

Conseils :

- Lisez attentivement l'énoncé du début à la fin et choisissez **ensuite** par quel problème commencer (aucun ordre n'est imposé).
- Le correcteur tiendra compte de la **présentation** (soin apporté aux schémas) et de la **rédaction de votre copie** : justifiez rapidement vos affirmations, donnez la **valeur littérale simplifiée** des résultats en fonction des données de l'énoncé, **vérifiez l'homogénéité et la cohérence** (tout résultat non homogène sera sanctionné).
Les résultats NON ENCADRÉS ne seront pas notés. Laissez une marge à gauche pour le correcteur.
- L'usage des **calculatrices est autorisé**.

CENTRALE SOLAIRE

Les centrales solaires thermiques utilisent l'énergie solaire afin de vaporiser un liquide et ainsi alimenter grâce à la vapeur produite une turbine reliée à un alternateur. Cette filière de production d'électricité fait partie des moyens de réaliser la transition énergétique mondiale nécessaire pour limiter le réchauffement climatique. En effet, l'Agence Internationale de l'Énergie estime que cette filière, adaptée dans les zones à fort ensoleillement, dispose d'un potentiel permettant d'envisager une production de l'ordre de 10% de l'électricité mondiale en 2050. La centrale solaire située sur la commune de Llo, dans les Pyrénées-Orientales, inaugurée en septembre 2019, dont la production annuelle permet d'alimenter environ 6000 foyers du plateau cerdan, a la particularité de pouvoir stocker dans des ballons de l'eau chaude produite dans le champ solaire en pleine journée afin de produire de l'électricité même après le coucher du soleil.



Ce problème propose d'étudier quelques caractéristiques des ballons de stockage de la centrale. Les données utilisées dans ce problème sont réelles s'il s'agit de données publiques. Dans le cas contraire, elles correspondent à des valeurs approximatives.

Lors du fonctionnement de la centrale en journée, une partie de l'eau sortant du champ solaire alimente un réservoir constitué de neuf ballons cylindriques ayant chacun un volume $V = 120 \text{ m}^3$. Lorsque la production d'eau chaude est trop faible (éclairage insuffisant) ou devient nulle (après le coucher du

soleil), la centrale peut continuer de fonctionner grâce à l'eau chaude stockée dans les ballons. La centrale de Llo est ainsi la première centrale solaire thermique au monde à stockage d'énergie. Le prélèvement de la vapeur d'eau, permettant de faire fonctionner les turbines, s'effectue à masse constante : de l'eau froide liquide est injectée dans le réservoir au fur et à mesure que la vapeur d'eau chaude est prélevée, de sorte à ce que la masse d'eau dans le ballon reste constante, comme l'illustre le schéma ci-dessous.

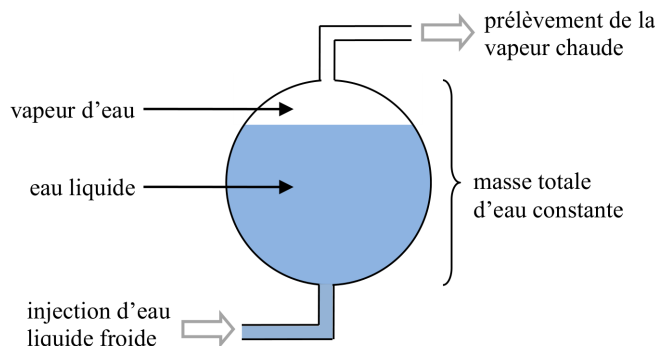


FIGURE 1 – Schéma du ballon de stockage

On note m la masse totale d'eau contenue dans un ballon. On raisonne lorsque le stockage d'énergie est à son maximum, c'est-à-dire que l'eau contenue dans les ballons est à la température $T_i = 285^\circ\text{C}$ sous 70 bar. On donne alors les masses volumiques de l'eau liquide et de la vapeur d'eau égales respectivement à $\rho_L = 741 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et $\rho_V = 37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Les ballons sont remplis de telle manière à ce que la masse m soit égale à 90% de sa valeur si les ballons étaient entièrement remplis d'eau liquide de masse volumique $\rho_L = 741 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1. Calculer la valeur de m d'eau stockée dans **un** ballon.
2. Le ballon ne contient que de l'eau (eau liquide et eau sous forme de vapeur.). Calculer le volume massique v de l'eau présente dans le ballon.
3. Calculer la fraction massique x_V de vapeur d'eau dans les ballons (on rappelle que le volumique massique est l'inverse de la masse volumique : $v_L = \frac{1}{\rho_L}$). En déduire le volume V_V occupé par cette vapeur dans chaque ballon.
4. Justifier que le prélèvement de vapeur et l'injection d'eau liquide à masse constante provoque la création de vapeur à l'intérieur du ballon. Que dire de l'évolution de la température de l'eau dans le ballon ?

