

PHYSIQUE CHIMIE

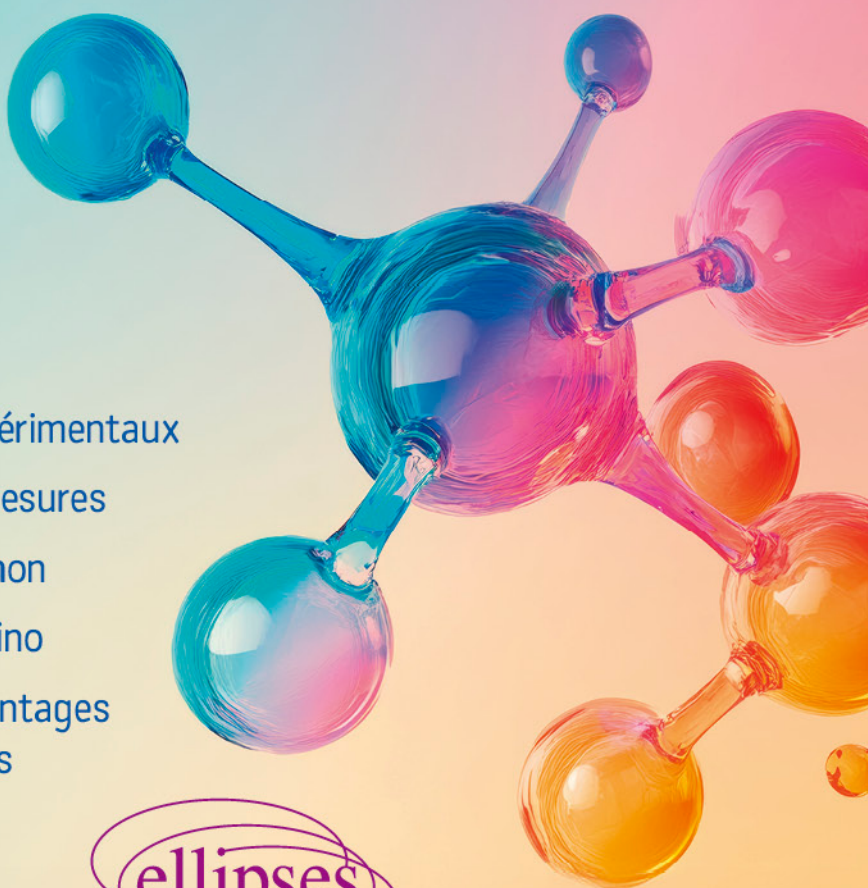
Travaux pratiques corrigés

Hassan Khalil

2^{de}

-  Protocoles expérimentaux
-  Résultats de mesures
-  Scripts de Python
-  Sketchs d'Arduino
-  Photos des montages
et des résultats

ellipses



Physique Chimie

Travaux pratiques corrigés

 Protocoles expérimentaux

 Résultats de mesures

 Scripts de Python

 Sketchs d'Arduino

 Photos des montages
et des résultats

2^{de}

Hassan KHALIL



Conception graphique couverture : Nathalie FOULLOY
Conception graphique intérieur et mise en pages : Nord Compo

ISBN 9782340-114722

Dépôt légal : août 2026

© Ellipses Édition Marketing S.A.
8/10 rue la Quintinie 75015 Paris



Le Code de la propriété intellectuelle et artistique n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr



Avant-propos

Les sciences physiques sont une discipline expérimentale. Leur apprentissage passe en grande partie par la réalisation de travaux pratiques (T.P) qui permettent aux élèves d'acquérir des savoir-faire expérimentaux qui ne peuvent être obtenus par l'enseignement théorique.

Le but de ce livre est d'aider les élèves de seconde à mieux réussir les travaux pratiques effectués en classe chaque semaine.

Il sensibilise dans un premier temps les élèves à la notion d'erreur lors d'une mesure et les initie aux calculs d'incertitudes.

Les 25 activités proposées par la suite couvrent l'ensemble des compétences expérimentales en physique et en chimie qu'un élève de seconde doit acquérir.

Les activités expérimentales sont structurées de la manière suivante :

- Objectifs
- Matériel et produits
- Protocoles
- Exploitation des résultats de mesures

Les corrigés des activités sont illustrés de photos de montages et de résultats de mesures pour permettre de mieux visualiser les expériences.

