

Exercices chapitre 1

Version du 19 avril 2015

CC-BY-SA Olivier Cleynen — <http://thermodynamique.ninja/>

1.1 Vélo en roue libre

Un/e cycliste s'élance dans une descente en roue libre. Avec son équipement et son vélo, sa masse est de 75 kg. Alors qu'il/elle passe un point d'altitude 1 200 m sa vitesse est de 50 km/h. Exactement 7 min plus tard, il/elle passe un point d'altitude 950 m à vitesse de 62 km/h.

1. Quelle quantité d'énergie a-t-il/elle dissipée sous forme de frottements entre ces deux points ?

Plus loin dans la descente, toujours en roue libre, le/la cycliste voit sa vitesse se stabiliser à 45 km h⁻¹ dans une pente à 4 %.

2. Avec quelle puissance dissipe-t-il/elle de l'énergie sous forme de frottements ?

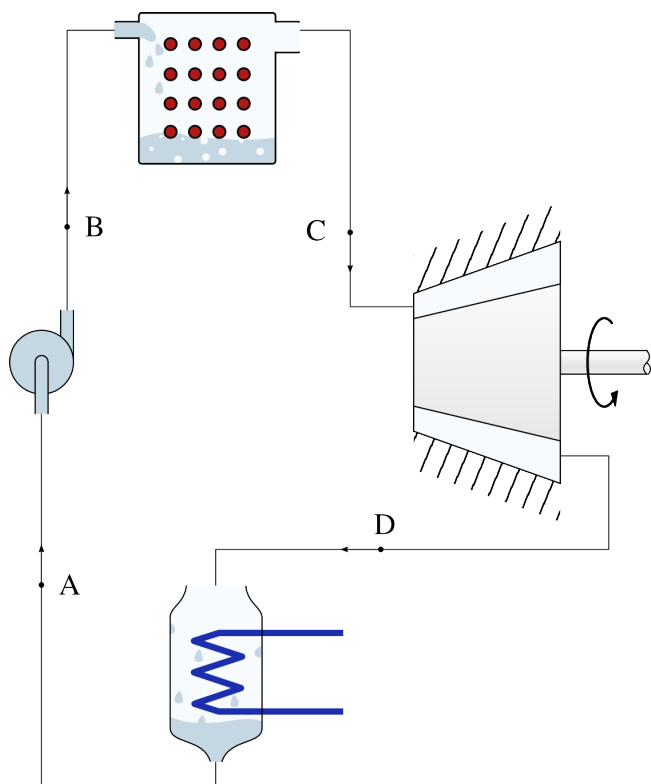


FIGURE 1.8 – Schéma simplifié du circuit suivi par l'eau à l'intérieur d'une centrale à vapeur. L'eau y suit un cycle complet en passant par quatre transformations. Ce circuit, nommé cycle de Rankine, est étudié de façon plus approfondie au chapitre 9 (*cycles moteurs à vapeur*) (section 9.4.2 p.281).

schéma CC-BY-SA Olivier Cleynen

1.2 Refroidissement et puissance de centrale à vapeur

Le circuit suivi par l'eau dans les centrales à vapeur peut être représenté de façon simplifiée de la façon suivante (figure 1.8) :

- De A à B** l'eau liquide est comprimée dans la pompe. Elle y reçoit un travail spécifique $w_{A \rightarrow B} = +50 \text{ kJ kg}^{-1}$, sans transfert de chaleur.
- De B à C** l'eau est chauffée dans la chaudière d'où elle ressort sous forme de vapeur. Elle y reçoit une chaleur spécifique $q_{B \rightarrow C} = +450 \text{ kJ kg}^{-1}$, sans recevoir de travail.
- De C à D** l'eau se détend dans la turbine, où elle dégage un travail spécifique $w_{C \rightarrow D} = -194 \text{ kJ kg}^{-1}$, sans recevoir ou perdre de chaleur.
- De D à A** l'eau est refroidie dans un condenseur, sans transfert de travail, où elle retrouve son état et ses propriétés originaux, avant de retourner à la pompe pour être à nouveau comprimée.

