

Variabilité de l'utilisation de la verrerie en chimie en seconde générale

Proposition d'activité expérimentale

par **Maxime CHAMPION**
Lycée Vauvenargues - 13100 Aix-en-Provence
maxime.champion@ac-aix-marseille.fr
Mickaël MELZANI
Lycée Follereau - 90000 Belfort
mickael.melzani@gmail.com
et **Kévin MORIS**
Lycée Berthollet - 74000 Annecy
kevin.moris@ac-grenoble.fr

Cet article décrit un protocole expérimental ainsi que les résultats d'une séance de travaux pratiques permettant d'explorer la variabilité expérimentale de l'utilisation de la verrerie en chimie. Cette expérience est ensuite interprétée en grande partie dans le cadre du programme de seconde générale. Elle permet d'évaluer pratiquement l'incertitude-type d'une mesure de volume en chimie.

INTRODUCTION

La variabilité de la mesure est au cœur de l'aspect expérimental des programmes de physique-chimie du lycée et de CPGE. La progression des programmes sur ces questions permet de construire une compréhension de la variabilité de la mesure sur les trois années du lycée. Pour plus de détails sur les aspects théoriques, on peut consulter par exemples les articles de D. Boilley et Y. Lallouet [1] ou de J. Roccia [2]. Pour les détails pratiques, la lecture de la ressource officielle d'accompagnement du programme [3] est indispensable.

À ce titre, dès le programme de seconde générale, les éléments centraux de compréhension de l'incertitude-type doivent être donnés aux élèves. Conformément au préambule du programme, nous proposons une activité expérimentale ayant pour but de :

- sensibiliser l'élève à la variabilité de mesures obtenues ;
- montrer que l'écart-type (autrement dit l'incertitude-type) permet de caractériser la dispersion des valeurs raisonnablement attribuables à la grandeur physique mesurée ;
- rendre compte de la compatibilité d'une valeur tabulée avec le résultat d'une expérience.

La séance proposée permet également à l'élève de travailler les gestes expérimentaux, à savoir prélever un volume de liquide et effectuer une pesée.

1. Présentation de l'expérience et des résultats

1.1. Problématique(s) posée(s)

Le protocole suivant a été réalisé par des élèves de première année de CPGE en filière PCSI. Il peut être effectué dès la seconde générale.

L'objectif est de permettre à l'élève de répondre à la question suivante : « Quelle pièce de verrerie choisir pour prélever 100 mL aussi précisément que possible ? ». Cette question est adaptée à une séance de découverte de la verrerie. Si les élèves sont déjà familiarisés avec celle-ci, on peut plutôt se demander : « Comment démontrer par l'expérience que la pièce de verrerie la plus précise pour prélever 100 mL est la fiole jaugée ? »

Dans un second temps, cette séance permet de discuter la question : « Est-ce que mon utilisation de la verrerie permet d'atteindre le volume inscrit dessus ? »

1.2. Protocole proposé

On étudie trois pièces de verrerie différentes : un bécher de 100 mL, une éprouvette graduée de 100 mL et une fiole jaugée de 100 mL. Chaque groupe dispose d'un exemplaire de chaque.

- Chaque pièce de verrerie est initialement propre et sèche, et sa masse est estimée à l'aide d'une balance de résolution 0,01 g.
- La pièce de verrerie est remplie pour prélever 100 mL. Il est rappelé aux élèves comment ajuster correctement un niveau de liquide par rapport à un trait de graduation ou un trait de jauge.
- La masse d'eau est estimée en pesant la verrerie pleine à l'aide de la même balance puis en retranchant à cette mesure la masse de la verrerie propre et sèche.
- Le volume d'eau prélevé est ensuite déduit en divisant la masse mesurée par la masse volumique de l'eau donnée en fonction de la température de la salle (tableau 1).

T (°C)	16	18	20	22	24
ρ (kg/m ³)	997,8	997,5	997,1	996,7	996,2

Tableau 1 - Masse volumique effective de l'eau en fonction de la température¹.

On suppose que l'incertitude associée à la pesée, ainsi que celle sur la valeur de la masse volumique de l'eau, sont négligeables.

