

# Exercices chapitre 5

Version du 30 septembre 2014  
CC-BY-SA Olivier Cleynen — thermo.ariadacapo.net

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 °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 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 ? Le récipient contient 2,5 L d'eau à 10 °C, et la pression atmosphérique ambiante est de 1 bar.
2. Représentez qualitativement l'évolution de l'eau sur un diagramme température-volume (en y représentant la courbe de saturation).
3. Le réchauffement est effectué avec une plaque électrique de 1 500 W. Combien de temps faut-il pour vaporiser l'eau, et quel est le coût engendré par l'expérience ? L'opérateur facture 0,15€ 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 qualitativement l'évolution sur un diagramme pression-volume (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  $2 \text{ kg s}^{-1}$  à 6 bar et 875 °C. La machine en charge de fournir cette vapeur est alimentée par une canalisation d'eau liquide pressurisée à 10 °C et 6 bar.

1. Quelles puissances sous forme de travail et de chaleur sont nécessaires pour générer ce débit ?
2. Tracez qualitativement l'évolution subie par l'eau sur un diagramme température-volume.

## 5.5 Tout est dans le bouchon

Un/e étudiant/e décide de maintenir une alimentation équilibrée, et 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 bar.

1. À quelle température l'autocuiseur permet-il de faire cuire les aliments ?
2. Quelle température et quelle pression une personne pourrait-elle générer à l'intérieur de l'autocuiseur en appuyant sur la soupape ? 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 expérimente 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. Tracez qualitativement l'évolution suivie par le fluide sur un diagramme pression-volume ou température-volume.
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 ?

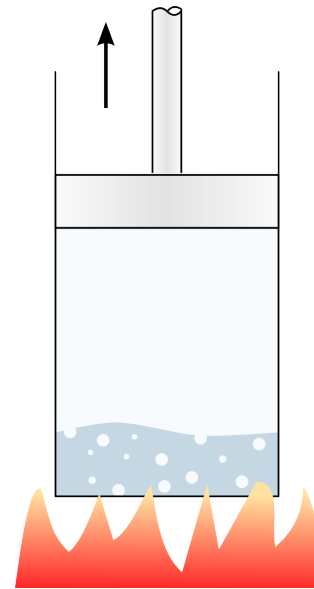


FIGURE 5.29 – Un concept très simple de moteur à vapeur

## 5.7 Pompage d'eau

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

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

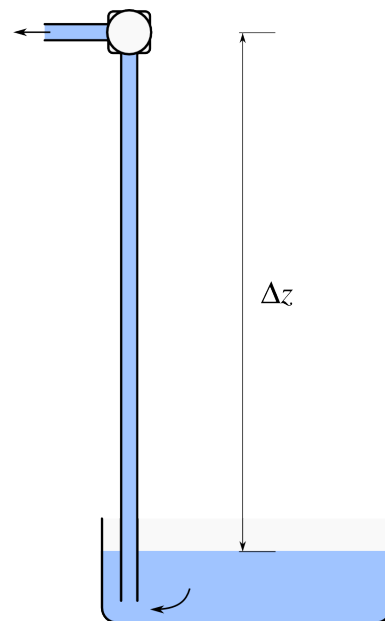


FIGURE 5.30 – Pompage d'un réservoir d'eau situé en contrebas. La première observation de la limite de hauteur calculée dans cet exercice est faite en 1630 par Giovanni Battista Baliani.

CC-0

---

## 5.8 Turbine à vapeur sur installation légère

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

Au sein de cette centrale, la turbine est adiabatique et admet  $5 \text{ t h}^{-1}$  de vapeur à 90 bar et  $510^\circ\text{C}$  en provenance de la chaudière. La pression de sortie est (à peine supérieure à) la pression atmosphérique (nous prendrons 1 bar). Un/e ingénieur prévoit<sup>15</sup> 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 container, une pompe électrique (seul autre élément mécanique de l'installation) récupère l'eau 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 dans un ancien baril de pétrole (contenance 208 L, hauteur 88 cm) à ébullition, à pression ambiante.

