

Le traitement statistique des mesures en travaux pratiques de physique de DEUG : une innovation à Orsay

Marie-Geneviève SÉRÉ, Roger JOURNEAUX

DidaScO, Université Paris XI
Centre Scientifique d'Orsay, Bât. 336
91405 Orsay cedex, France.

Résumé

Une innovation en premier cycle universitaire (première année de DEUG : Diplôme d'Études Universitaires Générales) est décrite dans cet article. Elle consiste en l'adaptation de travaux pratiques de physique pour aborder l'estimation des incertitudes par un traitement statistique des données expérimentales. Cette approche nouvelle a été précédée d'une recherche didactique qui a mis en évidence chez les étudiants des difficultés d'ordre épistémologique (déterminisme, rôle du hasard) et d'ordre conceptuel (dispersion, précision). Les séances sont conçues de telle façon que les concepts du domaine et les outils mathématiques sont progressivement introduits en fonction du problème posé, avec une interaction enseignants-étudiants importante. Par ailleurs, des questions écrites servent de guide aux étudiants et permettent une analyse de leurs réactions et productions.

Mots clés : mesure, statistique, innovation, travaux pratiques, physique.

Abstract

This paper is a description of an innovation during the first year of university (scientific DEUG). It is an adaptation of laboratory work in physics aimed at estimating uncertainties using statistical error analysis. This approach, new for the students, has been preceded by didactic research which has highlighted different kinds of difficulties for the students : epistemological difficulties (determinism, chance) and conceptual difficulties (dispersion, accuracy). The sequence was elaborated by progressively introducing notions and mathematical tools. There was a strong interaction between teachers and students. Moreover, written questions played the role of guidance for the students and allowed an analysis of their reactions and productions.

Key words : measurement, statistics, innovation, laboratory work, physics.

Resumen

Una innovación en el primer ciclo universitario (primer año del DEUG : Diploma de Estudios Universitarios Generales) es descrita en este artículo. Ella consiste en la adaptación de trabajos prácticos de física para abordar la estimación de las incertidumbres por un tratamiento estadístico de datos experimentales. Esta nueva aproximación fue precedida de una investigación didáctica que puso en evidencia en los estudiantes dificultades de orden epistemológico (determinismo, role del azar) y de orden conceptual (dispersión, precisión). Las sesiones están concebidas de tal manera que los conceptos del dominio y las herramientas matemáticas son progresivamente introducidas en función del problema propuesto, con una interacción importante entre profesores y estudiantes. Por otra parte, preguntas escritas sirven de guía a los estudiantes y permiten un análisis de sus reacciones y producciones.

Palabras claves : medida, estadística, innovación, trabajos prácticos, física.

«Voulez-vous croire au réel, mesurez-le.» (Bachelard, 1987)

1. INTRODUCTION : **INNOVATION ET RECHERCHE EN DIDACTIQUE**

Nous allons décrire une innovation en travaux pratiques (TP) de physique qui concerne la première année de DEUG (Diplôme d'Études Universitaires Générales). Son objectif est une première approche statistique des incertitudes de mesures. Au cours de deux journées de TP d'optique, les étudiants sont guidés pour effectuer plusieurs traitements statistiques de mesures. Les étudiants se familiarisent ainsi avec le concept de dispersion des mesures, avec les concepts et méthodes statistiques nécessaires à ce type de traitement, et sont amenés à saisir quelques avantages et

inconvénients de cette approche par rapport à la méthode dite «classique» qui consiste à faire une seule mesure. On peut ainsi espérer leur donner quelques premiers éléments de jugement, qui leur permettront ultérieurement de choisir l'une ou l'autre méthode.

Cette innovation est la suite et la conséquence de la recherche en didactique que nous avons menée sur l'acquisition du traitement statistique des mesures par des étudiants à ce niveau (Séré et al., 1993 ; Séré, 1994 ; Larcher et al., 1994). La recherche elle-même a concerné un seul groupe de TP à la fois, le groupe dont chaque année l'un de nous a la responsabilité en tant qu'enseignant. Cependant, plusieurs de nos collègues enseignants s'étant intéressés aux résultats de cette recherche, c'est avec leur collaboration que nous avons pu implanter simultanément dans un plus grand nombre de groupes les TP innovants que nous allons décrire. Le thème de ces TP ainsi que le matériel utilisé sont inchangés par rapport à la pratique des années antérieures et par rapport à celle des enseignants qui n'ont pas adopté notre innovation.

