Fiche-professeur :

Entraînement des astronautes : une plongée dans l'espace

Classes de 3e à 1ère

Markus Nielbock
traduction française : Paola Kiehl

5 décembre 2019

Résumé

La poussée d'Archimède apparaît souvent comme un principe assez abstrait. On abordera donc les phénomènes de flottabilité en s'intéressant à un exemple à la fois concret et passionnant : les entraînements aux sorties dans l'espace, sous l'eau. En effet, les équipages de l'ISS s'entraînent inlassablement dans d'immenses bassins afin de se préparer aux sorties extravéhiculaires. Afin de simuler un état d'impesanteur sous l'eau, les combinaisons des astronautes sont équipées de poids et de flotteurs. Cette fiche d'activité permettra aux élèves de découvrir le lien qui unit les forces de poids et de flottaison, au fil d'exercices et d'expériences à réaliser en classe.

Objectifs

Au travers de cette activité, les élèves pourront :

- mesurer le poids et le volume d'un corps,
- faire flotter un corps lors d'une expérience en classe,
- calculer le poids et la flottabilité à travers divers exemples.

Matériel

- Fiches de travail (disponibles sur : http://www.haus-der-astronomie.de/raum-fuer-bildung)
- Stylo, calculatrice
- Un récipient transparent rempli d'eau (env. 15 ℓ pour env. 25 cm de haut)
- Une boule en polystyrène (d'env. 5 cm de diamètre)
- Un crochet à vis (si possible avec filetage)
- Des poids (vis, écrous, trombones) ainsi qu'une pince coupante
- Une balance de cuisine numérique (d'env. 0,1 g de précision)

Mots-clés

Station spatiale internationale, ISS, sortie extravéhiculaire, combinaison spatiale, flottabilité, pression hydrostatique, poussée d'Archimède.

Durée

120 minutes

Contexte

La station spatiale internationale (ISS)

Figure 1 – L'ISS en 2011 (Image : NASA).

La station spatiale internationale (ISS, Fig. 1) est en constante évolution : depuis sa construction en 1998, (Loff 2013) différents modules (Fig. 2) viennent régulièrement la compléter (Zak 2017). Depuis l'an 2000, l'ISS est constamment occupée par un équipage (DLR 2018). La station restera en service jusqu'en 2024 au minimum, mais son exploitation se prolongera sûrement jusqu'en 2028, voire 2030 (Foust 2018 ; Sputnik 2016 ; Ulmer 2015). La structure de l'ISS pèse 420 tonnes, mesure 109 mètres de long, 73 mètres de large (Garcia 2016) et 45 mètres de haut (ESA 2014). Située à 400 kilomètres d'altitude, la station spatiale internationale parcourt l'orbite terrestre en 92 minutes (Howell 2018).

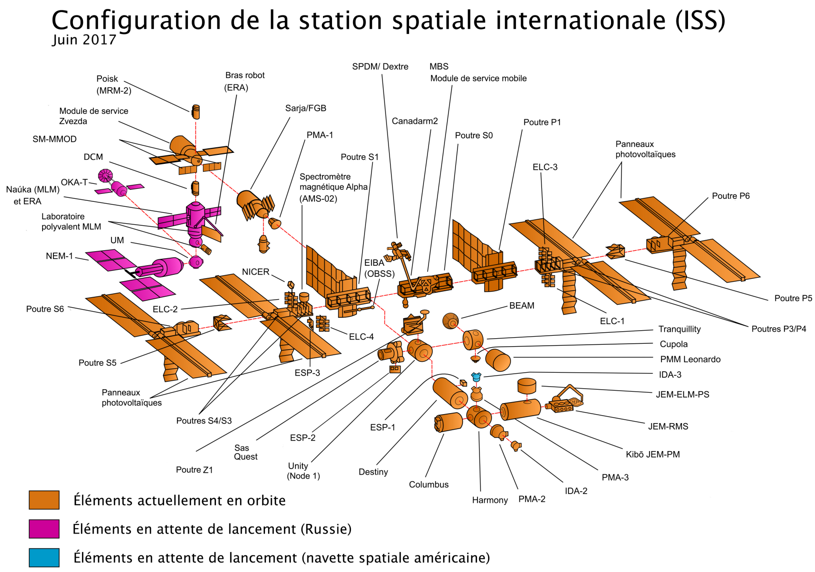


Figure 2 – Les modules de la station spatiale en juin 2017 (Image : NASA ; traduction française : P. Kiehl).

L'ISS est un programme international qui rassemble actuellement 15 pays (ESA 2013a ; Garcia 2018). La station sert de laboratoire de recherche et permet ainsi de mener des expériences que certains facteurs, comme la gravité terrestre, pourraient entraver. En effet, la microgravité qui agit à bord de la station engendre un état de quasi impesanteur (Schüttler

2006). L'ISS permet également d'aborder la question de la médecine spatiale. L'influence de la microgravité développe chez les équipages des symptômes semblables à ceux de maladies terrestres. Les recherches menées au sein de l'ISS ont pour objectifs de mieux comprendre l'environnement de la station, de développer la recherche médicale et thérapeutique (Bührke 2018) et, enfin, d'optimiser les conditions de préparation des futures missions au sein du système solaire (Ganse 2018).

Parfois, les astronautes de l'ISS doivent effectuer des sorties extravéhiculaires, ou activités extravéhiculaires (EVA, *Extra-Vehicular Activity*), à des fins d'assemblage, de maintenance ou de réparation.

L'entraînement des astronautes

Les opérations qui se déroulent à l'extérieur de la coque pressurisée de l'ISS sont nécessaires[1]. En effet, de nombreuses EVA ont permis de mener à bien la construction de la station spatiale. Lors des sorties extravéhiculaires, le port d'une combinaison spatiale est indispensable. Elle permet d'assurer la survie des astronautes dans l'espace et offre une protection, au moins partielle, contre l'absence de pression extérieure et les radiations électromagnétiques. Mais l'épaisseur des gants, la rigidité de la combinaison ainsi que les difficultés de déplacement et de manipulation obligent les astronautes à se soumettre à un entraînement intensif.

