

Exercices chapitre 5

Version du 18 avril 2015
CC-BY-SA Olivier Cleynen – thermodynamique.ninja

Les propriétés de l'eau sont toutes tabulées dans les abaques n°1, 2 et 3.

5.1 Température et pression d'ébullition

Un/e étudiant/e voyage à bord d'un avion de ligne et se voit servir une boisson chaude (figure 5.26) par l'équipage ; la boisson est presque à ébullition. Il/elle en mesure la température à $88,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1. Quelle est la pression dans la cabine ?

L'avion subit une dépressurisation rapide et la pression de la cabine s'égale avec la pression atmosphérique locale ($17,2\text{ kPa}$). L'étudiant/e enfile son masque à oxygène et constate avec déplaisir que la boisson, qui refroidit, s'est mise à bouillir.

2. À quelle température l'ébullition cessera-t-elle ?



FIGURE 5.26 – Boisson chaude aérienne au goût non identifié.

photo CC-BY par l'utilisateur rice Flickr notbrucelee

5.2 Évaporation d'eau

1. Combien faut-il de chaleur pour évaporer entièrement une casserole d'eau (figure 5.27) ? Le récipient contient $2,5\text{ L}$ d'eau à $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, et la pression atmosphérique ambiante est de 1 bar .
2. Représentez l'évolution sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative (c'est-à-dire sans représenter les valeurs numériques) et en y représentant la courbe de saturation.
3. Le réchauffement est effectué avec une plaque électrique de 1500 W . Combien de temps faut-il pour vaporiser l'eau, et quel est le coût engendré par l'expérience ? L'opérateur facture $0,15\text{ €}$ par kW h et les pertes de la plaque dans la pièce sont de l'ordre de 10% .



FIGURE 5.27 – Expérience de physique ordinaire

photo CC-BY par Indi Samarajiva

5.3 Exercice simple de cours

Décrivez très brièvement une expérience permettant de réchauffer à température constante une masse fixe d'eau liquide sous-refroidie. Représentez l'évolution sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative et en y représentant la courbe de saturation.

5.4 Génération de vapeur à haute pression

Un procédé industriel chimique nécessite l'apport d'un débit de vapeur de 2 kg s^{-1} à 6 bar et $875\text{ }^{\circ}\text{C}$. La machine en charge de fournir cette vapeur est alimentée par une canalisation d'eau liquide pressurisée à $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 6 bar .

1. Quelles puissances sous forme de travail et de chaleur sont nécessaires pour générer ce débit de vapeur ?
2. Représentez l'évolution subie par l'eau sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative et en y représentant la courbe de saturation.

5.5 Tout est dans le bouchon

Un/e étudiant/e décide de maintenir une alimentation équilibrée, et pour cela fait cuire des aliments dans un autocuiseur (couramment appelé « cocotte-minute », figure 5.28).

La soupape (couramment appelée « bouchon ») de l'autocuiseur pèse 216 g ; elle est posée sur un conduit d'échappement de diamètre 5 mm . La pression atmosphérique ambiante est de $1,1\text{ bar}$.

1. À quelle température l'autocuiseur permet-il de faire cuire les aliments ?
2. Quelle température et quelle pression une personne appuyant sur la soupape pourrait-elle générer à l'intérieur de l'autocuiseur ? Comment empêcher un accident ?



FIGURE 5.28 – Autocuiseur ou cuiseur à pression, couramment appelé « cocotte-minute » en France.

Photo CC-BY-SA par l'utilisateur-rice Commons rama

5.6 Un premier moteur à vapeur

Un/e ingénieur/e effectue une expérience avec de la vapeur d'eau, dans l'idée de mettre au point un petit moteur très simple (figure 5.29)

Il/elle insère 2 L d'eau liquide à 20 °C dans un grand cylindre. L'eau est comprimée à 2 bar par un piston.

Il/elle chauffe l'eau, et le piston se déplace en maintenant la pression constante, jusqu'à ce que le volume ait atteint 300 L.

