Thermodynamique et mécanique des fluides – Chapitre 2

Rappels de thermodynamique – TD

Exercice 1 : Gonflage de pneumatiques

On réalise le gonflage d'un pneumatique dans un garage automobile à l'aide d'une station mobile contenant un réservoir de volume $V_\mathrm{r} = 25\,\mathrm{L}$ rempli d'air à la pression $P_\mathrm{r} = 6{,}5\,\mathrm{bar}$. L'air dans le pneumatique est initialement à la pression $P_\mathrm{p} = 1{,}5\,\mathrm{bar}$, et le constructeur recommande une pression $P'_\mathrm{p} = 2{,}2\,\mathrm{bar}$ pour rouler en toute sécurité. On suppose que le gonflage est réalisé dans des conditions isothermes à la température $T = 20°\mathrm{C}$ en reliant simplement le réservoir au pneumatique par l'intermédiaire d'une valve, et que le volume $V_\mathrm{p} = 35\,\mathrm{L}$ de l'enveloppe du pneumatique est constant au cours du gonflage.

1. Calculer la quantité d'air introduite dans le pneu au cours du gonflage.

2. Calculer la pression dans le réservoir de la station mobile à la fin du gonflage.

3. Combien de pneumatiques peut-on gonfler dans les mêmes conditions avant de devoir remplir le réservoir de la station mobile ?

Correction :

1. À l'aide de la loi des gaz parfaits, on peut exprimer :

- la quantité d'air contenue dans l'enveloppe du pneumatique avant le gonflage : $n_\mathrm{p} = \dfrac{P_\mathrm{p}\,V_\mathrm{p}}{R\,T}$;
- la quantité d'air contenue dans l'enveloppe du pneumatique après le gonflage : $n'_\mathrm{p} = \dfrac{P'_\mathrm{p}\,V_\mathrm{p}}{R\,T}$;

d'où on en déduit la quantité d'air introduite au cours du gonflage : $n_\mathrm{int} = n'_\mathrm{p} - n_\mathrm{p} = \dfrac{\left(P'_\mathrm{p} - P_\mathrm{p}\right) V_\mathrm{p}}{R\,T} = 1{,}0\,\mathrm{mol}.$

2. La quantité d'air contenue dans le réservoir à la fin du gonflage est : $n'_\mathrm{r} = n_\mathrm{r} - n_\mathrm{int}$, avec $n'_\mathrm{r} = \dfrac{P'_\mathrm{r}\,V_\mathrm{r}}{R\,T}$ et $n_\mathrm{r} = \dfrac{P_\mathrm{r}\,V_\mathrm{r}}{R\,T}$, soit : $\dfrac{P'_\mathrm{r}\,V_\mathrm{r}}{R\,T} = \dfrac{P_\mathrm{r}\,V_\mathrm{r}}{R\,T} - n_\mathrm{int}$, d'où on en déduit la pression dans le réservoir : $P'_\mathrm{r} = P_\mathrm{r} - \dfrac{n_\mathrm{int}\,R\,T}{V_\mathrm{r}} = 5{,}5\,\mathrm{bar}.$

3. La station mobile est utilisable jusqu'à ce que la pression dans son réservoir soit égale à P'_p. Le nombre N_max de pneumatiques que l'on peut gonfler en introduisant une quantité d'air n_int vérifie donc : $P'_\mathrm{p} = P_\mathrm{r} - \dfrac{N_\mathrm{max}\,n_\mathrm{int}\,R\,T}{V_\mathrm{r}}$, d'où : $N_\mathrm{max} = \dfrac{\left(P_\mathrm{r} - P'_\mathrm{p}\right) V_\mathrm{r}}{n_\mathrm{int}\,R\,T} = 4{,}4$, c'est-à-dire 4 pneumatiques.

