Adapter l'enseignement pour donner du sens aux incertitudes de mesures

par **Aude CAUSSARIEU**
Département de physique
ENS de Lyon - 69342 Lyon Cedex 07
aude.caussarieu@ens-lyon.fr

et **Andrée TIBERGHIEN**
Université de Lyon - CNRS, UMR ICAR, Labex ASLAN
andree.tiberghien@univ-lyon2.

La mesure est au cœur de la construction des connaissances scientifiques. En effet, la validation de nouvelles connaissances repose souvent sur la confrontation entre des prédictions et des mesures. Ces comparaisons sont possibles uniquement lorsque l'on connaît l'incertitude associée aux valeurs à comparer. Les travaux en didactique montrent que les élèves et les étudiants ont du mal à donner un sens physique aux incertitudes de mesure. Dans cet article, nous proposons quelques pistes pour rénover l'enseignement des incertitudes de manière à ce que les étudiants leur donnent du sens.

INTRODUCTION

– Là, pourquoi tu calcules cette incertitude ?

– Bah, pour avoir le CAPES !

Cet échange typique montre que les étudiants ont du mal à donner du sens aux calculs d'incertitude. Quand ce n'est pas «pour avoir le CAPES», les étudiants ont tendance à calculer des incertitudes pour que leur résultat soit en accord avec «la valeur attendue». Cette valeur attendue peut être celle connue par l'enseignant ou celle qu'ils ont calculée auparavant. Le rôle des incertitudes pour les étudiants nous semble en contradiction avec l'usage des incertitudes «en physique». C'est pour cette raison que nous menons depuis quatre ans des travaux de recherche en didactique sur l'enseignement des incertitudes de mesure à l'université. Ces travaux sont concomitants à l'arrivée dans les programmes du lycée d'un enseignement de la mesure et des incertitudes basé sur le contenu du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)(1) publié par le Bureau international des poids et mesures (BIPM).

Dans cet article, nous nous demandons comment tirer profit des travaux menés en didactique pour construire un enseignement qui aide les étudiants à donner un sens physique aux incertitudes.

(1) https://www.bipm.org/fr/publications/guides/gum.html

1. POURQUOI CALCULE-T-ON DES INCERTITUDES EN PHYSIQUE ?

Pour construire des activités d'enseignement qui donnent du sens aux incertitudes, nous avons commencé par mener une réflexion sur l'usage des incertitudes dans le monde de la recherche en physique. Il y a deux manières de répondre à la question «pourquoi calcule-t-on des incertitudes en physique ?». On peut d'abord se demander quelle est l'origine des incertitudes en physique. On peut aussi se demander dans quelles situations le calcul des incertitudes de mesure est nécessaire. C'est à ces questions que nous allons tenter de répondre dans les paragraphes ci-dessous.

1.1. L'origine des incertitudes

En sciences, dès lors qu'il y a une mesure, c'est-à-dire dès que l'on souhaite estimer la valeur d'une grandeur physique, alors il y a nécessairement une incertitude associée à cette estimation. *La valeur d'une grandeur physique ne peut pas être connue avec une précision infinie.*

1.1.1. L'incertitude associée au processus du mesurage

Pour réaliser une mesure, il est nécessaire d'utiliser un instrument de mesure. Cet instrument de mesure réalise une comparaison entre l'objet à mesurer et un objet de référence, l'étalon. Il y a donc toujours au moins deux sources d'incertitude : l'étalon utilisé – qui ne sera jamais exactement semblable à l'étalon de référence – et la sensibilité de l'appareil qui fait la comparaison. Prenons un exemple simple avec une balance à plateaux.

L'étalon : il est impossible que la masse de référence notée 10 g fasse exactement 1/100 de la masse du kilo étalon conservé à Paris, au Bureau international des poids et mesures.

La comparaison : les deux plateaux restent équilibrés tant que la différence de masse entre les deux plateaux est inférieure à une valeur seuil. Cette valeur seuil limite la sensibilité de la balance à plateaux.

Comme le rappelait Henri Poincaré dans *La science et l'hypothèse*, le continuum de physique est tel qu'avec tout dispositif de mesure réel, il est possible d'avoir A = B, B = C et A ≠ C comme illustré sur la figure 1.

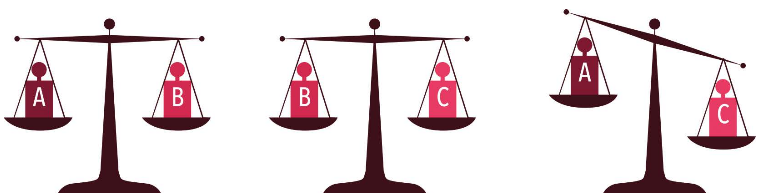


Figure 1 - Illustration du paradoxe du continuum de physique.

