

Métrologie : mesure de la durée d'une course

(Emmanuel Bricout, LEGTA d'YVETOT)

1-Présentation de l'activité

Afin de sensibiliser les élèves à la métrologie et plus précisément aux incertitudes de mesures, une activité sur la mesure du temps sera proposée aux élèves. Ils remarqueront ainsi qu'une mesure ne peut être donnée avec une valeur "unique" mais qu'elle correspond en réalité à un intervalle de valeurs.

L'activité proposée pour une classe de seconde GT s'inscrit dans une séquence de mécanique, et plus précisément dans le chapitre principe d'inertie, traité selon le thème la pratique de sport. La mesure effectuée sera la durée d'un 100 mètres (record du monde d'Usain Bolt aux mondiaux de Berlin, lien <https://www.youtube.com/watch?v=7kpW8JMkdCM>) projetée à l'ensemble de la classe. Les élèves devront vérifier si le résultat donné par le chronomètre officiel est cohérent ou non, en calculant l'incertitude pour un intervalle de confiance de 95%, après avoir identifié toutes les sources d'incertitudes.

Les notions et contenus traités sont la "Mesure d'une durée et le chronométrage", les compétences attendues du référentiel "Porter un regard critique sur un protocole de mesure d'une durée en fonction de la précision attendue".

2-Pourquoi introduire la métrologie dès la classe de seconde GT ?

Dès le début de la classe de seconde GT, les notions d'ordre de grandeur et de chiffres significatifs sont introduites, et expliquées par la précision des données. Les résultats sont majoritairement présentés en respectant un nombre de chiffres significatifs cohérents (contrairement au début de l'année où il était fréquent de trouver la valeur d'une année de lumière exprimée avec une dizaine de chiffres significatifs...). Cependant, les élèves ne comprennent pas toujours pourquoi une donnée est exprimée avec 3 chiffres significatifs et non 5, et ne savent pas avec combien de chiffres exprimer un résultat expérimental. Par exemple, il n'est pas rare de voir un calcul d'indice de réfraction exprimé avec 5 chiffres significatifs malgré des résultats expérimentaux arrondis au degré. Montrer expérimentalement qu'un résultat expérimental ne peut donner accès à une valeur vraie permet de donner un sens à cette notion de chiffres significatifs.

La métrologie est une notion complexe, difficile à assimiler voire même à accepter pour certains élèves. Il peut être en effet frustrant de ne pas avoir la valeur "exacte" d'une mesure mais seulement à une valeur approchée. Les élèves devraient ne plus poser la question "Mes résultats sont-ils exacts ?" mais plutôt "Mes résultats sont-ils cohérents ?" ! Il faudra insister sur ce point tout au long de l'année (et pas seulement sur cette séance).

De plus, les élèves doivent apprendre à utiliser le matériel approprié selon la précision voulue. Lorsqu'on prélève 10 mL d'une solution, faut-il le faire avec une éprouvette graduée, un bécher, une pipette jaugée ou une pipette graduée ? Cela dépend de la précision souhaitée, les élèves devront être capables de choisir le matériel adapté et surtout de justifier leur choix.

La métrologie est donc une notion complexe mais nécessaire en sciences physiques. Elle prend de plus en plus d'importance dans les programmes récents, que ce soit dans le bac scientifique ou même dans le bac technologique STAV (voire dans les baccalauréats professionnels, avec une exigence moindre). Afin de familiariser les élèves à cette notion, il est important de l'introduire le plus tôt possible, et de la réinvestir (et l'approfondir) dans les classes de première et terminale.

3-Déroulement de la séance

La séance se déroule avec une classe de 2nde GT, en demi-groupe. Par manque de chronomètres, certains élèves ont dû manipuler en binôme effectuant 3 mesures chacun (mais un binôme étant considéré comme un unique individu afin d'avoir assez de mesures...). Le tableau suivant décrit le déroulement de la séance

Activités	Objectifs
<u>Projection du film</u> Finale du 100 mètres à Berlin d'Usain Bolt (vidéo France 3) https://www.youtube.com/watch?v=7kpW8JMKdCM	
<u>Problème :</u> Peut-on vraiment être sûr qu'Usain Bolt a couru en 9'58" ?	Réflexions des élèves sur la précision d'une mesure. Mise en place d'un protocole
<u>Mesures :</u> A l'aide d'un chronomètre, chaque élève mesure 5 fois la durée de la course d'Usain Bolt	Réaliser des mesures
<u>Traitement des mesures :</u> Calcul de la moyenne, l'écart type corrigé et de l'intervalle de confiance (pour $k=2$) Présentation des résultats sous la forme $t=(moyenne) \pm U(t)$ (pour $k=2$)	Utilisation de la calculatrice en mode statistique
<u>Mise en commun des résultats :</u> Moyenne et intervalle de confiance à 95%(pour $k=2$)	
Conclusion sur l'activité et conclusion générale sur la précision des mesures	Savoir qu'une mesure comporte une incertitude qui dépend du matériel utilisé mais aussi de l'opérateur

Dans un premier temps, la vidéo du 100 mètres des championnats du monde de Berlin est projetée. A la fin de la vidéo, j'ai posé la question suivante aux élèves : "Le chronomètre nous indique que le temps réalisé par Usain Bolt est de 9 secondes 58. Mais peut-on vraiment être sûrs de cette mesure ?"

