1 une petite perturbation fait cesser la surfusion : la température remonte brutalement à 0 °C , et la goutte solidifie partiellement de manière instantanée.

3 - Calculer la fraction massique α de liquide restant à solidifier après rupture de la surfusion.

4 - À quel instant t_2 la goutte est-elle totalement solidifiée ?

Données :

- ▷ coefficient conducto-convectif $h = 65\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau liquide $c = 4,2\text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau solide $c' = 2,1\text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ enthalpie massique de fusion de la glace $\ell_{\text{fus}} = 333\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ masse volumique de l'eau liquide $\mu = 1,0 \cdot 10^3\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Exercice 8 : Combien de glaçons dans le jus de fruits ?

 3 |  1



▷ *Problème ouvert.*

Par une chaude journée d'été, vous avez oublié de mettre au frigo le jus de fruits de l'apéritif. Combien de glaçons devez-vous y ajouter pour qu'il soit aussi rafraîchissant ?

Données :

- ▷ enthalpie massique de fusion de l'eau : $3,3 \cdot 10^2\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau liquide : $4,2\text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau solide : $2,1\text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;

Machines thermodynamiques

Exercice 9 : Utiliser le CO2 comme fluide frigorigène

inspiré oral banque PT |  2 |  1



▷ *Cycle frigorifique ;*
▷ *Exploitation d'un diagramme des frigoristes.*

Historiquement, les fluides massivement utilisés étaient des chlorofluorocarbures CFC, au très fort potentiel d'effet de serre et à fort impact sur la couche d'ozone. Ils ont été remplacés à partir des années 1980 par les hydrofluorocarbures HFC, sans impact sur la couche d'ozone mais dont le potentiel de réchauffement global à 100 ans (qui quantifie leur impact de long terme sur le réchauffement climatique) est plusieurs centaines voire milliers de fois supérieur à celui du CO₂, d'où la nécessité de leur trouver des alternatives. À ce titre, le CO₂ lui-même est un fluide frigorigène qui est 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. Le diagramme des frigorigères du CO₂ est représenté figure 2.

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 et sans travail jusqu'à la pression $P_4 = P_1$;
- ▶ une transformation isobare jusqu'à retrouver l'état de départ.

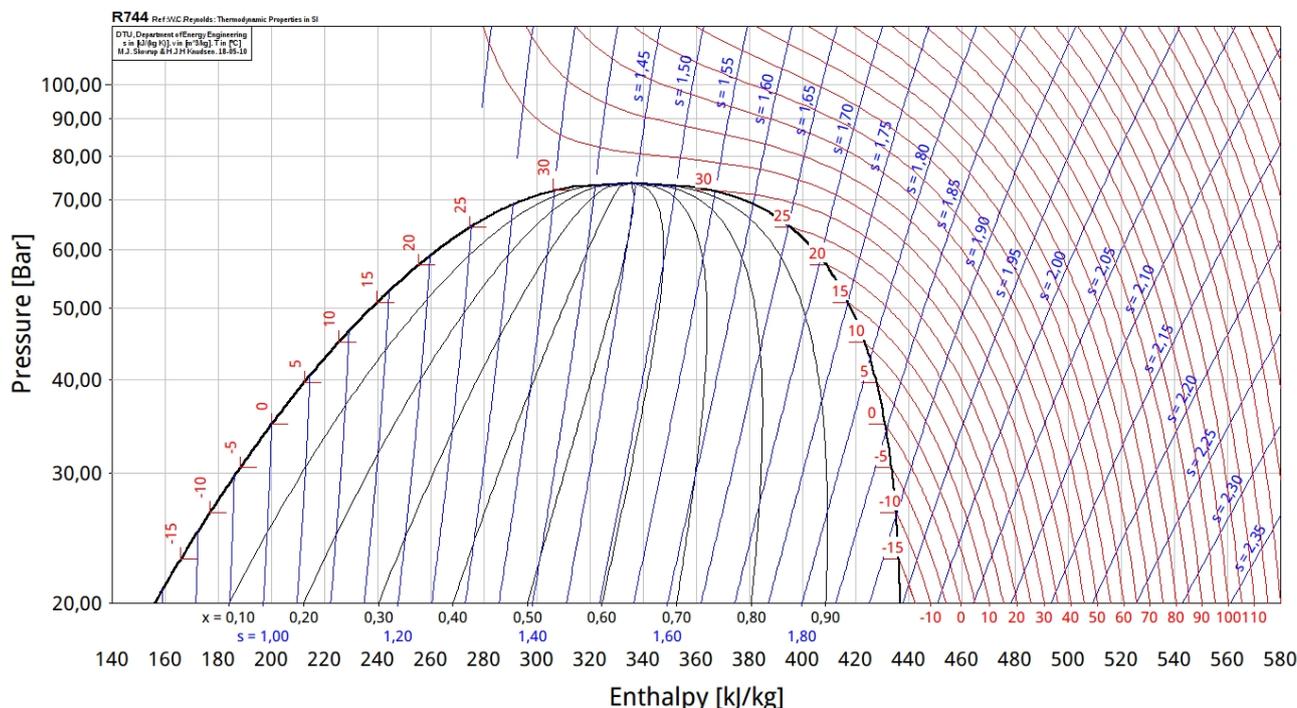


Figure 2 – Diagramme des frigorigères du CO₂.

