Physique
Semestre de printemps 2025

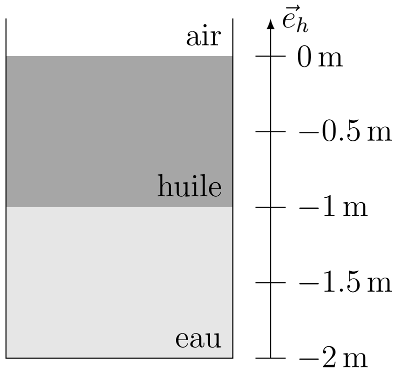
Roger Sauser
Raphaël Butté
Guido Burmeister

https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=15842

Corrigé 5

Exercice 1

C'est une application de la loi de l'hydrostatique.
Faire un dessin.



Considérer les profondeurs successives.
La loi de l'hydrostatique donne la différence de pression entre deux niveaux dans un même fluide :

$$p(h_1) - p(h_2) = \varrho_{\text{fluide}} g(h_2 - h_1) \quad \text{ou} \quad \Delta p = -\varrho_{\text{fluide}} g \Delta h\,.$$

La pression de référence (celle qui est donnée) est celle de l'air.

- $h_0 = 0\,\text{m}$: interface air-huile

$$p_0 = p_a = 1\,\text{atm} = 1.013 \cdot 10^5\,\text{Pa}$$

- $h_1 = -0.5\,\text{m}$: dans l'huile

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0 + \varrho_{\text{huile}} g(h_0 - h_1) \\ &= 1.013 \cdot 10^5\,\text{Pa} + 0.84 \cdot 10^3\,\text{kg}\,\text{m}^{-3} \cdot 9.81\,\text{m}\,\text{s}^{-2} \cdot (0\,\text{m} + 0.5\,\text{m}) \\ &= 1.013 \cdot 10^5\,\text{Pa} + 4.120 \cdot 10^3\,\text{Pa} = 1.054 \cdot 10^5\,\text{Pa} \end{aligned}$$

- à $h_2 = -1\,\text{m}$: interface huile-eau
  Remarque : la différence de pression sur $0.5\,\text{m}$ de profondeur dans l'huile est

$$\Delta p = 4.120 \cdot 10^3\,\text{Pa}\,.$$

  Ainsi

$$p_2 = p_1 + \Delta p = 1.054 \cdot 10^5\,\text{Pa} + 4.120 \cdot 10^3\,\text{Pa} = 1.095 \cdot 10^5\,\text{Pa}$$

- à $h_3 = -1.5\,\text{m}$: dans l'eau

$$\begin{aligned} p_3 &= p_2 + \varrho_{\text{eau}} g(h_2 - h_3) \\ &= 1.095 \cdot 10^5\,\text{Pa} + 10^3\,\text{kg}\,\text{m}^{-3} \cdot 9.81\,\text{m}\,\text{s}^{-2} \cdot (-1\,\text{m} + 1.5\,\text{m}) \\ &= 1.095 \cdot 10^5\,\text{Pa} + 4.905 \cdot 10^3\,\text{Pa} = 1.144 \cdot 10^5\,\text{Pa} \end{aligned}$$

- à $h_4 = -2\,\text{m}$: interface eau-fond du bac
  Remarque : la différence de pression sur $0.5\,\text{m}$ de profondeur dans l'eau est

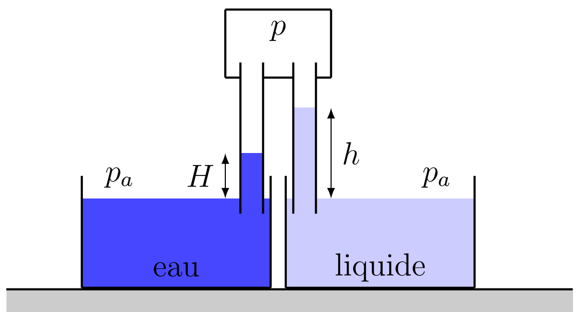
$$\Delta p = 4.905 \cdot 10^3\,\text{Pa}\,.$$

