Thermodynamique

1. Session 2022 – Jour1 – Métropole

Le maréchal-ferrant est un artisan spécialisé dans le ferrage des chevaux ; il pose un fer sous chaque sabot du cheval afin de les protéger.

Un fer à cheval doit être parfaitement adapté à la morphologie du sabot du cheval pour que celui-ci ne se blesse pas. Cela nécessite un ensemble d'opérations réalisées lors de la pose du fer par le maréchal-ferrant : le fer est chauffé à une température d'environ 900 °C dans une forge pour être malléable. À l'aide d'un marteau, il est ensuite déformé pour s'ajuster à la forme du sabot.

Données :

- température du fer à la sortie de la forge : θ_0 = 900 °C ;
- volume du fer à cheval : V_{Fer} = 104 cm^3 ;
- masse volumique du fer, supposée indépendante de la température : ρ_{Fer} = 7,87 g·cm^{-3} ;
- surface extérieure du fer à cheval : S = 293 cm^2 ;
- température ambiante extérieure : θ_{Ext} = 15 °C ;
- capacité thermique massique du fer supposée indépendante de la température :
$$c_{Fer} = 440 \text{ J·kg}^{-1}\text{·K}^{-1} ;$$
- loi de Newton donnant l'expression du flux thermique reçu par le système {fer à cheval}, de température θ en provenance de l'air extérieur, de température θ_{Ext} :
$$\Phi = h \cdot S \cdot (\theta_{Ext} - \theta)$$
avec h le coefficient de transfert thermique surfacique et S la surface d'échange :
  - dans l'air : h_{air} = 14 W·m^{-2}·K^{-1} ;
  - dans l'eau froide : h_{eau} = 360 W·m^{-2}·K^{-1}.

1. Chauffage du fer

Lors du chauffage du fer à cheval pour le rendre plus malléable, sa température passe de la température ambiante θ_{Ext} = 15 °C à θ_0 = 900 °C.

Q1. Déterminer la valeur de la masse m_{Fer} du fer à cheval.

Q2. Calculer la variation d'énergie interne ΔU du fer à cheval lors de cette étape.

Q3. Interpréter au niveau microscopique la variation d'énergie interne ΔU du fer à cheval.

2. Refroidissement du fer

Lorsque le fer est à la température souhaitée de 900 °C, le maréchal-ferrant le sort de la forge et le façonne à l'aide d'un marteau pendant une minute environ. Il s'installe ensuite près du cheval et il s'écoule à nouveau environ une minute.

Le fer, encore chaud, est alors posé quelques secondes sur la face inférieure du sabot, ce qui est sans douleur pour l'animal, mais brûle la corne en laissant une trace. Cela permet au maréchal-ferrant de juger si la forme est satisfaisante. Si c'est le cas, il refroidit rapidement le fer en le trempant dans l'eau puis le fixe définitivement sur le sabot à l'aide de clous.

2.1. Refroidissement à l'air libre

On considère que les transferts thermiques entre le fer à cheval et le milieu extérieur suivent la loi de Newton. Le système étudié est le fer à cheval.

Q4. Le maréchal-ferrant martèle le fer à cheval dans l'air. Appliquer le premier principe de la thermodynamique pour le système étudié entre les instants t et $t + \Delta t$; la durée Δt étant supposée faible devant une durée caractéristique d'évolution de la température et la température variant de $\theta(t)$ à $\theta(t + \Delta t)$.

En déduire que l'équation différentielle régissant l'évolution de la température du fer à cheval peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + \frac{\theta}{\tau} = \frac{\theta_{Ext}}{\tau} \qquad \text{avec} \quad \tau = \frac{m_{Fer} \cdot c_{Fer}}{h_{air} \cdot S}$$

Dans ces conditions $\tau = 880$ s.

L'équation différentielle précédente admet pour solution la fonction :

$$\theta(t) = (\theta_0 - \theta_{Ext}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_{Ext}$$

Q5. Vérifier que la fonction proposée $\theta(t)$ est bien solution de l'équation différentielle précédente.

