## LES RAPPORTS DE LABORATOIRE

À chaque semaine, vous recevrez un protocole de laboratoire et un formulaire de rapport de laboratoire. Le **protocole** explique la ou les expériences à réaliser lors d'une séance de laboratoire. Il présente la théorie et les montages nécessaires ainsi que les différentes mesures à effectuer. Par contre, le **formulaire de rapport** est un squelette de rapport. Il contient toutes les sections d'un rapport décrites plus loin mais certaines d'entre elles sont laissées en blanc et il vous reste à les compléter. Les formulaires de rapport complétés deviennent les rapports de laboratoires que vous remettez.

### I- Exigences

1- Vous devez remettre un rapport de laboratoire pour chaque période de laboratoire.
2- Les rapports de laboratoire doivent être remis au plus tard une semaine après
la période de laboratoire correspondante, au début de la nouvelle période.
3- Vous devez remettre une seule copie du rapport de laboratoire par équipe
en indiquant le nom de tous les membres de l'équipe. Chacun des membres
aura la même évaluation.

### II- Sections du rapport

1- Présentation :
Titre et date de l'expérience, noms des équipiers, nom du cours

2- But de l'expérience :
Description brève de ce qu'on cherche à démontrer, à vérifier ou à découvrir.

3- Méthode et Théorie :
Description brève de la démarche et des principes physiques utilisés pour arriver aux résultats. Il doit être clair que ceux-ci permettent bien arriver aux résultats.

Présentation des relations mathématiques nécessaires ainsi que des valeurs des constantes utilisées en unités SI (kilogramme (kg), mètre (m), seconde (s)).

Présentation des différentes sources d'erreurs identifiées et de leur contribution aux incertitudes des mesures.

4- Mesures et Résultats :
Présentation, en unités SI et **de façon organisée** (tableaux ou graphiques), de **toutes** les mesures faites en laboratoire.
Il faut y mettre tous les résultats même ceux qu'on n'utilise pas pour les calculs.
Dans ce cas, il faut aussi justifier pourquoi ils ne seront pas utilisés.

Présentation, en unités SI et **de façon organisée** (tableaux ou graphiques), des résultats que l'on peut déduire de ces mesures selon la méthode et la théorie décrite auparavant.

5- Analyse et Interprétation :
Explication de la signification des résultats.

6- Conclusion.

## III- Évaluation des rapports

Chacun des rapports de laboratoire reçoit une note sur 10. Lorsque c'est moi qui corrige, un demi-point est soustrait pour chaque oubli ou erreur jugé important. Pour les laboratoires donnés par un chargé de cours (généralement Mohamed), il faudra voir avec lui sa méthode de correction. À la fin de la session, toutes les notes de laboratoires sont additionnées et le résultat est ramené sur 40 % de la note finale du cours complet (théorie et laboratoire).

## IV- Conseils utiles

1- Évitez de faire des rapports trop longs :

Soyez précis et brefs. Rappelez-vous que le correcteur a déjà étudié la physique.
Vous n'avez pas besoin d'expliquer tous les principes de physique mais vous devez expliquer en quoi consiste l'expérience et indiquer quelle loi vous allez utiliser.

2- Soyez attentifs à la présentation du rapport :

Soyez propre, lisible et agréable à lire. Autant que possible, utilisez un ordinateur.

3- Faites des graphiques clairs :

Les graphiques peuvent être très simples mais aussi très complexes si on le désire.
Vous devez y inclure toute l'information pertinente **mais pas plus**.
Ils doivent permettre de visualiser rapidement un aspect de l'expérience sans qu'on se perde dans les informations inutiles.

4- Soyez logiques :

Ne vous servez pas des résultats avant de les avoir trouvés expérimentalement!
Jouez le jeu, même si vous savez déjà quels seront les résultats.
Le but des laboratoires est de vous faire redécouvrir les grands principes et non de les utiliser.

## V- Remarques sur la préparation et l'analyse d'un graphique

### 1- Les variables

Un graphique permet de visualiser la relation qui existe entre deux variables d'une expérience. L'une d'elles s'appellent **la variable indépendante**. C'est la variable que l'on contrôle. On peut lui donner la valeur qu'on veut et ceci aura un effet sur la valeur de l'autre variable. On place habituellement la variable indépendante selon l'abscisse (axe des $x$) d'un graphique. La deuxième variable s'appelle **la variable dépendante** simplement parce que son comportement dépend des changements que l'on impose à la variable indépendante. On place généralement la variable dépendante selon l'ordonnée (axe des $y$) d'un graphique.