1. Représentez l'évolution sur un diagramme pression-volume, de façon qualitative et en y représentant la courbe de saturation.
2. Quel a été le travail effectué ?
3. Combien de chaleur a-t-il fallu apporter ?
4. Quels seraient les transferts de travail et de chaleur si la détente était poursuivie jusqu'à 4 500 L ?

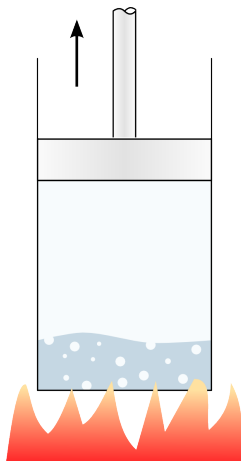


FIGURE 5.29 – Un concept très simple de moteur à vapeur

schéma CC-0 Olivier Cleynen

5.7 Pompage d'eau

Une pompe à liquide est installée pour prélever de l'eau à 5 °C située dans un réservoir en contrebas (figure 5.30).

1. Jusqu'à quelle hauteur Δz peut-on effectuer le pompage ?
2. Comment pourrait-on procéder pour pomper l'eau à plus grande hauteur ?

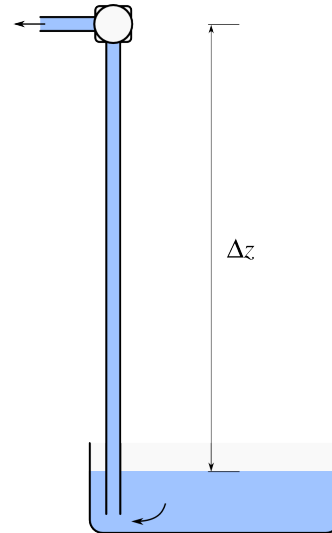


FIGURE 5.30 – Pompage d'un réservoir d'eau situé en contrebas. La première observation de la limite de hauteur calculée dans cet exercice est faite en 1630 par Giovanni Battista Baliani.

schéma CC-0 o.c.

5.8 Turbine à vapeur sur installation légère

Une entreprise développe une petite centrale à vapeur pouvant être embarquée dans un conteneur de taille standard. Une fois reliée à une chaudière externe, elle est capable de convertir en électricité, avec une efficacité intéressante, de la chaleur provenant de combustibles peu raffinés (comme le bois, le papier ou le charbon).

Au sein de cette centrale, la turbine est adiabatique et admet 5 t h^{-1} de vapeur à 90 bar et 510 °C en provenance de la chaudière. La pression de sortie est (à peine supérieure à) la pression atmosphérique (nous prendrons 1 bar). Un/e ingénieur/e prévoit¹³ que l'énergie interne spécifique de la vapeur sera alors de $2\,676,6 \text{ kJ kg}^{-1}$.

La turbine est mécaniquement connectée à une génératrice de courant d'efficacité 85 %.

1. Quelle est la puissance électrique dégagée par la génératrice ?

À l'autre extrémité du conteneur, une pompe électrique (seul autre élément mécanique de l'installation) récupère l'eau

13. Nous pourrions aussi faire cela après le chapitre 8 (l'entropie).

condensée à l'état de liquide saturé (1 bar) et augmente à nouveau sa pression jusqu'à 90 bar pour alimenter la chaudière. On considère que lors du pompage, le volume spécifique de l'eau varie de façon négligeable, et que la compression est réversible.

2. Quelle puissance électrique est prélevée pour alimenter la pompe ?

5.9 Le baril écrasé

Pour effectuer une démonstration de physique, un groupe d'étudiants porte de l'eau à ébullition, à pression ambiante, dans un ancien baril de pétrole (contenance 208 L, hauteur 88 cm).

Le baril est retiré de la source de chaleur et fermé de façon hermétique. Le but de l'opération est de pouvoir observer le baril se faire écraser par l'atmosphère suite au changement d'état de l'eau qu'il contient.

1. Quelle dépression peut-on générer à l'intérieur du baril en le laissant se refroidir ?
2. Quelle serait alors la force verticale s'appliquant sur la paroi supérieure du baril ?