Figure 3 – Sortie extra-véhiculaire de l'astronaute Thomas Pesquet en janvier 2017 (Image : ESA).

Les entraînements qui permettront aux équipages de l'ISS d'effectuer des opérations de routine dans l'espace en toute sécurité ont lieu sur terre, dans un immense bassin (ESA 2013b ; Gast et Moore 2009). Les astronautes, vêtus de leur combinaison, flottent sous l'eau dans un état impesanteur proche de celui qu'ils retrouveront à bord de l'ISS. Cependant, l'eau exerce une résistance que l'on ne retrouve pas dans l'espace. De plus, les astronautes ne sont pas réellement en impesanteur dans leur bassin : ils sont simplement maintenus en suspension grâce à la poussée d'Archimède.

Occupée, la combinaison spatiale EMU (Extra-véhicular Moblity Unit) pèse environ 200 kg (Tate 2013 ; Thomas et McMann 2011). Durant l'entraînement, la pression atmosphérique à l'intérieur de l'EMU est réduite à 0,3 bar (4,3 PSI) (Hutchinson 2013). La combinaison se gonfle alors légèrement, ce qui rend la flottabilité possible. Le subtil équilibre entre poids et flottabilité est primordial afin de maintenir les astronautes dans un état d'équilibre neutre.

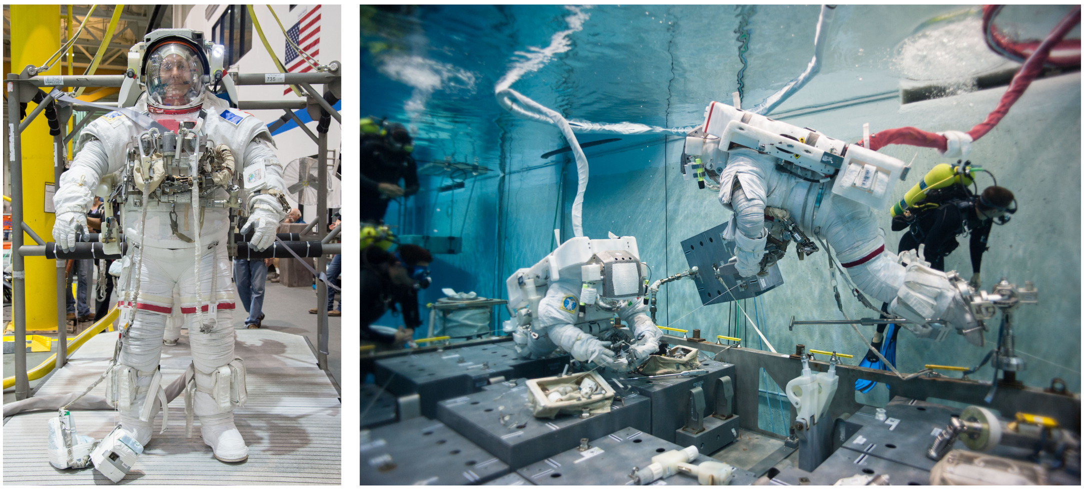


Figure 4 – À gauche : Le Français Thomas Pesquet, équipé pour une séance d'entraînement. À droite : Accompagnés par une équipe de plongeurs, les astronautes effectuent des opérations complexes pendant plusieurs heures. (Images : NASA).

Les entraînements des astronautes de l'Agence spatiale européenne (ESA) se déroulent au *Neutral Buoyancy Facility* à l'EAC de Cologne ainsi qu'au *Neutral Buoyancy Lab* de la NASA à Houston, au Texas.

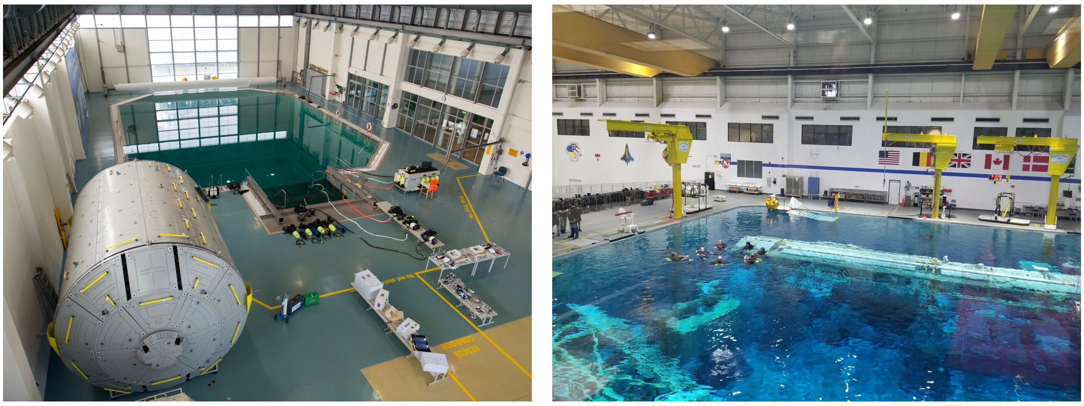


Figure 5 – À gauche : le bassin du Neutral Buoyancy Facility de l'ESA à l'EAC de Cologne (Image : ESA–S. Corvaja, 2015). À droite : le NBL (Neutral Buoyancy Lab) de la NASA dont le bassin accueille une réplique partielle de l'ISS. (Image : CCicalese (WMF), CC BY 4.0).

Dans la perspective d'une nouvelle exploration lunaire, cette méthode d'entraînement pourrait permettre de simuler la gravité réduite de notre satellite. L'étude Moondive (ESA 2018) a permis de développer un catalogue d'éléments nécessaires à la réalisation d'une telle simulation et de réfléchir à l'adaptabilité des infrastructures et des formations existantes.

La pression hydrostatique

La pression hydrostatique permet de mieux comprendre la flottabilité d'un corps dans un liquide tel que l'eau. On appelle pression hydrostatique la pression qu'exerce l'eau sur la surface d'un corps immergé, cf Fig. 6.

