



Formation continue des enseignants



La pluridisciplinarité dans les enseignements scientifiques

Actes de l'université d'été organisée du 9 au 13 juillet 2001 à l'École normale supérieure de Cachan dans le cadre du programme national de pilotage de la direction de l'enseignement scolaire

Place de l'expérience Tome 2

Ces actes ont été publiés en collaboration avec le CRDP Basse-Normandie dans la collection «Les Actes de la DESCO»

15 mai 2003

Sommaire

Ouverture des travaux

Mireille Tadjeddine, Madeleine Sonnevile 3

Première partie : les aspects historiques

De la mécanique à l'histoire des sciences :expérimenter en histoire ?..... 7

Pierre Lauginie

Deuxième partie : les aspects didactiques et pédagogiques

L'expérience de cours 18

René Moreau

L'expérience en travaux pratiques 28

Claudine Larcher

Troisième partie : les aspects liés aux formations professionnelles

L'expérience dans l'enseignement est-elle inutile ou nécessaire
pour la recherche et le développement? 32

Claude Fermon

Quatrième partie : les aspects liés à la mesure et à la métrologie

Mesures, erreurs et incertitudes en physique-chimie 39

René Moreau

Unités, références, incertitudes pour les mesures..... 70

Marc Himbert

Cinquième partie : les ateliers

Atelier n°1 : Les objectifs des travaux pratiques 78

Atelier n°2 : La mise en œuvre de l'expérience dans les travaux personnels encadrés 82

Atelier n°3 : Évaluer la pratique expérimentale au baccalauréat : pourquoi ?..... 91

Atelier n°4 : Autres actions pour le développement de la culture scientifique 106

Ouverture des travaux

Mireille Tadjeddine,

Professeure de physique, directrice du département de physique, Ens de Cachan
Responsable scientifique de l'université d'été

Madeleine Sonnevile,

Professeure de physique-chimie, présidente de l'union des physiciens
Responsable extérieure de l'université d'été

En plagiant Max Planck, Prix Nobel en 1918 pour la création des Quanta, nous pouvons dire que l'expérience est la seule voie qui amène à la connaissance, le reste n'est que poésie et imagination.

Dans les sciences physico-chimiques, biologiques et industrielles, la construction des savoirs se fait à travers l'élaboration de modèles qui sont le fruit des résultats expérimentaux acquis précédemment ; mais ces modèles sont à tout moment à l'épreuve de l'expérience qui est seule juge de la « vérité scientifique ». Si les nouveaux résultats expérimentaux sont satisfaisants, s'ils corroborent le modèle théorique, celui-ci sera conservé, amélioré ; si, à l'inverse, l'expérience infirme le modèle, celui-ci devra être revu, corrigé et, dans certain cas, remis totalement en cause et même abandonné complètement. C'est ainsi que se fait la recherche en sciences expérimentales, dans une dialectique constante entre expérience et théorie. Le modèle est donc une construction de l'esprit qui nous permet d'interroger l'univers et les sciences de la vie. Il peut être extrêmement abstrait, ainsi certaines interprétations de la physique quantique.

Ce concept de modèle est une notion relativement récente.

En effet, jusqu'au début du XX^e siècle, les scientifiques ont entretenu l'idéal d'une « description exacte » de la nature. L'objectif était d'élaborer une théorie parfaite, absolue, qui permettrait de tout prévoir, comme une véritable représentation de la nature (modèle / déterminisme). Cet idéal était apparu au XVII^e siècle avec l'œuvre de Galilée et de Descartes, puis avec la mécanique de Newton. Enfin le travail de Maxwell avait vu l'apogée de la physique classique à la fin du XIX^e siècle.

La contribution de Myriam Scheidecker (*Cf. tome 1 sur l'histoire des sciences*) montre bien le débat entre physiciens et chimistes sur l'existence des atomes. Ce sont les faits expérimentaux qui ont amené au concept d'atome, avec les données quantitatives obtenues à partir des réactions chimiques puis avec l'étude de la théorie cinétique des gaz. Des modèles atomiques « classiques » ont alors été proposés, comme le modèle de Rutherford, mais ils n'étaient pas globalement satisfaisants ; en effet, la physique classique est incapable d'expliquer l'existence et la stabilité de l'atome et donc de la matière. C'est ainsi qu'est née la physique quantique dans les années 1920-1930. Elle a donné naissance à des applications insoupçonnées dans des domaines très variés, débouchant sur des techniques instrumentales, qui utilisent le laser ou la résonance magnétique (IRM en médecine) ; elle a aussi ouvert des voies nouvelles, comme l'informatique et elle a apporté des interprétations à certains phénomènes cosmiques (naines blanches ou étoiles à neutron par exemple). Si la physique quantique peut heurter le « sens commun », elle se montre cependant partout en accord avec les résultats expérimentaux : toutes ses prédictions sont vérifiées et elle permet aujourd'hui encore d'en proposer de nouvelles.

L'expérience est donc bien la référence à laquelle doit être confrontée toute théorie qu'elle pourra ainsi légitimer.

L'expérience peut aussi être spectaculaire, créant surprise et enthousiasme.

L'abbé Henri Grégoire concevait en ces termes la mission du « *Conservatoire pour les arts et métiers* » qu'il avait fondé à l'automne 1794 :

« Là se réuniront tous les outils et machines nouvellement inventés ou perfectionnés. Là rien de systématique : l'expérience seule, en parlant aux yeux, aura droit d'obtenir l'assentiment. »

Jean Perrin, Prix Nobel de physique en 1926, sera l'illustre continuateur de cette œuvre de vulgarisation en créant le *Palais de la découverte*. Dans le compte rendu de l'exposition temporaire de 1937, alors qu'il est sous-secrétaire d'État à la recherche scientifique, il explicite ainsi les objectifs du Palais :

« Nous avons d'abord voulu familiariser nos visiteurs avec les recherches fondamentales par où s'est créée la science, en répétant journallement les grandes expériences auxquelles ont abouti ces recherches, sans abaisser le niveau, mais pourtant de façon accessible à un très grand nombre d'esprits. Et nous avons voulu par là répandre dans le public le goût de la culture scientifique, en même temps que les qualités de précision, de probité critique et de liberté de jugement que développe cette culture et qui sont utiles et précieuses à tout homme, quelle que soit sa carrière. »

Ainsi, Jean Perrin met-il, dès 1937, l'accent d'une part sur l'importance de la culture scientifique, partie intégrale de notre culture au même titre que la connaissance des arts et des lettres, d'autre part sur le rôle de l'expérience, indispensable pour se familiariser avec les objets (outils, machines) et les phénomènes physiques et biologiques. C'est dans cette pratique expérimentale que va se développer la nécessaire rigueur et le sens critique qui sont les éléments fondateurs de toute démarche scientifique.

Aujourd'hui, la désaffection des étudiants pour les études supérieures scientifiques devient un phénomène de société préoccupant qui mobilise toute notre communauté scientifique. En quelques années, alors que les débouchés restent nombreux et attractifs, les disciplines scientifiques universitaires ont vu leur effectif de nouveaux bacheliers diminuer de façon drastique : en 2000, ils étaient 24% de moins qu'en 1995 à s'y inscrire, la baisse atteignant 44% en physique. Cette désaffection qui touche la plupart des pays occidentaux exige un véritable état des lieux et une réflexion globale et approfondie.

La place occupée par les activités expérimentales dans l'enseignement scientifique français est importante et leur rôle régulièrement réaffirmé dans les programmes de physique-chimie, sciences de la vie et de la Terre et sciences de l'ingénieur. Cette reconnaissance va de pair avec deux types d'enjeux.

- D'une part, des enjeux politiques : au collège puis au lycée en classe de seconde et en séries non scientifiques, l'enseignement des sciences doit éclairer les élèves qui ne se destinent pas aux sciences sur la nature des démarches scientifiques. Celles-ci sont en particulier à l'œuvre dans les activités expérimentales où la confrontation avec le réel est partie prenante de la construction de la connaissance scientifique. Mais cet enseignement « pour tous » se doit aussi de susciter parmi les élèves un vivier suffisant de projets personnels centrés sur les sciences pour faire face aux besoins de la nation en la matière. Pour les élèves qui développeront un projet scientifique, l'enseignement des sciences est le début d'une formation dont la composante expérimentale est importante.

- D'autre part, des enjeux didactiques : comment analyser l'image de l'activité scientifique véhiculée à travers les activités expérimentales ? Quels objectifs l'enseignant assigne-t-il, implicitement ou explicitement, à ces activités ? Quels types d'activités propose-t-il ? Les travaux pratiques ont-ils pour objectif la réhabilitation du rapport au réel, la familiarisation avec un phénomène ou l'expérimentation ? Que montre donc une expérience ? Les activités expérimentales améliorent-elles la compréhension des concepts, la compréhension de ce qu'est une science expérimentale ? À trop induire des lois à partir de l'expérience, ne risque-t-on pas le contresens sur la nature même de l'activité du physicien ? Quelles compétences développe-t-on par la pratique des activités expérimentales ? Comment mener un apprentissage de la démarche scientifique ? Travaille-t-on suffisamment autour de l'exploitation des mesures ? Ne serait-il pas bon de se confronter aux pannes ? De réfléchir davantage aux incertitudes ? Comment gérer la progressivité des apprentissages, des gestes et des techniques au fil de la formation ?

Autant de questions sous-jacentes aux objectifs de l'université d'été : il s'agissait de réunir les conditions d'une réflexion commune sur la place et le rôle de l'expérience dans l'acquisition des connaissances scientifiques et des savoir-faire associés, du collège à l'enseignement supérieur. Ouverte à un large public (collège, lycée, classes préparatoires aux grandes écoles et université), cette université d'été résolument pluridisciplinaire a rassemblé, du 9 au 13 juillet 2001 à l'Ens de Cachan, des enseignants de biologie, physique-chimie et de sciences de l'ingénieur, ainsi que des personnels de laboratoire largement impliqués dans la mise en place des activités expérimentales.

Pour couvrir tout le champ du « rôle de l'expérience », le programme a été conçu autour de quelques axes thématiques qui sont représentés, pour l'essentiel, dans ce document :

Les aspects historiques ont été abordés car les formes et les fonctions de l'expérience dans la diffusion des sciences du XVIII^e au XX^e siècle ont évolué. Cette période a été traversée par de grands débats : relation expérience/théorie, méthode inductive/déductive, formation culturelle/utilitaire et professionnelle. Le XVIII^e siècle a été marqué par l'expérience-spectacle et la fin du XIX^e siècle par la science populaire, avec l'instauration de l'expérience pour tous les élèves au début du XX^e siècle. Pierre Lauginie présente une forme d'enseignement née du couplage entre l'enseignement expérimental et l'histoire des sciences. Cette ouverture sur l'histoire n'est pas le fait du hasard ; on sait combien l'élaboration des principes de la mécanique a été liée à l'histoire des idées. Un enseignement optionnel de mécanique expérimentale de type « pédagogie active » a été proposé à des étudiants de Deug-Sm puis en formation continue des maîtres.

Les aspects didactiques et pédagogiques ont été largement abordés à travers des conférences mais surtout lors des travaux en atelier. René Moreau a traité de l'expérience de cours qui permet à l'enseignant de donner une première approche, en général qualitative, du phénomène qu'il se propose d'étudier. Tout en identifiant les paramètres pertinents, le professeur prépare ses élèves aux développements ultérieurs du cours et aux activités expérimentales qu'ils auront à réaliser en Tp ou en TPE éventuellement pour certains d'entre eux. Claudine Larcher s'est intéressée à l'expérience durant les travaux pratiques qui constituent le cadre privilégié de l'apprentissage au travail expérimental : pendant ces séances, le lycéen ou l'étudiant va devoir articuler les différents savoirs acquis (conceptuels, mathématiques, techniques, méthodologiques...), tout en se familiarisant avec les objets et les phénomènes étudiés. Il apprend à observer, à faire des mesures. Dans certains cas, il est amené à se demander « pourquoi ça ne marche pas ? »

Les aspects liés aux formations professionnelles ont été évoqués à travers la question suivante : « *L'expérience dans l'enseignement est-elle inutile ou nécessaire pour la recherche et le développement ?* ». Claude Fermon répond à cette question à partir de l'expérience qu'il a acquise en tant que chercheur au Cea où les expériences deviennent de plus en plus lourdes et chères, nécessitant souvent plusieurs techniques simultanées. La simulation et la modélisation prennent une place importante aussi bien au niveau de la conception de l'expérience que pour l'exploitation des données.

Les aspects liés à la mesure et à la métrologie ont été approfondis dans le cadre de la conduite de l'expérience et de sa maîtrise. À quoi sert une mesure ? Un métrologue pourrait formuler la réponse suivante :

« Mesurer, c'est comparer la grandeur physique inconnue à une grandeur de même nature prise pour référence à l'aide d'un instrument, et exprimer le résultat de la comparaison par une valeur numérique, associée à une unité qui rappelle la nature de la référence, et accompagnée d'une incertitude qui traduit à la fois les caractéristiques de la comparaison réalisée et la connaissance que l'on a de la référence ou des conditions d'étalonnage de l'instrument. »

À cette définition, nous pourrions ajouter qu'aucun travail expérimental ne se conçoit sans des mesures précises en laboratoire de recherche et en classe. Le traitement raisonné des mesures des élèves permet au professeur de donner plus de sens à son cours, à travers l'interprétation des résultats, bref de motiver davantage les élèves. C'est ce que montre René Moreau dans sa contribution centrée sur la mesure et l'évaluation des incertitudes. Marc Himbert s'est attaché à préciser la portée des mesures et le système de références et de traçabilité qui a été établi à l'échelle internationale pour garantir la confiance dans les résultats expérimentaux.

Cependant, l'essentiel de la réflexion collective a été mené dans le cadre des ateliers dont les principaux thèmes ont visé à interroger les nouvelles modalités d'enseignement et d'évaluation au regard de la place et du rôle de l'expérience dans l'enseignement des sciences. Le travail en atelier a fait ressortir plusieurs types d'observations et d'interrogations exposées ici de manière synthétique mais qui sont proposées de façon détaillée dans la cinquième partie de cet ouvrage :

à propos des objectifs des travaux pratiques

Les fonctions des travaux pratiques (au niveau de la classe : fonctions de scientificité, d'authenticité, éducatives, pédagogiques) sont distinctes des missions des travaux pratiques (au niveau du curriculum : combler un déficit de familiarisation pratique aux objets et phénomènes, développer un rapport expérimental au monde, favoriser des orientations professionnelles positives).

à propos des travaux personnels encadrés

Il est clairement montré que la mise en œuvre d'expériences en TPE entre bien dans le champ pluridisciplinaire de cette nouvelle forme d'enseignement et combien cette expérimentation est motivante pour les élèves. Des exemples d'application sont proposés en sciences de la vie et de la Terre et en sciences de l'ingénieur.

à propos de l'évaluation de la pratique expérimentale au baccalauréat

Les modalités mises en œuvre pour évaluer cette pratique sont comparées dans les différents domaines disciplinaires : en sciences de l'ingénieur, en physique-chimie et en sciences de la vie et de la Terre ; les compétences évaluées dans chaque discipline sont analysées. Mais l'intérêt de cette évaluation ne doit pas être masqué par les difficultés bien réelles qu'elle soulève.

à propos des autres actions de culture scientifique

Deux actions sont présentées dans ce document : les ateliers scientifiques et les Olympiades nationales de la physique. La pratique en atelier scientifique et technique est conçue comme une rencontre avec la *Science* autour d'une thématique ou d'une problématique et non plus autour d'une discipline. Dans les Olympiades de la physique, les élèves sont impliqués dans un véritable travail de recherche scientifique où ils peuvent se laisser guider par leur intuition et leur bon sens.

Les contributions réunies dans ce document concernent essentiellement la pratique expérimentale dans les lycées et collèges et illustrent bien toutes les ressources et les motivations que les enseignants peuvent y trouver au sein de leur propre discipline ou dans le cadre de dispositifs pluridisciplinaires.

De la mécanique à l'histoire des sciences : expérimenter en histoire ?

Pierre Lauginie,

Maître de conférences, université Paris-Sud, Orsay

L'idée d'un couplage entre enseignement expérimental de la physique et histoire des sciences est née d'un enseignement optionnel de mécanique expérimentale de type « pédagogie active » qui a fonctionné en 2^{ème} année de DEUG-SM de 1992-1993 à 1999-2000, avec la collaboration de AF. Benhabib, aujourd'hui à l'université de Cergy, et de Vincent Ezratti, technicien d'enseignement. Après avoir décrit les grandes lignes de cette expérience pédagogique, nous aborderons dans une 2^{ème} partie le couplage avec l'histoire.

Les origines : « la Théorie au bout des Doigts »

L'idée était, qu'à partir du constat d'échec partiel du module classique de mécanique de 1^{ère} année, il pourrait être possible de reprendre les choses à zéro et de faire assimiler les concepts de base de la mécanique - particulièrement les deux principes de conservation dont tout découle : impulsion et moment cinétique - en plaçant d'emblée chaque étudiant au contact direct du phénomène. Un article de M-P. Silverman [1] paru en 1995 situe assez bien l'esprit de ce que nous avons essayé de faire : « *Science as it is taught should more closely resemble science as it is done by professional scientists* ». Donc ni empirisme, ni facilité, mais bénéfice du contact avec le réel pour élever à la fois le niveau théorique et le savoir que chacun d'entre nous porte au « bout de ses Doigts » :

- travail dans une sorte d'atelier, au milieu de diverses manips, par journées complètes, une fois par semaine pendant 7 à 8 semaines ; du temps est ménagé pour l'assimilation, l'erreur, la ténacité, la répétition ; ce n'est pas la course !
- relative liberté de choix et même d'invention : « bricolages inventifs », modestes mais réels ;
- manips conceptuellement très simples, mais de réalisation difficile : *oser la difficulté* ! La science n'est pas facile ! Apprentissage de l'attention, de la patience, du doigté et de ce qu'est le travail réel de l'expérimentateur ; souci de l'interprétation dès la phase d'observation ;
- transmission orale privilégiée : les exposés théoriques - interpréter, modéliser, comparer - s'insèrent au cœur de l'activité expérimentale : la physique est un tout ;
- absence de documents préétablis décrivant le travail à faire : mise à disposition de notices d'appareils (forcément imparfaites et en tous cas nécessitant des adaptations), d'articles historiques ou d'articles de périodiques scientifiques ;
- encadrement important nécessaire, difficile pour les enseignants mais indispensable au maintien de l'esprit « atelier » : plusieurs sujets ou manips « tournent » en même temps ;
- aspects historiques, *via* la reproduction d'expériences importantes (Cavendish par exemple) et la mise à disposition d'articles originaux ;
- contrôle des acquis effectué sur le travail effectivement produit : importance d'une rédaction de qualité et de l'exposé final ;
- l'erreur, parfois l'échec, considérés comme partie intégrante de la formation. Cela permet de proposer aux étudiants des choses difficiles. On peut échouer, et même cela arrive. C'est la vie, mais quelle surprise !

Les manips qui ont été proposées vont de la mesure de la constante universelle de gravitation (et corrélativement de la masse de la Terre et du Soleil) avec une balance de torsion « à la Cavendish », à l'étude de la précession de diverses roues gyroscopiques, entretenues ou non et à ses conséquences (précession des équinoxes, compas gyroscopique, navigation inertielle). L'étude complète du pendule (non simple, bien sûr) dévoile une richesse surprenante ; les mesures concernant la loi du frottement solide sont un exemple où le résultat n'était pas vraiment connu d'avance ; le yo-yo de Maxwell (chute en translation-rotation) a mis bien des pendules à l'heure sur la notion de vitesse instantanée car ici, il faut la mesurer ! Le pendule de Foucault « entretenu » (oui !), complété par une représentation sur plateau tournant, est l'occasion à la fois d'une étude fine du mouvement dans un référentiel non inertiel et d'une relance du débat plus de deux fois millénaire : « la Terre tourne ; qu'est-ce que ça veut dire ? » (Cf. *ci-après*). Un bon exemple de montage réalisé par des étudiants, visant à répondre expérimentalement à une vraie question, sera notamment présenté ici en atelier : la loi du frottement fluide aux vitesses de l'ordre du cm.s^{-1} est-elle linéaire ou quadratique en vitesse ?

Ni empirisme, ni facilité : il s'agit bien, dans cette approche de la science que nous baptisons « la Théorie au bout des Doigts », d'aboutir à une assimilation des principes de base et de leurs conséquences. Cette approche a rencontré un vif succès auprès des étudiants accueillis : changement complet de comportement de ces étudiants non sélectionnés au départ par rapport à l'attitude passive trop connue : après un bref temps d'adaptation, on a affaire à des êtres intéressés, intéressants, dynamiques, souvent persévérants et accrocheurs vis-à-vis de réelles difficultés qui ne leur sont pas mâchées, inventifs dans la réalisation de mini-projets, heureux au travail. Malgré d'évidentes modulations selon les individualités, il n'est pas d'étudiant qui n'ait appris et compris des éléments essentiels de cette discipline de base, et parfois même découvert à cette occasion le travail et le mode de connaissance scientifiques. Ceux que nous rencontrons par la suite en licence ou en maîtrise en gardent un souvenir extraordinaire. Certains « bricolages » ont laissé des souvenirs inoubliables : par exemple, réalisation (quantitative) d'une brachistochrone, focalisation du soleil au foyer d'un miroir à liquide tournant (mercure), simulation du pendule de Foucault à l'aide d'un plateau tournant (avec tracé et interprétation mathématique des trajectoires), étude du frottement fluide dans une colonne d'eau.

J'aimerais insister sur un dernier point : proposer aux étudiants des *choses difficiles*. Cette question suscite et mérite débat, et je connais à ce propos les réticences de nombre d'excellents collègues. Mesurer la constante de gravitation avec une balance de torsion de Cavendish est extrêmement délicat, mais personne n'a jamais regretté d'y avoir passé parfois plus d'une journée complète. Que l'on songe aux connaissances en découlant immédiatement : non seulement avoir « pesé » la Terre, mais du même coup en savoir plus sur son noyau interne, sur la masse du Soleil ou celle de Jupiter ! Ce faisant, la détermination effectivement réalisée du couple de frottement sur l'axe de précession d'un gyroscope est à la limite du possible. Je verse à ce sujet – celui des questions difficiles – le beau texte « Le cheval-moteur d'orgueil » de Didier Nordon, chroniqueur à « Pour la Science », en souhaitant l'instauration d'un débat [2].

Évolution : La rigidification des modalités d'enseignement a mis un terme provisoire à cette expérience pédagogique lors de la rentrée 2000 : une expérience de ce type, qui comporte une grande part d'improvisation, ne trouvait plus à s'insérer dans les « maquettes ». Réactivée en 2001/2002, quels en sont les prolongements ? Ils vont dans deux directions :

- d'une part, une partie des manips mises au point est passée dans le cursus général, « module expérimental » où les étudiants se voient proposer l'une de nos manips sur une journée unique. C'était aussi l'un des buts : tester des montages pouvant être proposés ultérieurement à tous. Inconvénients : une partie des acquis n'est pas proposée pour le moment (tout ce qui concerne le moment cinétique) ; on ne voit les étudiants qu'une fois, de sorte que l'assimilation progressive des concepts et l'approfondissement de la relation étudiant-enseignant que permettait le facteur temps

sont perdus. Signalons en revanche un utile prolongement sous la forme d'un stage de formation des moniteurs qui est proposé depuis plusieurs années dans le cadre du Cies ;

- d'autre part, un prolongement intéressant et prometteur s'est progressivement imposé en direction de l'histoire des sciences : plusieurs de nos manips débouchaient directement sur l'histoire et le parallèle historique prenait une place de plus en plus grande dans le commentaire.

C'est ce dernier point que nous développons maintenant.

Le couplage avec l'histoire des sciences

L'ouverture sur l'histoire, issue de « La Théorie au bout des Doigts », n'est pas le fait du hasard : on sait combien l'élaboration des principes de la mécanique a été intimement liée à l'histoire générale des idées.

Adoptant un point de vue pragmatique et nous appuyant sur l'existant, nous avons proposé d'introduire certaines de ces manips (puis de nouvelles) comme partie expérimentale dans le petit module optionnel d'histoire des sciences - le seul au DEUG de sciences de la matière - fonctionnant en 1^{ère} année sous la responsabilité de P. Brouzeng. L'initiative, très bien accueillie par les 30 étudiants inscrits en 1998-1999, a été prolongée ultérieurement à la formation continue des maîtres. Manifestement l'idée d'un couplage entre pratique expérimentale et histoire trouvait un écho.

Je citerai les trois exemples initiaux qui ont servi de support à notre proposition de couplage avec l'histoire :

- *l'expérience de Cavendish* (1798, mesure directe de la force d'attraction gravitationnelle entre deux objets) [3] reproduite sous forme miniaturisée mais sans tricherie : non seulement on atteint la constante gravitationnelle G , mais aussi d'un seul coup la masse et la densité moyenne de la Terre (1^{ère} information sur l'existence d'un noyau dense), celle du Soleil et même celle de Jupiter grâce à ses satellites, avec commentaire sur « l'arpentage » du système solaire ;

- *le pendule de Foucault* : réalisation d'un modèle élémentaire sur plateau tournant, observation des trajectoires « dans la semoule » et étude mathématique, observation et suivi sur des temps longs d'un vrai pendule de Foucault entretenu (qui disait que ça ne pouvait marcher ?). Toute l'histoire de la mécanique, de l'astronomie et des idées y passe : géocentrisme et héliocentrisme (inventé 1800 ans avant Copernic !), tous y sont, d'Aristarque à Copernic et Galilée, tandis que se repose, avec l'abandon relativement récent de l'espace absolu « métaphysique » de Newton (déjà contesté en son temps par Leibniz), la question du sens à donner aujourd'hui à cette phrase : « la Terre tourne ». Plus subtil qu'il n'y paraît !

- *la brachistochrone*, modélisation physique du premier problème posé et résolu théoriquement en termes de calcul des variations par les frères Bernoulli en 1697, formalisé ultérieurement par Euler et Lagrange : il s'agit de la courbe de temps minimum pour un objet glissant sans frottement d'un point A à un point B dans le champ de pesanteur. Les étudiants ont bricolé un montage comparatif et qui marche ! Celui-ci sera présenté en atelier.

L'idée générale est de faire reproduire, avec utilisation de composants actuels, des expériences historiques : l'intérêt est double car, ces expériences étant en général délicates, les étudiants y apprennent en même temps que la science est une activité qui requiert courage et persévérance. Le travail bien entendu débouche sur un commentaire historique et parfois un débat d'idées.

Notre démarche ne consiste pas à faire « manipuler pour manipuler », mais grâce au contact avec l'expérience, aider à replacer celle-ci dans son contexte historique et épistémologique, à en comprendre le sens, les difficultés et l'importance dans le mouvement des idées. Des contacts fructueux ont été pris avec des collègues de l'université d'Oldenbourg en Allemagne qui ont une bonne longueur d'avance dans ce type de démarche.

En 1999-2000, l'idée a été étendue aux stages « Expériences historiques de physique » de formation continue des professeurs de lycées et collèges des académies de Versailles et de Créteil. Ces formations de trois jours ont trouvé une forme équilibrée qui semble emporter l'adhésion des participants : une journée d'exposés et travail sur documents avec P. BROUZENG, une journée de travail expérimental avec moi-même, une journée à Paris au Musée des Arts et Métiers, incluant la visite des Réserves, avec B. JACOMI du Conservatoire.

En 1999-2000, trois manips supplémentaires sont venues compléter ce dispositif initial :

- une balance de torsion électrostatique « de Coulomb » ;
- l'expérience des miroirs tournants de Foucault pour la mesure de la vitesse de la lumière ;
- une mesure de l'équivalent mécanique de la calorie, actuellement en essai.

La *balance de Coulomb* (1785) est souvent considérée comme le pendant électrostatique de l'expérience de Cavendish, qu'elle a en fait précédé. Mais le contenu épistémologique en est complètement différent : Coulomb s'intéresse, en 1785, uniquement à la forme de la loi, qu'il pressent en inverse carré de la distance [5]. On sait quelles polémiques a suscitées le travail de Coulomb et nous en reparlerons plus loin. Pour Cavendish au contraire, la loi de gravitation en inverse carré est prouvée depuis Kepler et Newton - et avec une précision avec laquelle aucune expérience terrestre ne saurait rivaliser - par le mouvement des planètes ; s'il pose, avec une remarquable intuition, la question de son éventuelle modification aux « courtes distances », environ 20 cm dans son cas, il conclut : « *There is no reason, however, to think that any irregularity of this kind takes place, until the bodies come within the action of what is called the attraction of cohesion, and which seems to extend only to very minute distances* » ; il s'agit pour Cavendish, non d'établir la forme d'une loi, mais de mesurer la constante de force. Quant à l'expérience du miroir tournant de Foucault, elle est le couronnement des expériences de mesure directe de la vitesse de la lumière : pour la première fois, la mesure se fait sur une table alors que la base précédemment utilisée était de l'ordre de 8 km. On notera que la mesure de la vitesse de la lumière est aussi finalement une mesure de la constante de force de la loi de Coulomb, un remarquable raccourci historique !

Quelques mots encore du contexte expérimental. Nous ne sommes pas des chercheurs spécialisés dans la réplification d'expériences historiques, comme le sont nos collègues de l'université d'Oldenbourg en Allemagne : ceux-ci cherchent à construire des répliques *exactes* d'expériences anciennes, avec matériaux et procédures d'époque ; ce faisant, ils occupent un créneau spécifique dans l'histoire des sciences : en effet, les mémoires anciens relatent souvent essentiellement « ce qui a marché », sélectionnant parfois les résultats considérés comme les plus significatifs, et laissant sous silence tout ce que l'on trouvera plus tard dans les meilleurs « cahiers de labos », les difficultés, les insuccès, et surtout l'acquisition d'un savoir-faire d'importance cruciale qui requiert un important facteur temps. Ainsi, la réplification apporte un « plus » à l'histoire, traditionnellement fondée sur l'étude des seuls documents : observer notre collègue Christine Blondel, historienne de la physique, en train de réussir - non sans difficulté ni luxe de précautions, mais réussir - à mettre en évidence la loi en inverse carré des interactions électrostatiques à l'aide de la réplique de la balance de torsion de Coulomb construite par Peter Heering à Oldenbourg [6], voir cela est d'une part particulièrement émouvant, et d'autre part contribue à prendre la mesure de la confiance que l'on peut accorder aux travaux de Coulomb (ne nous faisons pas d'illusions : c'est sportif !). Cela apporte beaucoup au débat - qui fut violent, et pas encore totalement épuisé - sur la valeur des travaux de Coulomb.

Dans notre cas, au contraire, nous avons à être immédiatement opérationnels envers nos étudiants et stagiaires : la *réplication*, au sens exact de ce terme est donc exclue. Ainsi, à part la *brachistochrone*

- un montage d'étudiants avec les moyens du bord - notre approche consiste à acheter dans la mesure du possible des expériences et montages proposés par des firmes spécialisées. Notre strict et essentiel critère est la *transparence* conceptuelle du montage vis-à-vis de l'original, moyennant quoi une certaine miniaturisation et l'utilisation de matériaux modernes peuvent être acceptés. Par exemple, dans l'expérience de Cavendish, à part une importante miniaturisation et l'utilisation d'une méthode de Poggendorf avec rayon laser pour détecter la déviation du fléau, l'essentiel du montage reste tel que le décrit Cavendish. De plus l'étudiant peut, et doit, à tout moment comparer ses résultats à la publication originale qui lui est fournie¹. Dans le cas de la mesure de la vitesse de la lumière, la rotation du miroir est assurée par un petit moteur électrique avec affichage de la vitesse de rotation, au lieu du magnifique soufflet d'orgue - un mannequin - construit spécialement pour Foucault par Cavaillé-Coll pour alimenter une tuyère à régulateur mécanique avec détection de fréquence par diapason ! Toutefois, les étudiants peuvent comparer à l'original, exposé au Musée des Arts et Métiers, le principe de l'expérience est scrupuleusement respecté. Dans la balance de torsion électrostatique « à la Coulomb », les charges sont fournies par une source à haute tension, mais le déroulement de l'expérience est similaire, à ceci près qu'il est facilité par la possibilité de recharger les sphères métallisées toujours à l'identique, et à une valeur très supérieure à l'original. Bien entendu, le mémoire original de 1785 est fourni. Nous sommes fascinés par l'expérience de Joule (équivalent mécanique de la calorie), mais le contact – épique ! - que nous avons eu avec la réplique à Oldenbourg nous a vite amenés à renoncer jusqu'à nouvel ordre à un transfert de la même méthode au niveau de l'enseignement.

Nous nous contenterons dans ce cas d'une étude de l'article original, et d'un petit appareil - le seul sur le marché et en fait très éloigné des concepts originaux - qui sera présenté uniquement à titre de comparaison.

Ainsi, notre approche se situe à un niveau intermédiaire entre celle de nos collègues d'Oldenbourg, qui relève de la recherche, et celle de l'enseignement académique traditionnel. Nous pensons que cette approche pragmatique peut enrichir un cursus scientifique à travers une meilleure compréhension des conditions réelles de mise en œuvre des expériences cruciales de l'histoire de la discipline.

Nous aimerions maintenant illustrer notre démarche par la discussion plus détaillée de deux exemples :

- comparer les balances de torsion de Coulomb et de Cavendish (1785 et 1798 respectivement) aux modèles didactiques actuels ;
- signaler quelques difficultés techniques de l'expérience du pendule de Foucault, mais surtout en discuter la signification *aujourd'hui* au regard du « Grand Débat ».

Cavendish et Coulomb - Les réalisations des balances de torsion de Cavendish et de Coulomb ont curieusement suivi des évolutions inverses au cours des âges. Si l'on compare les montages originaux aux réalisations didactiques de la fin du XX^e siècle, on remarque que :

- l'expérience de Cavendish s'est considérablement allégée et miniaturisée, le fil de torsion devenant 10 000 fois plus souple que l'original ;
- l'expérience de Coulomb, au contraire, s'est légèrement « agrandie » en taille et distance des sphères, mais surtout elle a gagné considérablement en robustesse, le fil de torsion devenant 1000 fois plus rigide que l'original, et réduisant d'autant la sensibilité.

¹ Il existe une version automatisée de l'expérience de Cavendish, que nous ne retenons pas : sans fonctionner mieux, elle laisse l'étudiant totalement passif, ce qui est contraire à l'esprit décrit plus haut.

Dans une expérience de Cavendish, sachant que la force d'attraction entre des sphères identiques supposées au quasi-contact varie comme la puissance quatrième de leur rayon, on pourrait, en s'en tenant à cette seule remarque, laisser croire que l'on n'aurait aucun intérêt à miniaturiser le montage : or c'est le contraire qui est vrai ! En effet, en miniaturisant les sphères, on obtient un équipement beaucoup plus léger, ce qui permet d'utiliser un fil de torsion (qui, ne l'oublions pas, supporte tout le poids du fléau) beaucoup plus fin et donc un système beaucoup plus sensible ! Savoir si au total on est gagnant n'a rien d'une évidence mais c'est vrai !

Boys [4], à la fin du XIX^e siècle a magistralement démontré l'intérêt d'une miniaturisation, en insistant de plus sur la diminution cruciale des effets perturbateurs dus aux courants de convection dans l'air grâce à l'utilisation d'un cabinet de petite taille. Alors que les dimensions de l'expérience de Cavendish étaient de l'ordre de deux mètres, avec des masses grandes et petites de l'ordre de 170 kg et 0,8 kg respectivement, les dimensions de l'expérience proposée actuellement aux étudiants, à Orsay et dans d'autres universités, sont réduites d'un ordre de grandeur (facteur 20 sur le fil et le fléau), les masses sont plus petites de deux ordres de grandeur (1,5 kg et 15 g respectivement), et néanmoins les déviations que l'on observe (25 à 30') sont de l'ordre de celles obtenues par Cavendish avec le fil le plus souple et presque 10 fois supérieure à celles qu'il obtenait avec le fil le moins souple (en fait la majorité de ses mesures), et bien que la force d'interaction actuelle soit 250 fois plus petite que dans le montage original.

Dans l'expérience originale de Coulomb, contrairement à celle de Cavendish, le fil de torsion extrêmement souple soutient un fléau ultra-léger de longueur environ 20 cm, les sphères sont des boules de sureau de 5 à 6 mm de diamètre ; l'extrême sensibilité du montage exige des précautions draconiennes le rendant très difficile à utiliser - à la limite du possible - et peu compatible avec une utilisation didactique. En revanche, la réalisation moderne, tout en conservant à peu près le même encombrement, utilise, nous l'avons vu, un fil 10 000 fois plus rigide, diminuant d'autant la sensibilité. On gagne sur la taille des sphères métallisées (diamètre 38 mm), ce qui augmente d'autant leur capacité, et surtout sur la tension de charge utilisée – 6000 V – environ 10 fois celle que Coulomb pouvait obtenir à partir de ses peaux de chats (estimée par calcul inverse, à partir du mémoire de 1785). Au total, pour une même distance d'environ 5 cm (la plus grande pour Coulomb et la plus petite pour nous), la force d'interaction est 4000 fois plus grande dans la réalisation moderne, et les déviations observées sont du même ordre que dans l'original (des dizaines de degrés) malgré une sensibilité considérablement réduite.

Relativement à leur poids, les forces subies par les boules d'épreuve dans la version originale et dans la version moderne de l'expérience de Cavendish sont, en gros, du même ordre de grandeur : un cinquante millionième et un deux-cent millionième de leur poids respectivement ; de ce point de vue, les deux montages sont très similaires, et cela est en faveur de notre critère de « transparence ». La situation est différente pour l'expérience de Coulomb : la force relative d'interaction entre sphères y est de un à deux ordres de grandeur plus importante dans le montage moderne que dans l'original (de l'ordre de quelques 10^{-2} , et de 10^{-3} respectivement).

Une question importante, rarement évoquée, est celle de *la conductivité des sphères utilisées dans l'expérience de Coulomb* : dans la *version moderne*, les sphères sont métallisées, ce qui assure une répartition superficielle homogène des charges, quasi-instantanément, et autorise leur assimilation à des charges ponctuelles placées en leur centre ; en revanche, une correction devenant considérable aux courtes distances doit être effectuée à cause de la polarisation induite par leur influence mutuelle (nécessaire pratiquement en-dessous de cinq fois le rayon, soit en-dessous de 10 cm, elle atteint 30 % vers 5 cm). On peut donc, au regard de ces deux points importants, légitimement se poser la question de *ce qu'il en était dans l'expérience originale* : que peut-on dire de la conductivité des balles de moelle de sureau utilisées par Coulomb ? Ici, la réplique conforme réalisée à l'université d'Oldenbourg par Peter Heering [6] apporte un élément d'appréciation important : les deux balles étant initialement en contact, on apporte des charges sur l'une d'elles : les balles restent « collées » l'une sur l'autre pendant un temps qui paraît long ! Alors seulement, *c'est-à-dire lorsque les charges ont eu le*

temps de passer d'une balle sur l'autre, les deux balles se repoussent brusquement. Cela montre que la moelle de sureau utilisée est un très mauvais conducteur, mais probablement suffisant cependant pour assurer une répartition assez uniforme des charges pour des temps d'expérience qui sont de l'ordre de la minute. On peut aussi se demander quel est le rôle éventuel de l'eau adsorbée en surface pour favoriser ce transfert et cette répartition (P. Heering a observé qu'avec la moelle de sureau, l'expérience requiert un certain taux d'humidité pour bien marcher). En revanche, Coulomb ne parle évidemment pas de la correction due à la polarisation mutuelle induite : ses balles étant beaucoup plus petites que dans la version moderne, la distance des centres ne descend pas en-dessous de cinq fois le rayon dans chacun des essais rapportés dans le mémoire de 1785, et la correction est pratiquement inutile. Coulomb a donc évité cette difficulté supplémentaire. Chance ou habileté ?

On observe encore *d'intéressantes coïncidences croisées d'ordre de grandeur entre les expériences de Cavendish et de Coulomb*, anciennes et modernes :

- *la force d'interaction* mesurée par Coulomb (pour une distance entre centres de deux pouces environ) et celle mesurée par Cavendish (à 10 pouces) sont du même ordre de grandeur, soit l'équivalent de poids de $15\ \mu g$ et $18\ \mu g$ respectivement. On peut penser qu'il s'agissait là, pour l'époque, de limites raisonnables d'utilisation de la balance de torsion mais il faut souligner qu'il s'agissait dans le cas de Cavendish d'un dispositif extrêmement imposant et massif, alors que dans le cas de Coulomb, le dispositif était au contraire ultra-sensible et léger. Qu'un dispositif énorme soit nécessaire pour obtenir avec la gravitation des forces du même ordre de grandeur que celles obtenues par Coulomb en électrostatique est évidemment dans l'ordre des choses ;

- *la souplesse du fil de torsion* de l'expérience *moderne de Cavendish* est comparable à celle de l'expérience *originale de Coulomb* : ce dernier avait un dispositif de sensibilité comparable à ce que l'on sait faire aujourd'hui de « très bien », tout en restant dans des limites raisonnables de difficulté. De même, les fils employés dans la version *originale de Cavendish* et dans la version *moderne de Coulomb* sont comparables, c'est-à-dire des milliers de fois plus rigides que les précédents ;

- *les périodes d'oscillation* dans la version originale et dans la version moderne de l'expérience de Cavendish sont du même ordre : $15\ mn$ et $7\ mn$ pour l'original (pour les deux types de fils utilisés), et $10\ mn$ actuellement. Cette comparaison des périodes est importante car, conformément à la remarque de Cavendish lui-même, on n'attend en général jamais l'arrêt complet du fléau - deux heures ou plus - pour détecter la position d'équilibre, trop de perturbations parasites pouvant survenir entre temps : on détermine cette position par le relevé de deux ou trois oscillations (amorties) complètes. En ce sens, les versions originale et moderne de cette expérience sont à nouveau très comparables. Il est à noter également que Cavendish, comme d'ailleurs Coulomb dans ses dernières mesures, se rangera finalement à l'utilisation du fil le moins sensible pour la majorité de ses mesures, préférant perdre sur la déviation observée, plutôt que d'être soumis aux caprices d'un montage trop sensible : l'un comme l'autre ont fait « trop sensible » au départ ! Quant aux périodes d'oscillation dans l'expérience de Coulomb, elles ne jouent pas le même rôle car on n'a pas besoin de la constante de torsion du fil pour des mesures relatives, et il faut aller vite à cause de la décharge dans l'atmosphère ; les périodes sont donc dans les deux versions de l'ordre de quelques secondes et, comme la position d'équilibre doit pouvoir être relevée rapidement, un amortissement important est nécessaire. Celui-ci est aérodynamique dans l'expérience originale, grâce à un contrepoids en carton en forme d'empennage vertical placé à l'arrière du fléau, tandis qu'un amortissement critique par courants de Foucault est obtenu dans la version moderne, grâce à un secteur-contrepois horizontal en aluminium passant dans l'entrefer d'un aimant.

- *les déviations angulaires* comparées, originales et modernes, sont du même ordre, aussi bien dans le cas de Cavendish (jusqu'à 30') que Coulomb (dizaines de degrés) ;

- dans le cas de l'original de Coulomb, *les sphères ne sont chargées qu'une seule fois* pour chaque série de distances d'approche différentes, ce qui oblige à opérer très vite et qui n'est pas facile ! En effet, on ne serait pas capable de répéter à l'aide d'une peau de chat la même tension de charge. Dans la version moderne, l'utilisation d'une source de tension stabilisée permet au contraire de recharger les sphères à la même tension chaque fois que la distance d'approche est modifiée ; le fil de torsion est de plus fixé en haut et en bas, contrairement à l'original. Ces détails en facilitent grandement le maniement !

On notera finalement que, bien que l'expérience de Cavendish moderne ait subi une miniaturisation considérable par rapport à l'original, contrairement à celle de Coulomb, elle reste conceptuellement plus proche de l'original que cette dernière. Bien entendu, ces différences par rapport à l'original sont l'objet d'un commentaire attentif lors de chaque utilisation.

Le pendule de Foucault et le « Grand Débat »

Des détails techniques concernant le fonctionnement d'un « petit » pendule de Foucault, entretenu ou non, seront donnés lors de l'exposé oral et/ou lors de l'atelier. Il s'agit principalement des questions liées à « l'anharmonicité » des oscillations et aux perturbations locales : ces dernières engendrant une ovalisation, même très faible, du mouvement ; il s'ensuit une précession parasite, due à l'inégalité des périodes longitudinale et transversale, et qui peut être aussi importante que le mouvement de la Terre ! Des systèmes d'anneaux de garde et/ou de linéarisation permettent d'y remédier en partie.