Quelques questions plus difficiles :

3. Il reste 5 L de liquide au fond du baril à la fermeture du bouchon. Quel est le titre de la vapeur ?
4. Quelle masse de vapeur s'est condensée pendant le refroidissement ?
5. Combien a-t-il fallu retirer de chaleur pour atteindre la dépression finale ?

5.10 Moteur Newcomen

À leur époque, autour de 1720, les moteurs Newcomen (figure 5.23) étaient à la pointe de la technologie. On insérait dans un grand cylindre (hauteur 1 m, diamètre 1,5 m) de la vapeur à peine surchauffée (1 bar, 250 °C).

Puis on refroidissait cette vapeur (en laissant entrer une faible quantité d'eau liquide à pression et température atmosphériques), en maintenant la pression interne à 0,1 bar. Le piston redescendait ainsi en fournissant du travail.

L'eau disponible pour alimenter le moteur est à 1 bar, 10 °C.

1. Tracez l'évolution suivie par l'eau sur un diagramme pression-volume ou température-volume, en y indiquant la courbe de saturation.
2. Avant de pouvoir effectuer la descente, quelle quantité de chaleur faut-il fournir pour remplir le cylindre de vapeur ?
3. Quelle quantité de travail est dégagée par le moteur pendant la descente du piston ?
Indice : il faut tenir compte du travail effectué par l'atmosphère sur la face extérieure du piston.
4. Quelle est ainsi l'efficacité du moteur, si l'on néglige les frottements et toutes les autres pertes de chaleur ?

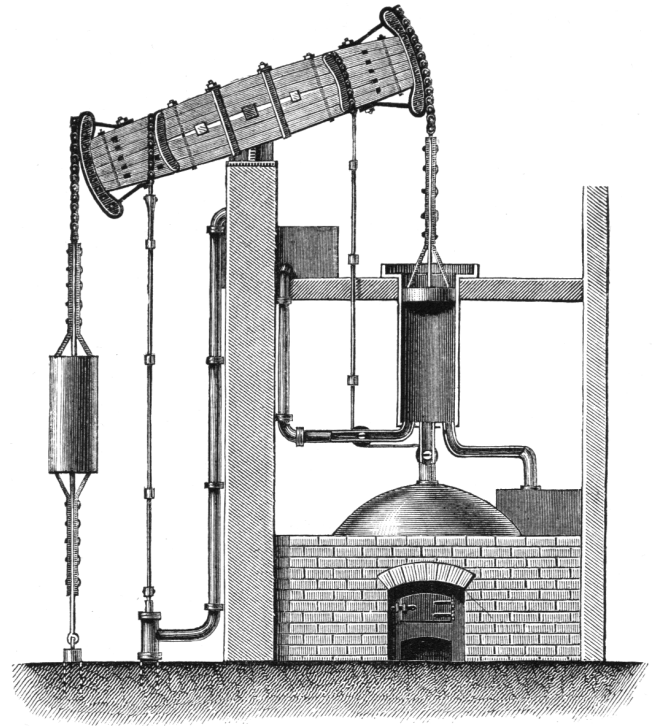


FIGURE 5.31 – L'ingénieux moteur atmosphérique de Newcomen, premier véritable succès de la motorisation vapeur.

schéma domaine public C. L. Moll – Die gesamten Naturwissenschaften (1873)

5.11 Condenseur de centrale à vapeur

Dans une centrale électrique de grande puissance, le condenseur est en charge de récupérer l'eau à la sortie des turbines et de lui retirer de l'énergie pour qu'elle puisse retourner à l'état liquide et ainsi ré-intégrer le circuit pompes → chaudières → turbines. L'eau du circuit (180 t h^{-1}) arrive à 0,5 bar avec un volume spécifique de $3,1247 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; elle doit repartir à la même pression, à l'état de liquide saturé.

Pour extraire de la chaleur à l'eau de la centrale, les condenseurs utilisent un circuit d'eau secondaire provenant directement d'une rivière. On y prélève de l'eau à 10 °C.

Pour réduire l'impact écologique de la centrale, on souhaite rejeter l'eau secondaire dans la rivière à une température égale ou inférieure à 35 °C.