La vapeur d'eau générée dans les ballons au fur et à mesure de son extraction permet ainsi d'alimenter en énergie thermique la centrale. On appelle durée d'autonomie de production d'électricité, que l'on note τ , la durée telle que l'énergie électrique totale pouvant être produite grâce aux ballons correspond à celle que fournit la centrale fonctionnant à pleine puissance ($P_e = 9 \text{ MW}$) pendant une durée τ . On se propose d'estimer, à l'aide d'un modèle simplifié, cette durée d'autonomie. Pour cela, on raisonne entre deux instants proches t et $t + dt$ entre lesquels :

- la source chaude que sont les ballons, à la température $T_C(t)$, fournit à la centrale une énergie thermique δQ_C .
- la centrale évacue vers la source froide qu'est l'air ambiant de température constante $T_F = 15^\circ\text{C}$ une énergie thermique $-\delta Q_F > 0$.
- la centrale produit un travail électrique δW_e .

On note $\eta = \frac{\delta W_e}{\delta Q_C}$ l'efficacité de la centrale.

5. En raisonnant sur un cycle entre les instants t et $t + dt$, déterminer, en fonction de $T_C(t)$ et T_F , l'expression de l'efficacité η_C , dite de Carnot, lorsque la centrale fonctionne en régime quasi-permanent de manière complètement réversible.

On prend en compte les différentes irréversibilités présentes dans le fonctionnement de la centrale en considérant que l'efficacité réelle de la centrale s'écrit $\eta = \varepsilon \eta_C$, avec $\varepsilon = 0,65$ et l'on note c_L la capacité calorifique de l'eau liquide, supposée indépendante de la température.

- Justifier précisément pourquoi on peut écrire $\delta Q_C \approx -9mc_L dT_C$, où dT_C représente la variation de la température de l'eau dans les ballons entre t et $t + dt$.
- En supposant que la centrale peut fonctionner tant que l'eau stockée dans les ballons est plus chaude que l'air ambiant, montrer que le travail électrique total que peut fournir la centrale grâce aux ballons d'eau chaude vaut $W_e = 9mc_L \varepsilon \left(T_i - T_F - T_F \ln \left(\frac{T_i}{T_F} \right) \right)$. On rappelle que $W_e = \int \delta W_e$ et que δW_e est lié à δQ_C ...
- Estimer la valeur numérique de τ d'après le modèle précédent sachant que $c_L = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Comparer à la valeur réelle qui est de 4 heures et commenter.

ÉTUDE DE LA SALLE DE BAIN DE DIMITRI

On rappelle la définition de l'hygrométrie :

$$H = \frac{p_{H_2O}}{p_{sat,H_2O}(T)}$$

où p_{H_2O} est la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et $p_{sat,H_2O}(T)$ est la pression de vapeur saturante à la température T . La masse molaire de l'eau est de 18 g/mol et la masse volumique de l'eau sera prise égale à 1000 kg/m^3 .

La constante de gaz parfait vaut $R = 8,314 \text{ SI}$. Lorsque cela est possible, donnez un résultat numérique en plus de l'expression littérale.

Dimitri a voulu bricoler dans sa salle de bain pour installer une VMC double flux (économie d'énergie en réchauffant l'air qui rentre dans la maison avec l'air qui sort de la maison). Malheureusement, il a cassé son aération et pour le moment sa salle de bain n'est plus ventilée. Les dimensions de la salle de bain sont $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$.

Il prend quand même sa douche avant d'aller au travail. Pour ne pas avoir froid en sortant, il allume le chauffage dans sa douche et prend une douche très chaude pendant longtemps. Ainsi, après s'être lavé, la température dans la pièce est d'environ 40°C et l'hygrométrie est de 90% . Dimitri sort ensuite de la salle de bain après avoir éteint le chauffage en claquant la porte, ce qui ferme la pièce de façon hermétique.

