

Fiche-élève :

Entraînement des astronautes : une plongée dans l'espace

Markus Nielbock
traduction française : Paola Kiehl

21 février 2019



Figure 1 – L'astronaute français Thomas Pesquet s'entraîne dans une piscine dotée d'une copie de module spatial pour simuler une sortie extravéhiculaire (Image : NASA).

Résumé

Afin de se préparer aux sorties extravéhiculaires, les astronautes qui rejoindront la station spatiale internationale s'entraînent sur Terre, dans d'immenses bassins prévus à cet effet. Les astronautes, vêtus de combinaisons spatiales, plongent vers une maquette de l'ISS immergée dans la piscine d'entraînement. Les combinaisons permettent aux équipages d'atteindre, sous l'eau, un état de quasi impesanteur. Cette flottabilité est obtenue par l'équilibre entre poids et la poussée d'Archimède. On observera ce phénomène au cours d'une expérience et de quelques exercices.

Matériel

- 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)

Durée

120 minutes

Fiche d'activité :

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 d'immenses bassins. Les astronautes, vêtus de leur combinaison, flottent sous l'eau dans un état d'impesanteur proche de celui qu'ils retrouveront à bord de l'ISS.

Au cours de ce chapitre, nous aborderons la question de la flottabilité des astronautes dans de tels bassins d'entraînement par le biais de vidéos, d'expériences et d'exercices pratiques.

Introduction

Avez-vous déjà entendu parler des sorties extravéhiculaires? Qu'est-ce que ce terme vous évoque-t-il? Vous trouverez quelques éléments de réponses à la page 10 ainsi que quelques vidéos instructives ci-dessous.

L'équipement de Thomas Pesquet en vue d'une sortie extravéhiculaire prévue le 13 janvier 2017 (Durée : 2 :08 min)

<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=Pc0-0n7H1LQ>

How Astronauts Train Underwater at NASA's Neutral Buoyancy Lab (Durée : 7min06, en anglais)

<https://youtu.be/BRPb0J8LZcY>

Voici quelques vidéos explicatives 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>

Pourquoi certains objets flottent, tandis que d'autres coulent? Un indice : la masse ou le poids ne sont pas des facteurs déterminants de la flottabilité d'un objet. En effet, le petit caillou coule tandis que l'énorme bateau de croisière reste à la surface.

Quels sont les paramètres à prendre en compte pour que, lors des entraînements en bassin, les astronautes parviennent à flotter sous l'eau, dans un état de quasi impesanteur?

Expérience

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 objet de faible densité, flottant à la surface de l'eau. On attachera ensuite un ensemble de petits poids (vis, écrous, trombones ou autres petits objets) à un crochet pour faire flotter la sphère sous l'eau, en équilibre neutre, et simuler ainsi un quasi état d'impesanteur.



Figure 2 – 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 3 – 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 ?

Astuce : Souvenez-vous du principe d'Archimède ! Référez-vous aux valeurs indiquées dans le tableau [1](#).

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

On attache les poids au crochet de la sphère à l'aide de trombones (cf Fig. 4) et on immerge le tout.