1.1.2. La valeur vraie n'existe pas !

Les objets du monde physique ne sont pas immuables. Dès lors qu'on les regarde d'assez près, ou assez longtemps, ils varient. Par exemple, la masse de l'étalon de référence varie selon les procédures de nettoyage, de conservation… De plus, la définition des objets à mesurer est toujours un peu trop vague. Si l'on parle de la longueur d'une table, il est évident qu'avec une suffisamment grande précision de mesure, cette longueur variera d'un bord à l'autre de la table. En physique, on retrouve souvent cette difficulté lorsque l'on veut mesurer la distance entre le centre de la lentille (mal défini) et le plan objet image (latitude de mise au point).

Ces deux sources d'incertitude mènent à la formule : «la valeur vraie d'une grandeur physique n'existe pas !». Ce point a été longuement discuté dans l'article de Jacques Treiner publié dans *Le Bup* n° 930 de janvier 2011 [6].

1.2. Les incertitudes sont nécessaires pour pouvoir comparer deux valeurs

Nous avons donc vu qu'il n'y avait pas de situation dans lesquelles on pouvait mesurer la valeur d'une grandeur avec une précision infinie. Il existe toujours une incertitude associée à l'estimation d'une grandeur. Mais dans quelles situations est-il réellement nécessaire de connaître la valeur de cette incertitude ?

Il est nécessaire de connaître l'incertitude associée à la valeur d'une grandeur physique lorsque l'on utilise cette grandeur dans une comparaison. En effet, si la somme des incertitudes est plus faible que l'écart entre les deux valeurs, alors on peut dire que les deux valeurs sont différentes. Si la somme des incertitudes entre les deux valeurs est plus grande que l'écart entre les deux valeurs, alors on peut dire que les deux valeurs sont identiques. En l'absence des incertitudes, il n'est pas possible de conclure.

Figure 2 - Illustration de la nécessité de connaître l'incertitude associée à des valeurs de grandeur physique pour pouvoir conclure sur une comparaison.

2. QUEL ENSEIGNEMENT CONDUIT LES ÉTUDIANTS À NE PAS DONNER DE SENS PHYSIQUE AUX INCERTITUDES ?

Cette analyse du savoir associé aux incertitudes nous donne une grille d'analyse pour étudier des situations d'enseignement des incertitudes de mesure en physique. Nos propos dans les prochains paragraphes s'appuient sur l'analyse de fascicules de TP d'une unité d'enseignement (UE) de première année d'université lors d'un travail de recherche mené en 2015 [2]. Cette unité d'enseignement de physique pour les SVT (Sciences de la vie et de la Terre) nous paraît représentative de l'enseignement habituel de TP en L1 de sciences et nous permet de dégager quelques constats.

2.1. Les notions abordées autour des incertitudes de mesure

Une première analyse des fascicules permet d'identifier les notions relatives aux incertitudes de mesure abordées dans cette unité d'enseignement. Aujourd'hui deux approches sont possibles pour enseigner les incertitudes de mesure : une approche dite traditionnelle et une approche dite probabiliste. Après un rappel des différences entre ces deux approches, nous expliquerons en quoi l'approche utilisée est traditionnelle. Nous comparerons alors la liste des notions abordées au recensement des notions qui auraient pu être abordées que nous avions préalablement mené.

2.1.1. Aujourd'hui, deux approches sont possibles

L'approche classique de la mesure est celle qui est la plus souvent utilisée en premier cycle universitaire. Elle définit l'erreur de mesure comme la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie. Dans cette approche, l'erreur de mesure due à l'utilisation d'un instrument de mesure est calculée différemment de l'erreur aléatoire.

En 1993, le Bureau international des poids et mesures publie un rapport pour encourager l'usage de l'approche probabiliste des incertitudes de mesure (cf. note 1). Cette approche définit toutes les notions associées à la mesure sans faire appel à la notion de valeur vraie. Dans cette approche, les sources d'incertitudes sont séparées en deux catégories, type A et type B, selon que l'on peut, ou pas, estimer l'incertitude correspondante en faisant une analyse statistique. Le formalisme est le même pour estimer l'incertitude associée à toutes les sources d'incertitude.

Ces deux approches sont épistémologiquement différentes. Le mode de calcul et d'interprétation de l'incertitude de mesure tout comme son interprétation diffèrent. Dans la majorité des cas, les valeurs numériques obtenues dans chacune des deux approches sont très similaires. Les enseignants font le constat que l'approche probabiliste est plus cohérente, mais qu'elle est aussi beaucoup plus calculatoire.

Le programme du lycée (réforme de 2012) impose aux enseignants de se placer dans l'approche probabiliste. Le *Bulletin officiel* (BO) maintient néanmoins au programme la notion de valeur vraie.

2.1.2. Notions associées à l'approche classique de la mesure

L'unité d'enseignement que nous avons étudiée utilise indifféremment le mot « incertitude » et le mot « erreur ». Dans les documents de cours que les étudiants peuvent consulter en ligne, la définition donnée à ces concepts fait explicitement référence à la valeur vraie. De plus, la syntaxe mathématique est celle de l'approche classique de la mesure. L'enseignement de la mesure proposé dans cette unité d'enseignement se fait donc bien dans le cadre de l'approche classique de la mesure. Les enseignants utilisent le mot incertitude, car ils trouvent qu'il est moins connoté pour les étudiants que le mot erreur.