Exercice 2 : Transformations successives d'un gaz parfait

Une quantité n de gaz parfait occupe un volume V_1 à la température T_1 et à la pression P_1. Le gaz subit deux transformations successives :

- une transformation adiabatique réversible qui amène le gaz à la température T_2 et à la pression $P_2 = P_1\,(1 + x)$, il occupe alors un volume V_2 ;
- une transformation isobare qui amène le gaz à la température $T_3 = T_1$, il occupe alors un volume V_3.

On note γ le coefficient adiabatique du gaz.

1. Exprimer V_2 en fonction de V_1, x et γ.

2. Exprimer V_3 en fonction de V_1 et x.

3. Exprimer T_2 en fonction de T_1, x et γ.

4. Déterminer la variation d'énergie interne ΔU et la variation d'enthalpie ΔH entre l'état initial et l'état final.

5. Exprimer le travail des forces de pression et le transfert thermique pour chacune de ces deux transformations en fonction de n, R, T_1, x et γ.

Correction :

1. Comme la première transformation est adiabatique réversible, la loi de Laplace donne : $P_1\,V_1^\gamma = P_2\,V_2^\gamma$, soit : $P_1\,V_1^\gamma = P_1\,(1+x)\,V_2^\gamma$, d'où : $V_2 = V_1\,(1+x)^{-1/\gamma}$.

2. L'équation des gaz parfaits permet d'écrire : $n\,R = \dfrac{P_1\,V_1}{T_1} = \dfrac{P_3\,V_3}{T_3}$, avec $T_3 = T_1$ et $P_3 = P_2 = P_1\,(1+x)$ comme la seconde transformation est isobare, d'où : $V_3 = \dfrac{V_1}{1+x}$.

3. L'équation des gaz parfaits permet d'écrire : $n\,R = \dfrac{P_1\,V_1}{T_1} = \dfrac{P_2\,V_2}{T_2}$, avec $P_2 = P_1\,(1+x)$ et $V_2 = V_1\,(1+x)^{-1/\gamma}$, d'où : $T_2 = T_1\,(1+x)^{1-1/\gamma}$.

4. La variation d'énergie interne est : $\Delta U = C_\mathrm{V}\,(T_3 - T_1)$, or $T_3 = T_1$, d'où : $\Delta U = 0$.
De même, la variation d'enthalpie est : $\Delta H = C_\mathrm{P}\,(T_3 - T_1) = 0$.

5. La première transformation est adiabatique, d'où : $Q_{1\to2} = 0$. À l'aide du premier principe, on peut exprimer le travail : $W_{1\to2} = \Delta U_{1\to2} = C_\mathrm{V}\,(T_2 - T_1) = \dfrac{n\,R\,T_1}{\gamma-1}\left[(1+x)^{1-1/\gamma} - 1\right]$.

La seconde transformation est isobare à la pression : $P_\mathrm{ext} = P_2 = P_1\,(1+x) = \dfrac{n\,R\,T_1\,(1+x)}{V_1}$, d'où le travail : $W_{2\to3} = -\displaystyle\int_2^3 P_\mathrm{ext}\,\mathrm{d}V = -\frac{n\,R\,T_1\,(1+x)}{V_1}\,(V_3 - V_2) = -n\,R\,T_1\left[1 - (1+x)^{1-1/\gamma}\right]$. Le transfert thermique peut s'exprimer : $Q_{2\to3} = \Delta H_{2\to3} = C_\mathrm{P}\,(T_3 - T_2) = \dfrac{\gamma\,n\,R}{\gamma-1}\left[T_1 - T_1\,(1+x)^{1-1/\gamma}\right]$, soit : $Q_{2\to3} = \dfrac{\gamma\,n\,R\,T_1}{\gamma-1}\left[1 - (1+x)^{1-1/\gamma}\right]$.

Exercice 3 : Équilibre entre deux compartiments d'une enceinte

Une enceinte indéformable aux parois calorifugées est composée de deux compartiments, séparés par une cloison étanche, diatherme (qui permet les transferts thermiques) et pouvant glisser sans frottement. Dans l'état initial, la cloison est maintenue au milieu de l'enceinte. Les deux compartiments contiennent le même gaz parfait, celui du compartiment 1 est dans l'état $\{T_1 = T_0, P_1 = P_0, V_1 = V_0\}$, et celui du compartiment 2 dans l'état $\{T_2 = T_0, P_2 = 2\,P_0, V_2 = V_0\}$.

