MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE,
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE
Liberté
Égalité
Fraternité

Lycée(s)	Général	Technologique	Professionnel
Niveau(x)	CAP, Seconde, Première		Terminale
Enseignement(s)	Commun	De spécialité	Optionnel

Physique-chimie

L'essentiel sur les paramètres influant sur la valeur de la force d'Archimède

Après une brève introduction sur les enjeux institutionnels liés au thème de cette ressource, une présentation théorique est développée. Des exemples de contextes mettant en jeu la poussée d'Archimède sont développés en complément d'une proposition de mise en œuvre pédagogique permettant de mettre en exergue l'articulation des enseignements de la physique-chimie et des mathématiques.

Mots-clés

Force d'Archimède, masse volumique, volume immergé, équilibre, facteurs, poids, fluide.

Références au programme

Capacités : déterminer expérimentalement

- La valeur de la force d'Archimède ;
- les paramètres influant sur la valeur de la force d'Archimède (masse volumique du fluide, volume immergé).

Connaissances :

- Connaître les caractéristiques de la force d'Archimède et les facteurs qui influencent sa valeur ;
- savoir qu'un corps solide peut flotter à la surface d'un liquide quand sa masse volumique est inférieure à celle du liquide.

Sommaire

Introduction

Les programmes de physique-chimie destinés aux classes de première professionnelle (BO spécial n° 1 du 6 février 2020) précisent l'importance de déterminer expérimentalement les paramètres influant sur la valeur de la poussée d'Archimède, et donc d'inscrire les apprenants dans une démarche expérimentale visant à déterminer ces différents facteurs.

Contenus scientifiques

Anecdote historique

Au IIIe siècle av. J-C, le roi de Syracuse, doutant de l'honnêteté du concepteur de la couronne royale, aurait missionné le physicien Archimède afin de déterminer la proportion réelle d'or dans le métal constituant cette couronne.

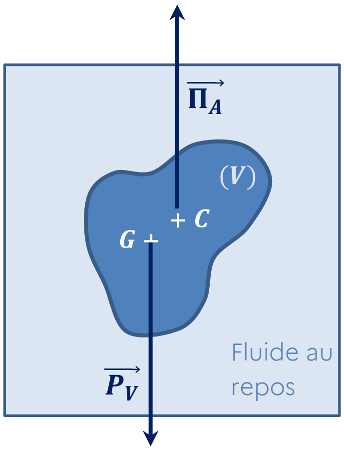
Après avoir établi de nombreuses théories, c'est en prenant son bain qu'Archimède aurait lancé selon la légende son fameux *Eurêka*, remarquant que l'eau contenue dans sa baignoire débordait lorsqu'il y entra. Cette observation lui permit de mesurer plus facilement le volume de la couronne en l'immergeant dans l'eau afin d'en déterminer la masse volumique et ainsi vérifier la constitution réelle de ladite couronne.

Mais surtout l'observation qu'un corps introduit dans l'eau *déplace* son propre volume du liquide aurait fait germer la réflexion qui mena au théorème d'Archimède.

Considérations théoriques

La loi fondamentale de la statique des fluides permet de montrer que la pression appliquée à un solide ne dépend que du champ de pesanteur. La poussée d'Archimède, résultante des forces pressantes exercées sur la solide, ne dépend donc pas de la composition du solide, mais uniquement de sa forme.

En considérant un volume V de centre de gravité noté G occupant un volume de fluide au repos dans le champ de pesanteur $\vec{g}$, la pression exercée par le fluide sur la partie basse du volume V est plus importante que sur sa partie haute. Le volume est considéré en équilibre au sein du fluide sous l'effet de deux forces : son poids $\vec{P_V}$ et la résultante $\vec{\Pi_A}$ des forces de pression exercées sur ce volume correspondant à la poussée d'Archimède.



La relation fondamentale de la dynamique permet alors d'établir la relation suivante :

$$\vec{P_V} + \vec{\Pi_A} = \vec{0}$$

$$\vec{\Pi_A} = - \vec{P_V}$$

$$\vec{\Pi_A} = - m \times \vec{g}$$

$$\vec{\Pi_A} = - \rho_f \times V \times \vec{g}$$

Où m est la masse du volume V étudié correspondant également à la masse de fluide déplacé (de masse volumique ρ_f).