Depuis 1992, ces TP sont proposés à environ mille étudiants à l'Université Paris XI à Orsay, à l'Université de Versailles-Saint Quentin et à l'Université de Cergy-Pontoise.

Une originalité de cette innovation est que la plupart des enseignants concernés (des maîtres de conférences et de jeunes moniteurs) n'ont jamais, dans leur formation initiale, reçu d'enseignement sur les méthodes statistiques de traitement des mesures. Ils ont accepté de s'initier à ce sujet avec les aides que nous leur avons fournies. Nous avons organisé pour eux deux réunions d'information et une réunion de présentation et commentaire du déroulement des séances, prenant appui sur le polycopié (Séré & Journeaux, 1992) dont disposent les étudiants (soit six heures de réunion en tout). De plus, les enseignants avaient à leur disposition dans chaque salle de TP un dossier élaboré pour répondre au mieux aux questions qu'ils pouvaient se poser. L'interaction que nous avons eue avec les enseignants a été très riche, souvent marquée par l'enthousiasme (peut-être dû à la nouveauté du sujet). Les interactions ne se sont pas limitées au temps de préparation des TP. Pendant les premiers mois, une dynamique d'échanges et de discussions s'est instaurée avec les jeunes moniteurs, mais aussi avec des enseignants chevronnés, qui ont approfondi personnellement le sujet.

Dans un premier paragraphe, nous résumerons les conceptions d'étudiants que l'enseignement doit faire évoluer et qui ont été mises à jour par la recherche préalable. Puis nous donnerons le déroulement des deux journées de TP destinés à faire évoluer ces conceptions, tout en visant des objectifs de connaissance en optique. Enfin, nous donnerons quelques éléments sur l'impact d'ores et déjà observable de cet enseignement, l'évaluation n'ayant pas encore pu être faite.

2. QUELQUES CONCEPTIONS D'ÉTUDIANTS À PROPOS DE LA MESURE

– Pour les étudiants, (et semble-t-il pour la plupart des enseignants), les **statistiques** sont un outil mathématique qui s'applique aux grands nombres d'épreuves et/ou au hasard (Séré, 1992). Or les séries de mesures sont parfois seulement de dix et le rôle du hasard dans une opération de mesurage est rarement reconnu par les étudiants. C'est pourquoi il nous a paru nécessaire d'argumenter le type de résultats que donnent les statistiques.

Les questions suivantes nous ont été posées par des étudiants et/ou des enseignants :

«*Est-il **correct** de conclure avec dix mesures ?*»

«*L'affirmation « x a 95% de chances de se trouver dans l'intervalle... » est-elle **vraie** ?*»

«*Dire que x a 95% de chances d'être dans l'intervalle de confiance, est-ce que ça a **des chances d'être faux** ?*»

– **La qualité d'une mesure** est une idée rudimentaire chez les étudiants. Une mesure est bonne si elle emporte l'accord de l'enseignant, car il détient la valeur de référence. Pour la trouver, un moyen : le soin. C'est qu'en effet les étudiants se sentent personnellement responsables des écarts à la «bonne valeur», écart qu'ils dénomment «erreur» avec une connotation nettement péjorative. Un des objectifs de notre enseignement est de faire évoluer cette idée vers la conception plus élaborée qu'un résultat doit avoir deux qualités : précis et exact, et que les moyens pour atteindre ces qualités sont de nature différente.

– Spontanément, les étudiants rejettent l'idée de **dispersion** et n'aiment pas recommencer une mesure. S'ils le font, c'est rarement pour obtenir plus d'information sur le résultat cherché, mais plutôt pour vérifier une première mesure. On retrouve ici l'idée qu'une mesure doit être jugée, qu'elle est à garder ou à éliminer.

Les étudiants considèrent que la troisième mesure sert à trancher entre les deux premières et espèrent pour la suite des mesures une certaine convergence de la série. Ils considèrent alors comme inutile de continuer à répéter les mesures.

Ainsi pour les étudiants, le nombre N de mesures serait fixé de façon subjective, au vu des résultats obtenus. Le point de vue que nous enseignons est différent : si l'on recommence N fois la mesure d'une même grandeur, c'est que chaque terme de la série apporte de l'information sur la population dont elle est extraite et dont on peut raisonnablement espérer qu'elle est gaussienne.