On laisse ensuite la cloison libre de se déplacer jusqu'à ce que le système atteigne un état d'équilibre.

1. Déterminer les températures T_1' et T_2' des deux gaz dans l'état final en fonction de T_0.

2. Déterminer les volumes V_1' et V_2' des deux gaz dans l'état final en fonction de V_0.

On rappelle l'expression de l'entropie d'un gaz parfait par rapport à un état de référence ($T_\text{réf}$, $P_\text{réf}$, $V_\text{réf}$) :

$$S = S_\text{réf} + C_\mathrm{V}\ln\left(\frac{T}{T_\text{réf}}\right) + n\,R\ln\left(\frac{V}{V_\text{réf}}\right).$$

3. Déterminer l'entropie créée.

Correction :

1. Dans l'état final, l'équilibre thermique à travers la paroi diatherme impose : $T_1' = T_2'$.
En appliquant le premier principe à l'enceinte indéformable et calorifugée, on obtient par additivité de l'énergie interne : $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = W + Q = 0$.
Comme le gaz est parfait, on a : $\Delta U_1 = C_{\mathrm{V}1}\,(T_1' - T_1) = C_{\mathrm{V}1}\,(T_1' - T_0)$ et $\Delta U_2 = C_{\mathrm{V}2}\,(T_2' - T_2) = C_{\mathrm{V}2}\,(T_1' - T_0)$, d'où : $(C_{\mathrm{V}1} + C_{\mathrm{V}2})\,(T_1' - T_0) = 0$, et on en déduit : $T_1' = T_2' = T_0$.

2. Dans l'état final, l'équilibre mécanique à travers la paroi pouvant glisser impose : $P_1' = P_2'$.
L'équation des gaz parfaits donne pour le compartiment 1 : $n_1\,R\,T_0 = P_1\,V_1 = P_1'\,V_1'$, soit : $P_0\,V_0 = P_1'\,V_1'$, et pour le compartiment 2 : $n_2\,R\,T_0 = P_2\,V_2 = P_2'\,V_2'$, soit : $2\,P_0\,V_0 = P_1'\,V_2'$. Le rapport de ces deux

équations donne : $\dfrac{V_1'}{V_2'} = \dfrac{1}{2}$.

Comme l'enceinte est indéformable, on a également par conservation du volume total : $V_1' + V_2' = V_1 + V_2 = 2\,V_0$.

À partir de ces deux équations, on obtient finalement : $V_1' = \dfrac{2}{3}\,V_0$ et $V_2' = \dfrac{4}{3}\,V_0$.

3. La variation d'entropie du système total pour cette transformation à température constante est : $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = n_1\,R\ln\left(\dfrac{V_1'}{V_1}\right) + n_2\,R\ln\left(\dfrac{V_2'}{V_2}\right) = n_1\,R\ln\left(\dfrac{2}{3}\right) + n_2\,R\ln\left(\dfrac{4}{3}\right)$, avec $n_1 = \dfrac{P_1\,V_1}{R\,T_1} = \dfrac{P_0\,V_0}{R\,T_0}$ et $n_2 = \dfrac{P_2\,V_2}{R\,T_2} = \dfrac{2\,P_0\,V_0}{R\,T_0}$, d'où : $\Delta S = \dfrac{P_0\,V_0}{T_0}\left[\ln\left(\dfrac{2}{3}\right) + 2\ln\left(\dfrac{4}{3}\right)\right] = \dfrac{P_0\,V_0}{T_0}\ln\left(\dfrac{32}{27}\right)$.

Comme la transformation est adiabatique, le système n'échange pas d'entropie avec l'extérieur ($S_{\text{éch}} = 0$), d'où : $S_{\text{créée}} = \Delta S = \dfrac{P_0\,V_0}{T_0}\ln\left(\dfrac{32}{27}\right)$.