Énoncé du théorème

La relation précédente permet d'établir implicitement le théorème d'Archimède :

> Tout corps plongé dans un fluide au repos subit de la part de celui-ci une force verticale appelée poussée d'Archimède, dirigée de bas en haut et dont l'intensité correspond au poids du volume de fluide déplacé.
>
> Cette poussée est appliquée au centre d'inertie C (appelé centre de poussée) de ce corps.

Cas particuliers d'utilisation

Le théorème d'Archimède s'utilise lorsqu'un volume est totalement immergé dans le fluide étudié. Dans le cas d'un objet flottant, on considère alors que le volume est immergé dans un fluide surmonté de l'atmosphère ce qui implique une étude de la partie immergée en négligeant la masse de l'air constituant l'atmosphère déplacé devant celle du volume de fluide déplacé ;

Le théorème d'Archimède ne peut être appliqué que sous certaines conditions notamment en ce qui concerne le fluide étudié qui doit être au repos. Néanmoins, il permet de déterminer, dans le cas de l'étude d'un phénomène « lent », une approximation tout à fait légitime quant aux différentes actions subies par un objet plongé dans un fluide donné :

$$\frac{dP}{dz} = -\rho \times g$$

Si la pression exercée sur un volume immergé est uniforme en tout point de celui-ci, alors la poussée d'Archimède appliquée à ce volume est nulle.

Exemples de contextualisation

Fonte d'un glaçon

On place un glaçon de volume V dans un verre que l'on remplit ensuite à ras bord d'un liquide de masse volumique ρ_l. On souhaite déterminer la condition pour que le verre ne déborde pas lorsque le glaçon aura fondu.

La masse du glaçon est alors $m = \rho_{glaçon} \times V$. Étant donné que le glaçon flotte, l'intensité de la poussée d'Archimède, en négligeant la contribution de l'air devant celle de l'eau, est égale à celle du poids du glaçon d'où la relation à l'équilibre mécanique :

$\Pi_A = m \times g = \rho_\ell \times V_{immergé} \times g$ d'où $V_{immergé} = \frac{m}{\rho_l}$

Lorsque le glaçon fond, le volume occupé par l'eau le constituant est : $V_{eau} = \frac{m}{\rho_{eau}}$

Le verre débordera si le volume d'eau constituant le glaçon est supérieur au volume immergé du glaçon soit :

$$V_{eau} > V_{immergé}$$
$$\frac{m}{\rho_{eau}} > \frac{m}{\rho_l}$$
$$\rho_l > \rho_{eau}$$

Le verre débordera uniquement si le liquide contenu dans le verre est plus dense que l'eau.

Volume immergé d'un iceberg

On cherche à déterminer la proportion immergée du volume de l'iceberg.

L'iceberg étant en équilibre, la relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$\vec{P} + \overrightarrow{\Pi_{mer}} + \overrightarrow{\Pi_{air}} = \vec{0}$$

La projection sur un axe vertical descendant conduit à l'expression :

$$\rho_{glace} \times (V_é + V_i) \times g - \rho_{mer} \times V_i \times g - \rho_{air} \times V_é \times g = 0$$
$$\rho_{glace} \times (V_é + V_i) - \rho_{mer} \times V_i - \rho_{air} \times V_é = 0$$

On obtient alors la relation :

$\frac{V_i}{V_é} = \frac{\rho_{air} - \rho_{glace}}{\rho_{glace} - \rho_{mer}} = \frac{1,3 - 917}{917 - 1025}$ d'où $\frac{V_i}{V_é} \approx 8,5$

Le volume immergé de l'iceberg est environ 8,5 fois plus important que le volume émergé.

Condition de flottaison d'un plongeur en profondeur

La plongée sans bouteille nécessite l'utilisation d'un lest en plomb dont le volume peut être considéré comme négligeable par rapport à celui du plongeur. La masse doit être rigoureusement sélectionnée de manière à éviter un éventuel sur-lestage.

On cherche à déterminer la valeur m_{lest} correspondant à la masse du lest permettant à un plongeur de 86 kg d'avoir une flottaison nulle à une profondeur de 4 mètres.

Précisions complémentaires :

- capacité maximale des poumons du plongeur : $V_M = 0{,}007\ m^3$;
- volume du plongeur hors cage thoracique : $V_0 = 0{,}08\ m^3$;
- masse volumique de l'eau de mer : $\rho = 1030\ kg.m^{-3}$;
- pression atmosphérique : $P_0 = 1{,}013 \times 10^5\ Pa$;
- intensité de pesanteur : $g = 9{,}81\ m.s^{-2}$.