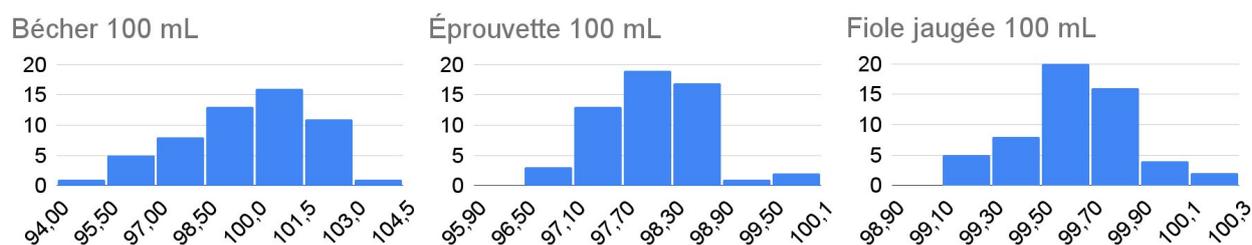
Remarque : l'éprouvette et la fiole jaugée sont des récipients destinés à contenir un volume (verrerie notée « In »), et sont calibrées pour contenir 100 mL. Il ne faut donc pas transvaser leur contenu pour le peser car on ne tiendrait pas compte du liquide qui, par mouillage, reste sur les parois. Ceci est différent d'une verrerie destinée à délivrer un volume (verrerie notée « Ex »), comme une pipette, qui est calibrée pour délivrer le volume indiqué. Une pipette de 10 mL contient en réalité 10 mL plus le volume de mouillage qui reste après la vidange. Le constructeur s'assure que, pour une utilisation dans des conditions bien spécifiées (durée de vidange, extrémité de la pipette au contact du bécher avec un certain angle, ...), le volume *délivré* est bien de 10 mL. Ici nous ne manipulons pas avec une pipette, mais si c'était le cas il faudrait faire mesurer aux élèves le volume délivré afin d'en estimer la variabilité (dont une part serait due à une utilisation qui s'éloigne des conditions prescrites par le constructeur). Quant au bécher, il n'est pas assez précis pour être spécifié In ou Ex.

1.3. Résultats

Pour chaque pièce de verrerie, chaque binôme a réalisé 5 prélèvements. Ainsi 55 résultats par type de verrerie sont disponibles au cours de la séance. Ils sont mis en commun sous forme d'histogramme et interprétés collectivement. Il est possible de réaliser cette interprétation avec moins de valeurs, une quarantaine paraissant un minimum pour avoir des résultats significatifs.

La présentation des données sous forme d'histogramme est un objectif de la classe de seconde générale. Faire un histogramme avec OpenOffice ou LibreOffice n'est pas aisé, c'est en revanche très simple à l'aide d'Excel, de GoogleSheet ou de Python. Pour plus de détails pratiques, nous renvoyons aux éléments 10 et 11 de la référence Eduscol [3].

Les histogrammes regroupés figure 1 ont été réalisés avec GoogleSheet sur 55 valeurs.



¹ Il s'agit de la masse volumique de l'eau corrigée de celle de l'air pour prendre en compte la poussée d'Archimède. Cette correction, en direction des enseignants, est présentée en annexe.

Figure 1 - Histogrammes représentant les données obtenues par les élèves.

2. Interprétations

La plupart des points d'interprétations présentés dans ce paragraphe sont accessibles dans le cadre du programme de seconde générale.

2.1. L'incertitude-type

2.1.1. Estimation qualitative

Le programme exige que les élèves soient capables d'interpréter qualitativement la notion d'incertitude-type. Celle-ci indique l'ordre de grandeur de la différence entre deux valeurs prises au hasard. Plus précisément, elle est définie comme étant égale à l'écart-type de la distribution. Qualitativement, l'élève peut l'estimer à partir d'un histogramme en évaluant graphiquement la demi-largeur de la distribution à mi-hauteur (figure 2). Ceci est en effet approximativement le cas pour les distributions courantes, par exemple pour une gaussienne la demi-largeur à mi-hauteur correspond à 1,2 fois l'écart-type.

