THÈME 3 – CHAPITRE 2

CORRECTION D'EXERCICES

Pierre-André LABOLLE

Lycée International des Pontonniers

Avril 2024

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P372 n°12

a. La température est la mesure de l'énergie cinétique moyenne des molécules. La température finale étant plus élevée que la température initiale, l'énergie cinétique moyenne des molécules d'eau dans la baignoire d'eau chauffée est supérieure à celle des molécules d'eau dans la baignoire d'eau froide.

b. Au cours du chauffage de l'eau, l'énergie interne du système augmente car l'énergie cinétique des molécules augmente et cette énergie cinétique microscopique est une contribution à l'énergie interne.

c. Le système est incompressible donc, d'après le premier principe de la thermodynamique, $\Delta U = Q$. D'autre part, $Q = m_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} \times \Delta T$. On obtient donc $Q = 200 \times 4180 \times (37 - 15) = 1,8 \cdot 10^7$ J $= 18$ MJ. Cette énergie thermique gagnée par le système est l'énergie à fournir pour chauffer l'eau du bain.

d. La relation entre puissance et énergie est $P = \dfrac{E}{\Delta t}$ donc

$$\Delta t = \frac{E}{P} = \frac{1,8 \cdot 10^7}{10} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ s} = 21 \text{ j}$$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P372 n°14

a. La température de la boisson diminue lors de l'activation du dispositif donc l'énergie interne de la boisson diminue. Autrement dit, $\Delta U < 0$. Cela se traduit par une diminution de l'énergie cinétique moyenne (donc de la vitesse) des molécules constituant la boisson.

b. Le système étant incompressible, le premier principe de la thermodynamique appliqué à la boisson nous indique que $\Delta U = Q$. Par ailleurs, nous savons que $Q = m_{\text{boisson}} \times c \times \Delta T$. Cette énergie thermique **perdue** par la boisson est égale à l'énergie $E = 12 \text{ kJ}$ **absorbée** par le dispositif d'où $E = -m_{\text{boisson}} \times c \times \Delta T$.

Par ailleurs, $m_{\text{boisson}} = \rho \times V$ d'où

$$\Delta T = -\frac{E}{\rho \times V \times c} = -\frac{12 \cdot 10^3}{1,0 \times 33 \cdot 10^{-2} \times 4,2 \cdot 10^3} = -8,7 \text{ K} = -8,7 \text{ °C}$$

La boisson est donc significativement refroidie grâce à ce dispositif puisque sa température est abaissée d'environ 9 °C.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P373 n°20

- Le flux thermique Φ est donné par la relation $T_e - T_i = R_{th} \times \Phi$

  Attention au signe, comme toujours avec le flux thermique. Ici, on cherche le flux à travers la fenêtre donc il s'agit d'u flux sortant qui doit être négatif, d'où le terme $T_e - T_i$ qui est négatif.

- On en déduit le flux thermique à travers la fenêtre :

  $$\Phi = \frac{T_e - T_i}{R_{th}} = \frac{5 - 20}{3,3 \cdot 10^{-3}} = -4,5 \cdot 10^3 \text{ W} = -4,5 \text{ kW}$$

- Par définition, $\Phi = \dfrac{Q}{\Delta t}$ donc l'énergie **perdue** par jour à travers cette fenêtre est donnée par :

  $$Q = \Phi \times \Delta t = -4,5 \cdot 10^3 \times (24 \times 60 \times 60) = -3,9 \cdot 10^8 \text{ J} = -390 \text{ MJ}$$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P377 n°36

a. L'expression entre guillemets dans le texte indique que, du fait de son métabolisme, l'Inuit produit de l'énergie thermique dont une partie est libérée dans l'atmosphère de l'igloo. Comme il s'agit d'une énergie dégagée par heure, cette grandeur est un flux thermique : $\Phi_{\text{Inuit}} = \dfrac{E_{\text{Inuit}}}{\Delta t} = \dfrac{0,5 \cdot 10^6}{60 \times 60} = 1,4 \cdot 10^2 \text{ W} = 140 \text{ W}$
Remarque : le signe positif indique que l'Inuit perd ce flux de chaleur au profit de l'air ; c'est donc le flux **reçu** par l'air.

b. Afin que la température dans l'igloo reste constante au cours de la nuit, il faut que le flux de chaleur apporté par les 3 Inuits à l'air de l'igloo compense exactement le flux de chaleur perdu par l'air de l'igloo du fait de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur de l'igloo.