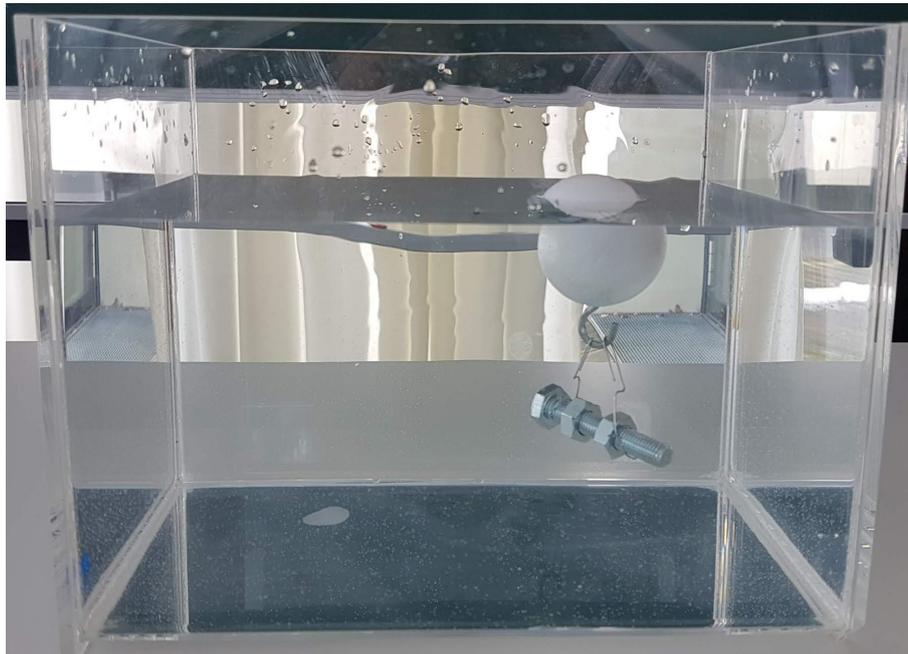


Figure 4 – Le poids total calculé n'est pas suffisant pour équilibrer la poussée d'Archimède. La sphère, partiellement immergée, flotte encore à la surface (Image : M. Nielbock).

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

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. 5).

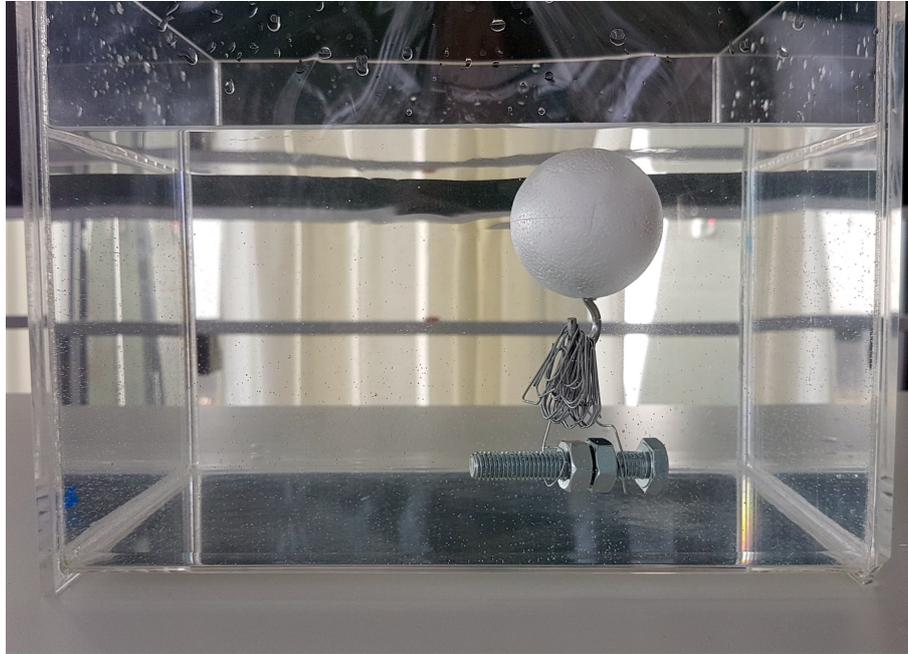


Figure 5 – Après avoir ajouté une quantité suffisante de trombones, la sphère, complètement immergée, flotte sous l'eau. (Image : M. Nielbock).

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

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

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.

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

Servez-vous du principe d'Archimède pour calculer volume d'eau déplacé à partir du poids de l'objet.

Exercices

1. Pression hydraulique

La pression exercée sur un objet immergé augmente avec la profondeur. Avec l'Eq. 3 (P. 12), on obtient la pression sous une colonne d'eau :

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

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 $p - p_0 = p_0 = 101325 \text{ Pa}$. Les valeurs correspondantes sont indiquées dans le tableau 1.

Ainsi, on obtient :

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

2. Pression hydraulique (graphique)

On obtient ainsi 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 Vitruve¹ 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-elle vraisemblable ? On considère deux pièces de métal ayant chacune une teneur en or différente. Chaque pièce pèse 1 kg, l'une est composée 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.

Contexte

La station spatiale internationale (ISS)



Figure 6 – L’ISS en 2011 (Image : NASA).

La station spatiale internationale (ISS, Fig. 6) est en constante évolution : depuis sa construction en 1998, différents modules (Fig. 7) viennent régulièrement la compléter. Depuis l’an 2000, l’ISS est constamment occupée par un équipage. La station restera en service jusqu’en 2024 au minimum, mais son exploitation se prolongera sûrement jusqu’en 2028, voire 2030. La structure de l’ISS pèse 420 tonnes, mesure 109 mètres de long, 73 mètres de large et 45 mètres de haut. Située à 400 kilomètres d’altitude, la station spatiale internationale parcourt l’orbite terrestre en 92 minutes.

