

LA MÉTROLOGIE est la science de la mesure. Pour toute grandeur L mesurée, la mesure nécessite à chaque fois de fixer la valeur numérique de cette grandeur physique, notée $\{L\}$ tout en lui associant une unité, de sorte que $L = \{L\}\text{unité}$. Le choix de l'unité est fondamental : il faut des unités stables dans le temps, disponibles en tout lieu, et permettant des mises en pratique précises à des échelles différentes. La métrologie fondamentale vise à créer, développer et maintenir des étalons de référence reconnus : il faut donc établir des liens entre la définition de l'unité et sa mise en pratique, c'est-à-dire son utilisation pour faire des mesures, grâce à des expériences impliquant la grandeur à mesurer et la grandeur servant à définir l'unité. Dans l'industrie, la métrologie met en œuvre des méthodes pour garantir les mesures, par exemple à l'issue d'un processus de fabrication, dans le cadre d'un contrôle de qualité où il faut respecter un ensemble de normes qui relève de la métrologie légale.

Le processus qui qualifie l'action de mesurer est appelée « mesurage ». Il convient de distinguer le « mesurande » de la « grandeur mesurée ». Le mesurande est la grandeur à mesurer en spécifiant dans quelles conditions la mesure est effectuée (température, pression, nature du corps intervenant...). Il en résulte que si l'on répète plusieurs fois le mesurage d'un même mesurande, on peut obtenir des valeurs différentes. On définit alors l'incertitude de mesure comme étant un paramètre qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande. L'incertitude-type, quant à elle, est l'incertitude de mesure exprimée sous la forme d'un écart-type. Enfin, l'incertitude-type composée est l'incertitude-type obtenue en utilisant les incertitudes-types individuelles associées aux grandeurs d'entrée dans un modèle de mesure.

Nous allons préciser toutes ces notions en donnant des références en nombre limité, mais que nous estimons suffisamment fiables et représentatives du sujet. Elles émanent de sites Internet institutionnels et d'articles qui sont pour l'essentiel tirés de notre revue, Le Bup.

1. UNITÉS ET MESURES

1.1. Le Système international (SI)

Lors de sa séance publique solennelle du 16 novembre 2018, la conférence a entériné la proposition faite par le Comité international des poids et mesures (CIPM) de redéfinir quatre des unités de base du Système international (SI) : le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin. Les nouvelles définitions de ces unités attribuent maintenant des valeurs numériques fixées à quatre constantes de la physique : la constante de

Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann. Le nouveau Système international (SI) est entré en application le 20 mai 2019.

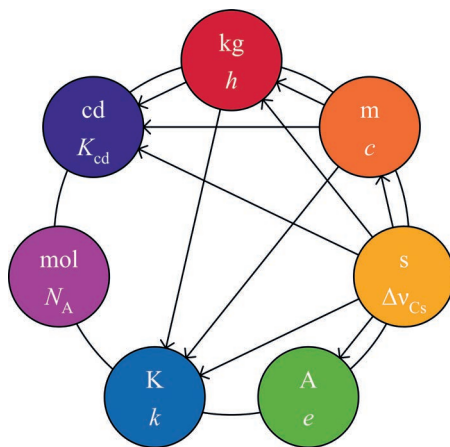


Figure 1 - Système international depuis 2019.

Parmi toutes les institutions qui sont les gardiennes des unités du Système international ou qui fournissent les tables de conversion approuvées par les instances internationales de métrologie, citons :

◆ **Le Bureau international des poids et mesures (BIPM)**

- est l'organisation intergouvernementale créée par la Convention du Mètre dont les États membres agissent en commun concernant les sujets liés à la science des mesures et aux étalons de mesure ;
- publie le Système international d'unités (SI) et produit l'échelle de temps de référence (UTC)⁽¹⁾.

À noter que la Société française de physique (SFP), par l'intermédiaire de sa revue *Reflète de la physique*, a émis un document qui récapitule tous les travaux établis par le Comité international des poids et mesures, document que l'on peut consulter selon [le lien](#).

