



**Analyse comparative
de la gestion du mesurage
en TP de DEUG à Orsay
(biologie, chimie et physique)**

**Practice and organisation of measuring
in experimental work during the first
two years at the Paris XI – Orsay
University : Comparative analysis in
biology, chemistry and physics**

Françoise FONDÈRE, Christiane PERNOT,

DidaScO, bâtiment 333, Université Paris XI
avenue G. Clémenceau
91405 Orsay cedex, France.

Christine RICHARD-MOLARD,

Département de biologie, bâtiment 336
Université Paris XI
avenue G. Clémenceau
91405 Orsay cedex, France.

«L'observation scientifique n'est pas une observation neutre, ni une observation complète mais au contraire, une observation utilisant une grille de lecture... L'observation neutre, face à l'objet, est une fiction».
(Fourez, 1992, p. 34)

Résumé

Ce travail présente la comparaison de pratiques d'enseignement expérimental au niveau du premier cycle universitaire, en biologie, chimie et physique à Orsay (Université Paris Sud, France). Cette comparaison est effectuée en décrivant les activités offertes aux étudiants. Nous proposons une lecture de ces activités traduisant l'intention didactique d'une formation à la démarche expérimentale. Nous décrivons et analysons comment cette interprétation peut amener les étudiants à effectuer la mise en relation des différents éléments du mesurage : protocole expérimental, appareillage, résultats de mesure, lois ou modèles, valeurs de référence. Nous précisons ainsi les activités intellectuelles et pratiques, et les compétences et savoirs en jeu dans cette mise en relation. Ceci permet de dégager les similitudes des pratiques d'enseignement expérimental et les particularités disciplinaires. L'interprétation proposée fait apparaître une potentialité intéressante des TP : l'enseignant peut placer l'étudiant dans une situation de mise en relation critique des éléments du mesurage, l'amenant à porter un jugement argumenté sur ses résultats.

Mots clés : *mesurage (pratiques et gestion du), démarche expérimentale, savoirs et compétences, jugement argumenté, particularités disciplinaires.*

Abstract

A comparison is made between the teaching practices in experimental work in biology, chemistry and physics, during the first two years of University (Université Paris XI, Orsay, France). In order to make this comparison, the activities proposed to students are described. We suggest an interpretation of these activities which represents the didactical intention of the training in the experimental process. We describe and analyse how this interpretation leads the students to link the different elements involved in measuring : experimental procedure, apparatus, results obtained, laws or models, reference values. In this way, the intellectual and practical activities, as well as the skills and knowledge required for this linkage can be identified. Consequently, the similarities in experimental teaching practices and the disciplinary particularities become apparent. The proposed interpretation reveals an interesting potential in labwork : the teacher's guidance can lead the students to relate in a critical way the elements involved in the measurement process, and to argue for their judgments on the results.

Key words : *measuring (practice and organisation), experimental process, skills and abilities, argued judgment, disciplinary particularities.*

Resumen

Este trabajo presenta la comparación de prácticas de enseñanza experimental al nivel del primer ciclo universitario, en biología, química y física en ORSAY ("Université Paris Sud", France). Dicha comparación se efectúa a través de la descripción de las actividades propuestas a los estudiantes. Proponemos una lectura de dichas actividades que traduce la intención didáctica de una capacitación al proceso experimental.

Describimos y analizamos cómo esta interpretación puede llevar a los estudiantes a establecer una relación entre los distintos elementos de medición protocolo experimental, aparatos, resultados de las medidas, leyes o modelos, valores de referencia. Precisamos, así, las actividades intelectuales y prácticas y las capacidades y conocimientos interrelacionados. Esto permite destacar prácticas de la enseñanza experimental y las particularidades de la disciplina. La interpretación propuesta revela una potencialidad interesante de las clases prácticas : el maestro puede poner al estudiante en una situación de crítica respecto a los elementos de la experiencia, llevándolo a emitir un juicio argumentado sobre los resultados.

Palabras claves : medición (prácticas), proceso experimental, conocimientos y capacitación, juicio argumentado, particularidades de la disciplina.

1. INTRODUCTION

Les recherches en didactique concernant les travaux pratiques (TP) en premier cycle universitaire (première et deuxième années post-baccalauréat) se font selon différents axes : les objectifs, les tâches, la formation à la démarche expérimentale, etc.

Dans des recherches récentes, centrées sur la possibilité d'utiliser les TP pour une formation à la démarche expérimentale, les auteurs étudient de nouvelles formes de séances : situation-problème, modélisation, projet (Guillon, 1995 ; Pernot, 1993 ; Pinelli & Lefèvre, 1993). Dans ce même axe de recherche, il nous semble intéressant d'analyser les activités proposées dans des TP «classiques» de premier cycle universitaire et de faire émerger leurs potentialités de formation à la démarche expérimentale. Pour faire émerger ces potentialités, nous nous sommes particulièrement attachées à décrire les choix auxquels les étudiants sont confrontés et les critères de décision. Dans l'explicitation de cette intention didactique de formation à la démarche expérimentale, notre position rejoint celle de G. Fourez concernant les démarches scientifiques, selon laquelle «*l'occultation systématique des choix, des critères et des situations permettant l'activité scientifique risque d'entraîner la dépendance des apprenants, de même qu'une profonde perte de sens... perte de sens, dans la mesure où se trouvent cachés la finalité et le contexte de l'activité* » (Fourez, 1994, pp. 65-66).

Les TP analysés ont été mis en place depuis plusieurs années, pour plusieurs centaines d'étudiants, à l'université de Paris XI, Orsay, en biologie, chimie et physique. Dans toutes les séances étudiées, les étudiants réalisent des mesures, ce qui est le cas pour la majorité des TP dans les trois disciplines. De plus, dans ces séances, le protocole expérimental et l'appareillage sont, en grande partie, choisis par l'équipe enseignante et les étudiants confrontent leurs résultats expérimentaux à ceux attendus dans le cadre de lois et modèles qu'ils doivent connaître.

Ces TP «classiques» proposent donc aux étudiants un ensemble d'activités de mesurage. Le mesurage est défini de façon internationale (International Organization for Standardization, 1984) comme l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer la valeur d'une grandeur. Ceci correspond à un ensemble d'activités auxquelles un ingénieur, un technicien ou un chercheur consacre une grande partie de son temps : ces activités concernent la réalisation des mesures, leur gestion, ainsi que l'exploitation et l'interprétation des résultats. Dans les trois disciplines (biologie, chimie et physique), notre analyse des activités de mesurage s'étend aux savoirs et compétences auxquelles elles font appel. Nous mettons en évidence et caractérisons les mises en relation possibles des éléments du mesurage que sont le protocole expérimental et l'appareillage, les résultats de mesures, les lois et modèles, les valeurs de référence. Cette analyse pluridisciplinaire nous semble présenter plusieurs avantages : d'une part, elle oblige à mieux préciser le sens des activités de mesurage pour chaque discipline et permet ainsi de dégager les spécificités disciplinaires ; d'autre part, un enseignant, conscient des pratiques dans les autres disciplines, peut mieux situer, présenter et justifier sa propre pratique.