  Ainsi

$$p_4 = p_3 + \Delta p = 1.144 \cdot 10^5\,\text{Pa} + 4.905 \cdot 10^3\,\text{Pa} = 1.193 \cdot 10^5\,\text{Pa}$$

Exercice 2

Après avoir modélisé la situation (en s'aidant d'un dessin), on exploite la loi de l'hydrostatique.
Nous allons supposer que la pression à la surface des liquides est p_a (pression extérieure) et que la pression dans les pailles (c'est-à-dire dans la bouche de la personne aspirant) est p. La situation peut alors être schématisée de la manière suivante :

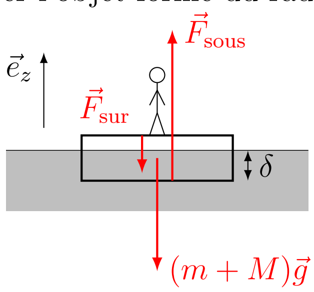


Selon la loi de l'hydrostatique :

$$\left.\begin{array}{rcl} p_a - p & = & \rho_{\text{eau}} g H \\ & = & \rho_{\text{liquide}} g h \end{array}\right\} \Rightarrow \quad d = \frac{\rho_{\text{liquide}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{H}{h} < 1\,.$$

Exercice 3

Variante 1 : utiliser la loi de l'hydrostatique.
Considérer l'objet formé du radeau et de la personne.



Objet : personne et radeau

Forces : poids, forces de pression

$$(m+M)\vec{g} + \vec{F}_{\text{sous}} + \vec{F}_{\text{sur}} = \vec{0}\,,$$

avec $M = \rho a b h\,.$

Utiliser la projection selon le repère.
Selon $\vec{e}_z$:

$$-(m+M)g + p_{\text{sous}} a b - p_{\text{sur}} a b = 0\,.$$

En admettant que la pression de l'air est uniforme, on a

$$p_{\text{sur}} = p_{\text{air}}$$

et, par la loi de l'hydrostatique,

$$p_{\text{sous}} - p_{\text{air}} = \rho_{\text{eau}} g \delta\,.$$

Alors $-(m+\rho abh)g + \rho_{\text{eau}} g\delta ab = 0$

$$\Rightarrow \delta = \frac{m+\rho abh}{\rho_{\text{eau}} ab} = \frac{60\,\text{kg} + 0.9\,10^3\,\text{kg}\,\text{m}^{-3}\cdot 4\,\text{m}\cdot 3\,\text{m}\cdot 0.1\,\text{m}}{10^3\,\text{kg}\,\text{m}^{-3}\cdot 4\,\text{m}\cdot 3\,\text{m}} = 9.5\,\text{cm}$$

Lorsque la personne quitte le radeau, $m = 0$ et

$$\delta = \frac{\rho abh}{\rho_{\text{eau}} ab} = \frac{\rho h}{\rho_{\text{eau}}} = 9\,\text{cm}.$$

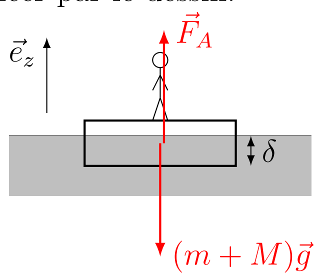
La hauteur immergée diminue donc de 5 mm.
Remarque : comment peut-on tenir compte du fait que la pression de l'air n'est pas uniforme ?
Considérer l'air comme un fluide pesant ($\rho_{\text{air}} = 1.3\,\text{kg}\,\text{m}^{-3}$).
Si l'on tient compte de la variation de la pression de l'air entre la surface du radeau et le niveau de l'eau, l'enfoncement du radeau dans l'eau est légèrement plus petit :

$$p_{\text{sous}} - p_{\text{sur}} = p_{\text{sous}} - p_{\text{interface}} + p_{\text{interface}} - p_{\text{sur}} = \rho_{\text{eau}} g\delta + \rho_{\text{air}} g(h-\delta)\,.$$

Alors ($\rho_{\text{air}} = 1.3\,\text{kg}\,\text{m}^{-3}$)

$$\delta = \frac{m + (\rho - \rho_{\text{air}})abh}{(\rho_{\text{eau}} - \rho_{\text{air}})ab} = 9.499\,\text{cm}\,.$$

Variante 2 : utiliser la poussée d'Archimède
Commencer par le dessin.



