

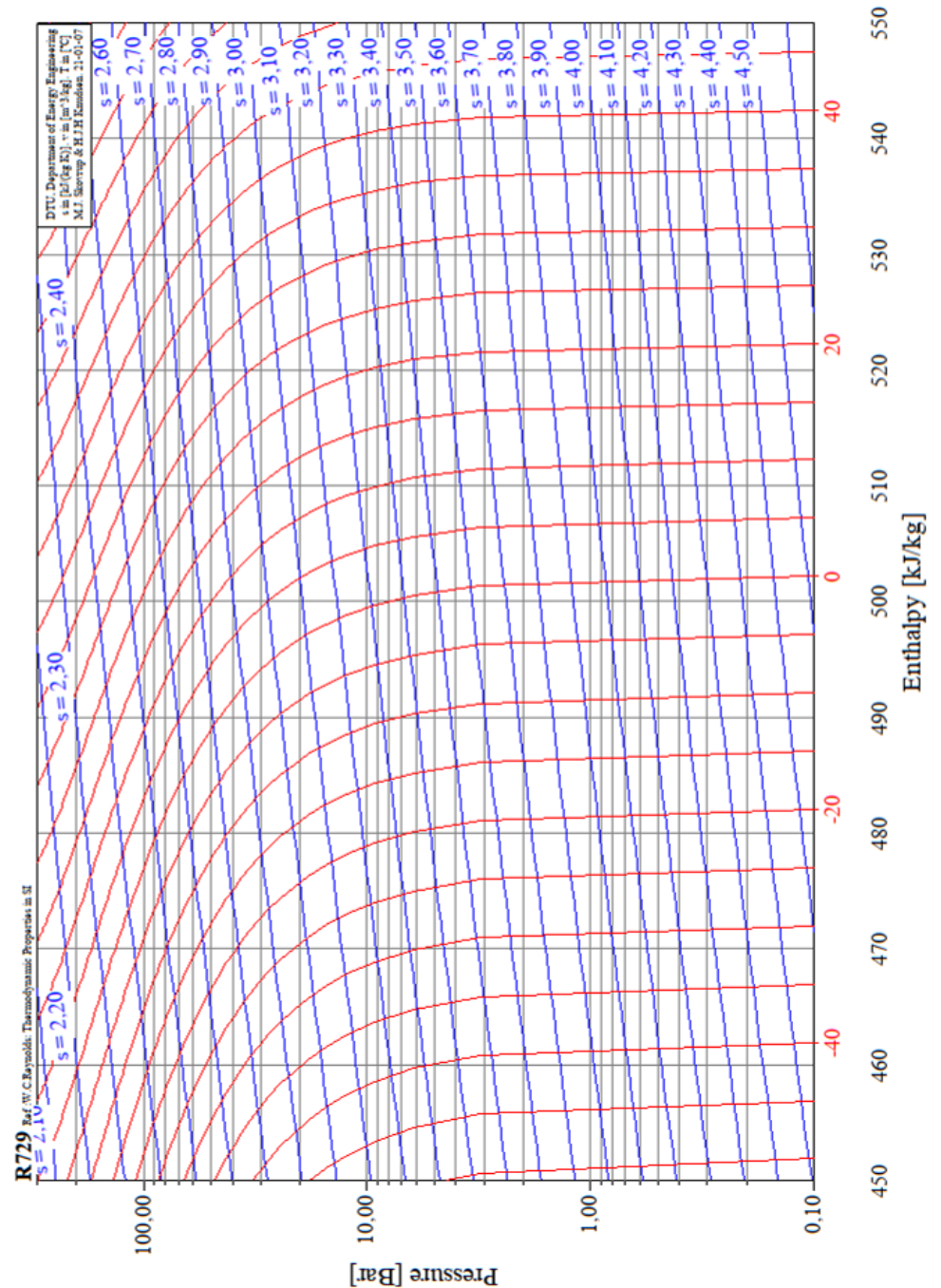
Détendeur de plongée

L'air des bouteilles de plongée sous-marine est stocké sous forme de gaz comprimé, en équilibre thermique avec l'eau environnante supposée à 20 °C. À l'aide d'un système complexe de membrane déformable et de ressort, un détendeur fait circuler l'air au travers d'un mince étranglement en lui faisant subir une détente isenthalpique et adiabatique. Pour la plongée, un détendeur primaire placé sur la bouteille assure une première détente de l'étage haute pression (200 bar, point 1) vers l'étage moyenne pression (10 bar, point 2), où l'air retrouve l'équilibre thermique avec l'eau (point 3). Un second détendeur, placé au niveau de la bouche du plongeur, assure la détente vers la basse pression (1 bar, point 4). Le plongeur inhale environ 0,5 L d'air par inspiration.