Les deux questions suivantes ont guidé notre étude :

– comment peuvent être mis en relation les différents éléments du mesurage ? Quels sont les compétences et savoirs en jeu dans cette mise en relation ?

– quelles similitudes et quelles particularités peut-on mettre en évidence dans les pratiques d'enseignement expérimental et dans le traitement des résultats de mesure pour les trois disciplines ?

Dans la lecture que nous proposons pour les activités des étudiants, dans les TP décrits, nous montrons que les différents éléments du mesurage peuvent ne pas être simplement juxtaposés, mais s'organiser en un réseau. Cette lecture traduit des intentions didactiques, dont la principale consiste en une initiation à porter un jugement argumenté sur le résultat du mesurage, ce qui se fait lors d'allers et retours entre les différents éléments du réseau.

2. MÉTHODOLOGIE

Les auteurs, maîtres de conférences confirmées respectivement en physique, chimie et biologie, ont toutes les trois participé à des innovations ou été à l'origine de modifications notables dans les cursus expérimentaux de leur discipline en DEUG (Diplôme d'Études Universitaires Générales) à l'université Paris XI (Fondère & Séré, 1997 ; Pernot, 1991 ; Richard-Molard, 1996). Les informations nécessaires à l'analyse des pratiques d'enseignement ont été recueillies au cours d'entretiens semi-directifs entre les trois auteurs et à partir de documents écrits, produits entre deux entretiens consécutifs. La durée des entretiens est d'environ trois heures par séance, à raison d'une séance ou deux par semaine, pendant un an, ce qui porte à cent cinquante heures environ le total des heures d'entretien. Tout au long de l'étude, un texte consensuel a été élaboré à la fin de chaque séance, permettant de synthétiser l'avancée du travail de description et d'analyse des pratiques et de préparer la séance suivante.

Notre méthodologie de recherche est du type inductivo-hypothético-déductif (de Ketele & Roegiers, 1993). Dans la première phase, exploratoire, nous recherchons des éléments descripteurs communs aux pratiques d'enseignement dans les trois disciplines. Pour cela, chacune des auteurs, experte dans sa discipline, questionnée par les deux autres chercheurs en didactique, décrit et explicite l'ensemble des activités proposées aux étudiants ; cette description et cette explication sont également effectuées par l'intermédiaire de documents de travail, produits par l'experte de la discipline. Une recherche commune de descripteurs pertinents par rapport aux objectifs de la recherche est alors entreprise. Puis, pour chaque discipline, les activités sont reformulées en utilisant les descripteurs sélectionnés. Une analyse synthétique et comparative effectuée en commun permet enfin de valider les descripteurs sélectionnés.

Une première tentative a été effectuée à partir d'éléments descripteurs tels que les grandeurs mesurées, les difficultés rencontrées au cours des mesures, les outils utilisés (calculs d'incertitude et outil statistique), le nombre de mesures effectuées, la conduite de l'exploitation des résultats de mesure. Ces éléments ont été présentés en relation avec les apprentissages en jeu (par exemple : l'apprentissage de l'observation correcte ou celui d'un jugement sur la pertinence des résultats). Cette première étude a permis de mettre en évidence les relations possibles entre les éléments du mesurage et de préciser les questions de recherche telles que nous les présentons dans l'introduction. Une seconde lecture des pratiques nous est alors apparue plus pertinente pour répondre à ces questions et pour décrire et caractériser les mises en relation possibles : celle prenant les activités proposées aux étudiants comme éléments descripteurs. Les étapes du

mesurage sont ainsi avantageusement décrites avec la même structure pour les trois disciplines.

Cette phase exploratoire de la recherche nous a conduites, à partir de la description des activités proposées aux étudiants, à analyser les possibilités de mises en relation des éléments du mesurage. Ceci nous a permis d'émettre l'hypothèse que, dans les trois disciplines, les activités proposées aux étudiants impliquent la nécessité d'effectuer et de gérer ces mises en relation.

Dans la phase suivante de validation de cette hypothèse, nous utilisons une méthodologie identique à celle de la phase exploratoire : entretiens, production de documents écrits, recherche commune d'un classement des mises en relation possibles suivie d'une analyse synthétique.

Par ailleurs, au cours de la phase exploratoire, l'experte de la discipline précise les savoir-faire et compétences en jeu dans les relations décrites. Une analyse synthétique commune de ces savoir-faire et compétences, à partir des entretiens et des documents de travail, permet de présenter ceux-ci en parallèle avec les mises en relation des éléments du mesurage.

L'ordre alphabétique entre les disciplines (biologie, chimie, physique) a été choisi pour présenter les informations et l'analyse, sauf cas particulier.

3. DESCRIPTION DES PRATIQUES DE MESURAGE EN RELATION AVEC LES SAVOIRS ET COMPÉTENCES EN JEU

Nous décrivons ci-dessous les activités intervenant dans les différentes étapes du mesurage, en les reliant aux savoirs et compétences à mettre en jeu. Nous avons fait le choix de ne pas trancher entre «savoirs» et «compétences», les deux termes nous semblant appropriés à notre étude.

Après avoir défini, en les caractérisant, les objets de mesure dans les trois disciplines, nous analysons les différentes étapes du mesurage qui amènent les étudiants à déterminer des grandeurs ou des caractéristiques : réalisation puis gestion et enfin exploitation et interprétation des mesures. Au cours de cette description, nous montrons les relations qui existent entre les éléments du mesurage, protocole et appareillage, mesures, valeurs de référence, lois et modèles. Une synthèse de l'analyse de ces relations est reprise au paragraphe quatre.

3.1. Que mesurent les étudiants ?

En biologie et en chimie, nous avons sélectionné les TP au cours desquels les étudiants sont particulièrement confrontés aux activités de mesurage : en biologie, la génétique et la microbiologie, en chimie, les dosages et la cinétique. En physique, les étudiants sont confrontés dans toutes les expériences à ce type d'activités ; nous avons choisi deux domaines, l'un étudié en première année de DEUG (l'optique), l'autre en deuxième année (l'électromagnétisme). Les expériences retenues présentent toutes les caractéristiques de TP «classiques» pour le niveau d'enseignement considéré ici.