Le Système international d'unités (SI) est fondé sur sept unités de base qui sont le mètre (m), le kilogramme (kg), la seconde (s), l'ampère (A), le kelvin (K), la mole (mol) et la candela (cd), respectivement unités de longueur, de masse, de temps, de courant électrique, de température, de quantité de matière et d'intensité lumineuse. Toutes les autres unités du SI sont des unités dérivées, qui se déduisent de ces unités de base. Le choix et la définition des unités de base sont fixés par convention entre les États membres du BIPM. Ils font l'objet d'un accord écrit, qui s'accompagne par des mises en pratique. Ce sont des séries d'instructions, en général discutées par un comité consultatif avant d'être publiées par le BIPM, qui permettent la réalisation

(1) En français : Temps universel coordonné – En anglais : *Coordinated universal time*.



The International System of Units (SI)

The recommended practical system of units of measurement is the International System of Units (*Système International d'Unités*), with the international abbreviation **SI**.

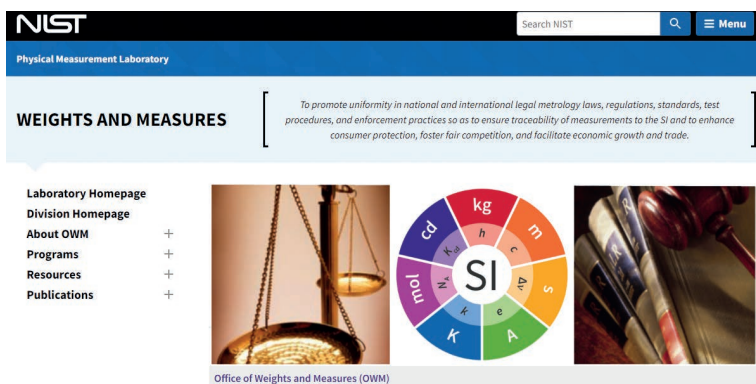
From 20 May 2019 all SI units are defined in terms of constants that describe the natural world. This assures the future stability of the SI and opens the opportunity for the use of new technologies, including quantum technologies, to implement the definitions.

The SI is the system of units in which

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium-133 atom $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ is 9 192 631 770 Hz
- the speed of light in vacuum c is 299 792 458 m/s
- the Planck constant h is $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s
- the elementary charge e is $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C
- the Boltzmann constant k is $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K
- the Avogadro constant N_A is $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd} , is 683 lm/W

where the hertz (Hz), joule (J), coulomb (C), lumen (lm), and watt (W), are related to the units second (s), metre (m), kilogram (kg), ampere (A), kelvin (K), mole (mol), and candela (cd), according to $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$, and $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$.

Figure 2 - Les fondements du SI d'après le BIPM.



OWM fulfills its mission through the following broad activities:

- Standards development (national and international)
- Design and development of test and operational procedures
- Design and delivery of training, in the areas of:
 - laboratory metrology,
 - weights and measures laws and regulations, and
 - weights and measures inspections;
- Technical guidance
- Implementation of national policy to establish the SI as the preferred system of weights and measures
- Publications and outreach

Figure 3 - Les fondements du SI d'après le NIST.

concrète de cette définition, avec les meilleures qualités métrologiques possibles. Pour la dissémination des unités et l'étalonnage des appareils de mesure, on réalise des étalons : ce sont des artefacts matériels ou des dispositifs expérimentaux qui matérialisent l'unité d'une grandeur physique, avec une valeur connue et une exactitude qui peut être plus ou moins grande (cf. figure 2, page précédente).

◆ Le National Institute of Standards and Technology (NIST)

Cette institution américaine est l'équivalent de notre LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais, anciennement Laboratoire national d'essais). Son site, très riche, tabule un très grand nombre de données qui portent sur les constantes de la physique et de la chimie (cf. figure 3, page précédente).