Nous avons fait la liste des notions qui peuvent être abordées dans cette approche en distinguant la sémantique, c'est-à-dire le sens des concepts, de la syntaxe, c'est-à-dire de leur écriture et de la façon de les calculer. Nous avons inscrit en italique les éléments de savoir qui n'étaient pas abordés ou mobilisés dans cet enseignement.

Sémantique	
Erreur de mesure	♦ Définition (en rapport avec la valeur vraie). ♦ *Erreur aléatoire.* ♦ *Erreur systématique.* ♦ Erreur relative.
Sources d'erreur	♦ Variabilité des objets et des phénomènes physiques. ♦ Limite des objets et des phénomènes physiques. ♦ Résolution limitée des instruments de mesure. ♦ Imprécision des instruments de mesure. ♦ Lecture des appareils de mesure.
Résultat d'une mesure	♦ Interprétation.

Syntaxe	
Estimer l'erreur associée	♦ *À la variabilité observée lorsqu'on répète la mesure.* ♦ À la définition des limites de l'objet ou du phénomène mesuré. ♦ Aux informations données par le constructeur sur la précision de l'appareil de mesure. ♦ À la lecture de l'instrument de mesure.
Estimer l'erreur associée à un paramètre d'une modélisation	♦ *Estimer l'erreur sur les coefficients d'une régression linéaire.*
Propager des erreurs	♦ Combiner différentes erreurs sur la même mesure. ♦ Combiner les erreurs sur plusieurs mesures utilisées dans un calcul simple. ♦ Loi de propagation des erreurs.
Présenter le résultat de la mesure	♦ Choisir le nombre de chiffres significatifs. ♦ Donner le résultat en utilisant le signe ±.
Comparer plusieurs valeurs en utilisant les erreurs de mesure	

Tableau 1 - Notions de l'approche classique de la mesure
(en italique éléments non abordés dans l'enseignement de l'unité d'enseignement).

2.2. Les calculs d'incertitude

Dans ce paragraphe, nous présentons notre analyse des situations dans lesquelles sont demandés les calculs d'incertitude lors des TP. Cette étude est possible à partir du fascicule, car, comme on le voit dans la figure 3, leurs concepteurs ont indiqué lorsqu'il fallait, ou non, calculer l'incertitude.

2.3. Influence de la résistance R sur le temps de charge

Utiliser $\boldsymbol{C}$ **= 10 nF** et donner à R les deux valeurs indiquées en revenant à $\boldsymbol{E}$ **= 6 V** et $\boldsymbol{f}$ **~ 100 Hz**.

R (kΩ)	10	100
$\tau_1 \pm \Delta\tau_1$ (préciser l'unité)		
τ_1 / R (préciser l'unité)		

• Conclure.

Figure 3 - Extrait d'un fascicule de TP d'électronique.

L'étude des fascicules de TP fait apparaître que les étudiants font de très nombreux calculs d'erreurs au cours des séances de travaux pratiques. Dans la grande majorité des cas, ils doivent uniquement estimer ou propager l'erreur associée à l'utilisation d'un instrument de mesure.

2.2.1. *De très (trop) nombreux calculs d'incertitude*

Dans l'unité d'enseignement de L1 de physique que nous avons étudiée, les étudiants avaient six séances de TP de deux heures. Au cours de ces six séances, ils avaient à réaliser cent quarante-et-une mesures ou calculs pour lesquels ils devaient estimer quatre-vingt-dix incertitudes. En moyenne, les étudiants doivent faire un calcul d'incertitude toutes les huit minutes. Un tel nombre de calculs d'incertitude ne laisse pas beaucoup de temps à l'étudiant pour réfléchir à ce qu'il fait.

2.2.2. *Les manipulations ne sont jamais répétées*

La majorité des estimations des erreurs étaient faites sur la base de la lecture de l'instrument de mesure (oscilloscope, multimètre, règle) ou de l'affichage : ainsi pour un oscilloscope numérique, il y a une incertitude liée au nombre de digits dans l'affichage ; si c'est 12,234 par exemple, cela veut dire qu'on peut être dans un intervalle [12,2335 – 12,2345].

Sur les soixante-neuf mesures que les étudiants réalisaient au cours de ces six séances de travaux pratiques, aucune ne correspondait à une mesure répétée. Les étudiants n'étaient donc jamais amenés à réfléchir à l'incertitude associée à la variabilité du monde physique. La définition de la valeur de la grandeur à mesurer comme source d'incertitude apparaît uniquement lors des mesures de distance sur le banc d'optique.

2.2.3. Les incertitudes sont absentes des données des énoncés

Dans les fascicules de TP que nous avons étudiés, les incertitudes ne sont quasiment jamais données sur les valeurs des données de l'énoncé comme le montre l'exemple typique de la figure 3 (cf. page ci-contre). Dans cet exemple, les étudiants étudient la réponse d'un circuit RC à un échelon de tension. Ils mesurent le temps de charge directement sur l'oscilloscope. L'énoncé attend d'eux qu'ils estiment l'incertitude sur cette mesure.