3.1.1. En biologie

En **génétique**, les étudiants déterminent les caractéristiques génétiques de souches mutantes de drosophiles : nombre de gènes mutés pour chaque caractère morphologique étudié, liaison au sexe ou non et localisation chromosomique de ces gènes. Chaque étudiant, analysant un croisement particulier, observe les caractères morphologiques et le sexe des descendants de première génération issue de deux souches mutantes. Cette observation permet à l'étudiant de choisir, en référence aux lois de la génétique, une hypothèse concernant le nombre de gènes. Pour tester cette hypothèse, l'observation de la deuxième génération (croisement entre individus de première génération) est nécessaire. Elle permet de classer et de **dénombrer** les drosophiles selon leurs différentes caractéristiques morphologiques et le sexe, et de comparer ces résultats avec ceux attendus dans le cadre de l'hypothèse. Cette comparaison nécessite un calcul à partir de ces résultats (voir paragraphe 3.4.)

En **microbiologie**, les étudiants déterminent l'effet sur la croissance bactérienne de différents milieux de culture. La population de bactéries, vivantes et mortes, dans un échantillon, étant proportionnelle à la turbidité (dans le cadre de la loi de Beer-Lambert), c'est cette dernière qui est **mesurée** par spectrophotométrie en fonction du temps. La croissance bactérienne suit différentes phases dont la courbe représentative est une sigmoïde. Le temps de génération (temps de doublement de la population) est déterminé graphiquement à partir de la phase exponentielle de croissance. Par comparaison entre les résultats obtenus dans les différentes conditions de culture, les étudiants déduisent l'effet de ces conditions sur la croissance (voir paragraphe 3.4.) En parallèle, pour déterminer la concentration de bactéries vivantes, une autre expérience est réalisée : étalement de bactéries sur boîte après dilution et incubation pendant 24 heures à 37°C et **dénombrement** des clones bactériens. Ce dénombrement permet de

calculer la concentration de bactéries vivantes à deux instants de la phase exponentielle de croissance.

3.1.2. En chimie

En **chimie des dosages**, deux méthodes sont utilisées, la volumétrie et l'absorptiométrie. Par la méthode volumétrique, il s'agit de déterminer la concentration C_i de l'acide éthanoïque dans le vinaigre en provoquant la réaction avec une solution d'hydroxyde de sodium de concentration C_0 connue. Le dosage est réalisé en présence d'un indicateur coloré, et la concentration est calculée en écrivant la conservation de la quantité de matière qui conduit, dans ce cas, à la relation : $C_0 V_0 = C_i V_i$ (cas particulier où tous les coefficients stoechiométriques de l'équation de réaction sont égaux). Les volumes V_0 et V_i sont **mesurés**, la concentration C_i est calculée.

En absorptiométrie, il s'agit de déterminer le coefficient d'extinction molaire ε et la concentration C_{col} d'un colorant en solution. Pour déterminer ε , les étudiants **mesurent**, à l'aide d'un spectrophotomètre, l'absorbance A en fonction de la longueur d'onde λ pour un produit dont la concentration en colorant est connue. Le tracé de la courbe d'absorption $A = f(\lambda)$ permet de déterminer la longueur d'onde λ_m du maximum d'absorption et de calculer ε à λ_m en utilisant la loi de Beer-Lambert $A = \varepsilon \lambda C$. Pour déterminer C_{col} , les étudiants **mesurent** l'absorbance, à $\lambda = \lambda_m$, d'une série de solutions de concentrations données en colorant. Le tracé de la droite d'étalonnage $A = g(C)$ correspondante permet de **déterminer graphiquement** la valeur de C_{col} à partir de la mesure de l'absorbance de l'échantillon. De plus, la pente de cette droite permet de calculer à nouveau ε à $\lambda = \lambda_m$ (voir paragraphe 3.4.)

En **cinétique**, les étudiants **mesurent** l'absorbance, proportionnelle à la concentration en bleu de bromophénol, en fonction du temps t . Selon l'ordre de la réaction : 0, 1 ou 2, l'une ou l'autre des courbes $C = f(t)$ déterminée, $1/C = f(t)$ ou $\ln C = f(t)$ est une droite. La pente de la droite, choisie d'après un processus décrit au paragraphe 3.4., leur permet de calculer la constante de cinétique.

3.1.3. En physique

En **optique**, les étudiants déterminent des distances focales de lentilles minces et l'indice de réfraction du plexiglas.

Pour déterminer les distance focales, ils alignent et centrent les éléments du montage (lentille, écran, objet) sur un banc d'optique, puis règlent leurs positions afin d'obtenir une image nette ; ils **mesurent** alors les positions des éléments, ce qui leur permet de calculer la distance focale f dans le cadre du modèle de l'optique géométrique (voir paragraphe 3.4.)

Pour déterminer l'indice n du plexiglas, les étudiants **mesurent** l'angle de réfraction r d'un faisceau laser à l'intérieur du plexiglas, pour plusieurs valeurs de l'angle d'incidence i . Leurs résultats doivent s'accorder à la loi de Descartes $\sin i = n \sin r$. Le tracé de la droite représentant la variation de $\sin i$ en fonction de $\sin r$, leur permet de calculer n .

En **électromagnétisme**, les étudiants déterminent les caractéristiques et les propriétés d'une onde électromagnétique, telles que sa longueur d'onde λ dans l'air ou dans un guide d'ondes, sa direction de polarisation, sa diffraction par un diaphragme.

Pour la détermination de la longueur d'onde, les ventres et les noeuds de l'onde stationnaire sont repérés à l'aide d'un voltmètre dans le cas de la propagation dans l'air, à l'aide d'un oscilloscope dans le cas de la propagation dans un guide d'ondes. Les **mesures** des positions des ventres et des noeuds permettent de déterminer λ par le calcul (voir paragraphe 3.4.).

Pour déterminer la direction de polarisation d'une onde électromagnétique, les étudiants **observent la variation du signal** reçu par un millivoltmètre relié à une antenne plongée dans le champ électrique de l'onde. Ils savent que ce signal est maximum quand les directions de l'antenne et du champ sont parallèles ; ils **déduisent** donc la direction du champ de celle de l'antenne, quand le signal observé est maximal.

Lors de l'étude de la diffraction d'une onde lumineuse par un diaphragme, les étudiants enregistrent, à l'aide d'une table traçante, la courbe de l'intensité de la lumière diffractée en fonction de la position du point d'observation du phénomène de diffraction. La **mesure** sur cette courbe, des positions correspondant aux minima de l'intensité diffractée, permet de calculer les dimensions des diaphragmes (voir paragraphe 3.4.).

Dans les TP décrits ici dans les trois disciplines, il apparaît que, pour certains cas, une étape qualitative existe préalablement aux mesures : en génétique, la reconnaissance des différences morphologiques des drosophiles ; en microbiologie, l'identification de clones bactériens ; en chimie des dosages par volumétrie, l'appréciation du changement de couleur de la solution ; en optique, l'appréciation de la netteté d'une image.