◆ L'Organisation internationale de métrologie légale (OIML)

La métrologie légale désigne l'application d'exigences réglementaires à des mesurages et à des instruments de mesure. Élaborer des normes mondiales applicables dans les règlements de métrologie légale est le rôle de l'OIML. Les mesurages font partie de notre vie quotidienne à tel point qu'ils sont devenus banals et que nous n'y prêtons parfois même plus attention. De nombreux exemples en témoignent :

- le contrôle de la vitesse de nos véhicules en vue de garantir notre sécurité lors de nos déplacements et de réduire ainsi le nombre de victimes d'accidents de la route ;
- les examens médicaux auxquels nous nous soumettons pour demeurer en bonne santé ;
- l'heure que nous consultons pour être ponctuels à nos rendez-vous et les systèmes de localisation par satellite qui nous permettent de connaître notre position ;
- l'électricité, le gaz et l'eau dont la facturation est établie sur la base de notre consommation ;
- la viande, le poisson, les fruits et les légumes qui nous sont vendus au poids ;
- la mesure du volume de carburant dont nous remplissons le réservoir de nos voitures ;
- les niveaux de gaz d'échappement émis par nos véhicules qui sont régulièrement contrôlés ;

et ainsi de suite !

Le plus souvent, les erreurs mineures, en plus ou en moins, s'annulent en moyenne sur un nombre élevé de mesurages. Dans le cas d'erreurs biaisées, toutefois, le préjudice financier peut être considérable : une imprécision de mesure des quantités de pétrole relevées à chacun des multiples points de transaction situés entre le puits de pétrole et le consommateur final, par exemple, risque d'avoir de graves conséquences économiques. Autre exemple qui illustre l'importance des mesurages : la radiothérapie dans le traitement des cancers où des doses incorrectes peuvent avoir des effets extrêmement nuisibles sur la santé.

Une législation sur les mesurages et les instruments de mesure est donc indispensable dans de tels cas. Mais il en va de même dans d'autres situations, comme les transactions commerciales qui nécessitent de protéger à la fois l'acheteur et le vendeur ou bien l'application de sanctions établies à partir de mesurages. Pratiquement tous les pays garantissent cette protection en intégrant la métrologie dans leur législation, d'où l'appellation métrologie légale (cf. figure 4).

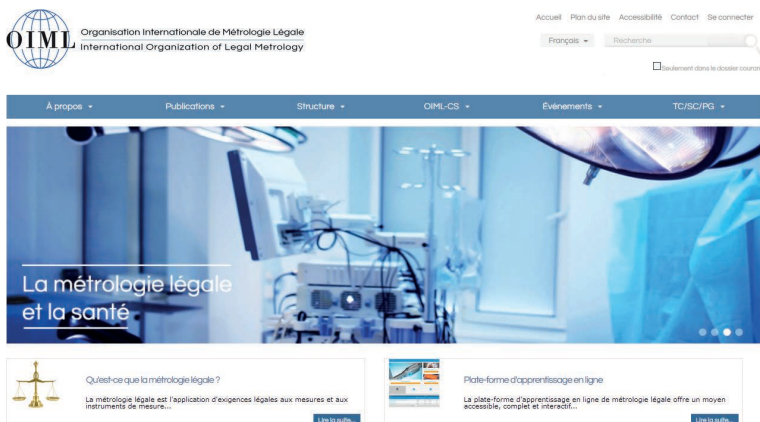


Figure 4 - La métrologie légale selon l'OIML.

1.2. Vu dans *Le Bup* : le Système international (SI)

Dans cette rubrique, nous citons quelques articles récents du *Bup* qui apportent un éclairage utile sur toutes les définitions et conventions qui ont permis ce vaste échafaudage que constitue le Système international (SI). Chaque article sélectionné est référencé, avec un court résumé de présentation.

- ◆ Christophe Daussy et Fabrice Wiotte, « Une introduction au nouveau Système international d'unités », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 113, n° 1010, p. 7-023, janvier 2019.

En décidant de fixer certaines constantes universelles, les métrologues ont changé notre façon de mesurer le monde. Cette évolution historique est marquée par une réforme majeure du Système international d'unités (SI) dont l'ambition est d'établir un système de mesure plus cohérent, plus stable et universel. Nous présentons les enjeux et les étapes de la construction de ce nouveau système qui est entré en vigueur en mai 2019.

- ◆ Mickaël Melzani, « Systèmes de grandeurs - Partie 1.1. : définir, utiliser et redéfinir les unités », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 113, n° 1017, p. 1037-1071, octobre 2019.