L'énoncé leur demande ensuite de calculer le rapport, $\frac{\tau_1}{R}$ mais ne demande pas de calculer l'incertitude associée à ce résultat. Ce calcul d'incertitude n'est pas faisable, car les étudiants n'ont pas les informations nécessaires, à savoir l'incertitude associée à la résistance du conducteur ohmique. Cette situation se retrouve très fréquemment dans le fascicule de TP, car les incertitudes associées aux données de l'énoncé ne sont quasiment jamais mentionnées.

2.3. Les calculs d'incertitude et les comparaisons sont souvent décorrélés

Dans les fascicules de TP que nous avons étudiés, il n'y avait pas de corrélation entre le fait qu'une valeur soit utilisée, ou non, dans une comparaison et le fait qu'on demande aux étudiants de calculer l'incertitude associée. Ainsi, dans l'exemple de la figure 3 (cf. page ci-contre) présentant la charge d'un condensateur, on demande aux étudiants de calculer l'incertitude sur la valeur mesurée τ, mais pas sur le calcul qui en découle $\frac{\tau_1}{R}$.

Pour vérifier que la formule qui prédit le temps de charge d'un circuit RC est correcte, on demande aux étudiants de comparer deux valeurs sans incertitudes. Dans un autre exemple, on demande aux étudiants de mesurer le diamètre de cellules au microscope et de donner l'incertitude associée à ces mesures. Dans cette activité à la fin du TP il n'est rien demandé de faire avec ces mesures et leurs incertitudes.

Les entretiens que nous avons menés avec les enseignants révèlent que les erreurs de mesure sont essentiellement estimées pour montrer aux étudiants qu'il y a toujours une incertitude associée à l'utilisation d'un instrument de mesure. Ainsi, les incertitudes de mesure ne sont jamais utilisées pour répondre à une question qui les rendrait nécessaires. Une telle question pourrait être de savoir si un modèle est adapté pour décrire un système expérimental donné.

3. QUELQUES PISTES POUR RÉNOVER L'ENSEIGNEMENT DES INCERTITUDES

De notre point de vue, enseigner les incertitudes de mesure est une opportunité pour enseigner aux étudiants des connaissances épistémiques, c'est-à-dire des connaissances sur la façon dont se construit le savoir en physique. Aborder les incertitudes de mesure en enseignement permettraient ainsi de :

- montrer comment la construction de connaissances repose sur la confrontation entre des prédictions et des mesures ;
- donner à voir que la science se construit sur des choix humains, contextualisés au sein d'une communauté de chercheurs.

Ainsi, le critère pour savoir si deux mesures sont compatibles ou non repose sur un accord au sein d'une communauté sur ce qui est raisonnable. Ce choix peut être remis en question comme c'est le cas actuellement en médecine et en biologie avec les p-values[(2)].

En tenant compte de l'analyse épistémologique et des constats présentés dans cet article, nous avons construit et testé des ressources pour enseigner les incertitudes à l'université. De ce travail, nous pouvons dégager quelques pistes plus générales pour rénover l'enseignement des incertitudes. Notre objectif est que les étudiants donnent du sens aux incertitudes de mesure avant d'en maîtriser les aspects calculatoires. Il s'agit d'enseigner d'abord le sens et l'utilité avant d'enseigner la syntaxe. Nous proposons donc les pistes suivantes :

- de supprimer les calculs d'incertitudes non nécessaires du point de vue du savoir en jeu ;
- de transformer certaines situations de TP pour qu'elles rendent nécessaire l'usage des incertitudes ;
- de prévoir un enseignement explicite des incertitudes. En particulier : introduire les notions associées à la mesure avec une (ou plusieurs) activité(s) qui permette(nt) de donner du sens physique aux incertitudes de mesure ; expliciter les situations dans lesquelles il faut calculer les incertitudes.

Dans les paragraphes ci-dessous, nous développons ces pistes en les illustrant avec des activités que nous avons testées.

3.1. Supprimer les calculs d'incertitude non nécessaires

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, l'enseignement actuel des incertitudes est basé sur la répétition d'un très grand nombre d'estimations d'incertitudes qui ne sont pas ensuite utilisées pour réaliser des comparaisons. Nous pensons que ces calculs non nécessaires du point de vue des situations proposées aux étudiants sont contre-productifs. Ils renforcent l'idée que l'estimation des incertitudes est «juste une norme de physicien».

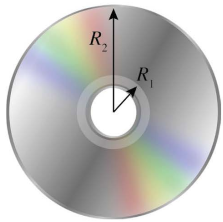
(2) La p-value est un indicateur statistique de la significativité d'un résultat. Plus la p-value est élevée, plus le résultat observé a des risques d'être dû au hasard. En médecine, si la p-value est inférieure à 0,05, alors le résultat est considéré significatif. Une autre valeur pourrait être choisie.

