



MESURE ET INCERTITUDES

TRAVAUX DU GRIESP 2018-2019

La sensibilisation des élèves aux incertitudes inhérentes à toute opération de mesure et aux méthodes mathématiques mises en œuvre pour les quantifier est l'un des objectifs visés par les nouveaux programmes de physique-chimie du lycée, ceci dès la classe de seconde. Cette première sensibilisation, à la fois modeste et ambitieuse, comporte des enjeux que l'enseignant doit bien identifier.

Tout d'abord, la notion de variabilité d'une mesure ne va pas de soi : les élèves prêtent souvent un caractère absolu aux indications fournies par les appareils de mesure, en particulier lorsque ceux-ci donnent les résultats sous forme digitale. De plus, l'enseignant conduit les apprentissages des élèves dans ce domaine en s'appuyant le plus souvent sur des activités expérimentales qui ont également d'autres objectifs de formation que ceux liés à la mesure.

Par ailleurs, l'évaluation quantitative précise de la confiance que l'on peut associer au résultat d'une mesure fait appel à des notions mathématiques délicates qui relèvent notamment du domaine des statistiques et des probabilités. Afin de ne pas avoir à mobiliser des outils complexes, les enseignants s'appuient sur des formules fournies ou sur des logiciels dédiés, utilisés en « boîte noire ». Cette approche permet effectivement de libérer les élèves de certains calculs fastidieux, mais leur attention reste le plus souvent portée sur le calcul d'incertitudes plutôt que sur l'analyse critique de leurs causes, de leurs conséquences, des moyens de les minimiser, etc.

Les nouveaux programmes de physique-chimie du lycée proposent une approche de la thématique « mesure et incertitudes » qui met davantage l'accent sur la prise de recul et le développement du sens critique des élèves dans le cadre de leurs activités expérimentales que sur la technicité associée à l'évaluation quantitative des incertitudes. Ils introduisent également une progression sur l'ensemble des niveaux du lycée, permettant d'installer peu à peu la notion de variabilité de la mesure et d'introduire des outils mathématiques de plus en plus précis pour la quantifier.

Une attention particulière est par ailleurs portée au sens que l'on peut donner à la comparaison d'une valeur de référence à une valeur mesurée. En effet, comme le rappelle le guide pour l'expression des incertitudes de mesure (ou GUM¹), lorsque des mesures sont effectuées, « il faut obligatoirement donner une indication quantitative sur la qualité du résultat pour que ceux qui l'utiliseront puissent estimer sa fiabilité. En l'absence d'une telle indication, les résultats de mesure ne peuvent pas être

¹ https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_F.pdf p9

comparés, soit entre eux, soit par rapport à des valeurs de référence données dans une spécification ou une norme ».

Ces transformations questionnent un certain nombre d'habitudes, notamment celle qui consiste à calculer systématiquement l'« erreur relative » entre une valeur mesurée et une valeur de référence. Elles ont également des incidences sur le traitement du nombre de chiffres significatifs adaptés à la présentation d'un résultat, qui doit résulter d'une analyse critique des relations mises en jeu et de la précision des données, plutôt que de l'application systématique de la règle qui énonce, en général inexactement, que le nombre de chiffres significatifs dans le résultat d'un calcul doit être celui de la moins précise des données utilisées.

Les ressources élaborées par le GRIESP ont pour vocation d'accompagner ce changement et fournir des outils pédagogiques, didactiques et scientifiques permettant leur mise en œuvre dans les programmes de physique-chimie, du cycle 4 à la classe de terminale. Elles ont essentiellement pour but de proposer sans dogmatisme excessif une initiation aux enjeux des incertitudes de mesure sans rentrer dans les détails mathématiques qui seront éventuellement développés dans l'enseignement supérieur.

Ces ressources permettent de sensibiliser les élèves, à partir d'exemples simples, démonstratifs et attrayants à la variabilité des valeurs obtenues lors de séries de mesures. Celles-ci, obtenues par exemple dans le cadre d'expériences collectives de classe et dans des contextes disciplinaires authentiques, pourront être exploitées et analysées par les élèves.

