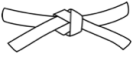





De l'eau dans tous ses états

Travailler avec vos cours et TD ouverts est **chaudement recommandé** : un DM est un entraînement, pas une évaluation. Réfléchir ensemble est une bonne idée, mais le travail de rédaction doit être individuel. En cas de besoin, **n'hésitez pas à me poser des questions**, idéalement à la fin d'un cours ou éventuellement par mail.

Ceinture		Travail à réaliser
	Ceinture blanche	I et II.A (II.B facultatif)
	Ceinture jaune	I et II
	Ceinture rouge	II et III
	Ceinture noire	II et III



Flasher ou cliquer pour accéder au corrigé

I - Mélange de trois phases

On laisse évoluer dans une enceinte calorifugée sous une pression constante de 1 bar un mélange d'eau sous ses trois états dont la composition est la suivante :

- ▷ une masse m de glace initialement à la température $T_{\text{fus}} = 0^\circ\text{C}$;
- ▷ une masse m de vapeur initialement à la température $T_{\text{vap}} = 100^\circ\text{C}$;
- ▷ une masse $3m$ de liquide initialement à la température $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

1 - Supposons qu'à l'état final le système est entièrement liquide. Déterminer la température T_1 dans cette hypothèse. Conclure.

2 - Justifier qualitativement que le système ne peut pas être entièrement sous forme de vapeur dans l'état final.

3 - En déduire la température et la composition finales du système.

Données :

- ▷ capacité thermique massique du liquide : $c = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ enthalpie massique de fusion : $\Delta_{\text{fus}}h = 335 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ enthalpie massique de vaporisation : $\Delta_{\text{vap}}h = 2250 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

II - Comparaison de deux vaporisations

Cet exercice, purement théorique mais conceptuellement important, a pour but de comparer deux transformations de vaporisation de 1 kg d'eau, schématisées figure 1. L'eau est supposée initialement à $T_{\text{vap}} = 100^\circ\text{C}$ sous forme entièrement liquide, et elle se vaporise totalement au contact d'un thermostat de température¹ $T_{\text{ext}} = T_{\text{vap}}$. La vapeur saturante est assimilée à un gaz parfait.

Donnée : $\Delta_{\text{vap}}h = 2,3 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$.

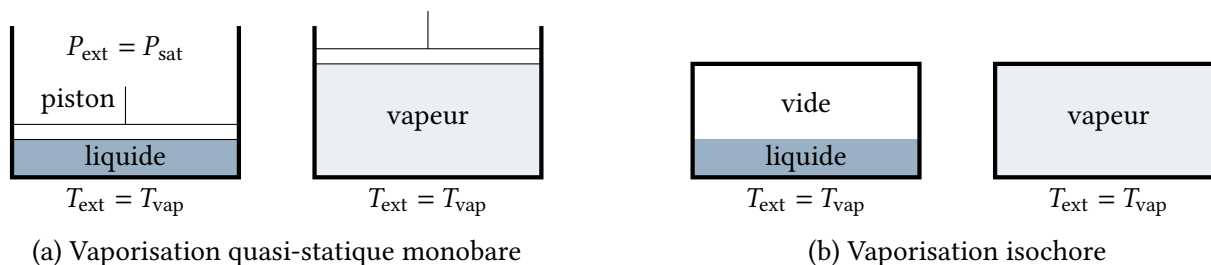


Figure 1 – Deux façons de vaporiser de l'eau.

II.A - Vaporisation quasi-statique monobare

L'eau est placée dans une enceinte fermée par un piston pouvant se déplacer sans frottement, soumis à une pression extérieure apparente $P_{\text{ext}} = P_{\text{sat}}(100^\circ\text{C}) = 1 \text{ bar}$. Cette pression est telle que l'eau se vaporise lentement, conduisant à une augmentation progressive de volume. Le volume initial est tel que l'eau liquide occupe tout l'espace, supposé négligeable devant le volume final.

- 4 - Déterminer le volume final V_F et le travail W reçu par l'eau. Commenter son signe.
- 5 - Procéder au bilan d'enthalpie de la transformation. En déduire le transfert thermique Q reçu par l'eau au cours de la transformation. Commenter son signe.
- 6 - Procéder au bilan d'énergie interne de la transformation.
- 7 - Procéder au bilan d'entropie de la transformation et l'interpréter.

II.B - Vaporisation isochore

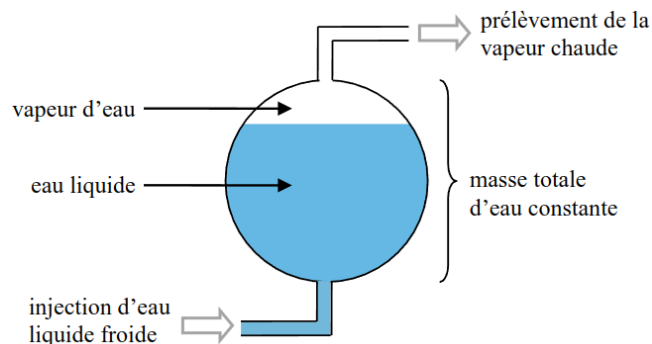
L'eau est cette fois placée dans une enceinte indéformable, initialement vide, de volume V_0 constant égal au volume V_F déterminé précédemment. L'eau s'y vaporise très rapidement. Les grandeurs relatives à cette seconde transformation seront repérées d'un « prime ».