Presque la moitié des activités expérimentales proposées dans ce livre peuvent être réalisées en dehors du lycée ce qui permet de s'exercer en toute autonomie.

Les compétences expérimentales acquises ainsi en physique et en chimie seront utiles aux élèves tout au long de leur scolarité, en particulier lors de l'épreuve cruciale de l'Évaluation des Compétences Expérimentales (E.C.E) dans le cadre du baccalauréat ; épreuve qui vise à valider les compétences pratiques.



Sommaire

INTRODUCTION.....7

Grandeurs, mesures et incertitudes 7

SUJETS DE TRAVAUX PRATIQUES DE CHIMIE..... 15

TP N°1 Mesures de masses volumiques..... 16

TP N°2 Mesure de la température de fusion du saccharose..... 21

TP N°3 Les mélanges et la chromatographie sur couche mince..... 24

TP N°4 Tests d'identification d'ions..... 29

TP N°5 Préparation d'une solution aqueuse par dissolution..... 31

TP N°6 Préparation d'une solution aqueuse par dilution 34

TP N°7 Estimation de la concentration massique de l'eau Dakin
en ions permanganate..... 37

TP N°8 Construire des atomes et des ions..... 39

TP N°9 Construire des ions et des molécules..... 42

TP N°10 Compter les entités chimiques 46

TP N°11 Synthèse d'un arôme de banane 49

TP N°12 Synthèse du savon..... 54

SUJETS DE TRAVAUX PRATIQUES DE PHYSIQUE 59

TP N°13 Étude du mouvement d'un mobile à l'aide d'une webcam 60

TP N°14 Étude du mouvement d'un mobile à l'aide d'une table
à coussin d'air..... 65

TP N°15 Le principe d'inertie appliqué au mouvement d'un mobile 69

TP N°16 Mesure de la vitesse d'un signal sonore à l'aide de deux
smartphones..... 72

TP N°17 Mesure des caractéristiques d'un signal ultrasonore à l'aide
d'un oscilloscope..... 77

TP N°18 Mesure de la vitesse des ultrasons à l'aide
du microcontrôleur Arduino 80

SOMMAIRE

TP N°19	Tracé de spectres d'émission de sources lumineuses	85
TP N°20	Mesure de l'indice de réfraction du plexiglas	89
TP N°21	Mesure des caractéristiques de l'image formée par une lentille mince convergente	93
TP N°22	Vérification expérimentale de la loi des nœuds et de la loi des mailles	97
TP N°23	Tracé de la caractéristique d'un dipôle ohmique	102
TP N°24	Tracé de la courbe d'étalonnage d'une thermistance CTN	106
TP N°25	Étude d'une photorésistance à l'aide d'un microcontrôleur Arduino	109

CORRIGÉS DES SUJETS DES TRAVAUX PRATIQUES DE CHIMIE	113
--	-----

CORRIGÉS DES SUJETS DES TRAVAUX PRATIQUES DE PHYSIQUE	157
--	-----

Grandeurs, mesures et incertitudes

1. Grandeurs scalaires ou vectorielles

On associe à la plupart des grandeurs physiques ou chimiques une unité ayant un nom et un symbole. Par exemple, l'unité de la masse d'un corps est le kilogramme de symbole kg.

Les grandeurs peuvent être scalaires ou vectorielles. Une grandeur scalaire comme le volume V possède une seule caractéristique qui est sa valeur. Une grandeur vectorielle comme la force $\vec{F}$ est caractérisée par quatre données (l'origine, la direction, le sens et la valeur).

Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de grandeurs et les unités correspondantes :

Grandeur	Nature	Notation	Unité
Masse	Scalaire	m	kg
Volume	Scalaire	V	m ³
Masse volumique	Scalaire	ρ	Kg.m ⁻³
Concentration massique	Scalaire	C_m	Kg.m ⁻³
Quantité de matière	Scalaire	n	mol
Longueur	Scalaire	L	m
Durée	Scalaire	τ	s
Vitesse	Vectorielle	v	m.s ⁻¹
Température	Scalaire	θ	°C
Tension électrique	Scalaire	U	V
Intensité du courant électrique	Scalaire	I	A
Force	Vectorielle	F	N

2. Incertitude absolue d'une mesure

Lorsque l'on mesure une grandeur physique ou chimique on cherche à déterminer une valeur de cette grandeur. À cause des erreurs de mesure dues à l'opérateur et ou à l'instrument de mesure, la valeur mesurée V_{mes} est entachée d'erreurs par conséquent on a jamais accès

à la vraie valeur V_{vraie} . On ne peut déterminer que l'intervalle où se trouve cette vraie valeur $[V_{\text{mes}} + u(V) ; V_{\text{mes}} - u(V)]$ où $u(V)$ représente **l'incertitude absolue de mesure**. L'intervalle $[V_{\text{mes}} + u(V) ; V_{\text{mes}} - u(V)]$ est dit intervalle de confiance.

Le résultat de mesure s'écrit $V = V_{\text{mes}} \pm u(V)$.

Lorsqu'elle n'est pas précisée, l'incertitude absolue de la valeur d'une grandeur donnée est égale à la moitié de l'unité du dernier chiffre significatif. Par exemple l'incertitude de $V = 15,48 \text{ L}$ est $(0,01)/2$ soit $0,005 \text{ L}$.

L'incertitude de mesure d'un instrument gradué, si son incertitude n'est pas précisée par le constructeur, est donnée par :

- La moitié de la valeur de la plus petite graduation si la mesure exige une seule lecture. C'est le cas d'une éprouvette graduée ;

EXEMPLE

Si l'éprouvette est graduée en **mL** et on mesure un volume égal à **23 mL** alors $u(V) = 0,5 \text{ mL}$.

Le résultat de mesure s'écrit $V = (23 \pm 0,5) \text{ mL}$

- La valeur de la plus petite graduation si la mesure exige deux lectures c'est le cas d'une règle graduée ;

EXEMPLE

Si la règle est graduée en **mm** et on mesure une longueur de **208 mm** alors $u(L) = 1 \text{ mm}$.

Le résultat de mesure s'écrit $L = (208 \pm 1) \text{ mm}$

L'incertitude de mesure d'un instrument numérique, si son incertitude n'est pas précisée par le constructeur, est donnée par la plus faible valeur du dernier digit.

EXEMPLE

Si une balance numérique qui réalise des mesures au **1/10** du gramme affiche une masse de **12,5 g** alors $u(m) = 0,1 \text{ g}$.

Le résultat de mesure s'écrit $m = (12,5 \pm 0,1) \text{ g}$

Lorsqu'une grandeur dépend d'autres grandeurs (par exemple $v = L/\tau$), l'incertitude de mesure de cette grandeur est déterminée à partir des incertitudes de mesure des grandeurs qui la composent.

$$\text{Ainsi, } u(v) = v \times \sqrt{\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(\tau)}{\tau}\right)^2}$$

3. Incertitude relative d'une mesure

L'incertitude relative d'une mesure est donnée par le rapport :

$$\frac{\text{Incertitude absolue}}{\text{Valeur mesure}}$$

EXEMPLE

L'incertitude relative d'une mesure d'un volume V est $\frac{u(V)}{V}$.

En fait, l'incertitude relative d'une mesure s'appelle la précision de cette mesure. Plus l'incertitude relative d'une mesure est petite, plus cette mesure est précise.

4. Comparaison avec une valeur de référence

Il est souvent utile de comparer le résultat de mesure ou de calcul à une valeur de référence $V_{\text{réf}}$:

- Si le résultat de mesure V_{mes} est fourni avec son incertitude $u(V)$, alors la mesure est considérée satisfaisante si $V_{\text{réf}}$ appartient à l'intervalle de confiance $[V_{\text{mes}} + u(V) ; V_{\text{mes}} - u(V)]$.
- Si le résultat de mesure V_{mes} est fourni sans incertitude $u(V)$, on pourrait calculer l'écart relatif exprimé en pourcentage entre la valeur mesurée V_{mes} et la valeur de référence $V_{\text{réf}}$:

$$\frac{|V_{\text{mes}} - V_{\text{réf}}|}{V_{\text{mes}}} \times 100$$

La mesure est satisfaisante tant que l'écart relatif ne dépasse pas 10 %.