Configuration de la station spatiale internationale (ISS)

Juin 2017

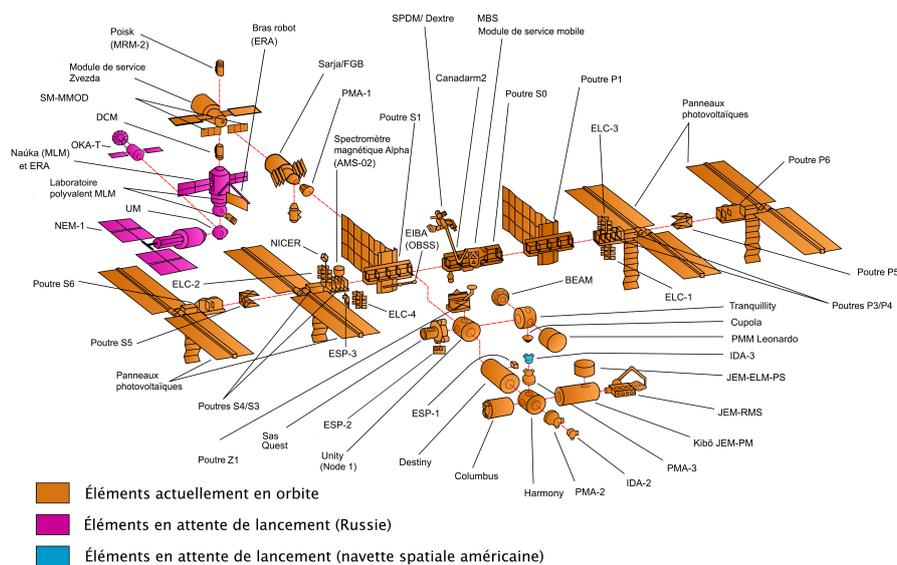


Figure 7 – Les modules de la station spatiale en juin 2017 (Image : NASA ; traduction française : P. Kiehl).

L’ISS est un programme international qui rassemble actuellement 15 pays. 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. 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 et, enfin, d'optimiser les conditions de préparation des futures missions au sein du système solaire.

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 nécessaires². 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 8 – 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. 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-véhiculaire Mobility Unit) pèse environ 200 kg. Durant l'entraînement, la pression atmosphérique à l'intérieur de l'EMU est réduite à 0,3 bar (4,3 PSI). 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.

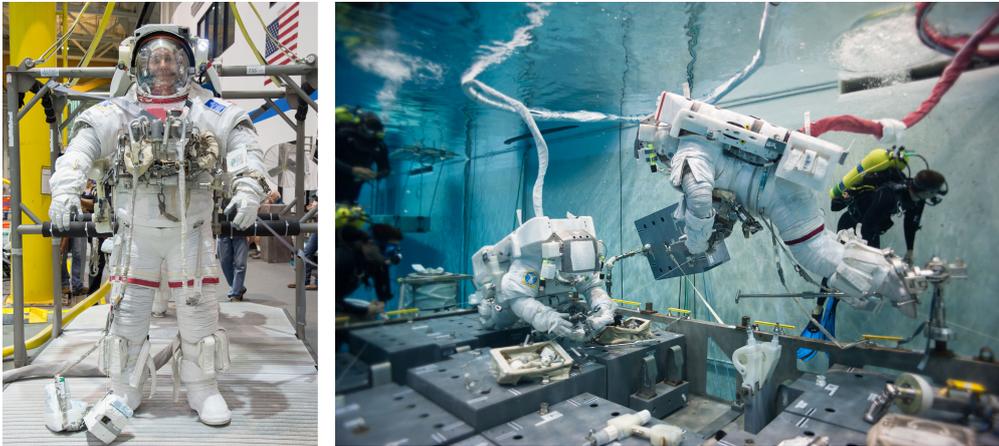


Figure 9 – À gauche : Le Français Thomas Pesquet, équipé pour une séance d'entraînement. À droite : Accompagnés par une équipe de plongeurs, les astronautes effectuent des opérations complexes pendant plusieurs heures. (Images : NASA).

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.