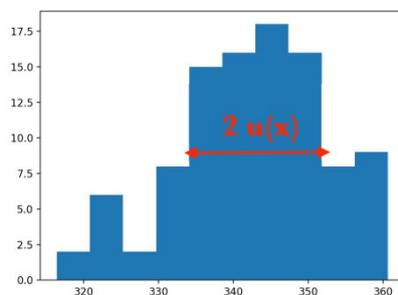


Figure 2 - Visualisation qualitative d'une incertitude-type sur la base d'un histogramme.

2.1.2. Estimation quantitative

L'incertitude-type associée à *un* prélèvement de 100 mL à l'aide d'une pièce de verrerie donnée est, par définition, l'écart-type d'une série de prélèvements à l'aide de cette même pièce de verrerie (voir l'élément 13 de la ressource Eduscol [3]). Ainsi, on réalise une première mesure puis *N-1* autres. Ces *N-1* mesures sont utilisées pour estimer l'incertitude-type de la première mesure. Les mesures étant indépendantes, cette incertitude-type est la même pour toutes les valeurs mesurées.

Ces écarts-types calculés à l'aide du tableur sont regroupés dans le tableau 2. Conformément à l'élément 25 de la ressource officielle [3], on conserve deux chiffres significatifs pour l'incertitude-type en arrondissant au plus proche.

Bécher	Éprouvette	Fiole jaugée
1,9 mL	0,64 mL	0,23 mL

Tableau 2 - Valeurs des incertitudes-types évaluées selon la pièce de verrerie utilisée².

On constate que ces valeurs sont compatibles avec l'application de la définition qualitative de la figure 2 sur les histogrammes de la figure 1.

Ces valeurs sont particulièrement utiles en chimie expérimentale, car elles pourront être réutilisées pour les calculs d'incertitudes composées dans de nombreuses situations.

² Ces valeurs ne dépendent pas de la correction de la poussée d'Archimède présentée en annexe.

2.1.3. Interprétation

Les valeurs de l'incertitude-type doivent être interprétées comme l'ordre de grandeur de l'écart entre deux reproductions de la mesure, ou de manière équivalente comme l'ordre de grandeur de l'écart entre une mesure et la valeur centrale. Ainsi, on constate que c'est avec la fiole jaugée que la dispersion des valeurs est la plus faible. C'est donc, dans le sens commun, la pièce de verrerie la plus « précise ».

Les valeurs d'incertitude-type ici obtenues sont exploitables dans de nombreux contextes. Par exemple, on utilise une fiole jaugée pour effectuer une dissolution : pesée d'une masse m de solide que l'on transvase dans la fiole de volume V , et on complète le volume de la fiole avec le solvant. En terminale, on peut calculer l'incertitude-type composée sur la concentration massique C_m de la solution :

$$\frac{u(C_m)}{C_m} = \sqrt{\left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2}$$

avec $u(m)$ donnée par la balance et $u(V) = 0,23$ mL (cf. tableau 2, si la fiole est de 100 mL).

2.1.4. Lien avec la graduation

Dans ce paragraphe on évalue l'incertitude par une méthode non statistique, appelée évaluation de type B qui apparaît au programme de spécialité de première. Elle consiste à apprécier scientifiquement le processus de mesure sur une unique réalisation à l'aide de l'ensemble des informations disponibles.

Une éprouvette est graduée au mL³. Ainsi, l'incertitude-type de type B liée à cette graduation peut être estimée comme $0,5 \text{ mL}/\sqrt{3}$ (voir éléments 18 et 19 de la référence [3]), soit 0,29 mL, inférieure d'un facteur deux à celle estimée ici par la méthode de type A (cf. tableau 2).

Sur la fiole jaugée, la précision indiquée est de 0,1 mL, soit une incertitude-type de type B de $0,1 \text{ mL}/\sqrt{3} = 0,06$ mL, inférieure d'un facteur quatre à celle estimée ici par la méthode de type A.

La variabilité provient de deux sources : la variabilité du geste et la variabilité du volume de la verrerie (différentes pour chaque groupe). Prenons l'exemple de la fiole. La précision indiquée par le constructeur rend compte des deux, mais dans des conditions d'utilisation précises et qui ne sont pas nécessairement celles suivies par nos élèves. Si cette variabilité « constructeur » implique bien une incertitude-type de 0,06 mL comme indiqué, alors la variabilité du geste des élèves se traduit par une incertitude-type supplémentaire de 0,22 mL pour parvenir à l'incertitude-type de 0,23 mL. En effet, le carré de l'incertitude-type totale est égal à la somme des carrés des incertitudes-types des différentes causes de variabilité.