### 2- L'incertitude sur les variables

Les variables que l'on porte en graphique peuvent être des mesures directes faites sur un appareil ou des résultats obtenus par combinaisons de quelques mesures directes. Dans les deux cas, les valeurs ne peuvent pas être d'une précision infinie et ce, pour deux raisons. D'abord, et surtout, chaque instrument de mesures utilisé introduit une certaine imprécision étant donné que sa **graduation a une précision finie**. On considère habituellement que l'incertitude reliée à l'usage d'un instrument de mesure est égale à la moitié de sa plus petite graduation.

De plus, dans certaines expériences, il peut arriver que les conditions extérieures ne soient pas toutes parfaitement contrôlées et qu'elles rendent les lectures d'instruments plus difficiles à effectuer. On parle alors de **sources d'erreur**. Dans certains cas, celles-ci peuvent même être suffisamment importantes pour justifier l'emploi d'appareils de mesure moins précis mais plus pratiques. Par exemple, supposons qu'on veut mesurer la profondeur d'un lac en descendant une pierre suspendue au bout d'une corde graduée et en faisant la lecture à l'endroit où la corde sort de l'eau. Si on ne voit pas au fond du lac, il est possible qu'on laisse descendre la pierre sur une autre pierre plutôt qu'au fond du lac, ou bien, dans un petit trou. Ceci n'est pas très représentatif de la véritable profondeur du lac. Ainsi, les conditions expérimentales font qu'on ne peut pas s'attendre à avoir un résultat précis aux millimètres (*mm*) ou aux centimètres (*cm*). Il serait dons inutile d'utiliser une corde graduée aux *cm*. Une graduation à chaque décimètre (*dm*) serait suffisante.

Ces deux facteurs (graduations des instruments et sources d'erreurs) contribuent à l'**incertitude** liée à chacune de nos mesures. L'usage de la calculatrice ne contribue pas car la précision de cet instrument dépasse celle des instruments de mesure que nous utilisons.

Comme on l'a mentionné plus haut, les valeurs que l'on veut porter en graphique peuvent aussi être obtenues par combinaison de quelques mesures directes. Dans ce cas, l'incertitude qu'on leur attribut n'est pas nécessairement la même que celle des mesures. Les règles à observer sont alors les suivantes :

**- le résultat d'un produit ou d'un quotient a le même nombre de chiffres significatifs que le facteur qui en a le moins,**

**- le résultat d'une addition ou d'une soustraction a le même nombre de décimal que le terme qui en a le moins.**

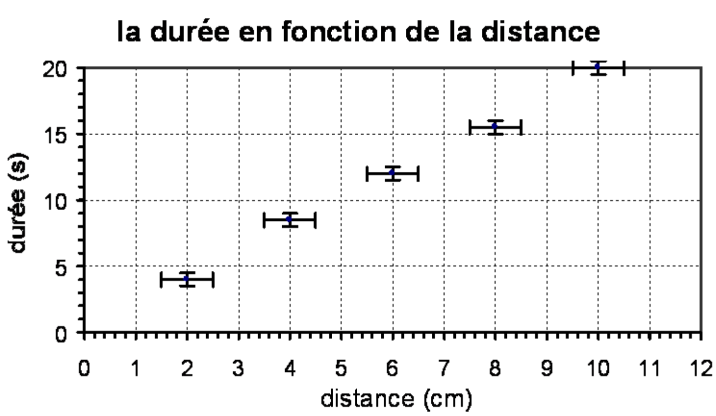
## 3- Les rectangles d'incertitude

L'incertitude sur une mesure signifie que la valeur de cette mesure n'est pas connue exactement et qu'elle peut se trouver n'importe où entre « la valeur mesurée moins l'incertitude » et « la valeur mesurée plus l'incertitude ». Par conséquent, lorsqu'on place le point correspondant sur le graphique, il n'y a pas de raison de choisir un endroit plutôt qu'un autre entre ces deux limites. C'est pourquoi on place le point à l'endroit correspondant à la valeur de la mesure et on lui ajoute un **rectangle d'incertitude**. Il s'agit d'un rectangle qui encadre le point et dont la largeur et la hauteur sont données respectivement par l'incertitude sur la mesure portée en abscisse et en ordonnée.