La porte n'étant pas calorifugée, la température de la pièce va redescendre à 20°C . On se propose dans cette exercice de calculer dans l'état dans lequel Dimitri va retrouver sa salle de bain en rentrant.

- Quelle est la dimension de R puis son unité courante ?
- Rappeler la définition de la pression partielle d'un corps dans une atmosphère inerte. Qu'est-ce que la pression de vapeur saturante ?
- Sur le diagramme en annexe, relever du mieux que vous pouvez la pression de vapeur saturante de l'eau à 20°C et à 40°C .
- Dans le cas d'un équilibre liquide vapeur en présence d'une atmosphère inerte, que se passe-t-il si à un instant initial l'état du système est tel que :
 - $p_{H_2O} > p_{sat,H_2O}(T)$
 - $p_{H_2O} < p_{sat,H_2O}(T)$
 - $p_{H_2O} = p_{sat,H_2O}(T)$

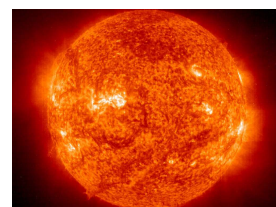
5. À l'équilibre, quelle est la valeur maximale de la pression partielle de la vapeur d'eau et donc la quantité de matière n_{max} d'eau sous forme vapeur dans la pièce. On exprimera le résultat en fonction du volume V de la pièce, de la température T , de la pression en vapeur saturante à cette température $p_{sat,H_2O}(T)$ et de R . Calculer n_{max} .
6. Compte tenu de la définition de l'hygrométrie et de la question précédente, exprimer H en fonction de la quantité de matière sous forme gazeuse dans l'atmosphère $n_{H_2O,g}$ et n_{max} défini à la question précédente.
7. Lorsque Dimitri sort de la douche quelle est la quantité de matière d'eau sous forme vapeur dans la pièce (on pourra utiliser la définition de l'hygrométrie). Faites l'application numérique.
8. Lorsque la salle de bain est revenue à la température de l'appartement, à quelle hygrométrie correspondrait la quantité de matière précédemment calculée, que va-t-il se passer ?
9. Dans quel état (hygrométrie, volume d'eau liquide) Dimitri va-t-il retrouver sa salle de bain en rentrant ?
10. Dimitri fait finalement appel à un plombier pour réparer sa VMC double flux. Sa salle de bain est donc maintenant correctement ventilée. Dimitri habitant en Franche-Comté, l'air extérieur est froid et humide (0°C et 65 % d'humidité).

La pression de vapeur saturante de l'eau à 0°C est 611 Pa. Lorsque l'air est amené dans la maison de Dimitri, il est porté à la température de 20°C mais la pression reste constante, donc la pression partielle de H_2O ne varie pas. Quelle est l'humidité de l'air amené depuis l'extérieur une fois qu'il a été réchauffé ?

DURÉE DE VIE DU SOLEIL : FACULTATIF

Document 1 : le Soleil

Le Soleil est une étoile de taille moyenne, âgée d'environ 4,5 milliards d'années, de masse totale $2 \cdot 10^{30}$ kg, constituée essentiellement d'hydrogène. Les réactions de fusion thermonucléaire se déroulent dans le noyau solaire, dont la masse représente environ 10 % de la masse du Soleil, où la température atteint $15 \cdot 10^6$ K. L'énergie est essentiellement libérée sous forme de rayonnement. La lumière est émise en surface par la troposphère, de température environ 6000 K et met un peu plus de 8 min pour arriver sur Terre. Elle est réfléchiée à 30 % par l'atmosphère terrestre par un effet d'albédo.



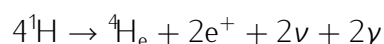
Document 2 : bouteille d'eau

Une bouteille de 1,5 L (capacité thermique massique $c_e = 4,18 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$) possède un diamètre de 8 cm et une hauteur de 30 cm.