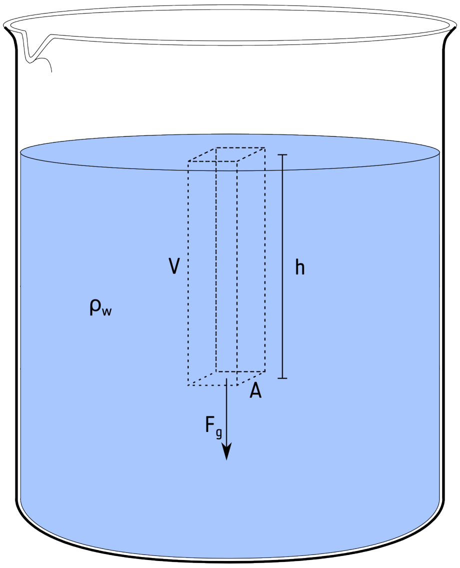


Figure 6 – On observe ici les causes de la pression hydrostatique (graphique : Markus Nielbock).

On représente un bécher rempli d'eau. On imagine une surface A, de hauteur h qui forme le volume V d'une colonne d'eau (colonne en pointillés). Cette eau de densité ϱ_w exerce sur A la force de gravité F_g, soit la masse de la colonne d'eau $m_w = \varrho_w \cdot V$. Ainsi :

$$\begin{aligned} F_g &= m_w \cdot g \\ &= \varrho_w \cdot V \cdot g \\ &= \varrho_w \cdot h \cdot A \cdot g \end{aligned} \tag{1}$$

$$\Leftrightarrow p = \frac{F_g}{A} = \varrho_w \cdot h \cdot g \tag{2}$$

Ainsi, on observe que la pression p augmente proportionnellement à la profondeur de l'eau h. La surface du liquide est également soumise à la pression atmosphérique (p_0) ; il faudra ajouter cette dernière à la pression de la colonne d'eau dans le calcul de la pression hydrostatique totale. Ainsi :

$$p = \varrho \cdot g \cdot h + p_0 \tag{3}$$

La flottabilité

Le champ gravitationnel g entraîne vers le centre de la Terre un objet de masse m soumis à une force de poids $F_g = m \cdot g$. Cependant, si l'on immerge l'objet dans un récipient avec de l'eau, la flottabilité F_a réduit l'effet de F_g. Fig. 7 : on observe un corps de volume V, de surface A et de masse m. La face supérieure de l'objet est de profondeur h_0, la face inférieure de profondeur h_1. Ainsi, l'objet est de hauteur $\Delta h = h_1 - h_0$ avec $V = A \cdot \Delta h$. On détermine alors la pression hydrostatique p à l'aide de h_0 et h_1.

$$p(h_0) = \varrho_w \cdot g \cdot h_0 + p_0$$

$$p(h_1) = \varrho_w \cdot g \cdot h_1 + p_0$$

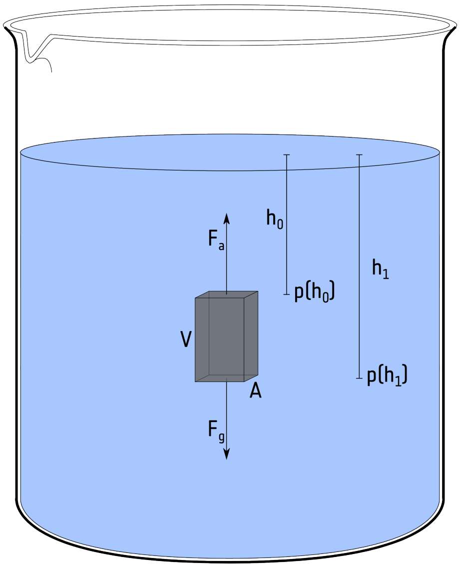


Figure 7 – On observe ici le phénomène de flottabilité d'un corps de volume V sous l'eau (graphique : Markus Nielbock).

Puisque $h_1 > h_0$, alors $p(h_1) > p(h_0)$. La force $F = p \cdot A$ agissant sur A est donc supérieure dans le cas de h_1. Ainsi, la pression exercée sur la face inférieure du corps (vers le haut) l'emporte sur la pression exercée sur la face supérieure du corps (vers le bas). Il en résulte une force verticale dirigée vers le haut, c'est-à-dire dans la direction opposée à la gravité : il s'agit de la force de flottabilité (ou de portance) F_a.

$$
\begin{aligned}
F_a &= \Delta p \cdot A = (p(h_1) - p(h_0)) \cdot A \\
&= (\varrho_w \cdot g \cdot h_1 + p_0 - (\varrho_w \cdot g \cdot h_0 + p_0)) \cdot A \\
&= \varrho_w \cdot g \cdot (h_1 - h_0) \cdot A \\
&= \varrho_w \cdot g \cdot \Delta h \cdot A \\
&= \varrho_w \cdot g \cdot V && (4) \\
&= m_w \cdot g && (5)
\end{aligned}
$$

Selon le **principe d'Archimède**[2] :

> «La flottabilité est la force verticale exercée de bas en haut sur un objet immergé dans un fluide.»

Selon la différence entre la poussée d'Archimède et le poids réel, on distingue trois cas de figure :

— $F_g > F_a$: l'objet coule.
— $F_g < F_a$: l'objet remonte à la surface.
— $F_g = F_a$: l'objet flotte sous l'eau, en équilibre neutre.

Ce dernier cas permet aux astronautes de flotter dans les bassins d'entraînement. Mais comment peut-on obtenir un tel équilibre des forces ? Pour le savoir, on calcule :

$$F_g = F_a \tag{6}$$

$$\Leftrightarrow m \cdot g = m_w \cdot g$$

$$\Leftrightarrow \varrho_k \cdot V \cdot g = \varrho_w \cdot V \cdot g$$

$$\Leftrightarrow \varrho_k = \varrho_w \tag{7}$$

Un objet flotte lorsque sa densité ϱ_k correspond à celle du liquide dans lequel il est immergé – ici, de l'eau. En revanche, si la densité de l'objet est trop élevée, il coule. Pour réduire la densité, on augmente le volume sans augmenter la masse. Dans le cas des entraînements en bassin, on équipe la combinaison des astronautes de flotteurs remplis d'air jusqu'à atteindre la densité moyenne de l'eau, ce qui permet aux astronautes de flotter[3].