On étudie donc le système air dans l'igloo qui **reçoit** un flux de chaleur tel que $\Phi_{\text{reçu}} = 3 \times \Phi_{\text{Inuit}}$ et qui perd un flux de chaleur $\Phi_{\text{perdu}} = \dfrac{\theta_{ext} - \theta_{int}}{R_{th}}$

On obtient donc $3 \times \Phi_{\text{Inuit}} = -\dfrac{\theta_{ext} - \theta_{int}}{R_{th}}$ d'où $R_{th} = -\dfrac{\theta_{ext} - \theta_{int}}{3 \times \Phi_{\text{Inuit}}}$

La valeur de la résistance thermique de l'igloo doit donc être :

$$R_{th} = -\frac{-40 - 20}{3 \times 140} = 1,4 \cdot 10^{-1} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P377 n°36 (suite)

c. $R_{th} = \dfrac{\dfrac{1}{R_0} - \dfrac{1}{R_0 + e}}{2 \times \pi \times \lambda_{th}}$ donc $\dfrac{1}{R_0} - \dfrac{1}{R_0 + e} = R_{th} \times 2 \times \pi \times \lambda_{th}$

$$\frac{1}{R_0 + e} = \frac{1}{R_0} - 2 \times \pi \times \lambda_{th} \times R_{th}$$

$$\frac{1}{R_0 + e} = \frac{1 - 2 \times \pi \times \lambda_{th} \times R_{th} \times R_0}{R_0}$$

$$R_0 + e = \frac{R_0}{1 - 2 \times \pi \times \lambda_{th} \times R_{th} \times R_0}$$

$$e = \frac{R_0}{1 - 2 \times \pi \times \lambda_{th} \times R_{th} \times R_0} - R_0$$

$$e = R_0 \times \left(\frac{1}{1 - 2 \times \pi \times \lambda_{th} \times R_{th} \times R_0} - 1 \right)$$

$$e = 1,0 \times \left(\frac{1}{1 - 2 \times \pi \times 0,25 \times 1,4 \cdot 10^{-1} \times 1,0} - 1 \right) = 3,0 \cdot 10^{-1}\ \mathrm{m}$$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P377 n°36 (fin)

d. L'épaisseur des murs de l'igloo trouvée précédemment est de 30 cm, ce qui semble réaliste et en accord avec ce que l'on peut voir sur la photographie de l'énoncé.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P378 n°38

a. Le fluide reçoit de l'énergie de la part de la source chaude donc $Q_c > 0$ et cède de l'énergie à la source froide donc $Q_f < 0$. Le travail est fourni à la pièce mécanique à entraîner, autrement dit, perdu par le fluide donc $W < 0$.

b. Dans ce cas, l'énergie utile est le travail fourni à la pièce mécanique (le but du moteur est de mettre cette pièce en mouvement). Or le travail est négatif donc $|\text{énergie utile}| = |W| = -W$

Par ailleurs, l'énergie dépensée est celle fournie par la source chaude au fluide qui est positive donc $|\text{énergie dépensée}| = Q_c$

On en déduit que le rendement s'exprime par la relation suivante :

$$\eta = \left|\frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée}}\right| = \frac{|\text{énergie utile}|}{|\text{énergie dépensée}|} = -\frac{W}{Q_c}$$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P378 n°38 (suite)

c. Le moteur effectue des cycles. Pour un cycle, le système se retrouve en fin de cycle dans le même état qu'en début de cycle (dans le cas idéal). Son énergie interne est donc la même au début et à la fin du cycle. On en déduit que la variation d'énergie interne au cours d'un cycle est nulle donc que $\Delta U = Q_c + Q_f + W = 0$. Par conséquent, $W = -Q_c - Q_f$.

   On peut donc exprimer le rendement η en fonction des seules énergies thermiques :
   $\eta = -\dfrac{W}{Q_c} = -\dfrac{-Q_c - Q_f}{Q_c} = \dfrac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \dfrac{Q_f}{Q_c}$

   Remarque : ce rendement est inférieur à 1 car $Q_f < 0$ alors que $Q_c > 0$

d. Si $\dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_f}{T_f} = 0$ alors $\dfrac{Q_f}{T_f} = -\dfrac{Q_c}{T_c}$ donc $\dfrac{Q_f}{Q_c} = -\dfrac{T_f}{T_c}$ et $\eta = 1 - \dfrac{T_f}{T_c}$