Mais nous aimerions ici au contraire nous intéresser à une question de fond : *quelle est aujourd'hui la signification d'une telle expérience ?* Il est courant, encore aujourd'hui, de considérer l'expérience du pendule comme une preuve « définitive » de la rotation diurne de la Terre, par opposition aux tenants de la fixité de celle-ci. Ainsi l'expérience de 1851 fut-elle, bien évidemment, rapportée dans la presse de l'époque. L'expérience de Foucault s'insère ainsi dans le « Grand Débat » - géocentrisme - héliocentrisme et finalement a-centrisme - qui, d'Aristarque, de Samos à Poincaré et Einstein - traverse deux millénaires et demi d'histoire en passant par Ptolémée, Copernic, Galilée, Képler, Newton et même Leibniz ! Les choses deviennent évidemment moins simples dès qu'on accepte le point de vue moderne (dont Leibniz avait eu l'intuition) qu'il n'existe pas de référentiel absolu, et donc que parler d'un mouvement absolu n'a aucun sens : le mouvement n'est que relatif. N'hésitons pas, alors, à donner du Pendule une interprétation volontairement non-conformiste et provocatrice, poussant à l'extrême une suggestion de J. Gapaillard [7] :

Soit un explorateur au pôle nord (la difficulté aux autres latitudes étant purement technique et se résolvant en tenant compte de la variation de la force de Coriolis avec la latitude). Levant les yeux au ciel, l'explorateur voit que le plan d'oscillation du pendule est rivé aux étoiles ; regardant au sol, il voit que ce même plan pivote d'un mouvement régulier autour de l'axe nord-sud en un jour (sidéral, pour être précis) : *donc, cela prouve que le Ciel tourne autour de la Terre en un jour !*

Cette conclusion est imparable. Or c'est le contraire que l'on dit habituellement « parce que l'on sait bien que c'est le Ciel qui est fixe, et donc le pendule prouve la rotation de la Terre ! ». À ce compte, on ne prouve rien du tout. Le raisonnement est le même que celui invoqué par le cardinal Bellarmine dans sa lettre au Père Foscarini - de fait s'adressant à Galilée - dans la parabole du bateau et du rivage : « *le voyageur sait bien que cela (l'éloignement progressif du rivage) n'est qu'une illusion et il est capable de rectifier* » ; le paradoxe est que Bellarmine utilise cette parabole en faveur d'une fixité du bateau - la

Terre - et d'une mobilité du rivage - le Ciel-paysage. S'en est-il rendu compte ? Ou serait-ce une ambiguïté volontaire ?

Bien entendu, le mouvement n'est que relatif, nous le savons aujourd'hui, mais Newton avait adopté une position opposée ². « Être fixe », « tourner », chacun de ces verbes n'a plus de sens en-soi. Indéniablement, le pendule de Foucault prouve un mouvement *relatif* de la Terre par rapport au Ciel, et inversement. Mais, pour en arriver-là, était-il besoin d'un instrument aussi sophistiqué (pas si facile à mettre en œuvre) qu'un pendule de Foucault ? Ne suffit-il pas de regarder en l'air, les jours ou les nuits de ciel pur ? Évidemment ! Poincaré lui-même s'est trouvé piégé par la presse rétrograde de son époque qui, retenant de la partie cinématique de sa discussion, dans « La Science et l'Hypothèse », son insistance justifiée sur le caractère relatif du mouvement, a voulu lui faire dire qu'il renvoyait Galilée et ses juges dos à dos [8, 9] !

Or on ne peut en rester là ! Alors, en quoi Aristarque de Samos, Copernic, Galilée ont-ils aujourd'hui raison ? Car il n'est pas question de leur donner tort ! Bien entendu, il faut dépasser le cadre de la cinématique et faire de la dynamique, il faut introduire forces, masses, accélérations, référentiels et lois de changement de référentiel. On observe alors que l'extrémité du pendule décrit une trajectoire compliquée relevant de trois forces (gravité, Coriolis, centrifuge) relativement à la Terre ³ alors qu'on a un mouvement harmonique rectiligne tout simple, pouvant être décrit par l'action de la seule gravité dans le référentiel copernicien, référentiel qui est aussi celui dans lequel le mouvement des planètes, répondant à la seule interaction de gravitation, devient très simple : la loi de l'inertie de Galilée-Newton y est valable. Là est le génie des illustres prédécesseurs de Newton, d'avoir pressenti cela même si, à leur époque, il leur était impossible de l'exprimer complètement.

Ce qu'apporte finalement le pendule de Foucault, ce n'est pas une preuve supplémentaire du mouvement relatif de la Terre et du Ciel l'un par rapport à l'autre, *preuve dont on n'a que faire, c'est une preuve que le référentiel terrestre n'est pas inertiel - ou galiléen - alors que le référentiel de Copernic en est un excellent*. Et bravo Galilée ! Mais le débat, nous le voyons, s'est déplacé de la question « qui est fixe, qui ne l'est pas ? » vers une question beaucoup plus profonde « dans quels référentiels la loi de l'inertie, celle de Galilée-Newton, est-elle valable ? ». Or ceci est une notion infiniment plus difficile à populariser et nous n'avons pas de recette toute faite, encore moins de leçon à donner ! Nous ne jetterons donc pas la pierre aux démonstrateurs qui, devant un pendule de Foucault, concluent simplement « voilà une preuve concrète que c'est la Terre qui tourne ». Nous restons persuadés cependant qu'il serait souhaitable de trouver le moyen d'aller au-delà de cette explication un peu courte, et c'est en tous cas immédiatement impératif devant un public averti : si un Bellarmine - une intelligence probablement plus redoutable qu'il n'a parfois été dit - venait à passer par là, il aurait tôt fait de renverser l'argument ! Il reste à souligner qu'apporter la preuve d'un mouvement, même seulement relatif, n'est pas rien et demeure propre à éveiller l'imaginaire poétique : c'est vrai qu'on « voit » la Terre tourner ! D'où l'intérêt des diverses réalisations de pendules de Foucault en milieu public ou scolaire ; il est toujours possible de dire : « même si la Terre était totalement couverte de nuages, vous auriez là une preuve que la Terre tourne *relativement à un ailleurs* que notre pendule a *choisi* de suivre ». Voilà bien de quoi exciter la curiosité scientifique ! Savoir de quelle mécanique relève cet « ailleurs » serait évidemment, en l'absence d'observations du ciel, une question beaucoup plus délicate ⁴ [8].

² Cette position formalisait une intuition conforme à sa métaphysique mais probablement très largement répandue chez les penseurs de sa génération ainsi que de la génération précédente (celle de Galilée). À la décharge de Newton, on pourrait remarquer qu'en l'absence d'observation, à l'époque, d'un mouvement relatif des étoiles les unes par rapport aux autres, le référentiel de Copernic pouvait constituer une référence d'espace absolu. Toutefois, il ne nous semble pas que l'axiome de l'espace absolu relève chez Newton d'une référence à une quelconque réalité observable.

³ On pourra étudier ce mouvement lors de l'atelier, à l'aide du plateau tournant et par simulation mathématique.

⁴ Des mécaniciens très savants et disposant d'instruments arbitrairement précis pourraient cependant, en principe, par l'observation soignée du mouvement d'une balle lancée à la surface de la Terre, en déduire qu'il existe un référentiel, en rotation diurne par rapport à la Terre, dans lequel le mouvement de cette balle s'effectue localement en ligne droite. La brisure de symétrie que constitue le mouvement des cyclones et des courants marins (respectivement en sens inverse les uns des autres, notons-le) pourrait les mettre sur la voie. On sait qu'un argument des héliocentristes de l'Antiquité était que, le

L'interprétation du mouvement du pendule de Foucault conduit donc à la discussion de cette véritable révolution, pas toujours totalement assimilée aujourd'hui, qu'a été la négation de l'espace et du mouvement absolus. C'est de cette absence de fait qu'ont implicitement bénéficié les accusateurs de Galilée, plaçant les défenseurs de ce dernier dans une situation, à l'époque, logiquement intenable : ils ne pouvaient « prouver » un mouvement absolu de la Terre, qui n'existe pas, et la notion de référentiel d'inertie n'était pas encore là pour les aider à dépasser les termes de la question. On peut même se demander, à lire entre les lignes la lettre de Bellarmin déjà citée, si la négation du mouvement absolu n'aurait pas, de façon peut-être fugace, effleuré son esprit (Cf. *la parabole du bateau et du rivage*, ci-avant). L'espace absolu n'a jamais eu en fait un statut épistémologique stable : n'oublions pas que Newton lui-même devra plus tard, devant les critiques pertinentes de Leibniz, reconnaître le caractère métaphysique de son postulat. Une difficulté psychologique encore d'actualité⁵ est l'assimilation de cette idée que « il n'y a pas de lieu et nous ne sommes nulle part, sauf *relativement* à nos voisins » ; savoir si la Terre est repassée deux fois au même lieu est une question vide de sens. Il semble que cette difficulté pourrait motiver des philosophes intéressés par le cadre psychologique de la pensée scientifique.

Conclusion

Partant de l'expérience de pédagogie active « La Théorie au bout des Doigts », nous en sommes arrivés, naturellement et presque sans le vouloir, à proposer d'introduire une partie expérimentale dans un enseignement d'histoire des sciences.

Très bien accueillie par les participants, cette initiative conduit à nombre de réflexions sur son intérêt et son avenir. Nous avons fait le choix de développer ci-dessus 2 exemples bien ciblés : l'un (la comparaison Cavendish-Coulomb) reste au plus près de la technique, et quelle technique ! L'autre (le pendule de Foucault) dépasse les réels et intéressants aspects techniques pour embrasser un débat qui a traversé l'histoire depuis qu'il y a histoire, le débat de la Terre, du Soleil et des Mondes, le Grand Débat ! Ayant ainsi « montré », nous laissons le lecteur maître d'apprécier, dans un cas comme dans l'autre, l'intérêt et la richesse de la démarche et l'invitons à toutes critiques et propositions.

De notre côté, et sans prétendre à l'exhaustivité, nous suggérerons quelques pistes :

- peut-on généraliser une pédagogie du type « La Théorie au bout des Doigts » pour enseigner les bases d'une discipline ? Ou seulement pour certains profils d'étudiants ? Faut-il créer des sections particulières et comment pourrait alors être conçu le contrôle des compétences ?

- « La Théorie au bout des Doigts » a, en son temps, permis le développement par « essais-erreurs » d'une mini-recherche pédagogique de terrain. Cet aspect des choses est aujourd'hui abandonné : une activité de ce type - un espace de liberté - ne devrait-elle pas au contraire être maintenue dans l'université, et sous quelle forme ? La continuité d'un travail de terrain avec un groupe donné d'étudiants n'est-elle pas un facteur essentiel, tant pour les étudiants concernés que pour le développement de la démarche ?

- le respect intellectuel vis-à-vis du public, quel qu'il soit, est un élément essentiel : amener celui-ci à prendre conscience des difficultés réelles plutôt que masquer celles-ci sous prétexte d'efficacité à court terme. La discussion détaillée sur le pendule de Foucault et le mouvement relatif est là pour illustrer cet esprit. D'expérience, nous estimons que nombre de retards éprouvés par les étudiants pour assimiler les principes de base proviennent de difficultés volontairement occultées

Soleil étant beaucoup plus gros que les autres astres (et plus encore que ce qu'ils croyaient), il devait fatalement être le centre du monde.

Cette remarque est assez profonde : imaginons - pure fiction - que deux ou plus des planètes du système solaire aient eu des masses de l'ordre de grandeur de celle du soleil, alors quelle difficulté supplémentaire pour « inventer » le référentiel de Copernic lié au centre de masse du système !

⁵ qui semble apparaître dans certains cours ou photocopiés.

« afin de ne pas leur embrouiller l'esprit avec des choses compliquées ». Tout le monde n'est pas d'accord : il y a là une ligne de clivage pédagogique qui traverse l'université, et donc sujet de discussion ;

- le couplage qui a été réalisé avec l'histoire est original : il se situe à un niveau intermédiaire entre l'enseignement académique classique et un travail fondamental de réplique d'expériences historiques. Au moment où il semble être question de faire entrer l'histoire des sciences dans le cursus général, la place et le rôle de l'expérience dans cet enseignement, suggérés par cet essai, nous semblent mériter débat ;

- cet essai expérience-histoire a fonctionné jusqu'à présent comme option de DEUG de 1^{ère} année. D'une part, nous verrions mieux sa place en 2^{ème} année afin que les étudiants disposent d'un meilleur bagage conceptuel pour aborder des questions pas toujours faciles. D'autre part, la diminution importante du nombre d'étudiants en sciences de la matière s'accommode de plus en plus mal d'une pluralité d'enseignements optionnels. Il nous paraît donc évident que cet essai de couplage expérience-histoire ne pourra trouver un plein développement qu'en quittant le cadre optionnel actuel pour s'intégrer dans le cursus général : on sait que l'incorporation dans les cursus d'éléments d'Épistémologie, et espérons-le, d'histoire de la discipline, est prévue dans un proche avenir. Des propositions ont donc été faites en ce sens dans notre université dans le cadre de la rénovation des DEUG.

Enfin nous aimerions faire ici une mise au point qui n'est peut-être pas inutile : on n'est pas devenu un historien des sciences même si, comme nous avons tenté de le faire, on apporte - en tant que physicien - une modeste pierre à l'édifice. Le travail de l'historien est spécifique et l'histoire des sciences est un métier. C'est bien pourquoi, ayant pressenti le possible intérêt d'aspects expérimentaux dans un enseignement d'histoire des sciences, nous avons tenu à nous rattacher à ce qui existait, à Orsay et à ce moment, comme enseignement spécifiquement historique. L'originalité de cet essai réside donc dans le couplage de compétences entre la pratique propre de l'historien et celle, expérimentale, de l'enseignant physicien. Dans cet esprit, et en prévision d'une intégration effective de l'histoire dans les cursus généraux, il nous paraît essentiel d'associer de vrais praticiens de l'histoire des sciences aux « amateurs » que nous demeurons au regard de l'histoire, nous enseignants des disciplines scientifiques, qui pouvons néanmoins apporter notre contribution. Nous avons connu le grand bénéfice d'un tel couplage inter-disciplinaire dans le cadre des mathématiques enseignées aux physiciens, mais ce n'est pas la situation la plus fréquemment rencontrée. Ce n'est pas une raison pour abandonner ce bénéfice !

Références bibliographiques

- [1] M.-P. Silverman, "A heretical experiment in teaching Physics", *Am. J. of Physics*, 63, 495 (1995).
- [2] D. Nordon, in *Pour la Science*, 208 (1995).
- [3] H. Cavendish, *Phil. Trans.*, 17, 469 (1798); version commentée in : *Great experiments in Physics*, chap. 6, Holt, Rinehart and Winston, N.Y. (1959), réédition coll. « Dover » (1990).
- [4] C.-V. Boys, *Phil. Trans.*, (1895).
- [5] C. Coulomb, *Mémoires de l'Académie des Sciences*, p. 569 (1785).
- [6] P. Heering, "The replication of the torsion balance experiment. The inverse square law and its refutation by early 19th-century German physicists" In : *Restaging Coulomb - Usages, controverses et répliques autour de la balance de torsion*, C. Blondel et M. Dörries (Ed.), Leo S. Olshki, Florence, 1994, 47-66.
- [7] J. Gapaillard, *Et pourtant elle tourne ! Le mouvement de la Terre*, Paris, Seuil (1993), chap. 12 et 15.
- [8] H. Poincaré, *La Science et l'Hypothèse*, Paris, coll. « Champs », Flammarion, chap. VII.
- [9] J. Mawhin, in : *Le Réalisme, Contrib. Sémin. Hist. Sci. et Techniques 1993-94*, Université catholique de Louvain, Réminiscences 2 (1996).

L'expérience de cours

René Moreau,

Inspecteur général de l'éducation nationale

Introduction

Le texte qui suit ne débutera pas par un exposé théorique sur ce que doivent être les expériences de cours, sur leur intérêt, la place qui doit leur être réservée, etc. Ces points seront certes abordés, mais en fin de parcours. Au lieu de cela, je préfère commencer mon exposé en vous relatant une séance de travaux pratiques à laquelle j'ai assisté, séance qui était organisée par un professeur dont je respecte la démarche et dont je salue le dévouement. Après avoir analysé cette séance, les contraintes qui la caractérisaient et les résultats auxquels elle a conduit, je vous dirai les raisons pour lesquelles, selon moi, il eût été préférable de la remplacer, au moins partiellement, par une expérience de cours à exploitation collective.

Analyse d'une séance de travaux pratiques

Présentation de la manipulation

Au début de l'année scolaire 2000-2001, dans une classe de 4^e, un courageux professeur essayait de faire découvrir à ses élèves la fameuse loi des courants dérivés : $i_p = i_{d1} + i_{d2}$, à l'aide du montage ci-dessous (*fig.1*), qu'ils devaient réaliser. C'était la première fois que les élèves montaient deux dipôles en dérivation. Ils savaient seulement, depuis la séance précédente, que, dans une branche d'un circuit, la valeur du courant est unique ou encore indépendante du point considéré. Il s'agissait d'une classe relativement homogène, sans élève caractériel, apparemment constituée d'adolescents de niveau socioculturel modeste.

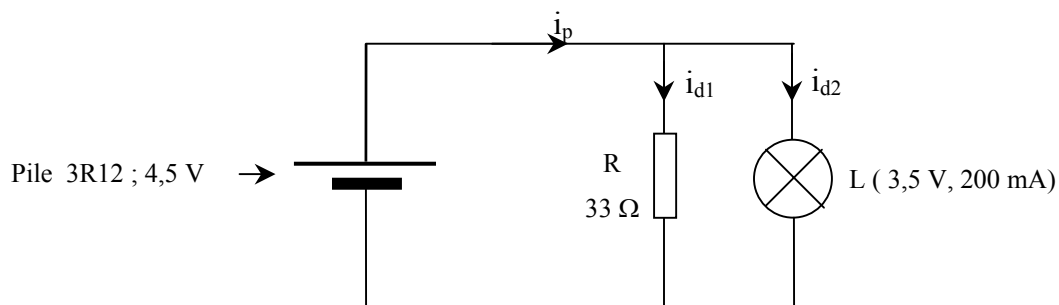


Figure 1

Le but du TP

Les élèves devaient insérer l'ampèremètre dont ils disposaient (il s'agissait en réalité d'un multimètre possédant de nombreux calibres, et en particulier un calibre 2A et un calibre 200 mA) dans le circuit

principal (mesure de i_p) puis dans chacune des branches R et L (mesure de i_{d1} puis de i_{d2}). De ces trois mesures, le professeur attendait que chaque groupe de deux élèves (exceptionnellement trois) découvre la relation liant i_p , i_{d1} et i_{d2} .

Les enjeux scientifiques de la manipulation

Ils ne furent pas formulés par le professeur, mais ils étaient très clairs :

- acquérir une certaine dextérité dans la réalisation de montages électriques, puisque la manipulation se déroulait directement sur table, sans platine support, avec seulement quelques cordons électriques et des “pinces crocodiles” ;

- découvrir la loi des courants dérivés : le protocole de la manipulation, remis par le professeur à chaque élève, prévoyait en effet, que les groupes les plus rapides pourraient, après avoir traité le cas de deux branches en dérivation, s'attaquer au cas où les circuits dérivés seraient au nombre de trois et essayer de trouver dans ce cas la relation entre i_p , i_{d1} , i_{d2} et i_{d3} . Aucun groupe n'ayant dépassé le premier stade (mesure de i_p , i_{d1} et i_{d2} et relation entre ces trois intensités), nous nous restreindrons ici à la loi des courants dérivés $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ correspondant au cas de deux branches en dérivation.

Remarquons tout d'abord qu'au début de la manipulation, aucun des 25 élèves de la classe n'avait une idée de ce que pouvait être cette relation. A la fin de celle-ci, un seul groupe, sur 12, ayant, par le plus grand des hasards trouvé $i_{d1} = 80$ mA, $i_{d2} = 180$ mA et $i_p = 260$ mA, c'est-à-dire trois nombres assez faciles à lire, a effectivement proposé la relation $i_p = i_{d1} + i_{d2}$. Les autres groupes, devant des triplets tels que ($i_{d1} = 85$ mA, $i_{d2} = 171$ mA et $i_p = 250$ mA) restaient coi.

Les contraintes matérielles de la manipulation

Remarquons encore que cette manipulation comportait, parmi d'autres causes de variabilité inhérentes aux manipulations d'élèves de quatrième en électricité (erreurs aléatoires dues aux multimètres, erreurs aléatoires dues à la qualité des contacts, réalisés à l'aide de “pinces crocodiles”, fluctuations aléatoires dues à la disparité des deux composants passifs utilisés dans chaque montage, résistances et lampes), une cause d'erreur aléatoire et une cause d'erreur systématique spécifiques :

- les piles étaient déjà fortement usagées et présentaient de ce fait une grande disparité ; les montages et démontages du circuit pouvaient avoir pour conséquence de les mettre transitoirement en court circuit, ce qui a un effet sur leur résistance interne et leur f.é.m. Mais même sans cela, leur f.é.m. et leur résistance interne variaient au cours du temps (diminution de la f.é.m. passant par exemple de $E_1 = 4,3$ V à $E_2 = 4,1$ V et augmentation de la résistance interne passant par exemple de $\rho_1 = 3 \Omega$ à $\rho_2 = 10 \Omega$, alors que pour une pile quasi neuve on a sensiblement $E_0 = 4,5$ V et $\rho_0 = 1,0 \Omega$). Cependant, comme le professeur n'avait pas imposé l'ordre dans lequel les élèves devaient mesurer i , i_1 et i_2 , cela conduisait à des erreurs pouvant être considérées comme aléatoires : chaque courant mesuré étant sous évalué par rapport au précédent ;

- les circuits réalisés n'étaient jamais celui de la figure ci-dessus puisqu'il fallait insérer l'unique ampèremètre de chaque groupe successivement dans la branche principale, en utilisant le calibre 2 A pour lequel le multimètre présentait une résistance r_{A1} de $0,23 \Omega$, puis dans chacune des branches dérivées, en utilisant le calibre 200 mA pour lequel la résistance de l'ampèremètre valait $r_{A2} = 1,2 \Omega$. À cette occasion, nous pouvons noter que les multimètres “grand public” d'aujourd'hui, malgré toutes leurs immenses qualités, constituent des ampèremètres présentant une résistance bien plus grande que les appareils à aiguille d'autrefois, alors que les voltmètres, eux, sont infiniment supérieurs aux appareils correspondants à cadres mobiles.

Supposons pour simplifier que la source de tension présente, tout au long de la manipulation, des caractéristiques invariables (prenons par exemple $E = 4,30 \text{ V}$ et $\rho = 4,7 \Omega$) et supposons également que la résistance de la lampe soit fixe (en fait, elle varie en fonction de la tension appliquée : on a par exemple $r_L = 20 \Omega$ pour $U_L = 4,2 \text{ V}$ et $r_L = 14 \Omega$ pour $U_L = 2,0 \text{ V}$). Prenons par exemple $r_L = 16,0 \Omega$ ce qui correspond sensiblement à $U_L = 3,0 \text{ V}$.

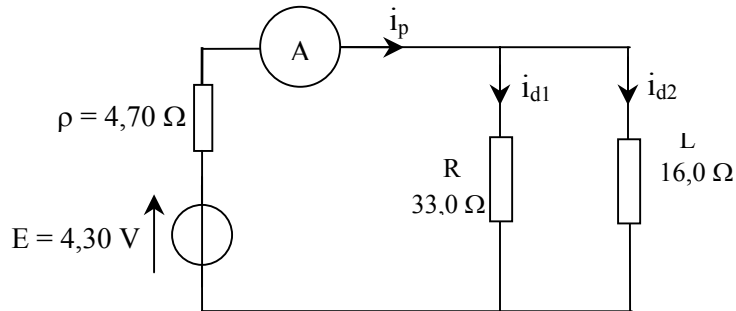


Figure 2

La figure 2 ci-dessus représente le cas où le multimètre est inséré dans la branche principale, celle de la pile, et où il présente une résistance interne $r_{A1} = 0,23 \Omega$ car il est utilisé sur le calibre 2 A.

Avec ce modèle, les valeurs exactes des courants (arrondies au milliampère le plus proche) seraient celles qui figurent dans la deuxième colonne du tableau ci-dessous. En revanche, en branchant le multimètre successivement dans les deux autres branches (mesures de i_1 puis de i_2), on trouve respectivement les valeurs inscrites dans les colonnes 3 et 4 de ce même tableau.

	A dans la branche principale (pile) calibre 2A, avec $r_{A1} = 0,23 \Omega$	A dans la branche R cal. 200 mA ; $r_{A2} = 1,2 \Omega$	A dans la branche L cal. 200 mA ; $r_{A3} = 1,2 \Omega$
i_p	$i_{p1} = 274 \text{ mA}$	$i_{p2} = 276 \text{ mA}$	$i_{p3} = 269 \text{ mA}$
i_{d1}	$i_{d11} = 89 \text{ mA}$	$i_{d12} = 88 \text{ mA}$	$i_{d13} = 92 \text{ mA}$
i_{d2}	$i_{d21} = 184 \text{ mA}$	$i_{d22} = 188 \text{ mA}$	$i_{d23} = 177 \text{ mA}$

Si chaque colonne correspondant à un montage donné, on retrouve bien, aux erreurs d'arrondi près, la relation $i_p = i_{d1} + i_{d2}$, en revanche on n'a pas $i_{p1} = i_{d12} + i_{d23}$. En effet la somme des deux mesures est telle que $i_{d12} + i_{d23} = 265 \text{ mA}$ contre 274 mA pour i_{p1} . **La méthode utilisée conduit donc à une erreur systématique relative de l'ordre de 3,4 %.**

Remarque : en utilisant le calibre 2 A pour mesurer chacun des trois courants, les résultats eussent été bien meilleurs, comme le montre le tableau ci dessous :

	A dans la branche principale (pile) calibre 2A, avec $r_{A1} = 0,23 \, \Omega$	A dans la branche R cal. 2A ; $r_{A2} = 0,23 \, \Omega$	A dans la branche L cal. 2A ; $r_{A2} = 0,23 \, \Omega$
i_p	$i_{p1} = 274 \, \text{mA}$	$i_{p2} = 277 \, \text{mA}$	$i_{p3} = 276 \, \text{mA}$
i_{d1}	$i_{d11} = 89 \, \text{mA}$	$i_{d12} = 90 \, \text{mA}$	$i_{d13} = 91 \, \text{mA}$
i_{d2}	$i_{d21} = 184 \, \text{mA}$	$i_{d22} = 187 \, \text{mA}$	$i_{d23} = 185 \, \text{mA}$

On trouve en effet $i_{d12} + i_{d23} = 275 \, \text{mA}$ contre $274 \, \text{mA}$ pour i_{p1} , ce qui correspond à une erreur systématique relative inférieure à 0,4 % qu'il est assez difficile de mettre en évidence dans l'enseignement secondaire. Cependant, on ne peut enseigner une notion une certaine semaine (se placer sur le calibre le plus faible compatible avec la grandeur mesurée) et dire le contraire la semaine suivante. Le professeur avait donc eu raison de rappeler aux élèves le savoir-faire qu'il leur avait enseigné lors de la séance précédente.

Résultats de la séance

Sur 12 groupes, 11 ont obtenu des résultats techniques cohérents, avec i_{p1} supérieure à i_{d12} et i_{d23} et assez voisine de la somme $i_{d12} + i_{d23}$; un des groupes ayant, sans s'en apercevoir, mesuré deux fois i_{d12} a obtenu un résultat aberrant.

L'absence de réflexion préalable sur la dispersion provoquée par les erreurs des appareils (il aurait suffi de mettre les 10 ampèremètres en série pour constater que, traversés par un même courant, ils n'indiquaient pas la même valeur) a fait que, mis à part le groupe ayant trouvé l'égalité parfaite entre i_{p1} et la somme $i_{d12} + i_{d23}$, les autres n'ont pas été convaincus d'avoir "vérifié" la loi $i_p = i_{d1} + i_{d2}$.

Les élèves ont certes été heureux de manipuler, de s'encourager, de s'invectiver, de montrer à leur professeur qu'ils travaillaient, mais l'efficacité de la séance a été réduite à la réalisation (dans 11 cas sur 12) de trois montages certes non évidents, compte tenu de la rusticité du matériel. Cela n'est pas suffisant. En effet les élèves n'ont pas réfléchi et la manipulation ne les a pas aidés, au contraire, à mémoriser la relation de conservation du courant continu.

Améliorations possibles de cette séance de TP

- Le laboratoire du collège ne disposait pas de 36 multimètres ; il n'était donc pas possible d'éviter l'erreur systématique due à l'insertion d'un ampèremètre de résistance $1,2 \, \Omega$ dans des branches dont l'une contenait seulement une lampe de résistance voisine de $16 \, \Omega$. En revanche, en demandant aux élèves de changer de calibre alors que leur ampèremètre était inséré dans l'une des branches dérivées R ou L, on leur aurait montré que ses indications variaient avec ce calibre (de 2 mA environ dans un cas, de 8 mA environ dans l'autre). Il n'était pas difficile d'en faire déduire aux élèves que si l'on cherchait à vérifier l'égalité théorique $i_p = i_{d1} + i_{d2}$, ceci s'ajoutant aux autres causes d'erreur, il fallait admettre que cette égalité ne puisse être réalisée qu'avec une certaine approximation. De fait, à 15 mA près, sur 270 mA en moyenne, soit à 5,5 % près, elle était vérifiée par 9 groupes sur 11.

- On ne peut non plus reprocher au professeur, qui ne disposait pas de 15 générateurs de courant continu, d'avoir utilisé des piles usagées : lorsque l'on doit enseigner dans dix classes différentes et que l'on dispose d'un budget annuel de fonctionnement de 2500 F, on ne peut offrir à ses élèves des piles neuves à toutes les séances. Malheureusement, ceci entraîne de fortes disparités dans les résultats et masque partiellement les phénomènes recherchés. Sans cela, la mise en commun des mesures des élèves et, notamment, la comparaison des moyennes des i_{p1} d'une part et de la somme $i_{d12} + i_{d23}$ d'autre part, aurait aidé à résoudre le problème. Notons en effet, que malgré tous les défauts cités, la moyenne des i_{p1} était égale à 270 mA contre 266 mA à la moyenne des sommes $i_{d12} + i_{d23}$. De plus, si le professeur avait fait admettre aux élèves que, compte tenu de la grande disparité des résultats (les valeurs des intensités i_{p1} se répartissaient entre 190 mA et 305 mA), il valait mieux ne donner ces moyennes qu'avec deux chiffres significatifs, le résultat de la manipulation aurait été :

$$\overline{i_{p1}} = 0,27 \text{ A et } \overline{i_{d12}} + \overline{i_{d23}} = 0,27 \text{ A.}$$

- De manière encore plus simple, on pouvait faire remarquer aux élèves, à condition, là encore d'utiliser l'ensemble de leurs résultats et non de demander à chacun d'eux de tirer de ses propres mesures la conclusion souhaitée, que, sur 11 groupes ayant donné des résultats cohérents, six trouvaient que l'intensité i_{p1} était supérieure à la somme $i_{d12} + i_{d23}$ et cinq trouvaient le contraire, ce qui, compte tenu des nombreuses erreurs possibles, laissait une bonne probabilité à l'égalité $i_p = i_{d1} + i_{d2}$.

Avantages présentés par une expérience de cours ayant le même but que le TP précédent

L'expérience de cours n'est pas soumise aux mêmes contraintes de matériel

- On a vu que la manipulation était soumise à de fortes contraintes. Une bonne préparation des élèves aux phénomènes rencontrés et une exploitation collective de l'ensemble des mesures aurait certes permis à la classe de comprendre que ces mesures n'étaient pas en contradiction avec la loi $i_p = i_{d1} + i_{d2}$. Mais, d'une part, cette préparation n'avait pas eu lieu (l'inventaire des prérequis n'avait pas été effectué) et, d'autre part, l'erreur systématique importante due au fait que l'ampèremètre de chaque groupe changeait 3 fois de place dans le circuit, ne permettait pas d'espérer de très bons résultats : à la limite, en recommençant la même manipulation dans dix collèges différents, avec les mêmes valeurs nominales de R et de la lampe L, des piles du même type et des multimètres de mêmes caractéristiques, on pourrait, avec une très bonne probabilité, mettre en évidence la différence irréductible entre i_{p1} et la somme $i_{d12} + i_{d23}$.

- Pour une expérience de cours, on peut disposer d'un générateur de tension continue stabilisée ou, au moins, d'une pile neuve dont les caractéristiques ne se modifient pratiquement pas pendant la durée d'une expérience.

On peut aussi disposer de trois multimètres dont les réponses en ampèremètres sont compatibles : si le professeur ne dispose pas d'appareils spécifiques, protégés des tribulations imposées par les élèves au matériel, il peut toujours monter en série tous les ampèremètres de la collection et choisir pour sa manipulation les trois appareils dont les indications sont les plus centrales. Cela élimine l'erreur systématique précédente (car il n'y a qu'un seul montage pour les trois mesures) et cela minimise beaucoup une autre erreur systématique qui serait liée à la fausseté d'un appareil ou de plusieurs.

Le montage devient alors celui de la figure 3 :

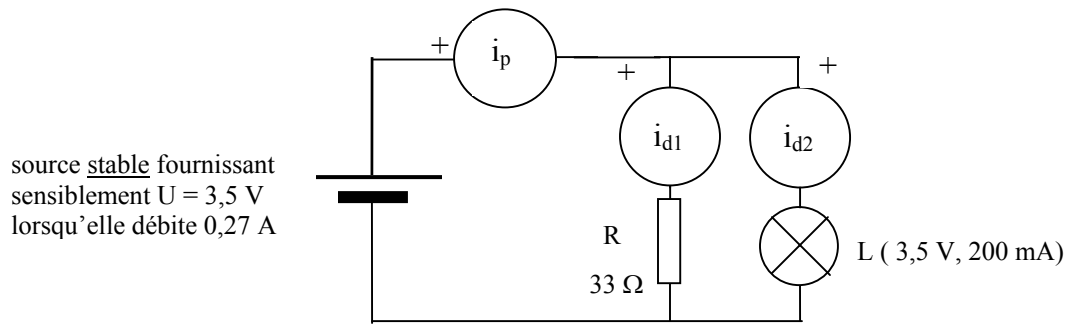


Figure 3

• Il n'est pas certain pour autant que le résultat obtenu satisfera exactement à la relation $i_p = i_{d1} + i_{d2}$. Cela n'est d'ailleurs même pas souhaitable. Car la difficulté liée à l'existence d'erreurs de mesures ne doit pas être esquivée : ces erreurs sont inhérentes à chaque processus de mesure et c'est véritablement faire œuvre d'éducateur et préparer les élèves à leur vie d'adulte que de traiter de ce problème. Pour ma part, reprenant la manipulation dans les conditions qui viennent d'être précisées, avec mes propres multimètres (je n'avais pu la reprendre avec le professeur concerné), j'ai trouvé :

$$i_p = 290 \text{ mA} ; i_{d1} = 197,8 \text{ mA} ; i_{d2} = 93,6 \text{ mA}.$$

En pareil cas, le professeur peut expliquer, car il n'est pas pris comme dans le déroulement d'un TP par les appels de 12 groupes d'élèves, que le constructeur des appareils admet que chacun d'entre eux peut donner une valeur légèrement erronée : il y a de bonnes chances, par exemple, lorsque les appareils sont neufs, que chaque erreur soit inférieure à "1 % VL + 1 UR". Voyons ce que cela signifie pour un courant i_p de 290 mA, mesuré sur le calibre 2 A avec un appareil à 2000 points de mesure. La valeur lue, VL, c'est 290 mA. Par conséquent, 1 % VL = 2,9 mA.

1 UR signifie une "unité de représentation" : c'est la valeur correspondant à une unité du dernier chiffre affiché, ou encore la valeur du calibre divisée par le nombre de points de mesure, soit ici, 1 mA.

Le constructeur nous indique donc que l'erreur commise sur la mesure de i_p a de fortes chances d'être inférieure à $\Delta i_p = 3,9 \text{ mA}$. On écrira donc $i_p = (290 \pm 3,9) \text{ mA}$.

De même, pour i_{d1} , on doit écrire : $i_{d1} = (197,8 \pm 2,1) \text{ mA}$ et pour i_{d2} : $i_{d2} = (93,6 \pm 1,0) \text{ mA}$.

L'écriture : $i_p = 290 \text{ mA} ; i_{d1} = 197,8 \text{ mA} ; i_{d2} = 93,6 \text{ mA}$ est très différente de :

$$i_p = (290 \pm 3,9) \text{ mA} ; i_{d1} = (197,8 \pm 2,1) \text{ mA} ; i_{d2} = (93,6 \pm 1,0) \text{ mA}.$$

De la première, on ne peut rien déduire, sinon que i_p n'est pas égale à la somme ($i_{d1} + i_{d2}$). De la seconde, on constate du premier coup d'œil que la différence entre ces deux quantités, $\delta i = 1,4 \text{ mA}$, qui représente moins de 0,4 % de leur valeur moyenne, est presque trois fois plus petite que la seule incertitude Δi_p sur la mesure du courant principal.

On peut donc dire que nos mesures sont compatibles avec la loi $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ (et non, comme on l'entend parfois dire, que l'on a "vérifié" la loi).

L'expérience de cours ne met pas en œuvre les même enjeux

Il est évident que l'expérience de cours précédente, réalisée au moins partiellement par le professeur (en ce qui concerne le choix des appareils et la disposition générale du montage) ne permet pas aux élèves de la classe de progresser en ce qui concerne le maniement du matériel. Cet enjeu n'est pas négligeable et il est évident que des séances de TP sont nécessaires pour le mettre en œuvre. Mais il faut bien les choisir et veiller à ce que les élèves, pendant ces séances, soient intellectuellement actifs.

En revanche, elle permet de mieux séparer l'énoncé de la loi elle-même et le rôle des mesures qui n'ont pas pour finalité d'établir cette loi, ni même de la vérifier, encore moins de la nier, mais seulement de montrer la cohérence de notre système de savoirs et de savoir-faire. En se fondant sur la nature du courant électrique dans les conducteurs métalliques (flux d'électrons) et sur une analogie avec des courants de fluides (d'un côté conservation de la charge et de l'autre conservation de la matière), le professeur, en cours, peut très bien postuler la loi $i_p = i_{d1} + i_{d2}$ et donner ensuite à l'expérience un rôle différent de celui que lui avait assigné le professeur lors de la séance de TP que je vous ai décrite (les expériences des élèves devaient établir la loi). Il s'agit d'un rôle de contrôle de la cohérence dont je parlais plus haut, et comme les mesures sont le plus souvent entachées de petites erreurs et qu'une incertitude est toujours attachée à chacune d'entre elles, ce contrôle est fragile ; ce n'est pas celui d'un juge qui absout ou condamne sans nuance.

Je rappellerai, à titre d'exemple, un fait scientifique survenu le 22 novembre 1975 (on pourrait multiplier les exemples de ce type) : ce jour-là, un avion de la Marine américaine décolla de la base de Chesapeake Bay pour un long vol en cercles répétés et monotones, au-dessus de cette base. Il emportait une horloge atomique, préalablement réglée sur un instrument identique qui restait au sol. Sa vitesse, pendant $T \approx 15,5$ h de vol, fut maintenue aussi proche que possible de $v = 140$ m/s, soit 504 km/h : il s'agissait de mesurer le décalage entre horloge embarquée et horloge stationnaire qui, d'après la relativité d'Einstein, est égal à :

$$\delta T = T \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Les calculs donnaient $\delta T = 5,7$ nanosecondes et l'on fut tout heureux et tout aise de mesurer, entre les deux horloges, et avec le bon signe, un décalage $\hat{\delta T} = 5,6$ ns.

On sera peut-être surpris de ce plaidoyer pour l'expérience de cours et pour la préférence donnée, dans ce cas particulier, à une expérience de cours par rapport à une séance de manipulation. En fait, il s'agit d'une alternative un peu singulière : expérience de cours riche et très typée (relative à une loi physique), face à une séance de TP difficile et chargée de contraintes. En fait, les deux activités expérimentales sont complémentaires.

Les expériences de cours dans l'enseignement de la physique et de la chimie

Les conditions de leur réalisation et leur rôle

Elles présentent un intérêt affirmé depuis longtemps et sont certainement trop rares. Il peut arriver exceptionnellement que les expériences de cours soient critiquées, notamment pour leur manque de visibilité ou leur mauvaise intégration au cours. Il est vrai que leurs conditions d'exploitation maximale ne sont pas toujours assurées.

- Une expérience de cours doit être visible par tous, de préférence sans déplacement d'élèves. Elle doit donc être de taille suffisante et nécessite parfois des appareils de mesures particuliers, à affichage renforcé. Le matériel audio-visuel moderne, et notamment les camescopes et les répéteurs d'écran équipent d'ores et déjà de nombreux lycées et ils apportent des améliorations considérables. J'ai pu ainsi, récemment, suivre, du fond d'une classe de 1^{ère}, la plus belle expérience d'oxydation ménagée de l'éthanol que j'aie jamais vue. Un autre jour, dans une expérience sur le mouvement des électrons dans un champ magnétique uniforme, la planéité de leur trajectoire fut parfaitement montrée par la présence d'un deuxième camescopie judicieusement placé.

Bien entendu, le déplacement des élèves est préférable à la non vision des expériences par une partie de la classe, mais il provoque perturbations et perte de temps (voir plus haut). En tout état de cause, certaines expériences de cours sont inadaptées, par exemple toutes celles qui nécessitent l'observation à travers un oculaire ou qui présentent un danger réel comme les réactions potentiellement explosives.

- Une expérience de cours doit être adaptée au contenu du cours. Le professeur doit savoir pourquoi il présente tel ou tel fait expérimental ; il doit aussi avoir réfléchi à l'usage précis qu'il compte en faire et à son exploitation. Je me souviens d'une magnifique expérience de cours, destinée à introduire la notion de chaleur de réaction et d'énergie de liaison, en première S. Seize grammes d'hydroxyde de baryum hydraté préalablement placés dans un bécher à la température ambiante (voisine de 20°C), ayant été intimement mélangés à 8 g de nitrate d'ammonium à la même température, la classe éberluée avait vu la température du "mélange" passer à -15 °C. De plus, comme le bécher avait été posé sur une capsule en verre contenant un peu d'eau, celle-ci avait gelé, si bien que la capsule restait attachée au fond du bécher. La leçon ne pouvait mieux commencer. Hélas tout fut gâché par l'incapacité du professeur à expliquer à une élève pourquoi cette baisse de température était le signe que la réaction chimique entre les deux réactifs exigeait, pour se produire, un apport extérieur d'énergie. Désireux d'aborder au plus vite la théorie qu'il s'était promis d'exposer, le professeur, qui avait pourtant réussi à étonner ses élèves, perdit tout l'avantage de sa belle expérience car il ne l'avait pas suffisamment interprétée : l'étonnement, au lieu de susciter la curiosité, avait créé l'inquiétude.

L'expérience de cours peut, comme dans l'exemple ci-dessus, avoir pour but d'effectuer une première approche qualitative du concept que l'on se propose d'aborder. Pour la majorité des élèves, cette approche qualitative est indispensable pour donner un sens à ce concept. Dans l'exemple ci-dessus, il aurait suffi de dire, par exemple, que la réaction de l'hydroxyde de baryum sur le nitrate d'ammonium, commence par utiliser sa propre énergie thermique, ce qui provoque une diminution de température du milieu réactif, mais que, de ce fait, le milieu extérieur et en particulier l'atmosphère peuvent transférer sous forme de chaleur, par conduction, de l'énergie thermique au système réactif.

Elle doit permettre d'identifier les paramètres qui agissent sur une situation donnée : quelle réalité aurait par exemple le phénomène d'induction électromagnétique s'il n'était pas introduit par des expériences qualitatives ? À ce sujet, les professeurs de Cpge qui, autrefois, alors que l'induction était traitée en classe terminale, rivalisaient d'abstraction en mathématiques spéciales et parachutaient parfois les équations de Maxwell sans aucune introduction, doivent, maintenant que ce sujet n'est plus abordé dans le secondaire (et c'est proprement honteux), pour donner du sens à leur cours, promener des aimants devant des circuits (ou l'inverse). Quelle représentation autre qu'abstraite des phénomènes d'interférences ou de diffraction peut se construire un élève qui n'a pas la possibilité d'observer les franges correspondantes et leurs caractéristiques ? Comment, sans expérience qualitative, faire prendre véritablement conscience des différences de comportement entre un acide faible et un acide fort ? Comment introduire les divers phénomènes liés à la stroboscopie sans une présentation expérimentale ?

- L'expérience de cours ne doit évidemment pas être un exercice solitaire du professeur ; suscitant l'intérêt des élèves, elle doit les préparer aux développements ultérieurs du cours et à leurs propres activités expérimentales.

- De nombreux professeurs, particulièrement dans l'enseignement technique, invoquent le déficit de salles de cours équipées pour expliquer l'absence d'expériences de cours. Si l'on prend le temps de discuter avec eux, ils reconnaissent généralement qu'ils n'ont pas véritablement cherché à obtenir les moyens de présenter de telles expériences aux élèves car ils pensent que ceux-ci, lors des séances de TP, auront tout le temps de se familiariser avec les aspects pratiques des phénomènes étudiés. Or l'expérience de cours, comme nous l'avons montré dans la première partie de notre exposé, correspond à d'autres objectifs que ceux qui sont généralement assignés aux manipulations d'élèves : elle permet de faire naître l'étonnement, d'amorcer un questionnement, de formuler des hypothèses, voire de poser une problématique ; elle permet aussi d'attirer l'attention des élèves sur tel ou tel aspect d'un phénomène qui pourrait leur échapper et leur apprend donc à observer.