Le baril est retiré de la source de chaleur et est fermé de façon hermétique. Le but de l'expérience est bien sûr de le voir se contracter suite au changement d'état de l'eau à l'intérieur.

1. Quelle dépression peut-on atteindre 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 ?

*Et pour ceux qui souhaitent poursuivre :*

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 ?

---

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

## 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 faisant rentrer de l'eau liquide à pression et température atmosphériques), en maintenant la pression interne à 0,1 bar. Le piston redescendait ainsi en fournissant du travail.

1. Tracez l'évolution suivie par l'eau sur un diagramme pression-volume ou température-volume, en y indiquant la courbe de saturation.
2. Quelle quantité de travail est dégagée par le moteur pendant la descente du piston ?
3. Avant de pouvoir effectuer la descente, quelle quantité de chaleur a-t-il fallu pour amener l'eau dans le cylindre (l'eau disponible étant à 1 bar, 10 °C) ?
4. Quel est ainsi le rendement du moteur, si l'on néglige toutes les autres pertes de chaleur ?

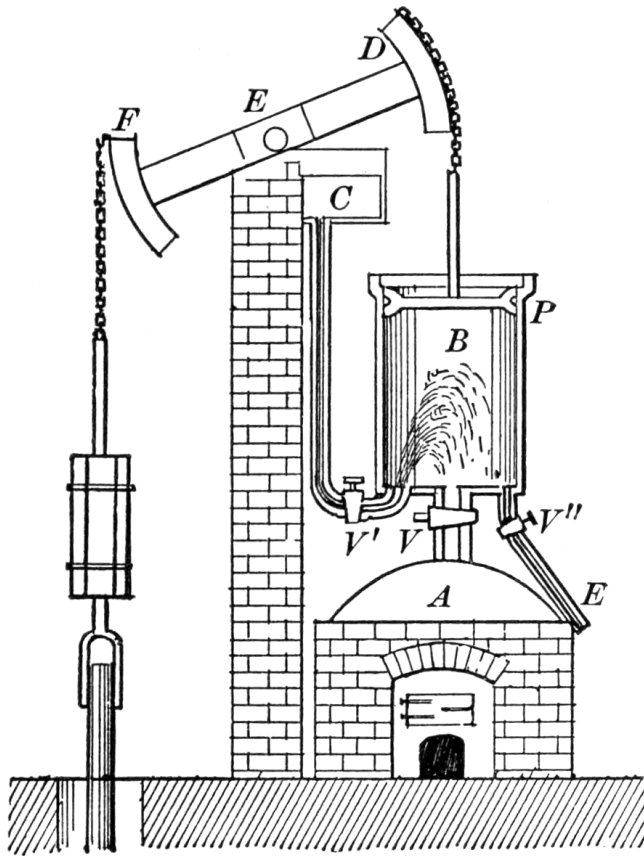


FIGURE 5.31 – L'ingénieux moteur atmosphérique de Newcomen, premier véritable succès de la motorisation vapeur.

*schéma domaine public (pub. 1913 in Practical physics for secondary schools. Fundamental principles and applications to daily life) par Newton Henry Black et Harvey Nathaniel Davis*

## 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 ré-intégrer le circuit pompes → chaudières → turbines. L'eau du circuit ( $180 \text{ t h}^{-1}$ ) 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 la chaleur du condenseur ?

## 5.12 Catapulte de porte-avions

Une catapulte à avions est montée sur un navire militaire (figure 5.32). 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 fournie 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 ?
3. (*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 ?