3.1.1. Exemple 1 : la valeur n'est pas utilisée dans une comparaison

Dans cet exemple, il s'agit d'un exercice de physique proposé par le manuel « micromega » en terminale S. Après avoir demandé aux élèves d'estimer plusieurs grandeurs telles que la longueur de la piste, on demande aux élèves de réaliser un calcul d'incertitude sur leur résultat en utilisant une formule compliquée qui leur est fournie. Ce calcul ne permet aucunement de mieux comprendre ce que sont les incertitudes ni d'apprendre à les estimer. Il permet au mieux de travailler des compétences purement calculatoires.

Stockage sur un DVD (p. 556 – n° 26)

Compétences : extraire des informations ; calculer



On détermine la largeur a séparant deux lignes consécutives d'un DVD en l'éclairant par un laser et en exploitant la figure d'interférences observée. On obtient ainsi :

$$a = (2{,}25 \pm 0{,}05)\,\mu\text{m}.$$

La plage de données du DVD est comprise entre les rayons :

$$R_1 = (2{,}25 \pm 0{,}05)\text{ cm} \quad \text{et} \quad R_2 = (5{,}90 \pm 0{,}05)\text{ cm}.$$

Sa capacité de stockage indiquée par le constructeur est de 4,38 Gio.

1. Calculer la surface S contenant des données.
Évaluer l'incertitude sur S à partir de son expression :

$$U(S) = 2\pi\sqrt{\left(R_1 \times U(R_1)\right)^2 + \left(R_2 \times U(R_2)\right)^2}\,.$$

2. *a.* Calculer la longueur L de la piste sur laquelle sont inscrits les creux et les plats.
b. Estimer l'incertitude $U(L)$ associée sachant que :

$$\sqrt{\left(\frac{U(S)^2}{S}\right) + \left(\frac{U(a)^2}{a}\right)}.$$

3. Évaluer la longueur de piste utilisée pour le codage d'un bit.
Données : 1 Gio = 2^{30} octects ; 1 octet = 8 bits.

Figure 4 - Extrait d'un manuel de physique-chimie de terminale S de lycée.

3.1.2. Exemple 2 : la valeur est utilisée dans une expérience qualitative

Dans ce deuxième exemple, il s'agit de l'expérience d'introduction d'un TP sur les lentilles. L'objectif est de montrer aux étudiants l'action d'une lentille convergente sur un faisceau divergent. Dans cette expérience, on demande aux étudiants d'éclairer une lentille convergente avec un faisceau divergent puis de mesurer le diamètre de ce faisceau sur un écran situé avant le plan image. Les étudiants doivent alors mesurer le diamètre de l'interception du faisceau lumineux sur l'écran, le noter sur leur rapport de TP en donnant l'incertitude associée à cette mesure. Ils doivent alors comparer cette mesure au diamètre de la lentille. Il s'agit de comparer typiquement 10 cm et 2 cm mesurés à l'aide d'une règle graduée au millimètre.

Pourtant, il n'est pas nécessaire d'estimer et d'écrire les incertitudes de mesure pour se convaincre que l'action d'une lentille convergente est de faire converger le faisceau lumineux. Cette expérience est une expérience qualitative. Or une bonne expérience qualitative est justement une expérience où le phénomène à observer est suffisamment visible pour ne pas avoir besoin d'estimer l'incertitude pour se convaincre du résultat.

Nous recommandons donc d'éviter les calculs d'incertitudes lorsqu'ils ne sont pas nécessaires *du point de vue de la physique ou de la chimie*. Dit plus simplement, nous conseillons d'éliminer les calculs d'incertitude que le bon sens ne commande pas. Le temps gagné permettra d'enseigner explicitement les incertitudes de mesure.

3.2. Adapter certaines activités pour donner un enjeu aux calculs d'incertitudes

Dans les travaux pratiques que nous avons étudiés, supprimer les calculs d'incertitudes non nécessaires supprime la majorité des calculs d'incertitude demandés aux étudiants. En partant des situations décrites au paragraphe 1.2.2. (comparer deux grandeurs de même nature, comparer une mesure à une valeur de référence), nous pensons qu'il est possible de modifier légèrement la situation expérimentale proposée aux élèves en gardant le même matériel pour que la situation ait davantage de sens du point de vue des incertitudes de mesures.

Dans les paragraphes ci-dessous, nous proposons d'illustrer trois types de situations-problèmes qui permettent de redonner du sens au calcul d'incertitude. Il s'agit de :

- Questionner la validité d'un modèle ;
- Comparer deux méthodes de mesure ;
- Déterminer la nature d'un objet inconnu.

Ces pistes ont été utilisées par exemple pour aider les étudiants qui préparent l'agrégation de physique à problématiser les expériences qu'ils présentent en montage.

3.2.1. Questionner la validité d'un modèle

À l'instar de ce qu'il se passe souvent dans un laboratoire de recherche, on peut adapter légèrement une expérience pour amener les étudiants à tester les hypothèses de modélisation faites en cours. Ainsi, au lieu de demander aux élèves de *vérifier* la loi qu'ils ont vue en cours et qui donne la période d'un pendule simple, on peut leur demander de trouver un système expérimental pour lequel les hypothèses de modélisation sont pertinentes.