- Dans une expérience de cours, on peut, au moins qualitativement, montrer l'influence de divers paramètres qui interviennent dans le phénomène étudié (comme la température et les concentrations pour une expérience de cinétique chimique, la tension appliquée et la nature du couple résistant pour la détermination du rendement d'un moteur électrique). Les élèves apprennent ainsi à structurer la démarche expérimentale qu'ils mettront en œuvre de manière autonome lors d'expériences plus personnelles.

- L'expérience de cours permet de réaliser des expériences particulières. Certaines situations expérimentales ne se prêtent pas à une expérimentation par tous les élèves. C'est le cas, nous l'avons vu lorsque le matériel est en nombre trop limité (il faut trois ampèremètres pour mesurer simultanément les trois courants aboutissant ou partant d'un même nœud) ou lorsque le dispositif expérimental n'existe qu'en un seul exemplaire (mouvement des particules chargées dans des champs magnétiques ou électriques, même si ce chapitre est désormais, lui aussi, exclu des programmes de physique) ou lorsque les expériences sont dangereuses (réactions chimiques devant être réalisées sous la hotte aspirante).

Autres modalités souhaitables des expériences de cours

- Il faut donner aux élèves les moyens de mémoriser les expériences de cours et leurs apports. Il faut donc leur laisser le temps de prendre des notes et faciliter cette prise de notes ; au collège, il faut même

l'organiser (éléments de schémas pré-imprimés, utilisation du rétroprojecteur). Dans certains cas, le traitement des mesures par un ordinateur et l'affichage sur répéteur d'écran apportent un indéniable supplément d'intérêt : je pense à une très belle expérience de cours que l'on peut réaliser en troisième avec un voltamètre, un générateur de tension de 6volts, par exemple, du sel de cuisine, un ampèremètre et une balance assez sensible permettant de peser de petites quantités égales de sel. A l'origine, le voltamètre contient de l'eau du robinet et l'ampèremètre n'indique qu'un courant négligeable. En revanche, lorsqu'on dissout dans cette eau de petites quantités de sel, on voit les points qui rendent compte de l'intensité traversant le voltamètre en fonction de la quantité de sel dissoute qui s'alignent rigoureusement les uns par rapport aux autres (tant que l'eau n'est pas saturée), et c'est un vrai plaisir.

La reproduction instantanée de graphes issus de l'ordinateur ou d'une table traçante couplée à un oscilloscope permet ensuite de pratiquer des mesures collectives et d'associer les élèves à l'exploitation de l'expérience.

- Les expériences de cours n'ont pas à être nombreuses, mais il faut bien les choisir et y revenir. Je me souviens de cet excellent professeur de physique de classe terminale qui gardait sur un coin de la paillasse, pendant trois ou quatre séances consacrées à la mécanique, une potence à laquelle était accrochée un ressort soutenant lui-même une masse marquée m . Dès qu'un de ses élèves, au cours d'un exercice, commettait l'erreur consistant croire que la tension du ressort est toujours égale au poids mg (ce qui n'est vrai qu'à l'équilibre), il tirait sur la masse marquée et l'élève, devant le pendule longitudinal ainsi animé et toute la classe, devait refaire le raisonnement montrant que l'égalité $T = mg$ n'est qu'occasionnelle.

Revoir une expérience, après questionnement, pratiquer des va-et-vient entre la formulation d'hypothèses et la réponse expérimentale, vérifier le domaine de validité de tel ou tel modèle explicatif est préférable à l'accumulation d'expériences diverses dont la valeur formatrice n'apparaît pas clairement.

- Les expériences de cours peuvent aussi fournir aux professeurs l'occasion de montrer que les phénomènes de laboratoire ne sont pas essentiellement différents de ceux qui sont vus dans la nature ou mis en œuvre dans les dispositifs technologiques actuels ou du passé. A propos de la transmission de la chaleur par conduction, il ne faut pas hésiter à faire vérifier par un élève, à l'aide d'un thermomètre de contact, que la plaque de marbre jugée "froide" à la main et l'étagère "chaude" sont en fait exactement à la même température. Quand au théorème du moment cinétique, qu'il soit introduit par le lancer adroit d'une toupie ou le beau mouvement d'une roue de bicyclette posée sur une seule des extrémités de son essieu, son étude motivera beaucoup plus le pauvre taupin que l'alignement aride et sans présentation expérimentale des seules équations de la mécanique. Cette dernière réflexion m'a été inspirée par l'attitude récente du savant Alain Aspect, de l'Institut d'optique d'Orsay, qui, au cours d'un exposé de vulgarisation, n'a pas hésité à présenter une petite expérience mettant magnifiquement en évidence le rôle stabilisateur du moment cinétique d'un dispositif dans certaines interactions magnétiques à distance.

De telles expériences devraient donner aux élèves l'occasion d'apprendre à défendre leur point de vue en argumentant. C'est ainsi qu'il y a trois ou quatre ans, il était possible de constater sans calcul et sans table de constantes sur les CX, que les affirmations d'un ministre sur les mouvements comparés d'une balle de tennis et d'une boule de pétanque étaient imprudentes dès lors que la hauteur de chute n'était plus d'un seul étage mais (par exemple) de trois (du bon usage des limites d'un modèle).

L'expérience en travaux pratiques ⁶

Claudine Larcher,
Professeure des universités, Inrp

Trois objets pour s'interroger

Pour introduire quelques aspects de « l'expérience en TP », je vais utiliser, non pas des exemples de « séances de TP » ce qui serait trop long, mais trois objets, plus faciles à montrer.

Le premier objet est ce qu'on appelle un « canard buveur ».

Ceux qui connaissent ont déjà une image dans la tête à laquelle ils se réfèrent. Pour ceux qui ne connaissent pas, je peux, soit montrer l'objet, soit le décrire pour que mes interlocuteurs s'en construisent une représentation. Aucune description ne peut être « complète » et je devrai faire des choix. Ces choix ne seront pas les mêmes suivant mon projet : le faire dessiner ? L'introduire comme objet de curiosité, comme objet de problématique ? Parlerai-je de sa plume verte, de son chapeau bleu ? Du tube de verre ? Du bulbe de verre qui contient du liquide rouge ? Comment en parlerai-je ? Comment vais-je décrire les événements dont il va être le sujet ?

Si je montre cet objet, je le donne à voir et laisse la description à la charge de celui qui regarde. Je peux aussi donner à voir « ce qui se passe » quand je cesse de l'entraver. Cela peut être décrit de différentes façons, suivant l'attention qu'on porte et ce qu'on a en tête pour guider l'observation.

Les événements répétitifs qui vont se produire (le « canard » se penche, « boit », se relève) vont certes amuser. Mais ils ne seront étonnants que pour ceux qui savent que le mouvement perpétuel n'existe pas car « on n'a rien sans rien ». Ces événements ne seront sujet de problème résoluble que pour ceux qui possèdent tout un ensemble de connaissances en mécanique, en thermodynamique, en chimie...

Les « explications » que l'on pourra construire ne seront pas validables expérimentalement sur cet objet. Elles resteront des explications possibles et cohérentes où des concepts, des lois, venant de champs conceptuels différents, vont être articulés pour expliquer chacune des phases d'un cycle répétitif, phases qu'il aura fallu discerner.

Le deuxième objet est « une horloge à pommes ».

Là aussi, je peux montrer ou décrire. La description peut être uniquement en termes d'objet ; elle peut aussi être fonctionnelle : la partie « alimentation » de l'horloge est « observable », la partie « calcul de l'heure » ne l'est pas, ni le transfert en affichage ; l'heure est affichée de façon digitale par des cristaux liquides. En faisant cette description, j'impose une lecture modélisante de cet objet en le décomposant en une source d'énergie, une base de temps, un affichage d'information et en faisant appel à des concepts ou au moins à des termes qui peuvent renvoyer à des concepts.

Un tel objet peut être soumis à expérimentation sur une de ces parties seulement, sans doute pas celle qui intéresserait le plus, mais celle qui peut susciter quand même un peu de curiosité par le pittoresque : on n'est pas habitué à voir associer pommes et horloge !

Cette curiosité peut être laissée libre de s'exprimer (quels autres fruits peut-on utiliser ? Quoi d'autre que des fruits ? Que peut-on changer d'autre pour que cela marche encore ?) et peut être guidée vers une explication qualitative, ou même quantitative, si on dispose des techniques nécessaires à l'étude d'un phénomène « électrochimique ».

⁶ Cette conférence s'articule avec les travaux de l'atelier n°1 « Les objectifs des travaux pratiques » (Cf. cinquième partie).

Le troisième objet est une loupe.

Il s'agit d'une loupe de bureau qu'on utilise pour lire ce qui est « trop petit ». Ces objets peuvent donner lieu à des investigations libres (observation du grossissement, de l'image « retournée », éventuellement en référence à des modèles d'optique travaillés de façon plus « théorique » en traçant des rayons lumineux sur un papier. Quand on commence à mettre en relation ce qu'on voit (ou qu'on n'arrive pas à voir !) avec ces objets - les schémas, les concepts d'objet et d'image réelle ou virtuelle, les conditions de Gauss... - on perçoit bien l'intérêt des travaux pratiques (faute de quoi on fait de la géométrie plus que de la physique), et même l'intérêt d'objets supplémentaires spécialement destinés à une étude physique !

À partir de ces trois exemples, un sur lequel on ne peut rien expérimenter, un sur lequel on peut partiellement expérimenter et un dernier où toute expérimentation est possible, mais où les questions ne se posent qu'en référence à un modèle, j'ai essayé de mettre en évidence l'importance d'un référent, d'interroger la différence entre description et interprétation, entre réel et modèle. J'ai aussi essayé de montrer la distinction entre familiarisation et expérimentation, et de faire percevoir le rôle des connaissances, des savoir-faire et des techniques disponibles pour qu'un problème soit, non seulement traitable, mais déjà reconnu comme un problème.

Je vais reprendre ces différents points en sortant du cadre de ces objets.

Le référent empirique, les registres de description

De quoi parle-t-on en classe de sciences ? Est-ce bien du monde qui nous entoure ? Pour l'enseignant, sans doute ; pour l'élève le lien entre les discours scientifiques et le monde réel n'est pas toujours assuré. Combien sont-ils à dire « le soufre, c'est S », sans en savoir beaucoup plus ? Combien « d'expériences » marchent tellement bien sur le papier et tellement moins bien dans la réalité ! La quête du mouvement perpétuel a donné lieu à des descriptifs de dispositifs ingénieux dont il est parfois difficile de détecter la faille. Quel degré d'approximation y a-t-il entre le monde réel et ce qu'on est capable d'en dire, à un niveau scolaire donné ? Quelles boîtes noires sont introduites (explicitement ?) et qui seront ouvertes éventuellement plus tard ? De quelle variété de descripteurs plus ou moins imbriqués ou juxtaposés dispose-t-on pour parler de ce référent empirique ?

Martinand (1994) distingue, dans le registre du référent empirique, la phénoménoteknik, connaissance des règles de montage, des conditions de sécurité, de savoir-faire instrumentaux mis en œuvre pour réussir les manipulations, la phénoménographie, description relevant d'une conceptualisation initiale (la solubilité par exemple, ou l'acidité) et la phénoménologie, description seconde en termes de nouveaux concepts, modèles théoriques (équilibre chimique). La dynamique d'apprentissage articule le référent empirique, la représentation qu'on en fait (modèles, concepts) et la matrice cognitive disponible.

Les TP sont un lieu d'apprentissages techniques et il faudrait pouvoir gérer un apprentissage progressif. Une épreuve d'évaluation des capacités expérimentales est maintenant mise en œuvre de façon systématique.

Lorsqu'on analyse les manuels scolaires (Claverie, C. - Thèse en cours), on est frappé par le peu de consensus sur ce que les élèves sont censés savoir faire à chaque niveau scolaire. Les fiches TP proposent des expériences où le matériel utilisé (réfrigérant à air ou à eau par exemple, ou bien verrerie) ne semble pas résulter de critères cohérents d'une classe à l'autre, ni d'un manuel à l'autre ; par ailleurs, ils ne sont pas présentés comme résultant d'un choix. Quand apprend-on à faire des

choix ? Quand apprend-on à contrôler ses gestes (par exemple maintien d'un pH dans une solution grâce à une solution tampon) ?

Mais aussi quand apprend-on à concevoir les principes techniques comme relevant des concepts construits ?

Il est normal que les élèves de quatrième ne connaissent pas le principe des indicateurs colorés : le langage utilisé dans les manuels (l'indicateur change de couleur) ne les aide pas à intégrer ces indicateurs dans la catégorie des substances chimiques, dans la mesure où un changement de couleur est par ailleurs pris comme critère de changement de substance. Ce sont des boîtes noires. Mais, sur près de 200 étudiants de CAPES interrogés, environ 40 % cochent comme « vrai » les propositions « la quantité de solution tampon introduite est sans importance » et / ou « la concentration de la solution tampon est sans importance » (Ganaras, K. 1998).

Ils sont par ailleurs à peine 20 % à affirmer que TOUS les points d'une courbe de dosage correspondent à des états d'équilibre.

Familiarisation, expérimentation

Mais les TP ne sont pas qu'un lieu d'apprentissages techniques. Ils donnent accès à un réel, sur lequel élaborer des représentations, en s'appuyant et en enrichissant la matrice cognitive.

Quand apprend-on à se servir de tout ce qu'on a appris, sans être guidé par le titre du TP, par les consignes, par le matériel disponible ?

Les activités sur ce réel peuvent être de différentes natures.

L'expérimentation peut être organisée pour « vérifier une loi », ou plutôt pour déterminer la valeur d'un paramètre ou chercher les limites de validité de cette loi, pour comparer des modèles, ou encore pour tester une hypothèse. Des exemples de TP différents sur un même thème (la réfraction et la stoechiométrie d'une réaction chimique) avaient été construits dans le cadre d'un groupe de travail ministériel, en repérant les conditions pédagogiques (prérequis en termes de connaissances, de savoir-faire, de démarches ; consignes précisant ce qui est à la charge de l'élève) qui permettent de « tenir » l'un de ces formats qu'on aura choisi pour une séance de TP (« Activités expérimentales des élèves en physique chimie ; quels enjeux d'apprentissage ? » Menrt, Desco, inspection générale ; Cndp de Basse-Normandie ; 1999).

La familiarisation avec des objets et des phénomènes ne peut pas être négligée. Elle contribue à donner du sens à ce dont on parle en cours de sciences. Les activités d'exploration peuvent être préalables à un cours qui aura alors pour fonction de structurer, de synthétiser, mais elles peuvent aussi ne pas s'inscrire dans une perspective théorique à court terme. Reproduire une expérience, par exemple une réaction oscillante (activité proposée en TP de DEUG à Orsay), décrite dans un article, c'est se confronter à de nombreux choix que la description n'indique pas, c'est aussi mettre en œuvre des techniques, des savoir-faire qui ne sont parfois même pas cités dans l'article. C'est souvent une activité où l'autonomie de recherche est plus grande et qui peut donner lieu à de réelles confrontations de résultats. On est alors plus proche d'une formation à une science expérimentale.

Mais il ne faut pas se leurrer sur les difficultés que rencontrent les élèves lorsqu'ils sont confrontés brutalement à ce type d'activité. Des analyses d'activités d'investigation, qui ne proposent pas un réel aménagé guidant, par des consignes directives, vers un modèle institutionnalisé, mais qui laissent à la charge des élèves l'élaboration de la problématique et des expériences qu'ils vont réaliser, ont été en particulier menées en sciences de la vie et de la Terre (Coquidé, 1999 ; Schneeberger, 1999).

Les connaissances construites dans des contextes différents sont difficilement mobilisées, même si chaque savoir est théoriquement disponible ; la multiplicité des savoirs à articuler (techniques, méthodologiques, mathématiques, conceptuels, communicationnels, etc.) réduit les ambitions de la

problématique envisagée par les élèves ; le déficit d'esprit critique conduit à des généralisations hâtives. L'espace du problème lui-même (où est le problème ?) est difficile à construire (Orange, 1999).

Faut-il pour autant se contenter de voir les élèves achever leur travail de TP, dans un engagement essentiellement formel, en passant à côté des problèmes ? Faut-il continuer à les maintenir en baby-trotteur et leur éviter tout « échec » ?

Bref, l'expérience s'acquiert par la pratique ! On ne peut que plonger dans la complexité.

Références bibliographiques

- COQUIDÉ M., BOURGEOIS-VICTOR P., DESBEAUX-SALVIAT B. « Résistance du réel dans les pratiques expérimentales » in *Aster*, n° 28, 1999, pages 57-79.
- COQUIDÉ M. Les pratiques expérimentales. Propos d'enseignants et conceptions officielles, in *Aster*, n° 26, 1998, pages 109-132.
- DARLEY B. Exemple d'une transposition didactique de la démarche scientifique dans un TP de biologie en Deug 2^{ème} année, in *Didaskalia*, n° 9, 1996, pages 31-56.
- FABRE M., ORANGE C., Construction des problèmes et franchissement d'obstacle, in *Aster*, n° 24, 1997, pages 28-48.
- GALIANA D., Problèmes posés par l'enseignement expérimental de la biologie dans les classes scientifiques des Lycées. Cas de la photosynthèse. 1999, thèse Paris-XI.
- GANARAS K., la conceptualisation des équilibres chimiques. 1998, thèse Ens Cachan.
- GUILLON A., Démarches scientifiques en TP de physique en Deug à l'université de Cergy Pontoise. *Didaskalia*, n° 7, 1995, pages 113-127.
- JOURNEAUX R., La référence au réel. Les sciences physiques et le recours à la physique, in *Didactique appliquée de la physique chimie*. J. TOUSSAINT (coord), Paris, Nathan, 1996.
- LARCHER C., et al. « Des TP différents pour des enjeux différents » in *Activités expérimentales des élèves en physique chimie ; quels enjeux d'apprentissage ?* Menrt ; Desco, inspection générale, Cndp de Basse-Normandie, 1999, pages 7-27.
- LARCHER C., BEAUFILS D (coord), in *Aster*, n° 28, 1999 : L'expérimental dans la classe.
- MARTINAND J.-L., (coord). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation*, Paris, Inrp, 1994.
- MARTINAND J.-L., La référence et le possible dans les activités scientifiques scolaires ? In *Recherches en didactique de la physique*. A. TIBERGHIE (ed), Paris, Éditions du Cnrs, 1983, pages 227-249.
- ORANGE C. et al., « Réel de terrain, réel de laboratoire et construction de problèmes en sciences de la vie et de la Terre » in *Aster* n° 28, 1999, pages 107-131.
- SCHNEEBERGER P., RODRIGUEZ R., « Des lycéens face à une investigation à caractère expérimental » in *Aster* n° 28, 1999, pages 79-107.
- SÉRÉ MG., JOURNEAU, R., WINTHER J. Enquête sur les objectifs des travaux pratiques. Bup 796, 1997, pages 1377-1389.

L'expérience dans l'enseignement est-elle inutile ou nécessaire pour la recherche et le développement?

Claude Fermon,

Chercheur au Commissariat à l'énergie atomique, Saclay ⁷

L'activité expérimentale au niveau des laboratoires de recherche publics ou privés est une nécessité absolue, aussi bien pour la progression des sciences que pour le développement de produits. Elle a pourtant, au cours de ces dernières années, changé de visage. Les expériences deviennent plus lourdes et plus chères en faisant souvent appel à plusieurs techniques simultanées. La simulation et la modélisation prennent une place importante aussi bien au niveau de la conception de l'expérience que pour l'exploitation des données. On peut alors se demander si l'expérience dans l'enseignement des sciences est encore bien adaptée ou même utile pour la recherche et le développement. Je donnerai une réponse personnelle à cette question en distinguant la formation par l'expérience et l'expérience dans l'enseignement pour la recherche expérimentale.

La formation par l'expérience

Pour illustrer mon propos, je me suis basé sur la formation telle qu'elle est faite au Cea dans notre service de physique de l'État Condensé. Elle est destinée aux étudiants post-baccalauréat et prend des aspects très différents, allant de simples travaux pratiques à la formation doctorale, en fonction des cursus proposés.

Les travaux pratiques

Pratiquement, il ne s'agit que d'étudiants en université ou en écoles d'ingénieurs. Ces TP de physique, chimie ou biologie sont organisés par du personnel Cea qui enseigne par ailleurs.

Ils sont organisés par petits groupes dans un cadre très spécifique et se réalisent sur des appareils utilisés pour la recherche dans des créneaux horaires spécialement prévus. On peut citer des TP de RMN, de microscopie à champ proche et de diffraction X.

Les points positifs de ces travaux pratiques :

- les étudiants sont plongés dans un milieu de recherche qui procure un intérêt par le changement de cadre ;
- les étudiants ont la possibilité d'utiliser des appareils performants, souvent à la pointe de la technologie et bien équipés.

Les points négatifs de ces travaux pratiques :

- la nécessité de déplacer des étudiants avec les problèmes de sécurité, d'entrée, etc. Cela réduit fortement les possibilités et restreint les travaux pratiques possibles. Ils sont en revanche nettement plus faciles à organiser dans des unités délocalisées ;
- les TP sont souvent trop spécialisés, surtout pour des étudiants de grandes écoles qui ne se destinent pas à une carrière fortement scientifique ;
- ces TP sont souvent trop courts par rapport au temps nécessaire pour comprendre la physique incluse dans ces expériences.

⁷ Laboratoire : Dsm/Drecam/Spec

Les stages

Il se déroulent pour des formations post-baccalauréat sur des durées variant entre 1 et 6 mois. Ils sont souvent très formateurs mais demandent beaucoup de travail à l'encadrant, particulièrement pour les premières années.

On peut distinguer :

Les stages de physique ou de chimie

Au niveau *Bts*, *Iup*, ils permettent à l'étudiant de se familiariser avec un type de technique donnée.

Au niveau *Deug*, *licence*, *maîtrise*, ils correspondent plutôt à la découverte de la recherche et sont souvent préparés pour donner des résultats en un temps court. On peut citer par exemple un stage de diffraction de rayons X et de neutrons sur un échantillon synthétisé au laboratoire.

Au niveau *Dea*, ils correspondent vraiment à la préparation du doctorat. D'ailleurs, beaucoup d'étudiants effectuant leur stage de *Dea* au laboratoire y restent pour faire leur thèse.

Les stages d'électronique

Ils s'adressent aux étudiants en *Bts* ou en *écoles d'ingénieurs*. Ces stages consistent à réaliser des prototypes de circuits non commerciaux destinés à équiper des expériences. Pratiquement, l'étudiant se forme à la chaîne allant de la conception à la réalisation et au test de circuits électroniques.

Ces stages apparaissent particulièrement utiles si leur durée est d'au moins deux mois. En deçà, l'étudiant n'a pas véritablement le temps de finir un projet.

Les stages d'informatique

Ils s'adressent aux étudiants en *Bts*, en *maîtrise* ou en *écoles d'ingénieurs*. Ils consistent en général à participer à l'écriture de logiciels spécifiques comme le pilotage d'expérience, la simulation ou le calcul.

Les contrats en alternance

Avec les contrats en alternance, on entre dans ce que l'on peut appeler les formations longues. Ils durent entre 2 et 3 ans : 2 ans s'ils correspondent à une formation de type *Bts*, 3 ans pour des formations d'ingénieurs. Ces contrats en alternance tendent à se développer au Cea car ils apparaissent extrêmement formateurs dans la mesure où l'étudiant fait l'effort demandé. En revanche, différents garde-fous ont été mis en place afin d'assurer une formation correcte à l'apprenti et lui permettre un débouché aisé dans la vie active. On peut citer par exemple l'interdiction à un maître d'apprentissage d'avoir plus d'un apprenti, l'interdiction de cumuler dans le temps plusieurs formations dans le même groupe ou projet, le suivi de l'apprenti en fin de formation.

Les rythmes des apprentis sont très variables : ils vont de une demi-semaine Cea-une demi-semaine étude à 6 mois/6 mois. Pratiquement, l'apprenti est moins opérationnel au Cea dans les rythmes courts, mais il profite nettement plus de l'aide des chercheurs pour l'étude de ses cours et la résolution de points d'enseignement difficiles.

Les thèses

C'est la formation par excellence de chercheurs de haut niveau destinés à la recherche ou l'industrie. Par le passé, avoir une thèse semblait destiner l'étudiant uniquement à la recherche académique ; actuellement, certaines industries de haute technologie sont fortement demandeuses de ce type de formation. Les thèses sont toujours financées, soit par des contrats formation recherche du Cea, soit cofinancées avec un partenaire industriel, soit par des bourses du ministère. Elles durent 3 ans de temps plein.

Les thésards issus du Cea n'ont en général pas de problèmes d'emploi. Les deux cas qui ralentissent l'insertion du jeune dans la vie active sont : la volonté du thésard de continuer dans la recherche

fondamentale alors que son niveau ou son caractère ne s'y prête pas ; la réalisation d'une thèse trop éloignée des besoins industriels par un étudiant n'ayant pas le niveau pour continuer en recherche académique.

Les stages au niveau post-doctoral

Ces stages d'une durée typique d'un an sont destinés à compléter la formation d'un thésard dans un domaine complémentaire à sa thèse et sont souvent maintenant nécessaires pour obtenir un poste en recherche ou en enseignement supérieur. On trouve aussi beaucoup d'étrangers à ce niveau de formation en raison de la nécessité absolue dans laquelle se trouvent de nombreux ressortissants étrangers d'effectuer plusieurs années de post-doc avant d'espérer obtenir un poste semi-permanent.

Les formations spéciales

Il existe enfin des formations spéciales et ponctuelles destinées le plus souvent à des physiciens en thèse ou post-doc, comme les écoles d'été ou les travaux pratiques (Hercules, formation aux grands instruments, les fans du Llb, etc.).

La répartition

Elles est très variable suivant les services ; je donne ici uniquement la répartition sur une année dans mon service, lequel est considéré comme particulièrement impliqué dans la formation.

Stages	20	
Deug	2	1-2 mois
Licence-maîtrise	4	1-3 mois
Dea	10	2-6 mois
Électronique	2	3 mois
Informatique	2	3 mois
Contrats en alternance	5	
Électronique	2	BTS /Ing
Informatique	2	BTS /Ing
Chimie	1	BTS
Thèses	25	≈8 par an
Post-Doctorats	15	

L'expérience dans l'enseignement pour la recherche expérimentale

Je diviserai ce chapitre en trois parties plus ou moins indépendantes. La première porte sur l'adéquation des TP aux besoins professionnels illustrée ici par les problèmes liés à la sécurité et par l'électronique. Ensuite, j'aborderai la simulation et enfin l'expérience virtuelle qui est une limite de la simulation.

Adéquation des TP aux besoins professionnels

Cette adéquation est très inégale, même si mon jugement est essentiellement basé sur la connaissance des travaux pratiques tels que je les ai moi-même vécus et qu'il m'est difficile de connaître les TP actuellement réalisés dans l'enseignement secondaire. Cela étant, les connaissances expérimentales des étudiants « débarquant » par exemple en thèse ne semblent pas avoir réellement variées.

On peut donc faire les remarques suivantes :

- Les TP de base sont toujours utiles. On peut citer à titre d'exemple :
 - l'apprentissage de la collecte des mesures (température, etc.) ;
 - l'électricité-électronique ;
 - les expériences simples de physique ou de chimie ;
 - l'informatique et les interfaces Pc-machine.
- Les TP trop sophistiqués sont peu utiles :
 - à l'exception des filières spécialisées, il vaut mieux éviter les appareils sophistiqués où l'étudiant n'apprend que la manipulation de l'appareil au détriment de la physique sous-jacente car il aura peu de chance de rencontrer le même instrument dans le futur.
- Les TP « trop » simples sont encore négligés :
 - le cas extrême, régulièrement rencontré, est celui de l'étudiant qui ne sait pas dans quel sens il faut tourner une vis pour la serrer ;
 - généralement, les étudiants en physique ou en chimie ne savent pas se servir d'une perceuse ou d'un tour, pas plus qu'ils n'ont l'idée de ce que permet de réaliser un tour. Cela pose des problèmes lorsqu'ils doivent par exemple dessiner une pièce à fabriquer en atelier ;
 - ils ne savent souvent pas souder ou braser un tube de cuivre, coller des pièces, assembler différents matériaux ; de façon plus générale, le travail des matériaux est méconnu.

Quelques points me semblent importants et illustrent bien l'évolution des techniques :

Les problèmes de sécurité

Les problèmes de sécurité sont relativement nouveaux : ils ont nécessité la mise en place de formations et de sensibilisation pour tous les stagiaires passant au Cea. On a l'impression que les étudiants sont de moins en moins bien formés dans ce domaine. Je cite ici quelques exemples qui ont entraîné des problèmes récents :

Expériences de chimie

Souvent, les TP de chimie sont en phase avec ce qui se fait en laboratoire mais les étudiants ont très peu d'idées sur les dangers liés :

- à la pression : tubes qui explosent ou implosent ;
- à l'utilisation des solvants ou des acides-bases (à part les acides très courants et la soude) ;
- au contrôle de la température.

En pratique, les physiciens sont beaucoup plus exposés que les chimistes.

Expériences de physique

En physique les principaux problèmes viennent :

- de la manipulation de hautes tensions ;
- du danger du froid (brûlures par l'azote liquide) ;

- des rayonnements (Laser, RX).

2. L'électricité-électronique

L'important dans ce domaine est de rester en phase avec l'évolution actuelle. Actuellement, les composants discrets sont fortement remplacés par des circuits intégrés et les circuits programmables sont en train de s'installer, permettant de grouper en un seul composant de nombreux circuits intégrés. Ceci est particulièrement vrai pour le numérique avec les microcontrôleurs et les Fpga, mais aussi pour l'analogique. On observe également une augmentation des fréquences de travail. A titre d'exemple, un ordinateur qui était à 100 MHz il y a 4 ans travaille maintenant allègrement au dessus du GHz.

Actuellement, le développement d'un circuit électronique passe toujours par les phases suivantes :

- **Phase 1 : conception**

Cette phase est difficile et nécessite une bonne connaissance de l'électronique, notamment des composants de base - résistance, condensateur - des systèmes simples (ampli opérationnel, etc.) et d'un certain nombre de circuits intégrés logiques et analogiques. La maîtrise du fonctionnement des composants discrets ou la connaissance de règles comme les lois de Kirchhoff, etc. sont de moins en moins utiles. Cette phase est trop difficile pour être réellement introduite au niveau des TP mais on peut regretter que, par exemple, au niveau de la formation de technologie au collège, les élèves fabriquent un petit circuit comme une minuterie pour les œufs à la coque avec deux résistances, un condensateur, un ILS et un circuit intégré temporisateur et qu'ils ne savent pas du tout la différence conceptuelle entre les différents composants.

- **Phase 2 : dessins sur Cio du schéma de base**

Cette phase nécessite de savoir se servir d'un PC et d'un logiciel.

- **Phase 3 : simulation**

Cette phase n'est pas toujours nécessaire et contient les mêmes contraintes que la phase 1

- **Phase 4 : implantation**

Cette phase nécessite de savoir se servir d'un Pc et d'un logiciel. Actuellement les logiciels sont très simples d'utilisation et tout à fait à la portée d'un collégien. En revanche, des connaissances particulières (règles d'implantation) sont nécessaires dans certains domaines (puissance, RF) pour pouvoir assurer un bon fonctionnement du circuit.

- **Phase 5 : réalisation de la carte et du câblage**

Cette phase est très facile à réaliser pour des systèmes simples. Elle est par exemple réalisée dans certains collèges.

- **Phase 6 : tests et mesures**

Comme pour la simulation, cette phase peut être délicate mais des systèmes simples peuvent être réalisés très tôt. En reprenant l'exemple du minuteur, un élève peut régler un temps avec un potentiomètre et vérifier le bon fonctionnement. En revanche, une panne d'un composant est difficile à trouver. La maîtrise de la chaîne, à part la conception et la simulation, demande 1 à 2 semaines pour des circuits simples. Le temps peut être réduit à 3-4 séances de TP avec des logiciels bien adaptés. La simulation

La simulation est maintenant utilisée partout. Au-delà de la simulation en électronique dont nous avons déjà parlé, la simulation est maintenant utilisée de façon intensive pour remplacer la réalisation de prototypes ou pour prévoir le comportement au cours du temps de machines.

On peut citer par exemple :

- la simulation électromagnétique pour la conception d'aimants ;
- la simulation de l'écoulement dans des circuits hydrauliques qui joue un rôle très important dans la conception de réacteurs nucléaires ;
- la simulation de défaillances, d'accidents ou de l'usure.

La simulation a été rendue possible grâce aux ordinateurs. Elle présente l'intérêt de réduire fortement les coûts et d'augmenter la fiabilité des systèmes utilisés.

Mais la simulation est difficile. Difficile à enseigner en dehors du contexte professionnel, car elle fait souvent appel à des logiciels très spécialisés qu'il faut maîtriser. Ensuite, il faut très bien comprendre le système à simuler.

La simulation a pourtant des pièges intrinsèques :

- Simuler peut se ramener à faire un grand nombre d'expériences en changeant tel ou tel paramètre jusqu'à ce que le système se comporte comme on l'espère. L'approche devient empirique car facile mais le résultat peut être relativement éloigné du résultat optimum qu'une approche plus raisonnée aurait pu donner. Ceci est à mettre en parallèle avec les discussions soulevées par l'introduction des programmes de calcul analytique, type *matlab* ou *mathematica*, qui sont souvent utilisés sans analyse préliminaire.
- La simulation a ses limites données par le logiciel. Ces limites sont en général mal connues de l'utilisateur et on peut voir apparaître de temps en temps des résultats extrêmement surprenants dus à des problèmes de divergence par exemple.

Comment former par l'expérience à la simulation ?

On peut imaginer de comparer en TP la simulation et l'expérience réelle. Ceci peut être facilement fait en électronique où les outils de simulation sont en général disponibles sur les chaînes de CAO. On peut ainsi, en prenant des systèmes simples comme un oscillateur marginal, faire passer les notions de tolérance de valeurs réelles, de variation entre les composants, d'oscillations parasites, etc.

Cela peut aussi se faire sur des mesures physiques où on peut introduire la notion de statistique de comptage ou de bruit : mesure d'une température, du seuil de renversement d'une aimantation, etc.

L'expérience virtuelle

Au-delà de la simulation, on peut véritablement réaliser une expérience virtuelle. Cette démarche est intéressante dans le cas où l'expérience réelle n'est pas accessible (danger, coût, disponibilité).

Bien sûr, ceci est vrai dans le cas de pilotage d'avion mais aussi pour des expériences de physique. Par exemple, une journée sur un grand instrument comme une source de neutrons coûte de l'ordre de 2 à 3000 Euros et, la demande étant très forte, il est important de réaliser des expériences virtuelles. Nous disposons par exemple d'un logiciel de simulation d'un réflectomètre (X ou neutrons). Cette simulation introduit un certain nombre d'erreurs expérimentales (échantillon mal placé, courbé...) et reproduit aussi en temps virtuel la statistique poissonnienne d'événements aléatoires comme l'arrivée de neutrons sur le détecteur.

Tout se passe comme une expérience réelle avec ses erreurs et ses incertitudes.

Ce type de formation s'adresse à des étudiants en 2^{ème} ou 3^{ème} cycle universitaire mais peut être transposé pour des TPs.

L'expérience virtuelle présente certains avantages : elle est peu chère, portable. Elle peut être très ludique et capter l'attention (pour combien de temps encore ?) et surtout elle marche à tous les coups (sauf problèmes de PC...) avec un minimum de danger pour l'élève.

Elle présente aussi des inconvénients : c'est trop souvent un système prédigéré qui gomme les difficultés expérimentales et qui enlève un savoir-faire. Par exemple, dans le cas cité plus haut d'une expérience de neutrons, elle n'apprendra jamais à mettre un échantillon sur l'expérience ou à refroidir correctement le système. Elle gomme aussi les problèmes de sécurité de la personne et du matériel.

Il existe un autre problème plus subtil qui est la disparition de la notion de temps. Souvent un temps réel est remplacé par un temps virtuel et l'étudiant, arrivant après une formation sur l'expérience virtuelle, est déboussolé face à l'expérience réelle qui va trop vite ou trop lentement.

Conclusion

J'espère avoir montré dans cet exposé l'importance que peut avoir l'expérience dans la formation pour la recherche et comment formation et expérience s'imbriquent au niveau d'un laboratoire de recherche, aussi bien pour la formation de techniciens que pour la formation de physiciens ou d'ingénieurs.

Mesures, erreurs et incertitudes en physique-chimie

René Moreau,

Inspecteur général de l'éducation nationale

Introduction

Première réflexion sur le contenu du document

Ce document peut apparaître à certains comme ne contenant que des notions triviales, tandis qu'il donnera à d'autres l'impression de traiter de sujets qu'il serait impossible de présenter aux élèves.

Aux uns comme aux autres, par avance, je conseillerai de nuancer leur opinion. Aux premiers, je demande de faire l'effort de se montrer attentifs bien qu'ils connaissent les notions théoriques qui seront mobilisées dans cet exposé : il m'est en effet arrivé bien souvent d'entendre un professeur m'affirmer qu'il attachait toujours une grande importance aux notions qui font l'objet de ce travail, alors que les documents qu'il me remettait (textes d'exercices ou de TP donnés à ses élèves, de problèmes construits pour eux) fourmillaient d'erreurs et d'exemples de non maîtrise du sujet.

Reconnaissons à l'intention des seconds que le sujet est assez complexe et qu'il comporte de nombreuses facettes. Sachons aussi qu'on ne peut attendre que toutes les notions qui fondent son étude soient maîtrisées par les élèves pour commencer à sensibiliser ces derniers aux problèmes des mesures, si bien que nombre de savoir-faire peuvent leur apparaître comme des recettes (ce qui choque plus les professeurs que les élèves). Mais il faut que ces réticents sachent que la majorité des notions nécessaires au traitement des mesures effectuées en classe sont assez intuitives, qu'aucune ne heurte le bon sens, si bien que les élèves admettent fort bien que certaines règles leur soient données sans démonstration et cela dès le collège. De plus, à l'heure actuelle, l'utilisation de logiciels commodes et clairs facilite le travail des professeurs de lycée. Le traitement raisonné des mesures des élèves donne aux professeurs tant d'occasions de donner plus de sens à leurs cours, de mettre leurs élèves sur le bon chemin quant à l'interprétation des résultats, bref d'augmenter sensiblement l'intérêt des séances d'enseignement qu'ils dispensent, que cela vaut largement la peine d'essayer. S'ils y croient vraiment, les professeurs percevront en plus une sorte de prime : par des observations qui sont de la même nature que celles d'un chercheur, mais qui sont appliquées à nos travaux pratiques, le traitement des mesures des élèves permet souvent de faire la lumière sur tel ou tel phénomène qui *a priori*, ne nous apparaissait pas comme important mais dont une analyse plus fine révèle l'influence. L'intérêt de notre métier s'en trouve alors singulièrement accru.

Afin que ces dernières remarques n'apparaissent pas comme trop théoriques, en m'appuyant sur le travail de dizaines de professeurs avec lesquels, en un quart de siècle, j'ai pu échanger des idées à propos des mesures de leurs élèves, je citerai la mise en évidence de nombreuses erreurs systématiques. En 1977, par exemple, en seconde C, au lycée d'Agen, dans l'expérience de Gay-Lussac conduisant à l'expression $p = p_0 (1 + \alpha t)$ pour un volume d'air maintenu constant et dont la température t était mesurée en degrés Celsius, la mise en commun du travail de deux classes montra que le coefficient α n'était pas tout à fait égal à $\frac{1}{273,15}$ et l'analyse attentive des bouchons montra qu'ils fuyaient légèrement. Un peu plus tard,

au lycée Montaigne de Bordeaux, en terminale, l'étude de la chute libre des corps, à l'aide d'un dispositif qui mettait en œuvre une bille en acier, parce qu'elle conduisait à une valeur de g un peu trop faible, montra que la bille ne devenait relativement libre qu'après s'être suffisamment éloignée de l'électroaimant qui l'attirait encore un peu, dans le premier centimètre de sa chute. Plus récemment, au lycée David d'Angers, le décalage persistant entre résultat attendu d'un dosage et le résultat moyen obtenu, a montré l'influence néfaste d'une balance de précision (mais qui n'avait pas été ré-étalonnée) à partir de laquelle les produits chimiques étaient pesés par le technicien de laboratoire.

Dans la belle expérience que réalisent les élèves de première S afin de mesurer le volume molaire des gaz parfaits, l'influence de la pression de vapeur saturante de l'eau sur le volume d'hydrogène que les élèves recueillent (dont la non prise en compte provoque une erreur systématique de l'ordre de 2,5 %) est apparue évidente. Cette même expérience (mais cela aurait tout aussi pu se produire à propos de la mesure de la vitesse du son dans l'air) a également amené les professeurs à réaliser que, lorsqu'on téléphone à un laboratoire de météorologie, pour connaître la pression atmosphérique locale, celui-ci ne vous donne pas la pression dans la ville où vous vivez, mais la pression corrigée, ramenée au niveau de la mer, car c'est elle qui est pertinente pour la prévision des phénomènes météorologiques. Or la pression atmosphérique chute de 10 hPa (soit 1 % de sa valeur) lorsque l'altitude s'élève de 85 m : de nombreuses mesures d'élèves, si elles sont convenablement exploitées en classe, sont affectées par cette correction et rendent nécessaire la prise en compte de l'altitude de la salle de classe.

Les buts que se propose d'atteindre ce document

Les mesures sont entachées d'erreurs

Nous savons tous qu'une mesure physique, aussi précise soit-elle, comporte toujours une part d'incertitude et probablement, une erreur, même minime. Mais si nous ne montrons jamais que, malgré nos efforts, de telles erreurs entachent nos mesures et si nous n'utilisons jamais le vocable d'incertitude, pour montrer que nous sommes conscients de ces erreurs, alors, sur ce point, notre enseignement est muet.

Les erreurs susceptibles d'entacher la mesure d'une grandeur sont multiples et la recherche de leurs causes peut être passionnante. Citons brièvement l'environnement de la grandeur mesurée, qui peut être influencée par d'autres grandeurs, l'équipement de mesure dont on dispose, la qualification des opérateurs effectuant la mesure ou la méthode utilisée.

En classe, la répétition de certaines mesures, selon un même mode opératoire, par des groupes d'élèves de même niveau, utilisant du matériel comparable, peut rapidement donner une idée exploitable de la répartition des erreurs, à l'exception des erreurs systématiques. Mais la comparaison des mesures obtenues par deux méthodes différentes (focométrie, dosages), ou la mesure de grandeurs déterminées avec précision par ailleurs, permet aussi de débusquer certaines erreurs systématiques.

Présentation des résultats de mesure

De manière idéale, une grandeur ayant pour valeur exacte (inconnue) la quantité A , le résultat de la mesure de A devrait être donné sous la forme $a = \hat{a} \pm \Delta a$: $\hat{a}$ est l'estimateur de la valeur exacte A (par exemple la moyenne de quelques mesures) et Δa l'incertitude sur la mesure de A , telle que la probabilité P pour que l'intervalle $(\hat{a} - \Delta a, \hat{a} + \Delta a)$ contienne A soit assez élevée (par exemple $P = 0,95$).

Cette écriture suppose que $\hat{a}$ ne coïncide pas exactement avec A : $\varepsilon_a = \hat{a} - A$ est l'erreur commise sur la mesure de A . On présentait autrefois Δa , l'incertitude absolue sur A , comme un majorant de $|\varepsilon_a|$: tout le calcul d'incertitudes classique en découlait, notamment les théorèmes sur la composition des incertitudes absolues ou celle des incertitudes relatives du type $\Delta a/\hat{a}$. Ces théorèmes conduisaient à des impasses : on "montrait" ainsi que la moyenne m de n mesures indépendantes $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_n$, n'était pas plus précise que l'une quelconque des mesures, alors que, dans une classe, notamment, chacun peut (et doit) constater le contraire.