Ainsi, utiliser les données constructeur dans un calcul d'incertitude conduit à une sous-estimation, potentiellement importante, de celle-ci. En toute rigueur, il faut donc utiliser les valeurs expérimentales mesurées lors de ce TP pour tout calcul ultérieur. Il serait intéressant de refaire ce TP plusieurs fois au cours de la formation (en seconde et à un niveau post-BAC) pour espérer voir cette incertitude expérimentale diminuer avec l'expérience.

2.2. Comparaison avec la valeur de référence

2.2.1. Discussion qualitative

Jusqu'ici, nous avons évalué la variabilité du prélèvement. Il est maintenant légitime de poser la dernière question du paragraphe 1.1 : « Est-ce que mon utilisation de la verrerie (en l'utilisant une fois, non pas N fois) permet d'atteindre le volume indiqué par le constructeur ? » Au vu de l'interprétation de l'incertitude-type, si on considère que la valeur de référence attendue est 100 mL, chaque mesure doit être écartée de cette valeur d'au plus deux écarts-types. Il est possible d'avoir quelques mesures (une sur vingt environ) qui sont significativement plus éloignées. Cela est observable qualitativement directement sur l'histogramme : il faut alors que la valeur attendue soit située à environ deux fois l'incertitude-type du pic de la distribution.

³ En réalité, ce n'est pas tant la graduation que la tolérance inscrite sur la pièce.

Pour le bécher, l'accord est immédiat⁴. Pour l'éprouvette, on constate que la majorité des données sont à environ 3-4 incertitudes-types de la valeur 100 mL. Pour la fiole jaugée, un peu plus de la moitié des valeurs sont à moins de deux incertitudes-types du résultat attendu.

Concernant l'éprouvette, les données sont majoritairement incompatibles avec la valeur attendue. Quelles peuvent en être les causes ? L'incertitude-type relative vaut $0,64/100 = 0,64\%$. Si la balance est précise à 0,01 g, ceci donne une incertitude relative sur la masse de l'ordre de 10^{-4} , bien inférieure donc. La mesure de température influe sur la valeur de la masse volumique utilisée dans le calcul : une erreur de 2 °C donne une variation relative de 4×10^{-4} , il faudrait donc avoir sous-estimé la température de beaucoup pour expliquer l'écart. Les onze éprouvettes utilisées sont-elles en moyenne d'un volume inférieur à 100 mL ? Il reste aussi que les élèves peuvent avoir manipulé, en moyenne, d'une manière qui sous-remplit l'éprouvette : mauvaise gestion du ménisque ? effet de parallaxe si l'œil n'est pas à la bonne hauteur ? Tout ceci peut permettre de sensibiliser les élèves au fait que, parfois, il est difficile d'avoir un modèle suffisamment précis pour obtenir un accord avec l'expérience. Il n'y a rien de grave à cela, il s'agit même du moteur de la recherche scientifique !

Quoi qu'il en soit, cette expérience permet d'avoir accès à l'incertitude-type expérimentale sur le volume prélevé, ce qui est son principal intérêt, indépendamment de l'accord avec la valeur de référence. De plus, rappelons que le processus est intrinsèquement aléatoire : il est possible, par chance, d'obtenir une valeur bien plus proche de 100 mL avec un bécher qu'avec une fiole, mais il est très improbable d'y parvenir plusieurs fois de suite.

2.2.2. Utilisation du z-score

Au niveau seconde générale, il n'est pas possible de discuter plus en détail de l'accord modèle-expérience que ce qui est indiqué au paragraphe précédent. À partir de la terminale, on peut calculer le z-score :

$$z = \frac{|V_{exp} - V_{ref}|}{u(V_{exp})} \quad (1)$$

en admettant que l'incertitude-type sur la valeur de référence soit négligeable. Si cet outil permet de donner un critère quantitatif objectif à la validation d'une compatibilité, il n'apporte toutefois rien en termes de compréhension de la variabilité. Il est d'ailleurs introduit uniquement en terminale pour que les années de seconde et de première soient centrées sur l'interprétation. Ce critère quantifie l'argument qualitatif : de combien est l'écart entre la valeur expérimentale et la valeur attendue.