Exercice 4 : Cycle de Lenoir

Le cycle de Lenoir est un modèle de cycle moteur idéal, introduit par Lenoir en 1860 pour décrire le fonctionnement du moteur à gaz qu'il avait mis au point l'année précédente. On modélise l'air présent dans la chambre de combustion par un gaz parfait. La quantité n_0 de gaz est à la température $T_1 = 100°\text{C}$, à la pression $P_1 = 2{,}0.10^5$ Pa, et occupe un volume $V_1 = 10\,\text{L}$. À partir de cet état (1), le système fermé va subir trois étapes au cours d'un cycle :

- étape $1 \to 2$: explosion isochore jusqu'à la pression P_2 ;
- étape $2 \to 3$: détente isotherme jusqu'à un volume $V_3 = 2\,V_1$;
- étape $3 \to 1$: transformation isobare jusqu'à revenir au volume V_1.

Les gaz brûlés sont ensuite évacués hors de la chambre de combustion, et un nouveau cycle démarre. On considère que toutes ces transformations sont quasi-statiques.

1. Déterminer l'équation d'une isotherme quasi-statique d'un gaz parfait dans le diagramme (P,V).

2. Représenter le diagramme (P,V) du cycle.

3. Déterminer la température $T_2 = T_3$ à laquelle a lieu la détente, ainsi que la pression P_2.

4. Calculer le travail total fourni par le moteur au cours du cycle.

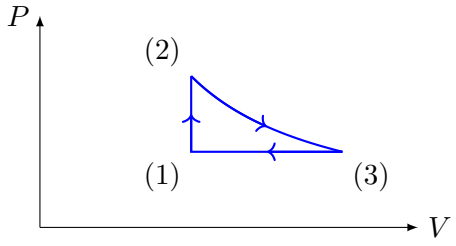
5. En déduire le transfert thermique reçu par le système au cours du cycle.

Correction :

1. L'équation des gaz parfaits s'écrit : $P\,V = n\,R\,T$, d'où : $P = \dfrac{n\,R\,T}{V}$.

Une isotherme d'un gaz parfait est donc une hyperbole dans le diagramme (P,V).

2. On représente le diagramme (P,V) du cycle :



3. L'équation des gaz parfaits dans les états (1) et (3) donne : $n_0\,R = \dfrac{P_1\,V_1}{T_1} = \dfrac{P_3\,V_3}{T_3}$. Comme $V_3 = 2\,V_1$ et $P_3 = P_1$, on obtient : $T_3 = 2\,T_1 = 746\,\text{K}$.

On en déduit la pression dans l'état (2) : $P_2 = \dfrac{n_0\,R\,T_2}{V_2} = \dfrac{\left(\frac{P_1\,V_1}{T_1}\right)T_3}{V_1} = 2\,P_1 = 4{,}0.10^5$ Pa.

4. Comme les transformations sont quasi-statiques, la pression extérieure est $P_{\text{ext}} = P$ à tout instant.

Le travail fourni par le moteur est l'opposé du travail reçu par le gaz, d'où :

$W_{\text{fourni}} = -W_{\text{cycle}} = \displaystyle\int_{1\to2} P\,\mathrm{d}V + \int_{2\to3} P\,\mathrm{d}V + \int_{3\to1} P\,\mathrm{d}V = 0 + \int_{V_2}^{V_3} \frac{n_0\,R\,T_2}{V}\,\mathrm{d}V + \int_{V_3}^{V_1} P_1\,\mathrm{d}V$, soit :
$W_{\text{fourni}} = n_0\,R\,T_2 \ln\left(\dfrac{V_3}{V_2}\right) + P_1\,(V_1 - V_3) = P_2\,V_2 \ln 2 + P_1\,(-V_1) = 2\,P_1\,V_1 \ln 2 - P_1\,V_1 = (2\ln 2 - 1)\,P_1\,V_1$,
et on obtient : $W_{\text{fourni}} = 7{,}7.10^2$ J.