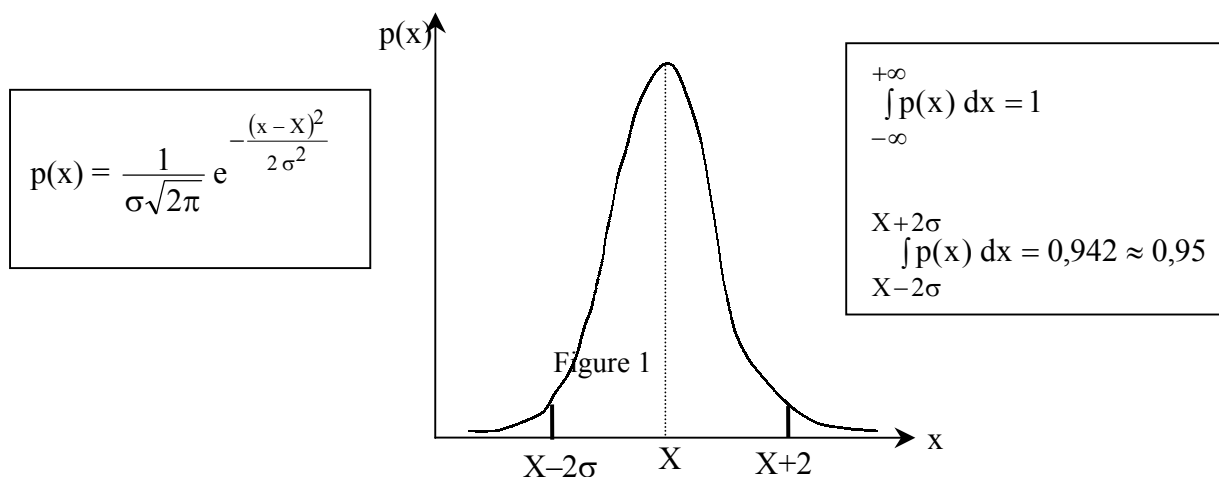
En fait, chaque opérateur, lorsqu'il s'inscrit dans la logique visant à déterminer un *majorant* Δa de $|\varepsilon_a|$, minimise inconsciemment l'incertitude Δa , comme le montrent par exemple les mesures historiques successives de la vitesse c de la lumière par des savants, qui, presque tous, ont proposé des majorants de $|\varepsilon_c|$ qui se sont révélés trop faibles.

De nombreux constructeurs d'appareils de mesure utilisés dans les établissements scolaires procèdent de même. Au bout d'un an de fonctionnement, par exemple, il n'est pas rare de trouver pour ces appareils des erreurs trois fois plus grandes que le "majorant" indiqué par la notice ! Il est donc beaucoup plus réaliste de considérer que l'intervalle $(\hat{a} - \Delta a, \hat{a} + \Delta a)$ est un *intervalle de confiance*, la probabilité P qui lui

est associée ($P = 0,95 = 95 \%$, ou $P = 0,99$) étant le *niveau de confiance* de l'intervalle choisi. Bien sûr, l'incertitude Δa est d'autant plus grande que le niveau de confiance P se rapproche de l'unité.

Ce point de vue, qui considère les différentes mesures indépendantes a_i de A comme les valeurs successives prises par la *variable aléatoire* a , se heurte cependant à une importante difficulté : pour affecter à une incertitude Δa un niveau de confiance P donné, il faut connaître la loi de répartition des mesures a_i autour de A , encore appelée densité de probabilité de a .

On suppose en général qu'il s'agit d'une répartition *gaussienne*, que chacun connaît au moins approximativement et dont on peut rappeler qu'elle est symétrique par rapport à sa valeur moyenne X et pour laquelle les faibles écarts à la moyenne sont plus probables que les forts.



Cette loi est si répandue qu'on la dénomme la loi *normale* de Gauss. Cette supposition est en général légitime (il suffit par exemple, ce sont les "conditions de Borel", que les causes d'erreurs soient multiples et d'importance comparable) ; cette loi de répartition a d'ailleurs été prouvée dans la quasi-totalité des cas où tel ou tel d'entre nous a pris le temps de regrouper un millier de mesures *indépendantes* et *de poids égaux* d'une même grandeur. En général, faute de temps, l'hypothèse gaussienne ne peut ni être prouvée, ni réfutée. Cependant, le logiciel « Incertitudes de mesure »⁸, mis au point par le CNDP sous ma direction (bénévole), permet instantanément de savoir si l'échantillon de mesures dont on dispose peut ou non être considéré comme tiré d'une population gaussienne. Il informe également l'opérateur de l'existence d'une ou plusieurs mesures aberrantes et, si l'opérateur accepte d'enlever ces valeurs, le logiciel calcule automatiquement l'incertitude Δa qui correspond à ces mesures en utilisant pour cela des critères sur lesquels je reviendrai et qui peuvent être admis par tous.

Il est bon de savoir qu'en matière d'Incertitudes de mesure, les méthodes statistiques normalisées se sont définitivement imposées au début des années 90, d'abord dans les laboratoires de métrologie (en particulier au Bureau national de métrologie), puis dans les entreprises, avec l'installation des normes d'assurance qualité ISO 9000.

Certains laboratoires de métrologie accompagnent seulement un résultat de mesure, considéré comme une valeur de variable aléatoire, de l'écart-type correspondant. Cet écart-type est baptisé "incertitude type", tandis qu'on appelle "incertitude élargie" la quantité 2σ : la valeur $k = 2$ qui a été retenue au niveau européen comme la valeur standard à prendre en compte, correspond, lorsque la répartition des mesures est gaussienne, à un niveau de confiance voisin de 95 % généralement considéré comme suffisant (c'est $1,96\sigma$ qui correspond exactement au niveau de confiance 95 %) : nous sommes très près des idées qui seront exposées plus loin comme pouvant être appliquées en classe.

On pourrait s'en tenir à la seule notion d'écart-type. Elle permet notamment un nouveau type de "calculs d'incertitude", plus réaliste que l'ancien, fondé sur les seules propriétés de la variance des fonctions aléatoires et indépendant des lois de probabilités. Mais ces calculs, qui supposent maîtrisé le

⁸ Cndp, coll. « Simulation et analyse de données ». Référence : 755 03624.

calcul différentiel, ne peuvent être menés qu'au niveau de l'enseignement supérieur. Ils ne sont pas envisageables au lycée où le problème de l'estimation d'une incertitude *raisonnable* ne peut être résolu que par des méthodes *directes* et *globales*. C'est d'ailleurs largement suffisant.

Pour initier les élèves aux méthodes statistiques utilisées par la mesure moderne, mais aussi dans d'autres types d'investigations, fixons-nous donc pour objectif de faire déterminer de temps en temps par les élèves de première ou de terminale S, à partir de leurs propres pratiques expérimentales et en regroupant seulement les mesures indépendantes de leur groupe de TP, sans lourds calculs mathématiques, un intervalle de confiance au niveau de confiance 95 %. Cet objectif à long terme peut être préparé dans les classes précédentes et même dès le collège.

La question des chiffres significatifs

Les exercices proposés aux élèves comportent des données exprimées avec un certain nombre de chiffres significatifs. Les réponses numériques à ces exercices doivent être cohérentes avec les données. Rechercher cette cohérence, la justifier, est une activité qui s'apparente à la réflexion sur les incertitudes de mesure. On peut donc, par ce biais, sensibiliser très tôt les élèves à ces questions. Dans ce seul domaine, d'immenses progrès restent à accomplir, à tous les niveaux, c'est-à-dire du collège à l'agrégation, car il n'est pas rare de trouver dans une épreuve d'agrégation des données exprimées par exemple avec un seul chiffre significatif alors que les examinateurs attendent des résultats exprimés avec trois chiffres significatifs. On aura par exemple un condensateur de capacité $C = 1 \text{ nF}$ et il faut donner la valeur de l'inductance L qui, associée à C , provoquera une résonance électrique à $f_0 = 120 \text{ kHz}$. L'application de la formule $LC\omega^2 = 1$ conduit les candidats à écrire $L = 1,76 \text{ mH}$ ou même $1,759 \text{ mH}$. Alors que, si l'auteur du sujet avait pensé au problème des chiffres significatifs, il aurait donné, par exemple, $C = 1,0 \text{ nF}$, $f_0 = 1,2 \times 10^5 \text{ Hz}$ et il était en droit de s'attendre à ce qu'on lui réponde $L = 1,8 \text{ mH}$.

Ou $C = 1,00 \text{ nF}$ et $f_0 = 120 \text{ kHz}$, ce qui entraîne bien $L = 1,76 \text{ mH}$.

Par ailleurs, l'écriture $\hat{a} \pm \Delta a$ suppose que l'on choisisse les chiffres significatifs qui expriment $\hat{a}$ et Δa . En nous fondant sur des considérations statistiques, nous proposerons, en annexe 5, des critères quantitatifs permettant d'effectuer logiquement ce choix. Avec ces critères, on remarque que ceux des professeurs qui s'intéressent au sujet ont parfois tendance à enlever trop de chiffres significatifs, aussi bien pour exprimer l'estimateur $\hat{a}$ que l'incertitude Δa . Cependant, ces critères sont un peu difficiles à mettre en œuvre ; il faut donc appliquer des règles d'emploi plus simple et qui font à peu près l'unanimité (et surtout, il ne faut pas adopter une attitude rigide pour l'application de ces règles qui ne correspondent que de manière approchée à l'application de critères scientifiques). Pour cela, les consignes données il y a bien longtemps par le grand physicien que fut G. Bruhat, dans son traité de Mécanique (page 265 de la sixième édition, chez Masson), restent tout à fait d'actualité : après avoir trouvé, par exemple, pour l'indice d'un prisme $n = 1,50944 \pm 0,00039$, il recommandait d'écrire : $n = 1,5094 \pm 0,0004$.

"L'incertitude étant de plusieurs unités de la quatrième décimale, il est inutile, disait-il, de conserver la cinquième décimale, mais il faut garder la quatrième car en la supprimant on introduirait une erreur d'écriture parfaitement inutile, comparable à l'erreur expérimentale".

De la même manière, partant par exemple d'une mesure de puissance telle que $P = (3420,5 \pm 25,67) \text{ W}$, nous verrons par la suite que l'écriture définitive du résultat devrait être : $P = (3,420 \pm 0,026) \text{ kW}$. En gros, l'incertitude Δa ne doit jamais être exprimée avec plus de deux chiffres significatifs et, pour l'estimateur $\hat{a}$, on conserve tous les chiffres significatifs qui sont affectés par Δa .

Quand et comment introduire ces notions dans les classes ?

Depuis vingt ans, mis à part quelques cas isolés, ces notions ne sont presque pas abordées. Cela conduit à des aberrations, car les jeunes gens qui sortent du lycée, y compris ceux qui, en première et en terminale ont choisi de participer aux Olympiades de la Physique, n'ont aucune idée de ce que peut représenter une incertitude de mesure, qu'elle soit considérée comme majorant ou affectée d'une

probabilité limitée ; l'incohérence s'installe même en ce qui concerne les chiffres significatifs des données et des résultats.

Nous ne pouvons continuer à ignorer le sujet et il faut donc progressivement tenter de "remonter la pente". Le mieux serait d'aborder ces questions dès le collège. Évidemment, c'est de manière prudente qu'il faut agir à ce niveau : il ne peut y être question, ni d'intervalle de confiance, ni d'écart-type. Mais on peut montrer que la précision d'une mesure est limitée et adopter des règles simples sur la question des chiffres significatifs. La sensibilisation précoce des jeunes élèves aux problèmes de la mesure, lorsqu'ils manipulent, permettrait de leur expliquer certaines contradictions apparentes et de répondre à leurs questions. En revanche, à aucun niveau de l'enseignement secondaire, il ne faut utiliser le modèle handicapant du majorant des erreurs qui, en conduisant aux anciennes règles du calcul d'incertitude, deviendrait plus tard gênant pour eux (pas plus qu'aucun modèle théorique de "propagation des erreurs").

Nous allons donc tenter de proposer une introduction progressive des notions dont il vient d'être question, introduction ni dogmatique ni abstraite, mais réalisée à partir des activités expérimentales réalisées en classe, soit dans les expériences de cours à exploitation collective, soit à l'occasion des travaux pratiques des élèves.

Nous commencerons donc par les classes du collège auxquelles nous associons la classe de 2^{de} indifférenciée. La seconde est en effet désormais une classe où les notions de physique sont rares, comme les occasions de pratiquer de véritables mesures.

Les classes de 1^{ère} et de terminale S ou industrielles constituent un deuxième stade, très différent, où les élèves ont en principe choisi de faire des sciences.

Des exemples d'applications effectivement réalisés dans les classes illustreront notre propos.

Ce qui peut être introduit au collège et en seconde

Généralités

Au collège, en cinquième et en quatrième, les élèves mesurent des températures pour repérer les changements d'état, ils manipulent ampèremètres et voltmètres ; ils peuvent mettre en évidence la variation de volume de l'eau au cours de la fusion de la glace... En troisième, on mesure des distances et des temps, pour accéder à la notion de vitesse moyenne, tandis que la relation entre masse et poids invite à mesurer ces deux types de grandeurs. Pour une résistance, l'ohmmètre permet de comparer son indication au quotient U/I des indications de deux appareils déjà connus. En chimie, enfin, l'usage du pH-mètre n'est pas exclu... On pourrait multiplier les exemples qui posent le problème de la mesure et donc celui des chiffres significatifs, car, après un mesurage, effectué par les élèves ou le professeur, on doit en effet afficher le résultat, la mesure, et utiliser pour cela une unité et un certain nombre de chiffres significatifs.

Très tôt, en quatrième par exemple, il faut montrer aux élèves que les indications fournies par les appareils de mesure sont entachées de petites erreurs et que, de ce fait, et, parfois aussi, du fait de l'expérimentateur lui-même, il n'y a pas tout à fait coïncidence entre la valeur exacte A d'une grandeur (parfois connue par ailleurs) et la mesure a correspondante. On peut, de temps en temps, proposer aux élèves d'évaluer expérimentalement l'ordre de grandeur de l'erreur commise sur une mesure, autrement dit, s'intéresser à l'incertitude qui lui est liée.

En troisième, on peut remarquer que de nombreuses grandeurs mesurées dépendent légèrement de facteurs physiques (température, pression...) susceptibles d'évoluer en fonction du temps de manière incontrôlée. D'autres, comme les dimensions d'une table rectangulaire en bois, le diamètre d'une sphère imparfaite, ne sont définies qu'avec une certaine précision.

Ces réalités n'ont pas à être cachées (il ne faut donc pas, pour "vérifier" la loi des courants dérivés $i = i_1 + i_2$, choisir, comme on le fait parfois, des courants de 100 à 200 mA et utiliser, pour les mesurer, les calibres 10 A des trois ampèremètres utilisés !).

Les observations liées au mesurage conduiront ainsi professeurs et élèves à présenter la plupart des mesures et calculs effectués en classe, avec, simplement, deux ou trois chiffres significatifs et l'emploi

correct des multiples et sous-multiples des unités légales ($m = 12,3 \text{ g}$; $V = 83 \text{ cm}^3$; $P = 6,5 \text{ N}$; $g = 9,8 \text{ N/kg}$; $I = 24,5 \text{ mA}$; $U = 4,5 \text{ V}$; $R = 47,3 \text{ k}\Omega$; $\theta = 99,5^\circ\text{C}$; $P = 105 \text{ W}$...).

Certains résultats, ayant fait l'objet d'une réflexion plus approfondie, pourront être donnés sous la forme d'un intervalle centré, par exemple : $g = (g_0 \pm \Delta g) \text{ N/kg}$. Dans ce cas, l'intervalle ($g_0 - \Delta g$, $g_0 + \Delta g$) sera présenté comme ayant "de fortes chances" de contenir la "vraie valeur" de g . Il s'agit de sensibiliser à la notion d'incertitude, et non de faire œuvre définitive. Ne pas dire de choses fausses, mais ne pas chercher non plus, à établir du premier coup la "doctrine" achevée, car c'est absolument impossible.

Les chiffres significatifs au collège

Il s'agit d'un problème difficile : la manière dont on s'exprime dans la vie courante n'en favorise pas la solution qui, de toute manière, n'est pas simple. En ville, quand une personne dit qu'elle a payé sa voiture neuve 110 000 F, cela signifie généralement qu'elle ne considère comme significatifs que les seuls deux premiers chiffres non nuls de cette somme alors que le prix réel, avec le plein d'essence, la carte grise et les plaques minéralogiques, était peut être 113 875,23 F ou, aussi bien, 108 256,89 F. Si aucun des quatre zéros n'est considéré comme significatif, la "bonne" manière de procéder, indiquant que le prix P payé est compris entre 105 000 F et 115 000 F (prix à 5 kF près en valeur absolue, ou encore à 5 % près en valeur relative), consisterait à écrire $P = 1,1 \times 10^5 \text{ F}$ ce qui apparaîtrait comme pédant. De même, si l'on désire indiquer que le prix est compris entre 109 500 F et 110 500 F (prix à 500 F près en valeur absolue ou à 0,5 % près en valeur relative), le premier zéro est un chiffre significatif, il faudrait dire que l'on a payé sa voiture 110 kF.

En mathématiques, écrire $m = 11\,597 \text{ g}$, signifie que seul le dernier chiffre, 7, est incertain. On a donc $11\,596,5 \text{ g} \leq m \leq 11\,597,5 \text{ g}$. En effet, si le résultat trouvé est $11\,597,7 \text{ g}$, par exemple, alors la masse m , arrondie au gramme, devient $11\,598 \text{ g}$. En physique, en l'absence d'indication explicite sur l'incertitude attachée à m , on admet souvent que celle-ci est égale à une demi unité du dernier chiffre exprimé (P. Fleury et J.-P. Mathieu, Mécanique physique, 4ème édition, 1965, page 42). Les écritures $m = 11\,597 \text{ g}$ ou $m = (11\,597 \pm 0,5) \text{ g}$ sont donc équivalentes. En revanche, si l'on désire indiquer que l'incertitude Δm sur m est de 1 g, par exemple, au sens où l'intervalle ($11\,596 \text{ g}$, $11\,598 \text{ g}$) a de fortes chances de contenir la vraie valeur de m , alors il faut écrire $m = (11\,597 \pm 1) \text{ g}$.

Dans ce cas, on a donc mesuré une masse de plus de 10 kg à 1 g près, soit avec une précision relative $\frac{\Delta m}{m} = 1 \times 10^{-4}$. Si des précisions de cet ordre sont très facilement réalisées en métrologie, elles sont rares dans la vie courante.

Au collège, la précision relative des mesures est couramment de l'ordre de 10^{-2} , soit 1 % en pourcentage. Cela entraîne en général l'écriture des mesures avec deux ou trois chiffres significatifs, par exemple :

$$m_1 = 11,6 \text{ kg} ; m_2 = 8,7 \text{ g} ; m_3 = 0,79 \text{ kg} ; m_4 = 228 \text{ g}.$$

Dans certains cas (appareils neufs ou de très bonne qualité ayant fait l'objet d'un suivi de maintenance), la précision relative atteint 10^{-3} . La mesure correspondante s'écrit alors avec 3 chiffres significatifs ($m_3 = 795 \text{ g}$), ou quatre ($U = 10,56 \text{ V}$).

Dans les calculs où il n'y a que des multiplications ou des divisions de grandeurs, du type $z = x \cdot y$ ou $z = \frac{x}{y}$, la précision relative $\frac{\Delta z}{z}$ du résultat final, z , ne peut être meilleure que celle de la grandeur x ou y la moins précise : le rapport $\frac{\Delta z}{z}$ est donc supérieur au plus grand des rapports $\frac{\Delta x}{x}$ ou $\frac{\Delta y}{y}$.

Dans l'hypothèse où Δx , Δy et Δz sont, comme en mathématiques, des majorants des erreurs commises sur x , y et z , ce résultat peut, dès le collège, être "justifié" sur des exemples numériques. Toujours dans

cette hypothèse, il peut être établi rigoureusement en terminale S. Cependant, ce point de vue est incompatible avec l'objectif recherché qui consiste seulement à associer aux intervalles $[x - \Delta x, x + \Delta x]$, $[y - \Delta y, y + \Delta y]$, $[z - \Delta z, z + \Delta z]$ une probabilité (par exemple $P \approx 0,95$) de contenir respectivement les valeurs exactes X , Y et Z . Dans ce cas, ce n'est qu'en classe post-baccalauréat qu'on peut démontrer le théorème précédent, mais nous verrons qu'on peut, à titre d'exercice, le faire toucher du doigt en première.

Supposons ainsi que l'on s'intéresse, à la vitesse moyenne v_{moy} sur 1000 m d'une voiture qui, arrêtée au départ, parcourt cette distance en 31,4 s ; ceci afin, par exemple, de la comparer à la vitesse maximale annoncée. En l'absence de précision supplémentaire sur ces mesures, nous remarquons que la distance L est donnée avec une précision relative de $0,5 \times 10^{-3}$ et la durée t avec une précision relative de $1,6 \times 10^{-3}$. De ce fait, on ne peut donner la vitesse moyenne $v_{\text{moy}} = L/t$ avec une précision meilleure que $1,6 \times 10^{-3}$. La bonne manière d'exprimer le résultat est donc $v_{\text{moy}} = 115 \text{ km/h}$. La vitesse 114,6 km/h est trop précise (précision relative de $0,44 \times 10^{-3}$), celle de $1,1 \times 10^2 \text{ km/h}$ (précision relative 45×10^{-3}) ne l'est pas assez.

On ne commet pas d'erreur grossière en remplaçant la règle ci-dessus par celle qui consiste à donner le résultat de la multiplication ou de la division avec un nombre de chiffres significatifs égal à celui de la donnée la moins précise.

Prenons un autre exemple : la mesure "à chaud" d'une résistance a donné $R = 47,2 \Omega$; cette résistance est parcourue par un courant d'intensité $I = 68 \text{ mA}$. On demande de calculer la tension U aux bornes de R .

Observons qu'en l'absence de précision supplémentaire, la donnée $R = 47,2 \Omega$ signifie que l'incertitude absolue sur R est de $0,05 \Omega$, soit une incertitude relative $\Delta R/R = 1 \times 10^{-3}$. De même, et avec la même restriction, on fait l'hypothèse que $\Delta I/I = 7,3 \times 10^{-3}$. Dans ces conditions, alors que le produit RI est égal à 3,2096 V, la précision relative $\Delta U/U$ de la tension $U = RI$ ne peut être meilleure que $7,3 \times 10^{-3}$. L'incertitude ΔU est donc supérieure à 23 mV et l'on ne peut donc écrire $U = 3,21 \text{ V}$, ce qui sous-entend que cette incertitude est égale à 5 mV. Le résultat cohérent avec les données est donc $U = 3,2 \text{ V}$.

Le marquage des résistances radio met bien l'accent sur les chiffres significatifs : on ne peut que recommander son utilisation.

Pour les résistances habituelles (de tolérance 5 % ou 10 %), deux cercles de couleur indiquent les chiffres significatifs, un troisième le multiplicateur et le quatrième la tolérance (ou précision relative). Ainsi, une résistance comportant un cercle bleu (6), un gris (8), un jaune (4) et un doré a pour valeur nominale $68 \times 10^4 \Omega$, soit $0,68 \text{ M}\Omega$ à 5 % près, et non, comme on le voit parfois écrit au tableau, $680\,000 \Omega$, ni même $680 \text{ k}\Omega$. Le fabricant garantit en effet que, dans les limites normales prévues pour son fonctionnement (limites portant sur la température ambiante et la puissance dissipée), sa valeur est comprise entre $646 \text{ k}\Omega$ et $714 \text{ k}\Omega$ et non entre $679\,999,5 \Omega$ et $680\,000,5 \Omega$, ni entre $679,5 \text{ k}\Omega$ et $680,5 \text{ k}\Omega$ ce qui supposerait encore une précision meilleure que $10^{-3} \Omega$.

L'emploi des puissances de 10 pour l'écriture des résultats, ou de "la notation ingénieur" recommandée dans le programme de mathématiques de la classe de quatrième, ou, ce qui revient pratiquement au même, l'emploi courant des multiples et sous-multiples des unités légales, est indispensable pour maîtriser la question des chiffres significatifs. Nous devons, en physique-chimie, habituer les élèves, dès le collège, à ne pas considérer comme totalement équivalentes des mesures différant les unes des autres par le nombre de chiffres significatifs. En particulier, les exercices de "conversions d'unités", nombreux, à juste titre, dans les manuels, devraient veiller au respect de ces nombres : si la capacité V d'une citerne est $2,75 \text{ m}^3$, elle peut certes s'exprimer en mL, mais en écrivant $V = 2,75 \times 10^6 \text{ mL}$ et non $V = 2\,750\,000 \text{ mL}$, car cette dernière écriture, qui sous-entend que la capacité est connue au millilitre près, n'est pas équivalente à l'information initiale. De même, la consommation journalière en charbon d'une chaudière d'immeuble est 15 tonnes (ou $15,0 \text{ t}$) plutôt que $15\,000\,000 \text{ grammes}$!

Donnons encore l'exemple de la distance moyenne de la Terre autour du Soleil (moyenne temporelle), il s'agit de "l'unité astronomique" très proche de la longueur du demi grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil :

$1 \text{ UA} = 1,495\,978\,70 \times 10^{11} \text{ m}$. On prend souvent, à juste titre, pour valeur arrondie de cette distance, cent cinquante millions de kilomètres. Mais cela doit s'écrire :

1 UA = $1,50 \times 10^8$ km, ou 1 UA = $1,50 \times 10^{11}$ m, et non 150 000 000 km. Cette dernière écriture, en effet, semble donner la valeur de l'unité astronomique arrondie au kilomètre, alors que la valeur retenue par les astronomes en diffère de 402 130 km.

La grandeur mesurée varie parfois quelque peu, de manière non maîtrisée

Prenons le cas de la résistance d'un dipôle ohmique classique de valeur nominale 47Ω à 5 % près (résistance "radio" portant les cercles jaune, violet, noir et doré). Cette résistance est comprise entre $44,5 \Omega$ et $49,5 \Omega$, mais, en général, elle est plus proche de 47Ω que ne le laisse penser la largeur de cet intervalle. Mesurée à l'aide d'un ohmmètre fournissant 4 chiffres significatifs, on obtiendra par exemple $R = 46,93 \Omega$ à la température de la salle. Supposons qu'il s'agisse d'une résistance destinée à être insérée dans un montage et capable de dissiper au maximum la puissance 0,5 W ce qui advient lorsque la tension à ses bornes atteint 4,8 V. Quand on applique effectivement cette tension, la température moyenne de la résistance radio augmente souvent d'une quinzaine de degrés et, lorsque l'équilibre thermique est atteint, la nouvelle valeur de R, mesurée avec le même ohmmètre devient par exemple $R' = 46,73 \Omega$. D'ailleurs, en serrant simplement la résistance entre le pouce et l'index, la valeur affichée passe alors, par exemple, de $46,93 \Omega$ à $46,82 \Omega$ en une ou deux minutes si la température de la résistance varie d'une dizaine de degrés au cours de cette opération (ce qui peut être le cas si la température de la salle est voisine de 18°C).

R varie donc avec la température et l'ensemble de ses valeurs, correspondant à un usage "normal", à température ambiante constante, occupe une plage de largeur voisine de $0,2 \Omega$.

On en tire tout de suite une première conséquence : le quatrième chiffre significatif donné par l'appareil, correspondant à $10 \text{ m}\Omega$, n'a pas à être conservé puisqu'une variation de température de quelques degrés, couramment subie par la résistance, entraîne une variation de R dix fois supérieure ($0,1 \Omega$) : on peut retenir $R = 46,9 \Omega$ comme valeur de la résistance à la température de la salle et $R = 46,7 \Omega$ lorsque la résistance s'est échauffée en dissipant sa puissance maximale (c'est la valeur "à chaud"). Si la puissance dissipée par la résistance est susceptible de varier entre 0 et 0,5 W, on estimera mieux sa valeur moyenne R en prenant la demi-somme de ces deux valeurs, soit $R = 46,8 \Omega$.

On peut minimiser de telles variations en choisissant bien son matériel. Dans le cas particulier précédent, (résistance de 47Ω soumise à des tensions comprises entre 0 et 5 V), supposons que l'on utilise une résistance métallique conçue pour pouvoir dissiper 50 W. Celle-ci est construite pour que sa variation n'excède pas $0,2 \Omega$ lorsqu'elle dissipe effectivement 50 W (sa température augmente alors d'une centaine de degrés Celsius). Ainsi, pour de faibles variations de température (5 ou 6 C), correspondant à des courants inférieurs à 0,3 A, la valeur d'une telle résistance métallique est-elle bien définie à $10 \text{ m}\Omega$ près.

Nous venons d'aborder le cas d'une grandeur qui varie quelque peu en fonction de la température. On peut aisément observer que d'autres grandeurs, que l'on souhaiterait constantes, dépendent légèrement de paramètres extérieurs :

La température d'un liquide que l'on chauffe par le fond du contenant, ou qui se refroidit par sa surface libre, ou d'un liquide qui bout, n'est pas parfaitement homogène : au collège, on peut espérer déterminer une telle température au demi degré Celsius près, mais non au dixième.

L'intensité du courant qui circule dans un circuit varie toujours un peu avec le temps, parce que les résistances du circuit et le générateur s'échauffent (ou la pile s'use) : on constate facilement qu'un courant réglé à la valeur $i = 100,0 \text{ mA}$, dérive par exemple jusqu'à $99,5 \text{ mA}$ en quelques minutes.

La masse d'un liquide varie, lorsqu'il se trouve dans un récipient non fermé, parce que le liquide s'évapore plus ou moins rapidement.

Les variations au cours du temps de la valeur efficace U de la tension du secteur, voisine de 230 V, sont en général largement supérieures à 1 V.

Le pH d'une solution aqueuse faiblement concentrée, laissée à l'air libre dans une salle de classe occupée, peut varier avec le temps car du dioxyde de carbone s'y dissout, etc.

Les erreurs des appareils de mesure et des manipulateurs

Lorsque l'on désire vérifier si les indications de trois ampèremètres différents, utilisés pour mesurer I , I_1 et I_2 , sont en conformité avec la loi $I = I_1 + I_2$ des courants dérivés, il arrive couramment, avec les appareils numériques actuels, que les mesures respectives $\hat{i}$, $\hat{i}_1$ et $\hat{i}_2$ des intensités I , I_1 et I_2 ne satisfassent pas rigoureusement à l'égalité $\hat{i} = \hat{i}_1 + \hat{i}_2$. Il ne faut bien évidemment pas en laisser déduire que la loi n'est qu'approchée, mais traiter la difficulté. Supposons par exemple qu'on utilise des appareils assez récents dont la notice indique que l'incertitude Δi attachée à chaque mesure est telle que $\Delta i = 1 \% \text{ VL} + 1 \text{ UR}$: VL est la valeur lue, tandis que le sigle 1 UR (une unité de représentation), signifie que l'on doit ajouter la valeur correspondant à une unité du dernier chiffre affiché. Par exemple, si $\hat{i} = 187,2 \text{ mA}$, alors $1 \% \text{ VL} = 1,9 \text{ mA}$ et $1 \text{ UR} = 0,1 \text{ mA}$ soit $\Delta i = 2,0 \text{ mA}$.

Les mesures $\hat{i}_1 = 50,1 \text{ mA}$, $\hat{i}_2 = 138,6 \text{ mA}$, et $\hat{i} = 187,2 \text{ mA}$, par exemple, ne mettent pas en cause l'égalité $I = I_1 + I_2$, et pourtant $\hat{i}_1 + \hat{i}_2 = 188,7 \text{ mA} \neq \hat{i} = 187,2 \text{ mA}$.

Elles sont même parfaitement compatibles avec elle puisque la différence $(\hat{i}_1 + \hat{i}_2) - \hat{i} = 1,5 \text{ mA}$ est inférieure à la seule incertitude $\Delta i = 2,0 \text{ mA}$.

Remarque 1 : Les mesures $\hat{i}$, $\hat{i}_1$ et $\hat{i}_2$ sont respectivement entachées des erreurs $\varepsilon_i = \hat{i} - I$, $\varepsilon_{i_1} = \hat{i}_1 - I_1$, et $\varepsilon_{i_2} = \hat{i}_2 - I_2$. Si les incertitudes Δi , Δi_1 et Δi_2 indiquées par le constructeur étaient effectivement les majorants respectifs de $|\varepsilon_i|$, $|\varepsilon_{i_1}|$ et $|\varepsilon_{i_2}|$, alors la somme $(\Delta i + \Delta i_1 + \Delta i_2)$, soit $(2,0 + 0,6 + 1,5) \text{ mA} = 4,1 \text{ mA}$, serait bien un majorant de la différence $(\hat{i}_1 + \hat{i}_2 - \hat{i})$. Mais ce n'est généralement pas le cas : l'expérience montre en effet que les incertitudes annoncées Δi , Δi_1 et Δi_2 ne sont pas des majorants de $|\varepsilon_i|$, $|\varepsilon_{i_1}|$ et $|\varepsilon_{i_2}|$ mais seulement les demi-largeurs d'intervalles ayant une probabilité $P < 1$ de contenir les valeurs exactes respectives I , I_1 et I_2 .

Dans ces conditions, la probabilité P' pour que l'intervalle $[-(\Delta i + \Delta i_1 + \Delta i_2), +(\Delta i + \Delta i_1 + \Delta i_2)]$ contienne la différence $(\hat{i}_1 + \hat{i}_2 - \hat{i})$ est beaucoup plus proche de l'unité que ne l'est P (par exemple $(P' = 0,999 \text{ tandis que } P = 0,95)$) à cause du caractère probabiliste de la composition des erreurs. Pour avoir $(\hat{i}_1 + \hat{i}_2 - \hat{i}) = (\Delta i + \Delta i_1 + \Delta i_2)$, par exemple, il faudrait en effet que les intensités $\hat{i}_1$ et $\hat{i}_2$ soient entachées d'erreurs positives respectivement voisines de Δi_1 et Δi_2 (ce qui est déjà fort improbable), tandis que $\hat{i}$ serait une mesure de I affectée d'une erreur négative voisine de $-\Delta i$, elle-même improbable. L'ensemble a peu de chances de se produire ce qui, mathématiquement, s'écrit $(1 - P') \ll (1 - P)$.

Cela signifie aussi que l'intervalle ayant la probabilité P de contenir la valeur de $(\hat{i}_1 + \hat{i}_2 - \hat{i})$ est plus étroit que $[-(\Delta i + \Delta i_1 + \Delta i_2), +(\Delta i + \Delta i_1 + \Delta i_2)]$. On peut montrer qu'il est de la forme $[-\delta i, +\delta i]$ avec $\delta i = \sqrt{(\Delta i)^2 + (\Delta i_1)^2 + (\Delta i_2)^2} = 2,6 \text{ mA}$.

La justification de cette expression exige des développements mathématiques absolument incompatibles avec le niveau du collège ou même celui du lycée. En revanche, au niveau des classes post-baccalauréat, une fois acquis le théorème selon lequel la variance d'une somme algébrique de variables aléatoires *indépendantes* est égale à la somme des variances de ces variables [réf. (1) page 118], cette propriété est aisément justifiable.

Au niveau du collège, il n'y a pas lieu d'évoquer le calcul de l'incertitude d'une somme algébrique à partir des incertitudes de chacun des termes de la somme.

Remarque 2 : Au collège, comme en classe de 2^{de}, où les appareils ne sont généralement pas de très grande qualité, le calcul de l'incertitude sur une mesure donnée par un appareil à l'aide de sa notice est risqué. Parfois, en effet, après un ou deux ans d'usage, les appareils de bas de gamme se dérèglent quelque peu et il arrive que la valeur exacte de la grandeur mesurée par l'un d'eux soit nettement extérieure à l'intervalle calculé d'après la notice.

Prenons un exemple réel : dans un établissement, on a placé en série 20 multimètres numériques à 2 000 points, utilisés en ampèremètres : il s'agit d'un lot d'appareils identiques, utilisés depuis plusieurs

années. Pour le calibre utilisé (200 mA), la notice commune indique que l'incertitude Δi se détermine par l'expression : $\Delta i = 1 \% VL + 1 UR$.

L'intensité mesurée I étant voisine de 96, on en déduit $\Delta i = 1,1 \text{ mA}$. Si les appareils étaient neufs, entre la plus grande et la plus petite de leurs indications, la différence ne devrait guère dépasser $2 \Delta i = 2,2 \text{ mA}$. Or, les différentes indications des appareils, rangées par ordre croissant, et exprimées en milliampères sont :

94,1 ; 94,8 ; 94,8 ; 94,9 ; 95,0 ; 95,0 ; 95,1 ; 95,1 ; 95,1 ; 95,1 ; 95,1 ; 95,2 ; 95,4 ; 97,7 ; 98,2 ; 98,4 ; 99,6 ; 99,7 ; 100,8 ; 101,5.

On constate que l'étendue $r = \hat{i}_{\max} - \hat{i}_{\min}$ est égale à 6,4 mA : elle est donc environ trois fois plus grande que ce que laissait prévoir la notice, par conséquent ces appareils ne sont plus conformes à ce que prédit cette dernière.

Sans être toujours aussi marqué que dans l'exemple précédent, le fait est tout de même assez fréquent. La meilleure solution consisterait à réétalonner les appareils lorsque, comme précédemment, leurs performances collectives réelles contredisent la notice. Sans cela, nous verrons qu'il est tout de même possible de réévaluer globalement leur incertitude.

Remarque 3 : Les incertitudes dues aux appareils peuvent se combiner avec d'autres. Supposons que l'on utilise un ohmmètre relativement neuf : lorsqu'il affiche $R = 46,82 \Omega$ la notice indique que la précision relative de cette mesure est telle que $\Delta R = 0,5 \% VL + 1 UR$, ce qui correspond à $\Delta_1 R = (0,23 + 0,01) \Omega = 0,24 \Omega$. En principe, donc, le constructeur garantit que, s'il affiche $46,82 \Omega$, l'ohmmètre a mesuré une résistance comprise entre $46,58$ et $47,06 \Omega$ (il est plus réaliste de dire que l'intervalle $\{46,58 \Omega, 47,06 \Omega\}$ a de fortes chances de contenir la valeur exacte de R). Supposons donc ceci réalisé pour une résistance "radio" à la température de la salle. Si, comme nous l'avons vu plus haut, la température de la résistance est susceptible de varier au cours de la séance de travail, l'incertitude $\Delta_2 R$ due à cette variation, dont nous avons vu qu'elle est voisine de $0,1 \Omega$, se combine à $\Delta_1 R = 0,24 \Omega$. Sauf cas particulier, le signe de la variation est *a priori* imprévisible, aussi conçoit-on que l'incertitude finale, ΔR , soit supérieure à la fois à $\Delta_1 R$ et à $\Delta_2 R$.

On en restera là. On ne posera pas, en particulier, $\Delta R = \Delta_1 R + \Delta_2 R$, ce qui conduit au résultat $R = 46,8 \Omega \pm 0,35 \Omega$, expression dans laquelle l'incertitude ΔR est généralement trop grande.

L'expression $\Delta R = \sqrt{\Delta_1 R^2 + \Delta_2 R^2}$ qui conduit à $\Delta R = 0,27 \Omega$ est plus réaliste, mais son utilisation au niveau du collège est exclue. Il reste que le résultat $R = 46,8 \Omega \pm 0,3 \Omega$ serait certainement le bon.

Remarque 4 : Tout comme des ampèremètres montés en série n'indiquent pas tout à fait la même intensité, plusieurs thermomètres, placés dans le même bain homogénéisé, n'indiquent pas rigoureusement la même température ; plusieurs balances, soumises à la même masse ou au même poids, ne donnent pas le même résultat (parfois, une même balance donne une indication qui varie légèrement avec l'endroit où l'on place la masse à mesurer), etc.

On peut profiter de ces observations pour évaluer l'ordre de grandeur de l'incertitude qui affecte une mesure d'élève quand il utilise, dans des conditions voisines, l'un de ces appareils pris au hasard. Il est alors possible d'indiquer aux élèves, sans justification, quelle incertitude ils peuvent prendre (il ne s'agit en aucune manière de leur imposer des calculs).

Exemple : supposons que le mesurage d'une même masse m , effectuée par neuf élèves différents utilisant neuf balances différentes ($n = 9$), mais de caractéristiques nominales identiques, ait donné les résultats ordonnés suivants, exprimés en grammes :

109,5 ; 109,7 ; 109,8 ; 110,0 ; 110,0 ; 110,0 ; 110,1 ; 110,1 ; 110,3.

Nous constatons qu'aucune de ces 9 mesures ne s'écarte sensiblement des autres, aussi ne peut-on suspecter aucune des balances d'être fautive. L'étendue r de ces mesures (différence entre la plus grande mesure et la plus petite), est égale à $0,8 \text{ g}$. Dans ces conditions, on peut faire admettre le résultat suivant : *lorsque l'on utilise l'une de ces balances, prise au hasard, pour mesurer une masse d'une centaine de*

grammes et que l'on trouve le résultat $m = m_i$, la valeur exacte de la masse mesurée a de fortes chances (de l'ordre de 95 sur 100) de se trouver dans l'intervalle ($m_i - 0,7 r$, $m_i + 0,7 r$).

Ici, puisque $r = 0,8$ g, nous arrondissons la quantité $0,7 r$, qui représente l'incertitude absolue sur une mesure au niveau de confiance 95 % est égale à $0,56$ g ; comme il s'agit seulement de donner des ordres de grandeur, arrondissons-la à $0,6$ g : on dira qu'il y a environ 95 chances sur cent pour que, lorsqu'un élève utilise une balance de ce type prise au hasard (parmi toutes celles qui existent et pas nécessairement dans la collection du collège) et trouve le résultat m_i , la vraie valeur de m se trouve dans l'intervalle ($m_i - 0,6$ g, $m_i + 0,6$ g). Par exemple, l'élève obtenant dans ces conditions $m_3 = 109,8$ g, peut donner comme intervalle d'incertitude ($109,2$ g, $110,4$ g) ou, mieux, écrire $m_3 = (109,8 \pm 0,6)$ g.

Donnons quelques indications sur la manière d'obtenir ce résultat : nous supposons que les neuf mesures de m sont tirées d'une population gaussienne d'écart-type σ . Dans ce cas, en moyenne, l'étendue r d'un échantillon de 9 valeurs est égale à $2,98 \sigma$ aussi estime-t-on σ par $s = r / 2,98$. L'incertitude, que l'on prend généralement égale à 2 fois l'écart-type σ , peut donc être estimée par $2 r / 2,98 = 0,67 r$, soit environ $0,7 r$.

Dans le cas de $n = 6$, nous estimons 2σ par $2 r / 2,54 \approx 0,8 r$; pour $n = 12$ par $2 r / 3,26 \approx 0,6 r$.

On peut également estimer σ à partir de l'estimateur habituel $s = \sigma_{n-1}$ (voir plus loin) : l'incertitude Δm sur une mesure, au niveau de confiance 95 %, est alors égale à $2 \sigma_{n-1}$, soit, ici, $0,48$ g. On remarque que ce résultat est proche du précédent, plus simple à mettre en œuvre, car, sans arrondi, la quantité $0,67 r$ est égale à $0,54$ g.

Remarque 5 : Si les élèves et les balances ont été supposés différents, c'est pour pouvoir considérer que les neuf mesures obtenues sont *indépendantes* : dans le cas contraire (neuf élèves mesurant successivement la masse d'un même objet avec une même balance, ou un seul élève, pouvant être très malhabile ou très adroit, effectuant neuf mesures avec des balances différentes, etc.), elles seraient plus ou moins fortement "liées", ou, en langage savant, *corrélées*. Or le coefficient $0,7$ intervenant ci-dessus suppose que les mesures sont indépendantes et, *a priori*, de même qualité. S'il n'en est pas ainsi, l'intervalle d'incertitude doit être plus ou moins élargi.

Autre exemple de mesures corrélées : une longueur L peut être considérée comme la somme de deux longueurs L_1 et L_2 . Deux élèves mesurent L_1 et obtiennent deux résultats λ'_1 et λ''_1 . Ils font alors appel à un troisième pour mesurer L_2 et celui-ci trouve λ_2 . Les sommes $\lambda' = \lambda'_1 + \lambda_2$ et $\lambda'' = \lambda''_1 + \lambda_2$ constituent bien deux mesures de $L = L_1 + L_2$, mais ce sont deux mesures corrélées et non deux mesures indépendantes.

Remarque 6 : La sensibilité d'une balance varie avec la masse qu'on mesure : notre étude ayant été menée à propos d'une masse de l'ordre de 100 grammes, l'incertitude absolue de $0,6$ g que nous avons déterminée n'est valable que pour des mesures voisines (par exemple de 80 à 120 g). Pour des masses de l'ordre de 10 grammes, par exemple, ou de 500 grammes, il faudrait recommencer l'opération et les incertitudes seraient certainement différentes.

Remarque 7 : Dans le cas précis qui vient d'être décrit, la moyenne μ des neuf mesures ($109,93$ g) constitue le meilleur résultat collectif que l'on puisse donner pour la mesure de m à l'issue de l'opération de comparaison des indications des neuf balances. La notion de moyenne étant au programme de mathématiques de la classe de 4^{ème}, on pourra, dès le collège, retenir que *la moyenne de plusieurs mesures indépendantes est le meilleur estimateur de la grandeur mesurée*.

On montre par ailleurs (voir plus loin) que la vraie valeur de la masse mesurée à l'aide des neuf balances précédentes, a de fortes chances (95 chances sur cent) d'appartenir à l'intervalle ($109,93$ g $\pm$ $0,17$ g), soit ($109,76$ g ; $110,10$ g) : *la mise en commun de plusieurs résultats indépendants améliore la précision*.

