

## Thermodynamique

### Warm-Up questions

Vocabulaire basique (Chapitre 4.1-4.3,4.7,4.8)

i. Pour 55 g d'oxygène gazeux, trouvez le nombre total de molécules d'oxygène ainsi que le nombre de moles de molécules d'oxygène. Quel est l'avantage d'utiliser l'unité de moles?

Oxygen has a molar mass of  $M = 32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ . This gives the amount of moles for the oxygen gas  $n = \frac{m}{M} = 1.7 \text{ mol}$ . With the Avogadro constant one can find the absolute number  $N = nN_A = 1.04 \cdot 10^{24}$ .

ii. Une boîte contenant un gaz à 20 °C est chauffée jusqu'à ce que l'énergie interne du gaz double. Quelle est la température du gaz maintenant ?

The internal energy is proportional to the temperature. But we have to convert the temperature to Kelvin scale first. We get

$$T = 2(20 + 273.15)\text{K} = 586 \text{ K} = 313^\circ\text{C}$$

iii. Déterminer lequel des éléments suivants peut influencer l'énergie interne d'un gaz:

- a) l'énergie cinétique de translation des molécules de gaz
- b) l'énergie thermique des molécules de gaz
- c) l'énergie potentielle due aux attractions entre les molécules de gaz
- d) l'énergie de rotation des molécules de gaz

Parmi ces éléments, lesquels contribuent à l'énergie interne d'un gaz idéal?

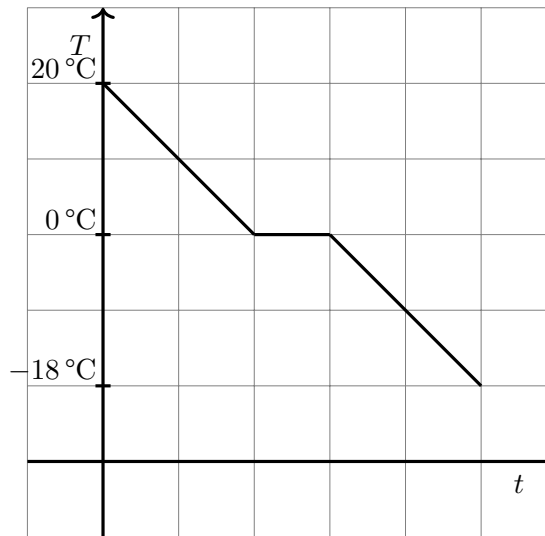
In general translation, rotation and potential energy contribute to the internal energy. Although transferring heat changes the internal energy it is not a part of the internal energy. In the ideal gas model the molecules are assumed to be point-like particles without molecular forces. Therefore only the translation energy contributes to the internal energy.

Capacité thermique et changements de phase : (Chapitre 4.4,4.13)

iv. Vous avez de l'eau à température ambiante (20 °C) et vous voulez faire un bloc de glace qui aura une température de -18 °C.

- a) Esquissez le changement de température au fur et à mesure que le temps passe.
- b) Vous utilisez de l'azote liquide pour refroidir l'eau. De quelle quantité d'azote liquide avez-vous besoin pour transformer 100 grammes d'eau en glace ? Quantités utiles : capacité thermique spécifique de l'eau  $c_w = 4.18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , capacité thermique spécifique de la glace  $c_i = 2.05 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , enthalpie de fusion / chaleur de fusion de l'eau  $L_w = 333.5 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ , enthalpie de vaporisation / chaleur de vaporisation de l'azote  $L_n = 199 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ .

- a) The important thing is that the water stays at  $0^\circ\text{C}$  during the phase transition from water to ice, so the temperature curve will look something like



- b) We first calculate how much heat per gram one needs to make the iceblock. We add all the contributions

$$c_{tot} = c_w \Delta T_w + L_w + c_i \Delta T_i = 454 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$$

with  $\Delta T_w = 20^\circ\text{C}$  and  $\Delta T_i = 18^\circ\text{C}$ . We can compare this to latent heat of nitrogen to get the mass of liquid nitrogen needed to make the iceblock.

$$m_n = \frac{c_{tot}}{L_n} m_w = 228 \text{ g}$$

#### La loi idéale sur le gaz (Chapitre 4.5)

- v. Une bulle d'air monte du fond d'un réservoir d'eau de 1 m de hauteur. Le volume initial est de  $5 \text{ cm}^3$ . En considérant que la température de l'eau est constante. Quel est son volume à la surface ?