Le débit d'eau circulant dans l'installation est de 15 kg s^{-1} .

1. Quelle est la puissance spécifique rejetée sous forme de chaleur dans le condenseur ?
2. Quelle est la puissance (en watts) rejetée par le condenseur ?
3. Quelle est la puissance (en watts) dégagée par la turbine sous forme de travail ?
4. Quelle est l'efficacité η_{centrale} de la centrale, c'est à dire le rapport entre sa puissance nette et sa consommation brute ?

1.3 Compression de ressorts

Dans le laboratoire d'une entreprise fabriquant des systèmes de suspension automobile, un/e ingénieur/e compare les caractéristiques de trois ressorts de géométrie différente. Pour cela il/elle mesure la force F (en N) exercée par chaque ressort en fonction de sa longueur l (en m), et modélise ces comportements ainsi :

- $F_A(l) = 8 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3 l$
- $F_B(l) = 8 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^3 l^{1,6}$
- $F_C(l) = 0,1 \cdot 10^3 l^{-3}$

Quelle est la quantité de travail qu'il faut fournir à chacun de ces ressorts pour les comprimer depuis une longueur de 40 cm jusqu'à une longueur de 12 cm ?

Nous verrons au chapitre 2 (*les systèmes fermés*) que lorsque les fluides sont comprimés et détendus lentement, ils se comportent de façon similaire au ressort C, de géométrie conique comme ceux représentés en figure 1.9.



FIGURE 1.9 – Ressorts coniques, dont la dureté augmente exponentiellement lorsqu'on les comprime.

Photo CC-BY-SA Jean-Jacques Milan

1.4 Moteur à ressorts

Nous modélisons le fonctionnement d'un moteur à essence en remplaçant l'air dans un cylindre par un ressort. Nous voulons quantifier l'énergie emmagasinée puis perdue par un ressort puissant pendant un aller-retour (comme l'air pendant les phases de compression et de détente d'un cycle moteur).

L'expérience se déroule de façon cyclique avec les quatre étapes suivantes (figure 1.10) :

De 1 à 2 : L'expérimentateur comprime un ressort depuis une longueur de 25 cm vers une longueur de 8 cm. Le ressort exerce une force liée à sa longueur (en mètres) par la relation :

$$F = 25,4 \cdot 10^3 - 40 \cdot 10^3 l \quad (1/14)$$

où F est la force (N) ;

et l est la longueur du ressort (m).

De 2 à 3 : Lorsque la longueur du ressort arrive à 8 cm, l'expérimentateur bloque le déplacement du piston. Un bloc solide est alors inséré entre la paroi du piston et le ressort.

La force sur le piston (qui n'a pas bougé) augmente jusqu'à atteindre 32 kN.

De 3 à 4 : Une fois que le bloc a été inséré, l'expérimentateur effectue le chemin du retour avec le piston, jusqu'à ce que la longueur finale atteigne à nouveau 25 cm.

De 4 à 1 : On retire le bloc sans déplacer le piston, et la force sur le piston revient à la valeur qu'elle avait au début de l'expérience.

Nous souhaitons quantifier l'énergie emmagasinée puis perdue par l'ensemble {ressort+bloc} pendant un aller-retour.

1. Représentez l'évolution sur un diagramme montrant la force en fonction de la longueur à l'intérieur, de façon qualitative (c'est-à-dire sans représenter les valeurs numériques).
2. Combien d'énergie le ressort a-t-il reçu de l'expérimentateur pendant le chemin aller (de 1 à 2) ?
3. Quelle est la caractéristique $F(l)$ de l'ensemble {ressort+bloc} pendant le chemin de retour (de 3 à 4) ?
4. Combien d'énergie le ressort a-t-il reçu du piston pendant le chemin retour (de 3 à 4) ?