Indiquons, pour les seuls professeurs, ce sur quoi repose ce résultat :

- estimation de l'écart-type de la mesure individuelle de m : $\sigma_{n-1} = 0,224 \text{ g}$;
- estimation de l'écart-type de la moyenne μ des neuf pesées, considérée comme une nouvelle variable aléatoire :

$$\sigma_{\mu} = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{9}} = \frac{0,224 \text{ g}}{3} = 0,075 \text{ g} ;$$

- calcul de la demi-largeur de l'intervalle de confiance de μ au niveau de confiance 95% :

$$\Delta\mu = t \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{9}} = 2,31 \times 0,075 \text{ g} = 0,17 \text{ g} .$$

Dans cette expression, t est le coefficient de Student correspondant à 9 mesures et $P = 0,95$ (cf. *annexe 4*).

La plupart des considérations qui précèdent sont bien entendu au seul usage des professeurs. Au cours de cette première étape de sensibilisation aux résultats de mesure, il importe surtout d'être attentif à la notion de chiffres significatifs et à la cohérence des résultats de certains calculs. A l'occasion de telle ou telle manipulation, on pourra mettre en évidence que certaines grandeurs sont définies avec une certaine imprécision (hauteur d'une colonne de liquide dans un tube, distance focale d'une lentille en lumière blanche...), tandis que d'autres peuvent légèrement varier en fonction de paramètres physiques non maîtrisés : on en déduira le nombre de chiffres significatifs à conserver. Mais ceci ne fera pas l'objet d'un cours. De même c'est lorsque l'occasion se présentera, c'est-à-dire peut-être une ou deux fois dans l'année, que l'on effectuera plusieurs mesures indépendantes d'une même grandeur dans le but de mettre en évidence la dispersion naturelle des mesures. Une telle occasion permet *au professeur* d'évaluer l'incertitude sur une mesure individuelle. En outre, si la grandeur mesurée présente de l'intérêt, il faut en profiter pour l'estimer par la *moyenne* des mesures, celles-ci étant indépendantes et effectuées dans les mêmes conditions : on sera généralement surpris de la précision d'une telle évaluation.

Quelques précisions supplémentaires (ou rappels) pour les professeurs

Les erreurs les plus petites sont plus probables

On rappelle que la mesure $\hat{a}$ d'une grandeur a de valeur exacte A comporte généralement une erreur $\varepsilon_a = \hat{a} - A$, que celle-ci soit due aux appareils, au manipulateur ou à la méthode employée ; cela se traduit par une incertitude "multifactorielle" Δa sur les mesures individuelles obtenue en classe et conduit à l'écriture $a = \hat{a} \pm \Delta a$, sachant que l'intervalle $[\hat{a} - \Delta a, \hat{a} + \Delta a]$ doit avoir une probabilité P de contenir A . Cette probabilité est en général de 95 %, mais on peut désirer qu'elle soit portée à 99 %. On comprend que l'incertitude Δa est d'autant plus grande que P est proche de l'unité. Dans ce qui suit, sauf mention contraire, nous nous placerons toujours dans le cas où $P = 95 \%$.

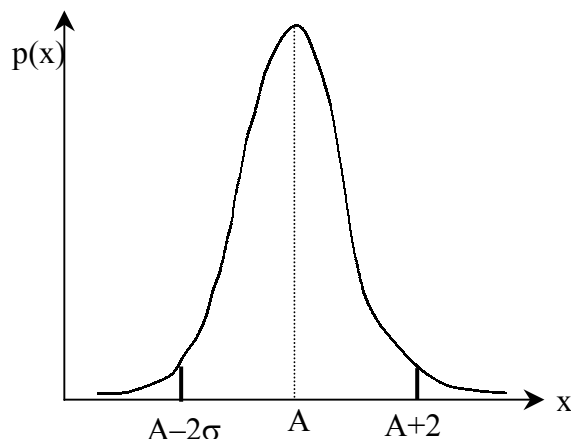


Figure 2

L'erreur ε_a est inévitable ; sa valeur absolue est, en général, nettement inférieure à Δa , puisque l'inégalité $|\varepsilon_a| > \Delta a$ n'est réalisée que dans 5 % des cas seulement (par exemple).

Le plus important, dans la distribution de Gauss, qui est celle de la répartition de la majorité des erreurs aléatoires, c'est qu'elle est décroissante de part et d'autre de sa valeur moyenne X (inconnue) qui, en l'absence d'erreur systématique, est censée représentée la valeur exacte cherchée. Autrement dit, les petites erreurs sont plus probables (et plus donc plus fréquentes) que les grandes. C'est cette notion qui est à la base de la théorie moderne des incertitudes et qui s'oppose de manière irréconciliable avec l'ancien "calcul d'incertitudes".

La notion de mesures "indépendantes"

Les théories simplifiées qui justifient nos règles et nos calculs, supposent que les différentes mesures que nous utilisons pour estimer une grandeur A et calculer son intervalle de confiance ΔA à un niveau de confiance donné P (vocabulaire voisin du précédent et synonyme), sont indépendantes. L'indépendance des mesures est une notion assez difficile à percevoir sur le terrain. De nombreux professeurs ne débusquent pas assez vite le fait que des erreurs soient liées (et donc que les mesures correspondantes ne soient pas indépendantes) et chaque fois que l'on m'a signalé que mon point de vue "ne marchait pas", c'était, en fait parce qu'au départ, les mesures n'étaient pas indépendantes.

Nous allons nous appuyer sur un exemple pour tenter d'y voir plus clair à ce sujet.

Deux tensions continues voisines V_1 et V_2 , bien définies, ont été mesurées à l'aide d'une collection de 19 multimètres de bonne qualité, ces appareils, utilisés depuis plusieurs années, n'ont jamais été recalibrés. Voici les résultats obtenus, exprimés en volts :

	V_1	V_2	$V_1 - V_2$	$V_1 + V_2$
1	16,82	15,09	1,73	31,91
2	16,91	15,17	1,74	32,08
3	16,85	15,11	1,74	31,96
4	16,97	15,23	1,74	32,20
5	16,71	14,96	1,75	31,67
6	16,84	15,11	1,73	31,95
7	16,87	15,13	1,74	32,00
8	16,95	15,21	1,74	32,16
9	16,92	15,18	1,74	32,10
10	16,89	15,15	1,74	32,04
11	16,69	14,97	1,72	31,66
12	16,74	15,03	1,71	31,77
13	16,88	15,15	1,73	32,03
14	16,86	15,12	1,74	31,98
15	16,66	14,95	1,71	31,61
16	16,83	15,10	1,73	31,93
17	16,84	15,11	1,73	31,95
18	16,87	15,13	1,74	32,00
19	17,07	15,32	1,75	32,39

Nous allons étudier ces séries de 19 mesures.

La moyenne des mesures de V_1 est 16,85 V.

Celle des mesures de V_2 est 15,12 V.

La moyenne de la différence $V_1 - V_2$ est évidemment égale à la différence des moyennes, soit 1,73 V et la moyenne de la somme est égale à la somme des moyennes, soit 31,97 V.

L'écart-type σ_{v_1} de la série des V_1 est de 97 mV ; celui de la série des V_2 , σ_{v_2} , vaut 90 mV. Mais l'écart-type σ_d de la différence $V_1 - V_2$ n'est que de 11 mV, alors que σ_s , écart-type de la somme $V_1 + V_2$ est égal à 187 mV !

Plusieurs tests (graphiques, comme ceux de Henry et de Dixon, ou numériques comme celui de Shapiro-Wilk) montrent en outre que les échantillons de 19 mesures V_1 ou V_2 peuvent être considérés comme tirés de populations normales [norme X 06-050]. C'est aussi le cas du logiciel « Incertitudes de mesure » distribué par le CNDP.

Constatons tout d'abord que les appareils étudiés peuvent encore être considérés comme bons : si l'on prend comme incertitude ΔV_1 sur une mesure unique la quantité $2 \sigma_{v_1}$, on trouve $\Delta V_1 \approx 0,2$ V, ce qui correspond à une incertitude relative $\Delta V_1 / V_1 = 1,2 \times 10^{-2}$, tandis que, dans les mêmes conditions, $\Delta V_2 / V_2 = 1,3 \times 10^{-2}$.

En revanche, l'indication de la notice, spécifiant que l'incertitude est égale à 0,15 % de la valeur affichée augmentée de la valeur correspondant à un digit, soit 35 mV pour V_1 et 33 mV pour V_2 , n'est plus d'aucune actualité : ces quantités doivent être multipliées par trois !

Nous pouvons encore observer que la différence $V_1 - V_2$ et la somme $V_1 + V_2$ sont fournies avec la même précision relative que chacune des tensions V_1 ou V_2 (l'incertitude relative sur $V_1 - V_2$, comme celle sur $V_1 + V_2$, vaut $1,3 \times 10^{-2}$). **Les mesures de V_1 et V_2 effectuées avec le même appareil, sont en effet liées** : on ne peut donc pas leur appliquer les règles de composition des incertitudes absolues des variables aléatoires indépendantes.

Au demeurant, la mesure de $V_1 - V_2$ est bien plus précise en utilisant le même appareil pour mesurer V_1 et V_2 qu'en prenant un appareil pour mesurer V_1 et un autre pour mesurer V_2 . Dans les mêmes conditions, la mesure de $V_1 + V_2$, elle, est moins précise.

Montrons-le simplement : tirons au sort, pour chaque mesure de V_1 par un appareil, le numéro de l'appareil qui donnera V_2 . Un tirage a donné le résultat suivant :

V_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
V_2	15	1	12	3	9	17	6	11	19	14	13	10	7	18	8	2	5	16	4

Ainsi la différence $V_1 - V_2$ et la somme $V_1 + V_2$ seront évaluées en prenant pour V_1 l'indication de l'appareil n°1 et pour V_2 celle de l'appareil n°15, puis on recommence ensuite avec les couples d'appareils 2 et 1, 3 et 12, etc. Autrement dit remplaçons les mesures liées V_1 et V_2 par des mesures indépendantes.

Les résultats que l'on obtient sont portés sur le tableau suivant :

	V_1	V_2	$V_1 - V_2$	$V_1 + V_2$
1- 15	16,82	14,95	1,87	31,77
2- 1	16,91	15,09	1,82	32,00
3- 12	16,85	15,03	1,82	31,88
4-3	16,97	15,11	1,86	32,08
5-9	16,71	15,18	1,53	31,89
6-17	16,84	15,11	1,73	31,95
7-6	16,87	15,11	1,76	31,98
8-11	16,95	14,97	1,98	31,92
9-19	16,92	15,32	1,60	32,24
10-14	16,89	15,12	1,77	32,01
11-13	16,69	15,15	1,54	31,84
12-10	16,74	15,15	1,59	31,89
13-7	16,88	15,13	1,75	32,01
14-18	16,86	15,13	1,73	31,99
15-8	16,66	15,21	1,45	31,87
16-2	16,83	15,17	1,66	32,00
17-5	16,84	14,96	1,88	31,80
18-16	16,87	15,10	1,77	31,97
19-4	17,07	15,23	1,84	32,30

Les écarts-types σ_{v_1} et σ_{v_2} sont toujours égaux, respectivement à 97,2 et 90,3 mV ; mais cette fois-ci, l'écart-type σ_d de la différence, qui était de 11 mV lorsque les mesures de V_1 et V_2 étaient liées, devient égal à 136 mV. En revanche, celui de la somme, σ_s , régresse de 187 mV à 130 mV.

Or : $\sqrt{97,2^2 + 90,3^2} = 133 \text{ mV}$; on a donc maintenant : $\sigma_d \approx \sigma_s \approx \sqrt{\sigma_{v_1}^2 + \sigma_{v_2}^2}$.

On constate donc, sur ce cas particulier, qu'il faut être très attentif au fait que des mesures soient indépendantes ou non, puisqu'en effectuant des différences de mesures indépendantes, on a multiplié par 12 l'écart-type de la différence $V_1 - V_2$ et fortement réduit celui de la somme $V_1 + V_2$. À l'évidence, les mesures V_1 et V_2 de chaque multimètre sont affectées d'erreurs voisines : l'opération différence élimine en grande partie ces erreurs ; l'opération somme, elle, les ajoute.

On constate aussi que les écarts-types σ_d et σ_s sur les séries de différences ou de sommes de deux mesures indépendantes sont très proches de la somme quadratique des écarts-types σ_{v_1} et σ_{v_2} . Dépendant du hasard, car il existe $19! \approx 1,2 \times 10^{17}$ manières d'apparier les appareils, σ_d , par exemple, peut certes varier entre les valeurs extrêmes 11 mV (lorsque V_1 et V_2 sont liées, ce qui correspond à une probabilité de 10^{-17}) et 184 mV (lorsqu'à la plus grande valeur de V_1 on fait correspondre la plus petite valeur de V_2 et vice versa, etc., situation de probabilité là encore voisine de 10^{-17}), mais, pour la plupart des combinaisons possibles, sa valeur est proche de 0,13 V.

Un autre appariement, dû lui aussi au hasard, conduisant aux couples d'appareils (1,4) ; (2,2) ; (3,17) ; (4,15) ; (5,1) ; (6,9) ; (7,6) ; (8,16) ; (9,5) ; (10,18) ; (11,8) ; (12,12) ; (13,7) ; (14,10) ; (15,11) ; (16,14) ; (17,13) ; (18,19) et (19,3) conduit à $\sigma_d = 134 \text{ mV}$ et $\sigma_s = 131 \text{ mV}$, ce qui est encore plus proche de la relation théorique qui correspond aux grands nombres de mesures.

C'est l'addition quadratique des écarts-types, jointe à l'hypothèse de normalité, qui conduit à l'addition quadratique des incertitudes absolues dans le cas d'une somme ou d'une différence de grandeurs indépendantes.

Intérêt de la notion d'écart-type

La notion d'écart-type permet de comparer, par exemple, les indications de deux séries de multimètres : supposons que le professeur dispose d'une ligne sèche permettant d'alimenter chaque poste de travail avec un même générateur de tension. Chaque groupe d'élèves (repéré par le nombre n variant par exemple de 1 à 9) dispose de deux multimètres, un appareil A_n "grand public", de faible coût, et un véritable appareil de mesure, B_n .

On relève les 9 indications A_n , les 9 indications B_n et on calcule les écarts-types σ_A et σ_B .

Si le premier de ces écarts-types est comparable au second (si σ_A ne dépasse pas l'ordre de grandeur $1,5 \sigma_B$), on se réjouit d'avoir des appareils peu coûteux et pourtant de bonne qualité. Mais si $\sigma_A > 2,5 \sigma_B$, on peut sans grand risque de se tromper, affirmer que les appareils de type A sont moins précis que ceux du type B (des tables, dites de Fisher, permettent de décider, en fonction de critères quantitatifs, si le rapport des écarts-types peut être considéré comme significatif, nous en dirons un mot en annexe 8).

Il peut arriver que l'on soit en mesure de mesurer collectivement une même grandeur à l'aide d'appareils différents et par des élèves différents (on obtient ainsi un nombre n de mesures indépendantes voisin de 10) : on calcule alors la moyenne m des n mesures et leur écart-type σ . Ces résultats permettent de répondre à plusieurs questions :

a) La moyenne m est alors le meilleur estimateur de la valeur de la grandeur mesurée.

b) On peut présenter l'intervalle $(m - 2 \sigma, m + 2 \sigma)$ comme l'intervalle de confiance d'une mesure individuelle, à un niveau voisin de 95 %.

Nous pouvons en effet reprendre à notre compte la phrase un peu vague qui était insérée dans les programmes précédents de mathématiques, selon laquelle, "dans de nombreux phénomènes, le pourcentage de mesures appartenant à l'intervalle $(m - 2 \sigma, m + 2 \sigma)$ ou $(m - 3 \sigma, m + 3 \sigma)$ est voisin de 95 % ou 99 %".

Supposons que nous disposions de nombres au hasard tirés d'une population gaussienne centrée sur la valeur X et d'écart-type σ . Constituons des échantillons de 9 nombres (par exemple) pris au hasard : $x_1, x_2, x_3, \dots, x_9$; calculons pour chacun de ces échantillons l'estimateur σ_{n-1} qui sera défini plus loin, puis cherchons si les intervalles $[x_i - 1,96 \sigma_{n-1} ; x_i + 1,96 \sigma_{n-1}]$ contiennent X . En général, la réponse est positive, mais il arrive que pour une valeur x_i , parfois deux, ce ne soit pas le cas. Re commençons l'opération un grand nombre de fois, par exemple 100 fois. On constate alors que sur 900 nombres utilisés ($9 \times 100 = 900$), 45 intervalles environ, soit 5 % d'entre eux, ne contiennent pas X .

C'est ce résultat, avéré, qui a été transposé ci-dessus au cas des erreurs de mesures physiques, en remplaçant le coefficient 1,96 par 2 et σ_{n-1} par " σ ". Rappelons encore que cette transposition suppose que les erreurs se répartissent selon une loi gaussienne et que le procédé de mesure ne comporte pas d'erreur systématique.

c) On peut aussi se demander quel est l'ordre de grandeur de l'incertitude qui affecte, non pas une mesure unique, comme précédemment, mais la moyenne m de n mesures indépendantes. L'idée importante, c'est que si les mesures individuelles constituent des variables aléatoires de moyenne A et d'écart-type σ_a , alors la moyenne de n mesures indépendantes est elle-même une variable aléatoire de même moyenne A (on dit plutôt d'espérance mathématique A) et d'écart-type $\sigma_m = \frac{\sigma_a}{\sqrt{n}}$.

Dans ces conditions, si n est supérieur à 20, le fait de prendre comme estimateur d'une grandeur mesurée, non pas une mesure unique mais la moyenne m des n mesures indépendantes de même type, améliore la précision d'un facteur proche de $\sqrt{n}$. Dans le cas où n est nettement inférieur à 20, ce facteur est un peu inférieur à $\sqrt{n}$ (voir l'annexe 4) mais on peut retenir que :

L'incertitude sur la moyenne m , à un niveau de confiance de 95%, est proche de $\frac{2\sigma}{\sqrt{n}}$

d) Plaçons une dizaine d'ampèremètres en série (ou des voltmètres en parallèle) et relevons les indications de ces appareils. On obtient une série statistique dont on calcule l'écart-type σ_n . Il est utile de comparer σ_n à l'incertitude annoncée par le constructeur : souvent celle-ci est voisine de $2\sigma_n$, ce qui correspond à un niveau de confiance P proche de 95 %.

Mais, comme nous l'avons vu précédemment, cette incertitude annoncée est parfois nettement insuffisante. Il arrive qu'elle soit inférieure à σ_n ($P < 68\%$). Pour des appareils de qualité, en revanche, elle représente parfois plus de $3\sigma_n$ ($P > 99,7\%$) : dans ce cas elle est pratiquement un majorant de la valeur absolue de l'erreur (ce qui ne rend pas pour autant légitime les calculs d'incertitudes d'autrefois).

Ce qui peut être présenté en première et terminale scientifiques ou industrielles

Réflexions et activités spécifiques à la classe de 1^{ère}

Il faut expliquer fermement aux élèves que la possibilité de répéter des mesures ne doit en aucune manière constituer un prétexte à de mauvaises mesures initiales ou à l'utilisation de méthodes peu précises, car cette répétition, coûteuse et consommatrice de temps, ne permet souvent pas de rattraper la précision perdue au départ.

En utilisant leur calculatrice, les élèves peuvent aussi comprendre, dans un cas particulier, comment les erreurs entachant les mesures primaires se propagent dans les calculs (il ne peut s'agir que d'une sensibilisation, si le niveau de la classe le permet).

Donnons un exemple : en chauffant un mélange de cuivre de masse m_1 et de poudre de soufre (en excès), les élèves obtiennent un produit d'aspect métallique de masse m_2 dont ils doivent déterminer la formule stœchiométrique Cu_nS (en supposant qu'elle existe).

Supposons qu'un élève prenne $m_1 = 2,00$ g de cuivre. Si le sulfure formé est bien Cu_2S , il devrait trouver $m_2 = 2,505$ g. Or le coefficient stœchiométrique n est donné par l'expression :

$$n = \frac{32,1}{63,5} \times \frac{m_1}{m_2 - m_1}$$

Le professeur, lui, sait, à partir de cette expression, établir la relation :

$$\frac{dn}{n} = \frac{m_2}{m_2 - m_1} \times \left(\frac{dm_1}{m_1} - \frac{dm_2}{m_2} \right) \approx 5 \times \left(\frac{dm_1}{m_1} - \frac{dm_2}{m_2} \right)$$

Mais, par de petits calculs de variations effectués à la machine, en remplaçant m_1 et m_2 par des valeurs proches, un élève de première, de son côté, peut très bien *constater* que des erreurs δm_1 et δm_2 commises sur m_1 et m_2 (respectivement), entraînent une erreur δn sur n telle que :

$$\frac{\delta n}{n} \approx 5 \times \left(\frac{\delta m_1}{m_1} - \frac{\delta m_2}{m_2} \right)$$

Par exemple, si $m_1 = 2,02$ g au lieu de 2,00 g, on a $\delta m_1 / m_1 = 1\%$. En remplaçant m_1 par cette valeur dans l'expression donnant n (et en conservant $m_2 = 2,505$ g), on trouve $n = 2,10$ ce qui correspond à une variation δn telle que $\delta n / n = 5\% = 5 \delta m_1 / m_1$. De même, pour $m_1 = 2,00$ g et $m_2 = 2,530$ g ($\delta m_2 / m_2 = 1\%$), on trouve $n = 1,907$, soit une variation δn telle que $\delta n / n \approx -5\% = -5 \delta m_2 / m_2$.

L'expression précédente montre donc qu'il faut être soigneux dans les mesures de m_1 et m_2 car une erreur de 2,5 % par excès sur m_1 combinée à une erreur par défaut de 2,5 % sur m_2 , par exemple, entraîne une valeur de n supérieure à 2,5 et donc une erreur sur le coefficient stœchiométrique n , car on prendra alors $n = 3$ au lieu de $n = 2$.

Heureusement, les mesures de m_1 et de m_2 étant effectuées avec la même balance, nous avons vu, à propos des voltmètres (§ 3.2), qu'elles sont corrélées par l'appareil : $\frac{\delta m_1}{m_1}$ et $\frac{\delta m_2}{m_2}$, assez fortement liées, ont ainsi de fortes chances d'être de même signe.

Cela explique le succès de cette manipulation qui est souvent réalisée en classe.

La simulation numérique, à l'aide de nombres au hasard à répartition gaussienne, peut être utilisée pour familiariser les élèves avec certains phénomènes.

Supposons par exemple que l'on dispose de mille nombres x_i répartis de manière normale autour de zéro, avec un écart-type σ égal à l'unité. Pour obtenir des nombres répartis autour de $X = 85$ avec $\sigma' = 3$, par exemple, il suffit de transformer les nombres x_i en y_i tels que $y_i = 85 + 3 x_i$: on peut donc obtenir n'importe quelle population gaussienne.

On peut ainsi simuler un produit de grandeurs U et I affectées d'erreurs aléatoires à répartition gaussienne comme $P = U I$, ou un quotient comme $R = \frac{U}{I}$ et comparer $\frac{\sigma_P}{P}$ ou $\frac{\sigma_R}{R}$, quantités calculées *a posteriori* sur une centaine de cas, à $\frac{\sigma_U}{U}$ et $\frac{\sigma_I}{I}$ quantités connues.

$$\text{On constatera ainsi que : } \frac{\sigma_P}{P} = \frac{\sigma_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2}.$$

Ce résultat particulier étant indépendant du type de distribution utilisée, il n'est pas nécessaire que les nombres au hasard considérés soient tirés d'une distribution gaussienne ; des nombres issus d'une répartition uniforme sur un intervalle donné conviennent aussi bien.

Ce qui devrait être acquis en terminale

Variable aléatoire, estimation de sa moyenne

La notion de variable aléatoire figure au programme de mathématiques, avec ses corollaires : fonction de répartition, écart-type, etc. On en profite pour présenter, en utilisant un vocabulaire correct, le caractère probabiliste de certaines erreurs : si l'on mesure une grandeur X , inconnue, à l'aide d'une méthode ne comportant pas d'erreur systématique, chaque mesure est assimilable à la valeur prise par une variable aléatoire x centrée sur X , c'est-à-dire que sa moyenne, ou espérance mathématique $E(x)$, vérifie l'égalité $E(x) = X$.

Un ensemble, appelé échantillon de n mesures indépendantes x_i , obtenues en utilisant la même méthode et du matériel comparable, une fois débarrassé des mesures manifestement fausses (TP "collectif"), permet d'estimer X par la moyenne m des x_i : c'est le meilleur estimateur de X (voir annexe 2).

Par exemple, la détermination de la masse de Jupiter par l'analyse du mouvement de ses satellites, à partir de mesures de distances effectuées sur des photocopies de documents annotés (afin de déterminer le diamètre de chaque orbite de satellite et sa période de révolution) conduit à des résultats individuels qui peuvent être décevants pour tel ou tel élève. En revanche, pour un groupe d'une douzaine d'élèves travaillant indépendamment, le résultat collectif devient satisfaisant car l'erreur relative de la détermination collective peut être inférieure à 5 %.

Estimation de l'écart-type

On peut dire aux élèves que la théorie mathématique permet de montrer que le meilleur *estimateur* de l'écart-type de la variable aléatoire x n'est pas σ , l'écart-type de la série statistique des x_i obtenue (parfois appelé σ_n), mais σ_{n-1} (ou s_n) qui figure également dans la liste des fonctions pré-programmées des calculatrices de poche, d'où l'emploi de cette grandeur (*se reporter aux annexes 2 et 3*).

Intervalle de confiance

Lorsque la séance de travaux pratiques se prête à une exploitation collective des résultats et qu'une même grandeur a été mesurée par plusieurs groupes d'élèves (n), le calcul de la moyenne m des mesures et de l'estimateur σ_{n-1} de leur écart-type permet d'aller plus loin dans le seul but de conclure la séance par une estimation vraisemblable de l'incertitude de la mesure collective.

Cela conduit souvent à proposer, pour cette moyenne, un intervalle de confiance qui est généralement assez réduit pour que les élèves considèrent leur travail collectif comme gratifiant.

Dans l'hypothèse où toute erreur systématique a été écartée et où les mesures individuelles x_i sont réparties selon une loi gaussienne, on établit en effet en mathématiques que, pour un niveau de confiance donné (95 % ou 99 %), l'intervalle de confiance de la grandeur X mesurée en commun est de la forme (*annexe 4*) :

$$\left[m - t_n \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}, m + t_n \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \right]$$

Le coefficient t_n est appelé coefficient de Student ; il dépend du niveau de confiance choisi et du nombre n ; ainsi, pour n variant de 7 à 12, t_n est un peu plus grand que 2 pour un niveau de confiance de 95 % et un peu plus grand que 3 pour un niveau de confiance de 99 %, comme le montre le tableau ci-dessous où figurent, pour des valeurs du nombre n des mesures indépendantes, les valeurs de t correspondant à deux niveaux de confiance :

n	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	20
$t_{95\%}$	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26	2,20	2,16	2,13	2,09
$t_{99\%}$	9,93	5,84	4,60	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25	3,11	3,01	2,95	2,86

Remarque : il est exclu que cette estimation donne l'occasion d'un exposé mathématique et encore moins qu'elle fasse l'objet d'une mémorisation. Ce qui importe, c'est de remarquer ce qui, après tout, relève du bon sens, que pour un même nombre n de mesures indépendantes, le coefficient t_n augmente avec le niveau de confiance souhaité.

Quant à la dépendance de la largeur de l'intervalle de confiance par rapport à n , elle vient essentiellement non du coefficient de Student, mais comme nous l'avons déjà vu, du facteur $\sqrt{n}$ qui divise σ_{n-1} .

Sachant, en effet que l'écart-type σ_m de notre résultat de mesure, m , est estimé par la quantité $\frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$, on constate que pour $n > 10$, l'intervalle de confiance au niveau de confiance 95 % défini ci-dessus, pour lequel t_n est alors très voisin de 2, est bien celui que prévoit, pour les incertitudes de mesures industrielles, la norme ISO 9000, à savoir $m \pm 2 \sigma_m$.

Mais, justement, dans la norme ISO 9000, on recommande de calculer σ_{n-1} " à partir d'un minimum de 10 mesures de « répétabilité » de l'ensemble du processus de mesure, dans le cas de variables indépendantes ".

C'est donc uniquement parce que nous, en classe, ne pouvons pas toujours disposer d'un minimum de 10 mesures que nous faisons appel aux coefficients de Student. Il est tout à fait possible de donner les valeurs de ces coefficients en début d'année scolaire, en faisant remarquer aux élèves que l'on pourrait s'en passer si l'on disposait toujours d'une vingtaine de mesures indépendantes.

En terminale, l'usage du logiciel « Incertitudes de mesure » édité par le CNDP, qui reprend exactement les idées exposées ci-dessus, simplifie beaucoup leur mise en œuvre.

Les chiffres significatifs à conserver

On pourrait aider les élèves à exprimer un résultat final sous la forme $a = \hat{a} \pm \Delta a$, en leur proposant les critères suivants (*annexe 5*) :

- la suppression d'un chiffre significatif sur Δa et l'arrondi correspondant ne doit pas entraîner pour cette incertitude une modification supérieure à 4 % (ou 5 % à la rigueur).
- la suppression d'un chiffre significatif sur $\hat{a}$ et l'arrondi correspondant ne doit pas entraîner une translation de l'intervalle de confiance supérieure à $0,2 \Delta a$.

D'après la première de ces règles, *l'incertitude sur une mesure s'exprime toujours avec au plus deux chiffres significatifs* ; la deuxième qui, comme la première, se justifie par des considérations de niveau de confiance, conforte le bon sens : si le fait de supprimer un chiffre significatif entraîne une erreur d'écriture égale au cinquième de l'incertitude, c'est payer trop cher la simplification recherchée.

Mais comme cela peut paraître encore un peu compliqué on peut simplifier ces critères sans trop les dénaturer et adopter le comportement suivant :

L'incertitude Δa s'exprime avec deux chiffres significatifs (au maximum) ; les derniers chiffres significatifs conservés pour l'estimateur $\hat{a}$ sont ceux sur lesquels porte Δa .

Ainsi le résultat $m = (98,486 \pm 1,573) \text{ g}$ s'écrira : $m = (98,5 \pm 1,6) \text{ g}$.

Annexes

Annexe 1 : variables aléatoires indépendantes

Soit une variable aléatoire x_1 , qui peut être le résultat de la mesure d'une grandeur X parfaitement définie par une certaine méthode M_1 . Si cette méthode ne comporte pas d'erreur systématique, $E(x_1) = X$ où $E(x_1)$ est l'espérance mathématique de x_1 que l'on peut approcher en faisant la moyenne d'un très grand nombre N de tirages successifs de x_1 .

Posons $\varepsilon_1 = x_1 - X$: ε_1 est une variable aléatoire centrée, d'espérance mathématique nulle : $E(\varepsilon_1) = 0$.

Procédons de même pour une deuxième variable aléatoire x_2 telle que $E(x_2) = X$, x_2 peut être la mesure de X par une deuxième méthode M_2 . Là encore, posons $\varepsilon_2 = x_2 - X$:

Les variables aléatoires x_1 et x_2 sont indépendantes si $E(\varepsilon_1 \times \varepsilon_2) = 0$.

En pratique, si les expressions de x_1 et de x_2 ne comportent pas de terme commun, il s'agit de variables aléatoires indépendantes (conduisant donc à des mesures indépendantes). En revanche, si on peut écrire, par exemple, $x_1 = a + b$ et $x_2 = a + c$ (cf. remarque 5, § 2.), les termes a , b et c étant eux-mêmes des variables aléatoires, alors x_1 et x_2 sont (partiellement) corrélées.

De même, soit, avec des notations évidentes, $R_1 = \frac{U_1}{I_1}$, $R_2 = \frac{U_1}{I_2}$, $R_3 = \frac{U_2}{I_1}$ et $R_4 = \frac{U_2}{I_2}$.

Seules deux de ces mesures sont indépendantes (par exemple R_1 et R_4) ; les deux autres leur sont partiellement corrélées.

Remarque : Si x_1 et x_2 sont indépendantes et d'écart-types respectifs σ_1 et σ_2 , l'écart-type σ_d de la différence $x_d = x_1 - x_2$ et celui de la somme $x_s = x_1 + x_2$ sont tous deux égaux à $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$. C'est un excellent test pour débusquer des corrélations entre variables.

Annexe 2 : les estimateurs

Un estimateur comme la moyenne m d'un échantillon ou l'écart-type σ_n de cet échantillon est lui-même une variable aléatoire, puisque, si l'on change d'échantillon, on trouve en général une autre valeur pour chacune de ces grandeurs.

On demande avant tout à un estimateur d'être "sans biais" : ceci est réalisé lorsque son espérance mathématique (ou moyenne calculée à partir d'un grand nombre d'échantillons) est précisément égale à la grandeur estimée. Ce n'est pas le cas de l'estimateur σ_n dont nous verrons dans l'annexe 3 que la moyenne sur un grand nombre d'échantillons ne donne pas σ , l'écart-type de la variable aléatoire initiale, mais une valeur plus petite : σ_n est donc un estimateur biaisé.

D'où l'emploi de σ_{n-1} qui, lui, est considéré comme sans biais (en toute rigueur, c'est son carré qui est sans biais). Il s'obtient en divisant, avant d'en prendre la racine carrée, la somme des carrés des écarts à la moyenne m , non par n , comme pour σ_n , mais par $n-1$.

La moyenne arithmétique m d'une série de n mesures x_i tirées d'une population considérée comme infinie et de moyenne générale X , est un estimateur sans biais de X : elle a même espérance mathématique X que les x_i .

On dit que m est le meilleur estimateur de X car l'autre qualité demandée à un estimateur est d'avoir un écart-type aussi faible que possible. Or, de tous les estimateurs sans biais de X que l'on peut réaliser à l'aide de combinaisons linéaires et homogènes de n variables primaires x_i identiques, la moyenne arithmétique m est celui dont l'écart-type est le plus faible ($\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$).

Annexe 3 : le cas particulier de σ_{n-1}

Il n'y a rien de magique dans le fait de remplacer n par $n-1$ au dénominateur de l'expression qui donne l'expression de l'écart-type d'un échantillon en vue d'obtenir un estimateur sans biais de l'écart-type σ . Rien non plus d'absolument parfait, comme nous allons le voir.

Soit x_i les valeurs prises par n variables aléatoires gaussiennes indépendantes d'espérance mathématique X et d'écart-type σ , lors d'un tirage unique de chacune d'elles. Nous désignons par m leur moyenne : celle-ci, nous le savons, est elle-même une variable aléatoire d'espérance mathématique X et d'écart-type $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$.

Nous nous intéressons à la quantité $S^2 = \sum (x_i - m)^2$.

$$S^2 = \sum x_i^2 - 2m \sum x_i + n m^2 ; \text{ or } \sum x_i = n m \text{ par définition de } m ; \text{ donc } S^2 = \sum x_i^2 - n m^2.$$

Mais $x_i = X + \varepsilon_i$, avec $E(\varepsilon_i^2) = \sigma^2$ et $m = X + \varepsilon_m$, avec $E(\varepsilon_m^2) = \sigma^2/n$.

Donc : $S^2 = n X^2 + 2 X \sum \varepsilon_i + \sum \varepsilon_i^2 - n X^2 - 2 n X \varepsilon_m - n \varepsilon_m^2$.

Soit encore : $S^2 = 2 X \sum \varepsilon_i + \sum \varepsilon_i^2 - 2 n X \varepsilon_m - n \varepsilon_m^2$.

Calculons l'espérance mathématique de S^2 , notée $E(S^2)$, autrement dit, la moyenne de cette quantité quand on recommence l'opération d'échantillonnage un grand nombre de fois :

$$E(S^2) = 2 X \sum E(\varepsilon_i) + \sum E(\varepsilon_i^2) - 2 n X E(\varepsilon_m) - n E(\varepsilon_m^2) = \sum E(\varepsilon_i^2) - n E(\varepsilon_m^2).$$

En effet $E(\varepsilon_i) = E(\varepsilon_m) = 0$ puisque $E(x_i) = E(m) = X$.

En remplaçant $E(\varepsilon_i^2)$ et $E(\varepsilon_m^2)$ par leurs valeurs respectives σ^2 et σ^2/n on trouve donc :

$$E(S^2) = n \sigma^2 - \sigma^2 = (n-1) \sigma^2.$$

La quantité qui a pour espérance mathématique σ^2 n'est donc pas $\frac{S^2}{n}$ mais $\frac{S^2}{n-1}$.

En toute rigueur, c'est donc la variance σ^2 dont l'estimateur sans biais est $\frac{S^2}{n-1} = \frac{\sum (x_i - m)^2}{n-1}$.

Mais $\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n-1}}$, à défaut d'être vraiment sans biais, est le meilleur estimateur de σ .

Remarque : cette démonstration est indépendante de la loi de répartition des variables aléatoires x_i .

Annexe 4 : le coefficient t de Student

Rappelons que si les x_i sont n variables aléatoires gaussiennes de même espérance mathématique X et de même écart-type σ , leur moyenne arithmétique m est elle-même une variable aléatoire gaussienne, d'espérance mathématique X et d'écart-type $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$.

Quant au coefficient $t = \frac{X - m}{\frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}}$, il suit une loi de Student à $n-1$ degrés de liberté.

Ce sont ces résultats mathématiques qui fondent la règle de calcul d'un intervalle de confiance centré sur la moyenne m pour un niveau de confiance donné, car la définition de t équivaut à $X = m \pm t \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$.

On trouvera un tableau des valeurs de la variable aléatoire t de Student par exemple dans le recueil de normes de la statistique de l'AFNOR (norme NF 06 041). La loi de Student est en effet essentielle pour les échantillons d'effectifs inférieurs ou égaux à 16. Elle fut découverte par Gosset, lequel publia ses travaux sous le pseudonyme de "Student" au début du XX^e siècle.

Nous redonnons un tableau simplifié des t correspondant aux niveaux de confiance 95 % et 99 %, c'est-à-dire aux probabilités 0,95 et 0,99 pour l'intervalle, de contenir la vraie valeur cherchée X :

n	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	20
t _{95%}	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26	2,20	2,16	2,13	2,09
t _{99%}	9,93	5,84	4,60	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25	3,11	3,01	2,95	2,86

Remarque : on entend parfois dire la sottise suivante : les grands échantillons suivent la loi de Gauss, tandis que les petits obéissent à la loi de Student, ou bien celle-ci : les résultats individuels de la mesure d'une grandeur suivent une loi de Gauss mais la moyenne d'un petit nombre de résultats obéit à une loi de Student. La première de ces assertions ne veut rien dire : quelle est la variable aléatoire considérée ? La seconde est erronée.

Redisons encore que si une variable aléatoire x suit une loi de Gauss d'espérance mathématique X et d'écart-type σ , la moyenne m de n tirages indépendants de x suit aussi une loi de Gauss de même espérance mathématique X et d'écart-type réduit $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ et ceci, quel que soit n .

En revanche la variable $t = \frac{X - m}{\frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}}$ suit toujours une loi de Student à $n-1$ degrés de liberté mais, lorsque

n atteint ou dépasse 20, par exemple, une telle loi est très proche d'une loi de Gauss réduite (d'écart-type 1) et centrée (d'espérance mathématique nulle).

Annexe 5 : les chiffres significatifs

Supposons que l'on ait mesuré une force et trouvé dans un premier temps : $F = (2,56712 \pm 0,01283) \text{ N}$.

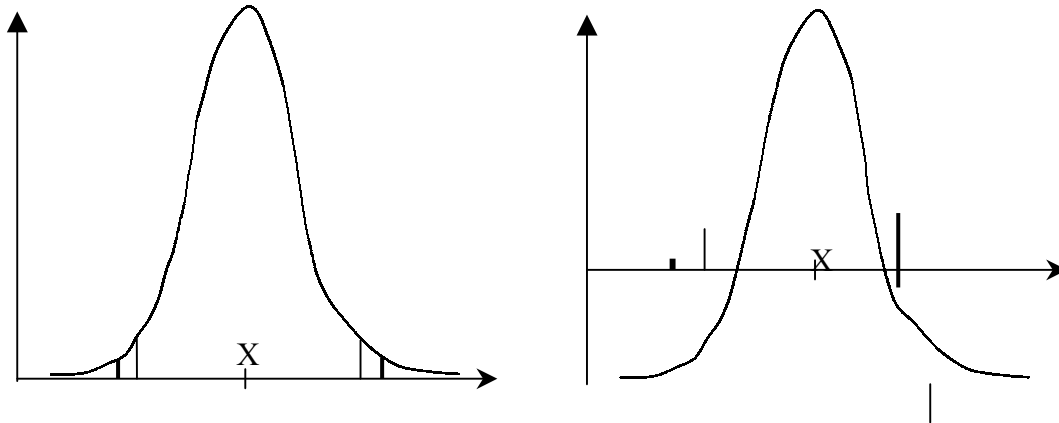
On se place dans le cas où l'estimateur de F suit une loi gaussienne, mais les résultats auxquels nous aboutirons sont tout à fait transposables à la loi de Student, très proche de la loi de Gauss pour $n \approx 9$.

L'incertitude $\Delta F = 0,01283 \text{ N}$ est donnée au niveau de confiance 95 % donc : $\sigma_F \approx 6,4 \times 10^{-3} \text{ N}$.

Comment donner ce résultat sous une meilleure forme ?

Peut-on écrire par exemple, comme cela est parfois préconisé, sous prétexte que le troisième chiffre après la virgule n'est pas certain : $F = (2,6 \pm 0,01) \text{ N}$?

Pour répondre, il faut observer les changements que provoquent la suppression des chiffres significatifs supposés en excès et les arrondis correspondants :



- Enlever le dernier 3 de ΔF , et écrire $\Delta F = 0,0128 \text{ N}$, c'est diminuer ΔF de $2,3 \times 10^{-3}$ en valeur relative. Poursuivre, et écrire $\Delta F = 0,013 \text{ N}$, c'est augmenter ΔF de $1,6 \times 10^{-2}$ en valeur relative. Donner $\Delta F = 0,01 \text{ N}$ c'est, cette fois, diminuer ΔF de 23×10^{-2} en valeur relative.

Que peut-on se permettre ? Observons tout d'abord que le standard européen recommande de prendre $\Delta F = 2 \sigma_F$ alors que les tables de la loi normale de Gauss indiquent que l'intervalle de confiance à 95 % de cette variable a pour demi-largeur $1,96 \sigma_F$; ceci revient à majorer σ_F de 2 % en valeur relative et à confondre $P = 95 \%$ et $P' = 95,4 \%$.

- D'une manière générale, si l'on minore $\sigma_{\hat{a}}$ de 5 %, sans décentrer l'intervalle, on trouve (il faut pour cela prendre une table de la fonction de répartition de Gauss), que la probabilité P passe de 95,0 % à 93,7 % : nous nous fixons cette limite. *La suppression d'un chiffre significatif sur Δa et l'arrondi correspondant ne devra pas entraîner une modification de $\sigma_{\hat{a}}$ supérieure à 5 %.* Pour notre exemple, cela implique d'écrire $\Delta F = 0,013 \text{ N}$.

La règle précédente est assez proche de celle-ci : “on exprimera ΔF avec deux chiffres significatifs”. On constatera en effet que passer de trois à deux chiffres significatifs ne provoque jamais une variation du nombre considéré de plus de $\pm 5 \%$.

- De même, écrire $F = 2,5671 \text{ N}$, c'est décentrer l'intervalle de $3,1 \times 10^{-3} \sigma_F$; supprimer le 1 provoque un nouveau décentrage de $1,6 \times 10^{-2} \sigma_F$. Enfin, écrire $F = 2,57 \text{ N}$ c'est provoquer un nouveau décentrage de $0,47 \sigma_F$.

- D'une manière générale, un décentrage de $0,4 \sigma_{\hat{a}}$ fait passer la probabilité P de 95,0 % à 93,8 % ce qui semble une limite à ne pas franchir. Si l'on adopte ce critère, on utilisera la règle suivante :

La suppression d'un chiffre significatif sur $\hat{a}$ et l'arrondi correspondant ne devra pas entraîner une translation de l'intervalle de confiance supérieure à $0,4 \sigma_{\hat{a}}$.

Pour notre exemple, le passage de 2,567 N à 2,57 N entraîne un trop fort décentrage.

Avec nos critères, le bon résultat s'énonce donc : $F = (2,567 \pm 0,013) \text{ N}$.

On remarque que cela correspond à conserver pour l'estimation de F tous les chiffres significatifs qui sont affectés par ΔF et rien que ceux-ci. C'est une situation assez générale qui peut, sans grand danger, être érigée en règle simple :

On conserve pour F les chiffres significatifs qui interviennent dans ΔF .

Annexe 6 : incompatibilité des points de vue "classique" et probabiliste

Si $z = x + y$, et si les erreurs ε_x et ε_y commises respectivement sur les mesures x et y sont indépendantes, le point de vue classique, où Δx , Δy et Δz sont les majorants respectifs de $|\Delta x|$, $|\Delta y|$ et $|\Delta z|$, entraîne l'égalité $\Delta z = \Delta x + \Delta y$.

Du point de vue probabiliste, supposons que Δx et Δy soient respectivement les incertitudes au niveau de confiance 95 % des mesures de x et de y : $\Delta x = 2 \sigma_x$; $\Delta y = 2 \sigma_y$.