Objet : personne et radeau

Forces : poids, poussée d'Archimède

$$(m+M)\vec{g} + \vec{F}_A = \vec{0}\,,$$

avec $M = \rho abh$.

Considérer l'air comme un fluide sans masse.
En admettant que la poussée d'Archimède due à l'air est négligeable, on a selon $\vec{e}_z$:

$$-(m+M)g + F_{A,\text{eau}} = -(m+M)g + \rho_{\text{eau}} ab\delta g = 0 \Rightarrow \delta = \frac{m+\rho abh}{\rho_{\text{eau}} ab} = 9.5\,\text{cm}.$$

Lorsque la personne quitte le radeau, $m = 0$ et

$$\delta = \frac{\rho abh}{\rho_{\text{eau}} ab} = \frac{\rho h}{\rho_{\text{eau}}} = 9\,\text{cm}.$$

La hauteur immergée diminue donc de 5 mm.
Si l'on tient compte de la poussée d'Archimède due à l'air, l'enfoncement du radeau dans l'eau est légèrement plus petit :

$$-(m+M)g + F_{A,\text{eau}} + F_{A,\text{air}} = -(m+M)g + \rho_{\text{eau}} ab\delta g + \rho_{\text{air}} ab(h-\delta)g = 0$$

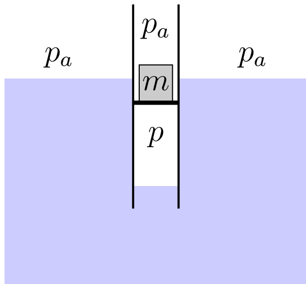
et alors

$$\delta = \frac{m + (\rho - \rho_{\text{air}})abh}{(\rho_{\text{eau}} - \rho_{\text{air}})ab} = 9.499\,\text{cm}\,.$$

Exercice 4

(a) On commence par faire un schéma de la situation d'équilibre, avant d'exploiter la deuxième loi de Newton.

Appelons p_a la pression au-dessus de la surface de l'eau et p la pression du gaz enfermé dans le tube à l'équilibre.



A l'équilibre

Le système du piston et de la masse est au repos. Selon la verticale, la deuxième équation de Newton appliquée à l'objet “piston” s'écrit, en projetant les forces selon la verticale vers le bas,

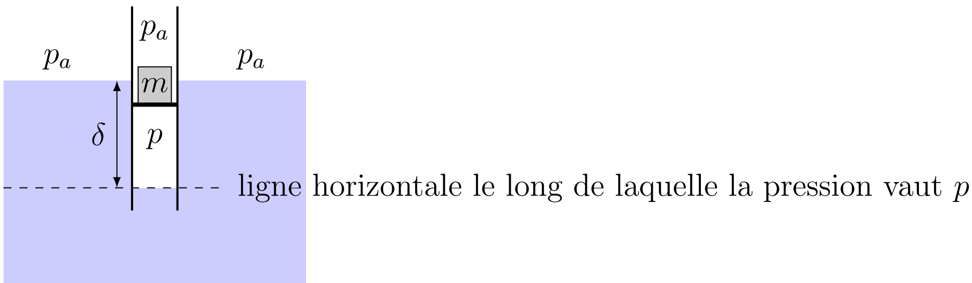
$$mg + p_a S - pS = 0\,.$$

Ainsi, la pression du gaz enfermé par le piston dans le tube a pour expression

$$p = p_a + \frac{mg}{S}\,.$$

(b) On exploite le résultat du point (a) et la loi de l'hydrostatique.

Appelons p_a la pression au-dessus de la surface de l'eau et p la pression du gaz enfermé dans le tube à l'équilibre.