1. Quel débit d'eau secondaire doit-on prélever en rivière ?
2. Pour limiter les rejets de chaleur en rivière, où (et comment) rejette-t-on aussi, en pratique, la chaleur du condenseur ?

5.12 Catapulte de porte-avions

Une catapulte à avions est montée sur un navire militaire (figures 5.32 et 5.33). Elle est constituée d'un réservoir de vapeur connecté à un long cylindre, dans lequel glisse un piston entraînant l'avion au décollage.

Au début du catapultage, la vapeur est à 140 bar et 700 °C. Après une brève course de 50 m, l'avion a quitté le pont et la vapeur est à 4 bar et 410 °C.

1. Quelle énergie la catapulte a-t-elle fourni à l'avion par kilo de vapeur ?
2. Quelles doivent être le diamètre du piston et la masse totale de vapeur, pour que la poussée fournie à l'avion soit toujours supérieure à 2,5 t ?

Et une question à laquelle nous ne savons pas encore répondre : Quelle est la quantité *maximale* d'énergie que la catapulte aurait pu fournir à l'avion en laissant la vapeur se détendre ?

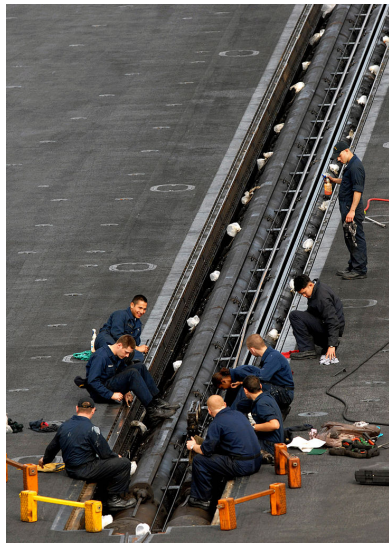


FIGURE 5.32 – Cylindre d'une catapulte à vapeur du USS Abraham Lincoln

Photo domaine public par Geoffrey Lewis, U.S. Navy

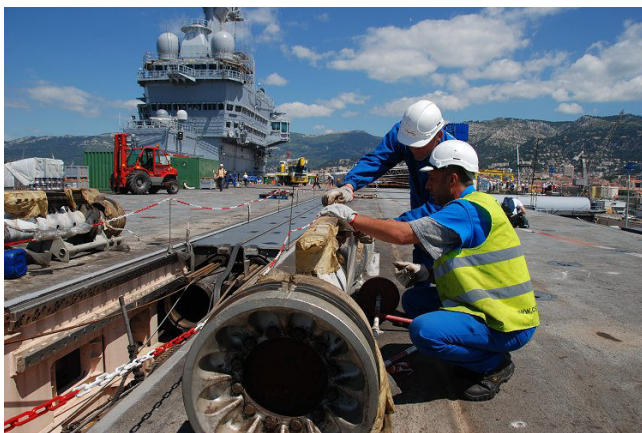


FIGURE 5.33 – Piston d'une catapulte à vapeur du porte-avions Charles de Gaulle.

Photo CC-BY-SA par Jean-Michel Roche, Netmarine.net

5.13 Turbine de centrale nucléaire

Dans une centrale nucléaire, la génératrice d'électricité est entraînée par une turbine à vapeur (figure 5.34).

La majeure partie de la vapeur (chauffée par le réacteur nucléaire) traverse l'entièreté de la turbine. Toutefois, au milieu de la turbine, on procède à un prélèvement de vapeur. Il permet, d'une part, de réchauffer l'eau d'une autre partie du circuit (§9.4.5), et d'autre part, de contrôler précisément le débit de masse en circulation. Le débit total à l'entrée est de 317 t h⁻¹ de vapeur.

On mesure les propriétés de vapeur suivantes :

Entrée :	120 bar ; 565 °C
Prélèvement :	10 bar ; 250 °C ; 1,2 kg s ⁻¹
Sortie :	1 bar ; 115 °C

Quelle est la puissance mécanique fournie par la turbine ?

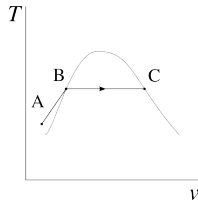


FIGURE 5.34 – Une des turbines de la centrale nucléaire russe de Balakovo (puissance centrale approx. 1 GW), en maintenance (haut) et en installation (bas).