Q6. Calculer la valeur de la température du fer au moment où le maréchal-ferrant le pose sur la face inférieure du sabot du cheval. Commenter.

2.2. Refroidissement dans l'eau avant la pose.

Pour accélérer le refroidissement du fer afin de le poser rapidement sur le sabot, le maréchal-ferrant plonge le fer encore chaud à la température de 600 °C dans un récipient contenant de l'eau à température ambiante de 15 °C que l'on considère comme constante.

Q7. En adaptant la solution obtenue dans le cadre du modèle précédent, estimer la valeur de la durée nécessaire pour que le fer soit refroidi à une température θ_{finale} = 40 °C à laquelle l'artisan pourra poser le fer à l'aide de clous sur le sabot du cheval.

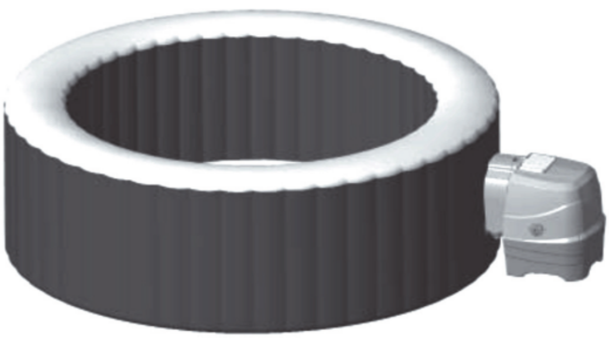
Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.

Q8. Dans la réalité, 20 secondes suffisent pour refroidir le fer dans de l'eau à 15 °C. Commenter.

2. SI – Session septembre 2022 – Jour1 – Métropole

Mots-clés : premier principe de la thermodynamique ; transfert thermique ; loi de Newton de la thermique

Un spa gonflable permet de profiter d'une eau chauffée pour se détendre. L'eau du spa est chauffée par une résistance électrique. Le spa est en outre équipé d'un système permettant d'envoyer de l'air dans le fond du spa pour faire des bulles et d'un couvercle permettant de le fermer.



Le but de l'exercice est d'étudier les conditions de fonctionnement du spa.