Exemple

À la préparation au CAPES, on demandait aux étudiants de mesurer la période de deux pendules. L'un est constitué d'une petite masse suspendue à une ficelle et l'autre est constitué d'une tige métallique creuse suspendue à son extrémité(3). Lorsqu'ils font les mesures et leurs calculs proprement, les étudiants trouvent que la mesure de la période d'oscillation du pendule simple correspond exactement à celle obtenue par le

(3) Pendule vendu chez Jeulin.

modèle alors que celle mesurée pour le pendule légèrement pesant est un tout petit peu différente (et est strictement différente si l'on tient compte des incertitudes de mesure). Si l'on utilise le modèle du pendule pesant, alors on retrouve un très bon accord entre le modèle et l'expérience.

3.2.2. Comparer deux méthodes expérimentales

L'enjeu d'un certain nombre de séances de TP est de faire acquérir aux étudiants des méthodes de mesure : ils doivent savoir utiliser un multimètre, réaliser un montage de focométrie… Dans ces situations, on peut choisir de passer par l'objet inconnu, mais l'on peut aussi demander aux étudiants de comparer la précision obtenue avec deux méthodes de mesure. Dans ce cas, pour donner un peu d'enjeu à l'exercice on peut demander aux étudiants de comparer deux méthodes selon plusieurs critères : précision, coût en temps, coût en matériel. Il est même possible de leur demander d'argumenter le choix de l'une des méthodes par rapport à un objectif fixé.

Exemple

Ici, il s'agit de donner un enjeu à l'utilisation des incertitudes lors d'un montage sur la mesure de distances focales de lentilles à l'agrégation de physique. Situation :«J'ai renversé la boîte où je range mes lentilles convergentes et je cherche à ranger de nouveau les lentilles dans la bonne case. Quelle méthode me conseillez-vous d'utiliser pour déterminer les distances focales de chacune des lentilles ? Argumentez à partir d'éléments liés à la précision des méthodes et leur coût en temps».

3.2.3. Déterminer la nature d'un objet inconnu

La manière la plus simple de transformer un énoncé est peut-être celle de l'objet inconnu. Les étudiants ont sur leur table un objet dont ils ne connaissent pas l'une des caractéristiques. Ils doivent utiliser les connaissances déjà étudiées pour trouver la caractéristique de cet objet.

Exemple 1

En classe de troisième, on distribue à des élèves des cylindres de métaux différents. Les élèves doivent mesurer la masse volumique des cylindres qu'ils ont à leur disposition pour déterminer les métaux qui sont identiques. La masse volumique est une grandeur quotient et leurs résultats apparaissent sur la calculette avec un très grand nombre de chiffres. Pour pouvoir déterminer quels sont les métaux identiques, il est nécessaire d'introduire la notion de chiffres significatifs. En effet, dans les programmes de cycle 4 il est écrit : «Il [l'élève] mesure des grandeurs physiques en prenant progressivement en compte les incertitudes associées.» (p. 49). Le choix du nombre de chiffres significatifs à utiliser pour écrire un résultat est à relier aux incertitudes associées aux différentes mesures.

Exemple 2

À la préparation au CAPES, les étudiants travaillant en binômes ont dans une boîte d'allumettes une pile inconnue et seuls sortent deux fils électriques. Ils doivent trouver quels sont les binômes qui possèdent des piles de même tension. Pour résoudre ce problème, ils doivent construire un montage comparateur avec un amplificateur opérationnel, quelques piles «libres» et une diode. Ils doivent alors comparer la tension des piles cachées aux piles de référence qu'ils ont sur la table.

La diode leur permet de savoir si la tension en sortie du comparateur est positive ou négative. Ils réalisent ainsi une estimation de la valeur de la tension de leur pile inconnue, et donc une mesure. Malgré leur rejet massif des TP d'électroniques, tous les étudiants se sont pris au jeu. Ils ont dû estimer l'incertitude associée à leur instrument de mesure rudimentaire pour pouvoir conclure sur les binômes possédant des piles similaires. Cette activité permet d'insister sur l'incertitude liée à l'affichage d'un appareil de mesure numérique.

3.3. Proposer des activités spécifiques pour construire les concepts associés aux incertitudes

Notre troisième piste concernant la rénovation de l'enseignement des incertitudes de mesure concerne la mise en place d'activités dédiées à un enseignement explicite des incertitudes. Cet enseignement explicite peut se faire de manière traditionnelle au cours d'un enseignement magistral. Pour aider les élèves ou les étudiants à construire le sens associé aux incertitudes de mesure, nous proposons d'utiliser des activités qui rendent nécessaires l'utilisation du concept d'incertitude en physique.

Nous détaillons cette proposition sur deux exemples que nous avons utilisés à la préparation au CAPES. Dans le premier exemple, la course d'Usain Bolt, l'idée est d'amener les étudiants à construire la notion d'erreur systématique et celle de budget d'incertitude (au sens du GUM). Dans la deuxième activité, le générateur mécanique de hasard, les étudiants construisent une interprétation probabiliste des incertitudes.