5. Le nombre de chiffres significatifs

La valeur d'une grandeur provenant d'une mesure ou d'un calcul comporte des chiffres. Tous ces chiffres n'ont pas forcément une signification c'est-à-dire ne sont pas significatifs.

INTRODUCTION

Un chiffre significatif est un chiffre qui a réellement une signification selon la précision des données ou du calcul.

Pour déterminer le nombre de chiffres significatifs d'une valeur, on utilise les trois règles suivantes :

- Tous les chiffres non nuls sont significatifs :
La valeur 245,7 a 4 chiffres significatifs et 24,57 a également 4 chiffres significatifs puisque la virgule n'intervient pas.
- Les zéros placés à l'intérieur du nombre ou à la fin du nombre, après la virgule, sont toujours significatifs ; 37 028 a 5 chiffres significatifs et 3 702,80 a 6 chiffres significatifs.
- Les zéros placés au début du nombre ne sont jamais significatifs. 0,123 a 3 chiffres significatifs et 0,0123 a également 3 chiffres significatifs.

En l'absence des valeurs des incertitudes absolues, la valeur numérique qui résulte d'un calcul provenant de grandeurs est exprimée avec le nombre de chiffres significatifs de la donnée qui comporte le moins de chiffres significatifs.

EXEMPLE

Calculons la vitesse d'un mobile qui a parcouru la distance $d = 42,6$ m pendant une durée égale à $\tau = 12$ s.

La valeur de la vitesse est donnée par :

$$v = \frac{d}{\tau}$$

Soit

$$v = \frac{42,6}{12}$$

Soit

$$v = 3,55 \text{ m.s}^{-1}$$

La distance est exprimée avec 3 chiffres significatifs et la durée avec 2 chiffres significatifs. La vitesse doit être exprimée avec seulement 2 chiffres significatifs. Ce qui donne $3,6 \text{ m.s}^{-1}$ en arrondissant par excès puis que le deuxième chiffre après la virgule est supérieur ou égal à 5.

Donc la valeur de la vitesse est donnée par :

$$v = 3,6 \text{ m.s}^{-1}$$

Dans le cas où les incertitudes sont connues, toute valeur numérique qui provient d'une mesure ou d'un calcul à partir de grandeurs mesurées doit être exprimée avec un nombre de chiffres significatifs tenant compte des incertitudes absolues.

ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

MATÉRIEL

- Feuille de papier A4 ;
- Règle de 30 cm.

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- a. Mesurer la longueur de la feuille et donner la valeur de la longueur **L** obtenue avec son incertitude absolue **u(L)**.

$$L = \dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots$$

- b. Mesurer la largeur de la feuille et donner la valeur de la largeur **l** obtenue avec son incertitude absolue **u(l)**.

$$l = \dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots$$

- c. En déduire la valeur **A** de l'aire de la feuille avec son incertitude **u(A)**.

$$A = \dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots$$

DONNÉES

- $A = L \times l$

- $u(A) = A \times \sqrt{\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(l)}{l}\right)^2}$

ÉNONCÉS DES EXERCICES

● Exercice 1. Masse d'une baguette de pain

En France, une baguette standard pèse d'habitude approximativement 250,0 g. Cette valeur peut varier légèrement d'un établissement à l'autre. Florence a utilisé sa balance de cuisine pour mesurer la masse d'une baguette de pain achetée à une boulangerie du quartier. Le résultat de la mesure est $m = 249,9$ g. La balance de Florence effectue des pesées au 1/10 de gramme.

- Quelle est la valeur de l'incertitude absolue de cette mesure ?
- En déduire l'intervalle de confiance de cette mesure.
- Quelle est la valeur de référence de cette mesure.
- Le résultat de cette mesure est-il satisfaisant ?

● Exercice 2. Volume d'une boisson gazeuse

Le volume d'une boisson gazeuse d'une canette de 330 mL a été mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée de 500 mL graduée au 10 mL.

- Quelle est la valeur de l'incertitude absolue de cette mesure ?
- L'intervalle de confiance de cette mesure est [321 mL ; 331 mL].
Quelle est la valeur du volume mesuré ?
- Quelle est la valeur de la valeur de référence $V_{\text{réf}}$?
- Calculer la valeur de l'incertitude relative de cette mesure.
- Cette mesure est-elle satisfaisante ?