   On peut donc calculer le rendement : $\eta = 1 - \dfrac{300}{3000} = 0,90 = 90\%$

e. La température T_f est celle du milieu extérieur. On ne peut donc pas jouer sur ce paramètre pour améliorer le rendement. En revanche, on constate sur la relation précédente que plus T_c est élevée, plus η se rapproche de 100%. On a donc intérêt à avoir une température la plus élevée possible pour le gaz en combustion dans un moteur thermique.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P379 n°41

a. Pendant une durée dt, l'énergie interne du système varie d'une quantité dU qui est égale à la quantité de chaleur échangée δQ en vertu du premier principe de la thermodynamique appliqué au système incompressible que représente le système ici. L'énergie issue de la thermogenèse est une énergie **reçue** par le système et s'exprime donc par $P_{th} \times dt$ alors que l'énergie associée aux échanges conducto-convectifs est une énergie **perdue** par le système. Cette énergie s'exprime donc par $-\Phi_{cc} \times dt$.

   On obtient alors la relation $dU = P_{th} \times dt - \Phi_{cc} \times dt$

b. Le système étant incompressible, nous savons que $dU = \delta Q = m \times c \times d\theta$. Par ailleurs, selon la loi phénoménologique de Newton $\Phi_{cc} = h \times S \times \big(\theta(t) - \theta_{eau}\big)$. On obtient donc la relation suivante :

$$m \times c \times d\theta = P_{th} \times dt - h \times S \times \big(\theta(t) - \theta_{eau}\big) \times dt$$

$$d\theta = \frac{P_{th}}{m \times c} \times dt - \frac{h \times S}{m \times c} \times \big(\theta(t) - \theta_{eau}\big) \times dt$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{P_{th}}{m \times c} - \frac{h \times S}{m \times c} \times \big(\theta(t) - \theta_{eau}\big) \text{ où l'on pose } \tau = \frac{m \times c}{h \times S} \text{ d'où}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{P_{th}}{m \times c} - \frac{1}{\tau} \times \big(\theta(t) - \theta_{eau}\big) = \frac{P_{th}}{m \times c} - \frac{\theta}{\tau} + \frac{\theta_{eau}}{\tau}$$

$$\text{d'où } \frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{\tau} = \frac{\theta_{eau}}{\tau} + \frac{P_{th}}{m \times c} \text{ avec } \tau = \frac{m \times c}{h \times S}$$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P379 n°41 (suite)

c. La solution de l'équation sans second membre $\dfrac{d\theta}{dt} + \dfrac{\theta}{\tau} = 0$ est de la forme $\theta = A \times e^{-\frac{t}{\tau}}$ où A est une constante.

Une solution particulière de l'équation avec second membre est, par exemple, $\left(\dfrac{\theta_{eau}}{\tau} + \dfrac{P_{th}}{m \times c}\right) \times \tau = \theta_{eau} + \dfrac{P_{th}}{h \times S}$

car $\dfrac{\tau}{m \times c} = \dfrac{m \times c}{h \times S} \times \dfrac{1}{m \times c} = \dfrac{1}{h \times S}$

La solution de l'équation différentielle est la somme de ces deux fonctions d'où

$\theta(t) = A \times e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_{eau} + \dfrac{P_{th}}{h \times S}$ où A reste à déterminer.

Pour $t = 0$, le plongeur ne s'est pas encore refroidi donc $\theta(t = 0) = \theta_0$ d'où

$\theta(t = 0) = \theta_0 = A \times e^{-\frac{0}{\tau}} + \theta_{eau} + \dfrac{P_{th}}{h \times S}$ soit $\theta_0 = A + \theta_{eau} + \dfrac{P_{th}}{h \times S}$

On obtient alors l'expression de $A = \theta_0 - \theta_{eau} - \dfrac{P_{th}}{h \times S}$ d'où

$$\theta(t) = \left(\theta_0 - \theta_{eau} - \frac{P_{th}}{h \times S}\right) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_{eau} + \frac{P_{th}}{h \times S}$$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P379 n°41 (Suite)

d. On recherche ici l'instant t_{max} à partir duquel $\theta(t)$ (fonction décroissante du temps) atteint $\theta_{min} = 36\ ^{\circ}\mathrm{C}$ puisque le plongeur doit remonter à la surface lorsque sa température interne a chuté de $1\ ^{\circ}\mathrm{C}$.