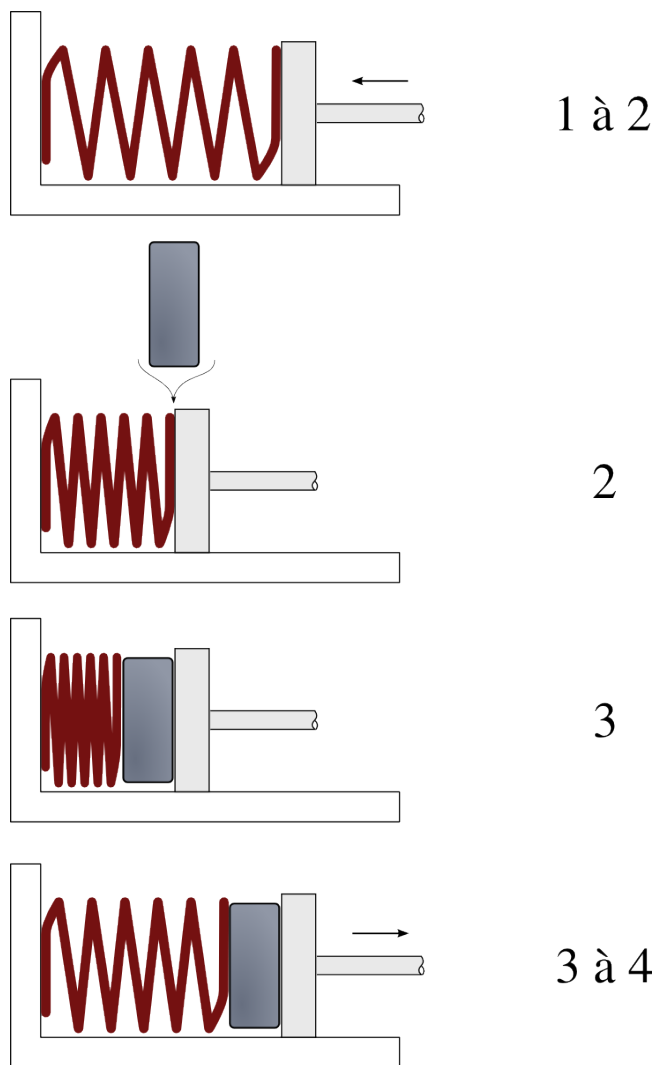


FIGURE 1.10 – Expérience réalisée avec un ressort puissant. Le piston écrase le ressort de 1 à 2, puis le ressort repousse le piston de 3 à 4. Au retour, la force exercée par le ressort est plus grande.

schéma CC-BY-SA Olivier Cleynen

5. Au final, combien d'énergie l'expérimentateur a-t-il reçu ou dépensé pendant l'expérience ?
6. Avec quelle fréquence doit-t-il répéter l'expérience pour que la puissance atteigne 25 ch, c'est-à-dire 18,4 kW ?

1.5 Préparation d'un bain

Un/e étudiant/e épuisé/e par le calcul intégral de compression de ressorts souhaite prendre un bain.

L'eau courante arrive à température de 10 °C dans le chauffe-eau électrique ; elle a une capacité calorifique constante de $c_{\text{eau liquide}} = 4,2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et une masse volumique constante $\rho_{\text{eau liquide}} = 10^3 \text{ kg m}^{-3}$.

1. Combien faut-il d'énergie pour chauffer l'eau à 40 °C afin de remplir une baignoire de 270 L ?
2. Combien de temps le réchauffage prendra-t-il si la puissance de chauffage est de $\dot{Q} = +2 \text{ kW}$?

1.6 Cric hydraulique

On souhaite lever un véhicule ayant pour masse $1\,200\text{ kg}$ avec le cric hydraulique schématisé en figure 1.11. Le piston gauche a pour surface 5 cm^2 .