Document 3 : fusion nucléaire

Dans une étoile comme le Soleil, la fusion thermonucléaire suit essentiellement une chaîne de réactions appelée chaîne proton-proton qui convertit les noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium, en libérant des neutrinos et du rayonnement selon la réaction :

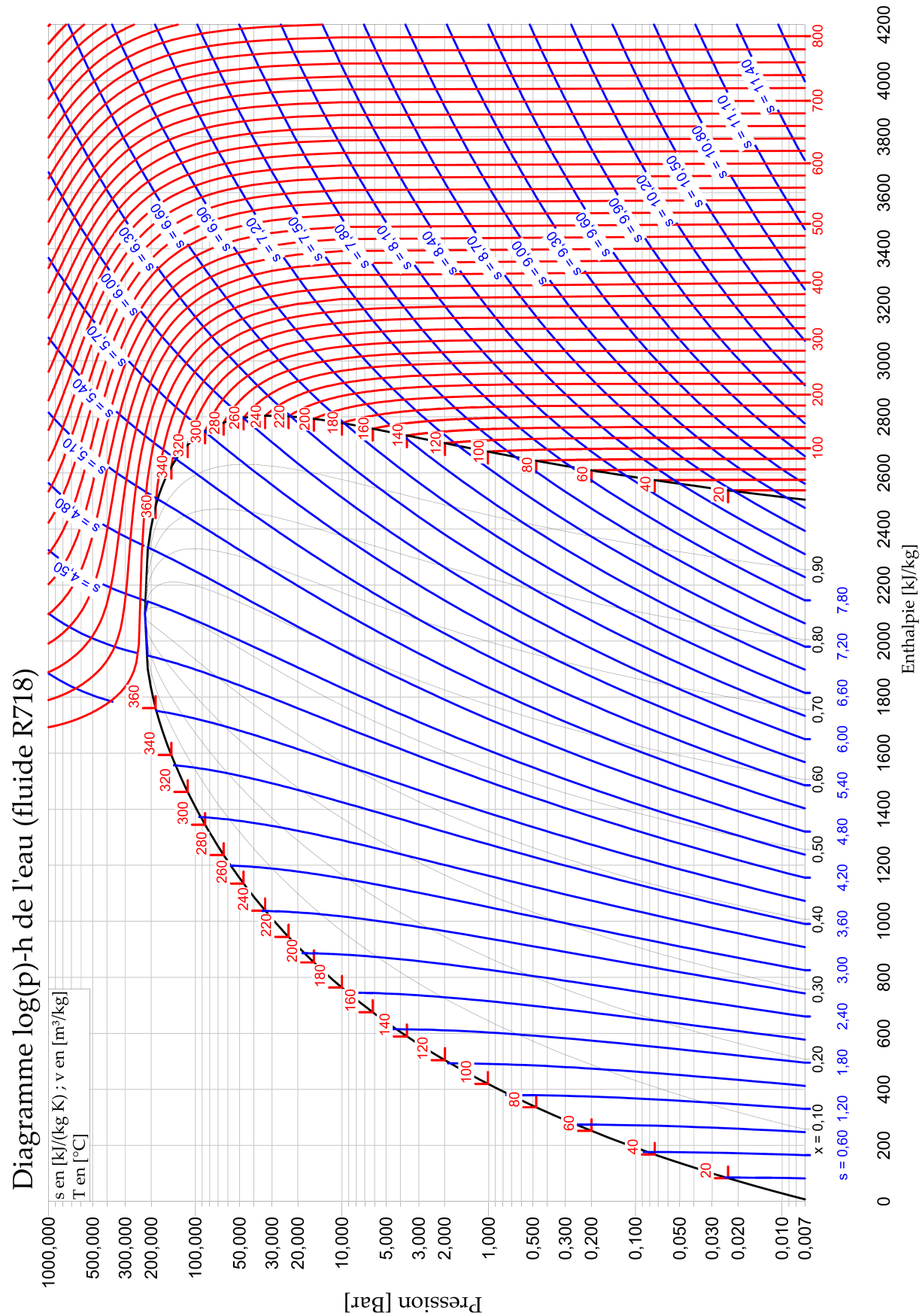


Le défaut de masse entre les noyaux d'hydrogène (de masse 1,00794 u) et la noyau d'hélium (de masse 4,00260 u) est libéré sous forme d'énergie selon la loi $E = mc^2$. L'unité de masse vaut $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Travail attendu :

Par une belle journée d'état (température extérieure de 20° C) le petit Philippe part faire un pique-nique. Il emporte avec lui sa bouteille d'eau qui sort du réfrigérateur. Il prend soin de la laisser à l'ombre et au bout d'une heure et demi il constate que l'eau est à 19° C. Continuant son pique-nique il oublie la bouteille au Soleil et à nouveau une heure et demi plus tard la température de l'eau avoisine les 27°C.