3.3.1. Exemple 1 : La course d'Usain Bolt

Dans cette activité, on projette aux élèves une rediffusion d'une course d'athlétisme d'un 100 m sans le son et on demande aux étudiants de chronométrer la course trois fois de suite. On compare alors leurs mesures à la valeur obtenue par le chronométreur de la course. Dans toutes mesures faites par les étudiants la durée de course est plus courte que celle du starter, pourquoi ?

Les étudiants proposent de calculer les incertitudes de mesure. Spontanément, ils prennent en compte l'incertitude liée au chronomètre (totalement négligeable) et celle liée à la variabilité des mesures (c'est-à-dire la variabilité de leur temps de réaction). Le compte n'y est toujours pas. Il faut en fait prendre aussi en compte le temps de réaction du coureur (de l'ordre de 300 ms, l'information se trouve en ligne)(4). Ils peuvent estimer leur temps de réaction soit avec une petite application en ligne soit avec l'expérience de la règle que l'on fait tomber et qu'il faut rattraper (la longueur de chute de la règle permet de remonter au temps de réaction)(5).

Cette activité qui dure une heure et qu'ils terminent chez eux leur permet de construire la notion d'erreur systématique et de la distinguer de la notion d'incertitude de mesure.

3.3.2. Un générateur mécanique de hasard

Dans cette activité, les étudiants ont pour consigne de construire un générateur de hasard à partir d'un dispositif lanceur et d'une cible. Les étudiants doivent en effet concevoir une cible et la positionner de manière à ce que, en moyenne, l'objet lancé tombe une fois sur deux sur la cible. Le dispositif lanceur est constitué d'un pendule et d'un cutter qui coupe le fil lorsqu'il passe la verticale. On pourrait aussi utiliser une rampe ou une catapulte (comme dans l'idée originale de Rebecca Kung-Lippman [3]).

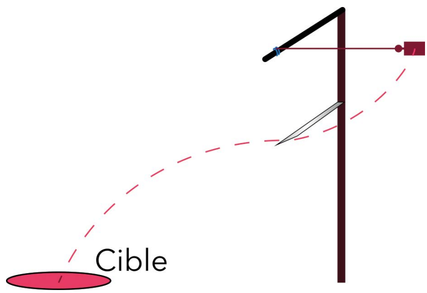


Figure 5 - Schéma du dispositif lanceur utilisé pour réaliser le générateur de pile ou face.

Pour répondre à la consigne, les étudiants doivent utiliser une interprétation probabiliste des incertitudes de mesure. Ils doivent en effet utiliser leur estimation de l'incertitude pour prédire la probabilité qu'a l'objet de tomber sur la cible lors d'un prochain lancer.

3.4. Expliciter l'enseignement des concepts associés aux incertitudes de mesure

Des travaux en sciences de l'éducation, en particulier en sociologie, ont montré l'importance d'expliciter les savoirs à apprendre, car les contextes dans lesquels ils sont mis en œuvre les rendent souvent implicites [1]. Plusieurs études [3-4] sur l'enseignement des incertitudes de mesure ont d'ailleurs montré qu'avec un enseignement

(4) http://tinyurl.com/goqplr4

(5) http://phymain.unisciel.fr/mesure-du-temps-de-reaction/

explicite des concepts associés aux incertitudes de mesure, les étudiants développaient une bonne compréhension des incertitudes de mesure.

3.4.1. *Expliciter les situations dans lesquelles les étudiants doivent calculer les incertitudes*

Lorsque nous avons présenté les résultats de notre analyse de cette unité d'enseignement de L1 aux enseignants qui avaient été interrogés pour l'étude, ils ont été surpris que les erreurs sur les données de l'énoncé n'aient pas été données et qu'il ne soit pas demandé aux étudiants d'estimer systématiquement les incertitudes. Pour des raisons de cohérence, ils ont souhaité ensuite faire évoluer les travaux pratiques pour que les étudiants calculent systématiquement les incertitudes de mesure. Nous pensons que ce n'est pas la seule manière d'être cohérent dans nos demandes aux étudiants. Nous pensons qu'il serait préférable, pour que les étudiants donnent du sens aux incertitudes, d'expliciter les situations dans lesquelles ils devront estimer les incertitudes.

En effet, dans la majorité des unités d'enseignement de physique, les étudiants ne voient jamais d'incertitude de mesure en cours ni en TD alors qu'ils en calculent un très grand nombre en TP. Il est donc nécessaire de leur proposer une règle cohérente entre cours, TP et TD qui explicite dans quelles situations il est pertinent d'estimer les incertitudes de mesure. Cette règle a la valeur d'une règle du jeu et est fondée sur le constat que l'incertitude est nécessaire pour faire des comparaisons de valeurs d'une grandeur. D'autres règles du jeu seraient possibles. Ainsi, calculer systématiquement les incertitudes est une autre règle du jeu possible. Cependant, ce calcul systématique au détriment de l'estimation des incertitudes quand cela est suffisant s'éloigne des pratiques des physiciens chercheurs.