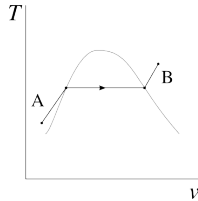
photo 1 et 2 CC-BY-SA The Centre of the Public Information Balakovo NPP

Solutions des exercices

- 5.1 1) Par interpolation entre $T_{\text{sat}} = 85^\circ\text{C}$ et $T_{\text{sat}} = 90^\circ\text{C}$ dans l'abaque n°2, on obtient $p_{\text{sat}} = 0,67 \text{ bar}$
 2) Par interpolation entre $p_{\text{sat}} = 0,016 \text{ MPa}$ et $p_{\text{sat}} = 0,018 \text{ MPa}$ dans l'abaque n°3, on obtient $T_{\text{sat}} = 56,8^\circ\text{C}$ (berk!)



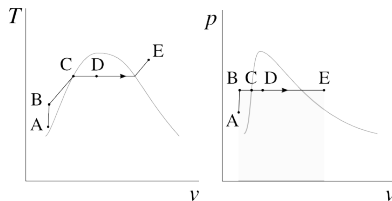
- 5.2 1) Pour chauffer l'eau jusqu'à ébullition (B) puis évaporation totale (C) : $Q_{A \rightarrow C} = m(q_{A \rightarrow B} + q_{B \rightarrow C}) = \frac{V_A}{v_A}(h_{L0,1 \text{ MPa}} - h_A + h_{LV0,1 \text{ MPa}}) = +6582 \text{ kJ}$.
 3) $\Delta t = \frac{Q_{A \rightarrow C}}{\dot{Q}_{\text{moyenne}}} = 1 \text{ h } 21 \text{ min}$ pour un coût effarant de 0,29€.



- 5.3 cf. §5.2.3 p.136 & figure 5.9.

- 5.4 1) Par lecture dans l'abaque n°1 @ $p_A = 0,6 \text{ MPa}$, $h_A = 42,6 \text{ kJ kg}^{-1}$. En interpolant entre 800 et 900 °C dans cette même table, on obtient $h_B = 4336,6 \text{ kJ kg}^{-1}$. Ainsi avec l'équation 5/10 ($\dot{Q}_{A \rightarrow B} = \dot{m}\Delta h = +8,59 \text{ MW}$. $\dot{W}_{A \rightarrow B} = 0 \text{ W}$ (5/9).

- 5.5 1) $p_{\text{intérieur}} = p_{\text{bouchon}} + p_{\text{atm.}} = \frac{F_{\text{poids}}}{S_{\text{bouchon}}} + 1 \text{ bar} = 2,0797 \text{ bar}$. Par interpolation dans l'abaque n°2, $T_{\text{sat}, p=2,0797 \text{ bar}} = 121,37^\circ\text{C}$.

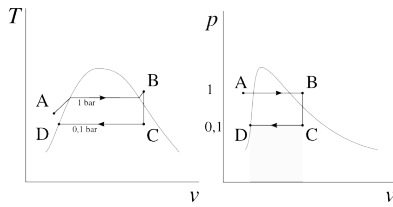


- 5.6 2) $W_{A \rightarrow B} \approx 0$ (5/11); avec $m = \frac{V_B}{v_B}$ et $v_D = \frac{v_D}{m}$, on calcule $W_{B \rightarrow D} = -mp_{\text{cste.}}(v_D - v_B) = -59,6 \text{ kJ}$ (5/7).
 3) Avec v_D on calcule le titre $x_D \approx \frac{v_D}{v_{V0,2 \text{ MPa}}} = 0,1697$. Ainsi, $Q_{B \rightarrow D} = m(h_D - h_B) = m(h_L + x_D h_{LV} - h_B) = +1585,2 \text{ kJ}$ (5/8), soit vingt-cinq fois plus... 4) Les relations sont identiques et donnent $W_{B \rightarrow E} = -899,6 \text{ kJ}$ et $Q_{B \rightarrow E} = +7694,3 \text{ kJ}$ (l'efficacité bondit de 3,8 à 11,7 %... il y a là une piste à suivre...)