La quantité $\Delta x + \Delta y$ représente donc $2 (\sigma_x + \sigma_y)$.

Or nous avons vu que si x et y sont indépendantes, $\sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$.

Plaçons-nous dans le cas d'école où $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$. On a alors $\sigma_z = \sigma \sqrt{2}$.

Dans ce cas, $\Delta x + \Delta y = 2 (\sigma_x + \sigma_y) = 4 \sigma = 2 \sqrt{2} \sigma_z = 2,83 \sigma_z$.

Nous supposons que x et y sont des variables aléatoires gaussiennes. Dans ce cas, z est aussi une variable gaussienne d'espérance mathématique $Z = X + Y$. Or la probabilité pour que l'intervalle $(z - 2,83 \sigma_z ; z + 2,83 \sigma_z)$ contienne Z n'est pas 0,95, mais 0,995 : le niveau de confiance est donc augmenté ; ou encore, le risque de 5 % retenu pour x et y est devenu 0,05 % pour z : il a été divisé par 10 et a donc changé d'ordre de grandeur.

En revanche, l'addition *quadratique* des incertitudes absolues, pour une somme ou une différence, conserve le même niveau de confiance et donc le même risque.

Pour un produit ou un quotient, c'est donc l'addition quadratique des incertitudes relatives qui permet de déterminer une incertitude au même niveau de confiance que pour les mesures initiales.

Ces règles découlent de celles qui permettent de calculer la variance (carré de l'écart-type) d'une variable aléatoire z s'exprimant comme une combinaison linéaire et homogène de plusieurs autres x_1 , x_2 et x_3 :

Soit $z = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3$; alors on montre que $\sigma_z^2 = \alpha_1^2 \sigma_1^2 + \alpha_2^2 \sigma_2^2 + \alpha_3^2 \sigma_3^2$.

Appliquons cette règle au cas de $R = \frac{U}{I}$; alors $\frac{dR}{R} = \frac{dU}{U} - \frac{dI}{I}$, soit : $dR = \frac{dU}{I} - R \frac{dI}{I}$.

Considérant dU et dI comme des variables aléatoires indépendantes d'écart-types respectifs σ_U et σ_I , en appliquant au calcul de σ_R le résultat précédant, avec $\alpha_1 = \frac{1}{I}$ et $\alpha_2 = -\frac{R}{I}$, on trouve :

$$\sigma_R^2 = \frac{\sigma_U^2}{I^2} + \frac{R^2}{I^2} \cdot \sigma_I^2, \text{ soit } \frac{\sigma_R^2}{R^2} = \frac{\sigma_U^2}{U^2} + \frac{\sigma_I^2}{I^2} \text{ ou } \frac{\sigma_R}{R} = \sqrt{\frac{\sigma_U^2}{U^2} + \frac{\sigma_I^2}{I^2}} \text{ (CQFD).}$$

De même, pour la moyenne arithmétique m de n mesures x_i de même écart-type σ , où tous les α_i sont égaux à $\frac{1}{n}$, on trouve ainsi : $\sigma_m^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{n}$ soit : $\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$.

Nous avons souvent, dans les pages qui précèdent, utilisé ce résultat.

L'ancien calcul d'incertitude, qui conduisait à donner pour la moyenne de n mesures équivalentes, une incertitude absolue égale à l'incertitude absolue sur une des mesures, aboutissait, dès que n dépassait 4, par exemple, à des majorants beaucoup trop grands, ne correspondant à aucune probabilité raisonnable.

Annexe 7 : écart à la normalité et valeurs aberrantes

1) L'usage des coefficients de Student ou, plus simplement, le fait de prendre " 2σ " pour incertitude, suppose que l'échantillon dont on dispose puisse être considéré comme "tiré d'une population normale".

Le tracé de la "droite de Henry", par exemple, sur papier "gausso-arithmétique", permet d'estimer "à l'œil" si l'ensemble des résultats recueillis est susceptible d'être tiré d'une "population gaussienne". Il s'agit d'un papier qui tire son nom des deux graduations qu'il porte. La première, en abscisses, est banale (graduation arithmétique) ; la deuxième, en ordonnées, (de 0,01 à 0,99 ou de 0,001 à 0,999), est reliée à la fonction de répartition de Gauss, c'est-à-dire à la probabilité $P(x)$ pour qu'une variable aléatoire normale centrée et réduite soit inférieure à x . Ainsi, si l'on dispose de n mesures ordonnées par rangs croissants, on marque sur le graphique n points dont les coordonnées respectives sont les suivantes : en abscisses (sur l'échelle banale) la valeur de la mesure choisie ; en ordonnées, si le rang de la mesure est i , on porte la valeur $\frac{i}{n+1}$. Si l'on dispose de 9 mesures, leurs ordonnées respectives sont donc, respectivement : 0,1 ;

0,2 ; ... 0,9. Ensuite, on regarde si les n points obtenus sont assez proches d'une droite qui, si elle existe, porte évidemment le nom de droite de Henry. Si l'un des points, ou plusieurs, sont trop éloignés d'une droite dont les autres sont proches, il y a peu de chances que l'on puisse considérer l'échantillon comme tiré d'une population gaussienne.

Ce test visuel peut être rendu quantitatif.

2) Lorsque divers groupes d'élèves procèdent à la mesure d'une même grandeur (accélération de la pesanteur en un lieu donné, vitesse du son dans la salle de classe, concentration d'une même solution, distance focale d'une même lentille mince, dureté d'une eau, inductance d'une même bobine à une fréquence donnée, etc.), il arrive qu'une ou deux valeurs s'écartent sensiblement des autres. Parfois, l'erreur est manifeste (erreur d'opération par exemple) et on peut la corriger si les étapes du raisonnement (calibres utilisés, unités employées, etc.) ont bien été enregistrées ; parfois, en revanche, rien ne permet d'expliquer l'écart observé et l'on se demande s'il faut conserver une valeur dont la singularité n'est peut-être due qu'au hasard ou s'il faut la rejeter à cause d'un appareil faux ou d'une observation erronée.

Le test de l'écart à la moyenne fournit à cet égard un critère quantitatif. Supposons que l'on dispose de n mesures indépendantes et de poids égaux : après avoir calculé leur moyenne m et l'écart-type σ_{n-1} correspondant, on les ordonne par valeurs croissantes ; la plus faible est notée x_m et la plus grande x_M . Supposons que ce soit la plus grande qui pose problème. On calcule alors le rapport $v = \frac{x_M - m}{\sigma_{n-1}}$. Pour $n = 9$, par exemple, si les mesures suivent une loi gaussienne, v est en moyenne égal

à 1,49 ; il ne dépasse 2,24 que dans 5 % des cas. Aussi, dans ce cas, en prenant le risque de 5 % d'enlever à tort une valeur, choisit-on généralement d'écarter toute valeur qui s'éloigne de la moyenne de plus de $2,24 \sigma_{n-1}$. Le tableau ci-dessous donne, pour quelques valeurs de n , les valeurs $v_{\max}$ de v qui, avec le même risque, ne doivent pas être dépassées :

$n :$	6	7	8	9	10	12	14	16	18
$v_{\max} :$	2,00	2,09	2,17	2,24	2,29	2,39	2,46	2,52	2,58

Le logiciel du CNDP "Incertitudes de mesure" pose les deux types de questions évoquées ci-dessus et permet d'y répondre instantanément.

Dans un premier temps, pour un échantillon donné, afin de savoir si l'échantillon des mesures peut être considéré comme tiré d'une population gaussienne, il trace automatiquement, non la droite de Henry mais celle de Pearson qui est d'inspiration très voisine. Comme les utilisateurs du logiciel ne sont pas des spécialistes des méthodes statistiques et qu'ils ne sont donc pas capables, *a priori*, de savoir si les points expérimentaux sont suffisamment alignés pour pouvoir accepter l'hypothèse d'une population gaussienne, le logiciel prend lui-même la décision d'acceptation ou de rejet. Pour cela, il calcule le coefficient de

corrélation des points expérimentaux et compare celui-ci à une valeur témoin qu'il possède en mémoire et qui dépend du nombre n de mesures. Si le coefficient de corrélation est inférieur à la valeur témoin, l'hypothèse de normalité est rejetée, sinon elle est acceptée. Les différents coefficients témoins (pour n compris entre 5 et 50) ont été calculés tout spécialement pour ce logiciel selon la méthode dite de Monte Carlo. Ils s'échelonnent entre $r = 0,8752$ pour $n = 5$ et $r = 0,9760$ pour $n = 50$ en passant par $r = 0,9186$ pour $n = 10$ et $r = 0,9496$ pour $n = 20$.

L'hypothèse de non normalité peut être rejetée pour plusieurs raisons :

- 1) parce que la population mère n'est pas normale (ou gaussienne) ;
- 2) parce que l'échantillon contient des valeurs aberrantes.

Le logiciel, en effectuant pour chaque mesure le test de l'écart à la moyenne exposé ci-dessus, propose donc d'éliminer celles des valeurs qui peuvent, avec une bonne probabilité, être considérées comme aberrantes.

Si l'opérateur accepte de les ôter de l'échantillon, il reprend sa démarche et cherche à savoir si les mesures conservées peuvent à nouveau être considérées comme tirées d'une population gaussienne, ce qui est très généralement le cas.

Il en découle une grande simplicité d'utilisation car les élèves, libérés de calculs fastidieux peuvent davantage se consacrer aux problèmes inhérents aux mesures. Informés par l'ordinateur de la présence de mesures aberrantes, ils acceptent plus volontiers la remise en cause de telle ou telle de leurs mesures.

Annexe 8 : comparaison des écarts-types de deux échantillons

Il peut arriver qu'un professeur fixe pour but d'un TP la comparaison de deux méthodes de mesures ; ou encore, la même mesure ayant été proposée aux "binômes" de chacun des deux groupes d'une même classe, il peut se poser la question de savoir s'il peut regrouper l'ensemble des résultats de la classe afin de disposer d'un plus grand nombre de mesures indépendantes dans le but d'améliorer la précision de la mesure collective.

Dans chacun de ces deux cas, il faut comparer les écart-types relatifs aux deux échantillons de mesure.

Notons n_1 l'effectif du premier échantillon (le nombre de mesures indépendantes d'une même grandeur effectuées par les élèves en utilisant la méthode n°1 dans le premier cas envisagé) et n_2 l'effectif du deuxième. C'est la loi $F(v_1, v_2)$ dite de Fisher qui permet de comparer les écarts-types (ou plutôt les variances de ces deux échantillons). Les nombres v_1 et v_2 sont respectivement égaux à $(n_1 - 1)$ et $(n_2 - 1)$, ce sont les degrés de liberté respectifs des variances considérées. Ainsi, lorsque l'effectif n de chaque échantillon est égal à 9, les nombres v_1 et v_2 de degrés de liberté des variances $(\sigma_{1\ n-1})^2$ ou $(\sigma_{2\ n-1})^2$ sont égaux à $n-1 = 8$.

La loi de Fisher donne la distribution du rapport de $(\sigma_{1\ n-1})^2 / (\sigma_{2\ n-1})^2$ dans le cas où les deux échantillons sont tirés de la même population mère gaussienne (c'est ce que l'on appelle faire l'hypothèse nulle). Il permet de connaître la probabilité pour que, dans le cadre de cette hypothèse, telle ou telle valeur de ce rapport $F(v_1, v_2)$ soit dépassée du seul fait du hasard. Pour deux échantillons (1) et (2) de 9 valeurs tirées d'une même population gaussienne, par exemple, le rapport $F(v_1, v_2)$ est supérieur à 4,43 dans 2,5 % des cas. Mais, en inversant numérateur et dénominateur, le rapport $F(v_2, v_1)$ est aussi supérieur à 4,43 dans 2,5 % des cas. Au total, le rapport de la plus grande des variances à la plus petite est supérieur à 4,43 dans 5 % des cas.

C'est le critère que nous retenons, dans ces conditions ($n_1 = n_2 = 9$), pour considérer comme significativement différentes deux variances. Comme le rapport correspondant des écarts-types $(\sigma_{1n-1} / \sigma_{2n-1})$ ou l'inverse $(\sigma_{2n-1} / \sigma_{1n-1})$, est égal à la racine carrée de 4,43 soit 2,1, nous admettrons ceci :

Dans le cas de deux échantillons de 9 mesures d'une même grandeur, si l'un des rapports $(\sigma_{1n-1} / \sigma_{2n-1})$ ou $(\sigma_{2n-1} / \sigma_{1n-1})$ est supérieur à 2,1, alors nous ne pouvons pas considérer que les deux échantillons sont tirés de la même population gaussienne (le risque de rejeter cette hypothèse à tort est ainsi égal à 5 %).

Inversement, nous traiterons (cf. plus loin) le cas de la mesure de la distance focale d'une lentille mince selon deux méthodes : la méthode de Silberman ayant conduit à 9 mesures d'écart-type $\sigma_{s_{n-1}} = 0,163$ cm et la méthode de l'autocollimation ayant, pour 9 mesures également, conduit à $\sigma_{a_{n-1}} = 0,101$ cm. Le rapport $\sigma_{s_{n-1}} / \sigma_{a_{n-1}}$ étant égal à 1,61, valeur nettement inférieure à 2,1, on ne peut pas, par ces seules mesures, considérer que la méthode de Silberman est significativement moins précise que la méthode d'autocollimation.

*Exemples de traitement de mesures en travaux pratiques*⁹

Des explications complémentaires, destinées à l'information des seuls professeurs, sont insérées en italiques.

Chimie : détermination d'une grandeur par dosage

Contexte de l'étude

L'exemple a été choisi en 1^{ère} S dans le cadre de l'option ; il s'agit de déterminer par complexométrie la dureté d'une eau, c'est-à-dire sa concentration totale en ions calcium et magnésium ; l'étiquette de l'eau de Contrexéville étudiée indique 486 mg/L d'ions Ca^{2+} et 84 mg/L d'ions Mg^{2+} .

Les élèves répartis en deux groupes de neuf binômes ont utilisé un matériel classique de dosage : burette de 25,0 mL, pipette jaugée à deux traits de 10,0 mL et agitateur magnétique. Lors de cette séance, ils ont réalisé leur second dosage, le premier étant le dosage des ions chlorure par la méthode de Mohr.

Un point à signaler lors du déroulement de la séance : les élèves du premier groupe s'étant trop précipités en début de séance (rinçages mal gérés, prédosage parfois absent...), des consignes plus explicites ont été données aux élèves du second groupe qui ont alors tous manipulé avec beaucoup de soin.

Résultats bruts

Le dosage consiste à déterminer le volume équivalent V_E de solution d'Edta qu'il faut verser pour complexer la totalité des ions calcium et magnésium initialement présents dans l'échantillon d'eau de volume V ; connaissant la concentration $[\text{Y}^{4-}]$ de l'Edta en solution, on calcule la concentration totale C des ions calcium et magnésium dans l'eau avec la relation : $C = \frac{[\text{Y}^{4-}] \cdot V_E}{V}$.

On aboutit alors au calcul de la dureté de l'eau exprimée en degrés hydrotimétriques français notée D et définie par la relation : $D = 10 \times C$, les concentrations molaires des ions calcium et magnésium étant exprimées en mmol.L^{-1} ; on exprime alors D en °TH.

(N.B : une eau est considérée dure lorsque D est supérieure à 50).

Il faut noter que les conditions expérimentales ne permettent d'exprimer le résultat qu'avec trois chiffres significatifs ; en effet V_E n'est connu qu'à 0,1 mL près (exemple de résultat : $V_E = 15,6$ mL).

Résultats ordonnés du premier groupe, exprimés en °TH :

153, 154, 154, 155, 155, 156, 156, 160, 165.

Moyenne : 156,4 °TH ; estimateur de l'écart-type, noté σ_{n-1} : 3,8 °TH.

Résultats ordonnés du deuxième groupe, exprimés en °TH :

154, 155, 155, 155, 156, 156, 156, 157.

Moyenne : 155,6 °TH ; estimateur de l'écart-type : σ_{n-1} : 0,88 °TH.

Analyse des résultats en classe

⁹ Les TP ont été réalisés dans la classe de Mme Colette Huet, du Lycée David d'Angers

L'indication de l'étiquette permet de calculer le degré hydrotimétrique de référence ; en désignant par x la concentration massique en ions Ca^{2+} et par y la concentration massique en ions Mg^{2+} , x et y étant exprimées en mg.L^{-1} , on a :

$$D = 10 \times \left(\frac{x}{40,08} + \frac{y}{24,31} \right) ; \text{ soit : } D = 155,8 \text{ } ^\circ\text{TH}.$$

Individuellement, chacun des binômes met en relation son résultat avec la valeur de référence en évaluant par exemple l'écart relatif entre les deux valeurs. Mais ceci est très pauvre !

La mise en commun des résultats des neuf binômes du même groupe permet, en revanche, d'aborder le traitement statistique d'une série de mesures.

Pour chacun des groupes, la moyenne, estimateur de la grandeur mesurée, est en très bon accord avec l'indication de l'étiquette. Les deux groupes ont à ce niveau des résultats très proches (le même résultat, si on se limite à trois chiffres significatifs).

Avec une étendue de 12 $^\circ\text{TH}$ dans le premier cas et 3 $^\circ\text{TH}$ dans le second, ou un écart-type 4 fois plus grand pour le premier groupe que pour le second, il est évident que les résultats globaux du premier groupe sont beaucoup plus dispersés que ceux du second. Le second groupe a fourni un travail expérimental de bien meilleure qualité : la seule moyenne des résultats ne le montre pas ; l'impact de la qualité du travail expérimental (rinçages, prédosage...) sur le résultat est ainsi parfaitement mis en valeur.

Commentaires et approfondissements (pour les professeurs)

L'objectif de ce paragraphe est d'utiliser la situation expérimentale décrite ci-dessus pour aller plus loin en ce qui concerne la résolution de différents problèmes tels que :

Combien de chiffres significatifs est-il raisonnable de garder dans un résultat ?

Comment exprimer un résultat pour qu'il prenne en compte la précision de la mesure ?

Comment reconnaître une mesure aberrante ?

Il s'agit aussi de concrétiser certains points théoriques exposés dans la première partie de ce chapitre.

• Calcul du degré hydrotimétrique de référence D

Le calcul aboutit à $D = 155,8 \text{ } ^\circ\text{TH}$; faut-il garder les 4 chiffres significatifs ?

Malheureusement, on ne connaît pas les incertitudes relatives aux concentrations x et y , respectivement en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , ce qui rend impossible la recherche d'un intervalle de confiance à partir de l'étiquette et qui pose également un problème pour l'expression de D car on ne sait exactement combien de chiffres significatifs on doit conserver.

Puisque les expressions numériques de x et de y sont arrondies (milligramme par litre), supposons qu'au niveau de confiance 95 %, on ait : $\Delta x = \Delta y = 0,5 \text{ mg.L}^{-1}$.

Alors, au même niveau de confiance, l'incertitude ΔD est :

$$\Delta D = \sqrt{\left(\frac{10 \times \Delta x}{40,08} \right)^2 + \left(\frac{10 \times \Delta y}{24,31} \right)^2} = 0,24 \text{ } ^\circ\text{TH}.$$

Ceci permet d'écrire $D = (155,8 \pm 0,24) \text{ } ^\circ\text{TH}$.

Il n'est pas bon, en effet, d'arrondir D à 156 $^\circ\text{TH}$, car alors on commettrait une erreur d'écriture presque égale à l'incertitude ΔD . Pour renoncer au quatrième chiffre significatif et écrire $D = 156 \text{ } ^\circ\text{TH}$, ce qui représente une translation de 0,2 $^\circ\text{TH}$, il faudrait avoir $\Delta D > 1 \text{ } ^\circ\text{TH}$ car nous nous interdisons des translations supérieures à 0,2 ΔD . En les supposant égales, les incertitudes Δx et Δy devraient alors être supérieures à 2 mg.L^{-1} , ce qui est certainement exagéré (les concentrations données par la marque Perrier sont arrondies à 0,1 mg.L^{-1}). Nous conservons donc l'écriture : $D = 155,8 \text{ } ^\circ\text{TH}$.

• Comparaison des mesures des deux groupes

Du fait des consignes supplémentaires et de leur impact évident, on ne peut considérer que les mesures des deux groupes constituent deux échantillons tirés d'une même population : le "poids" d'une mesure, selon qu'elle émane d'un groupe ou de l'autre, n'est pas le même. Les résultats de chaque groupe doivent donc être analysés séparément (*nous avons vu en annexe 7 qu'un rapport des écarts-types égal à 2,1 est*

généralement considéré comme suffisant pour marquer la dissemblance de deux échantillons de neuf mesures).

- *Analyse des résultats du second groupe*

On constate que l'accord entre la moyenne des mesures du second groupe (155,6 °TH) et la valeur calculée d'après l'étiquette (155,8 °TH) est excellent.

Notons ΔD la demi-largeur de l'intervalle de confiance de D, au niveau de confiance 95 %, calculée d'après les résultats de ce second groupe :

$$\Delta D = \frac{t \cdot \sigma_{n-1}}{\sqrt{9}}, \text{ avec } t, \text{ coefficient de Student tel que } t = 2,31, \text{ soit : } \Delta D = \frac{2,31 \times 0,88}{3} = 0,68 \text{ °TH}$$

- *Expression définitive du résultat du second groupe*

À cause de l'imprécision sur la mesure de V_E , les neuf mesures individuelles, exprimées à l'aide de trois chiffres significatifs seulement, ne correspondent en fait qu'à 4 valeurs.

De ce fait, il serait illusoire d'exprimer la moyenne (155,56 °TH) avec cinq chiffres significatifs. Nous partons donc de $D = (155,6 \pm 0,68) \text{ °TH}$.

L'intuition nous conduit à écrire $D = (155,6 \pm 0,7) \text{ °TH}$. C'est bien ce que confirment les critères que nous utilisons et qui sont basés sur le fait que le niveau de confiance choisi (ici 95 %) ne doit pas être affecté de plus de 1 % de variation par chaque opération de simplification à laquelle on se livre.

Critères retenus :

- On peut supprimer des chiffres significatifs dans l'expression de l'incertitude ΔD (et procéder aux arrondis correspondants), à condition que ces opérations provoquent une variation de l'incertitude ΔD initiale inférieure à 4 %. Ici $4 \times \frac{\Delta D}{100} = 0,03 \text{ °TH}$; on peut donc remplacer 0,68 °TH par 0,7 °TH, ce qui entraîne seulement une variation de 0,02 °TH.

- On peut supprimer des chiffres significatifs sur D (et procéder aux arrondis correspondants) à condition que ces opérations ne provoquent pas un décalage de D supérieur à 0,2 ΔD . Ici, $0,2 \Delta D = 0,14 \text{ °TH}$; le passage de 155,6 à 156 °TH entraînerait un décalage de 0,4 °TH trop important : cette erreur d'écriture, supérieure à la moitié de l'incertitude, abaisserait exagérément le niveau de confiance (*qui passerait à 83 %*).

- *Analyse des résultats du premier groupe*

La plus grande des mesures (165 °TH) est vraiment très éloignée des autres : son écart à la moyenne est égal à $2,26 \sigma_{n-1}$. Nous remarquons que, du fait de cette mesure, certainement due à une manipulation effectuée sans soin, la moyenne (156,4 °TH) des résultats du premier groupe d'élèves n'appartient même pas à l'intervalle de confiance au niveau de confiance 95 % du groupe 2, soit [149,9 °TH ; 156,3 °TH], alors qu'en ôtant cette mesure, la nouvelle moyenne (155,4 °TH) en fait pleinement partie (*cette dernière constatation ne constitue cependant pas un critère de rejet*).

Divers tests qualitatifs ou quantitatifs permettent de décider de rejeter la valeur 165 °TH : le tracé de la droite de Pearson, grâce au logiciel "Incertainitudes de mesure" du CNDP, montre que, compte tenu de cette mesure, l'échantillon étudié ne peut être considéré comme tiré d'une population gaussienne ; le test quantitatif de l'écart à la moyenne, lui, recommande d'enlever celle qui s'écarte de la moyenne de plus de $2,24 \sigma_{n-1}$: c'est le cas de la valeur considérée, éloignée de la moyenne de $2,26 \sigma_{n-1}$.

Il est donc plus sage de ne pas tenir compte de cette mesure.

Pour le groupe 1, les mesures conservées sont donc, ordonnées et exprimées en °TH :

153, 154, 154, 155, 155, 156, 156, 160.

Moyenne : 155,4 °TH ; estimateur de l'écart-type, noté σ_{n-1} : 2,1 °TH.

L'accord entre cette nouvelle moyenne et la valeur calculée d'après l'étiquette est encore très bon, mais les écarts-types des deux séries de mesures sont toujours beaucoup trop différents pour que celles-ci puissent être considérées comme de poids égaux.

- *Expression définitive du résultat du premier groupe*

La demi-largeur ΔD de l'intervalle de confiance, au niveau de confiance 95 %, calculée d'après les mesures retenues, avec $t = 2,37$, puisque désormais $n = 8$, donne : $D = 1,76^\circ\text{TH}$, quantité qui peut être arrondie à $1,8^\circ\text{TH}$ (la variation correspondante de ΔD est inférieure à 4 %).

Le résultat définitif du premier groupe est donc : $D = (155,4 \pm 1,8)^\circ\text{TH}$: on remarque en effet qu'en arrondissant la moyenne M des huit mesures de ce groupe à 155°TH , on provoquerait un décalage supérieur à $0,2 \Delta D = 0,36^\circ\text{TH}$.

Dans ce cas, l'application de la loi de Student montre que le passage de $D = (155,4 \pm 1,76)^\circ\text{TH}$ à $D = (155 \pm 1,8)^\circ\text{TH}$ entraîne une variation du niveau de confiance de 95 % à 93,8 % car les deux arrondis ont des effets contraires : le passage de $\Delta D = 1,76^\circ\text{TH}$ à $D = 1,8^\circ\text{TH}$ a pour effet d'augmenter le niveau de confiance (de 95,0 % à 95,4 %) ; le passage de $D = 155,4^\circ\text{TH}$ à $D = 155^\circ\text{TH}$ ramène le niveau de confiance à 93,8 %, ce qui, après tout, peut être accepté par certains comme suffisamment voisin de 95 %.

Le résultat collectif du premier groupe, $D = (155,4 \pm 1,8)^\circ\text{TH}$ est malgré tout un résultat dont la précision relative, $\Delta D / D$, égale à 1,2 %, doit être considérée comme bonne pour des élèves réalisant leur deuxième dosage.

Optique, comparaison de deux méthodes de détermination d'une distance focale

Contexte de l'étude

Les résultats ci-dessous ont été obtenus, pour une même lentille, par un groupe d'élèves de terminale S en spécialité. Les élèves ont utilisé un matériel classique de lycée : banc d'optique gradué à 0,2 cm ; supports de lentille et d'écran avec repères.

Résultats bruts

Mesures de distances focales, exprimées en centimètres et ordonnées :

- Méthode de Silberman (la distance focale est égale au quart de la distance mesurée, distance pour laquelle l'image et l'objet sont de même taille) : 4,65 ; 4,73 ; 4,75 ; 4,75 ; 4,80 ; 4,88 ; 4,90 ; 4,95 ; 5,20.

Moyenne : $m_S = 4,85 \text{ cm}$; estimateur de l'écart-type : $\sigma_{S\ n-1} = 0,163 \text{ cm}$.

- Méthode d'autocollimation (la distance focale est directement mesurée) :

4,8 ; 4,8 ; 4,9 ; 4,9 ; 5,0 ; 5,0 ; 5,0 ; 5,1.

Moyenne : $m_a = 4,94 \text{ cm}$; estimateur de l'écart-type : $\sigma_{a\ n-1} = 0,101 \text{ cm}$.

Analyse des résultats en classe

Les deux méthodes donnent des moyennes concordantes.

Les résultats obtenus avec la méthode d'autocollimation sont moins dispersés (étendue et écarts-types plus faibles) ; cette méthode semble plus performante que la méthode de Silberman.

Commentaires et approfondissements

- *Valeurs aberrantes ; précision du matériel*

Dans les mesures relatives à la méthode de Silberman, la distance focale de 5,20 cm semble un peu écartée des autres. En fait, elle ne diffère de la moyenne 4,85 cm que $2,15 \sigma_{S\ n-1}$ ce qui n'est pas suffisant pour la rejeter. Aucune des autres mesures n'est suspecte.

Le matériel (graduation du banc, justesse des repères...) n'est pas assez précis pour que cette étude soit totalement convaincante puisque huit valeurs pour la méthode de Silberman et quatre pour la méthode d'autocollimation suffisent à exprimer neuf mesures.

- *Expression des résultats*

- Méthode de Silberman : calcul de l'incertitude, considérée comme la demi-largeur de l'intervalle de confiance au niveau de confiance 95 % :

$$\Delta f = \left(2,31 \times \frac{0,163}{3} \right) \text{ cm} = 0,126 \text{ cm}.$$

Nous pouvons arrondir Δf à 0,13 cm sans modifier sensiblement le niveau de confiance affiché.

Peut-on enlever un chiffre significatif à la moyenne $m_s = 4,85 \text{ cm}$ et estimer f par 4,9 cm ?

La translation qui en résulterait serait de 0,05 cm, représentant 0,40 Δf ; elle est trop grande. On a donc :

$$f_s = (4,85 \pm 0,13) \text{ cm}$$

- Méthode d'autocollimation : au niveau de confiance 95 %, $\Delta f = 0,078 \text{ cm}$, quantité que nous pouvons confondre avec 0,08 cm.

La translation qui résulterait du passage de 4,94 cm à 4,9 cm serait là encore de 0,04 cm soit 0,51 Δf , ce qui, *a fortiori*, n'est pas acceptable. On a donc :

$$f_a = (4,94 \pm 0,08) \text{ cm}$$

- *Comparaison des estimateurs f_s et f_a de la distance focale f*

Les deux intervalles de confiance ont une partie commune (4,86 cm ; 4,99 cm), ce qui montre que les résultats donnés par les deux méthodes sont compatibles. Mais on peut se demander si le fait que l'estimateur f_s donné par la méthode de Silberman soit juste à la limite de l'intervalle de confiance déduit de la méthode d'autocollimation, n'est pas le signe que des erreurs systématiques ont été commises. Au lycée, par exemple, l'index d'une lentille ne correspond pas toujours exactement à la position de son centre optique. Ainsi, dans la méthode d'autocollimation par exemple, ne pas retourner une lentille par rapport au sens de propagation de la lumière lorsque celle-ci passe d'un groupe à l'autre, peut entraîner une erreur systématique de plusieurs millimètres, la retourner peut donner des résultats dispersés.

Compte tenu des valeurs de $\sigma_{S\ n-1}$ et de $\sigma_{a\ n-1}$ la différence $f_s - f_a$ n'est cependant pas significative.

- *Comparaison des écarts-types*

Le rapport des écarts-types est de 1,61. Il semble indiquer que, toutes causes d'erreurs confondues, la mise en œuvre de la méthode d'autocollimation par les élèves de terminale S, avec le matériel limité qui est mis à leur disposition (absence de viseurs) donne des résultats plus précis que celle de la méthode de Silberman.

Cette valeur n'est cependant pas suffisamment élevée pour poser une telle assertion (annexe 8).

On pourrait en effet montrer que, même si les deux méthodes étaient de précision tout à fait identiques, la valeur 1,61 caractérisant le rapport des estimateurs $\sigma_{S\ n-1}$ et de $\sigma_{a\ n-1}$ (quel que soit celui que l'on place au dénominateur) serait naturellement dépassée dans 18 % des cas.

On retiendra donc de ce TP d'optique que la méthode expérimentale utilisée pour comparer deux méthodes de détermination de la distance focale d'une lentille n'a pas permis, ici, avec les protocoles utilisés, de les classer, le rapport du plus grand des estimateurs ($\sigma_{S\ n-1}$) au plus petit ($\sigma_{a\ n-1}$), n'étant pas assez élevé (1,61).

Unités, références, incertitudes pour les mesures

Marc Himbert,

Chaire de métrologie, Conservatoire National des Arts et Métiers ¹⁰

RÉSUMÉ. Mesurer, c'est comparer une grandeur inconnue à une grandeur prise comme référence à l'aide d'une chaîne instrumentale, et exprimer le résultat de cette comparaison en ayant effectué l'estimation de l'incertitude attachée à l'obtention du résultat. Seuls l'établissement non ambigu de la traçabilité du résultat et l'évaluation convenable de son incertitude peuvent inspirer une confiance suffisante pour utiliser effectivement la donnée de sortie de la démarche expérimentale engagée, afin de prendre des décisions, sur le plan scientifique, technique, environnemental, réglementaire, diagnostique, thérapeutique, sportif, etc. La « traçabilité » suppose l'existence d'un système de références reconnues sans ambiguïté par les divers partenaires concernés par le résultat. À l'échelle aujourd'hui mondiale, il s'agit du Système international d'unités, aux définitions et aux actions bien plus vivantes qu'on ne le pense habituellement. L'évaluation convenable de l'incertitude requiert la poursuite d'une démarche à la fois analytique (analyse des causes d'erreur survenant dans le processus de mesure, essai, analyse) et expérimentale englobant une approche statistique de la mesure. Garantir la pertinence de ces deux éléments fondamentaux du résultat que sont l'incertitude et l'unité constitue l'objet de la métrologie.

Introduction

Qu'ils soient à vocation scientifique ou industrielle, qu'ils puissent être insérés dans une chaîne instrumentale plus complexe ou qu'ils aient été développés en vue de satisfaire une exigence particulière, les capteurs et instruments ont pour vocation d'aider à traduire la valeur d'une grandeur en une donnée numérique, parfois très simplifiée, qui pourra être utilisée afin de tirer des conclusions ou prendre des décisions, c'est-à-dire en une donnée numérique digne de confiance.

Les méthodes et conventions qui régissent la définition, l'évaluation et l'expression des résultats de mesure et les propriétés des instruments sont partie intégrante du langage à vocation universelle de la métrologie, *science* ou *art* de la mesure [1]. C'est en particulier grâce à une estimation convenable de l'incertitude attachée à un résultat que ce dernier pourra, paradoxalement, inspirer une confiance maîtrisée, et être reconnu sans équivoque par plusieurs partenaires. Comment, en effet, comparer entre eux des résultats de façon fiable ? Comment confronter une donnée à une tolérance, en l'absence de caractérisation de l'incertitude ?

La traçabilité des résultats de mesure

Des domaines d'application très variés

L'opération de mesure

Mesurer, c'est compter, comme on le fait depuis l'origine des échanges commerciaux, avant même que soit formalisé, en Mésopotamie ancienne, le système de numération : c'est exprimer, sous forme d'une valeur numérique, la grandeur physique caractérisant l'état d'un système, ou le résultat d'une succession d'actes élémentaires rassemblés en un protocole d'essai. Plus

¹⁰ Bnm-Inm, <http://www.cnam/instituts/inm>
292, rue Saint-Martin, 75003 Paris, France
himbert@cnam.fr

précisément, mesurer, c'est comparer une grandeur physique inconnue avec une grandeur de même nature prise comme référence, à l'aide d'une chaîne instrumentale comportant un ou plusieurs capteurs. C'est exprimer le résultat de cette comparaison à l'aide d'une valeur numérique, associée à une unité qui rappelle la nature de la référence, et assortie d'une incertitude qui dépend à la fois des qualités de l'expérience effectuée, des outils employés et de la connaissance que l'on a de la référence et de ses conditions d'utilisation [2].

Pour comparer, il faut choisir un principe de mesure, choisir ou développer les capteurs adaptés à la grandeur concernée, concevoir, construire, caractériser l'instrument optimal compte tenu des contraintes existantes, traiter enfin le signal délivré par la chaîne de mesure pour en extraire toute l'information disponible, en s'affranchissant autant que nécessaire des fluctuations indésirables qui nuisent à la lisibilité de l'information recherchée, en éliminant donc ce qu'on appelle le bruit. La démarche de caractérisation des outils et instruments, et l'appréciation critique de la qualité d'un résultat de mesure, doivent être poursuivies jusqu'à leur terme pour garantir l'exactitude d'un résultat [3], quel que soit le niveau d'exigence *a priori* souhaité.

Quelques domaines d'application

La société s'appuie sur une infrastructure qui n'est pas mais pourrait être familière, souvent invisible, de services, de denrées, de réseaux de transport et de communication dont le bon fonctionnement est essentiel à la vie quotidienne. Par exemple :

- pour la fabrication et les échanges de produits, aujourd'hui à l'échelle mondiale ;
- pour garantir le fonctionnement des systèmes à technologie avancée ;
- pour l'analyse des phénomènes physiques et chimiques ;
- pour le diagnostic médical, pour la thérapie ;
- pour assurer de hauts débits de communication fiables ;
- pour les systèmes de repérage à longue distance, à usage civil ou militaire ;
- pour l'alimentation, de la production à la protection, au transport, à la distribution des produits agricoles ;
- pour la définition et le contrôle des règles de sécurité ;
- pour l'analyse des performances, même sportives ;
- pour l'expertise judiciaire, en tous domaines ;
- pour valider les avancées de la recherche scientifique ; etc. [4].

C'est par la métrologie qu'on peut assurer que les volumes des marchandises qui font l'objet de transactions commerciales sont mesurés de façon correcte, comme le pétrole brut, le gaz naturel, l'eau, dans une vaste étendue de mesure. C'est grâce à des mesures exactes qu'on peut fabriquer de façon efficace les composants d'objets aussi variés que les lecteurs de disques numériques, les véhicules à design accrocheur et performances élevées, pour lesquels la fiabilité dépend de tolérances de fabrication contraignantes. De même les systèmes de télécommunications ne fonctionnent avec des rythmes de transmission élevés que grâce à la coordination des échelles de temps, à environ une microseconde près, au travers de l'UTC, l'échelle internationale construite à partir des horloges atomiques. Cette échelle est également utilisée par les systèmes de navigation à couverture globale, tel le GPS. Demain pour le système Galileo.

La pratique de la médecine fait appel à des mesures délicates, tant pour les diagnostics qu'en thérapie, qu'il s'agisse d'analyses chimiques, de mesure des doses de rayonnement, d'interprétation d'images. En agriculture, le suivi des produits alimentaires et la protection de l'environnement nécessitent des mesures, qui permettent le contrôle ou l'anticipation de dispositions réglementaires. Plus généralement, l'expertise judiciaire s'appuie sur des résultats de mesure, du simple contrôle de vitesse, de poids par essieu de camion, d'alcoolémie ou d'imprégnation de stupéfiants, aux investigations les plus poussées en matière, par exemple, de résistance des matériaux. Enfin, qu'on songe un instant aux impératifs d'exactitude des instruments de mesure qu'impose, dans le sport, la

comparaison des performances effectuées en des moments, dans des lieux et avec des équipements différents.

Garantir la traçabilité des résultats au Système international d'unités

Le raccordement des références

Asseoir les résultats de mesure sur des bases reconnues sans équivoque par plusieurs partenaires, que ce soit à des fins scientifiques, commerciales ou d'expertise légale, nécessite l'existence de références dont les caractéristiques sont bien établies : référence de travail d'un établissement, étalonnée avec une périodicité maîtrisée et contrôlée, par comparaison à une référence d'incertitude plus faible, située à un niveau plus élevé dans *la hiérarchie d'une chaîne d'étalonnage*, dont le stade ultime est la matérialisation dite « primaire » des unités permettant d'accéder à la grandeur, issue de la définition elle-même de celle-ci, s'il s'agit d'une unité de base du système employé, ou par combinaison de matérialisations des unités associées aux grandeurs composantes lorsqu'il s'agit de ce qu'on appelle une unité dérivée. Il appartient au Comité français d'accréditation (COFRAC) de prononcer et de garantir la capacité des acteurs industriels et économiques à procéder, en pratique, à ces raccordements.

Au niveau le plus élevé de ces chaînes, seules des comparaisons effectuées entre des montages indépendants – et donc *a priori* mis en place dans différents pays – permettent de préciser l'*exactitude* de ces réalisations. Le *Bureau National de Métrologie* est en France le garant de la traçabilité des mesures. Les comparaisons internationales permettent d'apprécier le degré d'équivalence de ses références avec celles des homologues étrangers et d'assurer officiellement la reconnaissance mutuelle des opérations effectuées par les organismes accrédités des divers pays. Aujourd'hui, un arrangement de reconnaissance mutuelle, signé en 1999 entre les grandes nations technologiques, et les autres, vient lever *a priori* les derniers obstacles aux échanges relatifs aux raccordements. En ligne, accessible à tous, sur le site Internet du Bureau international des poids et mesures (www.bipm.org), chacun peut disposer de l'ensemble des résultats des plus récentes comparaisons internationales d'étalons et donc du degré d'équivalence des références employées, au plus haut niveau d'exactitude, dans les divers pays.

Le Système international d'unités [5]

- généralités

C'est dans le cadre du Système International d'Unités (SI) que sont élaborées les références correspondant à l'ensemble des mesures. Issu d'un traité international toujours vivant signé en 1875, « la Convention du mètre », lui-même inspiré par l'époque révolutionnaire française [2], et en particulier la première loi à vocation universelle relative aux poids et mesures, celle du 18 germinal an III, ce système d'unités cohérent et rationalisé couvre l'ensemble du champ disciplinaire des mesures physiques, en mécanique, électrodynamique, et plus récemment thermodynamique, physico-chimie, chimie, photométrie.

Il repose sur sept grandeurs de base, pour lesquelles les définitions des unités correspondantes ont été précisées : le mètre, la seconde, le kilogramme, l'ampère, les quatre premières bien connues des physiciens. Bien entendu, certains théoriciens, non sans raison, estiment que les modèles récents de la physique permettraient de faire l'économie de certaines d'entre elles, en s'appuyant sur les approches théoriques non démenties aujourd'hui et les constantes de couplage entre les interactions. La Convention du mètre reste à ce stade sur une approche plus pragmatique, liée à l'appréhension du réel par l'homme, qui dans les faits distingue sous l'acception la plus commune et sans ambiguïté, nonobstant la théorie relativiste, la notion de longueur et celle de durée...

Pire, pour certains, le système international définit trois autres unités pour d'autres grandeurs : la température thermodynamique, grandeur mesurable au sens de la définition possible du rapport de deux températures thermodynamiques (le kelvin), la quantité de matière (la mole), l'intensité lumineuse (la candela). En un mot, disons que, pour les deux premières, - les physiciens et chimistes en sont bien conscients - il s'agit, dans le premier cas, de quantifier l'agitation thermique (au sens

large) des constituants fondamentaux d'un système et, dans le second cas, de dénombrer, dans l'état actuel de nos connaissances, les éléments chimiques ou structuraux à l'échelle moléculaire d'un système macroscopique : ces unités permettent en quelque sorte de donner un cadre à des grandeurs qui traduisent sur le plan macroscopique des effets quantifiables autrement à l'échelle moléculaire, effets dont on n'observe cependant, à l'échelle macroscopique et « humaine » (voir supra les utilisations des résultats de mesure) que des moyennes statistiques. Dans le dernier cas (intensité lumineuse et candela), le système international, pour des raisons historiques, intègre l'évaluation des rayonnements vus au travers d'un instrument de mesure particulier qui est l'œil humain moyen en vision diurne (dite photopique), permettant de traiter tout le domaine de la photométrie (lux, lumen, candela), par opposition au domaine de la radiométrie qui est celui de l'évaluation énergétique des propriétés des rayonnements. Ainsi, la vision est le seul « sens » de l'être humain réellement intégré au Système international, avec en fait l'ouïe, le modèle de comportement logarithmique de la sensation auditive en matière d'intensité acoustique en fonction de la pression acoustique étant bien adapté.

- la définition des unités de base

C'est la Conférence générale des poids et mesures (Cgpm), organisme diplomatique réuni tous les quatre ans, qui promulgue la définition des unités et émet des recommandations, sur proposition du Comité international des poids et mesures (Cipm) - assemblée d'éminents scientifiques réunie annuellement - comité qui lui-même s'appuie sur de nombreux groupes de travail internationaux faisant intervenir les laboratoires de métrologie des divers pays.

La structure s'appuie sur un laboratoire pérenne, le Bureau international des poids et mesures, installé à proximité de Paris, aux alentours du Petit Trianon de Saint-cloud (pavillon de Breteuil), dont le rôle scientifique est de contribuer aux efforts pour l'amélioration des références, d'orienter les travaux des laboratoires et de coordonner les comparaisons internationales, notamment.

Depuis plusieurs décennies, il apparaît clairement que l'évolution du Système international tente de mettre à profit les avancées les plus récentes de la science pour permettre aux scientifiques et à tous les utilisateurs industriels de disposer des outils les plus exacts, au sommet des chaînes d'étalonnage.

Les définitions retenues ont pour objectif d'assurer la pérennité (invariance dans le temps), l'uniformité (invariance suivant le lieu de matérialisation de l'unité, de réalisation d'un étalon), l'accessibilité (capacité à utiliser l'unité au plus proche de sa définition) et la plus grande exactitude possible des références ; elles sont de type très varié. A cet égard l'exemple du mètre, qui a connu en deux siècles quatre définitions successives, est intéressant pour appréhender ces évolutions.