La valeur de référence est ici plutôt une valeur cible : on souhaiterait que l'élève manipule de sorte à prélever, en moyenne, un volume de 100 mL. Comme précisé dans les éléments 26 et 27 de la ressource officielle Eduscol [3], ce z-score doit être inférieur à 2 pour considérer les mesures compatibles. On constate qu'on tire la même conclusion avec cet outil qu'avec l'interprétation qualitative.

2.3. Moyenne et incertitude sur la moyenne

2.3.1. Du point de vue des programmes

Les auteurs interprètent le programme de seconde comme ne nécessitant pas d'introduire le calcul de la moyenne pour estimer le résultat de la mesure, car celle-ci entre dans le cadre des estimations de type A explicitement introduites dans le programme de première. L'étude en seconde générale est donc restreinte à l'évaluation statistique de l'incertitude-type sur une mesure unique via le calcul de l'écart-type. Ce choix permet de se concentrer sur la compréhension de ce que représente la variabilité d'une mesure. Cette interprétation du programme permet de garder pour la classe de première, et donc aux élèves ayant choisi l'étude de la physique-chimie, les subtilités sur les moyennes⁵.

⁴ Les données non corrigées de la poussée d'Archimède présentées en annexe sont même suffisamment imprécises pour que l'accord soit déjà convenable.

⁵ La division par la racine de N de l'incertitude-type risque sinon de prendre pour les élèves un caractère occulte et magique.

2.3.2. Moyenne sur une fiole

En classe de première donc, on peut être tenté de prendre la moyenne des volumes prélevés, puis de calculer l'incertitude-type sur cette valeur moyenne en divisant l'incertitude-type obtenue précédemment par \sqrt{N} (avec $N = 55$ ici). Ceci est justifié lorsqu'on répète N fois un même protocole de mesure qui vise à estimer une même grandeur physique. La répétition des mesures permet alors de réduire, une fois la moyenne prise, la variabilité liée à des processus aléatoires (mais pas celle due à des contributions qui vont toujours dans le même sens), cette réduction étant traduite par le facteur $1/\sqrt{N}$ (voir l'élément 18 de la référence [3]).

Par exemple, considérons une *autre* expérience : on veut mesurer précisément le volume d'une *unique* fiole. On réalise alors N mesures de son volume, la meilleure estimation est alors obtenue en prenant la moyenne V_m , puis l'incertitude-type $u(V_m)$ est calculée comme l'écart-type de la série divisé par \sqrt{N} .

Le résultat obtenu pour V_m sera différent de 100 mL. En effet, le fabricant garantit sa valeur à une tolérance près. Pour comparer le résultat obtenu en tenant compte de la tolérance, il est nécessaire de se placer au niveau CPGE. Il est possible de tester la compatibilité avec la valeur du fabricant en calculant le z-score :

$$z = \frac{|V_m - V_{ref}|}{\sqrt{u(V_m)^2 + u(V_{ref})^2}} \quad (2)$$

Toutefois, cette expérience ne répond pas aux questions que nous posons au paragraphe 1.1. En effet, la question initiale n'est pas « quel est le volume d'une fiole ? est-ce compatible avec l'indication fabricant ? », mais « quelle est la variabilité du prélèvement d'un étudiant quelconque avec une verrerie quelconque de la classe considérée ? » et « est-ce que mon utilisation de la verrerie (en l'utilisant une fois, non pas N fois) permet d'atteindre le volume indiqué par le constructeur ? ».

2.3.3. Moyenne sur plusieurs fioles

L'expérience proposée nécessite l'utilisation de plusieurs fioles différentes. En supposant que chaque fiole ait été utilisée le même nombre de fois, calculer la moyenne de tous les résultats correspond à la recherche du volume moyen d'une fiole. En effet, comme cela est précisé par le constructeur à travers la tolérance qu'il indique, chacune a un volume légèrement différent.

On s'attend à ce que ce volume moyen soit compatible avec la valeur annoncée par le constructeur. Mais réaliser cette moyenne ne répond en aucune façon aux questions posées dans le paragraphe 1.1.