5. L'énergie interne est une fonction d'état, sa variation est donc nulle sur un cycle : $\Delta U = 0$.
D'après le premier principe, on en déduit le transfert thermique reçu : $Q = -W_{\text{cycle}} = W_{\text{fourni}} = 7{,}7.10^2$ J.

Exercice 5 : Moteur à explosion basé sur le cycle de Beau de Rochas

On considère un moteur à explosion contenant n moles de gaz parfait qui subissent le cycle de Beau de Rochas :

- compression adiabatique de l'état (P_1,V_1,T_1) à l'état (P_2,V_2,T_2) ;
- échauffement isochore de l'état (P_2,V_2,T_2) à l'état (P_3,V_3,T_3) ;
- détente adiabatique de l'état (P_3,V_3,T_3) à l'état (P_4,V_4,T_4) ;
- refroidissement isochore de l'état (P_4,V_4,T_4) à l'état initial (P_1,V_1,T_1).

Les transformations sont supposées quasi-statiques.

1. Représenter le cycle dans un diagramme (P,V).

2. Exprimer le rendement théorique r de ce moteur en fonction des températures T_1, T_2, T_3 et T_4.

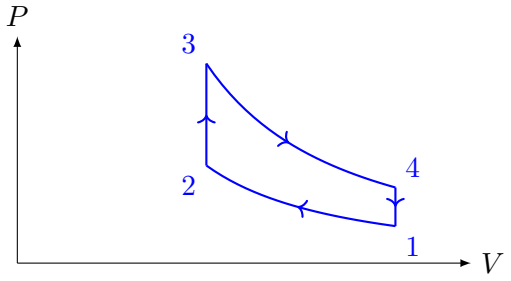
3. En déduire l'expression de r en fonction du rapport volumétrique $x = \dfrac{V_1}{V_2}$ et du coefficient adiabatique γ du gaz.

Le piston du cylindre où évolue l'air de coefficient adiabatique $\gamma = 1{,}4$ présente une course $\ell = 10\,\text{cm}$ et une section $S = 50\,\text{cm}^2$. Il emprisonne un volume d'air $V = 100\,\text{cm}^3$ en fin de compression.

4. Calculer le rendement théorique de ce moteur.

Correction :

1. On représente l'allure du cycle dans un diagramme (P,V) :



2. Le rendement théorique de ce moteur s'exprime : $\eta = -\dfrac{W}{Q_{23}}$, puisque la transformation $2 \to 3$ correspond à l'échauffement au contact de la source chaude. Comme l'application du premier principe sur le cycle donne : $\Delta U = W + Q_{12} + Q_{23} + Q_{34} + Q_{41} = 0$, on obtient : $\eta = \dfrac{Q_{12} + Q_{23} + Q_{34} + Q_{41}}{Q_{23}}$.

On exprime les différents transferts thermiques :

- pour la transformation $1 \to 2$ qui est adiabatique : $Q_{12} = 0$;
- pour la transformation $2 \to 3$ qui est isochore, l'application du premier principe de la thermodynamique donne : $Q_{23} = \Delta U_{23} = C_{\text{V}}\,(T_3 - T_2)$;
- pour la transformation $3 \to 4$ qui est adiabatique : $Q_{34} = 0$;
- pour la transformation $4 \to 1$ qui est isochore, l'application du premier principe de la thermodynamique donne : $Q_{41} = \Delta U_{41} = C_{\text{V}}\,(T_1 - T_4)$;

d'où finalement : $\eta = \dfrac{C_{\text{V}}\,(T_3 - T_2) + C_{\text{V}}\,(T_1 - T_4)}{C_{\text{V}}\,(T_3 - T_2)} = 1 + \dfrac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$.

3. Comme la transformation $1 \to 2$ est adiabatique et réversible (car supposée quasi-statique), l'application de la loi de Laplace permet d'obtenir : $T_1\,V_1^{\gamma-1} = T_2\,V_2^{\gamma-1}$, d'où : $T_2 = T_1 \left(\dfrac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = T_1\,x^{\gamma-1}$.