Elles illustrent également comment un résultat peut être qualitativement comparé avec une valeur de référence à l'aide de l'incertitude-type ; un critère quantitatif est introduit à ce propos dans le programme de spécialité physique-chimie de la classe de terminale. Ainsi, lorsqu'une valeur de référence est connue, l'élève peut conclure à une compatibilité entre le résultat de ses mesures et une valeur de référence, en s'assurant que leur différence est plus faible que ou comparable à l'incertitude-type des mesures.

Enfin, ces ressources s'attachent à proposer des situations d'enseignement qui, par le biais d'une analyse des incertitudes de mesure, permettent de développer chez les élèves la compétence « valider » de la démarche scientifique ; en effet, en étudiant les résultats d'une mesure et de l'incertitude-type associée, l'élève développe différentes capacités liées à cette compétence :

- faire preuve d'esprit critique, procéder à des tests de vraisemblance ;
- identifier des sources d'erreur, estimer une incertitude, comparer à une valeur de référence ;
- confronter un modèle à des résultats expérimentaux ;
- proposer d'éventuelles améliorations de la démarche ou du modèle.

Les douze activités présentées sont organisées selon un plan thématique articulé autour de questions :

1. comment estimer la variabilité d'une grandeur physique par une approche statistique ?
2. comment tester une loi ?
3. comment évaluer une incertitude-type par une approche autre que statistique ?
4. comment évaluer une incertitude-type à l'aide d'un microcontrôleur ?
5. comment évaluer les incertitudes-types composées à l'aide d'une simulation numérique ?

Les démarches mises au point par le groupe d'enseignants du GRIESP ont été testées avec des élèves et s'appuient sur des contextes disciplinaires variés (activités en physique, activités en chimie, situations expérimentales, exercices, mesures à l'aide d'un microcontrôleur...), destinés à différents niveaux de classe et privilégiant la mise en activité des élèves. En particulier, la progressivité des

apprentissages du cycle 4 à la classe de terminale est mise en avant, permettant la réactivation des connaissances travaillées antérieurement.

Les outils utilisés (smartphone, tableurs, environnement de programmation) favorisent une approche concrète pour donner du sens à la variabilité d'une mesure, dans des situations appropriées. Les ressources proposées privilégient l'utilisation d'outils numériques, construits si possible par les élèves, afin d'éviter l'utilisation systématique de « boîtes noires » ou de formules ad-hoc. En particulier, la simulation numérique de variabilité de mesures par le biais de fonctions pseudo-aléatoires est une méthode démonstrative permettant d'appréhender la problématique des incertitudes composées et de les évaluer quantitativement par « expérimentation numérique ».

Les rédacteurs utilisent un vocabulaire² précis et rigoureux issu en particulier du vocabulaire international de métrologie (VIM³). Les termes spécifiques à la métrologie sont en petit nombre, mais ils sont utilisés systématiquement afin de favoriser leur appropriation par les élèves. Dans cet esprit, il faut noter qu'une vigilance particulière est portée sur la différence de statut entre l'incertitude-type associée à la moyenne \bar{m} d'une « série de mesures » notée $u(\bar{m})$ et l'incertitude-type d'une « mesure unique » m' notée $u(m')$. Cette notation explicite la différence entre ces deux notions. Elle permet également aux élèves et aux enseignants d'avoir présent à l'esprit que l'analyse critique du résultat d'une expérience nécessite en premier lieu de la décrire de la façon la plus détaillée possible. Dans le compte-rendu d'une activité expérimentale, il n'est pas indifférent de savoir que les résultats rapportés concernent une « série de mesures » effectuées dans les mêmes conditions (autant que faire se peut) ou bien qu'ils s'appuient sur une « mesure unique ».

Enfin, pour faciliter les apprentissages de tous les élèves, les concepteurs des ressources proposent régulièrement des modalités de différenciation pédagogique, en particulier en ce qui concerne l'utilisation des outils numériques. Les logiciels libres choisis peuvent de plus être utilisés par les élèves en autonomie dans ou hors la classe, ce qui favorise une forme de continuité des apprentissages.

² On peut, à ce propos, souligner la polysémie du terme "mesure" sur laquelle le choix a été fait de ne pas s'étendre.

³ <https://www.bipm.org/fr/publications/guides/vim.html>