Par ailleurs nous essayons d'implanter l'idée que le nombre N de mesures est l'objet d'un **choix** raisonné, s'appuyant sur l'expression mathématique donnant l'intervalle de confiance associé à un taux de confiance donné. Il est en effet vain de rechercher un intervalle de confiance à 95% (par exemple), qui serait inférieur à l'inexactitude qu'il est impossible de réduire. C'est donc *in fine* une analyse physique du phénomène qui peut guider ce choix.

– L'idée de «**meilleur représentant d'une série de mesures**» est moins intuitive qu'il y paraît. Spontanément, des étudiants choisissent le mode ou la médiane plutôt que la moyenne (Séré et al., 1993). D'autres prennent la moyenne, éventuellement après élimination quelque peu arbitraire de l'une et/ou l'autre des valeurs extrêmes.

En ce qui concerne cette notion, l'enseignement est facile à saisir pour les étudiants. Tous apprennent sans problème à calculer la moyenne et semblent admettre qu'elle est bien le meilleur représentant de la série de mesures.

Ces résultats incitent à penser que deux facteurs peuvent favoriser la compréhension de l'approche statistique des incertitudes :

– faire évoluer la représentation que les étudiants ont d'une série de mesures, en les écartant de la dichotomie bonne / mauvaise mesure au profit de l'idée que toute valeur obtenue est porteuse d'information. Cette représentation constitue une ligne directrice qui donne du sens à l'ensemble du traitement mathématique enseigné ;

– initier une saine représentation du déterminisme, du hasard, de la nature des résultats obtenus par les statistiques. Il s'agit d'éviter l'application aveugle de formules, ce qui conduirait à une insatisfaction quant aux résultats obtenus. Nous proposons une prise de conscience de ce que sont une variable aléatoire, le prévisible et l'imprévisible pour une épreuve donnée ou pour une ensemble d'épreuves, le couple hasard-déterminisme. Nous proposons également une réflexion sur les informations qu'un échantillon, même de petite taille, apporte à propos de la population parente dont il est extrait.

3. LE DÉROULEMENT DES TRAVAUX PRATIQUES

Les TP d'optique dont il est ici question durent deux journées, chacune représentant environ sept heures de travail.

Nous décrivons les activités des étudiants chronologiquement et suivant un découpage regroupant les activités par objectifs. Nous laissons de côté dans cette description les objectifs de connaissance d'optique, malgré leur importance.

3.1. Première journée : mesures de distances focales de lentilles minces

Il s'agit ici de mesurer la distance focale de plusieurs lentilles, convergentes ou divergentes, à l'aide d'une/plusieurs méthodes, en réalisant une/plusieurs mesures. Quand ils concernent la même lentille (convergente), les résultats par différentes méthodes sont confrontés en vue de donner un résultat unique.

1°) Associer les activités de réglage à la recherche d'exactitude et à la minimisation des erreurs systématiques

Les étudiants règlent l'horizontalité du banc d'optique, l'alignement des appareils, etc.

2°) Parvenir au concept de dispersion

Les étudiants effectuent une mesure unique de la distance focale d'une lentille convergente L_1 par autocollimation. De façon «classique», ils donnent une seule valeur accompagnée d'un encadrement (méthode dite analytique par les métrologues). Il est alors demandé de réaliser une autre mesure «classique», et chaque binôme est invité à comparer ces deux premiers résultats. Cela pose en général le problème de la non-compatibilité de mesures et encadrements successifs. Les étudiants doivent alors réaliser huit autres mesures sans encadrement. Chaque binôme dispose ainsi d'une série de dix mesures dispersées.

3°) Comprendre la pertinence des statistiques pour obtenir un résultat à partir d'une série de mesures (exposé de l'enseignant)

L'enseignant dispose d'un appareil de Galton (figure 1) qui lui permet de faire énoncer aux étudiants un certain nombre de résultats à propos d'une variable aléatoire : la case dans laquelle tombe une bille. Il leur fait alors transposer ces résultats à la variable aléatoire qu'est le résultat d'une mesure. L'efficacité didactique de cette analogie a été étudiée par ailleurs (Séré, 1994). C'est par cet artifice que l'enseignant introduit les notions de statistiques indispensables pour le concept et le calcul de l'intervalle de confiance associé à un taux de confiance (nous nous sommes limités au taux de confiance de 95 % par souci de simplification).