A l'équilibre

Selon la loi de l'hydrostatique, la différence de pression entre les niveaux intérieur et extérieur est donnée par

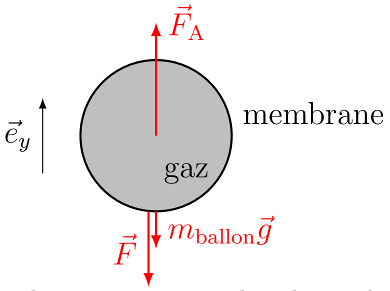
$$p - p_a = \rho_{\text{eau}} g \delta\,.$$

Or, selon le point (a), $p - p_a = mg/S$, si bien que la différence de niveau entre l'eau à l'extérieur et l'eau à l'intérieur du tube a pour expression

$$\delta = \frac{m}{\rho_{\text{eau}} S}\,.$$

Exercice 5

Considérer l'objet formé du gaz dans le ballon et de l'enveloppe de celui-ci.



Objet : ballon (gaz et membrane)

Forces : poids, poussée d'Archimède, tension

$$m_{\text{ballon}}\vec{g} + \vec{F}_{\text{A}} + \vec{F} = \vec{0}\,,$$

avec $m_{\text{ballon}} = m_{\text{gaz}} + m$ et $\vec{F}_{\text{A}} = -\rho_{\text{air}} V_{\text{ballon}}\vec{g}$.

Utiliser la projection selon le repère.
Selon $\vec{e}_y$:

$$-m_{\text{ballon}}g + \rho_{\text{air}} V_{\text{ballon}} g - F = 0\,.$$

Ainsi

$$\begin{aligned}
m_{\text{gaz}} g &= \rho_{\text{air}} V_{\text{ballon}} g - mg - F \\
\rho_{\text{gaz}} V_{\text{ballon}} g &= \rho_{\text{air}} V_{\text{ballon}} g - mg - F \\
\rho_{\text{gaz}} &= \frac{\rho_{\text{air}} V_{\text{ballon}} g - mg - F}{V_{\text{ballon}} g}\,.
\end{aligned}$$

Avec

$$V_{\text{ballon}} = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 = \frac{\pi}{6}(0.3\,\text{m})^3 = 0.0141\,\text{m}^3,,$$

nous avons

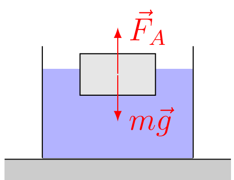
$$\begin{aligned}
\rho_{\text{gaz}} &= \frac{(\rho_{\text{air}} V_{\text{ballon}} - m)g - F}{V_{\text{ballon}} g} \\
&= \frac{(1.293\,\text{kg}\,\text{m}^{-3} \cdot 0.0141\,\text{m}^3 - 4.5 \cdot 10^{-3}\,\text{kg}) \cdot 9.81\,\text{m}\,\text{s}^{-2} - 0.08\,\text{N}}{0.0141\,\text{m}^3 \cdot 9.81\,\text{m}\,\text{s}^{-2}} \\
&= 0.395\,\text{kg}\,\text{m}^{-3}.
\end{aligned}$$

Exercice 6

On détermine le volume d'eau déplacé par le glaçon et on compare ce volume au volume qu'occupe la glace lorsqu'elle a fondu.

- **Volume immergé**

  En négligeant la poussée d'Archimède due à l'air, le glaçon de masse m à l'équilibre subit son poids et la poussée d'Archimède due à l'eau :

  $$\vec{F}_A = -\rho_{\text{eau}} V_{\text{immergé}}\,\vec{g}$$

  La deuxième loi de Newton appliquée au glaçon qui flotte sur l'eau s'écrit, lorsqu'elle est projetée le long d'un axe vertical vers le haut,

  $$\rho_{\text{eau}} V_{\text{immergé}}\, g - mg = 0\,.$$

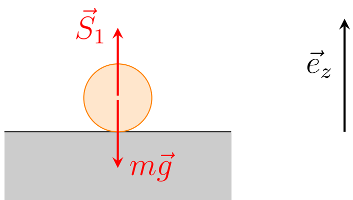
  Ainsi, le volume d'eau déplacé par le glaçon est

  $$V_{\text{immergé}} = \frac{m}{\rho_{\text{eau}}}\,.$$

- **Volume occupé par le glaçon lorsqu'il a fondu**
La masse de l'eau obtenue en fondant le glaçon est égale à la masse du glaçon (la quantité de matière est indépendante de son état, solide ou liquide). Lorsque le glaçon s'est transformé en eau, il occupe donc un volume donné par
$$V_{\text{glaçon fondu}} = \frac{m}{\rho_{\text{eau}}}\,.$$
- **Conclusion**
Comme
$$V_{\text{immergé}} = V_{\text{glaçon fondu}}\,,$$
la hauteur d'eau dans le récipient ne varie pas lors de la fonte du glaçon.