Prenons un exemple simple. Soit une petite voiture qui se déplace toujours à la même vitesse inconnue que je veux déterminer. Je choisis d'abord ma variable indépendante, disons la distance à parcourir que je représente par *x*. Je choisis que *x* prendra successivement les valeurs de 2, 4, 6, 8 et 10 centimètres (*cm*). Je mesure donc ces distances sur le plancher et je trace des lignes repère. J'utilise une règle graduée aux centimètres (*cm*). Celle-ci a donc une incertitude de 0,5 *cm*. Puisqu'il n'y a pas d'interférences externes, il s'agit là de la seule contribution à l'incertitude sur les distances. La variable dépendante est le temps nécessaire pour parcourir les distances choisies. Je le représente par *t*. On comprend bien qu'il s'agit d'une variable dépendante puisque les valeurs qu'elle prendra dépend des valeurs que nous avons choisies pour la distance. Pour mesurer le temps, j'utilise un chronomètre gradué aux secondes (*s*). Il a donc une incertitude de 0,5 *s* et il s'agit encore de la seule contribution à l'incertitude sur les durées. Maintenant, supposons qu'on fait l'expérience et qu'on obtient les résultats suivants :

| $d$ ($cm$) | $\pm \Delta d$ ($cm$) | $t$ ($s$) | $\pm \Delta t$ ($s$) |
|---|---|---|---|
| 2,0 | 0,5 | 4,0 | 0,5 |
| 4,0 | 0,5 | 8,5 | 0,5 |
| 6,0 | 0,5 | 12,0 | 0,5 |
| 8,0 | 0,5 | 15,5 | 0,5 |
| 10,0 | 0,5 | 20,0 | 0,5 |

On a alors comme graphique correspondant :



## 4- La courbe d'un graphique

Maintenant, il faut analyser les données pour trouver la relation entre les variables dépendante et indépendante. Pour y arriver, on a besoin de connaître l'allure de la courbe qui relie les différents points du graphique. La situation est particulièrement simple à analyser lorsque cette courbe est droite. On essaie donc d'abord de tracer une ligne droite qui passe le plus près possible de tous les points et surtout, qui traverse tous les rectangles d'incertitude. Si on y arrive, on peut dire que la courbe est droite et on pourra trouver facilement la relation entre les variables. Par contre, si on n'y arrive pas, c'est que la courbe n'est pas droite et que la relation entre les variables est plus complexe.

## 5- L'analyse d'une courbe droite

Lorsque la courbe est une droite, la relation entre les variables est **linéaire** et peut être décrite par une équation de la forme :

$$y = m\,x + b$$

où $y$ et $x$ représentent respectivement les variables portées sur l'ordonnée et l'abscisse alors que $m$ et $b$ représentent respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite. **La pente correspond à l'inclinaison de la droite alors que l'ordonnée à l'origine indique l'endroit où la courbe traverse l'ordonnée.**

Lorsqu'on trace une droite qui traverse tous les rectangles d'incertitude, il y a souvent plusieurs façons de tracer cette droite. Pour trouver la bonne droite, il faut s'assurer de minimiser la distance entre elle et chacun des points du graphique. Ensuite, en prenant deux points sur la droite obtenue, on devrait pouvoir calculer la pente. Toutefois, puisqu'il est généralement difficile de trouver exactement à l'œil la bonne inclinaison pour minimiser les distances, on utilise plutôt l'équation suivante :

$$m = \frac{n\sum(xy) - \sum(x)\sum(y)}{n\sum(x)^2 - \left(\sum(x)\right)^2}$$

où $n$ représente le nombre de points sur le graphique. De la même façon, on utilise généralement l'équation suivante pour trouver l'ordonnée à l'origine d'une courbe droite :

$$b = \frac{\sum y - m\sum x}{n}.$$

Poursuivons l'analyse avec l'exemple précédent. On a 5 paires de données, donc $n$ = 5. La variable indépendante est la distance $d$ et joue le rôle des $x$ alors que la variable dépendante est la durée $t$ et joue le rôle des $y$. Par conséquent, on calcul facilement :

$$\sum x = 30, \quad \sum y = 60, \quad \sum(xy) = 438 \quad \text{et} \quad \sum(x)^2 = 220.$$

