



**centre de
développement
pédagogique**

*pour la formation générale
en science et technologie*

LES PLASTIQUES

Nos résultats sont-ils fiables?



Étude de l'incertitude sur la mesure
GUIDE DE L'ANIMATEUR

Juin 2009

DOCUMENT DE TRAVAIL



En science comme en technologie, l'étude de phénomènes ou de matériaux, la mise à l'épreuve de théories ou de prototypes nécessitent souvent la collecte de données expérimentales. La collecte de ces données implique elle-même l'élaboration de protocoles expérimentaux par le chercheur, l'utilisation de nombreux instruments de mesure et parfois, la conception d'instruments de mesure adaptés à un contexte spécifique. Ces nombreux facteurs constituent autant de possibilités de sources d'erreurs et méritent qu'on s'y attarde.

Dans le cas de l'activité d'identification des plastiques, nous avons procédé à un test de comparaison avec un échantillon témoin afin de distinguer le PEHD du PEBD. Le test était basé sur une propriété caractéristique connue, la masse volumique. En effet, dans le cas du polyéthylène, on distingue les deux catégories par leur masse volumique respective. Ainsi, le PEHD possède une masse volumique supérieure à $0,95 \text{ g/cm}^3$ alors que celle du PEBD se situe entre $0,92$ et $0,95 \text{ g/cm}^3$.

Lorsqu'on cherche à identifier une substance, nous devons nous référer à différentes propriétés connues, procéder par comparaison en soumettant un échantillon à différents tests de propriétés. Le plus souvent, on consulte des outils de référence qui répertorient les propriétés et les propriétés caractéristiques de substances liquides, gazeuses ou solides. Avec suffisamment de propriétés, nous arrivons généralement à identifier une substance, à prime abord, inconnue.

PISTES DE RÉFLEXION...

- **Serait-il possible d'identifier ces deux substances à l'aide des instruments et du matériel de laboratoire disponible dans votre école?**
- **Vos résultats seront-ils fiables?**
- **Saurez-vous réduire les sources d'erreur à leur minimum?**

VOTRE DÉFI :

Déterminer expérimentalement la masse volumique de deux échantillons de polyéthylène, soit le PEHD et le PEBD. Vous devrez tenir compte des sources d'erreurs introduites par les manipulations et les appareils de mesure mis à votre disposition. Vous devrez juger de la validité de vos résultats et justifier ce jugement.



Quelques concepts utiles



1. Qu'est-ce que l'incertitude absolue et comment est-elle exprimée?
C'est l'évaluation quantifiée des difficultés rencontrées lors de la prise de mesure. Elles peuvent être causées par les appareils de mesures, l'opérateur ou les conditions dans lesquelles s'effectue la prise de mesures.
2. Comment est-elle estimée sur une échelle graduée (appareil analogique)?
Cette valeur est généralement fournie par le fabricant de l'appareil. Autrement, on l'estime généralement à la moitié de la plus petite division de l'appareil. (L'observateur peut effectivement déceler qu'une mesure se trouve entre deux divisions.)
3. Comment est-elle estimée sur un appareil à affichage numérique?
Cette valeur est généralement fournie par le fabricant de l'appareil. Autrement, on l'estime à une unité sur le chiffre le moins significatif affiché (la plus petite mesure possible) sauf dans le cas d'affichage inconstant où l'on estime la plage de valeurs probables où se trouve la mesure.
4. Qu'entend-t-on par « chiffres significatifs »?
Il s'agit des chiffres utiles (qui ont une signification) ou des « chiffres qui veulent dire quelque chose ». Par exemple : il est inutile d'indiquer une masse volumique au millième de g/mL si les instruments de mesures utilisés ont des précisions au dixième de millilitre et au centième de gramme.
5. Qu'est-ce que l'incertitude relative et comment est-elle exprimée?
C'est le rapport entre l'incertitude absolue et la valeur mesurée. Elle est exprimée en pourcentage avec au plus, deux chiffres significatifs.
6. Lorsqu'une mesure est déduite par une addition ou une soustraction de données, que fait-on des incertitudes?
On doit faire la somme des incertitudes absolues.
Exemple : Pour déterminer le volume d'un solide irrégulier, on peut mesurer un volume d'eau et y ajouter le solide. On déterminera le volume du solide par une soustraction. Comme cette mesure nécessite deux mesures accompagnées de leur incertitude, on additionnera ces valeurs pour indiquer l'incertitude sur le volume du solide.
Volume d'eau initial : 15,0 ± 0,2 mL
Volume d'eau et du solide : 18,4 ± 0,2 mL
Volume du solide : 3,4 ± 0,4 mL