3.2. Réalisation des mesures

Dans les TP de DEUG que nous analysons, les étudiants effectuent deux types d'**observation** : l'observation visuelle, qualitative, du système ou l'observation, quantitative, d'un signal traduisant l'état du système. Par ailleurs, la gestion correcte des activités pratiques demande aux étudiants de **mettre en oeuvre leur savoir-faire technique**. Nous décrivons les

savoirs et compétences nécessaires, ainsi que les relations entre les éléments du mesurage qui apparaissent au cours de cette étape.

3.2.1. En biologie

L'observation qualitative correcte, préalable au comptage, consiste, en génétique, à repérer avec finesse les différences entre les caractères des drosophiles étudiés et ceux des drosophiles d'une souche de référence (système-témoin), en n'omettant pas de noter, pour chaque individu, l'ensemble des caractères observés, ce qui est nécessaire pour l'interprétation ultérieure des résultats. En microbiologie, l'observation qualitative correcte consiste à repérer, lors de la détermination d'une concentration de bactéries vivantes, des clones bactériens individualisés (c'est-à-dire non groupés en amas) et à les différencier d'éventuels clones contaminants dont les caractéristiques macroscopiques sont différentes.

Il apparaît que, pour arriver à une observation qualitative correcte, les étudiants ont besoin, en génétique, d'un entraînement assez long et d'un guidage important de la part des enseignants ; en microbiologie, cet entraînement est plus rapide.

Par ailleurs, **les observations quantitative et qualitative** correctes nécessitent la **mise en oeuvre de savoir-faire techniques**. Ceci consiste pour les étudiants à savoir :

- choisir le matériel approprié. Un choix pertinent de la verrerie et du système de pipetage est nécessaire (microbiologie) ;

- appliquer le mode d'emploi d'un appareil ou le mode opératoire d'un appareillage. En microbiologie, la lecture du résultat d'une mesure sur un spectrophotomètre implique de régler le zéro et de chercher à éviter les erreurs de parallaxe, puis de contrôler régulièrement ce zéro sur un échantillon-témoin avant toute mesure de turbidité de la culture bactérienne ;

- choisir les conditions d'utilisation du matériel, en fonction des observations. En génétique, le choix du grossissement adéquat et le centrage de l'éclairage de la loupe sont nécessaires pour détecter de faibles différences des caractères des drosophiles ;

- modifier les conditions d'utilisation du matériel en fonction des observations. En microbiologie, les étudiants doivent penser à diluer la culture de bactéries si la turbidité dépasse la valeur maximale (indiquée par l'enseignant) au-delà de laquelle la loi de Beer-Lambert n'est plus applicable ;

- maîtriser les spécificités techniques d'une expérience. En génétique, si l'éthérisation des drosophiles est trop forte, les différences des caractères peuvent être difficiles à observer ; si elle est trop faible, les drosophiles se

réveillent avant la fin des observations. En microbiologie, pour que le dénombrement des clones bactériens soit possible, les étudiants doivent respecter les conditions de stérilité afin d'éviter des clones bactériens contaminants, et effectuer un étalement correct pour empêcher des amas. La mise en oeuvre de cette technique nécessite un entraînement important, guidé par l'enseignant.

Nous notons ainsi, qu'au cours de cette étape, il est possible de mettre en relation les résultats de mesures avec le protocole expérimental et l'appareillage. Cette mise en relation suppose un jugement critique et une éventuelle remise en cause des éléments. Par exemple, dans le cas de dénombrement de colonies bactériennes, la non-lisibilité des résultats, absence ou non-individualisation de colonies, entraîne la critique de la mise en oeuvre des savoir-faire techniques et du protocole. Dans le cas des mesures de turbidité, si la valeur dépasse la valeur limite, le protocole de dilution doit être revu. Pour la génétique, la relation entre les résultats de mesure d'une part, le protocole et l'appareillage d'autre part, est guidée par l'enseignant : ainsi, par exemple, la qualité de l'éthérisation des drosophiles peut être remise en cause.

3.2.2. En chimie

L'observation qualitative correcte consiste à évaluer avec finesse l'aspect d'un milieu réactionnel (couleur), souvent par comparaison avec un échantillon-témoin.

L'observation quantitative correcte consiste à déterminer les paramètres d'observation pertinents tels que l'intensité ou la forme d'un signal, et à juger si leur ordre de grandeur permet de les exploiter ou non : quand les étudiants déterminent la longueur d'onde correspondant à l'absorbance maximale d'une solution de colorant, ils recherchent le maximum et jugent s'il est acceptable ou non d'après son intensité. Quand les étudiants déterminent la concentration en colorant de la solution, ils mesurent l'intensité de l'absorbance et jugent si cette intensité est exploitable ou non (dans ces deux cas, c'est l'enseignant qui guide les étudiants dans ce jugement qui prend en compte les limites de détection de l'appareil et la limite de validité du modèle).

Il faut noter qu'en chimie, la forte sensibilité du milieu réactionnel aux conditions externes implique que les étudiants observent les caractéristiques du milieu extérieur (luminosité, température, quantité de dioxyde de carbone, etc.) et en tiennent compte dans l'exploitation des mesures.

Par ailleurs, pour les étudiants, la **mise en oeuvre de leur savoir-faire technique** consiste à savoir :

– choisir le matériel approprié. Un choix pertinent de la verrerie et du système de pipetage est nécessaire ; un mauvais choix de l'indicateur coloré conduit à des résultats inexploitable en acidimétrie ;

– appliquer le mode d'emploi d'un appareil ou le mode opératoire d'un appareillage. La lecture du résultat d'une mesure sur un appareil gradué implique de régler le zéro des appareils et de chercher à éviter les erreurs de parallaxe (spectrophotomètre, burette) ; le zéro du spectrophotomètre doit être régulièrement contrôlé sur un échantillon-témoin avant toute mesure d'absorption d'une solution colorée. On note aussi l'importance de la propreté de la verrerie, qui doit être rincée préalablement avec le solvant ou la solution ;

– modifier les conditions d'utilisation du matériel en fonction des observations. Les étudiants doivent penser à vérifier que la solution la plus concentrée de la gamme-étalon a une absorbance inférieure à l'absorbance maximale mesurable ;

– maîtriser les spécificités techniques d'une expérience. Les étudiants doivent contrôler la bonne qualité des produits utilisés (un produit oxydé ou hydraté conduit à des résultats erronés).