3.4.1.1. Donner toujours un nombre raisonnable de chiffres significatifs

Cet apprentissage est peut-être le plus important. Il ne s'agit pas de calculer précisément les incertitudes, mais d'arriver, dans des situations simples, à avoir une idée de l'incertitude et en tenir compte pour écrire un résultat avec le bon nombre de chiffres significatifs : le dernier chiffre significatif correspond au même ordre de grandeur que l'incertitude estimée. Cette règle permet ainsi d'estimer l'incertitude associée à la mesure de la distance lentille-image dans un montage d'optique.

L'image observée sur un écran est nette sur une plage de distance à la lentille de l'ordre du centimètre. Le résultat de la mesure est donc à donner au centimètre près. Et ce, même si la règle possède davantage de graduations.

3.4.1.2. Estimer précisément l'incertitude quand le résultat est utilisé (ou peut être utilisé) dans une comparaison

En cours magistral, l'enseignant confronte rarement les théories et les modèles qu'il présente à des situations expérimentales. Cela justifie de ne pas utiliser d'incertitudes de mesure lorsque des calculs sont développés au tableau.

En TD, les énoncés sont souvent conçus pour entraîner les capacités calculatoires des élèves ainsi que leur habileté à manier des modèles mathématiques. Tant qu'il n'y a pas de comparaisons entre les valeurs numériques obtenues et des mesures expérimentales, il n'est pas nécessaire d'estimer les incertitudes.

En TP, les étudiants rencontrent des situations impliquant des comparaisons entre des mesures (et parfois des valeurs de référence), et des situations n'impliquant pas de comparaisons entre des mesures. Ainsi, dans l'exemple sur le temps de charge d'un condensateur, les étudiants peuvent comparer la valeur mesurée à la valeur prédite par leur modèle. Cette comparaison rend pertinent l'usage des incertitudes.

À l'inverse, lors de l'un des TP d'optique, les étudiants doivent utiliser une mire sous microscope pour mesurer le diamètre d'une cellule. Cette mesure n'est pas utilisée par la suite et donc le calcul d'incertitudes ne présente pas d'intérêt. Les étudiants doivent donc estimer les incertitudes sur leurs mesures lorsqu'elles sont impliquées dans une comparaison.

Pour que les étudiants puissent développer leur capacité à choisir lorsqu'il est nécessaire, ou pas, de calculer les incertitudes en TP, il faut qu'ils aient accès aux incertitudes sur les données de l'énoncé, ce qui est malheureusement rarement le cas !

CONCLUSION

L'enseignement de la mesure est au cœur de l'enseignement expérimental de la physique. Il met directement en jeu la nature de la physique en questionnant la façon dont se construit le savoir en sciences. Nous avons donc proposé quelques pistes pour rénover les travaux pratiques de manière à aider les étudiants à donner du sens à ce qu'ils font : des sciences expérimentales.

Nous avons choisi d'illustrer notre propos avec des activités que nous avons pour la plupart menées en classe. L'objectif n'est pas que chacun utilise ces activités, mais davantage d'illustrer les quelques pistes de rénovation que nous avons proposées.

BIBLIOGRAPHIE

[1] S. Bonnery, *Comprendre l'échec scolaire - Élèves en difficultés et dispositifs pédagogiques*, La Dispute, collection « L'enjeu scolaire », 2007.

[2] A. Caussarieu and A. Tiberghien, " When and Why are the Values of Physical Quantities Expressed with Uncertainties in a Physics Undergraduate Laboratory Course?", *International Journal Science and Mathematics Education*, p. 1-19, 2016.

[3] R. L.Lippmann-Kung, "Teaching the concepts of measurement: an example of a concept-based laboratory course", *American Journal of Physics*, n° 73(8), p. 771–777, 2005.

[4] S. Pillay, A. Buffler, F. Lubben and S. Allie, "Effectiveness of a GUM-compliant course for teaching measurement in the introductory physics laboratory", *European Journal of Physics*, n° 29(3), p. 647-659, 2008.

Sur Le Bup, de très nombreux articles ont été consacrés à ce sujet

Pour les plus actuels, en prise avec cet article, citons :

[5] V. Tejedor et H. Lakmini, « Des incertitudes sur la notion d'incertitude », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 108, n° 968, p. 1387-1439, novembre 2014.

[6] J. Treiner, « Variabilité, incertitude, erreur », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 105, n° 930, p. 9-14, janvier 2011.

[7] M. Rouaud, « Mesure avec une règle », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 103, n° 913, p. 415-422, avril 2009.

[8] A. Bernard et J.-L. Vidal, « Mesures et incertitudes de mesure dans les laboratoires d'enseignement », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 102, n° 907, p. 1181-1186, octobre 2008.

Aude CAUSSARIEU
Agrégée préparatrice
Département de physique
ENS de Lyon
Lyon (Rhône)

Andrée TIBERGHIEN
Chercheur émérite
UMR ICAR (5191)
CNRS et Université de Lyon
Lyon (Rhône)