L'huile au sein du cric est présumée incompressible, c'est-à-dire que son volume est considéré comme constant quelle que soit la pression.

Le but de l'installation est de permettre à une personne de gabarit ordinaire de soulever et maintenir en place le véhicule avec le piston gauche (dont l'extrémité est munie de poignées).

1. Dimensionnez le piston droit (sous le véhicule) afin que la force dans le piston gauche n'excède pas 100 N .
2. Quelle est la puissance nécessaire pour maintenir le véhicule en place ?

On souhaite soulever le véhicule de 25 cm , en moins de 30 secondes.

3. Selon quelle distance faudrait-il enfoncer le piston gauche pour cela ?
4. Quels seraient alors le travail et la puissance à fournir ?

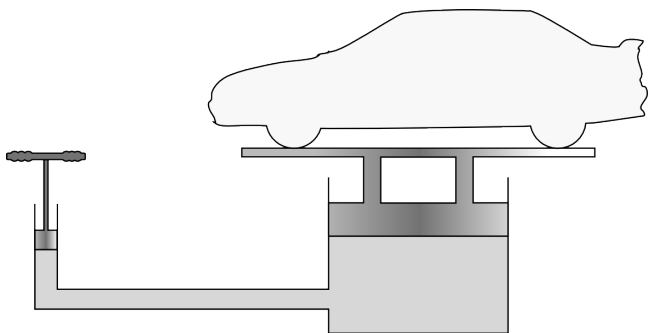


FIGURE 1.11 – Schéma de principe d'un cric hydraulique.

schéma CC-0 o.c.

1.7 Turbine à eau

Un débit constant de $1\,200\text{ kg s}^{-1}$ traverse une petite installation hydraulique représentée en figure 1.12.

- Au point 1, l'eau arrive à vitesse de 3 m s^{-1} avec une température $T_1 = 5^\circ\text{C}$ et une altitude $z_1 = 75\text{ m}$.
- Au point 2, elle ressort à vitesse de $2,5\text{ m s}^{-1}$ à température $T_2 = 5,04^\circ\text{C}$ et altitude $z_2 = 4\text{ m}$.

La pression de l'eau est identique en 1 et 2, et le profil de vitesse de l'eau en chaque point est approximativement uniforme. L'eau a une capacité calorifique massique de $c_{\text{eau liquide}} = 4,2\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$.

1. Quelle est la puissance spécifique mécanique gagnée ou perdue par l'eau en traversant l'installation ?
2. Avec quelle puissance spécifique est-elle réchauffée par le frottement ?
3. Quelle est la puissance (en watts) dégagée sous forme de travail par la turbine ?

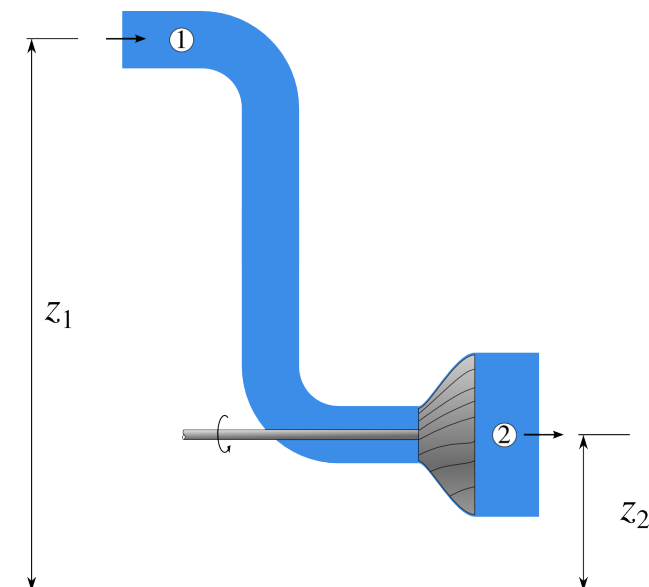


FIGURE 1.12 – Schéma de principe d'une turbine à eau. L'eau pénètre en haut à gauche, fait tourner les pales de la turbine, est réchauffée par frottement, et ressort en bas à droite de l'installation.

schéma CC-BY-SA Olivier Cleynen

1.8 Chaudière de chauffage central

La chaudière du système de chauffage central d'un bâtiment, représenté en figure 1.13, fonctionne avec la combustion du kérosène.