La redéfinition du système international SI d'unités de 2019 appelle certaines questions. L'objectif de cet article est d'aboutir à une compréhension assez fine de ce qu'est une unité, de la façon dont on peut la définir, de la façon dont l'unité est mise en pratique pour faire des mesures, ainsi que du processus de redéfinition d'une unité. Les exemples fondamentaux pris

pour cette étude concernant les définitions du mètre et du kilogramme, à partir des résolutions établies en 2018 qui ont permis de redéfinir l'unité kilogramme (cf. figure 5).

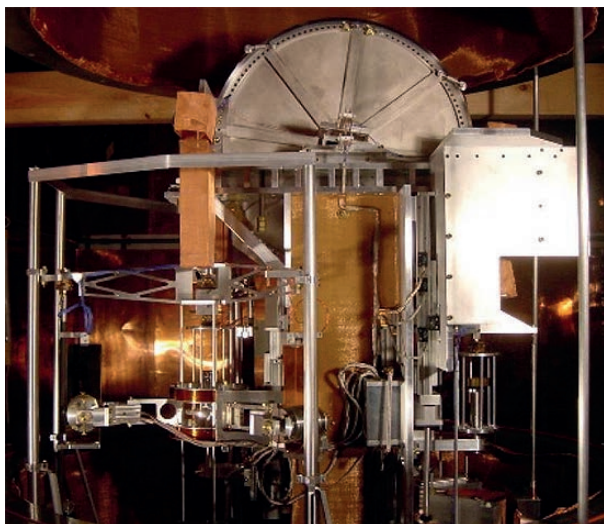


Figure 5 - La balance de Kibble :
une nouvelle définition du kilogramme.

- ◆ Mickaël Melzani, «Systèmes de grandeurs - Partie 1.2. : autour du Système international d'unités», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 113, n° 1019, p. 1319-1356, décembre 2019.

L'ampère permet d'illustrer la liberté dans le choix des grandeurs de base, le courant étant dimensionnellement indépendant, ou non, des unités mécaniques. Quant au kelvin, il permet de s'attarder sur la lente construction de la grandeur température. La mole pose la question de la mesure des masses molaires et des grandeurs fondamentales. La seconde est l'unité ultime du Système international (SI) d'après 2019, de par la précision des mesures qu'elle permet et de par le fait que les mesures des autres grandeurs s'y ramènent.

- ◆ Mickaël Melzani, «Systèmes de grandeurs - Partie 2 : structure des théories et des systèmes d'unités», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 114, n° 1020, p. 27-69, janvier 2020.

Le Système international (SI) comprend sept grandeurs de base, les autres étant dites dérivées. Pourquoi sept ? Comment choisir ? Quelle utilité ? Les grandeurs sont déclinées en grandeurs primaires et secondaires, et nous étudions cette partition et ses conséquences. Ainsi le temps et la quantité de matière sont les seules grandeurs de base primaires du SI d'après 2019.

- ◆ David Rouvel, «Scolie sur la révision du SI, ou, la disparition du grand K et ce qu'Amedeo y gagna», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 114, n° 1024, p. 455-488, mai 2020.

Après avoir explicité la raison de la modification du Système international d'unités (SI), nous

faisons un rappel historique des définitions des unités de base du SI et nous montrons l'évolution de sa structure. Nous précisons le changement de paradigme lié à l'emploi de constantes universelles pour terminer par une divagation sur la constante d'Avogadro.

2. INCERTITUDES ET MESURES

2.1. Les dispositions réglementaires dans notre enseignement de second cycle

2.1.1. Ressources [Éduscol](#) : travaux du GRIESP

Les travaux du [GRIESP](#) (Groupe de recherche et d'innovation en sciences physiques) ont pour objectif de présenter dans une première partie le vocabulaire et les notions de base dans le domaine de la métrologie. Il constitue le socle minimum que les enseignants doivent connaître et utiliser. Ce document s'appuie sur le Vocabulaire international de métrologie (VIM) 2008 élaboré par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) et le *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM). Pour accéder au VIM en ligne afin de retrouver [toutes les définitions](#).

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. 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. 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...

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.

Pour accéder au GUM, suivre [le lien suivant](#).

2.1.2. Ressources Éduscol : document élaboré en 2012

Ce document a pour vocation de présenter la vision probabiliste de l'erreur, développée depuis environ trois décennies par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) et qui a permis d'installer un consensus international dans l'expression de l'incertitude de mesure. Il se veut être une ressource pour les enseignants de sciences physiques et de mathématiques des lycées.