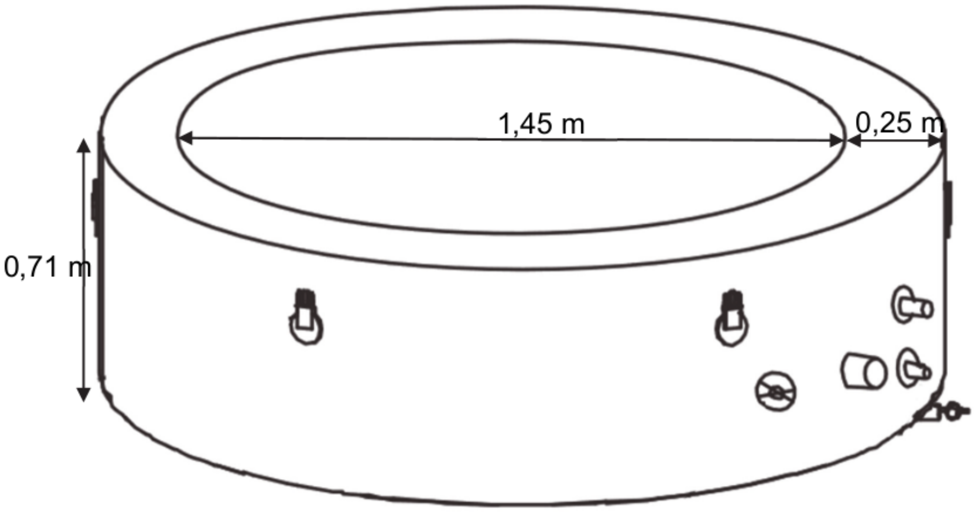


Figure 1. Dimensions du spa

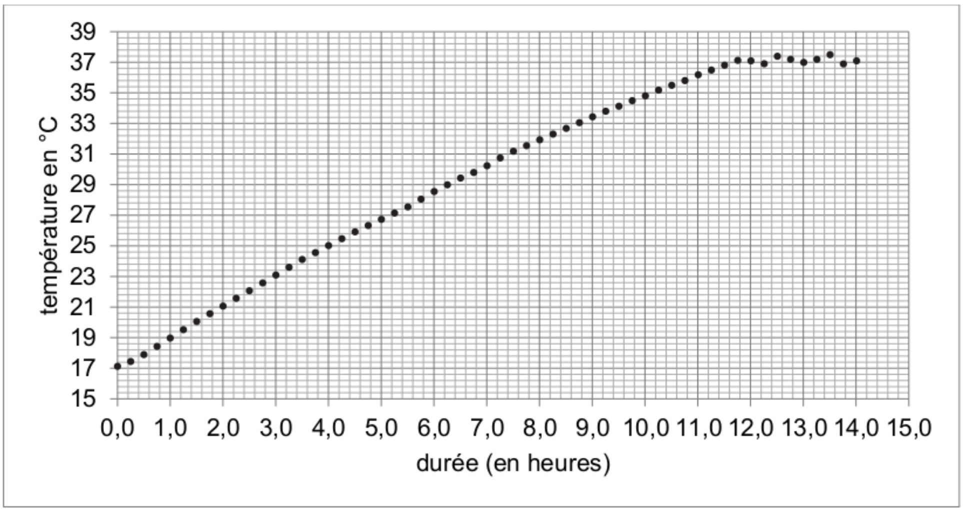


Figure 2. Évolution de la température de l'eau du spa rempli lors de la mise en service

D'après des mesures réalisées avec une sonde de température DS18B20

Données pour la situation étudiée :

- volume d'eau dans le spa rempli : $V_{\text{eau}} = 795$ L ;
- masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1{,}00\times10^3$ kg /m3
- puissance de chauffage du spa : $P_{\text{chauffage}} = 2{,}20\times10^3$ W ;
- capacité thermique massique de l'eau : $c_{\text{eau}} = 4{,}18\times10^3$ J·K^{-1}·kg^{-1}.

Dans un premier temps, on s'intéresse à la mise en service du spa. Le spa est rempli avec de l'eau à la température initiale T_{i} = 17 °C, puis le chauffage est mis en route. On suppose que la masse d'eau dans le spa reste constante.

Q1. Exprimer la capacité thermique C de l'eau du spa en fonction de V_{eau}, ρ_{eau} et c_{eau}. En déduire l'expression puis la valeur de la variation d'énergie interne ΔU de l'eau du spa lorsque sa température varie de T_i à la température T_{f} = 37 °C.

Q2. À l'aide notamment de la figure 2, montrer que la valeur de la puissance thermique moyenne P reçue par l'eau du spa lors de la mise en service est de l'ordre de 1,5 kW.

Q3. Comparer cette puissance thermique moyenne P reçue par l'eau du spa avec la puissance de chauffage du spa $P_{\text{chauffage}}$ et commenter.

Dans cette partie, on s'intéresse aux pertes d'énergie thermique du spa lorsque le système de chauffage est éteint.

La paroi du spa est constituée de deux couches de PVC de 4 mm d'épaisseur, séparées par une couche d'air de 24 cm d'épaisseur. On considère une température extérieure moyenne de 9 °C et une température de l'eau moyenne de 37 °C.

Q4. Expliquer qualitativement pourquoi il est, *a priori*, intéressant, d'un point de vue thermique, que les parois soient remplies d'air.

Q5. Déterminer le sens du transfert thermique dans cette situation. Justifier.

On considère le spa ouvert, le système de chauffage étant éteint. À l'instant t = 0, la température vaut 37 °C.

On modélise le transfert thermique Q entre l'eau du spa et l'air extérieur entre les instants t et $t + \Delta t$ par la loi de Newton :

$$Q = h \,.\, S \,.\, (T_{ext} - T(t)) \,.\, \Delta t$$

Avec h le coefficient conducto-convectif surfacique, S l'aire de la surface de l'eau en contact avec l'air, T_{ext} la température de l'air extérieur, $T(t)$ la température de l'eau du spa et Δt la durée d'étude supposée petite devant la durée typique d'évolution de la température du système.