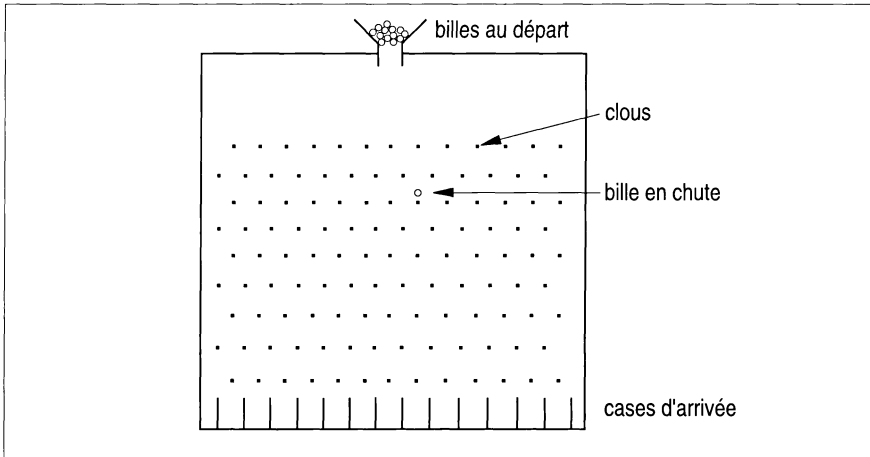


Figure 1 : **Schéma de l'appareil de Galton.** Quand on fait tomber un grand nombre de billes à travers le système de clous, celles-ci se distribuent dans les cases d'arrivée avec une répartition proche d'une courbe de Gauss.

4°) Comprendre l'intérêt de N mesures en calculant l'intervalle de confiance, par comparaison des méthodes «classique» / statistique

Chaque binôme effectue le calcul de l'intervalle de confiance à 95 % rendant compte de sa propre série de mesures et est invité à commenter ses résultats. La figure 2 montre le type de résultats obtenu par un binôme : l'intervalle de confiance obtenu avec dix mesures est bien inférieur à l'encadrement qu'il avait choisi pour sa première mesure (gain en précision). La moyenne est légèrement décalée par rapport à la première mesure (gain en exactitude).

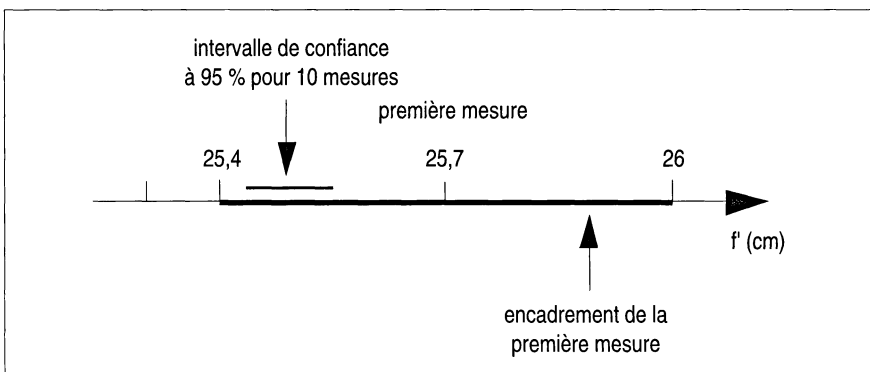


Figure 2 : **Dix mesures de f' réalisées par un binôme.** Comparaison de l'encadrement évalué pour la première mesure et de l'intervalle de confiance à 95 % pour les dix mesures.

5°) Réaliser un traitement statistique et l'appliquer à un problème de transmission des incertitudes

«Classiquement», les étudiants doivent acquérir le principe de la transmission des incertitudes par le calcul différentiel. Le même calcul est applicable à des intervalles de confiance. Nous leur faisons donc traiter un tel problème à l'occasion de la mesure de la distance focale de L_1 par la méthode de Bessel.

6°) Donner un résultat unique et en choisir le nombre de chiffres significatifs en fonction de l'intervalle et du taux de confiance choisis

Ainsi, chaque binôme obtient plusieurs résultats pour la distance focale d'une même lentille L_1 . Il lui est alors demandé de donner une valeur unique en ayant choisi le nombre de chiffres significatifs. Chaque binôme a ses propres résultats, ses propres difficultés aussi (décalage des valeurs, incompatibilité des intervalles, etc.). Chacun doit réaliser une discussion en terme d'incertitudes systématiques et aléatoires. Quelques questions sont posées pour les guider dans cette réflexion. On trouvera dans le paragraphe 4 quelques commentaires suscités par ces questions suggérant qu'elles sont l'occasion d'initiative et de réflexion personnelle pour les étudiants.