Comme la transformation $3 \to 4$ est adiabatique et réversible (car supposée quasi-statique), l'application de la loi de Laplace permet d'obtenir : $T_3\,V_3^{\gamma-1} = T_4\,V_4^{\gamma-1}$, avec $V_3 = V_2$ et $V_4 = V_1$ comme les transformations $2 \to 3$ et $4 \to 1$ sont isochores, d'où : $T_3 = T_4 \left(\dfrac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = T_4\,x^{\gamma-1}$.

On obtient finalement : $r = 1 + \dfrac{T_1 - T_4}{T_4\,x^{\gamma-1} - T_1\,x^{\gamma-1}} = 1 - x^{1-\gamma}$.

4. Le volume en fin de compression est : $V_2 = V$, et le volume au début de la compression est : $V_1 = V + \ell\,S$.

On obtient un rendement : $r = 1 - \left(\dfrac{V + \ell\,S}{V}\right)^{1-\gamma} = 51\%$.

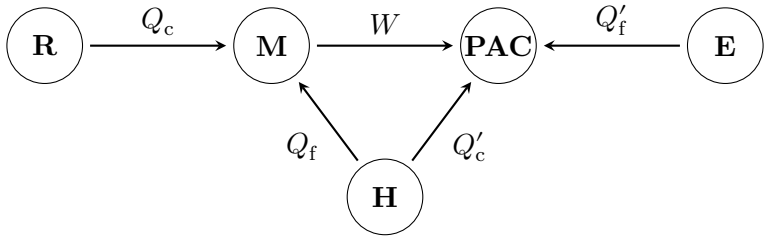
Exercice 6 : Procédés de chauffage au bois

On souhaite maintenir la température d'une habitation à la température $T_\mathrm{H} = 20°\mathrm{C}$, alors que la température de l'extérieur est $T_\mathrm{E} = 0°\mathrm{C}$. Pour cela, on doit lui fournir une puissance thermique $\Phi = 12\,\mathrm{kW}$ afin de compenser les pertes thermiques. On propose dans cet exercice de comparer deux procédés de chauffage au bois.

Dans un premier temps, on chauffe directement la maison en utilisant du bois comme combustible, sachant que le pouvoir calorifique du bois est $q_\mathrm{B} = 18\,\mathrm{MJ \cdot kg^{-1}}$.

1. Déterminer la masse m_B de bois consommée par heure pour maintenir la température de l'habitation.

On considère maintenant que le bois est utilisé pour maintenir la température $T_\mathrm{R} = 300°\mathrm{C}$ d'un réservoir **R** qui sert de source chaude à un moteur **M** dont la source froide est constituée par l'habitation **H**. Le travail fourni par le moteur est intégralement transformé en énergie électrique, qui sert à alimenter une pompe à chaleur **PAC** fonctionnant entre **H** qui sert de source chaude et l'extérieur **E** qui sert de source froide. Un schéma du dispositif est présenté ci-dessous. On note Q_c le transfert thermique fourni par le bois, qui est intégralement transmis au moteur par l'intermédiaire du réservoir.



2. Déterminer les signes de Q_c, Q_f, W, Q'_c et Q'_f dont l'orientation est définie sur le schéma.

3. Exprimer le transfert thermique Q_H reçu par l'habitation de la part des deux machines (**M** et **PAC**) en fonction de Q_c, du rendement η du moteur, et de l'efficacité e de la pompe à chaleur.

4. Établir les expressions de η et e en fonction des températures à l'aide des deux principes de la thermodynamique, sachant que les deux machines fonctionnent de façon réversible.

5. En déduire la masse m'_B de bois consommée par heure pour maintenir la température de l'habitation, puis la comparer à m_B.

Correction :

1. L'habitation doit recevoir une énergie thermique $Q = \Phi\,\Delta t$ pendant une durée $\Delta t = 1\,\mathrm{h}$, ce qui nécessite alors une masse de bois : $m_\mathrm{B} = \dfrac{Q}{q_\mathrm{B}} = \dfrac{\Phi\,\Delta t}{q_\mathrm{B}} = 2{,}4\,\mathrm{kg}$.