Fiche d'activité :

Fiche du professeur : prérequis à la pratique de l'activité

— Se familiariser avec les fiches d'exercices et prévoir le nombre requis de photocopies.
— Prévoir le matériel nécessaire à la réalisation des expériences en classe (voir page 1)
— Disposer d'une connexion internet dans la salle de classe afin de projeter les vidéos listées ci-dessous. Il est également possible de proposer aux élèves de visionner les vidéos chez eux et d'explorer, dans le même temps, les sites de la NASA et de l'ESA à la recherche d'informations utiles à la compréhension du sujet.

Toutes les expériences de cette fiche d'activité ont été mises en place et testées par l'auteur. Il possible d'utiliser des matériaux légèrement différents que ceux listés en page 1, comme des sphères en polystyrène plus petites, qui généreront moins de flottabilité. Il est toutefois déconseillé d'utiliser des sphères de plus grande taille, puisqu'elles nécessitent l'utilisation de poids beaucoup plus lourds et, par conséquent, de récipients d'eau bien plus grands. Il est conseillé de tester l'activité au préalable afin de déterminer la charge des poids nécessaire à la réussite de l'expérience.

Proposition d'introduction

Pour introduire le sujet, on interrogera les élèves sur leurs connaissances et leur compréhension des sorties extravéhiculaires. La discussion en classe peut s'accompagner de quelques vidéos.

L'équipement de Thomas Pesquet en vue d'une sortie extravéhiculaire prévue le 13 janvier 2017 (Durée : 2min08)
https://www.youtube.com/watch?v=cwQFqtKnBL8

Certaines sorties extravéhiculaires sont retransmises en direct sur le site de la NASA
https://www.nasa.gov/nasalive

France Télévisions a développé une expérience immersive en réalité virtuelle 360° permettant d'accompagner Thomas Pesquet dans son voyage et de vivre avec lui son entraînement et sa mission dans l'ISS. Téléchargez gratuitement l'application sur :
https://www.francetelevisions.fr/lab/projets/testez-une-experience-en-realite-virtuelle-avec-Thomas-Pesquet

L'entraînement des astronautes de la mission Proxima (Durée : 2min02)
https://www.youtube.com/watch?v=PcO-On7H1LQ

How Astronauts Train Underwater at NASA's Neutral Buoyancy Lab (Durée : 7min06, en anglais)
https://youtu.be/BRPb0J8lZcY

On interrogera les élèves sur ce qui fait que certains objets flottent, tandis que d'autres coulent. On prendra l'exemple de la pierre qui coule et de l'énorme bateau de croisière qui reste à la surface. On démontrera ainsi, que le poids ou la masse ne sont pas des facteurs déterminants de la flottabilité d'un objet. Le rapport masse/volume, ou la densité, est au cœur de ce phénomène.

On présentera aux élèves quelques vidéos récapitulatives sur la poussée d'Archimède.

L'énigme d'Archimède (Durée : 2min35)
https://www.youtube.com/watch?v=C-j3Dbfs_H4

Qu'est-ce que la poussée d'Archimède ? (Durée : 1min04)
https://www.youtube.com/watch?v=Id_0UAsJtz0

La poussée d'Archimède (Durée : 1min07)
https://www.youtube.com/watch?v=ekryR12B8BA

Enfin, on interrogera les élèves sur la spécificité les entraînements en bassin et sur les facteurs qui permettent aux astronautes de flotter. Il s'agit de trouver un équilibre très précis entre poids et flottabilité ; pour flotter, un objet doit avoir une densité proche de celle de l'eau.

Expérience

N.B. : le chapitre de la fiche élève est considérablement plus court, les étapes intermédiaires et les solutions des questions n'y figurant pas.

Cette expérience permet de comprendre pourquoi et comment un corps (ou, dans notre cas, un astronaute) flotte dans l'eau. On utilise ici une boule en polystyrène, c'est-à-dire un d'objet de faible densité, flottant à la surface de l'eau. On attachera ensuite un ensemble de petits poids (vis, écrous, trombones) à un crochet pour faire flotter la sphère sous l'eau (en équilibre neutre) et simuler ainsi un quasi état d'impesanteur. On observera qu'il est très difficile d'équilibrer poids et flottabilité avec précision.

Figure 8 – La boule en polystyrène et ses poids. On pèsera les différents éléments à l'aide d'une balance numérique. (Image : M. Nielbock).

Au début, la sphère flotte à la surface.

Figure 9 – La sphère flotte à la surface (Image : M. Nielbock).

Comment peut-on estimer la masse nécessaire pour que la boule en polystyrène flotte sous l'eau, en équilibre neutre ?

La poussée d'Archimède est égale au poids du volume d'eau déplacé par l'objet immergé. On peut donc, dans un premier temps, calculer le poids ou la masse d'eau correspondant au volume de la boule en polystyrène.

Ici, la sphère mesure 2,5 cm de rayon, soit un volume de 65,45 cm^3 ou $6,545 \cdot 10^{-5}\,\text{m}^3$. D'après la masse de l'eau du tableau 1, on peut calculer une masse de 65,25 g. On lestera

Table 1 – Grandeurs physiques et leurs unités

Grandeur	Symbole	Unité et valeur
Intensité de la pesanteur	g	9,81 m/s^2
Pression atmosphérique normale	p_0	1013,25 hPa = 101325 Pa
Densité de l'eau	ϱ_w	997 kg/m^3
Densité de l'or	ϱ_{Au}	1939 kg/m^3
Densité de l'argent	ϱ_{Ag}	1049 kg/m^3

donc la sphère de manière à atteindre une masse totale d'environ 65,25 g (Fig. 10).