7. Lorsqu'on calcule une valeur impliquant une division ou une multiplication, que fait-on des incertitudes?

On doit faire la somme des incertitudes relatives.

Exemple : Pour déterminer la masse volumique d'un solide irrégulier, on doit mesurer son volume et sa masse avant d'établir le rapport entre les deux mesures.

On peut mesurer un volume d'eau et y ajouter le solide. On déterminera le volume du solide par une soustraction. Ensuite, on déterminera la masse à l'aide d'une balance. Finalement, on procédera au calcul de sa masse volumique.

1)

Volume d'eau initial : 15,0 A 0,2 mL

Volume d'eau et du solide : 18,4 A 0,2 mL

*Volume du solide : 3,4 A 0,4 mL ou cm³
ou : 3,4 cm³ à 12%*

2) *Masse du solide : 24,55 A 0,05 g
ou : 24,55 à 0,2%*

3) *Calcul de la masse volumique*

24,55 \times 3,4 = 7,22 g/cm³ à 12,2% (on écrirait 12% puisqu'on indique pas plus de 2 chiffres significatifs)

On écrirait la réponse finale en respectant la convention d'un seul chiffre significatif à l'erreur absolue, donc : 7,2 A 0,9 g/cm³ afin qu'il y ait concordance entre la valeur calculée et son incertitude.

RAPPEL : Un bon appareil de mesure comporte trois qualités essentielles : la précision, la justesse et la fidélité.



UNE DÉCOUVERTE QUI DATE, MAIS QUI POURRAIT VOUS ÊTRE UTILE...

Archimède, un savant de l'Antiquité (287-212 av. J.C.), nous a laissé un héritage considérable tant en mathématique, qu'en science et en technologie. On lui attribue des inventions telles que la vis sans fin, les leviers et la roue dentée pour ne nommer que celles-là. On lui attribue également la découverte d'un principe qu'il aurait trouvé en prenant son bain et qui dit : « **Tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du fluide déplacé.** » Ce principe est aujourd'hui connu sous le nom de « principe d'Archimède ».

Selon Wikipedia – septembre 2008

(http://fr.wikipedia.org/wiki/Poussée_d'Archimède)

La couronne du roi Hiéron II

Vitruve rapporte que le roi Hiéron II de Syracuse (306-214 avant J.-C.) aurait demandé à son jeune ami et conseiller scientifique Archimède (âgé alors de 22 ans seulement) de

vérifier si une couronne d'or, qu'il s'était fait confectionner comme offrande à Jupiter, était totalement en or ou si l'artisan y avait mis de l'argent. La vérification avait bien sûr pour contrainte de ne pas détériorer la couronne. La forme de celle-ci était en outre trop complexe pour effectuer un calcul du volume de l'ornement. Archimède aurait trouvé le moyen de vérifier si la couronne était vraiment en or, alors qu'il était au bain public, en observant comment des objets y flottaient. Il serait alors sorti dans la rue en s'écriant le célèbre « Eurêka » (j'ai trouvé).

Ce que constate Archimède au bain public est que, pour un même volume donné, les corps n'ont pas le même poids apparent, c'est-à-dire une masse par unité de volume différente. On parle de nos jours de masse volumique. L'argent (masse volumique 10 500 kg·m⁻³) étant moins dense que l'or (masse volumique 19 300 kg·m⁻³), il a donc une masse volumique plus faible. De là, Archimède déduit que si l'artisan a caché de l'argent dans la couronne du roi, alors elle a une masse volumique plus faible. Ainsi fut découverte la supercherie du joaillier.