Ceci nous permet de calculer la pente :

$$m = \frac{5 \times 438 - 30 \times 60}{5 \times 220 - (30)^2} = 1{,}95$$

et l'ordonnée à l'origine :

$$b = \frac{60 - 1{,}95 \times 30}{5} = 0{,}3 .$$

La relation entre la distance *d* et le temps *t* pour franchir cette distance est donc :

$$t = 1{,}95 \times d - 0{,}3.$$

Dans cet exemple, la pente représente le rapport entre un intervalle de temps donnée et la distance correspondante i.e. $1{,}95 = \Delta t / \Delta d$. Toutefois, la vitesse inconnue que nous cherchons est plutôt définie par le rapport inverse i.e. $\Delta d / \Delta t$, entre une distance donnée et l'intervalle de temps correspondant. Ainsi, la petite voiture se déplace à une vitesse de 1 / 1,95 = 0,513 *cm* / *s*.

Certains étudiants ont peut-être déjà appris une façon plus simple de calculer la pente d'une courbe droite. Selon cette méthode, on prend les points extrême de la droite et on calcul le rapport entre la différence de leur ordonnée et la différence de leur abscisse. Dans notre exemple, les points extrêmes sont (2, 4) et (10, 20). Ainsi, selon cette méthode, on obtiendrait une pente de (20 – 4) / (10 – 2) = 2 et une vitesse de 0,5 *cm*. On voit que le résultat est assez proche ce qui était prévisible puisque la courbe est assez régulière. Toutefois, on rencontre très souvent des situations où l'usage de cette dernière méthode ne donne pas les bons résultats. Je vous recommande donc fortement d'apprendre immédiatement à utiliser la bonne façon d'effectuer les calculs de pente et d'ordonnée à l'origine.

**6- L'incertitude sur le résultat**

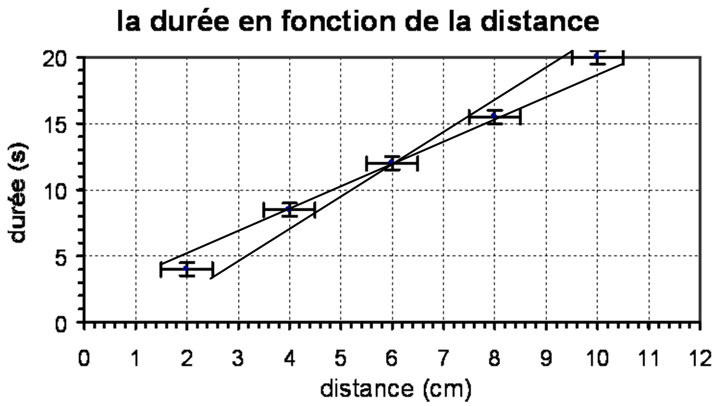
Évidemment, le résultat obtenu, quelque soit son degré de précision, reste toujours une approximation de la valeur exacte que nous cherchons à connaître. Par conséquent, on doit aussi lui attribuer une incertitude. On se rappelle que la droite choisie est celle qui minimise le plus la distance entre elle et chacun des points du graphique. Toutefois, il faut remarquer qu'il ne s'agit là que d'un choix. Nous faisons ce choix parce qu'il est le plus proche des résultats expérimentaux. Toutefois, les incertitudes sur ces résultats signifient qu'ils pourraient être un peu différents. La pente de la droite pourrait donc, elle aussi, être un peu différente. En fait, la pente pourrait prendre toutes les valeurs permises par les rectangles d'incertitude tracés sur le graphique. Il suffit de s'assurer que la droite passe bien par tous les rectangles. Ainsi, pour trouver l'incertitude sur la pente, il faut connaître les valeurs maximale et minimale qu'elle peut prendre tout en passant par tous les rectangles. Concrètement, :

- on trace la droite la plus inclinée et la droite la moins inclinée,

- on choisis deux points éloignés sur chaque droite pour calculer les pentes en divisant la différence des ordonnées par la différence des abscisses,

- la plus grande différence entre ces deux pentes et la pente optimisée devient l'incertitude de cette dernière.