L'eau pénètre dans la chaudière à une température $T_C = 20\text{ °C}$ et en ressort à $T_D = 70\text{ °C}$, avec un débit $\dot{V}_{\text{eau}} = 0,25\text{ L s}^{-1}$.

La chambre de combustion admet de l'air à $T_A = 8\text{ °C}$ et il ressort par la cheminée à une température $T_B = 120\text{ °C}$; le débit d'air est de $\dot{m}_{\text{air}} = 0,5\text{ kg s}^{-1}$.

Chaleur spécifique de combustion du kérosène : $46,4\text{ MJ kg}^{-1}$

Capacité calorifique massique de l'eau liquide : $4,18\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$

Capacité calorifique massique de l'air à pression constante : $1,15\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$

1. Quelle est la consommation horaire de kérosène par la chaudière ?
2. Quelle est l'efficacité de la chaudière, c'est à dire le rapport entre son transfert de chaleur utile et sa consommation énergétique ?

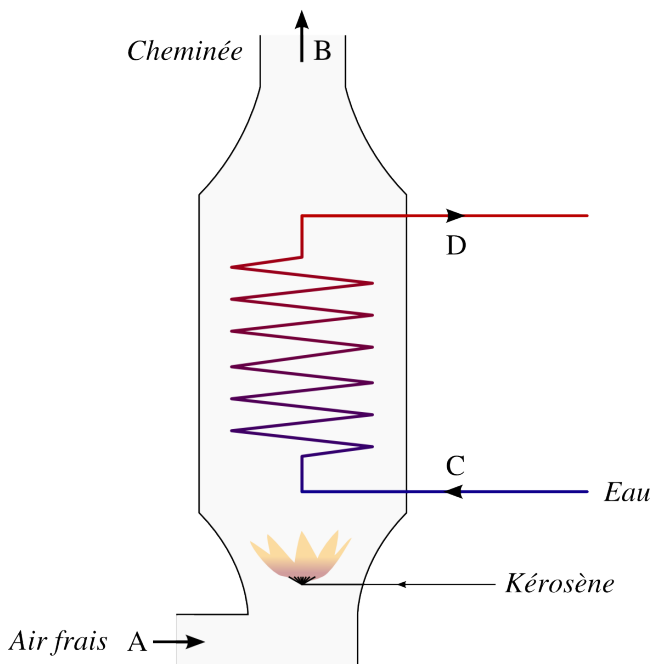


FIGURE 1.13 – Schéma de principe d'une chaudière utilisée pour le chauffage d'un bâtiment. L'eau ($C \rightarrow D$) y pénètre par la droite, et y est réchauffée par l'air ($A \rightarrow B$) mélangé au kérosène.

schéma CC-BY-SA Olivier Cleynen

1.9 Turbomoteur d'hélicoptère

Un hélicoptère est muni de deux turbomoteurs, c'est à dire de turbomachines dont le but est de faire tourner un arbre sortant du moteur (figure 1.14). Nous pouvons évaluer plusieurs caractéristiques de ces moteurs sans connaître précisément leur fonctionnement interne.

Chacun des deux moteurs admet de l'air atmosphérique à température de 15 °C . L'air y est comprimé, réchauffé, puis détendu, ce qui permet de dégager du travail pour faire tourner les rotors. À la sortie du moteur, l'air est rejeté à pression atmosphérique et température de 360 °C .

À pression constante, la capacité calorifique massique de l'air est environ $c_{p,\text{air}} = 1050\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$. La combustion du kérosène dégage $q_{\text{kérosène}} = 46\text{ MJ kg}^{-1}$.