Q6. Établir l'équation différentielle qui caractérise alors l'évolution temporelle du système {eau du spa} et la mettre sous la forme :

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} + \frac{T(t)}{\tau} = \frac{T_{ext}}{\tau}$$

avec τ le temps caractéristique de l'évolution de la température du système dont on donnera l'expression en fonction de h, S, c_{eau}, ρ_{eau} et V_{eau}.

L'évolution de la température peut être modélisée par une équation du type :

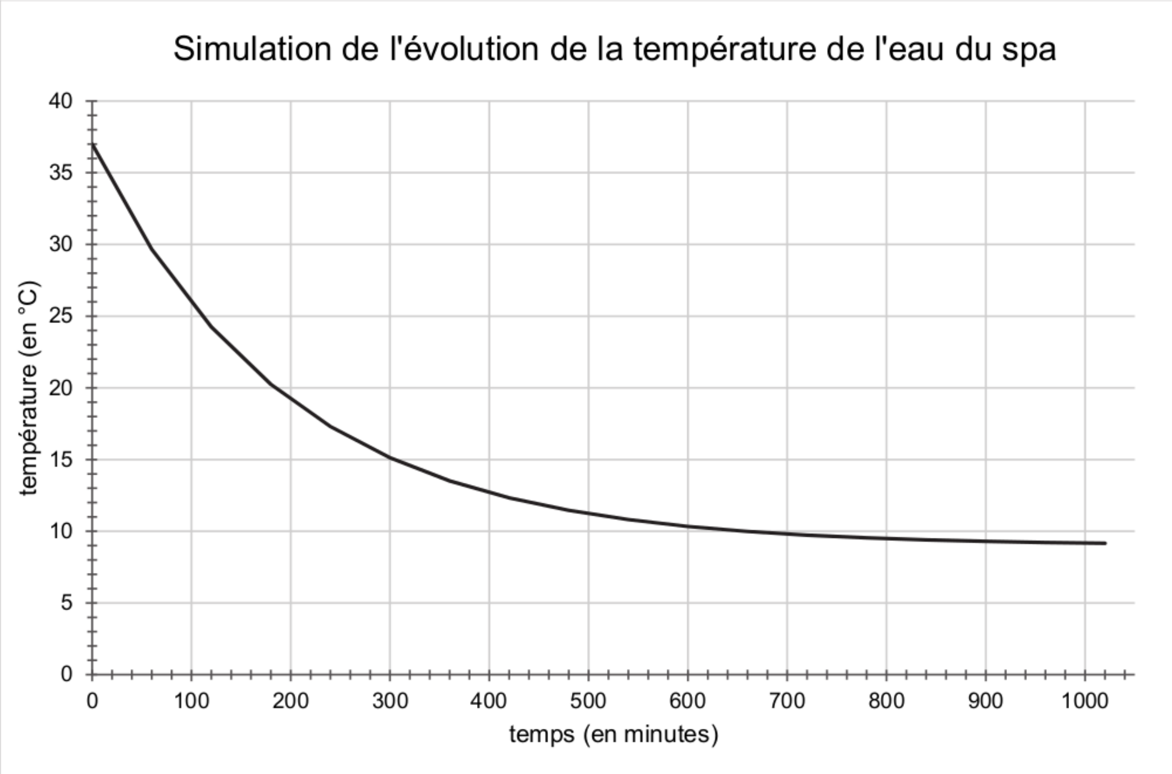
$T(t) = A \,.\, \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + B$ où A et B sont deux constantes que l'on ne cherchera pas à déterminer. Une simulation de cette évolution est proposée sur l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE.**

Q7. À l'aide de l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE,** déterminer graphiquement la valeur de τ. Commenter.

Dans les mêmes conditions que précédemment, on active les bulles du spa.

Q8. Expliquer qualitativement comment évolue la valeur de τ comparée à la situation précédente.