Donnée : masse molaire de l'air $M = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

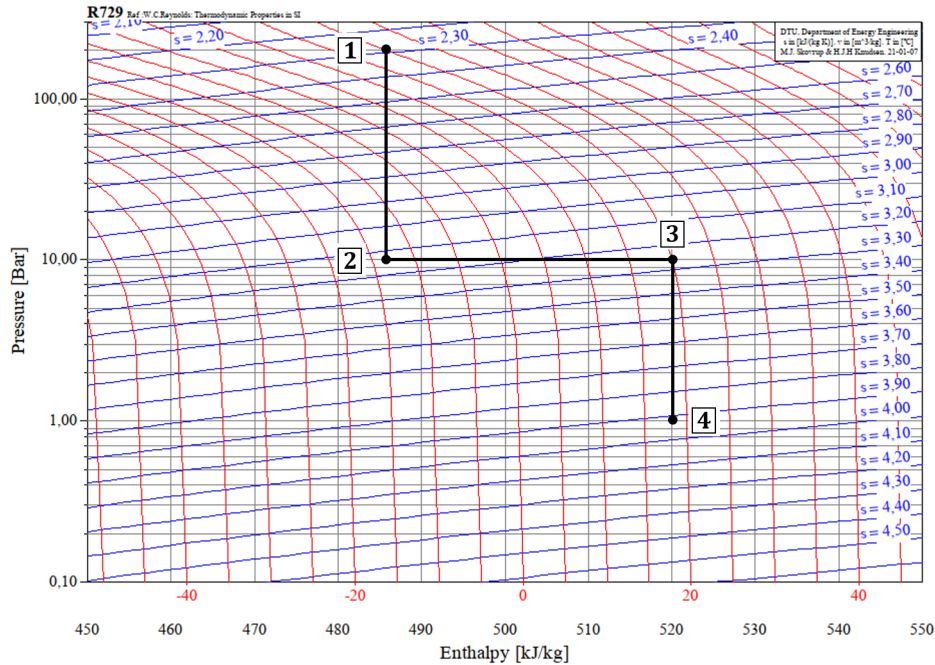
Au dos de la feuille : diagramme enthalpique de l'air. T en °C, P en bar, h en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et s en $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$.

- 1) Représenter l'évolution subie par l'air sur le diagramme au dos de la feuille.
- 2) Montrer que la première détente s'accompagne d'une forte baisse de température. Qu'aurait donné le modèle du gaz parfait ? Quel aspect du diagramme permet d'anticiper que ce modèle n'est pas valable ?
- 3) En pratique, le plongeur ne ressent pas de sensation d'air froid lors de l'inspiration. Expliquer.
- 4) À quel point le modèle du gaz parfait est-il le mieux vérifié ? En raisonnant en ce point, déterminer la masse d'air inhalée à chaque inspiration.
- 5) En déduire le transfert thermique que reçoit cette masse d'air lors de son passage dans le tube séparant les deux détendeurs, puis l'entropie créée lors de la totalité du processus.



Correction

1) Graphe :



2) À la fin de la première détente, on lit sur le diagramme $T_2 = -12\text{ °C}$, ce qui est très inférieur à $T_1 = 20\text{ °C}$. Le modèle du gaz parfait permet d'appliquer la loi de Joule : $\Delta h = c_p \Delta T$. Cette détente étant isenthalpique, elle aurait dû être isotherme si l'air s'était comporté en gaz parfait !

On peut se rendre compte que la loi de Joule n'est pas valable car les isothermes (courbes rouges) et les isenthalpes (verticales) ne sont pas du tout confondues au cours de l'étape 1 \rightarrow 2, contrairement à ce qu'elle prévoit.

3) La température à la fin de la seconde détente vaut $T_4 = 18\text{ °C}$, ce qui n'est pas très différent de la température de l'eau dans laquelle nage le plongeur.

4) Ce qui caractérise un gaz parfait dans un diagramme des frigoristes est la présence d'isothermes verticales : c'est au point 4 qu'on s'en approche le plus. D'après l'équation d'état des gaz parfaits, la masse d'air inspirée en une inspiration vaut :

$$m = \frac{MP_4V}{RT_4} = 6,0 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

5) Un tube de possède pas de pièce mobile, le fluide ne reçoit donc pas de travail. D'après le premier principe industriel appliqué au fluide en écoulement stationnaire entre le début et la fin du tube séparant les deux détendeurs :

$$\Delta H = m(h_3 - h_2) = Q_{23} \Rightarrow Q_{23} = 21 \text{ J}$$

par lecture graphique du diagramme : $h_2 = 485 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $h_3 = 520 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

D'après le second principe, la variation d'entropie de la masse d'air pendant tout le processus vaut :

$$\Delta S = m(s_4 - s_1) = S_e + S_c = \frac{Q_{tot}}{T_{eau}} + S_c = \frac{Q_{23}}{T_{eau}} + S_c$$

Par lecture graphique : $s_4 = 3,92 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $s_1 = 2,30 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$. Donc :

$$S_c = m(s_4 - s_1) - \frac{Q_{tot}}{T_{eau}} = 0,90 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$$