1. Quelle est la puissance spécifique rejetée par les moteurs sous forme de chaleur dans l'atmosphère ?
Indice : c'est la chaleur spécifique que doit perdre l'air rejeté pour retrouver sa température initiale.

Le manuel de vol indique que dans la chambre de combustion (la partie du moteur où est brûlé le carburant), l'air est admis à température de 250 °C et qu'il y est réchauffé par la combustion, à pression constante, jusqu'à 776 °C .

2. Quelle est la puissance spécifique dégagée par les moteurs sous forme de travail ?
Indice : au final, toute l'énergie perdue par l'air sous forme de travail et de chaleur lui a été apportée dans la chambre de combustion.

Pour maintenir l'hélicoptère en vol stationnaire en pleine charge, les rotors demandent aux deux moteurs une puissance totale sous forme de travail de $1,32\text{ MW}$ (environ 1800 ch).

3. Quel débit d'air faut-il admettre au total dans les deux turbomoteurs ?
4. Quelle est alors la puissance totale (en W) à fournir dans les deux chambres de combustion ?
5. Quelle est la consommation horaire en kérosène de l'hélicoptère en vol stationnaire ?

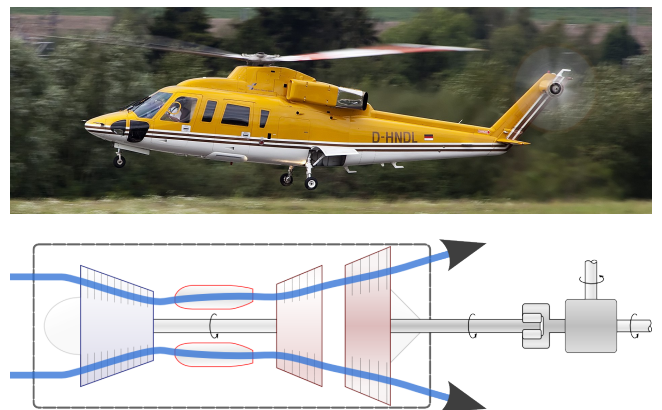
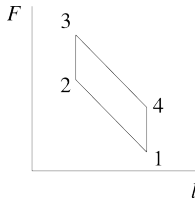


FIGURE 1.14 – Un hélicoptère Sikorsky S-76B, équipé de deux turbomoteurs P&WC PT-6B de 980 ch chacun. Le trajet de l'air dans les moteurs est représenté dans un schéma de principe. Nous étudions ces moteurs plus en détail au chapitre 10 (cycles moteurs à gaz).