- 5.7 1) La pression hydrostatique dans la canalisation dépend de la hauteur ($\Delta p = \rho g \Delta z$). Lorsque la pression à la pompe chute sous $p_{\text{sat.}}$, l'eau se met à bouillir. Pour $\Delta p_{\text{ébullition}} = 9,9127 \cdot 10^4 \text{ Pa}$, $\Delta z_{\text{ébullition}} = 10,1 \text{ m}$.
 2) Il y a mieux que de réchauffer le réservoir...

- 5.8 1) En A dans l'abaque n°1 nous interpolons à 9 MPa entre 500 et 600 °C pour obtenir $h_{510^\circ\text{C} \& 90 \text{ bar}} = 3412 \text{ kJ kg}^{-1}$. Idem en B où $u_B > u_{V1 \text{ bar}}$ ($h_B = 2899,4 \text{ kJ kg}^{-1}$). Enfin $\dot{W}_{\text{électrique}} = \eta_{\text{conversion}} \dot{m} \Delta h = -605,8 \text{ kW}$.
 2) $\dot{W}_{\text{pompe}} = \dot{m} \int v dp \approx \dot{m} v_L \Delta p = +12,9 \text{ kW}$.

- 5.9 1) Si on atteint $T_B = 30^\circ\text{C}$ à volume constant, alors $p_{\text{intérieur min.}} = p_{\text{sat}, 30^\circ\text{C}} = 0,004247 \text{ MPa}$. Alors $\Delta p_{\text{max}} = -9,575 \cdot 10^4 \text{ Pa}$;
 2) $F_{\text{max}} = \Delta p_{\text{max}} S_{\text{couvercle}} = 22,6 \text{ kN}$ (le baril sera bien sûr écrasé avant)
 3) $x_A = 0,02408$, $x_B = 7,328 \cdot 10^{-4}$; 4) $m_{\text{condensée}} = 4,9138 \text{ kg}$;
 5) $Q_{A \rightarrow B} = -1,878 \text{ MJ}$.



5.10

2) Une lecture de l'abaque n°1 donne $h_A = 42,1 \text{ kJ kg}^{-1}$. Par interpolation nous obtenons $h_B = 2975 \text{ kJ kg}^{-1}$ et $m = \frac{V_B}{v_B} = 0,7354 \text{ kg}$. Ainsi nous calculons $Q_{A \rightarrow B} = m\Delta h = +2154 \text{ kJ}$ (5/8). 3) Dans le même tableau que h_B nous avons déjà obtenu $v_B = 2,406 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Ainsi $W_{\text{piston} \rightarrow \text{arbre}} = W_{\text{atm.} \rightarrow \text{piston}} + W_{\text{piston} \rightarrow \text{vapeur}} = m(p_C - p_{\text{ext.}})(v_D - v_C) = -159 \text{ kJ}$.

4) $\eta \equiv \frac{Q_{\text{fournie}}}{W_{\text{utile}}} = 7,38 \%$ (valeur réaliste).

5.11

1) $x_A = 96,44 \%$ & $x_B = 0$; ainsi $\dot{Q}_{A \rightarrow B} = -111,13 \text{ MW}$, ce pourquoi il nous faut $\dot{m}_{\text{secondaire}} \geq 1062,4 \text{ kg s}^{-1}$.

2) Dans l'atmosphère, au moyen de l'eau secondaire rejetée par les larges cheminées...

5.12

1) $\Delta u = -433,1 \text{ kJ kg}^{-1}$ (= $w_{A \rightarrow B}$ si l'on suppose l'évolution adiabatique);

2) $D_{\text{min.}} = 32,26 \text{ cm}$ (attention à tenir compte de la pression atmosphérique); $m = \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{v_{\text{max}} - v_{\text{min}}} = 5,243 \text{ kg}$. NB : faute de sources fiables, les données de cet exercice sont purement imaginaires.

5.13

$\dot{W}_{\text{turbine}} = -71 \text{ MW}$.