Les relations possibles entre les éléments du mesurage au cours de cette étape de réalisation des mesures sont celles qui existent

– entre une loi et le protocole expérimental et l'appareillage ; par exemple, en chimie des dosages, les étudiants élaborent un protocole en choisissant la verrerie appropriée au dosage à effectuer ; ils utilisent pour cela la loi de conservation de la masse,

– entre les résultats de mesure et le protocole et l'appareillage ; par exemple, une mesure d'absorbance supérieure à la valeur de saturation d'un spectrophotomètre remet en cause les conditions d'utilisation de l'appareil ou le protocole. D'autre part, le jugement porté sur le protocole et l'appareillage permet d'accepter ou de rejeter les résultats des mesures ; par exemple, l'utilisation d'une pièce de verrerie de précision insuffisante entraîne le rejet de la mesure.

3.2.3. En physique

L'observation qualitative correcte consiste, en optique, à évaluer avec finesse la netteté d'une image.

L'observation **quantitative** correcte consiste à déterminer les paramètres d'observation pertinents, tels que l'intensité ou la forme d'un signal, et à juger si leur ordre de grandeur permet de les exploiter ou non. Par exemple, quand les étudiants déterminent la direction de polarisation d'une

onde électromagnétique, ils observent l'évolution du signal électrique avec l'orientation d'une antenne réceptrice. Les étudiants comparent ainsi entre eux les signaux correspondant à différentes orientations de l'antenne et jugent si le maximum obtenu est exploitable ou non d'après son intensité.

Par ailleurs, pour les étudiants, la **mise en oeuvre de leur savoir-faire technique** consiste à savoir :

– appliquer le mode d'emploi d'un appareil ou le mode opératoire d'un appareillage : la lecture du résultat d'une mesure sur un appareil gradué implique de régler le zéro des appareils et de chercher à éviter les erreurs de parallaxe (banc d'optique et tout appareil avec graduations). En ce qui concerne le mode opératoire d'un appareillage, il s'agit, en optique, d'aligner et centrer soigneusement chacun des éléments posés sur le banc pour obtenir l'image d'un objet ;

– modifier les conditions d'utilisation du matériel, en fonction des observations : pour la lecture d'un résultat sur un appareil sophistiqué, par exemple un microampèremètre, l'étudiant doit savoir choisir le calibre, puis l'échelle sur laquelle doit se faire la lecture (TP de caractérisation d'une onde électromagnétique) ;

– maîtriser les spécificités techniques d'une expérience : d'une façon générale, le savoir-faire technique est lié à l'application du mode d'emploi d'un appareil ou du mode opératoire d'un appareillage. Par exemple, pour étudier la diffraction d'une onde électromagnétique lumineuse, les étudiants ont à leur disposition un appareillage complexe dont ils doivent maîtriser les nombreux paramètres afin d'obtenir un enregistrement correct de la courbe de diffraction : vitesses de défilement du papier de l'enregistreur et de déplacement du récepteur, distance de l'objet diffractant au récepteur, coefficient d'amplification du signal etc.

Nous mettons en évidence la relation entre les lois et le protocole et l'appareillage : dans l'exemple, cité ci-dessus, de la détermination de la direction de polarisation d'une onde électromagnétique, les étudiants connaissent les lois régissant le fonctionnement de l'antenne réceptrice soumise au champ électrique de l'onde et celui du voltmètre récepteur ; ils utilisent ces lois pour effectuer et interpréter les mesures permettant de déterminer les grandeurs inconnues.

Dans le cas de l'optique, nous mettons en évidence la relation entre le protocole et l'appareillage et le modèle de l'optique géométrique : les étudiants connaissent ce modèle et doivent apprécier l'adéquation des conditions expérimentales aux conditions d'application de ce modèle ; par exemple, ce modèle ne s'applique que si les rayons lumineux sont paraxiaux et peu inclinés sur l'axe.

La relation entre les résultats de mesure et le protocole et l'appareillage apparaît aussi : pour l'exemple de la diffraction d'une onde lumineuse, l'obtention d'un enregistrement «correct» implique un choix pertinent des valeurs des paramètres de l'expérience, et donc un regard critique porté à la fois sur les conditions d'utilisation de l'appareillage, sur le protocole et sur les résultats des mesures.

En conclusion de ce paragraphe, il apparaît que l'initiation à une observation correcte en DEUG consiste en plusieurs étapes : préalablement à toute observation, le choix du paramètre pertinent ; l'observation simultanée du système étudié et du système témoin ou l'observation de l'évolution du système ; le jugement, après observation, sur la qualité de l'observation.

La qualité de l'observation est liée au savoir-faire technique : seul un savoir-faire performant peut produire les conditions optimales de l'observation, pour une évaluation fine de la différence de caractères morphologiques de drosophiles ou de clones bactériens (contaminants ou non), d'un changement de couleur, de la netteté d'une image. Par exemple, en optique, la netteté globale d'une image dépend de la qualité du montage (alignement et centrage des éléments) ; un étudiant qui modifie la position des éléments sur le banc améliore la netteté de l'image, mais si le montage n'est pas centré, cette netteté ne sera que partielle. Les étudiants sont donc amenés à gérer l'interactivité qui existe entre la qualité de l'observation et la maîtrise du savoir-faire.

Le schéma 1 présente, pour les trois disciplines, les relations que nous avons mises en évidence entre les éléments du mesurage. Pour ne pas alourdir la présentation de ce schéma (et des schémas suivants), l'élément «protocole expérimental et appareillage» sera systématiquement noté «PEA».

BIOLOGIE		Mesures ↔ PEA
CHIMIE	Dosages : loi de conservation de la masse →	Mesures ↔ PEA
	cinétique :	Mesures ↔ PEA
PHYSIQUE	Lois, modèles →	Mesures ↔ PEA

Schéma 1 : Relations entre les éléments du mesurage au cours de l'étape de réalisation des mesures

Les éléments sont reliés par des flèches à sens unique ou à double sens : le sens de la flèche indique l'élément éventuellement remis en question au cours de la mise en relation. Par exemple, en chimie des dosages, l'utilisation de la loi de conservation de la masse permet de choisir le protocole et l'appareillage avant la manipulation, et/ou d'en justifier la mise

en oeuvre après celle-ci (d'où la flèche à sens unique entre l'élément loi et l'élément protocole expérimental et appareillage).

Nous constatons sur ce schéma que, pour tous les TP proposés ici, une double flèche relie l'élément mesures à l'élément protocole expérimental et appareillage. Il y a donc ici une remise en question des deux éléments mis en relation. Ceci traduit la possibilité d'allers et retours entre ces deux éléments, ces allers et retours étant guidés par le jugement critique porté sur chacun d'eux. Nous constatons que, pour la chimie des dosages et pour tous les exemples de la physique, un modèle ou une loi interviennent dans le choix ou la remise en cause des conditions de l'expérimentation.

3.3. Gestion des mesures

Nous parlons de gestion des mesures quand il y a plusieurs mesures d'une même grandeur.

Tout expérimentateur sait que, pour éviter les difficultés d'estimation des incertitudes liées à une mesure unique, pour augmenter la précision du résultat et pour contrôler l'absence d'erreur importante de calcul ou de manipulation, il est souhaitable de faire plusieurs mesures.