L'Inspection générale de l'Éducation nationale a donné son éclairage sur ce document pour les enseignants de sciences physiques. Il reste trace de son travail sur les sites disciplinaires de nombreux rectorats comme celui de Lille.

2.1.3. Quelques ressources sur Édubase

- ◆ Un diaporama élaboré pour les élèves de terminale.
- ◆ Un document intéressant élaboré dans l'académie d'Amiens.

2.2. Vu dans Le Bup : mesures et incertitudes

Le Bup a été particulièrement prolixe sur ce sujet ! Près de soixante articles sont référencés dans BupDoc. Nous nous attachons à citer les plus récents ou les plus représentatifs, sur ce vaste sujet. Chaque article sélectionné est référencé, avec un court résumé de présentation.

- ◆ David Boilley et Yoann Lallouet, «Nouveau programme de terminale : évaluation numérique des incertitudes de mesures – Partie 1 : concepts et méthodes», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 115, n° 1033, p. 441-452, avril 2021.
Les incertitudes de mesure, désormais introduites progressivement dès la seconde, occupent une place importante dans les nouveaux programmes de lycée qui comportent aussi des capacités numériques. Une d'elles consiste à «simuler, à l'aide d'un langage de programmation, un processus aléatoire illustrant la détermination de la valeur d'une grandeur avec incertitudes-types composées». Le but de cet article est d'introduire les concepts liés à l'évaluation des incertitudes et de proposer des méthodes numériques applicables au lycée.
- ◆ David Boilley et Yoann Lallouet, «Nouveau programme de terminale : évaluation numérique des incertitudes de mesures – Partie 2 : exemples d'application», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 115, n° 1034, p. 513-525, mai 2021.
Les simulations numériques peuvent aider à introduire, comprendre et vérifier des formules qui semblent sorties de nulle part, alors qu'elles ont été obtenues dans un cadre rigoureux faisant appel aux statistiques et probabilités. Le but cet article est de montrer l'intérêt pédagogique de la démarche. Bien évidemment, si les méthodes Monte-Carlo sont si répandues et font l'objet de plusieurs normes nationales et internationales, c'est qu'elles ont un intérêt dans les laboratoires. Leur champ d'application dépasse largement le domaine de la métrologie. Pour le sujet très spécifique de l'estimation de l'incertitude, elles sont utilisées pour évaluer l'incertitude-type composée.
- ◆ David Boilley et Yoann Lallouet, «Introduction aux incertitudes de mesure», *Bull.*

Bull. Un. Prof. Phys. Chim., vol. 107, n° 955-956, p. 681-695, juin-juillet-août-septembre 2013.

Les incertitudes évaluées en utilisant les normes internationales sont entrées dans les programmes de terminales scientifiques. Les livres de physique, destinés aux élèves, sont un peu succincts pour les enseignants. Cet article a pour objectif de présenter les notions nécessaires à une bonne application des formules utiles.

- ◆ Aude Caussarieu et Andrée Tiberghien, « Adapter l'enseignement pour donner du sens aux incertitudes de mesures », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 111, n° 998, p. 1111-1126, novembre 2017.

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.

- ◆ Jérôme Roccia, « Théorie statistique des incertitudes expérimentales - Première partie », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 109, n° 979, p. 1495-1527, décembre 2015.

Cet article est une tentative d'explication du modèle statistique des incertitudes expérimentales (appelées aussi incertitudes de type A). L'article est principalement destiné aux professeurs souhaitant eux-mêmes enseigner ces notions aux élèves du secondaire ou aux étudiants de classes préparatoires. La première partie de l'article introduit les notions nécessaires à la construction d'une théorie statistique des incertitudes.

- ◆ Jérôme Roccia, « Théorie statistique des incertitudes expérimentales - Seconde partie », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 110, n° 980, p. 25-48, janvier 2016.

Cette seconde partie contient deux chapitres qui constituent le sujet principal de l'article. On aborde la notion d'estimateur, d'intervalle de confiance, de densité de chi-deux, de densité de Student. Les formules pour les incertitudes de type A sont démontrées. Quelques exemples de tests statistiques comme celui d'indépendance de Pearson et de normalité de Shapiro-Wilk sont présentés.