2.3.4. Conclusion de l'utilisation de la moyenne

Prenons un autre exemple pour insister sur ce point qui donne facilement lieu à des confusions. Nous avons établi que la variabilité du prélèvement avec un bécher de 100 mL se traduit par une incertitude-type $u(V) = 1,9$ mL. Nous sommes arrivés à ce résultat en exploitant une série de 55 mesures. La valeur de $u(V)$ aurait été la même (à des fluctuations près) en exploitant une série de 5000 mesures. Car en effet, l'écart-type (et la moyenne) d'une série de réalisations converge raisonnablement au bout de quelques dizaines de valeurs, puis ne change que très peu. La division par \sqrt{N} , qui fait tendre le rapport vers zéro, ne peut pas être effectuée pour répondre à la question de la variabilité d'une mesure. Le faire mènerait facilement à des conclusions absurdes : en comparant une série de 5000 mesures avec un bécher et une série de 10 mesures avec une fiole, en divisant par \sqrt{N} on conclurait que le bécher est plus précis pour un prélèvement unique...

Il est à noter qu'un document expérimental officiel d'accompagnement du programme est disponible sur cette expérience [3]. Les résultats bruts obtenus sont cohérents avec ceux présentés dans cet article, toutefois l'interprétation qui est faite de l'expérience peut prêter à confusion à cause du manque d'énonciation claire des objectifs.

Pour conclure, tout travail expérimental doit commencer par se poser une question sur ce que l'on souhaite mesurer. L'utilisation d'une moyenne ne doit jamais faire partie d'un processus routinier mais doit permettre de répondre à la question posée. Ainsi, les auteurs reviennent au point 2.3.1. et considèrent que son

utilisation en classe de seconde est à exclure.

CONCLUSION

Dans cet article, un protocole expérimental visant à quantifier la variabilité des mesures de volumes en chimie a été présenté. Ce protocole est réalisable dès la classe de seconde générale et s'intègre totalement dans l'esprit de la partie *Mesures et Incertitudes* de ce programme.

En plus de travailler la technique du geste, ce TP très simple à réaliser permet de mettre en place tous les éléments fondamentaux de l'interprétation des incertitudes. Une telle séance peut servir d'ouverture et d'introduction pratique et concrète au traitement des incertitudes de mesure. Un TP similaire peut être réalisé pour étudier, lorsqu'elle est introduite, la pipette jaugée ou graduée.

Par la suite, les résultats de ce TP sont indispensables pour traiter correctement des incertitudes liées à l'utilisation de la verrerie. En effet, nous avons vu que les incertitudes qu'on peut déduire de la tolérance inscrite par le constructeur sont significativement plus faibles que celles constatées expérimentalement. Cela s'explique par le manque d'expérience des élèves dans la réalisation des gestes, c'est-à-dire par une utilisation des instruments qui s'éloigne de la configuration métrologique utilisée pour les tests des fabricants.

Enfin, nous avons expliqué que le calcul de la moyenne des volumes ne permettait pas, dans les conditions de l'expérience, de répondre aux questions posées en préalable de l'activité expérimentale. Dans ce cas, le calcul de moyenne est à exclure.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Julien Browaeyns pour ses nombreuses suggestions ayant permis une amélioration de cet article supérieure à 2σ .

BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. Boilley et Y. Lallouet, « Nouveau programme de terminale : évaluation numérique des incertitudes de mesures », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 115, n° 1033, p. 441-453, avril 2021.
D. Boilley et Yoann Lallouet, « Nouveau programme de terminale : évaluation numérique des incertitudes de mesures. Partie 2 : exemples d'application », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 115, n° 1034, p. 513-525, mai 2021.
- [2] J. Roccia, « Théorie statistique des incertitudes expérimentales. Première partie », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 109, n° 979, p. 1495-1527, décembre 2015.
J. Roccia, « Théorie statistique des incertitudes expérimentales. Deuxième partie » par, *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 110, n° 980, p. 25-48, janvier 2016.
- [3] Julien Browaeyns, Groupe IREM « Mesure et incertitudes » de l'Université de Paris, « Mesures et incertitudes au lycée », *Document d'accompagnement du programme Eduscol*, <https://eduscol.education.fr/document/7067/download>
- [4] GRIESP, « Mesure de masse et de volume (seconde générale) », *Document d'accompagnement du programme Eduscol*, <https://eduscol.education.fr/225/recherche-et-innovation-en-physique-chimie>
- [5] Site web Thermexcel : « Caractéristiques physiques de l'eau (à pression atmosphérique) », https://www.thermexcel.com/french/tables/eau_atm.htm
- [6] Site web Thermexcel : « Masse volumique de l'air humide », <https://www.thermexcel.com/french/tables/massair.htm>