Remarque
Un iceberg flottant ne va donc pas faire augmenter le niveau des mers en fondant. Tout au moins, si l'on néglige le fait que l'iceberg est la plupart du temps constitué d'eau douce, alors que l'eau de mer est salée.

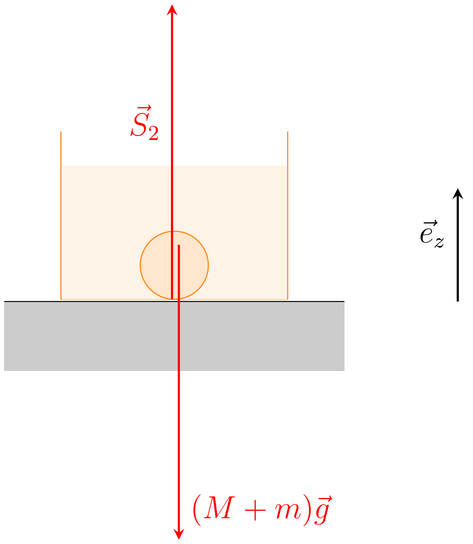
Exercice 7
Chacune des pesées exprime un équilibre. Nous allons donc dans chacune des pesées choisir un objet et l'étudier en écrivant la deuxième loi de Newton dans le cas d'une accélération nulle. Les relations obtenues vont nous permettre d'exprimer la densité $d_m = \rho_m/\rho_{\text{eau}}$ de la masse m en fonction des pesées S_i , $i = 1, 2, 3$.
On étudie la première pesée :



- Objet : masse m
- Forces (externes) : poids $m\vec{g}$ et soutien $\vec{S}_1$ de la balance.
- Deuxième loi de Newton (sous forme vectorielle) :
$$m\vec{g} + \vec{S}_1 = \vec{0}\,.$$
- Projection par rapport au repère choisi :
  selon $\vec{e}_z$:
$$-mg + S_1 = 0\,.$$

Ainsi,
$$mg = S_1\,.$$

On considère la deuxième pesée :



- Objet : masse m et récipient rempli d'eau (masse M)
- Forces (externes) : poids $(M+m)\vec{g}$ et soutien $\vec{S}_2$ de la balance
- Deuxième loi de Newton (sous forme vectorielle) :

$$(M+m)\vec{g}+\vec{S}_2=\vec{0}\,.$$

- Projection par rapport au repère choisi :

  selon $\vec{e}_z$:

$$-(M+m)g+S_2=0\,.$$

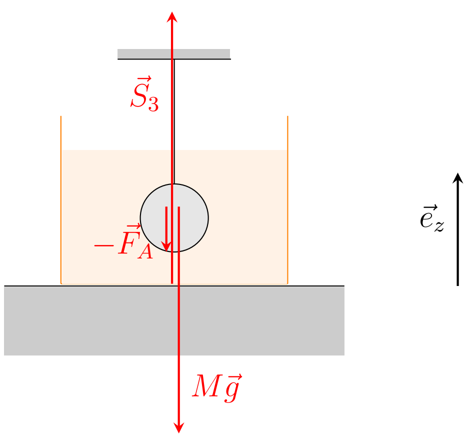
En utilisant le résultat de la première étape, il vient alors

$$Mg=S_2-mg=S_2-S_1\,.$$

Remarque

La masse m subit la pousée d'Archimède due à la présence du fluide (l'eau). Cette force est une force *interne* de l'objet "masse m et récipient rempli d'eau". Par le principe action=réaction, une force de même direction et de même norme, mais de sens opposé, agit sur le fluide. Ces deux forces se compensent et n'interviennent donc pas dans la deuxième loi de Newton appliquée à l'objet considéré.