3.2. Deuxième journée : mesures de l'indice d'un milieu transparent (altuglas)

Les méthodes utilisées sont : plusieurs mesures de l'angle limite pour un dioptre plan en altuglas, plusieurs mesures du couple d'angles d'incidence et de réfraction (i, r) pour le même dioptre plan, mesure unique de la déviation produite par un prisme fait du même matériau.

Une première question ouverte est posée : «Le fait de tenir compte de nombreuses mesures de tous les binômes va-t-il diminuer la précision du résultat ou au contraire l'améliorer ? Argumentez votre réponse.» Elle a donné des indications sur les acquis des étudiants au cours de la séance précédente (les deux séances étaient séparées de une à trois semaines). On trouvera quelques réponses à cette question dans le paragraphe 4.

1°) Associer les activités de réglage à la recherche d'exactitude et à la minimisation des erreurs systématiques

Il s'agit ici de centrer la platine support des appareils en altuglas par rapport au faisceau laser constituant la source.

2°) Effectuer le traitement statistique de deux séries de mesures dispersées de «tailles» différentes ($N = 10$ et $N = 120$)

Chaque binôme mesure dix fois un angle k , double de l'angle limite de l'altuglas (figure 3).

Puis chacun à son tour introduit cette série de mesures dans le logiciel de fonctions statistiques «KaleidaGraf». Celui-ci fournit l'histogramme et l'intervalle de confiance de chaque binôme (dix mesures). Il fournit aussi l'histogramme et l'intervalle de confiance correspondant à l'ensemble du groupe (120 mesures).

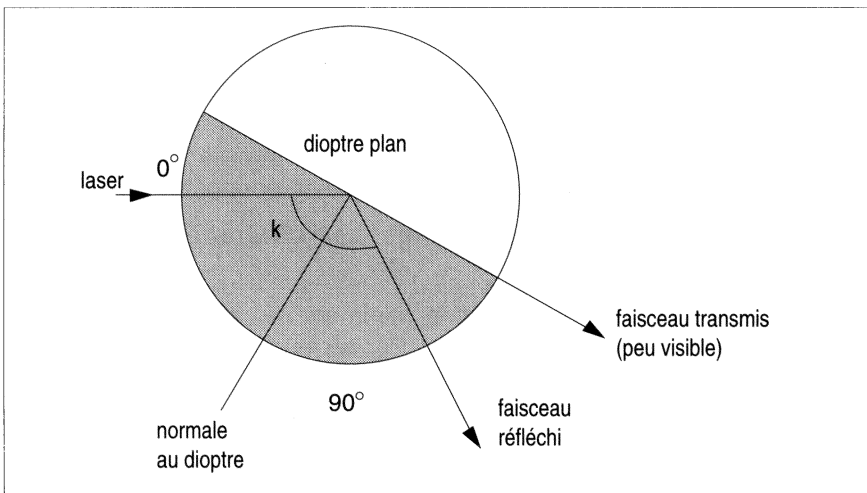


Figure 3 : Mesure de l'angle k , double de l'angle limite dans l'altuglas.

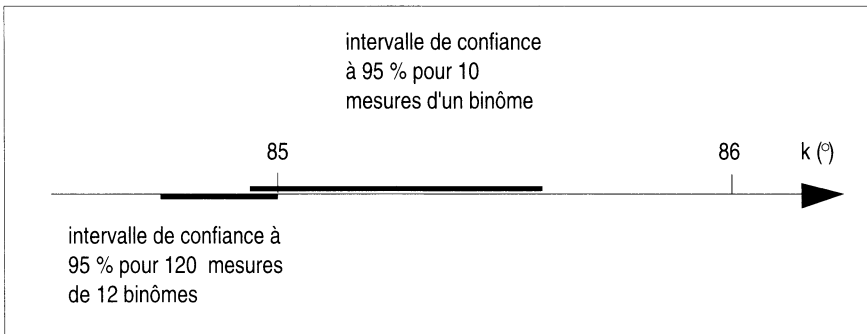


Figure 4 : Comparaison des intervalles de confiance pour un binôme et pour douze binômes pour le taux de confiance de 95 %.