CORRIGÉ DE L'ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

- La valeur de la longueur de la feuille écrite avec son incertitude absolue $u(L)$:

$$L = (297 \pm 1) \text{ mm}$$

- La valeur de la largeur de la feuille écrite avec son incertitude absolue $u(l)$:

$$l = (210 \pm 1) \text{ mm}$$

- c. La valeur **A** de l'aire de la feuille écrite avec son incertitude absolue **u(A)** :

$$A = L \times l$$

APPLICATION NUMÉRIQUE

$$A = 297 \times 210$$

Soit

$$A = 62\,370 \text{ mm}^2$$

La valeur de A trouvée est exprimée avec 5 chiffres significatifs.

Calcul de u(A) :

$$u(A) = A \times \sqrt{\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(l)}{l}\right)^2}$$

APPLICATION NUMÉRIQUE

$$u(A) = 62\,370 \times \sqrt{\left(\frac{1}{297}\right)^2 + \left(\frac{1}{210}\right)^2}$$

Soit

$$u(A) = 363,74 \text{ mm}^2$$

On doit garder un seul chiffre significatif, il vient

$$u(A) = 4 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

La valeur de u(A) précise le nombre de chiffres significatifs que l'on doit adopter pour exprimer la valeur de A. À savoir 3 chiffres significatifs.

Donc

$$A = (624 \pm 4) \times 10^2 \text{ mm}^2.$$

CORRIGÉS DES EXERCICES

● Exercice 1. Masse d'une baguette de pain

- a. La valeur de l'incertitude absolue de cette mesure est : 0,1 g.
- b. L'intervalle de confiance de cette mesure est :
[249,9 – 0,1 ; 249,9 + 0,1] soit [249,8 ; 250,0].
- c. La valeur de référence de cette mesure est 250,0 g.
- d. La valeur de référence 250,0 g appartient à l'intervalle de confiance [249,8 ; 250,0] par conséquent cette mesure est satisfaisante.

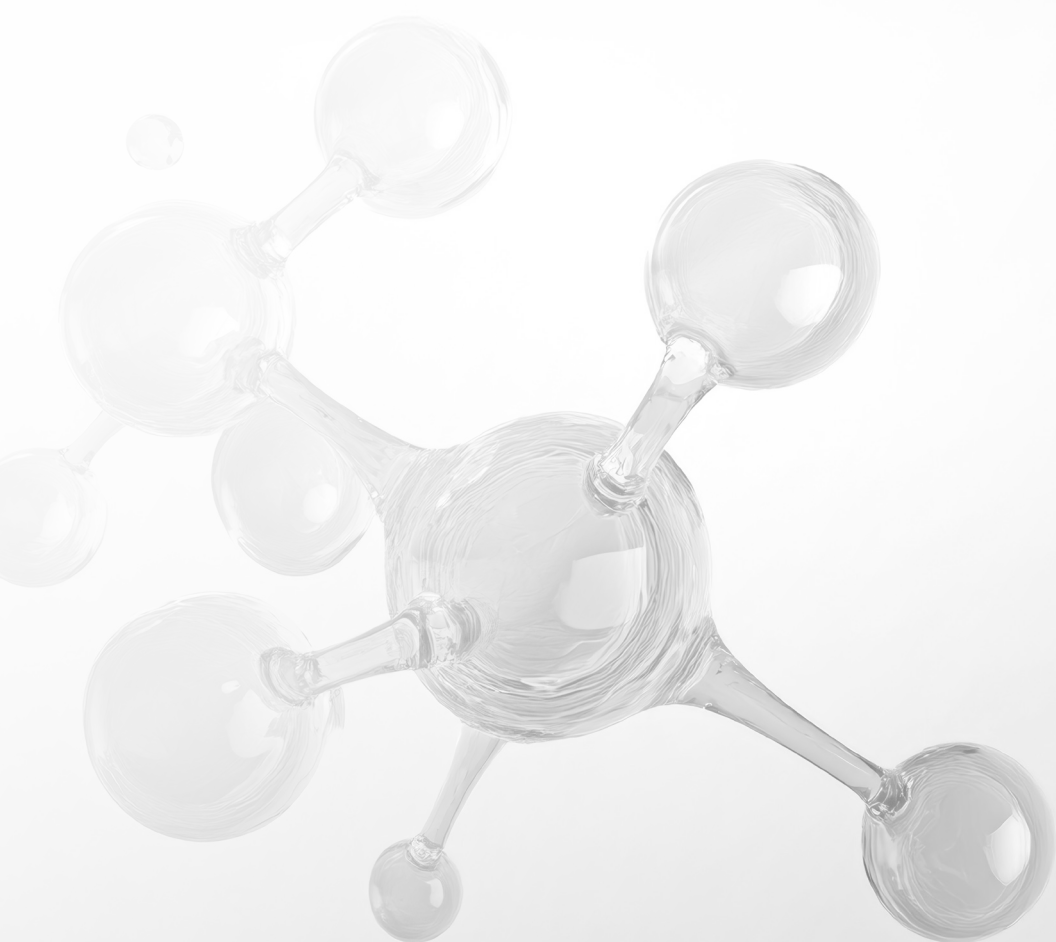
● Exercice 2. Volume d'une boisson gazeuse