On étudie la troisième pesée :



- Objet : récipient rempli d'eau (masse M)
- Forces (externes) : poids $M\vec{g}$, soutien $\vec{S}_3$ de la balance et résultante $-\vec{F}_A$ des forces de pression dues à la présence de la masse m
- Deuxième loi de Newton (sous forme vectorielle) :

$$M\vec{g} + \vec{S}_3 - \vec{F}_A = \vec{0}\,.$$

- Projection par rapport au repère choisi :

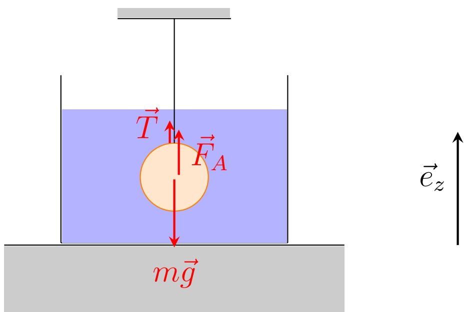
  selon $\vec{e}_z$:

$$-Mg + S_3 - F_A = 0\,.$$

La résultante des forces de pression dues à la présence de la masse m est égale (au signe près : action=réaction) à la poussée d'Archimède $\vec{F}_A$ que subit la masse m. Comme $\vec{F}_A = -\rho_{\text{eau}} V_m\, \vec{g}$, l'équation ci-dessus s'écrit

$$-Mg + S_3 - \rho_{\text{eau}} V_m\, g = 0 \quad \Rightarrow \quad \rho_{\text{eau}} V_m\, g = S_3 - Mg\,.$$

Remarque
On aurait également pu étudier l'objet "masse m" :



- Objet : masse m
- Forces (externes) : poids $m\vec{g}$, tension $\vec{T}$ du fil et poussée d'Archimède $\vec{F}_A$.
- Deuxième loi de Newton (sous forme vectorielle) :

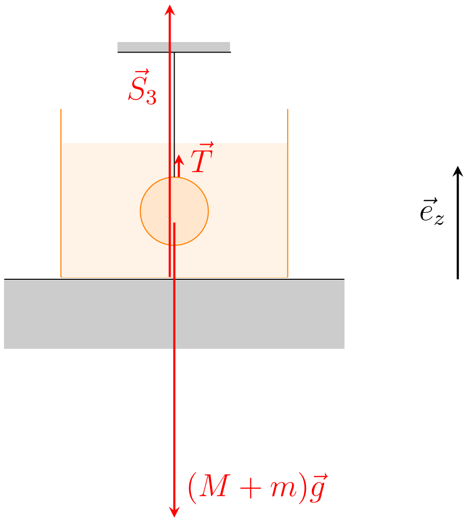
$$m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F}_A = \vec{0}\,.$$

- Projection par rapport au repère choisi :

  selon $\vec{e}_z$:

$$-mg + T + \rho_{\text{eau}} V_m\, g = 0 \quad \Rightarrow \quad \rho_{\text{eau}} V_m\, g = mg - T\,.$$

Il faut alors trouver une relation entre T et S_3. Pour ce faire, on étudie l'objet "masse m et récipient rempli d'eau" :



- Objet : masse m et récipient rempli d'eau (masse M)
- Forces (externes) : poids $(M+m)\vec{g}$, tension $\vec{T}$ du fil et soutien $\vec{S}_3$ de la balance.
- Deuxième loi de Newton (sous forme vectorielle) :

$$(M+m)\vec{g}+\vec{T}+\vec{S}_3=\vec{0}\,.$$

- Projection par rapport au repère choisi :

  selon $\vec{e}_z$:

$$T+S_3-(M+m)g=0 \quad\Rightarrow\quad T=(M+m)g-S_3\,.$$

On peut alors remplacer T par son expression en fonction de S_3 dans l'équation obtenue pour l'objet "masse m" :

$$\rho_{\text{eau}}V_m\,g=mg-T=mg-(M+m)g+S_3=S_3-Mg\,.$$

On retrouve bien le même résultat.
Par définition, la densité d_m de la masse m s'écrit

$$d_m=\frac{\rho_m}{\rho_{\text{eau}}}\,.$$

En amplifiant par $V_m g$ et en utilisant $m=\rho_m V_m$ ainsi que les résultats des étapes précédentes, il vient alors

$$d_m=\frac{\rho_m V_m g}{\rho_{\text{eau}}V_m g}=\frac{mg}{S_3-Mg}=\frac{S_1}{S_3+S_1-S_2}\,.$$