Si on reprend notre exemple, on trace d'abord sur le graphique suivant les deux droites extrêmes i.e. la plus et la moins inclinées.




On trouve, pour ces deux droites, les pentes suivantes :

$$p_1 = \frac{20{,}5 - 3{,}5}{9{,}5 - 2{,}5} = 2{,}43 \qquad \text{et} \qquad p_2 = \frac{19{,}5 - 4{,}5}{10{,}5 - 1{,}5} = 1{,}67.$$

Puisque, plus haut, on a pris l'inverse de la pente pour trouver la vitesse, on doit prendre ici aussi l'inverse de la pente pour trouver les valeurs extrêmes que peut prendre la vitesse. On trouve donc :

$$v_{\min} = 1 / 2{,}43 = 0{,}418 \qquad \text{et} \qquad v_{\max} = 1 / 1{,}67 = 0{,}6.$$

Maintenant, il faut prendre les écarts entre ces valeurs et la valeur déjà trouvée $v$ = 0,513. On trouve :

$$0{,}418 - 0{,}513 = -\,0{,}095 \qquad \text{et} \qquad 0{,}6 - 0{,}513 = 0{,}087.$$

Le plus grand écart nous donne l'incertitude sur le résultat. On a donc $v$ = 0,513 ± 0,095.

## 7- La précision du résultat et de l'incertitude

Toutefois, il faut faire attention à la précision de ces chiffres. En effet, une incertitude exprime essentiellement que le résultat n'est pas certain. Il n'est donc pas très logique que cette incertitude ait elle-même une grande précision. Par conséquent, on doit arrondir l'incertitude pour ne garder qu'un seul chiffre non nul. Dans notre exemple, l'incertitude devient alors ± 0,1. Ensuite, il faut aussi réaliser que le résultat ne peut pas être plus précis que l'incertitude. Par conséquent, il faut aussi l'arrondir pour qu'il ait la même précision que l'incertitude arrondie. Ainsi, le résultat de notre exemple est : $v$ = 0,5 ± 0,1.

## 8- La valeur théorique

Si le but de l'expérience est de vérifier une valeur théorique connue, ceci revient, concrètement, à vérifier si celle-ci se trouve à l'intérieur des limites données par l'incertitude du résultat expérimental. Si c'est le cas, on peut dire que la théorie est vérifiée par l'expérience, sinon, même si les résultats sont proches, il faut dire que l'expérience n'est pas en accord avec la théorie.

## 9- L’analyse d’une courbe qui n’est pas droite

On vient de voir comment traiter le cas le plus simple, celui où la relation est linéaire. Toutefois, pour de nombreuses situations, ce n’est pas le cas. Heureusement, il est souvent possible d’effectuer une petite transformation pour obtenir une courbe droite. On peut alors poursuivre l’analyse du graphique comme si la courbe était droite. Les principaux exemples sont illustrés dans les 2 pages suivantes.

Le premier graphique illustre l’exemple d’une courbe droite comme celui que nous avons déjà traité. On fait un graphique de $y$ en fonction de $x$, on obtient une droite et on peut trouver la pente de cette droite $m$ qui est aussi la constante de proportionnalité $k$ entre $y$ et $x$. Pour le deuxième exemple, le graphique obtenu n’est pas une courbe droite. Toutefois, dans ce cas précis, si on faisait un graphique de $y$ en fonction de $x^2$, on obtiendrait la droite cherchée. Ainsi, on a une relation linéaire entre $y$ et $x^2$ (on dit aussi quadratique entre $y$ et $x$). On peut donc poursuivre l’analyse du graphique comme précédemment mais en donnant à $x^2$ le rôle qui était joué par $x$. La pente de la droite du graphique de $y$ en fonction de $x^2$ est la constante de proportionnalité et la relation entre les variables est $y = k\,x^2$. La situation est la même pour les autres graphiques.

Ainsi, concrètement, lorsque la courbe d’un graphique n’est pas droite, il suffit de suivre les étapes suivantes :

- comparer l’allure de la courbe avec les graphiques des pages suivantes,
- identifier ceux qui lui ressemblent le plus,
- tracer de nouveaux graphiques en utilisant en abscisse les valeurs de $x$ transformées selon les relations correspondantes,
- identifier la transformation qui nous a permis d’obtenir une courbe droite,
- et poursuivre l’analyse comme pour une courbe droite.