Le volume d'une boisson gazeuse d'une canette de 330 mL a été mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée de 500 mL graduée au 10 mL.

- a. La valeur de l'incertitude absolue de cette mesure :
Elle vaut la moitié de la plus petite graduation c'est-à-dire $10/2 = 5$ mL.
- b. La valeur du volume mesuré :
 $321 = V_{\text{mes}} - 5$ soit $V_{\text{mes}} = 321 + 5 = 326$ mL.
- c. La valeur de référence de cette mesure est $V_{\text{réf}} = 330$ mL.
- d. Calcul de la valeur de l'incertitude relative de cette mesure :

$$\frac{|V_{\text{mes}} - V_{\text{réf}}|}{V_{\text{mes}}} \times 100 = \frac{|326 - 330|}{326} \times 100 = 1,2 \%$$

- e. La valeur de l'incertitude relative est inférieure à 10 % donc la mesure est satisfaisante.



SUJETS DE TRAVAUX PRATIQUES DE CHIMIE

TP N°1

Mesures de masses volumiques



Objectifs

Mesurer les masses volumiques de l'eau, d'une orange et d'un cylindre métallique.

Produits et matériel

- ✓ Une orange ;
- ✓ Un cylindre métallique ;
- ✓ L'eau de robinet ;
- ✓ Un tube à essai ;
- ✓ Bécher ;
- ✓ Éprouvette graduée de 100 mL ;
- ✓ Un fil de cuisine ;
- ✓ Règle de 30 cm ;
- ✓ Balance de précision 0,1 g.



PROTOCOLES

● Protocole n° 1. Mesure de la masse volumique de l'eau

- Placer un bécher sur le plateau de la balance ;
- Tarer la balance ;
- Remplir un tube à essai à ras bord avec de l'eau de robinet ;
- Vider le contenu du tube à essai dans le bécher et mesurer la masse de l'eau ;
- Donner la valeur de la masse **m** obtenue avec son incertitude absolue **u(m)** ;

$$m = (\dots \pm \dots) \text{ g}$$

- Mesurer le volume de l'eau du bécher et donner la valeur du volume **V** obtenu avec son incertitude absolue **u(V)** ;

$$V = (\dots\dots \pm \dots\dots) \text{ mL}$$

- En déduire la valeur de la masse volumique de l'eau ;

$$\rho = \dots\dots \text{ g.mL}^{-1}$$

- Calculer la valeur de l'incertitude absolue **u(ρ)** de la masse volumique **ρ**.

DONNÉE

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

- Donner la valeur de de la masse volumique **ρ** avec son incertitude absolue **u(ρ)**.

$$\rho = (\dots\dots \pm \dots\dots) \text{ g.mL}^{-1}$$

- Le résultat de cette mesure est-il satisfaisant ?

DONNÉE

Masse volumique de l'eau : $\rho = 1,0 \text{ g.mL}^{-1}$.