The pressure at the bottom is  $p = \rho gh + p_{atm}$  at the surface  $p = p_{atm}$ . By the ideal gas law we get

$$V_{sur} = \frac{\rho gh + p_{atm}}{p_{atm}} V_0$$

We plug in the values and get

$$V_{sur} = \frac{1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 1 \text{ m} + 1 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}}{1 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}} \cdot 5 \text{ cm}^3 = 5.5 \text{ cm}^3$$

- vi. Nous avons un gaz parfait avec une masse molaire  $M$ .

- a) Quel est le rapport entre la densité et la température  $T$  ? Quel est le rapport entre la densité et la pression  $p$  ?
- b) Comme nous le savons par l'expérience, l'air chaud s'élève. Cela s'applique-t-il également aux gaz parfaits ? Si oui, pourquoi ?

- a) The density is  $\rho = \frac{nM}{V}$  with  $n$  the numbers of particle in moles und  $V$  the volume of the gas. From the ideal gas law we get

$$\rho = \frac{nM}{V} = \frac{pM}{RT}$$

- b) We see that with higher temperature the gas becomes less dense. This means it experiences a buoyant force and ascends.

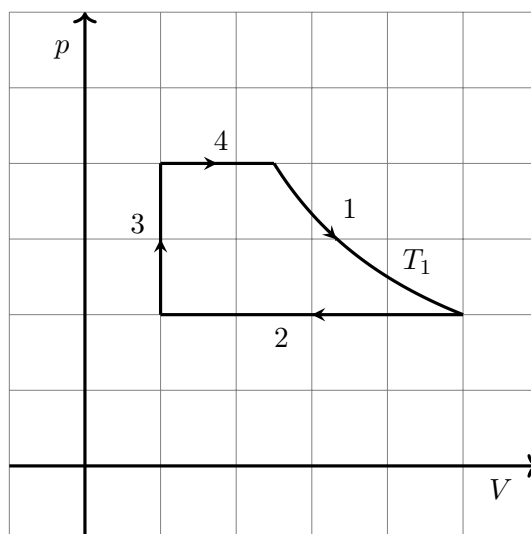
#### Processus et moteurs thermiques (Chapitre 4.9-4.11)

vii. Quels sont les processus thermodynamiques (isobares, isochores, isothermiques, adiabatiques) qui décrivent le mieux les phénomènes suivants:

- a) le chauffage d'une montgolfière
- b) la combustion interne d'un moteur diesel
- c) le gonflement d'un ballon de football

- a) The balloon is open so pressure and volume stays constant. This means the process is isochoric and isobaric. Note, this doesn't mean that the temperature remains constant, because the system is open and the amount of particles can change as well.
- b) The fuel burns so fast, that it cannot exchange heat with the environment. Therefore this is an adiabatic process.
- c) The shape of the football remains more or less the same and also the temperature stays constant. Therefore the process is isochoric and isothermic. As in subquestion a) this system is open, which means the pressure can change even though the volume and the temperature remain constant.

viii. Le cycle thermodynamique suivant est décrit dans un diagramme P-V (le processus 1 est isotherme à la température  $T_1$ ).



**Décrire qualitativement comment ce cycle thermodynamique serait représenté dans un diagramme T-V ainsi que dans un diagramme P-T.**