Figure 10 – La boule de polystyrène et les poids correspondants (Image : M. Nielbock).

On attache les poids au crochet de la sphère à l'aide de trombones et on immerge le tout.

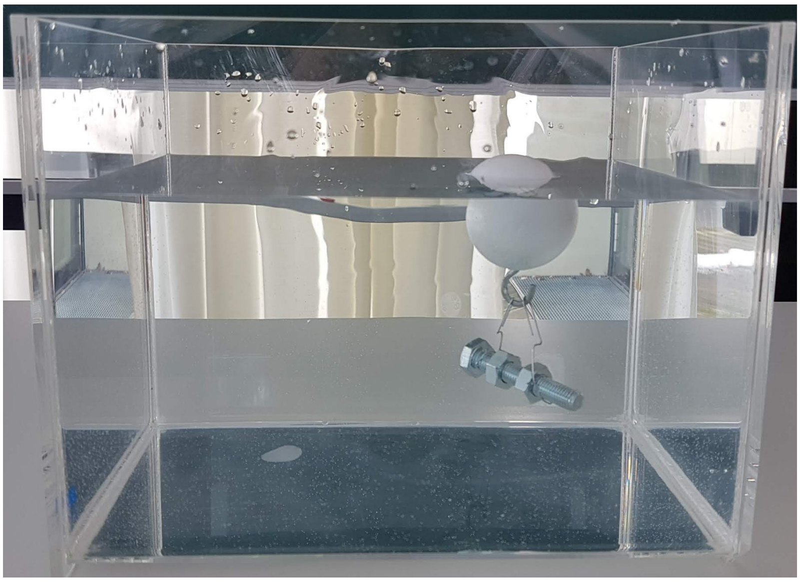


Figure 11 – Le poids total calculé n'est pas suffisant pour équilibrer la poussée d'Archimède. La sphère, partiellement immergée, flotte encore à la surface (Image : M. Nielbock).

Pourquoi la sphère n'est-elle pas complètement immergée ?

La sphère, partiellement immergée, flotte encore à la surface (Fig. 11) : on a donc sous-estimé la masse requise. En effet, le volume des poids n'a pas été pris en compte alors que ces derniers sont également soumis à la flottabilité.

On pèse la sphère jusqu'à ce qu'elle flotte sous l'eau.

On leste la sphère - à l'aide de trombones, par exemple - jusqu'à ce qu'elle soit en suspens. (Fig. 12).

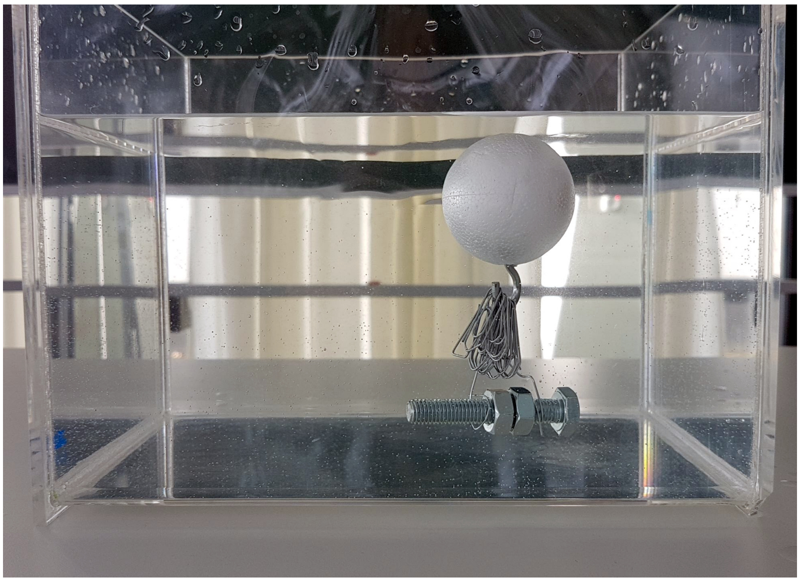


Figure 12 – Après avoir ajouté une quantité suffisante de trombones, la sphère, complètement immergée, flotte sous l'eau. (Image : M. Nielbock).

On notera que cet état de flottaison correspond à l'équilibre entre poids et flottabilité. Dans certains cas, les trombones peuvent constituer des unités trop imprécises, si bien que, lentement, la sphère coule ou remonte à la surface.

Pourquoi est-il si difficile d'obtenir un équilibre entre poids et flottabilité avec précision ?

Tout déséquilibre entraîne une réaction immédiate des forces à l'œuvre, dans un sens ou dans l'autre. Dans cette expérience, la plus petite unité de poids est celle d'un trombone. Afin d'obtenir des poids plus petits, on découpera des morceaux de trombone à l'aide d'une pince coupante.

Quelle est la corrélation entre le volume de la sphère et le poids nécessaire pour faire flotter la sphère sous l'eau ?

Pour comprendre la corrélation entre le volume de la sphère et le poids requis, on utilise le principe d'Archimède. La poussée d'Archimède est égale au poids du volume d'eau déplacé par l'objet immergé. Le poids nécessaire pour que la boule en polystyrène flotte sous l'eau en équilibre neutre est égal à celui du volume d'eau déplacé par la sphère immergée.

La poussée d'Archimède s'exerce également dans l'air. Calculez une estimation de la poussée d'Archimède dans l'air par rapport à celle qui s'applique à un fluide. Nommez les variables pertinentes.

La poussée d'Archimède dans l'air et dans l'eau correspond au rapport de densité de ces milieux. Avec une densité d'air de $\varrho_L = 1,2\,\mathrm{kg/m^3}$, on obtient :

$$\frac{\varrho_W}{\varrho_L} = 831$$

Question bonus : déterminer le volume d'eau déplacé pendant l'expérience.

Le principe d'Archimède s'applique également ici ; le volume déplacé dépend de la masse totale et de la densité de l'eau. La balance indique un poids total correspondant à une masse de 73,6 g (Fig. 13), soit un volume de 73,8 $\mathrm{cm^3}$.

Figure 13 – La balance indique une masse totale de 73,6 g (Image : M. Nielbock).