Nous allons montrer comment, dans les TP de DEUG proposés à Orsay, l'étudiant est conduit, d'une part, à réfléchir sur le nombre de mesures à effectuer et, d'autre part, à apprendre à gérer l'ensemble de ces mesures. Cette réflexion est à relier à la prise en compte des contraintes de l'expérience. La gestion consiste en l'observation et le traitement de la dispersion des mesures, ce qui permet de déterminer la valeur à retenir pour la grandeur étudiée.

Qu'en est-il dans la pratique pour les trois disciplines ?

Précisons que les étudiants sont groupés par deux et que de sept à douze binômes travaillent sur le même sujet.

3.3.1. En biologie

En génétique, les étudiants effectuent des classements et des comptages sur plusieurs échantillons d'une population de drosophiles issues d'un même croisement (individus de deuxième génération). Étant donné que le protocole expérimental est délicat à mettre en oeuvre pour des étudiants débutants et afin qu'ils ne passent pas trop de temps au comptage, les enseignants leur indiquent une taille d'échantillon qui tient compte des contraintes ; cette taille d'échantillon doit, en particulier, être suffisante pour permettre l'interprétation des résultats. En effet, à un effectif de taille trop

faible, correspondraient des fluctuations aléatoires très grandes et cet effectif ne serait pas représentatif de la population étudiée ; on aurait donc, dans ce cas, une perte d'information génétique. Les étudiants analysent de quatre à six échantillons d'une vingtaine d'individus chacun (taille d'échantillon conseillée) ; les résultats sont cumulés, puis exploités grâce à l'outil statistique (voir paragraphe 3.4.)

En TP de microbiologie, chaque binôme étudie la croissance bactérienne dans un milieu de culture donné et réalise une seule mesure de turbidité à différents instants de la croissance (la répétition des mesures entraînerait la consommation d'une trop grande quantité de milieu stérile).

Parallèlement, pour déterminer la concentration en bactéries vivantes, chaque binôme dispose des résultats de quatre dénombrements. En effet, étant donné que la dilution «adéquate» (entre 60 et 100 colonies par boîte) n'est définie qu'approximativement, elle est encadrée par deux autres dilutions s'en approchant – les dilutions sont indiquées par l'enseignant–. Deux dénombrements sont effectués à partir de la dilution «adéquate» et un seul pour chacune des dilutions l'encadrant. La répétition du dénombrement à partir de la dilution «adéquate» permet de tenir compte de la variation aléatoire du nombre de bactéries dans des échantillons de même volume. En raison des contraintes matérielles, cette répétition n'est pas réalisée pour les autres dilutions. Les étudiants ont à juger la cohérence des résultats obtenus pour ces quatre dénombrements (proportionnalité entre les dilutions et les dénombrements) et à décider de garder ou non ces résultats pour en faire la moyenne. En cas d'incohérence des résultats, les étudiants ne peuvent recommencer, car il faut vingt-quatre heures pour qu'une bactérie étalée donne un clone bactérien visible à l'oeil nu. Ils réfléchissent alors sur les conditions de leur mesurage : l'incohérence des résultats entraîne la critique sur les savoir-faire techniques et le protocole utilisés, et éventuellement le rejet de certains dénombrements.

En génétique et en microbiologie, la relation entre les éléments du mesurage se fait donc au cours de cette étape de gestion des mesures, entre l'élément mesures et l'élément protocole et appareillage.

3.3.2. En chimie

En TP de chimie de DEUG, il existe de nombreuses causes expérimentales pouvant conduire à de mauvaises mesures par manque de savoir-faire et il existe des contraintes de temps telles qu'on ne peut envisager de répéter plus de trois ou quatre fois un dosage. L'estimation classique de l'incertitude permet de délimiter un intervalle «raisonnable» de différence entre deux mesures. Si cette différence est supérieure à l'incertitude,

on considère qu'il y a probablement une erreur de manipulation et on recommence le dosage.

Dans l'exemple du dosage de l'acide éthanoïque par l'hydroxyde de sodium, les étudiants, au cours d'un premier essai, notent le changement de couleur de la solution pour un volume V_1 d'hydroxyde de sodium, déterminé classiquement à ΔV_1 près. Ils font un deuxième essai et notent V_2 et ΔV_2 . En général, les valeurs de V_1 et V_2 ne sont pas rigoureusement égales et les essais peuvent ne pas être concordants, c'est-à-dire qu'une des valeurs peut ne pas être incluse dans l'intervalle d'incertitude obtenu pour l'autre valeur. Un troisième essai est alors effectué, et éventuellement un quatrième, jusqu'à ce que les résultats concordent, c'est-à-dire que l'écart entre les valeurs mesurées soit inférieur à l'incertitude estimée. Les essais pour lesquels les résultats concordent sont alors conservés, et le volume retenu est obtenu en prenant la moyenne des résultats concordants. Au cours de cette étape, chaque binôme d'étudiants juge la cohérence interne de ses résultats.

De plus, une étude de la dispersion des résultats de tous les étudiants en permet une analyse globale : vérification que la plupart des résultats ne diffèrent entre eux que d'une valeur inférieure à l'incertitude classique, détermination de la valeur à retenir parce que la plus probable, remise en cause des résultats jugés trop éloignés de la valeur la plus probable. Au cours de cette étape, chaque binôme d'étudiants juge la cohérence entre ses résultats et ceux des autres étudiants de son groupe.

On peut ainsi conclure que, comme pour la biologie, de nombreuses contraintes interviennent pour limiter le nombre de mesures : temps nécessaire pour effectuer le dosage, nombre important d'opérations délicates à contrôler. La répétition des mesures par un binôme d'étudiants est donc arrêtée quand les résultats concordent. Par contre, pour décider de la valeur à retenir, les résultats de l'ensemble des binômes sont regroupés et une valeur unique est extraite de leur comparaison.

Cependant, dans la manipulation de DEUG concernant la détermination d'une constante de cinétique, chaque binôme d'étudiants a le temps de calculer plusieurs valeurs (au moins 4) de cette constante. Le traitement des résultats est alors effectué en utilisant l'outil statistique sur les résultats d'un binôme et sur les résultats du groupe, d'une façon similaire à celle décrite ci-dessous pour la physique.

Pour mettre à profit la grande similarité de la gestion de l'ensemble des mesures entre les exemples proposés pour la chimie et la physique, nous traitons la mise en relation des éléments du mesurage à la fin du paragraphe suivant.

3.3.3. En physique

Couramment, les étudiants effectuent une mesure, recherchent toutes les causes d'incertitude et estiment cette incertitude, afin de juger de la précision de leurs mesures (incertitudes de lecture, d'étalonnage, dues à la méthode utilisée, à l'expérimentateur ou à l'appareil). On peut donc, et c'est souvent le cas, se contenter de faire une seule mesure.