1. On suppose que la puissance thermique reçue par la bouteille lorsque celle-ci est à l'ombre est proportionnelle à l'écart de température avec l'extérieur. Établir l'équation différentielle qui régit l'évolution de la température de l'eau.
2. Quelle est la puissance que la bouteille reçoit de la part du Soleil ?
3. En déduire l'équation différentielle qui régit l'évolution de la température de l'eau lorsque celle-ci est au Soleil.
4. En déduire, à l'aide des documents, la durée de vie du Soleil.



CENTRALE SOLAIRE

- Compte tenu des indications de l'énoncé, on a $m = 0,9\rho_L V$, d'où $m = 80$ tonnes.
- On a $v = \frac{V}{m} = \frac{120}{80 \cdot 10^3} = 1.5 \text{ L.kg}^{-1}$
- En sommant les volumes d'eau liquide et de vapeur, on a $V = V_L + V_V$ avec $m_V = x_V m = \rho_V V_V$ et $m_L = (1 - x_V)m = \rho_L V_L$. On a donc $V = \left(\frac{1-x_V}{\rho_L} + \frac{x_V}{\rho_V} \right) m$, ce qui donne $x_V = \frac{\frac{V}{m} - \frac{1}{\rho_L}}{\frac{1}{\rho_V} - \frac{1}{\rho_L}} = 0,6\%$. Le volume de vapeur d'eau vaut quant à lui $V_V = 13 \text{ m}^3$. Ainsi, même si la vapeur d'eau occupe plus de 10% du volume du ballon, sa masse représente moins de 1% de la masse totale stockée.
- On considère qu'une masse δm de vapeur d'eau est prélevée du ballon et que, dans le même temps, une masse δm d'eau liquide y est injectée. En négligeant les variations des valeurs de ρ_L et ρ_V dues à la modification de température qui en découle, le volume d'eau $V = \frac{m_L}{\rho_L} + \frac{m_V}{\rho_V}$ contenue dans le ballon varierait de $\delta V = \left(\frac{1}{\rho_L} - \frac{1}{\rho_V} \right) \delta m < 0$ si aucun changement d'état n'avait lieu. Le volume du ballon étant invariant, il se produit une vaporisation partielle de l'eau pour que le volume V occupé par l'eau reste constant (puisque $\rho_V > \rho_L$). La température de l'eau dans le ballon diminue puisque, d'une part, de la vapeur d'eau chaude a été remplacée par de l'eau liquide froide et d'autre part, la vaporisation engendrée est un processus endothermique.
- On applique le premier et le second principe à la centrale entre t et $t + dt$ (en faisant attention aux signes pour être en accord avec l'énoncé) qui s'écrivent respectivement $dU_{\text{centrale}} = -\delta W_e + \delta Q_C + \delta Q_F$ et $dS_{\text{centrale}} = \frac{\delta Q_C}{T_C(t)} + \frac{\delta Q_F}{T_F} + \delta S_{\text{créée}}$. La centrale fonctionnant en régime quasi-permanent, son état ne change (presque) pas : on peut donc considérer que $dU_{\text{centrale}} \approx 0$ et $dS_{\text{centrale}} \approx 0$ puisque l'énergie interne U et l'entropie S sont des fonctions d'état. Par ailleurs, un fonctionnement réversible implique qu'aucune entropie n'est créée : $\delta S_{\text{créée}} = 0$. On en déduit $\delta Q_F = -\frac{T_F}{T_C(t)} \delta Q_C$ d'où $\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C(t)}$.
- Il y a neuf ballons contenant chacun une masse m d'eau. Nous avons vu à la question 2 qu'initialement, l'eau était essentiellement sous forme liquide (à plus de 99%). On s'attend à ce que cela perdure lors de l'extraction de la vapeur d'eau. La variation d'enthalpie entre t et $t + dt$ de l'eau contenue dans les ballons vaut donc $dH_{\text{eau}} = 9(m_L c_L + m_V c_V) dT_C \approx 9m c_L dT_C$ puisque $m_L \approx m$. Le premier principe appliqué à la source chaude entre t et $t + dt$ s'écrivant $dH_{\text{eau}} = -\delta Q_C$ dans l'approximation des corps condensés, on aboutit bien à la relation de l'énoncé.
- Le travail électrique total fourni par la centrale est la somme des travaux infinitésimaux : $W_e = \int \delta W_e$. En introduisant l'efficacité, on peut écrire $W_e = \int \eta \delta Q_C$, d'où $W_e = -9m \int \varepsilon \left(1 - \frac{T_F}{T_C} \right) c_L dT_C$. L'énoncé indique que ε et c_L sont considérés comme indépendants de la température T_C de l'eau (ce qui est une approximation). Initialement, $T_C = T_i$ et la centrale arrêtera définitivement de fournir de l'énergie lorsque $T_C = T_F$ (même si, en pratique, elle s'arrêtera avant...). Ainsi, $W_e = -9m \varepsilon c_L \int_{T_i}^{T_F} \left(1 - \frac{T_F}{T_C} \right) dT_C$. Le calcul de l'intégrale aboutit bien à $W_e = 9m c_L \varepsilon \left(T_i - T_F - T_F \ln \left(\frac{T_i}{T_F} \right) \right)$.
- Par définition de la durée d'autonomie de la centrale, $\tau = \frac{W_e}{P_e}$. L'application numérique fournit $\tau = 1,7 \cdot 10^4 \text{ s}$, c'est-à-dire 4 h et 50 min, ce qui est proche de la durée maximale réelle d'autonomie de 4 h. Il n'est pas étonnant d'obtenir une valeur quelque peu surestimée (d'environ 20%) puisqu'en pratique, l'eau dans les ballons doit être suffisamment chaude pour que la vapeur puisse actionner les turbines : la borne supérieure de l'intégrale dans le calcul de W_e est en réalité à une température $T_{\text{arrêt}}$ supérieure à T_F . Il est possible d'estimer cette température en résolvant l'équation implicite $9m c_L \varepsilon \left(T_i - T_{\text{arrêt}} - T_F \ln \left(\frac{T_i}{T_{\text{arrêt}}} \right) \right) = P_e \tau$.