Exercices

Les exercices ci-dessous permettent d'approfondir les notions du chapitre à l'aide de divers calculs.

1. Pression hydraulique (arithmétique)

La pression exercée sur un objet immergé augmente avec la profondeur. Avec l'Eq. 3, on obtient la pression sous une colonne d'eau :

$$p = \varrho_w \cdot g \cdot h + p_0$$

Calculez la profondeur à laquelle on atteint une pression correspondant à la pression atmosphérique relevée à la surface de l'eau ainsi qu'à la pression atmosphérique normale $p - p_0 = p_0 = 101325\,\mathrm{Pa}$. Les valeurs correspondantes sont indiquées dans le tableau 1.

Ainsi, on obtient :

$$1\,\mathrm{Pa} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = 1\,\frac{\frac{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}{\mathrm{m}^2} = 1\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^2}$$

2. Pression hydraulique (graphique)

On obtient la fonction :

$$f(x) = a \cdot x + b$$

Il s'agit d'une équation de droite. Reprenez les valeurs de l'exercice 1 en prêtant attention aux valeurs variables et aux valeurs constantes. Calculez l'ordonnée à l'origine et le coefficient directeur de la droite a.

Tracez un graphique : l'axe des ordonnées indique la pression, l'axe des abscisses la taille variable. Graduez les ordonnées de sorte que la pression totale soit égale au double de p_0. Tracez la droite. Graduez les abscisses afin que $p = 2 \cdot p_0$.

3. Volume d'eau déplacé

Calculez le volume d'une combinaison spatiale et de son occupant, d'une masse totale de 200 kg lorsqu'ils flottent dans l'eau. Veillez à obtenir un équilibre entre force gravitationnelle et poussée d'Archimède.

4. Le principe d'Archimède

La poussée d'Archimède a été théorisée par l'un des plus grands mathématiciens de l'Antiquité, Archimède de Syracuse. La légende raconte que le roi Hiéron II aurait chargé son conseiller et ami Archimède de résoudre un énigme. Le roi avait confié à un joaillier une certaine masse d'or nécessaire à la confection d'une couronne. Cependant, une fois la fabrication achevée, le roi se mit à soupçonner le joaillier d'avoir remplacé une partie de l'or par de l'argent, bien que la masse de la couronne fut identique à celle de l'or donné par le roi. Archimède fut alors chargé de s'en assurer sans abîmer la couronne.

L'architecte romain Vitruve[4] rapporte l'expérience d'Archimède et expose le raisonnement du scientifique. À un même volume donné, correspondent des poids différents et des masses par unité de volume différentes. Archimède décide donc de comparer les volumes d'eau déplacés par la couronne et une quantité d'or de poids identique. Si les deux déplacent le même volume d'eau, leur masse volumique est alors égale et on peut en conclure que les deux sont composés du même métal. À l'inverse, la densité d'un alliage d'or et d'argent étant plus faible, une couronne qui contient de l'argent déplacera plus d'eau qu'une couronne d'or pur. Archimède démasque ainsi la supercherie du joaillier.

Cette histoire vous paraît-t-elle vraisemblable ? On considère deux pièces de métal ayant chacune une teneur en or différente. Chaque pièce pèse 1 kg, l'une est composé à 100% d'or, l'autre à 30% d'argent et 70% d'or. Dans un récipient à fond circulaire (de 5 cm de rayon) on verse 1 ℓ d'eau. Déterminez le niveau d'eau :

1. sans les pièces,
2. lorsque la pièce d'or est immergée,
3. lorsque la pièce composée d'un alliage or-argent est immergée.

Peut-on mesurer l'écart entre les niveaux d'eau avec suffisamment de précision pour constater une véritable différence entre les pièces de métal ?

Il est fort probable qu'Archimède ait simplement mesuré le poids de l'objet, réduit par la flottabilité de l'eau. Reprenez ce raisonnement pour calculer les forces de flottabilité des deux pièces de métal ainsi que la différence de leurs forces une fois les pièces immergées. Déterminez la masse correspondant à cette différence de force.

Solutions

1. Pression hydraulique (arithmétique)

$$h = \frac{p - p_0}{\varrho_w \cdot g} = \frac{101325\,\text{Pa}}{997\,\text{kg/m}^3 \cdot 9,81\,\text{m/s}^2} = 10,4\,\text{m}$$

2. Pression hydraulique (graphique)

On obtient l'équation de droite :

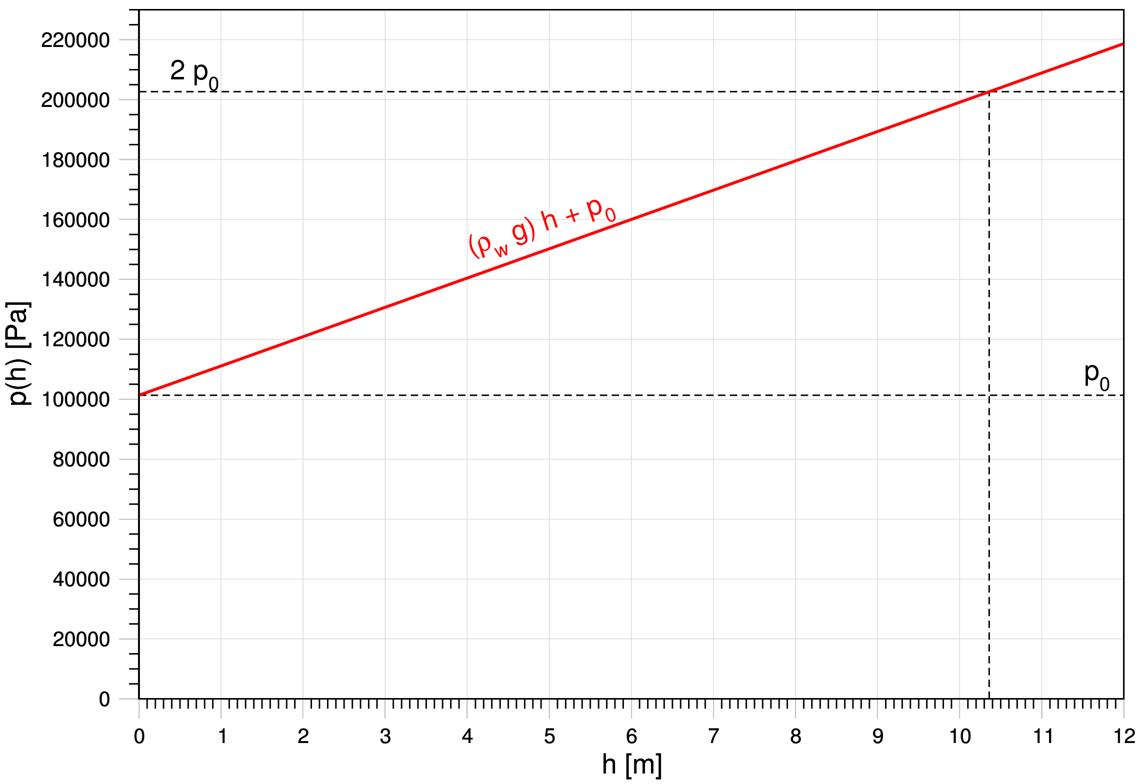
$$p(h) = (\varrho_w \cdot g) \cdot h + p_0$$