- 1 - Dessiner le cycle sur le diagramme. Quel est l'état du fluide au point 3 ?
- 2 - Calculer la chaleur échangée avec la source froide.
- 3 - Calculer l'efficacité du cycle.

Exercice 10 : Cycle d'une centrale nucléaire REP



- ▶ Cycle moteur ;
- ▶ Diagramme des frigorigères.

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise un réacteur nucléaire pour produire de la chaleur. Le fonctionnement des réacteurs à eau pressurisée utilisés en France repose sur trois circuits d'eau indépendants. Dans le bâtiment réacteur, les réactions nucléaires chauffent l'eau du circuit primaire. Le « fluide thermodynamique » est l'eau du circuit secondaire. Celle-ci se vaporise au contact du circuit primaire dans le générateur de vapeur, puis entraîne en rotation plusieurs turbines couplées à un alternateur. Elle est ensuite

condensée au contact du circuit de refroidissement avant d'être comprimée puis renvoyée dans le générateur de vapeur.

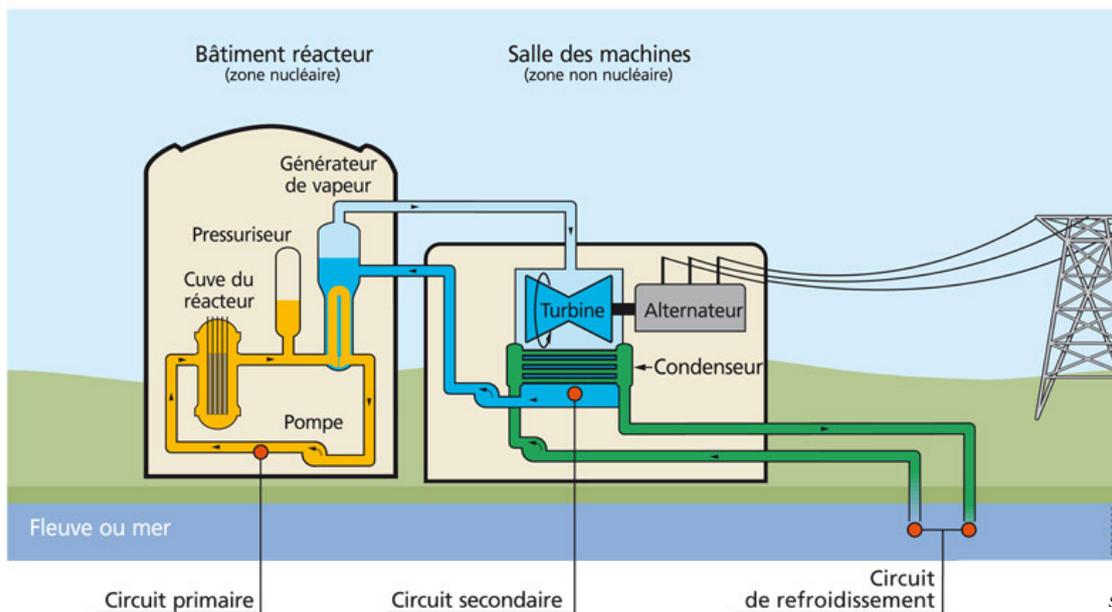


Figure 3 – Structure d'une centrale nucléaire REP.

1 - Quel peut être l'intérêt d'utiliser trois circuits d'eau séparés ?

2 - Sur le plan thermodynamique, une centrale nucléaire est-elle une machine motrice ou réceptrice ? Identifier la source chaude et la source froide.

On s'intéresse au cycle suivi par l'eau du circuit secondaire d'une tranche de centrale de type P4, comme par exemple celles de Paluel ou Penly en Seine-Maritime, produisant une puissance électrique de 1300 MW. Le schéma thermodynamique est représenté figure 4.

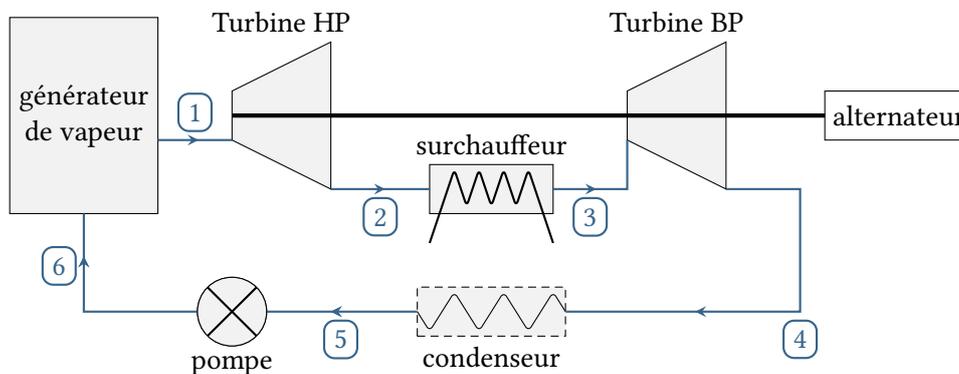


Figure 4 – Schéma thermodynamique du circuit secondaire.