La première réaction des élèves est en général de dire que la mesure est juste parce qu'on utilise du matériel de haute précision dans ce genre d'épreuve, faisant ainsi apparaître déjà la notion de précision et de la nécessité d'utiliser des appareils adaptés à la précision souhaitée. Un parallèle peut être fait avec l'activité précédente (démarche d'investigation sur la relativité du mouvement) et le dialogue entre Simplicio et Salviati (présenté en annexe 1). Il est nécessaire de ne pas toujours croire ce qu'on dit, il faut le vérifier ! L'idée d'effectuer une puis plusieurs mesures et de calculer la moyenne arrive spontanément. Il est alors nécessaire de faire comprendre aux élèves qu'une moyenne seule ne suffit pas, mais qu'il faut parler d'incertitude. En binômes, les élèves dressent la liste de ces incertitudes et une mise en commun permet de mettre en évidence les deux sources d'incertitudes principales : l'opérateur (temps de réaction,...) et le chronomètre. Les sources d'incertitudes liées à l'informatique sont rejetées. Je n'ai pas réussi à trouver de données quant à l'incertitude du chronomètre. Mais pour l'intérêt de l'exercice, j'ai supposé qu'elle était de l'ordre du centième de seconde (de façon arbitraire).

Une feuille est ensuite distribuée aux élèves sur laquelle ils doivent noter les 6 mesures correspondant aux 6 projections de la vidéo de la course d'Usain Bolt.

Le calcul de la moyenne est ensuite effectué. Cette notion est en général maîtrisée par les élèves et ne requiert que peu d'explications.

L'écart type (corrigé) est défini comme l'écart des mesures par rapport à la moyenne et une mesure de la dispersion des mesures. Au tableau, 2 cas extrêmes sont présentées : des mesures dont la moyenne est identique mais dont l'écart type est soit très faible, soit très important. Cette valeur est lue sur la calculatrice, à l'aide du menu statistique.

Les formules des calculs d'incertitudes sont données sans être détaillées. Il est en effet difficile pour des élèves de seconde de comprendre ce qu'est une répartition de type rectangulaire ou triangulaire !

Les résultats sont consignés dans les tableaux suivants :

	Type	incertitude fabricant (en s)	formule $u(t)$	$u(t)$	$u(t)^2$
Opérateur	répétabilité	-	écart-type corrigé		
Chronomètre	fabricant	0,01	$0,01/\sqrt{3}$		

Somme des $u(t)^2$		$U(t) = \text{Racine (somme des } u(t)^2)$	
--------------------	--	--	--

La notion d'intervalle de confiance est ensuite introduite et définie comme la probabilité que la valeur soit comprise dans l'intervalle. Cette probabilité est fixée à 95% arbitrairement, correspondant à un coefficient $k=2$. Il faut donc multiplier la valeur $U(t)$ par 2 pour obtenir l'incertitude élargie et en déduire les valeurs extrêmes de l'intervalle.

4-Exemple de résultats

Mesures : 9,51 s ; 9,21 s ; 9,62 s ; 9,22 s ; 9,58 s ; 9,4 s

	Type	incertitude fabricant (en s)	formule $u(t)$	$u(t)$	$u(t)^2$
Opérateur	répétabilité	-	écart-type corrigé	$9,48 \times 10^{-2}$	$8,99 \times 10^{-3}$
Chronomètre	fabricant	0,01	$0,01/\sqrt{3}$	$5,77 \times 10^{-3}$	$3,33 \times 10^{-5}$

Somme des $u(t)^2$	$9,02 \times 10^{-3}$	$U(t) = \text{Racine (somme des } u(t)^2)$	$9,50 \times 10^{-2}$
--------------------	-----------------------	--	-----------------------

moyenne : 9,43 s

$U(t) : 0,095 \text{ s}$

Intervalle de confiance à 95% (pour $k = 2$): [9,24 ; 9,62]

On vérifie ensuite que la valeur mesurée par le chronométrage officiel se situe bien dans l'intervalle de confiance, ce qui est le cas pour la très grande majorité des élèves. Si ce n'est pas le cas, doit-on considérer mettre en doute le record du monde de Bolt ? Il y a encore 5% de chance que la valeur mesurée se trouve en dehors de l'intervalle. On peut effectuer les calculs pour un intervalle de confiance à 99% (soit $k=3$).