Coefficient directeur : $\varrho_w \cdot g = 997\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9780,57\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2}$

Ordonnée à l'origine : $p_0 = 101325\,\text{Pa} = 101325\,\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$

Pour $p(h) = 2 \cdot p_0$, on obtient :

$$9780,57\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2} \cdot h = p_0 = 101325\,\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$



3. Volume d'eau déplacé

Lorsque l'astronaute vêtu de sa combinaison spatiale flotte sous l'eau, poids et poussée d'Archimède sont équilibrés. Selon l'Eq. 6, on a :

$$
\begin{aligned}
F_g &= F_a \\
\Leftrightarrow m \cdot g &= m_w \cdot g \\
\Leftrightarrow m &= \varrho_w \cdot V \\
\Leftrightarrow V &= \frac{m}{\varrho_w} \\
&= \frac{200\,\mathrm{kg}}{997\,\mathrm{kg/m^3}} = 0,2\,\mathrm{m^3}
\end{aligned}
$$

4. Le principe d'Archimède

À partir des valeurs du tableau 1, on peut calculer la densité de l'alliage dont la teneur en argent est de 30%.

$$\varrho_{70/30} = 0,7 \cdot \varrho_{\mathrm{Au}} + 0,3 \cdot \varrho_{\mathrm{Ag}} = 1672\,\mathrm{kg/m^3} \tag{8}$$

On obtient, pour les pièces métalliques d'1 kg en or et en argent, les volumes suivants :

$$
\begin{aligned}
V_{\mathrm{Au}} &= \frac{m}{\varrho_{\mathrm{Au}}} = \frac{1000\,\mathrm{kg}}{1939\,\mathrm{kg/m^3}} = 0,5157\,\mathrm{m^3} \\
V_{\mathrm{Ag}} &= \frac{m}{\varrho_{\mathrm{Ag}}} = \frac{1000\,\mathrm{kg}}{1049\,\mathrm{kg/m^3}} = 0,9533\,\mathrm{m^3} \\
V_{70/30} &= \frac{m}{\varrho_{70/30}} = \frac{1000\,\mathrm{kg}}{1672\,\mathrm{kg/m^3}} = 0,5981\,\mathrm{m^3}
\end{aligned}
$$

Avec $\frac{V_{70/30}}{V_{\mathrm{Au}}} = 1,16$, l'écart semble très facile à mesurer. Pour un volume d'eau de $25\,\ell$ dans un bécher de 25 cm de rayon, on obtient le niveau d'eau suivant :

$$h = \frac{V}{A} = \frac{V}{\pi \cdot r^2}$$

1. $V_w = 25000\,\mathrm{cm^3} \Rightarrow h = 12,73\,\mathrm{cm}$
2. $V_w + V_{\mathrm{Au}} = 25051,57\,\mathrm{cm^3} \Rightarrow h = 12,76\,\mathrm{cm}$
3. $V_w + V_{70/30} = 25059,81\,\mathrm{cm^3} \Rightarrow h = 12,76\,\mathrm{cm}$

Les variations du niveau d'eau sont à peine perceptibles. Il est donc peu probable qu'Archimède ait ainsi démasqué la supercherie du joaillier.

Ainsi, on définit la poussée d'Archimède comme suit :

$$F_a = \varrho_w \cdot V \cdot g = \varrho_w \cdot \frac{m}{\varrho_{\mathrm{Metall}}} \cdot g = \frac{\varrho_w}{\varrho_{\mathrm{Metall}}} \cdot m \cdot g$$

Ainsi, on obtient :

$$\frac{F_{a,70/30}}{F_{a,\mathrm{Au}}} = \frac{V_{70/30}}{V_{\mathrm{Au}}} = 1,16$$

Les forces de flottabilité pour 1 kg d'or et 1 kg d'alliage sont :

$$F_{a,70/30} = \frac{997\,\mathrm{kg/m^3}}{1672\,\mathrm{kg/m^3}} \cdot 1\,\mathrm{kg} \cdot 9,81\,\mathrm{m/s^2} = 5,850\,\mathrm{N}$$

$$F_{a,\mathrm{Au}} = \frac{997\,\mathrm{kg/m^3}}{1939\,\mathrm{kg/m^3}} \cdot 1\,\mathrm{kg} \cdot 9,81\,\mathrm{m/s^2} = 5,044\,\mathrm{N}$$

On obtient un écart de $F_{a,70/30} - F_{a,\mathrm{Au}} = 0,806\,\mathrm{N}$, ce qui correspond à une masse de 82 g. On pouvait déjà réaliser un tel calcul à l'époque d'Archimède.