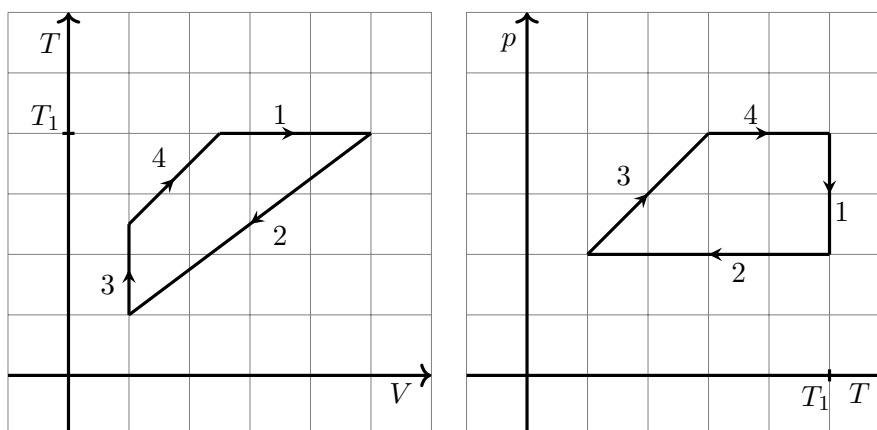
From the ideal gas law one can deduce how dependencies look like for the isobaric in the T-V diagram

$$\left(\frac{p}{nR}\right)V = T$$

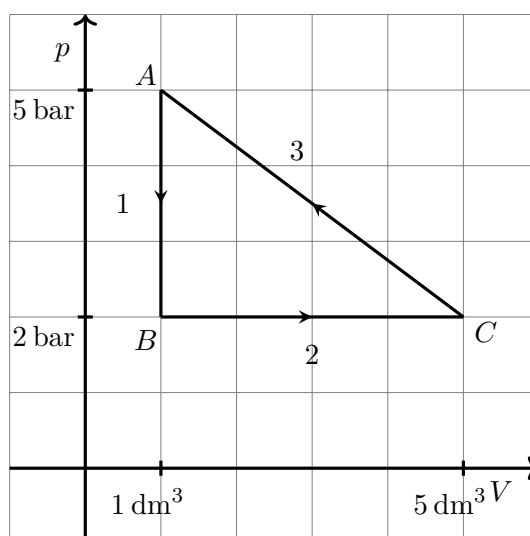
similarly we get for the isochoric process in the T-p diagram

$$\left(\frac{V}{nR}\right)p = T$$

The processes where one of the variables  $p, V, T$  remains constant is perpendicular to the corresponding axis. With this one finds how the process looks like in the p-T and T-V diagram



ix. Un moteur thermique qui est rempli avec une mol de gaz parfait, suit le cycle thermodynamique suivant.



a) Comment sont nommés les processus 1 et 2 ?

- b) Dans quelles parties du cycle le travail est-il effectué par le moteur thermique et dans quelles parties le travail est-il effectué sur le moteur thermique (travail fournit de l'extérieur) ? Calculez la quantité (avec le bon signe) pour chaque partie.
- c) Quel est le travail net effectué par le moteur thermique après un cycle complet ?
- d) Calculez la chaleur externe qui est fournie durant les parties 1 et 3. Quel est le flux de chaleur net après un cycle complet ?

a) process 1 is isochoric, process 2 isobaric

b) When the gas expands the machine gives mechanical work (process 2). When it contracts the machine consumes mechanical work (process 3). For process 1 the volume stays constant and therefore the machine neither gives nor consumes work. The quantitative number can be found by calculating the area below the curve of each subprocess

$$W_1 = 0, W_2 = -800 \text{ J}, W_3 = 1400 \text{ J}.$$

c) The netto work is just the sum of the work of all subprocesses

$$W = W_1 + W_2 + W_3 = 600 \text{ J}.$$

d) By the first law of thermodynamics we have

$$\Delta U = W + Q$$

in each process. For an ideal gas the change in internal energy is related to change in temperature

$$\Delta U = \frac{3}{2} n R \Delta T,$$

which can also be related to the pressure and volume with the ideal gas law

$$T_i = \frac{p_i V_i}{n R}.$$

Combining all the formulas together we get

$$Q_i = \Delta U_i - W_i = \frac{3}{2} (p_{f,i} V_{f,i} - p_{i,i} V_{i,i}) - W_i,$$

where  $p_{i,i}$ ,  $V_{i,i}$  and  $p_{f,i}$ ,  $V_{f,i}$  are the initial respectively the final pressure and volume of each process. The numerical values are

$$Q_1 = -450 \text{ J}, Q_2 = 2000 \text{ J}, W_3 = -2150 \text{ J}.$$

The netto heat is

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = -600 \text{ J}.$$

as expected, because we need to have  $Q + W = \Delta U = 0$  for a cyclic process.