$$\theta_{min} = \left(\theta_0 - \theta_{eau} - \frac{P_{th}}{h \times S}\right) \times e^{-\frac{t_{max}}{\tau}} + \theta_{eau} + \frac{P_{th}}{h \times S}$$

$$\theta_{min} - \theta_{eau} - \frac{P_{th}}{h \times S} = \left(\theta_0 - \theta_{eau} - \frac{P_{th}}{h \times S}\right) \times e^{-\frac{t_{max}}{\tau}}$$

$$\frac{\theta_{min} - \theta_{eau} - \dfrac{P_{th}}{h \times S}}{\theta_0 - \theta_{eau} - \dfrac{P_{th}}{h \times S}} = e^{-\frac{t_{max}}{\tau}}$$

On applique à cette relation la fonction logarithme népérien $\ln(x)$ qui est la fonction réciproque de la fonction exponentielle :

$$\ln\left[\frac{\theta_{min} - \theta_{eau} - \dfrac{P_{th}}{h \times S}}{\theta_0 - \theta_{eau} - \dfrac{P_{th}}{h \times S}}\right] = -\frac{t_{max}}{\tau} \text{ d'où}$$

$$t_{max} = -\tau \times \ln\left[\frac{\theta_{min} - \theta_{eau} - \dfrac{P_{th}}{h \times S}}{\theta_0 - \theta_{eau} - \dfrac{P_{th}}{h \times S}}\right]$$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P379 n°41 (fin)

d. Sans combinaison : $t_{max} = -\dfrac{80 \times 3,5 \cdot 10^3}{100 \times 1} \times \ln \left[\dfrac{36 - 4 - \dfrac{200}{100 \times 1}}{37 - 4 - \dfrac{200}{100 \times 1}} \right]$

Sans combinaison : $t_{max} = 92$ s $\simeq 1$ min 30 s

Avec combinaison : $t'_{max} = -\dfrac{80 \times 3,5 \cdot 10^3}{8 \times 1} \times \ln \left[\dfrac{36 - 4 - \dfrac{200}{8 \times 1}}{37 - 4 - \dfrac{200}{8 \times 1}} \right]$

Avec combinaison : $t'_{max} = 4,7 \cdot 10^3$ s $\simeq 1$ h 18 min

Cet écart très important entre les deux durées de plongée montre l'efficacité et la nécessité de la combinaison de plongée, surtout lorsque la température de l'eau est très faible.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P381 n°43

1.a. La puissance électrique P_e fournie par la centrale résulte de la puissance P_r fournie par le réacteur. Des pertes sont responsables du rendement de 33%. On a donc $P_e = 0,33 \times P_r$ d'où la puissance fournie par le réacteur :
$P_r = \dfrac{P_e}{0,33} = 2700 \text{ MW}$. L'énergie fournie chaque seconde par le réacteur est donc de $2700 \text{ MJ} = 2,7 \text{ GJ}$.

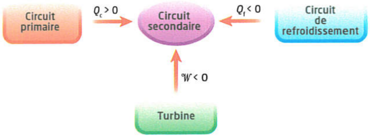
La mode de transfert thermique par lequel cette énergie est échangée avec l'eau du circuit primaire est le rayonnement.

1.b. D'après les données, la capacité thermique massique de l'eau liquide est supérieur à celle de l'eau gazeuse : c'est donc un meilleur fluide caloporteur que l'eau gazeuse. De plus, travailler à haute pression permet de maintenir l'eau à l'état liquide, même pour des températures élevées et, de surcroît, cela augmente encore sa capacité thermique massique par rapport aux faibles pressions.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P381 n°43 (suite)

2.a. Transferts d'énergie à l'eau du circuit secondaire :



2.b. Au cours d'un cycle, la variation d'énergie interne de l'eau du circuit secondaire est nulle puisqu'au cours d'un cycle, le système revient à son état initial.

2.c. D'après le premier principe de la thermodynamique et d'après ce qui précède, on a la relation : $\Delta U = Q_c + Q_f + W = 0$

Or, d'après **1.a.** et l'hypothèse formulée dans l'énoncé, $Q_c = 2700$ MJ pour une durée de 1 s.

En outre, le travail cédé à la turbine en 1 s correspond à la puissance électrique fournie par la centrale d'où $W = -900$ MJ

On en déduit que, pour une durée de 1 s :
$Q_f = -Q_c - W = -2700 - (-900) = -1800 \text{ MJ} = -1,8 \text{ GJ}$

Le flux thermique vers le circuit de refroidissement est donc $\Phi_f = -1,8$ GW

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P381 n°43 (fin)

3. En une seconde, l'énergie **reçue** par les 60 m^3 d'eau est de $-Q_f = 1,8 \text{ GJ}$. Pour cette durée, la variation d'énergie interne de l'eau (système incompressible) est donnée par $\Delta U = -Q_f = m_{eau} \times c_{eau} \times (\theta_s - \theta_e)$.