- l'exemple du mètre

Le mètre, en Germinal an III, est d'abord lié à un système supposé invariable, la longueur du quart nord du méridien terrestre ; après le travail remarquable de Delambre et Méchain, qui raccordent un objet matériel à la fraction de méridien comprise entre Dunkerque et Barcelone par triangulation, cette définition n'est plus que rarement utilisée et les utilisateurs se contentent du prototype de fait alors étalonné (un étalon à bouts en Platine) conservé aux archives de France ; peu à peu, on prend en compte le caractère non pérenne du mètre « méridien » et, après la signature de la Convention du Mètre, il est décidé de donner acte de ces défauts en changeant la définition : le mètre devient en 1889 associé au prototype international, un étalon matériel particulier en platine iridié sur lequel sont gravés deux traits distants par définition de « un » mètre ; les progrès de la spectroscopie et de la physique quantique conduisent à retenir comme définition, en 1960 seulement, un multiple de la longueur d'onde d'une radiation résonnante sur une transition visible dans l'atome de krypton, comme J.C.Maxwell l'appelait de ses vœux dès la fin du XIX^e siècle. En 1983, la définition du mètre change une dernière fois : il est désormais établi à partir du phénomène de propagation de la lumière dans le vide : la définition traduit l'existence d'une loi physique fondamentale et impose le gel de la valeur numérique d'une constante physique fondamentale, la vitesse de propagation de la lumière c , dont la valeur numérique vaut désormais exactement, en unités du système international, $299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$. Étalon macroscopique terrestre, prototype, étalon atomique, expression d'une loi physique fixant la valeur numérique en SI d'une constante fondamentale, ces quatre définitions successives montrent que

ce système d'unités évolue de façon pragmatique dans le sens de la prise en compte de toujours davantage de science et de lois fondamentales.

- les autres unités de base

Les autres unités de base du SI traduisent cette variété de définitions :

La seconde est aujourd'hui réalisée avec une exactitude relative supérieure à 10^{-14} , à l'aide d'une horloge atomique, matérialisant la période d'une transition dans le domaine des radiofréquences, dans l'atome de césium ; ces horloges sont aujourd'hui, pour les plus performantes, établies à partir d'atomes refroidis par laser, presque immobiles isolés au repos, comme le postulerait un manuel de physique... Elle servent à l'établissement des références de temps. Bientôt installées en orbite, ces horloges serviront aux réseaux de positionnement.

Le kilogramme reste depuis 1889 défini par le biais d'un prototype en alliage de platine et d'iridium, dont les copies peuvent être étalonnées à quelques 10^{-9} près, et dont la stabilité globale, en termes de dispersion au moins, s'établit à moins d'un microgramme par an, à condition de bien définir et de contrôler l'état de surface des prototypes avant mesurage.

La définition de l'ampère exprime la loi de Laplace et permet d'établir au dixième de millionième près (aujourd'hui grâce au mètre et à la seconde) les principaux étalons du domaine électrique, à partir de condensateurs calculables de haute exactitude, les « condensateurs de Lampard ».

Le kelvin fait référence à la matérialisation du point triple de l'eau pure, réalisée en pratique au dixième de millikelvin près ; il convient également de mettre en place dans une étendue de mesure très vaste allant des températures cryogéniques (près de $-272,9^{\circ}\text{C}$) aux conditions exigeant des méthodes de pyrométrie près de 1300°C), l'échelle internationale de température (EIT-90) promulguée en 1990 et étendue en 2000 ; la France diffuse dans de nombreux pays un système de mini-cellules à multi-compartiments matérialisant divers points fixes de l'échelle de température, obtenus lors de l'équilibre entre phases de corps purs, à l'instar du mélange eau-glace couramment utilisé.

La mole relie, par l'intermédiaire de la masse de l'isotope 12 de l'atome de carbone, les grandeurs à l'échelle atomique aux grandeurs macroscopiques ; de sa définition résulte le fait que la constante d'Avogadro doit faire l'objet de mesures.

Enfin la candela assure, à quelques millièmes ou dix-millièmes près, le raccordement entre les grandeurs radiométriques et le domaine photométrique comme expliqué plus haut.

Le rôle croissant de la physique fondamentale

De nombreux travaux sont entrepris pour obtenir une exactitude plus grande, des références plus pérennes ou plus accessibles, ou encore pour élargir le champ d'application effectivement couvert. Ils portent principalement aujourd'hui, pour la partie physique, sur l'utilisation et la mise en œuvre de phénomènes de physique fondamentale. Dans le domaine électrique - mais les recouvrements de ce domaine avec les grandeurs énergétiques, et donc le kilogramme, sont nombreux - on cherche à mettre à profit les effets quantiques macroscopiques découverts au cours des quarante dernières années : l'effet Josephson, aujourd'hui pour la conservation du volt ; l'effet Hall quantique pour la conservation de l'ohm ; les effets mono-électroniques (pompe à électron, éclose...) dont la matérialisation pratique à un haut niveau d'exactitude permettrait de boucler le triangle de la métrologie quantique et d'introduire dans la détermination des constantes fondamentales h (constante de Planck) et e (charge de l'électron) la redondance nécessaire à l'estimation des incertitudes associées. De même les progrès en spectroscopie atomique, ceux accomplis dans l'évaluation des caractéristiques des systèmes microscopiques, permettent d'espérer de substantielles améliorations. Aujourd'hui, pour la seconde par exemple, la perspective d'obtenir et d'observer expérimentalement des systèmes composés d'atomes pratiquement immobiles, pratiquement isolés, et de construire à partir de ces atomes des horloges dans le domaine optique, devient peu à peu une réalité grâce aux méthodes de ralentissement et de refroidissement par laser.

L'interférométrie atomique, dans laquelle on met à profit le comportement ondulatoire de systèmes aussi lourds que des atomes ou des molécules (qui doivent être ralentis de façon drastique) permet d'utiliser ces atomes comme de très précises sondes locales et semble, par exemple, une technique de gravimétrie prometteuse. L'Échelle Internationale de Température promulguée en 1990, et qui fait appel à un instrument d'interpolation particulier (le thermomètre à résistance de platine) entre des points fixes de référence nombreux, peut être utilement complétée par la mise en oeuvre d'effets physiques nouveaux dans le domaine des très basses températures, comme l'étude de la propagation du son dans l'hélium liquide, ou la courbe de fusion de l'hélium 3. Des projets tendent à utiliser, en radiométrie et pyrométrie ou en spectroscopie, la constante de Boltzmann. Les mesures de rayonnement reposent désormais sur la radiométrie cryogénique à substitution électrique. Enfin d'importants efforts sont engagés pour obtenir, à terme, une définition de l'unité de masse qui ne fasse plus intervenir un prototype dont la pérennité n'est en aucun cas garantie : expériences de mesure de flux magnétique dans des systèmes en lévitation supraconductrice, de comparaison d'une puissance électrique à une puissance mécanique, de comptage et de pesage simultanés d'ions lourds (susceptibles de raccorder, par une détermination meilleure de la constante d'Avogadro, une masse atomique à une masse macroscopique au niveau d'exactitude requis)... Parmi les différents projets engagés, il convient d'accorder à la « balance du watt » une place toute particulière puisqu'elle conduirait sans doute à une évolution simultanée des références électriques : cette expérience revient à comparer, dans une balance de type Cotton utilisée en statique (on « pèse » la force de Laplace exercée par un champ sur un circuit) puis en dynamique (on mesure la f.é.m. induite par un déplacement contrôlé du même circuit dans le même champ), une puissance électrique obtenue à partir d'étalons quantiques et une puissance mécanique ; elle revient à mesurer h , ou à valider la stabilité du prototype du kilogramme...

L'approche statistique de la mesure

La dispersion des résultats de mesure lorsqu'on répète à l'identique un mode opératoire justifie l'adoption d'une démarche d'interprétation statistique de la mesure. Il convient néanmoins, dans chaque cas, de faire l'inventaire des causes d'erreur susceptibles de biaiser le résultat, d'effectuer les corrections nécessaires, d'évaluer, *a priori* ou par des mesures et des comparaisons complémentaires, l'incertitude associée à celles-ci, de composer ces termes avec la dispersion liée à la répétabilité du procédé de mesure et d'exprimer le résultat en termes d'intervalle de confiance.

En effet, de nombreuses causes d'erreur viennent affecter le résultat brut d'un mesurage, suite d'actes élémentaires permettant d'obtenir un résultat brut. Il faut introduire des corrections pour compenser ces erreurs, corrections qui sont elles-mêmes issues de mesures, donc incertaines...

Estimation de l'incertitude-type

On appelle *incertitude de mesure* un paramètre associé au résultat qui caractérise la dispersion des valeurs numériques qui peuvent être, raisonnablement, attribuées au mesurande [6]. C'est l'approche statistique de la mesure qui permet d'évaluer l'incertitude-type, dont la dénomination traduit que la dispersion est exprimée par l'écart-type de la distribution des valeurs [7, 8].

Il faut donc estimer l'impact de toutes les causes de variabilité du résultat, une fois les corrections effectuées. Deux types de méthodes permettent l'évaluation des composantes de l'incertitude.

Les méthodes d'évaluation dites de type A concernent toutes les techniques d'évaluation basées sur un procédé statistique prenant en compte la dispersion observée lors de la répétition du procédé de mesure (analyse de variance, étude de répétabilité, de reproductibilité). Une telle évaluation ne peut être que globale. Des techniques d'ajustement par moindres carrés sont également fréquemment mises en oeuvre.

Les méthodes d'évaluation dites de type B concernent *a contrario* toute technique d'évaluation basée sur un procédé autre que statistique. Une telle évaluation s'appuie généralement sur un jugement porté à la suite d'une analyse physique de la manipulation, utilisant toutes les informations disponibles. Il faut en particulier cerner la part d'incertitude qui est due à chacune des corrections associées aux causes d'erreur identifiées, même lorsqu'elles n'apportent pas *a priori* de dispersion directement discernable aux résultats. On applique le même formalisme que pour les méthodes de type A, à savoir évaluer l'incertitude sur la correction (correction qui peut être nulle !) par une valeur U qu'on peut traiter comme un écart-type. Cette valeur est déterminée à partir d'éléments variés : bibliographie sur les matériaux et capteurs, notices des fournisseurs et constructeurs, certificats d'étalonnage, rapport de comparaisons, ... mais aussi à partir des connaissances et du savoir-faire de l'analyste et de l'opérateur. Cette manière de procéder revient, dans certains cas, à postuler l'existence sous-jacente d'une loi de distribution statistique pour la correction considérée.

Pour obtenir l'incertitude sur la correction totale, on applique la loi quadratique de composition des variances, dans l'hypothèse où causes d'erreur et corrections sont non corrélées. On peut évidemment tenir compte de corrélations et adapter le formalisme au cas très général des mesures indirectes. L'incertitude-type du résultat est donnée par la racine carrée de cette variance.

Intervalle de confiance

Pour quantifier la probabilité que l'on a de trouver les résultats dans un intervalle donné, pour prononcer la conformité à une spécification, il faut connaître davantage que l'incertitude-type. En général, on fait l'hypothèse que les différentes valeurs pouvant être obtenues pour la mesure d'une grandeur physique donnée suivent une distribution gaussienne ; on peut alors évaluer le risque encouru lorsqu'on donne pour la valeur de la grandeur un intervalle de confiance, de "certitude maîtrisée" [3]. En limitant cet intervalle à plus ou moins un écart-type autour de la valeur estimée, le risque est de 68 % ; deux écarts-types, le risque est inférieur à 5 % ; trois écarts-types, on approche les 100 %.

Il est essentiel d'adopter cette composition quadratique, cohérente avec la donnée d'un intervalle de certitude maîtrisée, quelles que soient les prétentions des partenaires à disposer d'un intervalle d'erreur maximale ou une tolérance qui ne sont que des intervalles de certitude absolue illusoire et scientifiquement sans fondement. Mais dans des cas particuliers, une connaissance accrue de la distribution des résultats permet de fixer des limites plus contraignantes pour l'acceptation d'un produit ou pour définir la capacité d'un équipement. De nombreuses normes proposent un cadre de référence pour de telles conventions entre un « fournisseur » de résultat et son « client » [9].

Conclusion

Ainsi, « mesurer », c'est comparer une grandeur physique inconnue à une référence dont la traçabilité est établie dans le cadre du Système international d'unités et évaluer l'incertitude associée, aussi élevée soit-elle, par une approche statistique de la mesure permettant d'apprécier la justesse du résultat, la fidélité des instruments, ... Adopter ce langage naturel de la métrologie, qui repose sur des règles scientifiquement justifiées pour l'évaluation et l'expression ou la matérialisation de ces paramètres, est un des moyens les plus efficaces afin que puissent être utilisés de façon pertinente et confiante, dans les domaines scientifiques, techniques ou de vie courante, les résultats de mesure.

Quelques références

- [1] GIACOMO P., « Mesure et métrologie » *Bulletin du Bureau National de Métrologie* vol. 101, 1995, page 1, Chiron, Paris.
- [2] HIMBERT M., « Le mètre : l'aventure continue... » *Bulletin du Bureau National de Métrologie* vol. 93, 1993, page 1, Chiron, Paris.
- [3] HIMBERT M., « Métrologie : un langage universel pour les sciences et techniques », *Récents Progrès en Génie des Procédés*, vol. 12, page 15, 1997.
- [4] QUINN T.J., HIMBERT M., « Mesurer : unités et incertitudes », *La Mesure*, Entretiens de la Villette vol. 7, page 107, Éditions Cndp, Paris, (1996).
- [5] « Le système international d'unités », BIPM, 1998 & 2000, Gauthier-Villars, Paris.
- [6] « Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie » 1993, ISO ed., Version française NF X 07 001, 1993, AFNOR ed., Paris.
- [7] « Guide to the expression of uncertainty in measurement » 1993, ISO ed., Version française 1995, AFNOR ed., Paris.
- [8] RANSON C., « Introduction à la lecture du Guide pour l'expression des incertitudes de mesure, *Bulletin du Bureau National de Métrologie* vol. 103, 1996, Chiron, Paris.
- [9] PERRUCHET C., PRIEL M., *Estimation de l'incertitude de mesure* 2000, AFNOR ed., Paris.
- HIMBERT M., PINOT P., « The unit of mass : new trends for the future » Proc. VIIIth Int. Metrology Cong., Besançon, 1997, Mfq-Bnm-Ofmet, Paris.
- HIMBERT M., « Métrologie Scientifique : de nouvelles pistes pour la matérialisation des unités » Proc. VIIth Int. Metrology Cong., Nîmes, 1995, Mfq-Bnm, Paris.
- « Special issue on physical units » *Metrologia*, vol. 31, 1995, pages 403-541, Bipm éditeur, Sèvres.

Atelier n°1

Les objectifs des travaux pratiques

Animatrice : Hélène Richoux, professeur de physique-chimie au lycée Marcel Pagnol d'Athis-Mons et à l'Inrp-Didactique des sciences expérimentales

Intervenants : Maryline Coquidé, maître de conférences en didactique de la biologie à l'université et Iufm Rouen, Lirest Ens Cachan, Odile Gallais, maître de conférences en chimie à l'université Paris-Sud, Laurent Jourdan, Igen de sciences et techniques industrielles, Jean-Marie Virely, Ens Cachan

35 stagiaires des différentes disciplines scientifiques ont participé aux travaux des deux séances de l'atelier : 7 enseignants en sciences de la vie et de la Terre, 4 en sciences et techniques industrielles et enfin 24 en sciences physiques et chimiques. Les participants à l'atelier enseignent à différents niveaux : collège, lycée, Cpge, université, Ens et Iufm.

L'atelier a été construit dans le but, d'une part, de sensibiliser les participants aux différents niveaux d'objectifs, d'explicitier et de distinguer les objectifs d'apprentissage visés pour une séance de travaux pratiques des fonctions et missions des activités expérimentales réalisées par les élèves en sciences et, d'autre part, de réfléchir sur l'articulation entre les tâches et activités proposées aux élèves et l'apprentissage visé.

Après un rappel de l'importance donnée dans l'enseignement scientifique et technique français aux activités expérimentales réalisées par les élèves, l'enjeu de l'atelier a été présenté.

Objectifs d'apprentissage, fonctions et missions des activités expérimentales

Afin de faire émerger les objectifs d'apprentissage visés lors de séances de travaux pratiques, les participants ont travaillé par groupes dans lesquels, pour enrichir la réflexion et les débats, les différentes composantes (disciplines et niveaux d'enseignement) étaient représentées. Les productions attendues, comportant cinq objectifs d'apprentissage, devaient donc représenter les choix et les formulations de chaque groupe.

Un long travail de discussion (s'appuyant ou non sur des fiches de travaux pratiques) entre les membres de chaque groupe, travail soutenu par l'ensemble des animateurs, a permis de recueillir des listes "d'objectifs" reproduits dans le tableau ci-dessous :

Groupe 1	savoir observer savoir agir savoir conceptualiser savoir coopérer devenir autonome
Groupe 2	analyser et interpréter des faits et des résultats expérimentaux organiser, exploiter et traiter les résultats manipuler du matériel et des appareils donner du sens à un concept, à un savoir découvrir une notion nouvelle répliquer une expérience historique impliquer l'élève
Groupe 3	acquérir une méthode de travail

	acquérir des connaissances (articuler, concrétiser, etc.) acquérir des savoir-faire apprendre à communiquer apprendre à travailler en groupe
Groupe 4	confrontation au réel savoir faire technique démarches scientifiques savoir être, comportement évaluation formative
Groupe 5	établir un protocole réinvestir des connaissances validation d'un acquis de cours différences réel, modèle

Une première lecture montre la variété des "objectifs" proposés. Ces résultats font également apparaître la cohérence de la production de chaque groupe : ainsi, par exemple, le groupe 1 propose une liste d'objectifs qui ne sont pas spécifiques aux travaux pratiques de sciences et qui sont des objectifs à long terme, alors que le groupe 2, dans la formulation donnée, paraît énumérer essentiellement un ensemble de tâches, d'activités d'élèves.

Ce travail, par la durée des discussions, par les productions obtenues, montre à l'évidence la difficulté à différencier objectifs et tâches et à définir des objectifs d'apprentissage.

Afin d'analyser des fiches de travaux pratiques de physique, chimie et biologie des niveaux lycée et début d'université, une liste d'objectifs d'apprentissage a été élaborée dans le cadre du projet européen "Labwork in Science Education" :

aider les élèves à...

- identifier des objets et des phénomènes et à se familiariser avec eux ;
- apprendre un ou des fait(s) ;
- apprendre un concept ;
- apprendre une relation ;
- apprendre une théorie, un modèle ;
- apprendre comment utiliser un instrument de laboratoire courant, ou installer et utiliser un dispositif expérimental classique ;
- apprendre comment exécuter un mode opératoire classique ;
- apprendre comment planifier une recherche pour s'attaquer à une question ou à un problème spécifique ;
- apprendre comment traiter des données ;
- apprendre comment utiliser des données pour appuyer une conclusion ;
- apprendre comment communiquer les résultats de leur travail.

La discussion qui s'est appuyée sur cette liste a permis à la fois de préciser et d'éclairer les choix qui ont été pris en compte lors de son élaboration (ce sont les seuls savoirs et savoir-faire disciplinaires qui sont ici visés) et de faire apparaître les différences avec les objectifs proposés par chaque groupe de travail.

Tâches proposées et apprentissages visés

Dans une deuxième phase, c'est une réflexion autour des tâches planifiées pour les apprentissages visés qui a été l'objet du travail des groupes.

La majorité des tâches proposées (telles qu'elles ont été formulées) peuvent être regroupées autour de quatre pôles :

la mise en œuvre de matériel et d'instruments :

- mettre en œuvre du matériel ;
- manipuler du matériel ;
- mesurer (choix d'appareils, réglage, etc.) ;
- mesurer le plus précisément possible.

l'élaboration et/ou la mise en œuvre d'un protocole expérimental :

- suivre un protocole, appliquer un protocole ;
- formuler un protocole, établir un protocole ;
- écrire un protocole ;
- justifier un protocole.

le traitement des mesures :

- traiter les mesures ;
- conclure à partir de résultats obtenus.

la rédaction d'un compte rendu :

- rédiger un compte rendu ;
- réaliser un compte rendu.

Parallèlement un seul groupe a proposé : observer / décrire et schématiser ; émettre des hypothèses.

Ce travail de groupe a permis de mettre en évidence les tâches communes demandées aux élèves dans les différentes disciplines scientifiques, mais n'a pas fait apparaître les spécificités des différentes disciplines (ce qui peut s'expliquer par la forte proportion d'enseignants de physique-chimie).

Dans une des séances, les résultats établis par la recherche européenne déjà citée ont été présentés ; la réflexion s'est prolongée sur la cohérence entre objectifs visés, tâches planifiées et consignes en analysant des réponses d'élèves et en observant, sur un film vidéo, la mise en œuvre des connaissances des élèves d'un binôme lors de la construction d'une argumentation (extrait d'un film vidéo réalisé pour la recherche Inrp-Lyon II en cours "Conception et analyse d'activités pour la formation scientifique").

Ont été ensuite présentés les caractères propres aux TP de technologie où l'objet d'étude n'est pas le phénomène mais le produit industriel réalisé pour son exploitation. Cette approche, d'une part, donne du sens à l'analyse par la validation de la pertinence de l'usage et, d'autre part, permet d'aborder la complexité des contraintes qui jalonnent la réalisation de produit. L'explicitation des principes sur lesquels s'appuie la conception des TP (avec notamment le choix explicite des objectifs d'apprentissage) et des précisions sur la place et les critères de l'évaluation des compétences acquises ont également été apportées aux stagiaires.

Enfin, le débat a été élargi autour des objectifs des activités expérimentales en TP en présentant :

les fonctions des travaux pratiques (au niveau de la classe) :

- fonctions de scientificité ;
- fonctions d'authenticité ;
- fonctions éducatives ;
- fonctions pédagogiques.

les missions des travaux pratiques (au niveau du curriculum) :

combler un déficit de familiarisation pratique aux objets et phénomènes ;
développer un rapport expérimental au monde : transformer ses conceptions, affronter la matérialité des sciences, développer une rationalité expérimentale ;
favoriser des orientations professionnelles positives.

Une analyse (selon ce dernier point de vue) des "objectifs" visés pour les travaux pratiques dans les programmes de lycée et de collège en sciences de la vie et de la Terre et en sciences physiques fait apparaître une imbrication des "objectifs d'apprentissage", des fonctions et des missions ; on retrouve cette même difficulté dans le travail des groupes de l'atelier : ce sont les fonctions éducatives et pédagogiques qui sont le plus souvent distinguées.

En conclusion, la richesse des échanges qu'ont suscité les activités développées dans cet atelier montre l'intérêt des enseignants des différentes disciplines scientifiques pour une clarification du concept d'objectif et l'importance qu'ils y attachent pour leur enseignement. Le débat a mis en évidence la difficulté qu'éprouvent les enseignants à construire des activités de TP qui contribuent de façon pertinente à l'acquisition de compétences par les élèves ; il a fait émerger une forte demande de formation des professeurs.

Atelier n°2

La mise en œuvre de l'expérience dans les travaux personnels encadrés

Animatrice : Marie-Françoise Karatchentzeff, professeure de physique-chimie au lycée Marie Curie à Sceaux.

Intervenants : Marie-Christine Baurrier, professeure de physique-chimie, et Jacqueline Gentils, professeure de biologie, au lycée Pothiers à Orléans ; Hélène Combet, professeure de physique-chimie, et Dominique Meyer, professeure de mathématiques, au lycée Jean Zay à Orléans ; Bernard Lacage, professeur de sciences industrielles au lycée Marie Curie à Nogent-sur-Oise.

Dans cet atelier interviennent 5 professeurs : un professeur de classe préparatoire en sciences industrielles (SI) membre du groupe d'experts de SI et deux binômes ayant pratiqué dans leurs classes de 1^{ère} S des TPE interdisciplinaires à fort caractère expérimental, depuis plus de deux ans, en sciences physiques et mathématiques pour l'un, en sciences physiques et biologie pour l'autre.

Parmi les 30 participants, d'horizons assez divers, quatre seulement ont pratiqué les TPE dans leurs classes. Les autres se sont inscrits à l'atelier pour s'informer sur cette nouvelle forme d'enseignement :

- soit parce qu'ils pratiquent des activités analogues dans leurs classes, sous forme de projets pluridisciplinaires (3 professeurs de collège et 1 professeur de Sti) ou qu'ils se destinent à encadrer des TPE dans les prochaines années (professeurs de lycée) ;
- soit parce qu'ils sont impliqués dans la formation des maîtres (4 formateurs en Iufm) ou dans l'accompagnement des enseignants et des élèves (1 professeur de biologie attaché à la Cité des sciences et de l'industrie et Brigitte Zana, directrice de l'Explor@dome) ;
- soit enfin parce que cette nouvelle forme d'enseignement est susceptible de modifier le profil de leurs futurs étudiants (2 enseignants de l'université de Cergy-Pontoise).

L'objet de l'atelier est d'une part de montrer que la mise en œuvre d'expériences en TPE entre bien dans le champ pluridisciplinaire de cette nouvelle forme d'enseignement et d'autre part d'envisager l'intérêt qu'il y a pour les élèves à mener une expérimentation en TPE. Les textes figurant aux paragraphes I et II ont été distribués aux stagiaires et ont servi de base à la discussion.

Les TPE en filière S, option SVT

Les textes officiels

Tous les textes officiels sont consultables en ligne, sur le site pédagogique de la direction de l'enseignement scolaire : www.eduscol.education.fr rubrique « lycée », TPE, textes de référence.

Quel intérêt à ce que les élèves expérimentent en TPE ?

De manière générale, quel sens donnons-nous au mot expérimenter ?

- ⇒ Différence entre manipulation et expérimentation
- ⇒ Différence de signification selon les disciplines
- ⇒ Différence avec un exposé

De manière générale, expérimenter correspond à ce que le groupe réalise par lui-même (expérience, raisonnement à partir de données scientifiques, conjecture et démonstration mathématique, compréhension du fonctionnement d'un logiciel, utilisation à bon escient, etc.

Dans le contexte des TPE, quel intérêt y a-t-il à mener une expérimentation ?

Garantie d'un travail personnel, d'une appropriation, d'une créativité

⇒ Facilite la possibilité de contrôler le caractère personnel du travail des élèves.

Garantie d'un contenu scientifique

⇒ Beaucoup d'élèves en restent aux phases n°1 et n°2 du travail à faire, c'est-à-dire les phases de recherche documentaire et de mise en ordre de cette recherche ; il manque la phase d'étude.

⇒ Dans de nombreux cas, le travail présenté se limite à une simple énumération sans véritable contenu.

⇒ La question s'est donc posée d'identifier l'absence de démarche, notamment scientifique, dans le travail des élèves. Des marqueurs de cette absence seraient :

- l'absence d'expérience (au sens d'expérience de physique ou de chimie !)
- l'absence de références à des lois ou des théories de la physique ou de la chimie ;
- l'absence de la formulation claire d'une problématique.

L'absence de contenu s'accompagne généralement d'une dérive encyclopédique : le dossier prend alors de l'épaisseur et tombe dans la vulgarisation avec l'utilisation d'un vocabulaire non maîtrisé.

Face à ces dérives, une manière efficace d'obtenir un contenu scientifique est de réaliser une expérience simple. L'identification des paramètres de l'expérience et l'action sur un seul de ces paramètres constituent une limite bien satisfaisante au-delà de laquelle il n'est pas souhaitable d'aller. La manipulation étant réalisée au lycée, elle possède de plus un caractère authentique : il ne peut pas s'agir de copier-coller, même si son descriptif se trouve dans les manuels, et encore moins d'une *réalisation* extérieure.

Critère de motivation pour les élèves

Interdisciplinarité dans l'expérimentation

Le sens que l'on donne à l'expérimentation, les consignes que l'on donne aux élèves sont-elles les mêmes dans les 3 disciplines scientifiques ?

Exemples :

En mathématiques, logiciels sur la perspective. S'agit-il d'une expérience ?

Construction avec des bandes de papier pour illusions d'optique.

En SVT/Sciences physiques : conservation des aliments.

Quel guidage pour les manipulations ?

Où chercher sa manipulation ?

⇒ Dans la tête : cela est possible chez certains élèves, surtout s'ils sont très guidés par le professeur. Il reste difficile de concevoir des manipulations pour l'élève lambda.

⇒ Les élèves se servent donc souvent dans des livres scolaires. Est-ce un mal ? Comment font les professeurs pour mettre en place de nouveaux TP ?

⇒ Quel degré d'invention y a-t-il vraiment dans un protocole ?

⇒ Le problème du choix de la manipulation se pose de manière cruciale quand elle porte sur un domaine inconnu pour eux (ex : spectrophotométrie).

Problème de l'autonomie

- ⇒ On laisse souvent les élèves « galérer » parce qu'on est pris par les autres groupes.
- ⇒ Cela est bien, car les élèves apprennent à s'en sortir seuls, ils mémorisent mieux les erreurs qu'ils ont faites et qui ne sont plus à faire (dosage du lait).
- ⇒ Cela risque cependant de les décourager à cause des échecs successifs, de leur incapacité à rebondir, ou de celle du professeur à résoudre leur problème, faute de connaissances, de matériels...
- ⇒ Mais cela est un bon indicateur de l'adaptabilité des élèves aux conditions de travail (vit C et réactif bleu).

Les contraintes pratiques

Choix des élèves

Il ne s'agit pas que tous les élèves réalisent un travail comportant une partie manipulative (cela nous semble impossible à réaliser et ne concorderait sûrement pas avec les aspirations des élèves). Il faut simplement pouvoir offrir à ceux qui le souhaitent la possibilité de mener une activité expérimentale modeste et adaptée à leurs capacités.

Personnel de laboratoire

Préparation des manipulations : instaurer un dialogue entre les élèves demandeurs de manipulations et le personnel de laboratoire semble être un bon moyen de communiquer. Les uns prennent conscience des disponibilités du laboratoire, les autres sont impliqués dans le travail des élèves et donc plus motivés.

Rôle du personnel pendant les séances de manipulations : ils peuvent ne pas être seulement pourvoyeurs de matériel.

Contraintes de locaux

Il faudrait avoir à la disposition des groupes de TPE une salle de travaux pratiques adaptée aux manipulations que demandent les élèves.

Les séances de chimie, de physique ou de SvT ne « tombent » pas toujours bien pour les élèves qui n'ont pas assez progressé pour manipuler, ou qui au contraire doivent attendre pour pouvoir réaliser leur expérience.

Contraintes de matériel

Il est d'abord indispensable que les professeurs et les aides de laboratoire aient une bonne connaissance de ce qui est disponible dans les laboratoires.

Les élèves sont ensuite limités dans leurs recherches par le matériel qui est disponible (en quantité et en qualité), leurs demandes étant très diverses et non axées sur un programme officiel relativement strict comme cela était le cas jusqu'à présent.

Il faudrait donc d'abord établir une liste précise du matériel et des produits disponibles dans les laboratoires, afin d'envisager ensuite des achats spécifiques.

Quelle place les manipulations ont-elles dans le calendrier des TPE ?

Les élèves exploitent les documents qui ont été recueillis aux séances précédentes et font éventuellement des expériences en relation avec leur sujet.

La mise en place de manipulations arrive donc après la définition du sujet, de la problématique, d'une première recherche documentaire, à moins que le TPE ne soit centré sur l'étude d'une expérience historique. Elle constitue alors presque à elle seule le sujet du TPE.

Quelle évaluation faire de ces manipulations ?

Maîtrise expérimentale

A - Sur le fond
Choix des expériences en accord avec le sujet
Choix d'expériences réalistes et réalisables
Protocole expérimental
Validité de l'exploitation
Compréhension du phénomène physique étudié
Exploitation de l'expérimentation dans le dossier
B - Dans la mise en œuvre
Choix du matériel (pertinence, adéquation et réalisme avec le protocole)
Habilité et respect des consignes de sécurité

L'expérimentation du point de vue des élèves

Du point de vue pratique

Quelle trace des manipulations dans le carnet de bord ?

⇒ Le carnet de bord aide l'élève à organiser son travail :

- Description des itinéraires choisis / écartés ;
- Mémorisation des étapes franchies ;
- Analyse des erreurs faites et des difficultés rencontrées ;
- Projection dans les étapes futures ;
- Répartition du travail dans le groupe ;
- Description de la documentation collectée ;
- Gestion du temps imparti.

⇒ Il lui facilite le travail de production finale :

- Pour la synthèse écrite brève ;
- Pour la présentation orale.

⇒ Il permet aux professeurs de suivre le travail des élèves.

Ainsi, le professeur peut suivre l'évolution du projet. Le compte rendu est beaucoup plus personnalisé que lors d'un TP normal, mieux approprié. Les élèves ne cherchent pas « la réponse du professeur », mais une solution à leur propre problème.

Exigences pratiques vis-à-vis des élèves

Lorsque les élèves souhaitent enrichir leur travail de manipulations, ils doivent :

- fournir à l'avance la liste de matériel nécessaire et le protocole au professeur ;
- discuter au préalable avec le professeur sur la faisabilité de l'expérience ;
- éviter de laisser des manipulations « en attente » au laboratoire de manière à ne pas encombrer, monopoliser le matériel...

Il faut exiger avant la séance de manipulation une liste de matériel nécessaire et un protocole expérimental. Dans l'absolu, il faudrait que ce dernier soit fourni suffisamment à l'avance pour que le professeur en discute avec les élèves, car sur ce point les propositions délirantes sont assez fréquentes. Il faut donc être très modeste : il est plus important de laisser les élèves réaliser eux-mêmes une expérience simple qu'ils ont imaginée que de les aider à réussir une expérience plus spectaculaire qui leur aura été indiquée.

Du point de vue de la démarche intellectuelle

Quelle exploitation de la démarche expérimentale espère-t-on retrouver dans la production finale ?

- ⇒ Une critique de la manipulation ou du raisonnement ;
- ⇒ Une demande de modification, d'évolution de la manipulation ;

⇒ Une réponse à la problématique de départ...

CONCLUSION

Il ne s'agit pas que tous les élèves réalisent un travail comportant une partie manipulative, mais il faut simplement pouvoir offrir à ceux qui le souhaitent la possibilité de mener une activité manipulative modeste adaptée à leurs capacités. En revanche, il faut que tous mènent un raisonnement scientifique.

Contenu scientifique
Ouverture scientifique de la problématique
Référence à une loi ou à une expérience de sciences
Éléments de réponse scientifiques
Exactitude du contenu scientifique
Clarté du raisonnement

Les TPE en filière S, option SI

Les textes officiels

Extrait du nouveau programme de S, option SI, se rapportant à l'expérimentation (document du groupe d'experts sur les programmes scolaires de sciences et technologies industrielles).

Ce texte a pour objectif :

- d'informer les collègues des autres disciplines participant à cet atelier sur la réforme en cours ;
- de préciser la spécificité des expérimentations en SI ;
- de témoigner des questions qu'il est naturel de se poser sur l'expérimentation en TPE.

Sciences de l'ingénieur

L'élaboration par l'homme de produits réalisant des fonctions matérielles ou virtuelles exige, pour les concevoir, les fabriquer et en obtenir les performances attendues, des compétences scientifiques et pluritechniques alliées à une compréhension approfondie des principes qui les gouvernent.

Partant de problèmes concrets, les "Sciences de l'Ingénieur", sciences de la conception et de la réalisation des systèmes inventés par l'homme, concernent aussi bien l'élaboration d'objets, d'équipements et de processus, que l'organisation qui accompagne ces créations.

Par leur implication dans l'ensemble de l'activité humaine, les "Sciences de l'Ingénieur" sont en interdépendance avec les sciences de la nature, les sciences économiques et les sciences humaines, dont elles exploitent les lois et les méthodes tout en contribuant à leur développement.

Objectifs généraux

L'enseignement des Sciences de l'Ingénieur dans la voie S aborde les grands domaines techniques de la mécanique, l'automatique, l'électrotechnique, l'électronique, le traitement et la communication de l'information.

La formation vise à donner au bachelier des connaissances de base dans les domaines concernés ainsi que la capacité à conduire en autonomie des activités pratiques. Elle s'appuie sur l'étude de la conception et la mise en œuvre de tout ou partie de produits pluritechniques. Elle fait largement appel

aux outils informatiques pour représenter des solutions constructives existantes ou imaginées, pour calculer des paramètres déterminants, et pour simuler des comportements à partir des lois physiques.

Compétences terminales visées

Le titulaire du baccalauréat S doit être capable :

- d'identifier l'organisation fonctionnelle et structurelle d'un produit ou d'un système pluritechnique, ainsi que les flux d'énergie et d'information par lesquels il s'anime et communique ;
- de le mettre en œuvre, d'analyser son fonctionnement et d'y associer des modèles de comportement ;
- d'en déterminer expérimentalement les principales performances.

Complémentarité des approches d'un sujet de TPE en mathématiques, sciences physiques et sciences de l'ingénieur

Les sujets choisis et développés en TPE sont pluridisciplinaires : Mathématiques/SI et Physique/SI, car l'encadrement dans la filière S option SI s'articule sur ces trois disciplines scientifiques. La spécificité des sciences de l'ingénieur dans les TPE est de se référer à des produits ou à des systèmes.

Exemples de démarches de choix d'un sujet de TPE Physique/SI :

1) Démarche partant du choix d'un phénomène physique pour parvenir à l'étude d'un produit

Les connaissances scientifiques (physique et SI) du phénomène et de ses modèles aux programmes des classes de première et de terminale filière S/SI permettent de s'approprier les connaissances complémentaires tirées des publications pour le grand public et/ou le spécialiste. Les connaissances de physique et de SI sont ainsi mobilisées pour concourir à réaliser un produit répondant à un besoin exprimé. Le produit est alors choisi parmi d'autres car permettant de mieux concrétiser le phénomène étudié.

2) Démarche partant du choix d'un produit pour parvenir à l'étude d'un phénomène physique

Le produit conçu et réalisé répond à un besoin exprimé. Il est accessible, ce qui justifie qu'il soit retenu pour ce TPE. Il met en œuvre des chaînes fonctionnelles qui sont le lieu de phénomènes physiques importants. Les fonctions réalisées par le produit, les fonctions techniques internes au produit sont des sources de développement mettant en œuvre des connaissances scientifiques (physique et SI). Parmi les phénomènes physiques mis en œuvre, le plus significatif abordable est retenu.

Expérimentation donnant lieu à des manipulations ou pas :

Une expérimentation ne se justifie-t-elle que si elle permet de résoudre un véritable problème posé ?

Est-il vraiment raisonnable de reconstruire une expérimentation publiée dans des livres ?

Expérimenter pour un élève est-ce assister à une expérimentation dans un laboratoire et exploiter les résultats ?

En SI, expérimenter un produit revient pour partie à vérifier que le produit est capable de fournir les performances attendues. Il est donc nécessaire de disposer du produit et d'effectuer des contrôles sur ce produit. L'instrumentation (capteur) devient nécessaire et cette situation est rapidement lourde à gérer même par une équipe motivée. L'autonomie trouve ainsi ces limites. Les TPE s'appuyant sur des partenaires extérieurs à l'établissement (entreprise, association, laboratoire de recherche...) peuvent ainsi aboutir !

Organisation de l'enseignement

Les Travaux Personnels Encadrés (TPE), organisés en équipe avec un professeur de mathématiques ou de sciences physiques ou un autre professeur enseignant dans la classe, sont l'occasion de mettre en œuvre la pluridisciplinarité, de faire le lien entre les concepts spécifiques aux différentes disciplines et ainsi d'enrichir mutuellement les diverses approches.

En classe de terminale les TPE prendront la forme d'un Projet Pluritechnique Encadré, sur des sujets se référant au programme de la classe avec une large ouverture thématique.

B. Projet pluritechnique encadré et articulation avec les TPE

Une partie des activités de la classe de terminale est réservée à la réalisation d'un projet pluritechnique encadré (Ppe) qui exerce la créativité des élèves, met en œuvre et complète les savoirs et les savoir-faire visés par la formation et développe les capacités de réflexion autonome et de travail en groupe organisé des élèves.

Réalisée dans le cadre horaire affecté au TPE en terminale et structurée en démarche de projet, cette réalisation peut débiter par la recherche d'une documentation relative au sujet abordé, se poursuivre par la définition d'une architecture et aboutir à la création, la modification, la validation, la configuration, la mise en œuvre et le test de solutions constructives ou de processus.

Associée à un mini dossier témoignant de la démarche conduite, la production pourra prendre diverses formes : fichiers, maquette de simulation, prototype de pièce, dispositif de mesure d'une performance du produit ou du système en réponse au Cdcf, etc.

L'ensemble des ressources documentaires et des moyens disponibles dans le laboratoire pourra être mobilisé pour mener à bien les activités de projet. L'éventualité d'un travail conduit en collaboration avec d'autres sections de l'établissement peut également présenter un intérêt pour la découverte de divers procédés et pour l'illustration concrète de la démarche d'ingénierie.

CONCLUSION

L'activité expérimentale conduisant à des manipulations rendues nécessaires par le sujet traité doit être possible pour les élèves motivés. Cette activité doit restée modeste, en relation avec la capacité des élèves et les moyens disponibles dans l'établissement. L'utilisation de résultats d'expérimentations réalisées dans un cadre extérieur à l'établissement peut compléter ou remplacer les expérimentations réalisées dans les établissements. Le raisonnement scientifique doit être rigoureux pour tous les sujets traités.

<i>Contenu scientifique</i>
Ouverture scientifique de la problématique et/ou analyse fonctionnelle externe d'un produit (expression du besoin)
Référence à une loi ou à une expérience de sciences et/ou modélisation de tout ou partie du produit
Éléments de réponse scientifiques et/ou traitement des modèles (outils de simulation)
Vérification des performances attendues : distance entre le modèle et le comportement réel
Exactitude du contenu scientifique en relation avec les programmes scientifiques des classes de S-SI
Critères de choix de la démarche d'étude. Qualité de synthèse du rapport de TPE

Les travaux de l'atelier

Quelques points importants ont particulièrement été discutés.

Qu'est-ce qu'expérimenter ?

Le mot revêt différentes significations selon les disciplines et les participants :

- faire une manipulation démonstrative ;
- modéliser (utiliser une maquette ou un modèle mathématique) ;
- mettre en œuvre un procédé, lire et interpréter une documentation technique, faire des mesures, analyser un système industriel complexe ;
- exploiter des résultats de manipulations réalisées dans des laboratoires de recherche.

Cependant, tous s'accordent à définir une expérimentation comme un travail de création dont les élèves sont les acteurs. L'expérimentation a donc une définition plus large que la manipulation et ne peut se limiter en aucun cas à celle-ci. Elle inclut en particulier l'exploitation de la manipulation, domaine où les mathématiques trouvent toute leur place avec la modélisation. Elle ne nécessite pas forcément une manipulation.

Pourquoi mener une expérimentation en TPE ?

- Le premier intérêt, pour l'enseignant, est évidemment d'éviter que les TPE ne se réduisent à une compilation de documents mais soient bien au contraire un travail original du groupe d'élèves sur le sujet qu'ils ont choisi.

- Les élèves n'acquièrent pas beaucoup de connaissances nouvelles, mais cela leur permet de mieux se les approprier, en particulier de mieux prendre conscience de leurs lacunes et de la nécessité d'y remédier pour pouvoir poursuivre leur travail.

- Utiliser les connaissances acquises dans le tronc commun pour résoudre un problème concret est très motivant pour eux.

- Cela les oblige à être rigoureux dans leur démarche scientifique.

- Les TPE et, plus spécifiquement l'expérimentation dans les TPE, modifient leur rapport au savoir : les élèves deviennent autonomes par rapport à certains éléments du savoir.

- L'expérimentation modifie aussi le travail des enseignants : elle nécessite un réel travail en équipe des professeurs encadrant les TPE ; elle oblige à harmoniser le vocabulaire et les méthodes dans les différentes matières (exemples : physique-sciences de l'ingénieur ou chimie-biologie).

Quelle autonomie laisser aux élèves pour les manipulations ?

En dehors de l'obligation de présence d'un enseignant lors des séances avec manipulations, on doit se poser la question de l'autonomie des élèves dans le choix et la conduite de la manipulation.

- On attend des élèves qu'ils soient capables de critiquer leur manipulation, de savoir éventuellement la modifier ou la faire évoluer, afin que leur travail expérimental soit en accord avec leur problématique.

- Le rôle de l'enseignant est de les aider à choisir des expériences réalistes et réalisables avec les moyens du laboratoire.

- L'élève découvre qu'une manipulation se prépare et ne « marche » pas toujours.

- En TPE, il a le temps de se tromper et de refaire le travail. Le rôle de l'enseignant est ici important et différent selon la personnalité des élèves : il est bien qu'ils apprennent à surmonter seuls les difficultés, mais tous n'ont pas la même capacité à rebondir. Il faut donc décider du moment, qui n'est pas le même pour tous, où l'aide de l'enseignant devient nécessaire pour éviter le découragement.