La solution au problème

Pour répondre à la question du roi Hiéron, Archimède a donc pu comparer les volumes d'eau déplacés par la couronne et une masse d'or 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 composées du même métal. Pour réaliser l'expérience, on peut imaginer plonger dans un récipient rempli à ras bord la masse d'or. Une certaine quantité d'eau débordera alors du récipient. Ensuite, on retire l'or et on le remplace par la couronne à étudier. Si la couronne est bien totalement en or, alors l'eau ne débordera pas. En revanche, si sa densité est plus faible, de l'eau supplémentaire débordera.

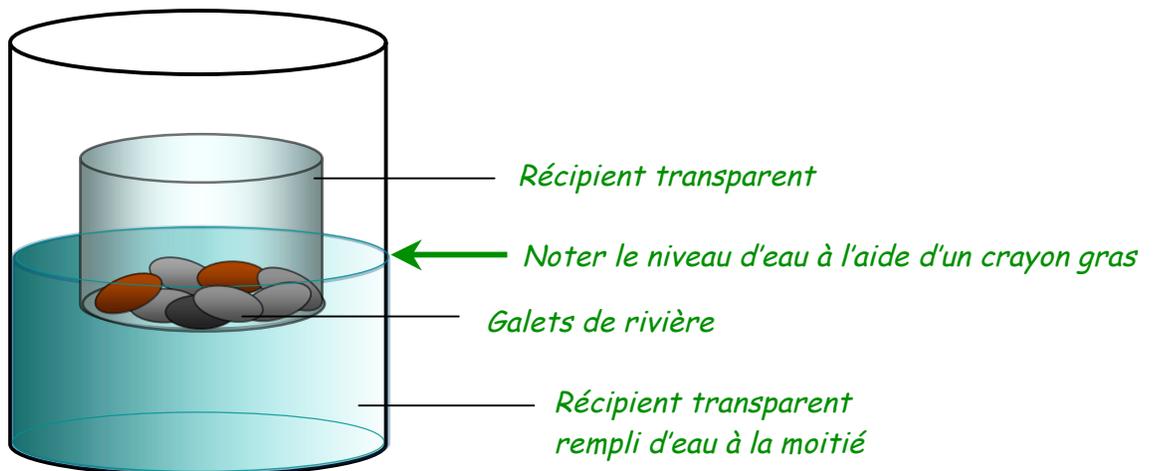
Cette méthode présente deux inconvénients. Le premier est qu'elle ne fait ici intervenir en rien le principe d'Archimède. Le second problème est qu'avec des conditions réalistes, en raison de la forme de la couronne et de la densité de l'or, la hauteur d'eau déplacée est très faible (inférieur au millimètre). Il est donc peu probable qu'Archimède ait pu tirer des conclusions significatives à partir d'une telle expérience.

Une méthode plus réaliste est la suivante. En disposant sur chaque bras d'une balance la couronne d'un côté et son poids égal en or, l'équilibre est initialement obtenu. Ensuite, on peut immerger les deux bras dans de l'eau. Si la couronne et l'or ont la même masse volumique, alors la poussée d'Archimède sera égale sur les deux bras de la balance et l'équilibre sera respecté. Si la couronne ne contient pas uniquement de l'or, alors elle subira une poussée d'Archimède plus importante et un déséquilibre sera alors visible.

1. Imaginez un bol contenant des galets, de l'eau et un petit bol y flottant. En retirant des galets du fond de l'eau pour les déposer dans le bol, qu'arrivera-t-il au niveau de l'eau? (Utilisez le principe d'Archimède pour expliquer le résultat.)