2. Sachant que **M** est un moteur :

- il reçoit un transfert thermique de la source chaude, d'où : $Q_\mathrm{c} > 0$;
- il fournit un transfert thermique à la source froide, d'où : $Q_\mathrm{f} < 0$;
- il fournit un travail, d'où : $W > 0$ (attention à l'orientation définie sur le schéma).

Sachant que **PAC** est une pompe à chaleur :

- elle fournit un transfert thermique à la source chaude, d'où : $Q'_\mathrm{c} < 0$;
- elle reçoit un transfert thermique de la source froide, d'où : $Q'_\mathrm{f} > 0$.
- elle reçoit un travail, d'où on retrouve : $W > 0$.

3. Le transfert thermique reçu par l'habitation de la part de deux machines est : $Q_H = -Q_f - Q'_c$ d'après l'orientation définie sur le schéma.

Pour exprimer Q'_c, on utilise la définition du rendement du moteur : $\eta = \dfrac{W}{Q_c}$, et celle de l'efficacité de la pompe à chaleur : $e = -\dfrac{Q'_c}{W}$, d'où : $W = \eta\, Q_c = -\dfrac{Q'_c}{e}$, et on obtient : $Q'_c = -e\,\eta\, Q_c$.

Pour exprimer Q_f, on applique le premier principe au moteur : $Q_c + Q_f - W = 0$ (comme $W > 0$), avec $W = \eta\, Q_c$, d'où : $Q_f = (\eta - 1)\, Q_c$.

On obtient finalement : $Q_H = (1 - \eta + e\,\eta)\, Q_c$.

4. L'application du premier principe au moteur donne : $W = Q_c + Q_f$ (comme $W > 0$), d'où : $\eta = \dfrac{W}{Q_c} = 1 + \dfrac{Q_f}{Q_c}$. Comme il fonctionne de façon réversible, l'application du second principe donne : $\dfrac{Q_c}{T_R} + \dfrac{Q_f}{T_H} = 0$, d'où : $\dfrac{Q_f}{Q_c} = -\dfrac{T_H}{T_R}$, et on obtient alors l'expression du rendement de Carnot : $\eta = 1 - \dfrac{T_H}{T_R}$.

L'application du premier principe à la pompe à chaleur donne : $W = -Q'_c - Q'_f$, d'où : $e = -\dfrac{Q'_c}{W} = \dfrac{Q'_c}{Q'_c + Q'_f}$. Comme elle fonctionne de façon réversible, l'application du second principe donne : $\dfrac{Q'_c}{T_H} + \dfrac{Q'_f}{T_E} = 0$, d'où : $Q'_f = -\dfrac{T_E\, Q'_c}{T_H}$, et on obtient alors l'expression de l'efficacité de Carnot : $e = \dfrac{T_H}{T_H - T_E}$.

5. L'habitation doit recevoir une énergie thermique $Q_H = \Phi\, \Delta t$ pendant une durée $\Delta t = 1\,\text{h}$, où on exprime : $Q_H = \left[1 - \left(1 - \dfrac{T_H}{T_R}\right) + \dfrac{T_H}{T_H - T_E}\left(1 - \dfrac{T_H}{T_R}\right)\right] Q_c = \dfrac{T_H\,(T_R - T_E)}{T_R\,(T_H - T_E)}\, Q_c$, soit : $\dfrac{T_H\,(T_R - T_E)}{T_R\,(T_H - T_E)}\, Q_c = \Phi\, \Delta t$, ce qui nécessite alors une masse de bois : $m'_B = \dfrac{Q_c}{q_B} = \dfrac{T_R\,(T_H - T_E)\,\Phi\,\Delta t}{T_H\,(T_R - T_E)\,q_B} = 0{,}31\,\text{kg}$.

Cette masse est bien inférieure à la masse m_B, ce dispositif est donc plus efficace.