● Protocole n° 2. Mesure de la masse volumique d'un cylindre métallique

- Mesurer la masse du cylindre ;
- Donner la valeur de la masse **m** obtenue avec son incertitude absolue **u(m)** ;

$$m = (\dots\dots \pm \dots\dots) \text{ g}$$

- Mesurer le volume **V** du cylindre et donner la valeur obtenue avec son incertitude absolue **u(V)** ;

$$V = (\dots\dots \pm \dots\dots) \text{ mL}$$

- En déduire la valeur de la masse volumique du cylindre ;

$$\rho = \dots\dots\dots \text{ g.mL}^{-1}$$

- Calculer la valeur de l'incertitude absolue $u(\rho)$ de la masse volumique ρ .

DONNÉE

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

- Donner la valeur de la masse volumique ρ avec son incertitude absolue $u(\rho)$.

$$\rho = (\dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots) \text{ g.mL}^{-1}$$

- En utilisant le tableau de valeurs des masses volumiques, indiquer de quel métal s'agit-il ?

Métal	ρ (g/mL)
Aluminium	3,0
Zinc	7,0
Fer	8,0
Argent	10,5

● Protocole n° 3. Mesure de la masse volumique d'une orange

- Mesurer la masse de l'orange ;
- Donner la valeur de la masse m obtenue avec son incertitude absolue $u(m)$;

$$m = (\dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots) \text{ g}$$

- À l'aide d'un fil de cuisine et d'une règle, mesurer le périmètre p de l'orange et donner la valeur obtenue avec son incertitude absolue $u(p)$;

$$p = (\dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots) \text{ mm}$$

- Calculer la valeur du rayon R de l'orange et donner la valeur obtenue avec son incertitude absolue $u(R)$;

DONNÉE

Périmètre d'un disque : $p = 2\pi \times R$

$$R = (\dots\dots \pm \dots\dots) \text{ mm}$$

- Calculer le volume **V** de l'orange et donner la valeur obtenue avec son incertitude absolue **u(V)** ;

DONNÉE

Volume d'une sphère : $V = \frac{4\pi}{3}R^3$

- Calculer la valeur de l'incertitude absolue **u(V)** ;

DONNÉE

$$u(V) = 3 \times V \times \frac{u(R)}{R}$$

$$V = (\dots\dots \pm \dots\dots) \text{ mL}$$

- En déduire la valeur de la masse volumique de l'orange ;

$$\rho = \dots\dots \text{ g.mL}^{-1}$$

- Calculer la valeur de l'incertitude absolue **u(ρ)** de la masse volumique **ρ**.

DONNÉE

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

- Donner la valeur de la masse volumique **ρ** avec son incertitude absolue **u(ρ)**.

$$\rho = (\dots\dots \pm \dots\dots) \text{ g.mL}^{-1}$$

- En comparant la valeur trouvée à celle de l'eau, expliquer pourquoi une orange flotte dans l'eau.

DONNÉE

Masse volumique de l'eau : $\rho = 1,0 \text{ g.mL}^{-1}$.

● Le coup de pouce de Python

Le script du programme Python ci-dessous, permet de calculer la valeur d'une masse volumique avec son incertitude absolue.

```
# Script pour calculer la valeur d'une masse volumique
# et son incertitude absolue
# La valeur de m en g
m =.....
# La valeur du volume en mL
V =.....
# La valeur de l'incertitude sur la masse en g
u_m =...
# La valeur de l'incertitude sur le volume en mL
u_V =.....
# Calcul de la masse volumique
Rau =.....
# Calcul de l'incertitude absolue
u_Rau =.....
# Affichage des résultats
print("Masse volumique : Rau =", str(round(Rau,3)) + " g/mL")
print("Incertitude absolue : u(Rau) =", str(round(u_Rau,3))
+ "g/mL")
```

- Compléter les rubriques des valeurs du programme dans le cas de la situation suivante :
 $m = 25,8 \text{ g}$; $u(m) = 0,1 \text{ g}$; $V = 9,0 \text{ mL}$; $u(V) = 0,5 \text{ mL}$
- Compléter les rubriques des calculs du programme.
- Exécuter le programme et donner les résultats affichés.
- Donner l'expression de la masse volumique ρ avec son incertitude $u(\rho)$.
- Donner l'intervalle de confiance de la masse volumique ρ .