Les étudiants sont invités à comparer ces différents résultats, qui sont en général très parlants (figure 4). Tel binôme s'aperçoit d'un décalage grossier de ses mesures par rapport à celles du groupe. Il recherche une source d'erreur systématique. Tel autre binôme s'interroge sur la quasi-égalité de son écart moyen quadratique et de celui de tout le groupe (une conception erronée consiste à penser que l'écart moyen quadratique diminue quand on augmente le nombre de mesures). Tous constatent que l'intervalle de confiance du groupe est plus faible que le leur (il devrait être $\sqrt{12}$ fois plus petit), ce qui rend clair l'intérêt de faire beaucoup de mesures.

L'ensemble du groupe peut finalement produire une valeur de l'indice n de l'altuglas en lui donnant un nombre de chiffres significatifs au vu de l'intervalle de confiance.

3°) Traiter un ensemble de mesures par la régression linéaire

La loi $\sin i = n \sin r$ est utilisée pour calculer n par régression linéaire. Chaque binôme obtient la pente de la droite formée par les points expérimentaux, ainsi que l'intervalle de confiance pour cette pente.

4°) Comparer les résultats donnés par différentes méthodes, «classique»/statistique

Enfin chaque binôme mesure le minimum de déviation D pour un prisme taillé dans le même altuglas. Par le jeu des coefficients dans l'expression donnant n à partir de D , il se trouve que cette méthode «classique», puisqu'elle n'utilise qu'une mesure, donne une bonne précision.

Les étudiants doivent alors rassembler tous leurs résultats pour n . Bien qu'étant centrés autour des mêmes valeurs, les résultats ont parfois des configurations fort différentes d'un binôme à l'autre. Chaque binôme doit commenter ses résultats personnels.

4. L'IMPACT DE CET ENSEIGNEMENT

Sans constituer une évaluation, les observations suivantes apportent quelque lumière sur l'impact de cette innovation.

Les enseignants qui s'y sont intéressés approuvent dans leur ensemble le fond et la forme de ces TP. Les modifications qu'ils demandent pour une version ultérieure sont la reformulation de quelques questions portant sur la comparaison de méthodes et l'informatisation d'un calcul un peu long. Ils demandent aussi que les mesures du même angle k (deuxième journée) soient recueillies pour tous les groupes et qu'un intervalle de confiance puisse être calculé pour une valeur de N de l'ordre de 1000. Cela permettrait une discussion sur les limites de la méthode consistant à répéter des mesures.

Généralement, les enseignants regrettent que le sérieux avec lequel les résultats de mesure ont été discutés reste exceptionnel. C'est qu'en effet ils ont vu des étudiants développer des considérations physiques inhabituelles pour critiquer et comparer leurs résultats. Ils ont également vu des étudiants faire preuve d'initiative et de réflexion personnelle devant ces résultats. Nous donnons ci-dessous quelques extraits de comptes rendus de TP, montrant que commentaires et réponses sont variés et non stéréotypés, même s'ils manifestent encore quelques conceptions erronées.

Première journée - «Sur un même axe, reportez vos dix mesures, l'encadrement que vous avez donné pour une seule mesure et l'intervalle de confiance à 95 %. Commentez.» (voir figure 2)

«Sept mesures sur dix n'appartiennent pas à l'intervalle de confiance. [Cela] montre bien l'utilité des calculs statistiques : nos dix mesures de départ ont ainsi été réduites à un intervalle de confiance réduisant le nombre de mesures à trois.» (Ce binôme continue à penser qu'il faut éliminer les «mauvaises» mesures et considère que ce sont celles qui sont hors de l'intervalle de confiance).

«C'est justement le but du traitement statistique qui réduit considérablement cette imprécision, qui est de 0,4 cm tandis qu'auparavant elle était de 0,65 cm.» (Ce binôme comprend que le fait de faire dix mesures apporte un gain en précision).

«Nous avons cinq mesures sur dix qui se trouvent dans l'intervalle de confiance. Nous serions tentées de dire qu'il y a 50 % de bonnes et 50 % de mauvaises mesures, mais nous nous efforçons de nous en dissuader car toutes ont contribué à l'affinement de l'intervalle de confiance.» (Ce binôme est parvenu à la même conclusion que le précédent, en exprimant de plus que toutes les mesures ont contribué à apporter de l'information).

Deuxième journée – Question préalable : «Le fait de tenir compte de nombreuses mesures de tous les binômes va-t-il diminuer la précision du résultat ou au contraire l'améliorer ? Argumentez votre réponse.»