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

La détermination de l'incertitude associée à une mesure est au cœur des nouveaux programmes. Cependant, les hypothèses permettant de transformer une ou plusieurs mesure(s) en une valeur assortie d'un intervalle de confiance sont rarement explicites, et jamais vérifiées. Les différences fondamentales entre incertitude (descriptive) et intervalle de confiance (quantifié), et entre méthode de type A ou de type B sont ici étudiées. En particulier, l'hypothèse gaussienne des erreurs fondée sur la loi des grands nombres est remise en question, de même que la méthode de combinaison des incertitudes. De façon générale, l'objectif de cet article est de souligner que

les « automatismes » du traitement statistique de données reposent sur plusieurs hypothèses qui peuvent (et doivent) être vérifiées.

- ◆ Cédric Mulet-Marquis, « Importance des corrélations dans le calcul des incertitudes », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 109, n° 975, p. 857-868, juin 2015.
Les formules les plus couramment utilisées pour déterminer l'incertitude sur une grandeur calculée à partir d'autres variables supposent le plus souvent que les corrélations entre variables ne sont pas présentes. Nous présentons les formules générales prenant en compte les corrélations puis donnons un exemple expérimental simple en électronique dans lequel les corrélations sont fondamentales pour calculer l'incertitude.
- ◆ François-Xavier Bally et Jean-Marc Berroir, « Incertitudes expérimentales », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 104, n° 928, p. 995-1019, novembre 2010.
Cet article s'intéresse aux problèmes liés à l'évaluation des incertitudes expérimentales que l'on peut rencontrer lors d'une séance de travaux pratiques, dans l'enseignement secondaire, en classes préparatoires ou à l'Université. Issu d'un enseignement en préparation à l'agrégation de physique, il est davantage centré sur la pratique que sur des considérations théoriques. Les points suivants sont abordés : définition de l'incertitude expérimentale, étude statistique, propagation des incertitudes, modélisation et vérification d'une loi physique. De nombreux exemples pratiques sont présentés.
- ◆ Jacques Treiner, « Variabilité, incertitude, erreur », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 105, n° 930, p. 9-14, janvier 2011.
Le caractère aléatoire de tout processus de mesure physique peine à être pleinement reconnu. À preuve, la référence persistante à la notion de « valeur exacte » d'une grandeur physique qui, bien que proclamée inconnue, est postulée exister, alors qu'une analyse même succincte de situations concrètes montre qu'il n'en est rien. Cette conception implique que les incertitudes résultent d'imperfections (incertitudes) qui empêcheraient d'atteindre cette valeur vraie. En réalité, les grandeurs physiques sont modélisées par des variables aléatoires, et les incertitudes de mesure ont leur origine dans la variabilité propre à toute variable aléatoire. Quant au terme « erreurs », il convient de le réserver à ce qu'on peut éviter de commettre, c'est-à-dire les « erreurs systématiques ».
- ◆ René Moreau, « Exploitation d'une série de mesures », *Bull. Un. Phys.*, vol. 71, n° 596, p. 1249-1303, juillet-août-septembre 1977.
Cet article, historiquement important pour notre enseignement, présente trois parties :
 - *buts d'une analyse de mesures (intervalle de confiance et niveau de confiance, recherche d'erreurs systématiques) ;*
 - *comparaison avec les calculs d'incertitude classique ;*
 - *proposition de méthodes pour atteindre certains objectifs.**En annexes, l'auteur examine l'incertitude sur une mesure isolée et sur la moyenne de plusieurs mesures de la même grandeur, la relation entre les estimations basées sur l'écart-type et celles basées sur l'étendue, la méthode de Monte-Carlo*
- ◆ Thierry Pré et François Hernandez, « Quelle est la « meilleure » droite ? – La méthode

des moindres carrés revisitée», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 113, n° 1011, p. 163-183, février 2019.

C'est en présentant la méthode des moindres carrés à des étudiants de CPGE et en posant la question suivante : « Comment définir la meilleure droite permettant un ajustement linéaire des données ? » que les différentes méthodes présentées dans cet article ont été proposées et étudiées. Si la méthode des moindres carrés présente des avantages indéniables (résolution analytique, adaptabilité à d'autres modèles), il est néanmoins intéressant d'étudier les autres propositions et de les comparer à la méthode standard des moindres carrés pour un ajustement linéaire. Les méthodes présentées peuvent servir de support pour un TP d'informatique présentant différents niveaux de complexité.