Annexe

Prise en compte de la poussée d'Archimède

Présentation de la masse volumique effective

Au niveau de précision atteint par la fiole jaugée et par l'éprouvette graduée, la modélisation du résultat de la pesée comme étant la masse de l'eau n'est pas compatible avec l'expérience. Il est nécessaire d'affiner le modèle en tenant compte de la poussée d'Archimède de l'air, qui réduit la masse apparente de ce qui est pesé⁶. Le raffinement discuté ici n'a pas vocation à être présenté à des élèves de seconde.

La poussée d'Archimède est une force qui s'applique à un corps immergé dans un fluide et est égale à l'opposé du poids du volume de fluide déplacé. En remplissant la verrerie d'un volume V_{eau} d'eau, on déplace un volume correspondant d'air. La poussée d'Archimède vaut donc en norme $\Pi = \rho_{\text{air}} V_{\text{eau}} g$ avec ρ_{air} la masse volumique de l'air et g l'accélération de pesanteur.

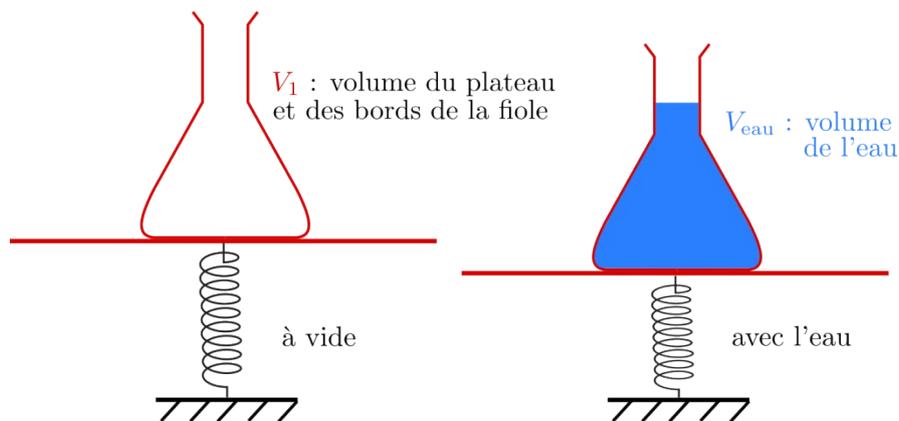


Figure 3 - Fonctionnement schématique d'une balance.

On peut schématiser le fonctionnement d'une balance comme sur la figure 3 : elle traduit en masse la somme des forces F_{tot} qui s'exercent sur l'extrémité haute du ressort, en la divisant par g . À vide :

$$F_{\text{tot, vide}}/g = m_{\text{plateau}} + m_{\text{fiole}} - \rho_{\text{air}} V_1.$$

Avec l'eau :

$$F_{\text{tot, plein}}/g = (m_{\text{plateau}} + m_{\text{fiole}} + m_{\text{eau}}) - \rho_{\text{air}} (V_1 + V_{\text{eau}}).$$

La tare effectuée à vide permet de ne mesurer que la différence :

$$\Delta m = m_{\text{eau}} - \rho_{\text{air}} V_{\text{eau}} = (\rho_{\text{eau}} - \rho_{\text{air}}) V_{\text{eau}} = \rho_{\text{apparente}} V_{\text{eau}}$$

On en déduit que la différence de masse ne doit pas être divisée par la masse volumique de l'eau afin d'obtenir le volume de liquide, mais par $\rho_{\text{apparente}} = \rho_{\text{eau}} - \rho_{\text{air}}$ (tableau 3).