Q9. Sur l'**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE,** tracer alors l'allure de la courbe d'évolution de la température que l'on obtiendrait dans ce dernier cas.



3. SI – Session 2023 – Jour1 – Nouvelle calédonie

Wim Hof, surnommé « l'homme de glace » est internationalement connu pour avoir battu plusieurs records du Guinness d'exposition au froid extrême. Il a établi le record du monde du temps le plus long au contact direct du corps avec la glace. Il a réitéré 16 fois l'exploit. Son record le plus long a une durée de 1 heure 53 minutes et 2 secondes en 2013.

L'objectif de cet exercice est d'estimer le temps pendant lequel une personne peut rester dans de l'eau froide avant d'atteindre l'hypothermie.

On considère une personne de masse m = 75 kg plongeant en maillot de bain dans une eau glacée où règne une température notée θ_{eau} = 2,8 °C, considérée comme constante.
On supposera que la température du plongeur est uniforme, c'est-à-dire identique en tous points de son corps. Elle évolue au cours du temps et sera notée $\theta_{int}(t)$.
Le corps humain est naturellement réchauffé par de l'énergie produite par son métabolisme et représentée par un flux thermique constant de $1{,}0 \times 10^7$ J par jour.

Les échanges thermiques entre le plongeur et l'eau seront modélisés par des échanges de type conducto-convectifs décrits par la loi phénoménologique de Newton :

$$\Phi(t) = h \times S \times (\theta_{eau} - \theta_{int}(t))$$

avec $\Phi(t)$ en W : le flux thermique conducto-convectif
S = 1,9 m^2 : surface de contact du plongeur avec l'eau
h = 100 W·m^{-2}·K^{-1} : coefficient de transfert thermique

Données

- Capacité thermique massique du corps humain : $c = 3{,}5 \times 10^3$ J·kg^{-1}·K^{-1}.
- L'hypothermie est un phénomène au cours duquel une baisse anormale de la température d'un être vivant à sang chaud ne permet plus d'assurer correctement ses fonctions vitales. Pour l'être humain :
  - de 34 à 35 °C, l'hypothermie est modérée,
  - de 30 à 34 °C, l'hypothermie est moyenne,

- en dessous de 30 °C, l'hypothermie est grave.

1. Montrer que la puissance dissipée par le métabolisme, à flux constant, est P_{th} = 0,12 kW environ.

2. Montrer que les échanges thermiques entre le plongeur et son environnement pendant une petite durée Δt est donnée par la relation : $Q = P_{th} \times \Delta t + \Phi(t) \times \Delta t$. Donner le signe de $\Phi(t)$.

3. En utilisant le premier principe de la thermodynamique et en considérant le plongeur comme un système fermé incompressible, déterminer la relation donnant la variation de l'énergie interne ΔU du plongeur en fonction de sa masse m, de sa capacité thermique massique c et de la variation de sa température $\Delta\theta_{\text{int}}$.

4. Montrer, par le bilan d'énergie précédent, que la température, supposée uniforme, $\theta_{\text{int}}(t)$ du plongeur vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d\theta_{\text{int}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{int}}(t)}{\tau} = \frac{\theta_{\text{eau}}}{\tau} + \frac{P_{\text{th}}}{m \times c} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{m \times c}{h \times S}$$

5. Montrer que la constante τ peut s'exprimer en secondes et déterminer sa valeur.

La solution de l'équation différentielle est :

$$\theta_{\text{int}}(t) = 33{,}6 \times e^{-\frac{t}{1{,}4 \times 10^3}} + 3{,}42 \qquad \text{avec } t \text{ en s et } \theta_{\text{int}} \text{ en °C.}$$