ÉTUDE DE LA SALLE DE BAIN DE DIMITRE

- Q1 1. L'unité de R est $\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$. En effet dans la relation $pV = nRT$, pV est une énergie (J), n est une quantité de matière (mol) et T une température (K).
- Q2 2. La pression partielle d'un corps gazeux dans une atmosphère inerte est la pression qu'aurait ce corps s'il était seul. Pour la calculer on utilise en général l'équation des gaz parfait : $p_A = n_ART/V$. La pression de vapeur saturante est la pression à laquelle l'équilibre liquide vapeur a lieu pour un corps pur à une température fixée.
- Q3 3. Sur le diagramme, la pression de vapeur saturante se lit en cherchant l'ordonnée de l'isotherme sous la courbe de saturation (dans la région où l'on a l'équilibre liquide vapeur). À 20°C l'isotherme est entre 0,02 et 0,03 bar on peut donc estimer 0,025 bar (la valeur tabulée est 2337 Pa). À 40°C l'isotherme est entre 0,07 et 0,08 bar on peut donc estimer 0,075 bar (la valeur tabulée est 7375 Pa).
- Q4 4. Dans le cas d'un équilibre liquide vapeur
- (a) $p_{\text{H}_2\text{O}} > p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T)$ le système est hors équilibre et l'eau gazeuse va se liquéfier jusqu'à atteindre $p_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T)$.
- (b) $p_{\text{H}_2\text{O}} < p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T)$ le système est hors équilibre et l'eau liquide va s'évaporer jusqu'à atteindre $p_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T)$ ou jusqu'à épuisement de l'eau liquide.
- (c) $p_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T)$ le système est à l'équilibre, rien ne se passe.
5. À l'équilibre, la valeur maximale de la pression partielle de la vapeur d'eau est $p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T)$. On a donc

$$p_{\text{H}_2\text{O}} < p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T) \Leftrightarrow \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}RT}{V} < \frac{n_{\text{max}}RT}{V} = p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T) \Leftrightarrow n_{\text{H}_2\text{O}} < n_{\text{max}} = \frac{p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T)V}{RT}$$

Q5

Q6

6.

$$H = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T)} = \frac{\frac{n_{\text{H}_2\text{O}}RT}{V}}{\frac{n_{\text{max}}RT}{V}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{max}}}$$

Q7

7. D'après la question précédente $n = Hn_{\text{max}}$. À 40°C , $n_{\text{max}} = \frac{p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T)V}{RT} = \frac{7375 \times 10}{8,314 \times (273+40)} = 28,3 \text{ mol}$ et $n = 25,5 \text{ mol}$

Q8

8. À cette température, on a $n_{\text{max}} = 8,98 \text{ mol}$. L'hygrométrie serait donc de 284%! La vapeur d'eau va se liquéfier.