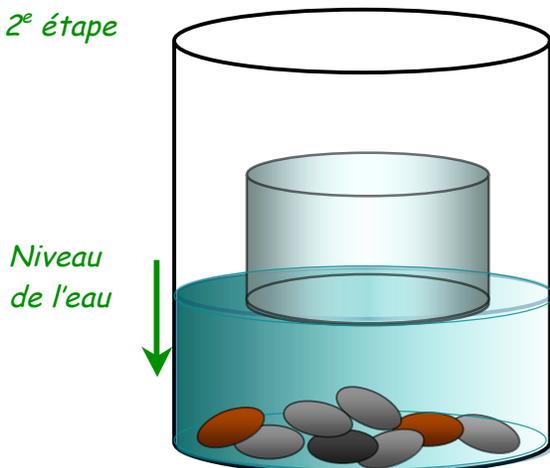
Note : La démonstration et l'explication qui suivent ne font pas de distinction entre poids et masse. Le principe d'Archimède est énoncé en fonction du poids. Sachant que le poids est fonction de la force d'attraction gravitationnelle à laquelle est soumis un corps et que nous travaillerons toujours sur la Terre ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) à l'aide de nos balances étalonnées en grammes, nous ne ferons pas de distinction entre le poids et la masse dans l'explication.

1^{ère} étape



Le récipient contenant les galets de rivière est déposé sur l'eau et flotte tel un bateau.

2^e étape



Les galets sont déposés au fond de l'eau et l'on remarque une baisse significative du niveau de l'eau par rapport au niveau initial.

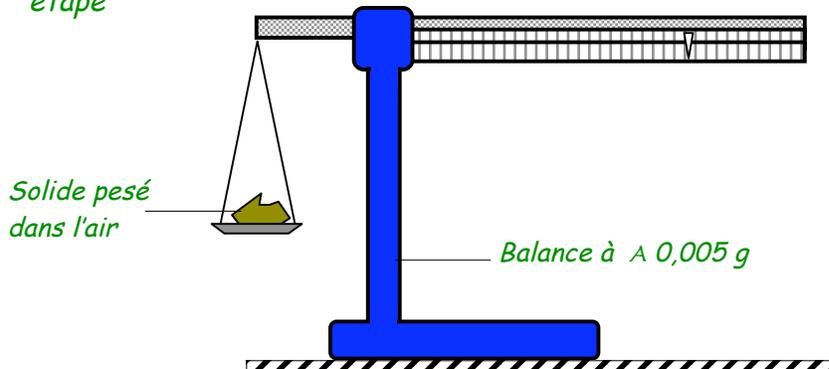
Ceci est dû au fait que les galets ont une masse volumique beaucoup plus grande que celle de l'eau qui est de 1 g/mL . Pour que les galets flottent, ils doivent subir une poussée verticale d'un poids équivalent en eau. Or, si les galets ont une masse totale de 100 g et un volume total de 25 mL , ils déplaceront un volume d'eau de 100 mL pour flotter. Par contre, ils déplaceront un volume de 25 mL une fois immergés.

2. Comment peut-on déterminer le volume d'un solide irrégulier à l'aide d'une balance?

En utilisant le principe d'Archimède, à l'aide d'une balance, on peut peser le solide dans l'air et dans l'eau (voir l'exemple qui suit). En notant la différence de masse dans l'air et dans l'eau, on obtient la poussée exercée par l'eau sur le solide. Comme nous connaissons la masse volumique de l'eau, 1 g/mL, on en déduit le volume du solide.

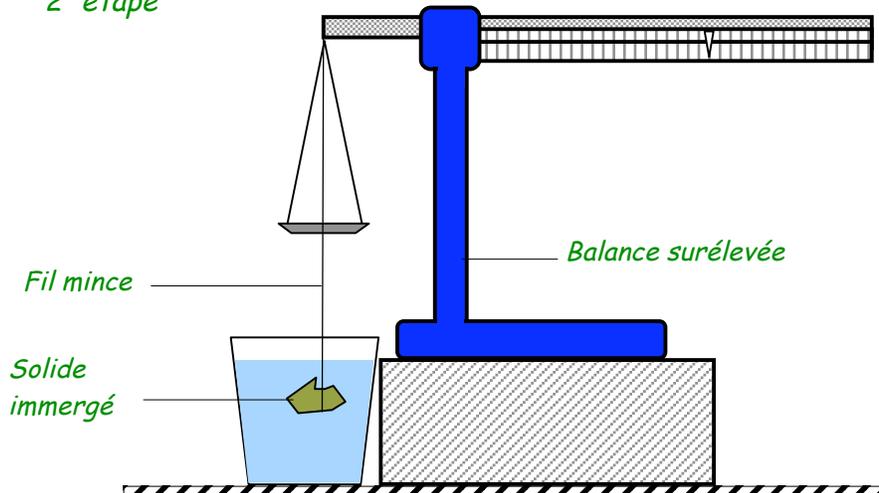
Exemple :