En conclusion, lorsque cela est possible, et compte tenu des contraintes de matériel et de locaux propres à chaque établissement, il paraît particulièrement important d'inciter les élèves à choisir un sujet de TPE permettant une expérimentation. Le caractère pluridisciplinaire du TPE ne peut que s'en trouver renforcé.

Atelier n°3

Évaluer la pratique expérimentale au baccalauréat : pourquoi ?

Animateur : Marie Bourgarel, professeur de physique et chimie à Montpellier

Intervenants : Daniel Allard, Ien-Et de sciences et techniques industrielles ; Adeline Géronimi, professeure de Svt au lycée Paul Lamour de Nîmes ; Nicole Longuet, professeur de Svt au lycée Blaise Pascal de Clermont-Ferrand ; Josette Maurel, professeur de physique et chimie au lycée Maurice Ravel à Paris ; Robert Pacchioni, professeur de Svt au lycée Jacques Audibert d'Antibes.

L'atelier réunit au total 21 participants, professeurs de sciences de la vie et de la Terre et de sciences physiques, en deux sessions d'égale importance. L'objectif est de comparer les modalités mises en œuvre pour évaluer la pratique expérimentale au baccalauréat en sciences de l'ingénieur, en physique-chimie et en sciences de la vie et de la Terre, d'analyser les compétences évaluées dans chaque discipline, de recenser les difficultés rencontrées et de voir si l'on peut faire émerger des propositions de solutions communes.

Les enjeux dans les différentes disciplines

La prise en compte à l'examen ¹¹

- Elle est effective en sciences de l'ingénieur sous la forme d'une épreuve de 4 heures constituée d'un contrôle en cours de formation ou d'une évaluation ponctuelle destinée à valider les savoir-faire participant d'une qualification professionnelle et d'un métier.

- En physique-chimie et en sciences de la vie et de la Terre, la pratique expérimentale ne fait pas l'objet d'une note à l'examen.

Cependant, elle est devenue obligatoire en physique-chimie en 2001, sous la forme d'une évaluation locale en fin d'année qui donne lieu à l'attribution d'une note reportée sur le livret scolaire.

En sciences de la vie et de la Terre, elle deviendra de même en 2003 avec l'introduction des nouveaux programmes. Elle est facultative en 2001.

Les compétences évaluées

- En physique-chimie, l'épreuve évalue le suivi d'un protocole, les gestes techniques, la présentation et l'exploitation des résultats, le réinvestissement des connaissances et la production écrite. Les annexes 1 et 2 fournissent deux exemples de sujets, l'un de physique et l'autre de chimie : ils sont constitués d'un ensemble de fiches, chacune ayant une destination bien particulière.

- En sciences de la vie et de la Terre, la réalisation technique et la communication des résultats sont toujours évaluées. En revanche, les gestes, la conception d'un protocole et l'exploitation des résultats ne le sont pas systématiquement et ces derniers points font actuellement l'objet de discussions entre les professeurs.

¹¹ Consulter le dernier texte paru au bulletin officiel n° 41 du 7 novembre 2002.

Les manipulations actuellement proposées reposent assez souvent sur l'utilisation du microscope en sciences de la vie et de la Terre, sur celles de l'oscilloscope et de la burette et physique et chimie. Des efforts doivent sans doute être accomplis dans le sens d'une diversification des sujets.

Modalités de l'évaluation

- En physique-chimie, il s'agit d'une épreuve terminale de 45 minutes dans laquelle un professeur évalue 4 élèves, au sein de son établissement. Les sujets sont pris dans une banque nationale.
- En sciences de la vie et de la Terre, les pratiques sont plus diversifiées. Une épreuve terminale analogue à celle de la physique-chimie est préconisée par les textes officiels. Elle est parfois remplacée par une évaluation étalée sur l'année. Les professeurs disposent d'une banque de 20 sujets mais peuvent avoir des sujets personnalisés.

Les résultats

Dans les deux disciplines, la moyenne s'établit autour de 13/20 ; elle est donc supérieure à celle des épreuves écrites. Ce résultat concerne la session 2001 dans les académies :

- de Montpellier, en physique-chimie, où tous les élèves ont été évalués ;
- de Nice et de Montpellier en sciences de la vie et de la Terre, discipline pour laquelle l'épreuve était facultative et seuls 20 % des élèves ont été évalués.

Discussion entre les participants

L'évaluation de la pratique expérimentale au baccalauréat soulève encore chez certains des difficultés, matérielles ou de principe. L'objectif de la discussion est de recenser, par les échanges entre les participants, quelques arguments en sa faveur, d'identifier quelques-uns des points qui posent encore problème et de proposer des solutions pour les résoudre.

Quelques arguments en faveur de l'évaluation de la pratique expérimentale

- Du point de vue des élèves, on observe une modification du comportement en travaux pratiques, une valorisation de la pratique de l'élève, l'acquisition d'un goût pour la manipulation, une meilleure répartition du travail dans le binôme en cours d'année et enfin une meilleure appropriation des Tice, conséquence de cette meilleure répartition du travail.
- Du point de vue des enseignants, la perspective de cette évaluation a contribué à la relance et à l'harmonisation de la réflexion des professeurs à propos de leurs exigences en matière expérimentale. On signale aussi la valorisation de l'aspect expérimental des disciplines.
- En physique-chimie et au baccalauréat S, cette évaluation complète heureusement l'exercice de l'épreuve écrite qui porte sur un sujet expérimental. Dans les lycées professionnels et toujours en physique-chimie, cette évaluation a largement favorisé, par sa présence, la mise en place et la réalisation des travaux pratiques.

Quelques difficultés et quelques propositions de solutions

- Une première difficulté est de disposer de sujets de travaux pratiques effectivement évaluable au baccalauréat. Un serveur disposant d'une banque de sujets suffisante, alimentée par un groupe de travail national et améliorée d'année en année au fil de l'avancement de la réflexion a donné jusqu'ici satisfaction pour la physique-chimie. Le nouveau programme de terminale S nécessitera que ces sujets soient renouvelés. Une solution analogue devrait sans doute être envisagée pour les sciences de la vie et de la Terre.

- Une objection porte sur l'organisation de l'évaluation et sur le temps consacré à cette évaluation en classe de terminale S à une période de l'année où la disponibilité des élèves et des professeurs est faible. Parmi les suggestions entendues, on note la proposition d'une évaluation en fin de première, avec le risque inévitable de voir l'aspect expérimental de l'enseignement dénaturé en classe terminale. Une solution plus raisonnable semble être la banalisation d'une semaine de travaux pratiques. Encore faut-il que le programme de déroulement des travaux pratiques sur l'année permette cette banalisation sans préjudice pour les travaux pratiques au programme. Cette semaine ne pourrait-elle pas se situer juste après l'écrit ?

- L'inégalité dans la difficulté des sujets proposés à l'évaluation peut être levée en introduisant un peu de contrôle en cours de formation dans cette évaluation : on propose de choisir une manipulation terminant, en cours d'année, un cycle d'apprentissage et d'effectuer une péréquation des notes. Pour autant, l'idée du contrôle continu est loin de faire l'unanimité.

- La difficulté à évaluer plusieurs élèves à la fois au cours d'une séance peut être levée par la mise en place de grilles d'évaluation communes à plusieurs manipulations et par une meilleure explicitation des critères.

- Le risque de devoir évaluer ses propres élèves inquiète certains enseignants, surtout dans les petits lycées. Une solution serait l'établissement d'ordres de mission pour que les professeurs aillent évaluer les élèves dans un autre lycée, avec toutes les difficultés matérielles que cela comporte lorsqu'il s'agit d'évaluer les élèves travaillant sur un matériel qu'on connaît mal.

- Le coût de l'épreuve : en termes de prix de revient du matériel, il est nul puisque cette évaluation remplace une séance de travaux pratiques.

- Le surcroît de travail du personnel technique de laboratoire est réel, la mise en place de cette évaluation nécessitant une organisation beaucoup plus lourde que celle d'une séance de travaux pratiques ordinaire. Il convient donc d'en tenir compte en offrant aux personnels concernés des jours de récupération durant les vacances scolaires. Une autre solution consisterait à prévoir une rémunération pour les personnels de laboratoire.

- Les jurys de baccalauréat ne tiennent pas suffisamment compte de la note de pratique expérimentale qui figure actuellement (pour la physique-chimie) sur le livret scolaire. La solution est donc que la note soit effectivement intégrée dans le baccalauréat.

- Enfin certains objectent que les sujets accessibles sur un serveur risquent d'entraîner un bachotage des élèves qui peuvent avoir accès à la banque de sujets. La solution réside dans une banque de sujets suffisamment riche et surtout évolutive d'année en année.

Conclusion

L'intérêt de l'évaluation de la pratique expérimentale ne doit pas être masqué par les difficultés bien réelles qu'elle soulève pour certains. Ces difficultés doivent être analysées et des solutions proposées. Une réponse à certaines d'entre elles pourrait être trouvée en tirant parti d'une éventuelle suppression de l'oral de rattrapage et en plaçant cette évaluation après les épreuves écrites du baccalauréat. Quoiqu'il en soit, cette épreuve supplémentaire pour les élèves de la voie S devrait aller de pair avec un allègement des épreuves finales dans d'autres disciplines : de même que les élèves des voies L et ES bénéficient, outre l'épreuve anticipée de français, d'une épreuve anticipée d'enseignement scientifique, il faut que les élèves de la voie S puissent bénéficier d'une seconde épreuve anticipée. Sinon, une charge de travail trop lourde risque de décourager certains élèves, pourtant intéressés, de s'engager dans une voie scientifique, à une époque où l'on déplore précisément le manque de vocations scientifiques.

Fiche n°1 : Descriptif du sujet destiné aux professeurs

SUJET : RÉSONANCE D'INTENSITÉ.

Les manipulations proposées doivent permettre de vérifier les savoir-faire expérimentaux suivants :

- réalisation d'un circuit à partir d'un schéma.
- maîtrise des réglages d'un GBF et d'un oscilloscope; choix des sensibilités permettant d'obtenir la précision la meilleure.
- reconnaissance d'un oscillogramme de résonance ; obtention d'une résonance d'intensité ; maîtrise de l'utilisation d'un ampèremètre en régime sinusoïdal : branchement, grandeur mesurée, lecture...
- réflexion sur la cohérence des résultats.

Savoirs et savoir-faire théoriques évalués :

- $i(t)$ et $u(t)$ sont en phase à la résonance.
- distinction entre intensité maximale et intensité efficace; relations entre ces grandeurs.
- le dipôle RLC n'est que résistif à la résonance.

Remarques et conseils sur la préparation du poste de travail :

Ce protocole de base peut donner lieu à plusieurs protocoles ; il suffit de donner des valeurs L , C , U , R différentes. Un élève ne doit pas avoir juste près de lui un élève possédant exactement le même protocole que lui.

Le candidat ne connaissant pas forcément le GBF utilisé, un mode d'emploi simplifié peut être fourni (schéma du cadran avec principaux boutons et bornes).

Avant le début de la séance positionner les différents boutons (oscilloscope, GBF,...) des appareils de façon à ce que l'élève ne bénéficie pas du bon réglage par hasard ; ne pas chercher pour autant la difficulté maximale. On peut adopter une stratégie commune à tous les TP d'électricité.

S'assurer du bon fonctionnement du multimètre en ampèremètre avant chaque séance.

Remarques et conseils sur le déroulement de l'épreuve :

Lors du premier appel de l'élève, vérifier le montage et les différents réglages ; remplir les différentes rubriques de la grille ci-jointe. Corriger les erreurs pour que l'élève puisse continuer et réaliser les mesures ; notamment vérifier le calibrage des voies et les sensibilités choisies.

Un élève qui ne sait pas faire le montage peut être aidé : le professeur réalise le montage ; bien sûr l'élève perd les points de réalisation ; il peut cependant bien réussir par la suite. Pour vérifier rapidement que le circuit est en résonance d'intensité on peut passer en XY.

Remarques et conseils concernant la notation :

Pendant la séance évaluer chaque rubrique en entourant une ou plusieurs croix suivant la qualité du travail de l'élève.

Fiche n°2 : Liste du matériel destinée aux professeurs et au personnel de laboratoire
--

SUJET : RÉSONANCE D'INTENSITÉ.

Pour un poste de travail :

- un oscilloscope bicourbe.
- un GBF qui permet une lecture directe de la fréquence, ou un GBF associé à un fréquencemètre.
- un dipôle ohmique de résistance $100\ \Omega$.
- une bobine d'inductance $0,1\ \text{H}$ ou toute autre bobine sans fer doux si possible d'inductance connue avec une précision correcte et dont l'inductance est comprise entre $10\ \text{mH}$ et $1\ \text{H}$.
- un condensateur de capacité $0,1\ \mu\text{F}$.
- un multimètre numérique.
- des fils conducteurs courts et longs, rouges et noirs ($50\ \text{cm} \times 4$; 150 (ou 100) $\text{cm} \times 3$).
- une multiprise si nécessaire.

Matériel supplémentaire :

- un appareil de chaque sorte en secours.
- des fusibles adaptés aux appareils.

Fiche n°3 : Énoncé destiné au candidat

Sujet : RÉSONANCE D'INTENSITÉ.

But de la manipulation :

Obtenir la résonance d'intensité pour un dipôle RLC série et déterminer quelques grandeurs caractérisant le circuit alors réalisé.

Travail à effectuer :

Ce sujet est accompagné d'une feuille de réponse individuelle sur laquelle vous devez consigner tous vos résultats.

Travail à effectuer :

Réaliser le circuit ci-contre et comprenant :

Le GBF délivrant une tension sinusoïdale.

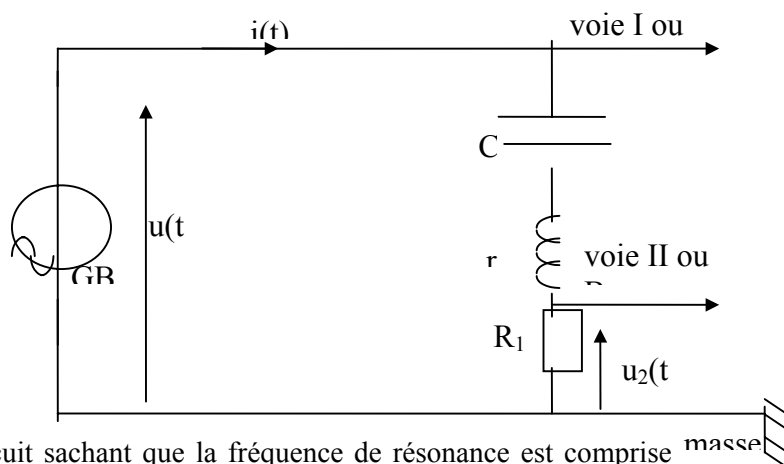
Un dipôle ohmique de résistance $R_1 = 100 \, \Omega$.

La bobine (r ; $L = 0,1 \, \text{H}$).

Le condensateur ($C = 0,1 \, \mu\text{F}$).

L'oscilloscope bicourbe.

Régler l'amplitude de $u(t)$ à : $U_m = 6 \, \text{V}$



Obtenir la résonance d'intensité pour ce circuit sachant que la fréquence de résonance est comprise entre : 400 Hz et 6000 Hz.

N.B. : Veiller à ce que ces réglages ne soient pas modifiés pendant toute la suite de l'étude expérimentale.

Régler l'oscilloscope pour que les oscillogrammes permettent des mesures précises.

!!! Appeler le professeur pour vérification.

Déterminer la fréquence de résonance :

- par lecture directe sur le GBF ou sur le fréquencemètre.
- à partir de la mesure, à l'oscilloscope, de la période.

Compléter le 1°) de la fiche réponse.

!!! Appeler le professeur pour vérification.

Déterminer l'amplitude I_m de l'intensité $i(t)$:

- à partir de la mesure de l'amplitude U_{2m} de la tension $u_2(t)$.
- à partir de la mesure réalisée avec un ampèremètre intégré au circuit.

Compléter le 2°) de la fiche réponse.

!!! Appeler le professeur pour vérification.

Déduire des résultats expérimentaux la résistance R du dipôle RLC.

Compléter le 3°) de la fiche réponse.

LE CANDIDAT DOIT RESTITUER CE DOCUMENT AU JURY EN SORTANT DE LA SALLE D'EXAMEN.

Fiche n°4 : Réponses du candidat

DOCUMENT A COMPLÉTER PENDANT L'ÉPREUVE ET À RENDRE AU JURY EN SORTANT DE LA SALLE D'EXAMEN.

NOM :	Manipulation : / 14
Prénom :	Fiche réponse : / 6
Numéro de candidat :	Note proposée : / 20
Classe :	

DOCUMENT A COMPLÉTER PENDANT L'ÉPREUVE ET À RENDRE AU JURY EN SORTANT DE LA SALLE D'EXAMEN.

SUJET : RÉSONANCE D'INTENSITÉ.

1°) Déterminer la fréquence f de résonance :

a) à partir de la lecture directe du GBF ou du fréquencemètre :

b) à partir de la mesure, à l'oscilloscope, de la période T . Remplir le tableau :

sensibilité :	lecture :	résultat : T

Calcul de la fréquence f :

c) Comparer les deux résultats et commenter leur cohérence :

2°) Étudier l'amplitude I_m de l'intensité $i(t)$ du courant :

a) à partir de la mesure de l'amplitude U_{2m} de la tension $u_2(t)$. Remplir le tableau :

sensibilité :	lecture :	résultat : U_{2m}

Calculer l'amplitude I_m :

b) à partir de la mesure réalisée avec l'ampèremètre.

Noter le résultat de la mesure :

Calculer I_m :

c) Comparer les deux résultats et commenter leur cohérence.

3°) Déterminer la résistance totale R :

Nom et signature de l'examineur :

Lycée :

Fiche n°5 : Grille d'observation pendant la séance destinée à l'évaluateur

SUJET : RÉSONANCE D'INTENSITÉ.

Nom du candidat :					
n° du candidat :					
n° de poste		1	2	3	4
1er appel	circuit série	X X X X	X X X X	X X X X	X X X X
	branchement oscilloscope	X X X	X X X	X X X	X X X
	sensibilité horizontale la meilleure	X	X	X	X
	réglage de U_m	X X	X X	X X	X X
	sensibilité verticale la meilleure	X	X	X	X
	résonance correcte	X X X X	X X X X	X X X X	X X X X
2ème appel	lecture de f	X X	X X	X X	X X
	lecture de T	X X X	X X X	X X X	X X X
3ème appel	mesure de $(U_2)_m$	X X	X X	X X	X X
	branchement de l'ampèremètre	X X X X	X X X X	X X X X	X X X X
	mesure de I	X X	X X	X X	X X
Total / 14 points					

Chaque croix vaut 0,5 point. Pendant la séance entourer les croix et si nécessaire indiquer quelques mots dans les cases vides ; la gestion des notes sera faite plus tard.

Fiche n°6 : Barème destiné à l'évaluateur

SUJET : RÉSONANCE D'INTENSITÉ.

	Barème
Évaluation pendant la séance (voir grille) :	14
Exploitation des résultats expérimentaux :	
1°) b) Calcul de f à partir de T .	1
c) Comparaison et commentaire (1).	1
2°) a) Calcul de I_m à partir de U_{2_m} .	1
b) Calcul de I_m à partir de I .	1
c) Commentaire (1).	1
3°) Détermination de la résistance.	1
Total :	20

Une erreur (ou un oubli) d'unité sera pénalisée par 0,5 point.

Valoriser un élève qui détecte une incohérence dans ses résultats.

(1) L'élève doit expliquer les légers décalages par les imprécisions inévitables de mesures ou détecter une anomalie si le décalage est grand.

Fiche n°1 : Descriptif du sujet destiné aux professeurs
--

SUJET : DÉTERMINATION DU pK_a DE QUELQUES COUPLES.

Les manipulations proposées permettent de vérifier les savoir-faire expérimentaux suivants :

- réaliser une dilution
- utiliser une verrerie classique : pipette, burette, etc.
- utiliser un pH-mètre.

Remarques et conseils sur la présentation du poste de travail :

Le candidat devant choisir le matériel le mieux adapté pour réaliser une dilution, il sera bon de mettre à sa disposition un assez grand échantillonnage de verrerie.

Les mesures effectuées ne permettent d'obtenir qu'un ordre de grandeur des valeurs de pK_a , mais il sera quand même bon de vérifier avec soin l'étalonnage du pH-mètre.

Remarques et conseils sur le déroulement de l'épreuve :

Si le candidat se trompe sur le choix de la verrerie à utiliser lors de la dilution, on lui indiquera le bon matériel. Les points correspondant à cette partie ne lui seront pas attribués.

L'agitateur magnétique est à la disposition du candidat, mais son utilisation n'est pas suggérée lors de l'obtention de la teinte sensible de l'indicateur coloré.

Fiche n°2 : Liste du matériel destinée aux professeurs et au personnel de laboratoire
--

SUJET : DÉTERMINATION DU pKa DE QUELQUES COUPLES

Pour un poste de travail :

- pipettes jaugées de 5, 10, 20 mL.
- pipettes graduées.
- fioles jaugées de 50, 100, 250 mL.
- dispositif de pipetage.
- burette.
- éprouvette graduée de 100mL.
- agitateur magnétique.
- pH-mètre étalonné.
- une dizaine de béchers de 100mL.
- eau distillée.
- hélianthine ou vert de bromocrésol.
- Solutions (100mL) : **Attention, les concentrations sont très importantes pour l'obtention de valeurs correctes de pK_a**
 - acide éthanoïque 1,0 mol.L⁻¹
 - acide monochloroéthanoïque ou acide méthanoïque 1,0.10⁻¹ mol.L⁻¹
 - ammoniac 1,0.10⁻¹ mol.L⁻¹
 - acide chlorhydrique 1,0.10⁻² mol.L⁻¹
 - soude 1,0.10⁻² mol.L⁻¹

Les noms et les concentrations seront indiqués sur chaque flacon.

Pour huit postes de travail :

Préparer un litre de chaque solution

Matériel supplémentaire :

Prévoir un pH-mètre de secours

Fiche n°3 : Énoncé destiné au candidat

SUJET : DÉTERMINATION DU pK_a DE QUELQUES COUPLES.

But de la manipulation

Mesurer le pK_a de quelques couples acido-basiques afin de les classer sur une échelle de pK_a .

Travail à effectuer

Ce sujet est accompagné d'une feuille de réponse individuelle sur laquelle vous devez consigner tous vos résultats.

1 - La solution d'acide éthanoïque dont vous disposez est trop concentrée pour réaliser une mesure de pH. A l'aide des solutions et du matériel que vous avez sur votre table, vous devez fabriquer 50mL d'une solution S_1 d'acide éthanoïque de concentration $1,0 \cdot 10^{-1} \text{ mol.L}^{-1}$.

Avant de procéder à la fabrication de la solution :

!!! Appeler le professeur pour réaliser devant lui la dilution

2 - Mesurez le pH des solutions S_2 et S_3 mises à votre disposition, ainsi que celui de la solution S_1 que vous avez fabriquée (le pH-mètre est étalonné).

!!! Appeler le professeur pour réaliser une mesure devant lui

Complétez le tableau figurant sur la fiche réponse.

3 - On peut déterminer l'ordre de grandeur du pK_a d'un indicateur coloré. Lorsque le pH d'une solution est égal au pK_a de l'indicateur coloré, on obtient la teinte sensible, intermédiaire entre les deux teintes correspondant aux formes acide et basique.

Préparez deux béchers témoins, l'un contenant la solution d'acide chlorhydrique $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ (bécher n°2), l'autre la solution de soude de même concentration (bécher n°3). Ajoutez l'indicateur coloré dans ces deux béchers. On obtient ainsi les teintes correspondant aux formes acide et basique.

Placez dans un bécher (n°1) environ 20mL de solution d'acide chlorhydrique $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$, ajoutez quelques gouttes d'indicateur coloré.

A l'aide d'une burette, vous verserez tout doucement de la soude de concentration $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ dans le bécher n°1 jusqu'à obtention de la teinte sensible.

Avant de commencer à verser la solution de soude :

!!! Appeler le professeur

Le passage à la teinte sensible peut être délicat à obtenir. Si vous dépassez cette zone, vous pouvez "revenir en arrière" en ajoutant un peu de solution d'acide chlorhydrique et en versant à nouveau de la solution de soude.

Mesurer le pH de la solution lorsque la teinte sensible est obtenue, et donner l'ordre de grandeur du pK_a de l'indicateur coloré.

**LE CANDIDAT DOIT RESTITUER CE DOCUMENT AU JURY
EN SORTANT DE LA SALLE D'EXAMEN**

Fiche n°4 : Réponses du candidat**Ville :****Établissement :****Manipulation :** /12**Fiche réponse :** / 8**Note proposée :** /20

SUJET : DÉTERMINATION DU pK_a DE QUELQUES COUPLES.
DOCUMENT À COMPLÉTER PENDANT L'ÉPREUVE ET À RENDRE AU JURY EN SORTANT DE LA SALLE

NOM :**Prénom :****Numéro du candidat :****Classe :**

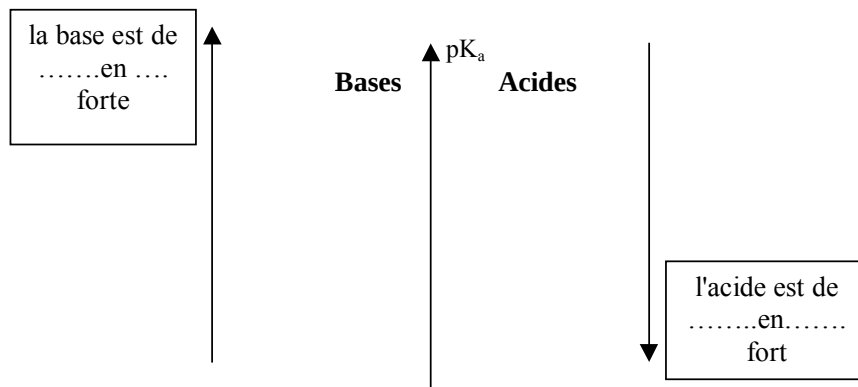
Pour les solutions utilisées lors de la manipulation, les concentrations C des espèces mises en solution sont telles que l'on peut écrire : les relations suivantes :

- pour les solutions acides : $pK_a = 2 \text{ pH} + \lg C$
- pour les solutions basiques : $pK_a = 2 \text{ pH} - (14 + \lg C)$

Compléter le tableau ci-dessous :

N° de la solution	S_1	S_2	S_3
espèce en solution	CH_3COOH		
$C \text{ (mol.L}^{-1}\text{)}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$
Quest. 2 : pH			
Quest. 3 pK_a			
Couple A/B			

Classer les couples sur l'axe ci-dessous :



nom et signature de l'évaluateur :

signature du candidat :

Donner l'ordre de grandeur du pK_a de l'indicateur coloré.

Fiche n°5 : Grille d'observation pendant la séance destinée à l'évaluateur

SUJET : DÉTERMINATION DU pKa DE QUELQUES COUPLES.

Numéro de poste				
Nom du candidat				
Numéro du candidat				
choix du matériel de dilution 2 points				
Remarques				
Pipette 2 points				
Pipetage à partir d'une petite quantité préalablement versée dans un bécher, rinçage de la pipette avec la solution à prélever				
Utilisation d'un système de pipetage (propipette ...)				
Pipetage correct				
Démontage du système de pipetage				
Remarques				
Fiole jaugée 2 points				
Rinçage				
Ajustage au trait de jauge				
Ajout d'eau distillée				
Homogénéisation				
Remarques				
Phmétrerie 3 points				
Rinçage des électrodes et séchage				
Immersion des électrodes				
Lecture				
Remarques				
Burette 1 point				
Réglage du débit				
Rinçage				
Remarques				
Autre matériel 1 point				
Agitateur				
Remarques				
Organisation de la paillasse 3 points				
Disposition des témoins				
Organisation générale				
Repérage correct des solutions				
État final de la paillasse				
Remarques				
Total				

Nom et signature de l'évaluateur :

Fiche n°6 : Barème destiné à l'évaluateur
--

SUJET : DÉTERMINATION DU pK_a DE QUELQUES COUPLES.

Notation :

Elle s'effectue en deux parties :

- Pendant l'épreuve : évaluation des compétences à manipuler **/14 points**
- Après l'épreuve : lecture de la fiche du candidat **/ 6 points**

Total **/20 points**

Barème à utiliser pour exploiter la fiche d'observation pendant la manipulation effectuée par le candidat :

Compétences à manipuler : **14 points**

Barème à utiliser pour noter la fiche du candidat :

⇒ **Tableau à compléter :**

- valeurs des pH **1 point**
- valeurs des pK_a **1 point**
- couples A/B **1 point**

⇒ **Classement des couples :** **1 point**

⇒ **Valeur approximative du pK_a de l'indicateur coloré** **2 points**

Atelier n°4

Autres actions pour le développement de la culture scientifique

Les ateliers scientifiques

Animateur : Pierre Fontes, professeur à l'université Paris-Sud et à l'Iufm de Versailles

Intervenants : Sylvette Pierron, délégation académique à l'action culturelle, rectorat de Versailles, Yves Corboz, professeur de physique-chimie au collège Jules Ferry à Eaubonne

Les participants à cet atelier étaient au nombre de vingt, relevant de diverses disciplines (sciences de la vie et de la Terre, physique, chimie, mécanique), de statuts variés (enseignants, techniciens, assistants ingénieurs) et affectés dans différents types d'établissement (collèges, lycées, instituts universitaires de formation des maîtres, universités, écoles normales supérieures).

Chaque exposé a été suivi par un quart d'heure de questions, soit posées par écrit et transmises au modérateur, soit formulées oralement en fin de présentation.

Présentation des ateliers scientifiques et techniques (Ast) au collège et au lycée

Intervention de Sylvette Pierron

Depuis le début des années 80, à travers les projets d'action éducative (Pae), des actions de culture scientifique et technique s'étaient mises en place, au sein de l'école, en prenant appui sur les disciplines scientifiques mais en occupant un espace de plus en plus significatif au-delà de la classe et au-delà même de l'école.

Les assises de la culture scientifique et technique en 1989 avaient permis de cristalliser l'attention du plus grand nombre et de sensibiliser le monde de l'éducation sur les rapports existant entre les jeunes et la culture scientifique et technique.

À ce stade, l'action culturelle dans les rectorats, soucieuse de développer le partenariat, s'interroge sur les représentations qu'ont les jeunes de la *Science* dans l'enseignement dispensé, mais aussi à travers les structures en charge de la diffusion et de la vulgarisation scientifique (musées, manifestations diverses, rencontres). La cellule d'action culturelle de l'académie de Versailles crée des ateliers expérimentaux de pratique scientifique, sur la base du cahier des charges existant pour les ateliers de pratique artistique et en s'appuyant sur les formations mise en place.

La question de la pratique fait émerger le besoin « charnel » de rencontre avec la *Science* (quelque peu abandonnée à cette époque, en particulier au collège, où les dédoublements des classes de science n'est plus une règle) conçue autour d'une thématique ou d'une problématique et non plus autour d'une discipline.

En 1991, ces ateliers expérimentaux sont reconnus par la direction des lycées et collèges qui souligne la nécessité dans ce cadre :

- d'une réflexion et d'une pratique authentique,
- d'une rencontre entre enseignants, chercheurs, industriels, professionnels de la technique,

et qui insiste sur le projet pédagogique annuel conçu en partenariat et sur la mise en place de moyens horaires spécifiques. L'essentiel était dit mais il fallait élaborer une circulaire conjointe entre le ministère de l'Éducation nationale et le ministère de la recherche afin d'identifier, autour d'objectifs et de démarches communes, les moyens à mettre en place pour ces ateliers.

La circulaire n° 95-075 du 24 mars 1995 énonce quelques principes relatifs aux aspects qualitatifs que l'expérience des ateliers existants a permis de dégager et définit le *cahier des charges*. Elle précise le cadre original de l'atelier ainsi que les objectifs du projet et la procédure de mise en place confiée aux rectorats.

Le projet doit permettre aux élèves de :

- mieux connaître les métiers de la recherche ;
- favoriser leur autonomie, leur sens de la responsabilité et leur aptitude au travail en équipe ;
- acquérir des méthodes mises en jeu dans la démarche scientifique (formuler des problèmes, observer, analyser, expérimenter, modéliser, faire preuve d'esprit critique...) ;
- établir des liens entre les différentes disciplines ;
- aboutir à la réalisation d'une production ;
- percevoir la dimension sociale, économique et éthique de la science et de la technologie ;
- découvrir l'importance de l'information scientifique et s'exercer à la communication.

La demande de création d'un atelier scientifique comporte :

- la présentation de l'enseignant ou de l'équipe pédagogique ;
- la présentation du ou des partenaires du monde de la recherche et les modalités de la collaboration prévue, le projet pédagogique élaboré par l'équipe définissant les objectifs, les principales étapes et la production finale envisagée ;
- la description des locaux : équipements et matériels mis à disposition de l'atelier à l'intérieur de l'établissement ;
- le budget prévisionnel ;
- l'accord du conseil d'administration de l'établissement.

La cellule rectorale d'action culturelle de Versailles propose un dossier aux établissements et s'attache, à cette occasion, à mettre en relation tous les domaines de la culture, à formuler des propositions de formations complémentaires ; elle invite aussi l'équipe d'enseignants à réfléchir, dès la conception du projet, à son évaluation. La présentation du budget prévisionnel permettra d'évaluer l'aide possible accordée à partir des crédits délégués par la recherche.

À noter que les ateliers n'excluent aucun secteur de la recherche, qu'ils se situent dans une réflexion plus globale, complémentaire et non substitutive aux enseignements et que les sciences humaines sont également concernées.

La récente circulaire n° 2001-046 du 21-3-2001 reprend l'essentiel de la circulaire de 1995. Elle s'attache à souligner la cohérence nécessaire entre les Ast, les actions éducatives innovantes à caractère scientifique et technique, les travaux croisés en 4^e et les TPE en lycée, auxquelles il faut adjoindre aussi les classes à Pac.

Elle fait apparaître également dans les *objectifs* :

- la sensibilisation aux risques naturels et technologiques majeurs ;
- la familiarisation avec l'histoire des sciences et celle des idées ;
- le rapprochement avec les politiques locales en particulier, pour toutes les actions touchant aux questions d'environnement.

Le projet, plus que jamais défini comme interdisciplinaire et privilégiant l'initiative, la créativité, l'esprit critique des élèves, peut s'adresser à plusieurs établissements. Il trouve sa place dans le projet d'établissement, comme une démarche de culture générale décroisée et en relation avec les autres aspects de la culture (actions *Arts - Sciences*).

Le partenariat est qualifié d'obligatoire, il est précisé dans le fond et dans la forme, en particulier pour les associations et les centres de culture scientifique, technique et industrielle (Cesti).

Il est fait référence très clairement aux modalités de valorisation et d'évaluation ainsi qu'aux procédures d'attribution de moyens. Ces dernières n'ont pas changé fondamentalement mais la montée en puissance des demandes d'ouverture pose parfois problème car les moyens délégués ne suivent pas cette évolution et sont parfois en régression.

Ce dispositif reste cependant un lieu privilégié de pratiques et de rencontres avec la science en train de se faire ; il est socialisant, il crée du lien au sein de l'école entre les disciplines et contribue à donner du sens aux enseignements scientifiques. On peut simplement regretter que cette activité soit vécue comme une charge supplémentaire pour les enseignants.

Remarques

Il est possible de faire fonctionner un atelier sur une durée de deux années successives, avec la présentation d'un *état des lieux* à la fin de la première année et la remise d'un *produit fini* à la fin de la deuxième.

Les ateliers scientifiques sont distincts des autres actions de nature scientifique (Fête de la science, Semaine de la science, Olympiades de physique, Olympiades de chimie...) mais n'en sont pas exclusifs.

B. Exemple de réalisation au collège Jules-Ferry, à Eaubonne

Intervention de Yves CORBOZ

Cette intervention fait état d'une expérimentation conduite au collège Jules-Ferry, à Eaubonne (Val d'Oise) depuis 1991 en classe de sciences physiques, dans une activité de club « météo-sciences » en partenariat avec Météo-France, puis à partir de 1995 dans le cadre d'une liaison entre l'école primaire et le collège. Cette liaison entre l'école et le collège a conduit à la mise en place d'activités dans lesquelles des collégiens tiennent le rôle de moniteur pour des élèves de l'école élémentaire.

La réalisation d'une activité centrée sur la météorologie présente de l'intérêt dans plusieurs domaines ; elle permet de :

- faire acquérir des connaissances relatives à l'atmosphère et à l'environnement ;
- travailler de façon pluridisciplinaire dans le cadre d'un même projet pour créer une base de données utilisable dans différentes disciplines (sciences physiques, sciences de la vie et de la Terre, géographie...) ;
- faire appel à des compétences transversales, des compétences disciplinaires et des compétences liées à la maîtrise de la langue ;
- développer la motivation de certains élèves grâce au caractère concret des activités ;
- initier les élèves à l'usage des technologies d'information et de communication ;
- engager les élèves dans un travail à long terme ;
- développer l'autonomie dans le travail ;
- inciter les élèves et les enseignants au travail en équipe ;
- créer des relations avec des partenaires extérieurs et rompre ainsi l'isolement de certains établissements.

Les partenaires sollicités interviennent pour la validation des manipulations imaginées par les élèves et la relation ainsi établie comporte un rôle formateur très appréciable.

La situation de découverte permanente initie les élèves à la démarche expérimentale (formulation de nouvelles questions, recherche de rigueur, ...).

Au cours de cet atelier, une bonne vingtaine d'expériences a été présentée (mise en évidence de l'existence de l'air, formation d'un vent, fabrication d'un baromètre à eau, etc.). Ces expériences figurent, parmi d'autres, dans un cédérom réalisé par l'intervenant, dont un exemplaire a été remis à

chacun des participants à la fin de l'atelier et sont également décrites sur un site Internet à l'adresse suivante : <http://www.educnet.education.fr/meteo/ressourc/somm.htm>. Elles apparaissent sous le titre « *Quelques expériences simples de physique* ». Ces expériences ont en commun, d'une part, d'être en relation avec des questions de météorologie qui se prêtent particulièrement à des études pluridisciplinaires, d'autre part, d'être réalisables avec un matériel peu onéreux et, en partie, issu de la vie quotidienne. Ces expériences sont fondamentales et simples à réaliser. Elles sont initialement destinées à des élèves de collège, mais sont également utilisables à l'école élémentaire.

Des affiches représentant des documents et des réalisations d'élèves de collège sur ce même thème ont également été présentées comme exemples de productions auxquelles conduisent les ateliers scientifiques.

Un projet d'atelier scientifique est élaboré en partenariat avec l'association nationale science et technologie jeunesse (Anstj) et Météo-France pour développer un réseau de surveillance et de mesure de l'acidité des pluies. Ce projet s'adressant à des élèves de collège et de lycée constitue un prolongement des activités déjà réalisées à l'école et au collège. Il repose, en partie, sur la gestion d'une station de relevés automatisés d'intérêt météorologique ; il apporte donc un intérêt supplémentaire à la maîtrise des techniques d'information et de communication dans l'enseignement. Il doit, par ailleurs, conduire au développement d'un travail en commun avec le lycée et entraîner une collaboration pluridisciplinaire.

Un atelier scientifique sur le thème de la météorologie illustre la possibilité de faire découvrir à des élèves de l'école, du collège ou du lycée, les notions élémentaires de physique et des autres sciences expérimentales qui interviennent en météorologie et constituent les bases de cette science complexe.

L'expérience dans les Olympiades nationales de la physique

Animateur : Dominique Sacépé, professeur de physique et chimie au lycée Jules Haag

Intervenants : Kamil Fadel, responsable du département de physique du Palais de la découverte ; Philippe Jeanjacquot, professeur de physique et chimie au lycée Charlie Chaplin à Décines, Isère ; Jacques Royer, professeur de physique et chimie au lycée Aristide Briand à Saint-Nazaire, Loire-Atlantique

À la demande de certains participants, les modalités pratiques de déroulement des Olympiades nationales de la physique sont brièvement présentées : choix du sujet, constitution des groupes, partenariat, financement, fonctionnement du jury et organisation matérielle de la finale nationale. Le compte rendu qui suit s'attache plus spécialement à l'intérêt que peut présenter la participation à ce concours pour la formation scientifique du lycéen.

Une initiation à la recherche expérimentale

Selon Claude Bernard, on raisonne dans les sciences expérimentales à partir de faits expérimentaux obtenus dans des conditions créées et déterminées par l'expérimentateur lui-même. À ce titre, les travaux pratiques dont l'intérêt est indéniable n'illustrent pas le travail des ingénieurs et des chercheurs scientifiques, et ce n'est d'ailleurs pas leur objectif. Ils ne peuvent donc pas constituer une initiation à la recherche expérimentale puisque les conditions et protocoles expérimentaux ne sont pas déterminés par les élèves, mais plus ou moins dictés par les enseignants et les manuels. Les Olympiades de la physique offrent alors, à certains des élèves de 1^{ère} S qui viennent de s'engager dans un projet scientifique, une vision réaliste de la démarche scientifique et de son caractère fondamentalement expérimental. Elles contribuent à leur montrer tout ce qui se cache derrière l'expérience lorsqu'on pratique la science, que ce soit sous son aspect technique qui relève du travail

des ingénieurs et techniciens ou sous son aspect plus fondamental, domaine des chercheurs. Elles leur font découvrir les coulisses de la recherche expérimentale. Elles contribuent à renforcer des vocations scientifiques, permettant à certains élèves de mieux s'orienter, de mieux savoir vers quoi ils s'orientent ou parfois aussi ce vers quoi il vaudrait mieux qu'ils ne s'orientent pas. Dans les Olympiades, les élèves sont impliqués dans un véritable travail de recherche scientifique à caractère expérimental où ils peuvent se laisser librement guider par leur intuition et leur bon sens. À l'image des professionnels de la recherche, ils rencontrent des difficultés insoupçonnées qu'ils doivent résoudre en faisant appel à leur imagination et à leur créativité, un aspect essentiel du travail scientifique souvent méconnu des élèves. Le concours des Olympiades de la physique constitue une excellente et irremplaçable initiation à la recherche expérimentale qui peut d'ailleurs susciter ou révéler des vocations pour cette activité.

Un apprentissage du travail en équipe

Les Olympiades de la physique constituent une excellente occasion pour les élèves d'apprendre à travailler en équipe, chacun avec sa spécialité, ses atouts et son savoir-faire. Tout en étant intégré au groupe, chaque élève peut révéler ses propres compétences et garde sa personnalité. Cela se traduit par l'apparition naturelle au sein de l'équipe d'un chef de groupe, d'un responsable du budget, d'un bricoleur, d'un théoricien... Par ailleurs, le professeur fait partie intégrante de l'équipe et se retrouve sur un pied d'égalité avec les élèves lorsque, comme eux, il se trouve désarmé face à une difficulté qu'il ne sait résoudre.

Un enrichissement culturel

Souvent, le projet expérimental des élèves présente un caractère pluridisciplinaire : il n'est pas rare que la biophysique ou la géophysique viennent rejoindre l'astronomie, l'électronique ou l'histoire des sciences. Cette approche pluridisciplinaire est essentielle dans les Olympiades de la physique dont l'objectif premier déborde largement du cadre de la discipline. Aussi n'est-il pas surprenant que des premiers prix aient pu être attribués pour des travaux largement interdisciplinaires (par exemple, en 1998 pour un gnomon ou plus récemment en 2000 pour un projet consacré à la cathédrale de Meaux). Cette ouverture permet d'éviter l'enclavement des Olympiades dans une discipline académique ; elle contribue à procurer aux élèves une vision plus globale et unitaire des sciences.

Un entraînement à une communication de qualité

À l'image d'une œuvre d'art, une expérience scientifique s' imagine, se réalise et se met en scène. Quotidiennement, les chercheurs et les ingénieurs présentent dans des publications ou par voie de conférence les nouvelles expériences qu'ils ont réalisées ; ils exposent à la communauté scientifique ou aux médias l'intérêt de ces expériences. Les élèves qui ont passé près d'un an à réaliser un montage expérimental ont à cœur de susciter l'enthousiasme du jury à travers un rapport écrit et surtout lors de la présentation orale de leur travail. Le concours des Olympiades n'est donc pas uniquement une épreuve technique, c'est également une épreuve d'expression écrite et orale. Il requiert des candidats clarté et esprit de synthèse, ainsi qu'une certaine capacité à mettre en scène le travail réalisé. À ce titre, les Olympiades de la physique constituent une initiation à un savoir-faire qui dépasse largement le cadre de ce concours. Il n'est donc pas étonnant que tous les élèves sans exception reconnaissent les progrès extraordinaires qu'ils ont réalisés dans le domaine de la communication.

Conclusion

Tous les groupes, même s'ils ne sont pas récompensés au concours, ont acquis, à l'issue d'un projet d'Olympiades, une formation irremplaçable. Malgré la baisse d'intérêt actuelle, on peut espérer que la création d'ateliers scientifiques et la réalisation de TPE à contenu expérimental puissent engager les professeurs et leurs élèves à prolonger ces nouvelles activités dans des projets d'Olympiades.