   On en déduit que $\dfrac{-Q_f}{m_{eau} \times c_{eau}} = \theta_s - \theta_e$ et donc que $\theta_s = \dfrac{-Q_f}{m_{eau} \times c_{eau}} + \theta_e$

   En remarquant qu'à la sortie du circuit de refroidissement, l'eau est à la pression atmosphérique (elle est rejetée dans le fleuve), on peut calculer la température de l'eau à la sortie de la canalisation :

   $$\theta_s = \frac{1,8 \cdot 10^9}{(60 \times 1,00 \cdot 10^3) \times 4180} + 19 = 26 \text{ °C}$$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P382 n°44

Question préliminaire : Le flux thermique entre le corps du campeur et l'extérieur doit rester inférieur à 100 W pour que le campeur n'ait pas froid. Le document 2 précise que les deux tiers (67%) des échanges de l'énergie produite par le corps ont lieu entre le campeur et le sol. Le flux thermique maximal entre le corps et le sol ne doit donc pas dépasser 67 W (soit environ 70 W car les 100 W fournis par la thermogenèse constituent un ordre de grandeur approximatif).

Problème : On suppose que la température du corps du campeur est $\theta_C = 37\ ^\circ\mathrm{C}$ et que la température du sol est $\theta_S = -5\ ^\circ\mathrm{C}$. Nous savons par définition que le flux thermique entre deux système séparé par une paroi de résistance thermique r_{th} est tel que $T_S - T_C = \theta_S - \theta_C = r_{th} \times \Phi$, soit $\Phi = \dfrac{\theta_S - \theta_C}{r_{th}}$ où le flux Φ est ici le flux thermique **perdu** par le campeur.

Le problème se résume donc à trouver la valeur de la résistance thermique entre le campeur et le sol.

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P382 n°44 (suite)

Problème (suite) : L'isolation thermique entre le campeur et le sol est constituée de 3 couches que l'on considèrera comme planes en première approximation :

- Résistance thermique surfacique des vêtements :
  $R_{th,vet} = 0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
- Résistance thermique surfacique du sac de couchage réduite de 85% par l'écrasement :
  $R_{th,sac} = 0,15 \times 0,60 = 0,090 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
- Résistance thermique surfacique du matelas :
  $R_{th,mat} = 2 \text{ unités US} = \dfrac{2}{6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} = 0,33 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

La résistance thermique r_{th} s'exprime en fonction de la résistance thermique surfacique R_{th} par la relation $r_{th} = \dfrac{R_{th}}{S}$ où S est la surface du matériau.

Comme la surface de contact entre le campeur et le sol est de 1 m^2, on a :

$r_{th,vet} = 0,05 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$

$r_{th,sac} = 0,090 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$

$r_{th,mat} = 0,33 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$

CORRECTION DES EXERCICES

Exercice P382 n°44 (fin)

Problème (fin) : Les parois sont supposées planes et accolées. Dans ce cas, la résistance thermique de l'ensemble est égale à la somme des résistances thermiques des différentes parois accolées d'où la valeur de la résistance thermique totale des différentes couches isolant le campeur du sol :

$$r_{th,tot} = r_{th,vet} + r_{th,sac} = r_{th,mat} = 0,05 + 0,090 + 0,33 = 0,47 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

On peut à présent calculer la valeur du flux thermique perdu par le campeur :

$$\Phi = \frac{\theta_S - \theta_C}{r_{th}} = \frac{-5 - 37}{0,47} = -90 \text{ W}$$

Conclusion : D'après cette étude simplifiée, le flux thermique entre le campeur et le sol est supérieur à la limite des 70 W qui devrait permettre au campeur de ne pas avoir froid. La valeur trouvée pour le flux a peut-être été surestimée compte-tenu des approximations ont été faites et du fait d'avoir surestimé la température du campeur mais pas au point d'engendrer une erreur de l'ordre de 30%.

On peut donc fortement conseiller au campeur de choisir un matelas avec une R-Value plus élevée afin de ne pas avoir froid au cours de son trek en Laponie.

Cela est d'ailleurs confirmé par le document 3 qui indique d'une R-Value de 2 correspond à des matelas "été" ou "toutes saisons" qui ne sont sans doute pas les plus appropriés au camping de plein air dans le Grand Nord.