1^{ère} étape



Masse du solide dans l'air : 23,785 A 0,005 g

2^e étape



Masse du solide dans l'eau : 18,650 A 0,005 g

Si la différence des pesées est de 5,135 g (23,785 g - 18,650 g), c'est l'équivalent de la masse d'eau qui exerce la poussée sur le solide. Puisque chaque gramme d'eau a un volume de 1 millilitre, nous pouvons déduire que le solide subit la poussée de 5,135 mL d'eau :

$$\begin{aligned} 1 \text{ g} &= 1 \text{ mL d'eau} \\ 5,135 \text{ g} &= x \text{ mL d'eau} \end{aligned}$$

Le volume du solide est donc égal au volume d'eau qui exerce la poussée, soit : 5,135 mL. Si nous tenons compte de l'incertitude absolue, nous devons additionner les incertitudes sur les valeurs mesurées, nous écrirons donc :

$$(23,785 \pm 0,005) \text{ g} - (18,650 \pm 0,005) \text{ g} = 5,14 \pm 0,01 \text{ g}$$

ce qui nous donne un volume de 5,14 ± 0,01 mL.

Cette méthode permet d'estimer le volume d'un solide avec une grande précision. Lorsque l'on considère l'incertitude due à l'instrument de mesure, elle présente un avantage appréciable comparativement à l'estimation à l'aide d'un cylindre gradué.

3. Que pourrait-on faire si le solide flotte sur l'eau?

On peut utiliser un liquide dont la masse volumique est inférieure à celle du solide, par exemple, l'alcool. Il sera cependant nécessaire de prendre en considération la masse volumique de l'alcool pour déterminer le volume d'alcool qui exerce la poussée.

Exemple :

Masse du solide dans l'air : 21,747 ± 0,005 g

Masse du solide dans l'alcool : 17,422 ± 0,005 g

Poussée de l'alcool sur le solide : 21,747 g - 17,422 g = 4,33 g ± 0,01 g ou 4,33 g à 0,23%

Si la masse volumique de l'alcool est de 0,788 g/mL à 1%, alors :

$$0,788 \text{ g} = 1 \text{ mL d'alcool}$$

$$4,33 \text{ g} = x \text{ mL d'alcool}$$

Volume d'alcool : 5,49 mL à 1,23% (On additionne les incertitudes relatives.)

Si on indique la mesure avec son incertitude absolue, elle sera de 5,49 ± 0,07 mL. Ceci correspond également au volume du solide.



Exemple de l'estimation de la masse volumique d'un échantillon de PEBD et d'un échantillon de PEHD en laboratoire

Matériel à mettre à la disposition des participants :

- Cylindres gradués de grandeurs variées;
- Échantillon de plastique no.2
- Échantillon de plastique no.4
- Balance à fléau de graduée au 0,01 g
- Alcool isopropylique à 70%
- Boîtes ou plateau pour surélever la balance
- Eau
- Compte-gouttes
- Règles
- Fil
- Bêchers

Calcul de la masse volumique de l'alcool :

Note : Un cylindre gradué de 50,0 mL a été utilisé afin de réduire l'incertitude relative sur la valeur finale.

Masse du cylindre gradué : 73,190 A 0,005 g

Masse du cylindre et de l'alcool : 112,570 A 0,005 g

Masse de l'alcool : 39,38 A 0,01 g ou 39,38 g à 0,025%

Volume de l'alcool : 50,0 A 0,5 mL ou 50,0 mL à 1%

Masse volumique de l'alcool : 0,788g/mL à 1% (car 1,025% est arrondi à 1%)
ou 0,788 A 0,008 g/mL.

Calcul de la masse volumique de l'échantillon 1 :

Note : La masse du fil n'est pas considérée car la mise à zéro de la balance a été faite avec le fil afin de réduire les manipulations et d'éviter d'introduire une erreur supplémentaire. (Il est suggéré de ne pas le mentionner afin d'ajouter au défi - certains y penseront.)