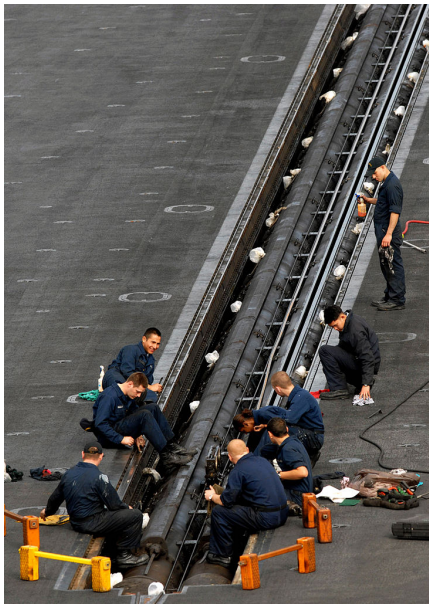


FIGURE 5.32 – Cylindre d’une catapulte à vapeur du USS Abraham Lincoln (gauche), et piston d’une catapulte à vapeur du Charles de Gaulle (droite).

*Photo 1 domaine public par Geoffrey Lewis, U.S. Navy  
Photo 2 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 5.33).

La majorité 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, et d’autre part, de contrôler précisément le débit de masse en série. La turbine est ainsi divisée en deux sections en série. Le débit total à l’entrée est de  $317 \text{ t h}^{-1}$  de vapeur.

On mesure les propriétés de vapeur suivantes :

Entrée : 120 bar ;  $565^\circ\text{C}$

Prélèvement : 10 bar ;  $250^\circ\text{C}$  ;  $1,2 \text{ kg s}^{-1}$

Sortie : 1 bar ;  $115^\circ\text{C}$

Quelle est la puissance mécanique fournie par la turbine ?



FIGURE 5.33 – Une des turbines de la centrale nucléaire russe de Balakovo (puissance 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*

# Résultats

① De nombreux exercices sont corrigés intégralement dans les annales publiées à l'adresse <http://thermo.ariadacapo.net/>.

5.1 0,67 bar ; 56,8 °C (berk!)

5.2 0,29€ (en 1 h et 21 min)

5.4  $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = +8,59 \text{ MW}$ ,  $\dot{W}_{1 \rightarrow 2} = 0 \text{ W}$

5.5 1) 121,37 °C (ne pas oublier la pression atmosphérique)

5.6 2)  $W_{2 \rightarrow 4} = -59,6 \text{ kJ}$

3)  $Q_{1 \rightarrow 2} = +1\,585,2 \text{ kJ}$  (on a  $x_4 = 0,1697$ )

4)  $W_{2 \rightarrow 5} = -899,6 \text{ kJ}$  et  $Q_{2 \rightarrow 5} = +7\,694,3 \text{ kJ}$

5.7  $\Delta p_{\text{ébullition}} = 9,9127 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ ,  $\Delta z_{\text{ébullition}} = 10,1 \text{ m}$

5.8  $\dot{W}_{\text{électrique}} = -605,8 \text{ kW}$ ;  $\dot{W}_{\text{pompe}} = +12,9 \text{ kW}$

5.9 1) Si on atteint  $T_{\text{final}} = 20 \text{ °C}$ ,  $\Delta p_{\text{max}} = -9,575 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

2) 22,6 kN (le baril sera bien sûr écrasé avant)  
-1,878 MJ

4)  $x_1 = 0,02408$ ,  $x_2 = 7,328 \cdot 10^{-4}$ ;  $Q_{1 \rightarrow 2} =$

5.10 2)  $W_{\text{piston} \rightarrow \text{arbre}} = -159 \text{ kJ}$

3)  $Q_{\text{réchauff}} = +2\,185 \text{ kJ}$

4)  $\eta = 7,28 \%$ .

5.11  $\dot{m}_{\text{secondaire}} = 1\,062,4 \text{ kg s}^{-1}$

5.12 1)  $w_{1 \rightarrow 2} = -433,1 \text{ kJ kg}^{-1}$

2)  $D_{\text{min.}} = 32,26 \text{ cm}$ ,  $m = 5,243 \text{ kg}$  (attention

à tenir compte de la pression atmosphérique)

5.13  $\dot{W}_{1 \rightarrow 3} = -71 \text{ MW}$