(D'après Concours communs Mines – Pont MP 2004)

La flottaison du plongeur à une profondeur z est nulle dans le cas où :

$\overrightarrow{\Pi_A} + \vec{P} = \vec{0}$, ce qui conduit après projection sur un axe vertical ascendant à

$\rho \times (V_0 + V(z)) \times g - (m + m_{lest}) \times g = 0$

où V(z) représente la capacité pulmonaire du plongeur à une profondeur de z mètres.

$\rho \times (V_0 + V(z)) = (m + m_{lest})$

$m_{lest} = \rho \times (V_0 + V(z)) - m$: relation **(1)**

L'air contenu dans les poumons est modélisé par un gaz parfait, la loi de Boyle-Mariotte nous permet alors d'établir que : $p \times V = p(z) \times V(z) = P_0 \times V_M$ = constante

Et par conséquent, on a $V(z) = \frac{P_0 \times V_M}{p(z)}$ d'où $V(z) = \frac{P_0 \times V_M}{P_0 - \rho \times g \times z}$ en appliquant la relation fondamentale de l'hydrostatique.

La relation **(1)** devient alors :

$$m_{lest} = \rho \times \left(V_0 + \frac{P_0 \times V_M}{P_0 - \rho \times g \times z}\right) - m = 1\,030 \times \left(0{,}08 + \frac{101\,300 \times 0{,}007}{101\,300 - 1030 \times 9{,}81 \times (-4)}\right) - 86$$

Soit $m_{lest} \approx 1{,}55$ kg

Le plongeur doit utiliser un lest de masse environ 1,55 kg s'il souhaite avoir une flottaison nulle à une profondeur de 4 m.

Mise en œuvre pédagogique

Applications professionnelles

Il existe de nombreuses applications industrielles utilisant la poussée d'Archimède qui, de ce fait, permettent la construction de séquences de co-intervention. Dans ce cadre, certaines capacités et connaissances directement extraites des référentiels d'activités professionnelles pourraient alors être mises à contribution.

À titre d'exemple, le densimètre est un appareil constitué d'un flotteur lesté auquel on annexe un tube gradué permettant ainsi d'évaluer la masse volumique et donc la densité d'un liquide en évaluant les variations de l'intensité de la poussée d'Archimède au sein de celui-ci. Le densimètre est décliné en plusieurs modèles, suivant l'utilisation qui en est faite :

- le mustimètre (ou pèse mout) est un appareil utilisé pour mesurer la densité d'un jus de raisin ;
- le densimètre est également utilisé par les brasseurs pour déterminer avec précision la quantité de sucre dans le moût de bière ;
- le pèse-acide permet de déterminer la concentration d'une solution en acide. Ce système est utilisé pour certaines batteries afin de déterminer le niveau d'électrolyte.

Séquence pédagogique en physique-chimie

De nombreux contextes pédagogiques permettent de mettre en exergue l'existence de la poussée d'Archimède (lignes de flottaison d'un bateau, mise en eau et remontée à la surface d'un sous-marin, projection en l'air d'un ballon maintenu dans une piscine, utilisation d'un densimètre, etc.).

Une fois le contexte posé, l'enseignant pourra notamment veiller à ce que les apprenants émettent plusieurs hypothèses quant au choix des facteurs à étudier : la masse de l'objet, sa forme, son volume, la profondeur d'immersion, la nature du liquide, etc.

L'objectif est qu'ils proposent dans un premier temps un protocole expérimental simple permettant la mesure de la valeur de la poussée d'Archimède appliquée à un solide donné. La seconde étape permettrait alors ensuite de valider ou d'invalider expérimentalement les différentes hypothèses proposées à l'aide d'un protocole approprié.

Corrélation avec les mathématiques

Les lignes directrices pour l'enseignement déclinées dans les programmes de la voie professionnelle visent notamment à mettre en exergue l'importance d'une corrélation entre l'enseignement des mathématiques et celui de la physique-chimie. En ce sens il pourrait être pertinent de travailler en parallèle de cette séquence les capacités et connaissances constituant le module Algorithmique et programmation (notamment sur la notion de liste), ainsi que le module sur la statistique à deux variables quantitatives.