Notes

[1]Consultez la liste de toutes les sorties extravéhiculaires : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_International_Space_Station_spacewalks (document en anglais)

[2]Archimède de Syracuse est un célèbre mathématicien, physicien, ingénieur, inventeur et astronome grec du IIIe siècle avant notre ère

[3]En théorie, on pourrait également renverser le problème et modifier la densité du milieu en remplaçant l'eau douce du bassin par de l'eau salée, dont la densité est bien plus élevée.

[4] Marcus Vitruvius Pollio est un architecte, ingénieur et théoricien romain du Ier siècle avant notre ère.

Références

Bührke, Thomas (2018). *Was macht Alexander Gerst im All ?* Helmholtz - Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr. url : https://www.helmholtz.de/luftfahrt_raumfahrt_und_verkehr/was-macht-alexander-gerst-im-all/ (visité le 19/02/2019).

DLR (2018). *20 Jahre ISS : Die unwahrscheinlichste Maschine, die die Menschheit jemals gebaut hat*. DLR - Raumfahrt. url : https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10212/332_read-30922/ (visité le 01/03/2019).

ESA (2013a). *International Space Station legal framework*. International Space Station - Human and robotic exploration. url : https://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/International_Space_Station_legal_framework (visité le 16/07/2018).

– (2013b). *Spacewalk training*. Astronauts - Human and robotic exploration. url : https://www.esa.int/Our_Activities/Human_and_Robotic_Exploration/Astronauts/Spacewalk_training (visité le 11/02/2019).

– (2014). *ISS : International Space Station*. International Space Station - Human and robotic exploration. url : https://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/ISS_International_Space_Station (visité le 13/07/2018).

– (2018). *Mondspaziergänge unter Wasser*. ESA - Deutschland. url : https://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Mondspaziergaenge_unter_Wasser (visité le 19/02/2019).

Foust, Jeff (2018). *House joins Senate in push to extend ISS*. SpaceNews.com. url : https://spacenews.com/house-joins-senate-in-push-to-extend-iss/ (visité le 19/02/2019).

Ganse, Bergita (2018). *Weltraummedizin : Faszination All*. Deutsches Ärzteblatt. url : https://www.aerzteblatt.de/archiv/200894/Weltraummedizin-Faszination-All (visité le 19/02/2019).

Garcia, Mark (2016). *International Space Station Facts and Figures*. NASA. url : http://www.nasa.gov/feature/facts-and-figures (visité le 13/07/2018).

– (2018). *20 Years Ago : Space Station Partners Sign Intergovernmental Agreement*. NASA - Space Station. url : http://www.nasa.gov/feature/20-years-ago-station-partners-sign-intergovernmental-agreement-iga (visité le 16/07/2018).

Gast, Matthew et Sandra Moore (2009). « A Glimpse From The Inside Of A Space Suit : What Is It Really Like To Train For An EVA ? » In : *Proceedings of the 60th International Astronautical Congress, Daejon, Republic of Korea*. 60th International Astronautical Congress, Symposium B6 : Space Operations Symposium, Session 3. International Astronautical Federation, IAC–09.B6.3.5. isbn : 978-1-61567-908-9. url : https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090034233.pdf (visité le 11/02/2019).

Howell, Elizabeth (2018). *Soyuz Rocket : Russia's Reliable Booster*. Space.com. url : https://www.space.com/40282-soyuz-rocket.html (visité le 08/08/2018).

Hutchinson, Lee (2013). *Swimming with spacemen : training for spacewalks at NASA's giant pool*. Ars Technica. url : https://arstechnica.com/science/2013/03/swimming-with-spacemen/ (visité le 25/02/2019).

Loff, Sarah (2013). *Dec. 6, 1998, International Space Station Assembly Begins*. NASA - Space Station. url : http://www.nasa.gov/content/fifteen-years-ago-international-space-station-assembly-begins (visité le 18/07/2018).

Schüttler, Tobias (2006). « Mikrogravitationsexperimente im Physikunterricht ». Zulassungsarbeit zur ersten Staatsprüfung nach LPO I für das Lehramt an Gymnasien. München : Ludwig-Maximilians-Universität. 90 p. url : https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/mikrogravitation/mikrogravitation.pdf (visité le 01/03/2019).

Sputnik (2016). *ISS' Life Span Could Extend Into 2028 - Space Corporation Energia Director*. Sputnik. url : https://sputniknews.com/russia/201611151047447591-russia-iss-rsc-lifespan/ (visité le 12/07/2018).

Tate, Karl (2013). *How NASA Spacesuits Work : EMUs Explained (Infographic)*. Space.com. url : https://www.space.com/21987-how-nasa-spacesuits-work-infographic.html (visité le 19/02/2019).

Thomas, Kenneth S. et Harold J. McMann (2011). *U. S. Spacesuits*. 2e éd. New Zork : Springer-Verlag. 472 p. isbn : 978-1-4419-9566-7.

Ulmer, Kenneth (2015). *NASA, Boeing Extend International Space Station Contract*. Boeing Media Room. url : http://boeing.mediaroom.com/2015-09-29-NASA-Boeing-Extend-International-Space-Station-Contract (visité le 12/07/2018).

Zak, Anatoly (2017). *After a Decade of Delays, Russia's ISS Module Faces Even More Problems*. Popular Mechanics. url : https://www.popularmechanics.com/space/satellites/a25773/mlm-delayed-russia/ (visité le 11/07/2018).

Remerciements

L'auteur tient à remercier Matthias Penselin, Florian Seitz et Martin Wetz pour leurs précieux conseils et leurs suggestions avisées, ainsi que Volker Kratzenberg-Annies pour l'excellence de son travail de révision. Merci également à Faustine Cantalloube pour la relecture.

Ces ressources pédagogiques ont été élaborées dans le cadre du projet *Raum für Bildung* de la Haus der Astronomie à Heidelberg. D'autres documents en Français et en Allemand sont disponibles sur :

http://www.haus-der-astronomie.de/raum-fuer-bildung et http://www.dlr.de/next

Ce projet a été élaboré en coopération avec le *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique) avec le soutien de la Fondation Joachim Herz.