Masse de l'échantillon dans l'air: 0,513 A 0,005 g ou 0,513 g à 1%

Masse de l'échantillon dans l'alcool : 0,078 A 0,005 g

Masse d'alcool déplacé : 0,44 A 0,01 g ou 0,44 g à 1%

Volume d'alcool déplacé : 1 mL d'alcool = 0,788 g à 1%

(volume de l'échantillon) x mL d'alcool = 0,44 g à 2,3% donc 0,55 mL à 3,3%

Masse volumique de l'échantillon : $\frac{\text{masse de l'échantillon dans l'air}}{\text{volume de l'échantillon}} = \frac{0,513 \text{ g à 1\%}}{0,55 \text{ mL à 3,3\%}}$

= 0,929 g/cm³ à 4,3% ou 0,93 A 0,04 g/cm³.

Valeur calculée : 0,93 A 0,04 g/cm³

Valeur minimale : 0,89 g/cm³

Valeur maximale : 0,97 g/cm³

Calcul de la masse volumique de l'échantillon 2 :

Masse de l'échantillon dans l'air: 0,450 A 0,005 g ou 0,450 g à 1,1%

Masse de l'échantillon dans l'alcool : 0,078 A 0,005 g

Masse d'alcool déplacé : 0,37 A 0,01 g ou 0,37 g à 2,7%

Volume d'alcool déplacé : 1 mL d'alcool = 0,788 g à 1%

(volume de l'échantillon) x mL d'alcool = 0,37 g à 2,7% donc 0,47 mL à 3,7%

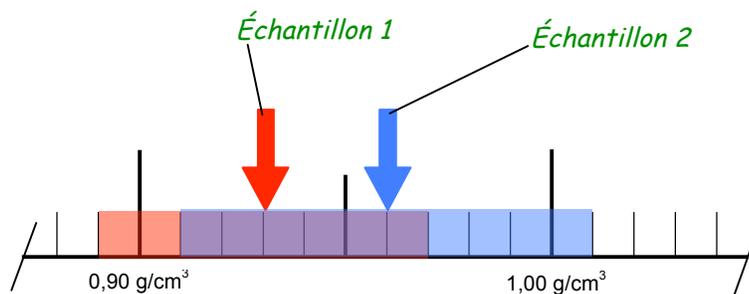
Masse volumique de l'échantillon : $\frac{\text{masse de l'échantillon dans l'air}}{\text{volume de l'échantillon}} = \frac{0,450 \text{ g à } 1,1\%}{0,47 \text{ mL à } 3,7\%}$
= 0,959 g/cm³ à 4,8% ou 0,96 A 0,05 g/cm³.

Valeur calculée : 0,96 A 0,05 g/cm³

Valeur minimale : 0,91 g/cm³

Valeur maximale : 1,01 g/cm³

Conclusion :



Bien que nous croyions avoir réussi à distinguer le PEBD du PEHD, il nous est impossible de nous prononcer de façon tranchante. En effet, en prenant en compte l'intervalle de valeurs possibles (voir figure), nous pouvons confondre les valeurs expérimentales car elles se chevauchent.

Pour obtenir des résultats plus convaincants, il serait nécessaire d'utiliser des appareils de mesures plus précis ou simplement de plus gros échantillons afin de réduire l'incertitude relative sur les mesures effectuées.

Bibliographie

Le grand dictionnaire terminologique (GDT),
http://www.granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index1024_1.asp

BINDI, Christophe. *Dictionnaire pratique de la métrologie : mesure, essai et calculs d'incertitudes*. La Plaine Saint-Denis : AFNOR, 2006, 380 p.

BOISCLAIR, Gilles, PAGÉ, Jocelyne. *Guide des sciences expérimentales – Observations, mesures, rédaction du rapport de laboratoire*. Éditions du Renouveau Pédagogique, Montréal, 1992, 160 p.

TREMBLAY, Louis-Marie, CHASSÉ, Yvan. *Introduction à la méthode expérimentale*. Centre Éducatif et Culturel, Montréal, 1970, 116 p.