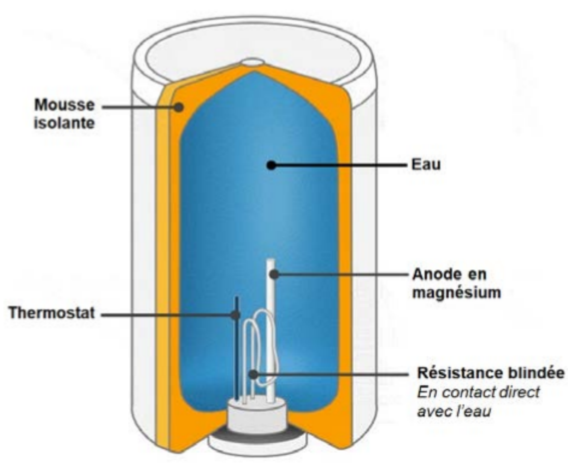
6. Déterminer la durée maximale de plongée envisageable avant d'atteindre l'hypothermie grave.

7. Critiquer le modèle simplifié utilisé ici pour expliquer le record de Win Hof.

4. SI – Session 2022 – Jour2 – Centres étrangers

L'eau chaude sanitaire est le deuxième poste de dépense en électricité des foyers de France après le chauffage. Selon le fournisseur d'énergie EDF, elle représente entre 11 % et 15 % de la dépense totale.

Un chauffe-eau électrique, encore appelé cumulus ou ballon d'eau chaude, se compose principalement d'une cuve isolée (grâce à une mousse isolante) qui maintient l'eau à bonne température, et d'une résistance blindée qui permet la montée en température de l'eau. Cette isolation interne est généralement insuffisante et n'empêche pas les déperditions thermiques.
La température idéale de l'eau contenue dans un chauffe-eau se situe aux alentours de 55 à 60 °C. Au-delà de 65 °C, le risque d'apparition de tartre augmente. À l'inverse, une température trop basse (moins de 50 °C) peut favoriser le développement de bactéries



Le but de l'exercice est d'étudier des moyens pour diminuer la facture énergétique annuelle liée à la consommation d'eau chaude sanitaire.

Le système d'étude est l'eau liquide contenue dans le ballon.

Données :

- l'eau liquide est un fluide incompressible ;
- capacité thermique massique de l'eau liquide : c_{eau} = 4,18 kJ·kg^{-1}·K^{-1} ;
- masse volumique de l'eau liquide : ρ_{eau}= 1,00 kg·L^{-1}.

On considère une famille de quatre personnes habitant une maison individuelle équipée d'un chauffe-eau électrique. L'eau admise dans le ballon, de volume 200 L, est chauffée de 15 °C à 60 °C une fois par jour en moyenne.

1. Indiquer le mode de transfert thermique qui permet d'uniformiser la température de l'eau au sein du ballon.

2. Déterminer la valeur de la variation d'énergie interne du système sur une journée.

Le chauffe-eau est installé dans une buanderie dans laquelle la température de l'air est de 20 °C, considérée constante.

La résistance thermique des parois du ballon contenant l'eau chaude est R_{th} = 0,624 K·W^{-1}.

3. Donner l'expression du flux thermique ϕ à travers les parois du ballon, entre l'eau chaude et l'air de la buanderie. Calculer sa valeur lorsque la température de l'eau est de 60 °C. Préciser le sens du transfert thermique.

4. Vérifier que la valeur de l'énergie perdue sur une journée par l'eau du ballon sous forme de transfert thermique vers l'air extérieur est environ $Q_{journée}$ = 5,5 × 10^6 J. On négligera les pertes thermiques pendant la phase de chauffage.

La résistance blindée du chauffe-eau convertit l'énergie qu'elle reçoit par travail électrique $W_{él}$ en énergie thermique. On considère que cette énergie est restituée intégralement par transfert thermique à l'eau du ballon, en contact direct avec la résistance.

5. En appliquant le premier principe de la thermodynamique à l'eau du ballon et en tenant compte des pertes thermiques à travers les parois du ballon, montrer que la consommation d'énergie électrique de la famille pour produire 200 L d'eau chaude sanitaire par jour a pour valeur environ 4,3 × 10^7 J.
Pour cette question, la rigueur des calculs, la rédaction du raisonnement et toute initiative prise durant la démarche, même non aboutie, seront valorisées lors de la correction.