- ◆ Daniel Beaufile et Hélène Richoux, « Régression linéaire et incertitudes expérimentales », *Bull. Un. Phys.*, vol. 91, n° 796, p. 1361-1376, juillet-août-septembre 1997.
L'utilisation de la régression linéaire dans l'analyse de résultats expérimentaux suscite de nombreuses discussions. L'erreur vient parfois de ce que l'on n'utilise pas tous les résultats des calculs. La régression ne conduit pas seulement aux valeurs des deux paramètres, mais aussi à leur incertitude. Une telle exploitation permet sur le plan scientifique de résoudre des situations, sinon indécidables. L'explicitation permet sur le plan didactique de clarifier l'articulation des activités de modélisation et de mesurage. On introduit ainsi la légitimité de la prise en compte des incertitudes expérimentales.
- ◆ Roger Journeaux, « La régression linéaire et ses conditions d'application », *Bull. Un. Phys.*, vol. 87, n° 752, p. 353-369, mars 1993.
Le présent article propose une approche qui fait appel au sens physique, sans ambition axiomatique, pour les étudiants ou les enseignants. Par ailleurs, des compléments sont donnés au sujet des incertitudes sur les coefficients donnés par la régression. Le problème de la régression ; les limites du critère quadratique classique. Précision sur les coefficients.
- ◆ Édith Antonot, « TP "qualité" en post-bac : des exemples d'utilisation d'un tableur-grapheur et du logiciel GUM pour évaluer des incertitudes en TP de chimie », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 109, n° 977, p. 1247-1262, octobre 2015.
Cette séance de travaux pratiques d'une durée de deux heures a été réalisée avec des étudiants de BTS chimie première année. Cette séance est l'occasion pour les étudiants de faire une exploitation statistique de mesurages en utilisant un tableur-grapheur et ensuite d'utiliser le logiciel GUM pour évaluer l'incertitude élargie d'un volume puis d'une concentration molaire volumique.
- ◆ Julien Browaeys et le Groupe IREM « Mesurer en physique-chimie », « La relation de conjugaison et la régression linéaire - Première partie : critique », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 115, n° 1032, p. 347-365, mars 2021.
L'illustration expérimentale de la relation de conjugaison de lentilles minces conduit souvent à réaliser une régression linéaire, simultanément pour vérifier la validité de cette loi et pour en déduire la distance focale de la lentille étudiée. Cette méthode d'analyse est problématique à bien des égards, et une alternative peut être envisagée. Dans ce premier article, nous analysons les programmes de classe de première pour essayer de reformuler les questions qui se posent en

travaux pratiques. Puis nous examinons les propositions des livres scolaires pour montrer que le recours à la régression linéaire se fait sans compréhension de ses conditions d'application. La notion de variabilité associée à la mesure, pourtant centrale dans les attendus du programme, n'émerge pas, pas plus que l'idée d'incertitude. Il en découle que l'interprétation des résultats est toujours erronée.

- ◆ Julien Browaeys, Tristan Beau et le Groupe IREM « Mesurer en physique-chimie », « La relation de conjugaison et la régression linéaire – Deuxième partie : alternative », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 115, n° 1033, p. 475–487, avril 2021.

La pratique scolaire courante consiste à utiliser la régression linéaire pour traiter les données d'expériences sur la relation de conjugaison. Cette pratique est critiquable sur de nombreux aspects. Nous présentons ici une alternative : celle de calculer la focale pour chaque couple de distances relevées, de représenter ces valeurs et d'en calculer moyenne et écart-type. Plus justifiée scientifiquement et faisant émerger la variabilité inhérente à toute mesure, elle s'inscrit bien davantage dans les programmes de spécialité physique-chimie de première. En sus de fournir une mesure de la distance focale, cette approche permet également, via une simulation Monte-Carlo, de juger de l'adéquation du modèle à l'expérience. Les calculs restent simples, ce qui permet de les réaliser indifféremment avec un tableur ou en langage Python™.