Cependant, pour les TP de DEUG, les problèmes de la durée et/ou du coût de la répétition des expériences se posent en physique de façon beaucoup moins cruciale qu'en biologie et en chimie : au cours de séances de durée raisonnable, on peut faire de 5 à 10 mesures de distance focale, de même que des mesures d'indice de réfraction, de résistances, de longueurs d'onde, car les grandeurs nécessaires à ces déterminations sont obtenues rapidement.

Pour utiliser la possibilité de multiplier les mesures indépendantes d'une même grandeur, une innovation a été mise en place récemment (Séré et al., 1993 ; Séré & Journeaux, 1995). Elle concerne, en particulier, les déterminations de distances focales et d'indice de réfraction. Cette innovation est basée sur le fait que tout résultat de mesure est porteur d'information et que l'échantillon constitué par l'ensemble des mesures suit une distribution se rapprochant de la distribution de Gauss (normale) si le nombre de mesures est suffisamment grand. Augmenter le nombre de mesures constitue un apport d'informations supplémentaires et permet d'accroître la précision du résultat en diminuant l'intervalle de confiance pour un taux de confiance donné. On doit, par conséquent, conserver tous les résultats, et la dispersion de ces résultats permet, en appliquant les lois de la statistique, de déterminer par le calcul la valeur qui représente au mieux l'ensemble des résultats.

Ainsi, en ce qui concerne les exemples en optique, deux pratiques sont utilisées : soit une seule mesure est effectuée et le calcul d'incertitude qui prend en compte toutes les causes d'erreur possibles est mené pour permettre l'appréciation du résultat du mesurage ; soit, pour contourner les difficultés de recherche et d'estimation des incertitudes et améliorer la précision du résultat, plusieurs mesures sont effectuées et un calcul statistique est mené. Dans les deux cas, toute mesure dont le résultat n'est pas visiblement aberrant est exploitée.

Dans le cas où plusieurs mesures sont effectuées, les étudiants, dans une première étape, calculent l'intervalle de confiance pour un taux de confiance donné ainsi que l'écart-type ; dans une deuxième étape, grâce à un logiciel de traitement de données, ils cumulent leurs résultats et ceux des autres étudiants sur un histogramme visualisé sur l'écran d'un ordinateur. Il s'agit donc, pour eux, de savoir utiliser un outil de traitement statistique de données, et de mettre en relation des grandeurs mathématiques et leur

signification physique. Les étudiants peuvent juger ensuite la qualité des résultats : dans une première étape, ils jugent la cohérence interne de leurs propres résultats ; dans une deuxième étape, celle de leurs résultats avec ceux de l'ensemble du groupe : ceci se fait en comparant l'écart-type obtenu pour les valeurs du groupe entier à la différence entre leur valeur moyenne et la valeur la plus probable. Ils peuvent enfin juger la qualité de la valeur finale retenue pour l'ensemble du groupe.

Examinons, en ce qui concerne la chimie et la physique, les relations entre les éléments du mesurage, apparaissant au cours de cette étape de gestion de l'ensemble des mesures. Quand une seule mesure est effectuée, les étudiants font un calcul d'incertitude et pour cela, portent un regard critique à la fois sur le protocole expérimental et l'appareillage employés, et sur le résultat obtenu, ce qui suppose à nouveau, comme au paragraphe 3.2., des allers et retours entre ces deux éléments du mesurage. Quand plusieurs mesures sont effectuées et un traitement statistique mis en oeuvre, les étudiants apprécient la cohérence interne de leurs résultats et la cohérence de ceux-ci avec les résultats des autres étudiants du groupe, ce qui les amène à porter un jugement sur le protocole et l'appareillage utilisés.

Au cours de l'étape de gestion de l'ensemble des mesures, les relations entre les éléments du mesurage peuvent être représentées par le schéma 2 ci-dessous pour les trois disciplines.

BIOLOGIE	PEA \longleftrightarrow mesures
CHIMIE	PEA \longleftrightarrow mesures
PHYSIQUE	PEA \longleftrightarrow mesures

Schéma 2 : Relations entre les éléments du mesurage au cours de l'étape de gestion des mesures

Nous constatons sur ce schéma que, comme sur le schéma 1 correspondant à la réalisation des mesures, une double flèche relie l'élément mesures à l'élément protocole expérimental et appareillage (PEA), pour les trois disciplines. Le jugement critique porté sur les mesures entraîne un jugement sur le protocole et l'appareillage, et un jugement sur le protocole et l'appareillage ne se fait que par l'intermédiaire des mesures. Il faut remarquer cependant qu'en biologie, à cause des contraintes techniques, la remise en question de l'un ou l'autre des éléments ne se fait qu'à l'aide d'un guidage important de l'enseignant.

À la différence du schéma 1, nous constatons en chimie et en physique, l'absence de l'élément lois et modèles. Ceci traduit le fait que, au cours de cette étape de gestion d'un ensemble de mesures répétées dans les trois disciplines, ce sont surtout les savoir-faire techniques qui sont en jeu.

3.4. Exploitation et interprétation des résultats

3.4.1. En biologie

En génétique, les étudiants choisissent, en fonction des résultats d'observation de drosophiles d'une première génération, une hypothèse issue des lois de la génétique. Ils exploitent alors les résultats de dénombrements de drosophiles de deuxième génération dans le cadre de cette hypothèse. Pour cela, ils comparent leurs dénombrements aux effectifs attendus. L'hypothèse est validée ou rejetée grâce au test statistique du Chi-deux, avec un taux de risque de 5 %. Dans le cas où l'hypothèse est rejetée, les mêmes résultats servent à en tester une autre.

En microbiologie, l'analyse de la dispersion des mesures de turbidité par rapport à la courbe attendue (sigmoïde) permet un jugement sur la qualité de l'expérimentation. Cette analyse est effectuée en fin de cinétique ; ce n'est qu'ensuite, que les valeurs aberrantes sont repérées et éliminées après une discussion sur les causes possibles des écarts observés (comme par exemple des mesures sur une culture mal homogénéisée). Une relation peut se faire entre l'élément mesures et l'élément protocole et appareillage, par l'intermédiaire de la courbe attendue. Les étudiants exploitent les mesures de turbidité grâce à l'utilisation de la loi de cinétique du premier ordre : $\ln N = \mu t + \ln N_0$ (N = concentration de bactéries vivantes et mortes, $N_0 = N$ à $t = 0$, t = temps, μ = taux de croissance bactérien). L'exploitation des résultats de mesures en coordonnées semi-logarithmiques permet de déterminer graphiquement, dans la phase exponentielle de la croissance, le temps de génération (temps de doublement de la population). En parallèle, les résultats des dénombrements permettent de déterminer la concentration n , par ml, de bactéries vivantes. Celle-ci est calculée en moyennant les concentrations n_i obtenues pour chaque dilution à partir de la formule suivante : $n_i = x_i (1/d) \cdot (1/v)$ où x_i est la moyenne des dénombrements pour la i ème dilution ; d est la dilution (en puissances négatives de 10) ; v est le volume de la culture étalé (en ml). Chaque binôme compare, dans différentes conditions de milieu, les caractéristiques analysées (les différentes phases et leur durée, le temps de génération, la concentration de bactéries vivantes). Les élèves en déduisent l'effet de la composition du milieu sur ces caractéristiques et interprètent leurs résultats grâce aux connaissances acquises en cours.