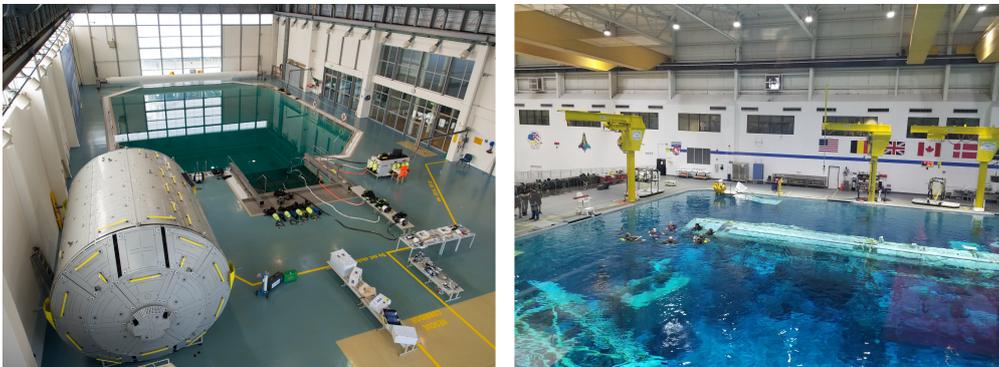


Figure 10 – À gauche : le bassin du Neutral Buoyancy Facility de l'ESA à l'EAC de Cologne (Image : ESA–S. Corvaja, 2015). À droite : le NBL (Neutral Buoyancy Lab) de la NASA dont le bassin accueille une réplique partielle de l'ISS. (Image : CCicalese (WMF), CC BY 4.0).

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 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. 11.

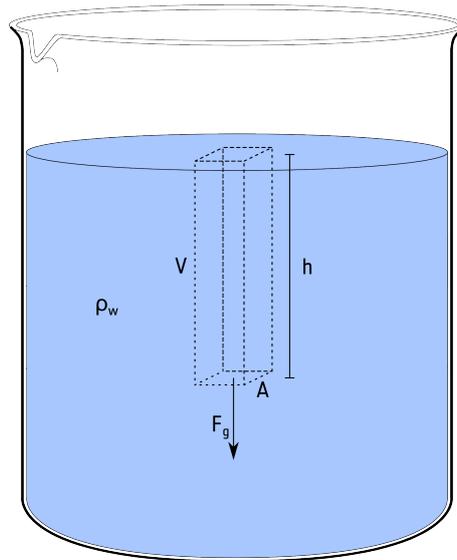


Figure 11 – On observe ici les causes de la pression hydrostatique (graphique : Markus Nielbock).

On représente un b cher 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 $m_w = \rho_w \cdot V$. Ainsi :

$$\begin{aligned} F_g &= m_w \cdot g \\ &= \rho_w \cdot V \cdot g \\ &= \rho_w \cdot h \cdot A \cdot g \\ \Leftrightarrow p &= \frac{F_g}{A} = \rho_w \cdot h \cdot g \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow p = \frac{F_g}{A} = \rho_w \cdot h \cdot g \quad (2)$$

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 :

$$p = \rho \cdot g \cdot h + p_0 \quad (3)$$

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. 12 : 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 .

$$\begin{aligned} p(h_0) &= \rho_w \cdot g \cdot h_0 + p_0 \\ p(h_1) &= \rho_w \cdot g \cdot h_1 + p_0 \end{aligned}$$

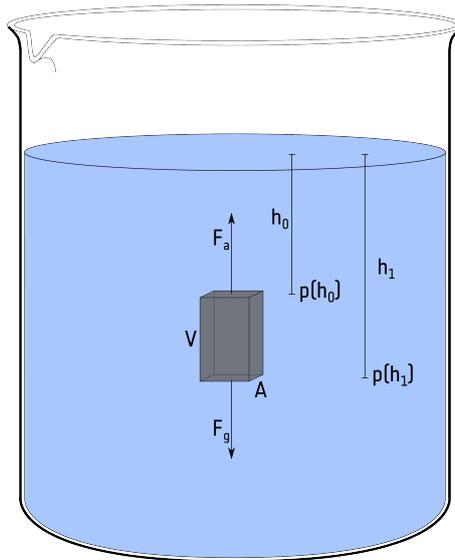


Figure 12 – On observe ici le phénomène de flottabilité d'un corps de volume V sous l'eau (graphique : Markus Nielbock).

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 .

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

Selon le **principe d'Archimède**³ :

«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 :

$$F_g = F_a \quad (6)$$

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

$$\Leftrightarrow \rho_k \cdot V \cdot g = \rho_w \cdot V \cdot g$$

$$\Leftrightarrow \rho_k = \rho_w \quad (7)$$

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 flotter⁴.

Notes

¹Marcus Vitruvius Pollio est un architecte, ingénieur et théoricien romain du 1er siècle avant notre ère.

²Consultez la liste de toutes les sorties extravéhiculaires :
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_International_Space_Station_spacewalks
(document en anglais)

³Archimède de Syracuse est un célèbre mathématicien, physicien, ingénieur, inventeur et astronome grec du IIIe siècle avant notre ère

⁴En 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.

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.