Q9

9. À l'état final, la pression sera égale à la pression de vapeur saturante et on aura un équilibre liquide vapeur. L'hygrométrie sera donc de 100%. Puisque $n_{\text{max}} = 8,98 \text{ mol}$ et qu'au départ il y avait $n = 25,5 \text{ mol}$ dans l'atmosphère, une quantité de matière $n_L = 25,5 - 8,98 = 16,5 \text{ mol}$ d'eau va se liquéfier. Soit une masse $m_L = n_L M_{\text{H}_2\text{O}} = 16,5 \times 0,018 = 0,297 \text{ kg}$ soit un volume de 0,3 L d'eau liquide environ.

Q10

10. $H(T_1) = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T_1)}$ et $H(T_2) = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T_2)}$ d'où puisque la pression partielle ne varie pas d'après l'énoncé : $\frac{H(T_1)}{H(T_2)} = \frac{p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T_2)}{p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T_1)} \Rightarrow H(T_2) = H(T_1) \frac{p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T_1)}{p_{\text{sat,H}_2\text{O}}(T_2)}$ soit avec les valeurs de l'énoncé $H(20^\circ\text{C}) = 0,65 \frac{611}{2337} = 17\%$ d'humidité. Cet air est trop sec pour un bon confort dans une habitation.

DURÉE DE VIE DU SOLEIL

1. On se propose dans un premier temps de modéliser les transferts thermiques entre la bouteille d'eau et l'extérieur, pour d'une part caractériser les pertes thermiques, et, d'autre part, évaluer la puissance apportée par le Soleil par rayonnement.

Le premier principe de la thermodynamique appliquée à la bouteille donne :

$dU = mcdT = -k(T - T_{ext})dt$. Le signe $-$ traduit le fait que l'énergie thermique est reçue par la bouteille.

On obtient alors l'équation différentielle : $\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_{ext}}{\tau}$ avec $\tau = \frac{mc}{k}$. On résout cette équation : $T = (T_i - T_{ext}) \exp(\frac{-t}{\tau}) + T_{ext}$. À l'aide des données numériques, on peut évaluer $\tau = 33$ minutes.

2. La bouteille est ensuite laissée au Soleil. Elle reçoit un transfert thermique par rayonnement supplémentaire. On note P_{chauf} la puissance du rayonnement thermique. On a alors, de même que précédemment :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_{ext}}{\tau} + \frac{P_{chauff}}{mc}$$

On intègre : $T = (T_1 - T_{ext} - \frac{\tau}{mc}P_{chauff}) \exp(-t/\tau) + T_{ext} + \frac{\tau}{mc}P_{chauff}$. On trouve alors numériquement : $P_{chauff} = 24$ W. On obtient le flux de puissance : $\phi = \frac{P_{chauff}}{S}$, où S est la section de la bouteille. Numériquement : $\phi = 1,0 \cdot 10^3$ W.m⁻². Or ceci correspond à 70% du flux reçu par la Terre, donc le flux incident est $A = \frac{\phi}{1-0,3} = 1,4 \cdot 10^3$ W.m⁻².

3. La lumière met 8 min pour nous parvenir depuis le Soleil, ce dernier est donc à $d = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. On trouve alors la puissance émise par le Soleil : $P_{Soleil} = 4\pi d^2 A$.

Grâce au document 3, on peut calculer l'énergie massique libérée par le Soleil : $\frac{\Delta mc^2}{4m_h} = 6,52 \cdot 10^{14}$ J.kg⁻¹, avec $\Delta m = m_{He} - 4m_H$ la perte de masse lors de la réaction de fusion. Celle-ci a lieu dans le noyau, de masse $M = 2,0 \cdot 10^{29}$ kg. Ainsi, l'hydrogène contenu dans le noyau peut dégager $E_{tot} = 1,3 \cdot 10^{44}$ J.

La durée de vie du Soleil est donc : $T = \frac{E_{tot}}{P_{Soleil}} = 3,25 \cdot 10^{17}$ s, soit environ 10 milliard d'années.

Comme le Soleil est vieux de 4,5 milliard d'année, il est à la moitié de sa vie, qu'il terminera en géante rouge (dévorant toutes les planètes jusqu'à Mars), puis en naine blanche.