«Le traitement statistique du maximum de données garantit la qualité du résultat. Par conséquent, le fait d'avoir 120 mesures plutôt que 10, minimise les erreurs aléatoires commises pendant l'expérimentation à chaque mesure.»

«L'encadrement final du résultat sera donc plus fin (surtout pour cette manipulation où le jugement de l'opérateur tient une place non négligeable).» (Ces deux binômes semblent comprendre le processus selon lequel l'accumulation de mesures augmente la précision et minimise l'influence des erreurs aléatoires. Il ne se servent pas de

l'expression mathématique donnant l'intervalle de confiance pour étayer leur réponse).

«Plus nous obtenons de résultats, plus notre moyenne sera précise donc plus proche de la valeur exacte.»

«De nombreuses mesures augmentent la probabilité d'obtenir des mesures proches de la réalité.»

(Ces deux binômes font une confusion entre la précision et l'exactitude).

De plus, les enseignants regrettent que le traitement statistique des mesures, et le souci de choisir entre une méthode «classique» et statistique, soient l'affaire de deux journées seulement. L'ensemble du groupe concerné a réellement avancé dans la prise de conscience des conditions qui rendent légitime un traitement statistique (ordre de grandeur des erreurs systématiques et aléatoires, indépendance des mesures successives, résolution de l'appareil de mesures, etc.). Aussi est-il souhaité que ce type de préoccupations reste présent dans l'ensemble des TP, même si pour des raisons évidentes de temps, il n'est pas souvent envisageable de faire beaucoup de mesures.

5. CONCLUSION

Edgar Morin (cité par F. Cros, 1993) dit des innovations que «*ce qui est important, c'est la dynamique sociale qu'une expérience met en œuvre, à un moment donné, et pas sa réussite finale.*» Pour notre part, nous attachons une réelle importance au résultat de cette innovation et nous avons décrit les moyens pour y parvenir. Quant à la dynamique, elle est multiple. Elle consiste d'une part à renouveler et approfondir le regard des enseignants et des étudiants sur la mesure et sur la variété des moyens disponibles pour améliorer ses qualités. Elle consiste d'autre part à ouvrir des possibilités d'autonomie pour les étudiants et de travail commun avec les enseignants, comme en témoignent les discussions collectives qui s'instaurent autour de résultats toujours imprévus et toujours différents d'un groupe à l'autre. Cette dynamique, encore loin de son terme, peut apporter un intérêt renouvelé aux TP de DEUG.

BIBLIOGRAPHIE

BACHELARD G. (1987). *Essai sur la connaissance approchée*. Paris, Vrin.

CROS F. (1993). *L'innovation à l'école : forces et illusions*. Paris, PUF.

LARCHER C., SÉRÉ M.-G. & JOURNEAUX R. (1994). Difficultés lors du mesurage chez des étudiants de première année d'Université. *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 12, n° 2, pp. 217-225.

- SÉRÉ M.-G. (1992). Le déterminisme et le hasard dans la tête des élèves. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 740, pp. 87-96.
- SÉRÉ M.-G. & JOURNEAUX R. (1992). *TP d'Optique, MO3-MO4*. Polycopié du Centre Scientifique d'Orsay, Université Paris XI.
- SÉRÉ M.-G., JOURNEAUX R. & LARCHER C. (1993). Learning the statistical analysis of measurement errors. *International Journal of Science Education*, vol. 15, n° 4, pp. 427-438.
- SÉRÉ M.-G. (1994). Une analogie pour comprendre l'approche statistique des incertitudes en première année d'Université. *Didaskalia*, n° 3, pp. 27-42.

Remerciements

Nous tenons à remercier vivement les collègues enseignants qui se sont intéressés à nos recherches et ont joint leur dynamisme au nôtre pour cette innovation. Leurs questions et commentaires ont fait avancer notre réflexion. Merci à A. Benani, J.-L. Duchêne, P. Lauginie et M.-C. Méry, ainsi qu'à C. Ferrari et K. Bochialini, moniteurs (Université Paris 11), A. Jorus (Université de Versailles St Quentin) et A. Guillon (Université de Cergy-Pontoise).

Notre reconnaissance va également à J. Bénard qui s'est chargé du travail informatique et a accompagné avec compétence et souplesse le cheminement de la recherche et de l'innovation.