Les résultats sont ensuite présentés au tableau (et sur la feuille de chaque élève) sous la forme :

$$t = \bar{t} \pm k * U(t) \text{ s } (k=2)$$

Le résultat de la mesure comporte les 4 éléments suivants :

- la valeur moyenne calculée
- la valeur de l'incertitude élargie (exprimée avec un nombre de chiffres

significatifs cohérents, qui peut différer selon les mesures)

- l'unité (ici les secondes)
- la valeur du coefficient k

La question du nombre de chiffres significatifs à utiliser lors de la présentation des résultats est posée. En fonction de la valeur de l'incertitude élargie, les résultats sont exprimés avec 2 ou 3 chiffres significatifs.

Si le temps avait été suffisant, il aurait pu être intéressant d'expliquer pourquoi il n'était pas possible de regrouper l'ensemble des résultats mais les traiter uniquement par binôme (notion de reproductibilité).

5-Analyse des incertitudes

Les élèves sont ensuite interrogés sur des modifications du protocole qui permettraient d'améliorer la précision. Il peut d'agir de diminuer :

- l'incertitude liée à l'opérateur : effectuer plus de mesures, ne choisir que des opérateurs "performants" (des chronométreurs officiels comme il y a quelques dizaines d'années) ou utiliser d'autres méthodes
- l'incertitude liée au chronomètre : changement du matériel et utilisation de chronomètres ayant par exemple une précision d'un millième.

Le poids des différentes incertitudes est donc analysé. Pour chacun des groupes, celui de l'incertitude liée au matériel est faible devant celui lié à l'opérateur : le temps de réaction est élevé, et ne se compense pas entre l'arrivée et le départ.

Il serait donc inutile d'utiliser des chronomètres plus performants et donc a priori plus chers... Il est nécessaire d'agir sur le temps de réaction. Un petit rappel historique et une présentation des méthodes de mesures en athlétisme sont effectués :

- jusqu'au début du XXème siècle les résultats étaient donnés à la seconde près
- au début du XXème siècle, le chronométrage reste effectué à la main, mais la précision des nouveaux appareils permet d'avoir une précision d'un dixième de seconde
- Le chronométrage est ensuite devenu automatique : le chronomètre est déclenché automatiquement par le starter, l'installation de caméras sur la ligne d'arrivée (photo finish) permet d'obtenir une mesure du temps au 1/1000ème de seconde

Ce rapide historique permet de mettre en évidence l'évolution de la précision des résultats selon l'évolution des techniques. Elle démontre aussi que l'œil humain ne permet pas d'atteindre une précision suffisante pour le chronométrage en sport de haut niveau.

6-Difficultés rencontrées par les élèves

Pour les élèves, la principale difficulté rencontrée a été la réalisation des calculs, à l'aide de la calculatrice scientifique et de l'option STAT. Tous élèves possédant une calculatrice CASIO 35+ ont réussi à obtenir des résultats pour la moyenne et l'écart type réduit. Je n'ai pas réussi à aider tous les élèves ayant une calculatrice de marque Texas Instrument ou d'autres calculatrices plus anciennes. Il aurait fallu se renseigner sur les calculatrices utilisées et regarder le mode d'emploi avant le TP. D'autres calculs, faciles à effectuer n'ont pas été totalement compris. Il est difficile d'expliquer pourquoi il faut diviser l'incertitude due au chronomètre par racine de 3 sans explication trop complexe !

Certaines notions de statistiques n'avaient pas été vues auparavant. En effet, la moyenne est une notion assimilée par les élèves (qui ont l'habitude de la calculer), mais l'écart type et l'intervalle de confiance ne seront étudiés en mathématiques que plus tard dans l'année. De plus, les valeurs extrêmes de l'intervalle de confiance ne sont pas calculées de la même façon.... Effectuer l'activité un peu plus tard dans l'année aurait été préférable.

Enfin, un problème de son a rendu difficile la détection du départ de la course, ce qui a augmenté la dispersion des mesures.

1 Annexe : fiche élèves métrologie

Précision d'une mesure

Problème : Usain Bolt a-t-il vraiment couru le 100 mètres en 9'58 ?

Mesures :

Mesure n°	Durée de la course (en s)
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Calculer la moyenne des 5 mesures :.....

Une moyenne est-elle suffisante pour donner la valeur d'une mesure ?

Quelles sont les sources d'incertitude pour cette mesure ?

Calcul de l'incertitude U(t) :

	Type	incertitude fabricant (en s)	formule u(t)	u(t)	u(t) ²
Opérateur	répétabilité	-	écart-type corrigé		
Chronomètre	fabricant	0,01	0,01/√3		

Somme des u(t) ²		U(t) = Racine (somme des u(t) ²)	
-----------------------------	--	--	--

Il reste un dernier élément à prendre en compte pour exprimer un résultat : l'intervalle de confiance ! Pour un intervalle de confiance de 95% utilisé habituellement, on utilise un coefficient k = 2 (on multiplie U(t) par 2)

D'après vos résultats exprimer la durée de la course d'Usain Bolt :

$$t = \text{moyenne} \pm k \times U(t) \text{ unité (pour } k = \dots)$$