- 8 - Déterminer P'_F sans aucun calcul. Que vaut le travail W' reçu par l'eau au cours de la transformation ?
- 9 - Déterminer le transfert thermique Q' . Comparer Q et Q' .
- 10 - Procéder au bilan d'entropie de la transformation. En déduire l'entropie créée S'_c .
- 11 - Identifier une relation entre l'entropie créée S'_c dans la seconde transformation et le travail W échangé dans la première. Interpréter physiquement.

1. En réalité, il faut que le thermostat soit à une température supérieure à T_{vap} , sinon l'équilibre serait atteint dès l'état initial et l'eau ne se vaporiserait pas. Supposer à la fois $T_{\text{ext}} = T_{\text{vap}}$ et que la vaporisation a lieu revient à étudier les transformations dans la limite $T_{\text{ext}} \rightarrow T_{\text{vap}}^+$.

III - Stockage thermique d'énergie solaire

La centrale solaire de Llo, qui alimente 6000 foyers des Pyrénées-Orientales depuis 2019, a un fonctionnement original. Il s'agit d'une centrale à vapeur, dans laquelle de l'eau suit un cycle de Rankine analogue à celui d'une centrale nucléaire ou à gaz traditionnelle. Cependant, cette eau est chauffée par le rayonnement solaire au lieu de l'être par radioactivité ou par combustion de gaz naturel. Cela améliore considérablement le bilan environnemental, mais empêche évidemment de produire la nuit.



Pour remédier à ce défaut majeur, de l'eau chaude produite en journée est mise en réserve dans des ballons de stockage, puis utilisée lorsque le Soleil ne chauffe plus suffisamment. La centrale dispose de neuf ballons de stockage de volume $V_0 = 120 \text{ m}^3$. Le prélèvement de la vapeur d'eau permettant de faire tourner les turbines s'effectue à masse constante : de l'eau « froide » liquide sortant du condenseur est injectée dans le réservoir au fur et à mesure que la vapeur d'eau chaude en est prélevée, en des quantités telles que la masse $m_0 = 80$ tonnes d'eau dans le ballon reste constante.

Le but de l'exercice est d'estimer l'ordre de grandeur de la durée de fonctionnement permise par le dispositif de stockage. Considérons le stockage d'énergie initialement à son maximum : l'eau contenue dans les ballons est à $T_0 = 285 \text{ °C}$ sous $P_0 = 70 \text{ bar}$. Dans ces conditions, le liquide saturant et la vapeur saturante ont pour masse volumique $\rho_L = 741 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et $\rho_V = 37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. La capacité thermique massique du liquide, supposée indépendante de la température, vaut $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$.

12 - Montrer que l'eau dans le ballon est initialement diphasée. Déterminer le titre en vapeur initial x_0 , et le volume de liquide et de vapeur contenu dans un ballon.

13 - Montrer que le prélèvement de vapeur et l'injection de liquide à masse constante entraîne la création de vapeur au sein du ballon. Prévoir qualitativement (mais en expliquant clairement !) comment la température et la pression dans le ballon évoluent. On gagnera à illustrer le raisonnement par un diagramme de Clapeyron.

On définit la *durée d'autonomie de production* τ comme le rapport entre le travail électrique total W_e produit par la centrale grâce au dispositif de stockage et la puissance P_{\max} qu'elle fournit lorsqu'elle tourne à pleine puissance. Pour en estimer un ordre de grandeur, on modélise la centrale par une machine ditherme dont la température de la source chaude évolue au cours du temps : entre deux instants proches t et $t + dt$,

- ▷ la source chaude, constituée des ballons de température $T_c(t)$, fournit un transfert thermique $\delta Q_c > 0$;
- ▷ la centrale produit un travail électrique $\delta W_e > 0$;
- ▷ elle évacue vers l'air environnant de température $T_{\text{ext}} = 15 \text{ °C}$ constante un transfert thermique $-\delta Q_f > 0$.

On définit le rendement instantané de la centrale par

$$\eta(t) = \frac{\delta W_e}{\delta Q_c}.$$

14 - Établir l'expression de l'efficacité de Carnot instantanée $\eta_{\max}(t)$ en fonction de $T_c(t)$ et T_f lorsque le fonctionnement de la centrale est parfaitement réversible.

15 - En prenant en compte les neuf ballons, exprimer le transfert thermique δQ_c en fonction de la variation dT_c de température des ballons.

16 - Pour prendre en compte empiriquement le fonctionnement imparfait de l'installation, on introduit un coefficient d'efficacité constant ε tel que le rendement réel s'écrive $\eta(t) = \varepsilon \eta_{\max}(t)$. En considérant que la centrale fonctionne tant que $T_c > T_{\text{ext}}$, déterminer le travail électrique total que produit la centrale grâce aux ballons.

17 - Pour la centrale de Llo, $P_{\max} = 9 \text{ MW}$ et $\tau = 4 \text{ h}$. Déterminer la valeur de ε .

18 - Calculer le rendement thermodynamique de la centrale sur toute la durée de fonctionnement du dispositif de stockage. Commenter le résultat².

2. Traduisons pour ceux qui peinent à lire entre les lignes : pourquoi la valeur est-elle petite ?