La fonction Python **graphe** ci-dessous a pour objectif d'afficher un nuage de points illustrant l'évolution $\Pi_A = f(\text{Facteur})$ à l'aide des données expérimentales recueillies par les apprenants pour chaque facteur étudié.

```python
PA = []
Fact =  []

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

def graphe(L1,L2):
    plt.grid(True)
    m,p = np.polyfit(L1,L2,1)
    f = np.poly1d((m,p))
    plt.plot(L1,f(L1),'r--')
    plt.plot(L1,L2,'bo')
    return np.corrcoef(L1,L2)[0,1]**2
```

On définit deux listes Fact (valeurs du facteur étudié) et PA (valeurs de la poussée d'Archimède correspondantes)

Import des bibliothèques matplotlib (représentation graphique du nuage de points) et numpy (outils numériques)

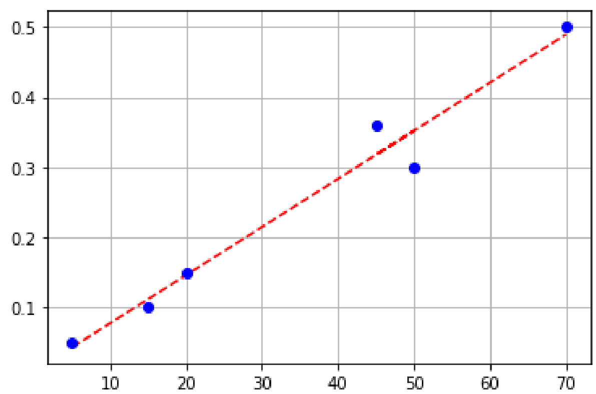
Affichage de la grille

Définition des coefficients de la droite d'ajustement affine d'équation y = mx + p et création de la fonction f : y ↦ mx + p

Affichage du nuage de points de coordonnées (L1 ; L2) en ronds bleus et de la représentation graphique de la fonction f en pointillés rouges

La fonction renvoie la valeur du coefficient de détermination associé à la situation.

L'exemple ci-dessous traite de l'évolution de la valeur de la poussée d'Archimède en fonction du volume du solide étudié (les listes **PA** et **Fact** ayant été renseignées à l'aide des résultats expérimentaux en amont de l'appel à la fonction **graphe** dans la console d'exécution). Le résultat renvoyé par l'appel ci-dessous permet d'appréhender la pertinence d'un modèle d'ajustement affine à l'aide du coefficient de détermination. En prolongement on pourrait par exemple demander aux apprenants de modifier la fonction Python **graphe** afin qu'elle renvoie le coefficient p (ordonnée à l'origine de la droite d'ajustement) afin d'aboutir à la situation de proportionnalité mise en lumière ici et ainsi valider l'influence du volume du solide sur la valeur de la poussée d'Archimède.




```
In [2]: graphe(Fact,PA)
Out[2]: 0.9677844543516185
```

Prolongement possible : mesures et incertitudes

Dans le cadre des protocoles expérimentaux mis en jeu par les apprenants, une sensibilisation aux différentes sources d'erreurs pourrait être proposée : défaut de la méthode de mesure, imperfection ou utilisation incorrecte du dynamomètre, etc.

Une mise en commun des résultats expérimentaux permettrait alors de laisser émerger la notion d'incertitude liée à la mesure d'une grandeur physique et d'analyser les différentes présentations des résultats proposées par les apprenants : choix de l'unité, du nombre de chiffres significatifs, etc.

Le calcul du couple (moyenne, écart-type) pour les valeurs expérimentales de la poussée d'Archimède obtenues par les apprenants sur un facteur en particulier permet alors non seulement de réinvestir certaines capacités et connaissances acquises en seconde professionnelle (statistique à une variable) mais également de sensibiliser les apprenants à la démarche analytique sur la dispersion de plusieurs mesures indépendantes.

Bibliographie et sitographie

- « *Recherches historiques sur le principe d'Archimède* » De Charles Thurot, *Revue Archéologique*, vol. 18, 1868, pp. 389–406. *JSTOR* ;
- « Blaise Pascal, un nouvel Archimède ? » par Michel Faget, BUP n° 810 ;
- « Galilée, physicien et astronome », vidéo hébergée sur le site de Lumni ;
- « TP : Archimède au secours de l'œuf », ressource produite par l'académie de Nancy-Metz.