T (°C)	16	18	20	22	24
ρ_{eau} (kg/m ³)	999,0	998,7	998,3	997,9	997,4
ρ_{air} (kg/m ³)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

⁶ Par exemple, les comparaisons d'étalons au Bureau International des Poids et Mesures se font souvent avec une balance sous vide pour s'affranchir de la poussée d'Archimède. Lorsqu'elles se font dans l'air, ce n'est pas un problème tant que les masses comparées ont le même volume. Mais si elles ne l'ont pas (étalonnage d'un étalon en inox par rapport à un en platine), alors la différence de poussée d'Archimède est très significative et domine le budget des incertitudes.

$\rho_{\text{apparente}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	997,8	997,5	997,1	996,7	996,2
---	-------	-------	-------	-------	-------

Tableau 3 - Masses volumique en fonction de la température (données issues de [5] et [6]). Le tableau 1 à destination des élèves ne présente que la dernière ligne.

Les histogrammes regroupés figure 4 ont été réalisés avant correction de la poussée d'Archimède. On constate que la correction est minime mais, au niveau de précision de l'expérience, elle est nécessaire (mais non suffisante) pour espérer la compatibilité entre l'expérience et le modèle.

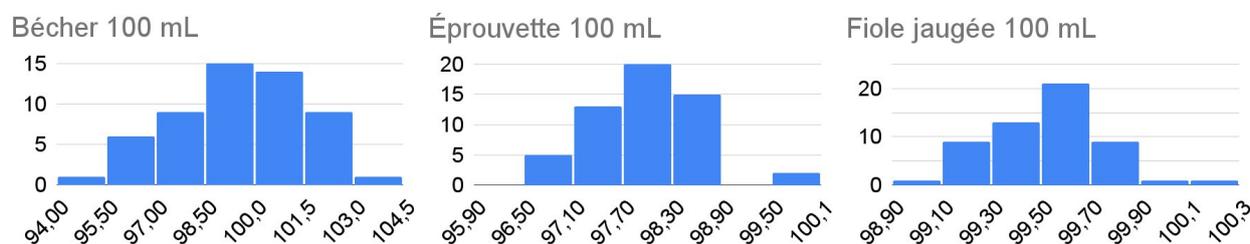


Figure 4 - Histogrammes représentant les données obtenues par les élèves sans prendre en compte la poussée d'Archimède ($\Delta m/\rho_{\text{eau}}$). Les données ne semblent pas compatibles avec un prélèvement de 100 mL pour l'éprouvette et la fiole.

Discussion

On peut remarquer qu'utiliser une verrerie de plus faible volume permettrait vraisemblablement de limiter l'impact de la poussée d'Archimède de l'air. Pour un prélèvement de 10 mL, la variabilité de la mesure est sans doute prépondérante devant la correction à apporter pour en tenir compte, comme c'est le cas pour le bécher (voir figure 1). Mais cela reste à démontrer.

Enfin, il est tout à fait possible de ne pas tenir compte de la poussée d'Archimède. Si l'objectif du TP est l'estimation des incertitudes-types des prélèvements, alors ceci n'a aucun impact (car cela décale presque en bloc toutes les valeurs sans affecter leur variabilité). Les élèves pourraient alors faire remarquer un désaccord entre la moyenne des expériences et le volume attendu de 100 mL (comme sur la figure 1 pour la fiole où la moyenne est légèrement trop basse). L'enseignant peut alors évoquer la poussée d'Archimède. Plus généralement, en tant qu'enseignants, nous avons souvent tendance à ne proposer aux élèves que des expériences compatibles avec la théorie. Cela constitue un biais important dans leur formation. Il faut que les élèves soient confrontés à des écarts théorie-modèle, qu'ils soient capables de les expliquer ou non, car il s'agit du moteur même de la méthode scientifique. Cela permet de mettre en avant le fait que parfois le protocole ou le modèle ne sont pas adaptés, indépendamment du travail des élèves. Il n'y a aucune raison pédagogique de leur faire croire que le professeur a toujours raison !



Maxime CHAMPION

Professeur de physique-chimie en PTSI

Lycée Vauvenargues

Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône)



Mickaël MELZANI

Professeur de physique-chimie en PTSI

Lycée Raoul Follereau

Belfort (Territoire de Belfort)



Kévin MORIS

Professeur de chimie en PCSI

Lycée Berthollet

Annecy (Haute-Savoie)