Photo hélicoptère CC-BY-SA Maarten Visser
Schéma CC-BY-SA Olivier Cleynen

Solutions des exercices

- 1.1** 1) $E_{\text{méca}2} - E_{\text{méca}1} = -180 \text{ kJ}$ (le temps de 7 min n'ayant bien sûr pas d'importance)
 2) $\dot{Q}_{\text{frottements}} = m g |\dot{z}| = 368 \text{ W}$.
- 1.2** 1) Au final, l'eau a perdu autant d'énergie qu'elle en a reçu, donc $q_{D \rightarrow A} = -w_{A \rightarrow B} - q_{B \rightarrow C} - w_{C \rightarrow D} = -306 \text{ kJ kg}^{-1}$ Nous avons fait fonctionner des moteurs pendant quarante ans avant de comprendre cela !
 2) $\dot{Q}_{D \rightarrow A} = \dot{m} q_{D \rightarrow A} = -4,59 \text{ MW}$
 3) $\dot{W}_{C \rightarrow D} = \dot{m} w_{C \rightarrow D} = -2,91 \text{ MW}$
 4) $\eta_{\text{centrale}} = \left| \frac{w_{\text{turbine}} + w_{\text{pompe}}}{q_{\text{chaudière}}} \right| = 32 \%$ (valeur réaliste).
- 1.3** 1) $W_A = \int_{l_1}^{l_2} F(l) dl = -10^3 \left[8l - \frac{1}{2} 2l^2 \right]_{0,4}^{0,12} = +2,094 \text{ kJ}$.
 2) $W_B = +2,138 \text{ kJ}$
 3) $W_C = +3,157 \text{ kJ}$.
- 
- 1.4** 2) $W_{1 \rightarrow 2} = +3,196 \text{ kJ}$
 3) $F(l)_{3 \rightarrow 4} = 35,2 \cdot 10^3 - 40 \cdot 10^3 l$
 4) $W_{3 \rightarrow 4} = -4,862 \text{ kJ}$
 5) $W_{\text{cycle}} = 1,666 \text{ kJ}$
 6) $f = 11,04 \text{ s}^{-1}$ (11 fois par seconde)
- 1.5** 1) $Q_{\text{eau}} = \rho_{\text{eau}} V_{\text{eau}} c_{\text{eau}} \Delta T = +34,02 \text{ MJ}$
 2) $\Delta t = \frac{Q_{\text{eau}}}{\dot{Q}} = 4,7 \text{ h}$
- 1.6** 1) $S_2 \leq \frac{F_2}{p_2} = \frac{F_2}{p_1} = 5,89 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 = 589 \text{ cm}^2$
 2) $\dot{W} = 0 \text{ W}$ bien sûr, puisqu'il n'y a pas de déplacement...
 3) En calculant le volume V d'huile balayé,
 $d_1 = \frac{V_1}{S_1} = \frac{V_2}{S_2} = 29,43 \text{ m}$, une longueur impraticable sans ajouter un mécanisme de pompage.
 4) $\dot{W}_{\text{moyen}} \leq \frac{W_{A \rightarrow B}}{\Delta t} = 98,1 \text{ W}$.
- 1.7** 1) $\Delta e_{\text{méca.}} = -697,9 \text{ J kg}^{-1}$ (donc une perte par l'eau)
 2) $q_{1 \rightarrow 2} = +168 \text{ J kg}^{-1}$
 3) $\dot{W}_{\text{turbine}} = \dot{m} (\Delta e_{\text{méca.}} + q_{1 \rightarrow 2}) = -635,9 \text{ kW}$.
- 1.8** 1) $\dot{m}_{\text{kérosène}} = \frac{\dot{Q}_{\text{kérosène}}}{q_{\text{kérosène}}} = \frac{-\dot{Q}_{\text{eau}} - \dot{Q}_{\text{air}}}{q_{\text{kérosène}}} = 2,51 \cdot 10^{-3} \text{ kg s}^{-1} = 9,1 \text{ kg h}^{-1}$
 2) $\eta_{\text{chaudière}} = \left| \frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{\dot{Q}_{\text{kérosène}}} \right| = 44,8 \%$
- 1.9** 1) $q_{\text{rejet}} = +362,25 \text{ kJ kg}^{-1}$
 2) $q_{\text{chambre}} + w_{\text{arbre}} + q_{\text{refroidissement atmosphérique}} = 0$ ou encore $q_{\text{chambre}} + w_{\text{arbre}} - q_{\text{rejet}} = 0$; ainsi on a $w_{\text{arbre}} = -q_{\text{chambre}} + q_{\text{rejet}} = -190,1 \text{ kJ kg}^{-1}$ (ces puissances ne dépendent pas du débit de masse, et donc pas du nombre de moteurs considérés).
 3) $\dot{m}_{\text{air}} = 6,95 \text{ kg s}^{-1}$
 4) $\dot{Q}_{\text{chambres}} = 3,836 \text{ MW}$
 5) $\dot{m}_{\text{kérosène}} = \frac{\dot{Q}_{\text{chambres}}}{q_{\text{kérosène}}} = 300,2 \text{ kg h}^{-1}$ (valeur réaliste).