Finalement, on utilise les valeurs numériques obtenues lors des pesées successives :

$$d_m=\frac{3\,\text{N}}{22\,\text{N}+3\,\text{N}-23\,\text{N}}=1.5\,.$$

Remarque
En résumé,

$$mg=S_1=3\,\text{N},\quad (M+m)g=S_2=23\,\text{N},$$

$$Mg=S_2-S_1=23-3=20\,\text{N},$$

$$F_A=S_3-Mg=22-20=2\,\text{N}\quad\text{et}$$

$$T=S_2-S_3=23-22=1\,\text{N}\,.$$

Exercice 8

En amenant la boîte à sa position sous l'eau, on comprime l'air enfermé, ce qui modifie le volume qu'il occupe.
Objet : air et boîte

Forces : poids, poussée d'Archimède, tension.

Newton :

$$m\vec{g} - \varrho_{\text{eau}} V_{\text{im}} \vec{g} + \vec{T} = \vec{0}\,.$$

Selon la verticale,

$$T = \varrho_{\text{eau}} V_{\text{im}} g - mg = (\varrho_{\text{eau}} V_{\text{im}} - m)g\,.$$

On peut raisonnablement négliger la masse de l'air enfermé devant la masse de la boîte. En négligeant également l'épaisseur des parois de la boîte, on a

$$V_{\text{im}} = V_{\text{air}} = Sh\,,$$

h étant la hauteur d'air dans la boîte ($0 < h < H$).

V_{air} est le volume d'air enfermé dans la boîte. L'air ne s'étant pas échappé lors de la descente, le nombre de molécules a été conservé.

- Air dans la boîte hors de l'eau : $p_0 V_0 = NkT_0$. La pression est celle de l'air ambiant, tout comme la température :

$$p_a SH = NkT_0\,.$$

- Air dans la boîte sous l'eau : $p_1 V_1 = NkT_1$. Le volume est $V_1 = V_{\text{air}} = Sh$ et la température est celle de l'eau dont on peut supposer qu'elle est la même que celle de l'air ambiant.

$$p_1 Sh = NkT_0\,.$$

Ainsi

$$p_a SH = NkT_0 = p_1 Sh \Leftrightarrow p_a H = p_1 h\,.$$

La pression de l'air enfermé est aussi celle de l'eau au niveau de l'interface air-eau dans la boîte.
Selon la loi de l'hydrostatique pour l'eau entre la surface de l'eau et la profondeur $\delta + h$,

$$p_1 - p_a = \varrho_{\text{eau}} g(\delta + h)\,.$$

Ainsi

$$p_a H = p_1 h = \big(p_a + \varrho_{\text{eau}} g(\delta + h)\big)h \Leftrightarrow \varrho_{\text{eau}} g h^2 + (p_a + \varrho_{\text{eau}} g\delta)h - p_a H = 0\,.$$

Posons $r = \dfrac{p_a}{\varrho_{\text{eau}} g} = 10\,\text{m}$. Alors

$$h^2 + (r + \delta)h - rH = 0\,.$$

Les solutions en h à cette équation du second degré sont

$$h = \frac{-(r+\delta) \pm \sqrt{(r+\delta)^2 + 4rH}}{2}\,.$$

Comme $h > 0$, nous avons

$$h = \frac{-(r+\delta) + \sqrt{(r+\delta)^2 + 4rH}}{2} = \frac{-13\,\text{m} + \sqrt{(13\,\text{m})^2 + 120\,\text{m}^2}}{2} = 2\,\text{m}\,.$$

Le volume de l'air comprimé est alors

$$V_{\text{air}} = V_{\text{im}} = Sh = 2\,\text{m}^3$$

et la tension

$$T = (\varrho_{\text{eau}} V_{\text{im}} - m)g = (2 \cdot 10^3\,\text{kg} - 1 \cdot 10^3\,\text{kg})\,10\text{m}\,\text{s}^{-2} = 10^4\,\text{N}\,.$$