- L'eau sort du générateur de vapeur sous forme de vapeur saturante sèche à 65 bar (état 1) ;
- Elle traverse alors une première turbine dite « haute pression » dans laquelle elle se détend jusqu'à 10 bar ;
- La présence des gouttelettes d'eau liquide étant nocive en raison des chocs avec les pales des turbines, dont l'extrémité atteint quasiment la vitesse du son, l'eau passe dans un surchauffeur isobare où elle est remise en contact thermique avec de l'eau chaude issue du circuit primaire jusqu'à atteindre une température de 280 °C (état 3) ;
- Une deuxième détente a lieu dans une seconde turbine « basse pression » ;
- L'eau traverse ensuite le condenseur, où elle atteint de manière isobare l'état de liquide saturant par contact avec le circuit de refroidissement ;
- Enfin, un bloc pompe ramène l'eau à 65 bar pour la renvoyer dans le générateur de vapeur.

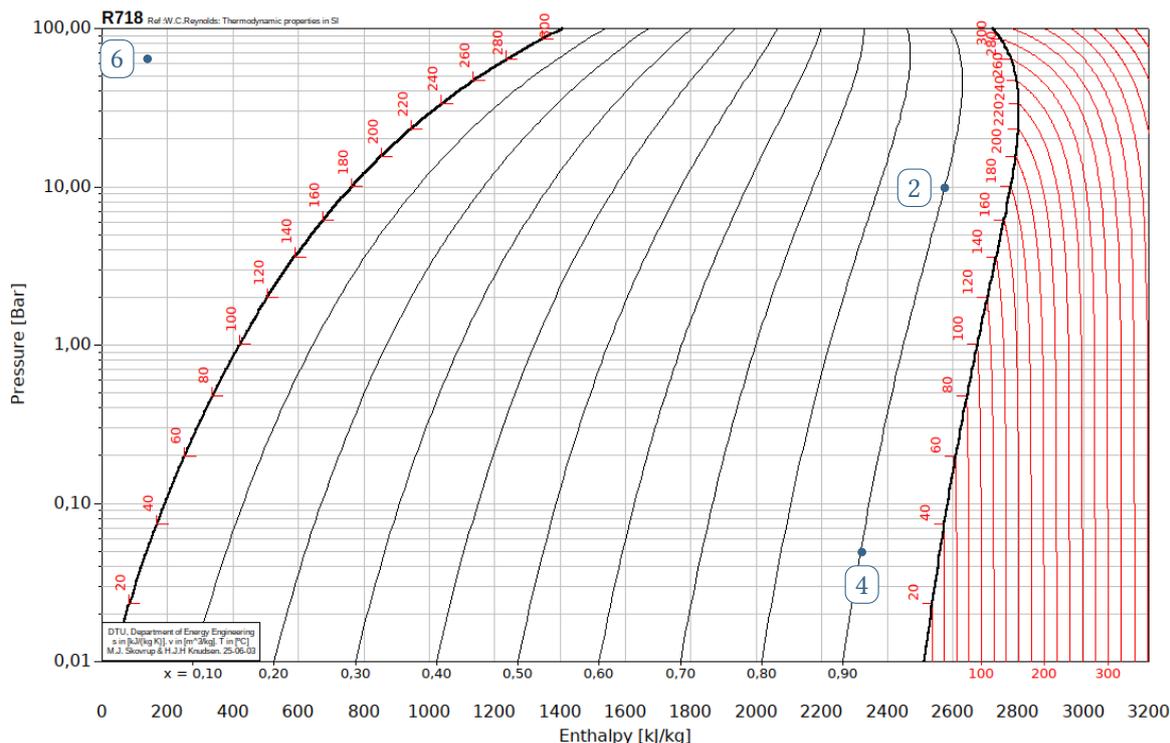


Figure 5 – Cycle thermodynamique du circuit secondaire représenté dans le diagramme des frigorigères.

- 3 - Placer les points manquants sur le diagramme figure 5 et tracer le cycle.
- 4 - Déterminer les températures T_2 et T_6 et les titres en vapeur x_2 et x_4 .
- 5 - Déterminer le travail massique algébrique total fourni par les turbines, supposées parfaitement calorifugées.
- 6 - En déduire le débit d'eau, en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, permettant à la centrale de produire une puissance électrique de 1350 MW.
- 7 - Déterminer le transfert thermique algébrique total fourni par la source chaude. En déduire le rendement thermodynamique du cycle.