Lors de l'étape d'exploitation des résultats de mesure, les relations entre les éléments sont les suivantes : en ce qui concerne la génétique, une relation à sens unique de l'élément «mesures» vers l'élément «hypothèse» ; en ce qui concerne la turbidité, une relation entre l'élément «loi» (courbe attendue, loi de cinétique du premier ordre), avec une flèche à sens unique vers les mesures ; cette remise en cause des résultats de mesures implique

celle du protocole et de l'appareillage utilisés. En ce qui concerne les dénombrements, l'interprétation utilise une relation mathématique indépendante des éléments du mesurage.

3.4.2. En chimie

En chimie des dosages, on utilise (à partir de la loi de conservation de la masse) la relation permettant de déterminer la concentration C_i d'une solution d'acide éthanoïque dans le vinaigre, soit $C_i = C_0 V_0 / V_i$ (voir paragraphe 3.1.2.) Les étudiants comparent l'écart entre la valeur obtenue et une valeur de référence, et discutent cet écart par rapport à l'incertitude estimée (voir paragraphe 3.3.)

En spectrophotométrie d'absorption, les étudiants déterminent la longueur d'onde correspondant à l'absorbance maximale du colorant en exploitant la courbe donnant l'absorbance en fonction de la longueur d'onde pour une concentration connue (voir paragraphe 3.1.2.) ; ils utilisent ensuite la loi de Beer-Lambert $A = \varepsilon l C$, pour déterminer ε par la mesure de l'absorbance. Les mesures de l'absorbance en fonction de la concentration permettent de tracer la droite $A = g(C)$: les étudiants valident la gamme-étalon par comparaison entre les absorbances mesurées et celles attendues théoriquement, puis déterminent graphiquement, à partir de la valeur de la pente, le coefficient d'extinction molaire ε de la substance colorée étudiée. Cette valeur, comparée à celle tabulée, leur permet d'apprécier la qualité de cette mesure. La loi de Beer-Lambert, exploitée à travers la droite d'étalonnage, permet une détermination graphique de la concentration inconnue de l'échantillon de colorant à partir de la mesure de son absorbance. Cette concentration est comparée à la valeur de référence, fournie par des tables, le fabricant ou l'enseignant, et l'écart est discuté en référence à l'incertitude expérimentale.

Dans le cas de l'étude de cinétiques de réactions, les mesures d'absorbance en fonction du temps permettent de choisir entre plusieurs lois de cinétique. Les étudiants confrontent les résultats de leurs mesures aux différentes lois de cinétique et tranchent en faveur de l'une d'elles. Ce choix fixe l'ordre de la réaction, puis l'exploitation graphique des mesures à travers la loi retenue permet de calculer la constante de cinétique. Si la dispersion des points est telle qu'elle empêche un choix clair, les étudiants sont amenés à remettre en cause à la fois les mesures effectuées et le protocole et l'appareillage utilisés.

Les relations entre les éléments du mesurage au cours de cette étape d'exploitation des résultats sont les suivantes : pour les dosages, une relation apparaît entre la loi de conservation de la masse et les mesures mais sans qu'on puisse relier ces deux éléments par une flèche à sens unique ou

à double sens puisque aucun des deux éléments n'est remis en question. Il en est de même quand, en absorptiométrie, la loi de Beer-Lambert est utilisée pour déterminer ε d'un colorant de concentration connue. Par contre, quand la courbe d'étalonnage est utilisée pour déterminer ε et la concentration, la relation entre la loi de Beer-Lambert et les mesures implique une éventuelle remise en question des mesures et donc une flèche à sens unique vers cet élément. En ce qui concerne la cinétique, une relation à double sens s'établit entre les lois et les mesures.

3.4.3. En physique

En ce qui concerne la physique, chacun peut constater l'importance des entités abstraites et théoriques : dans le cadre de théories acceptées, les scientifiques ont construit des modèles et établi des lois. Les étudiants ne peuvent exploiter et interpréter leurs résultats expérimentaux que par l'intermédiaire de ces lois et modèles. Ils doivent comprendre que *«une expérience de physique est l'observation précise d'un groupe de phénomènes accompagnée de l'interprétation de ces phénomènes ; cette interprétation substitue aux données concrètes réellement recueillies par l'observation des représentations abstraites et symboliques qui leur correspondent en vertu des théories admises par l'observateur»* (Duhem, 1989, pp. 221-222). Il est ainsi nécessaire que les étudiants établissent le rapport entre d'une part, les phénomènes constatés et traduits par les grandeurs mesurées, et, d'autre part, les grandeurs inconnues qui rendent compte de ces phénomènes. Ils accèdent à ces grandeurs par l'intermédiaire d'un modèle. Par exemple, pour déterminer la direction de polarisation d'une onde électromagnétique, les étudiants analysent la variation du signal aux bornes d'une antenne linéaire recevant cette onde, variation qui dépend de la direction de cette antenne (voir paragraphe 3.2.3.) En s'appuyant sur un modèle et des lois utilisés en électromagnétisme, cette analyse permet de conclure sur la direction de polarisation ; il faut donc que les étudiants connaissent ce modèle et ces lois pour savoir relier la variation du signal observé et la direction du champ électrique.

Dans le cadre du modèle de l'optique géométrique, on établit la formule permettant de déterminer la distance focale f' d'une lentille par la méthode de Bessel, soit $f' = (D^2 - a^2) / 4D$ (D est la distance entre l'objet et l'écran, a est celle entre les deux positions de la lentille pour lesquelles l'image est nette sur l'écran). L'exploitation des résultats de mesures à travers cette relation permet aux étudiants de déterminer la distance focale. Les étudiants comparent l'écart entre la valeur obtenue et une valeur de référence donnée par le fabricant ou l'enseignant, et discutent cet écart par rapport à l'incertitude estimée (voir paragraphe 3.3.)

Pour déterminer l'indice de réfraction n du plexiglas, les étudiants utilisent la loi de Descartes $\sin i = n \sin r$. Cette loi entre à la fois dans la théorie de l'électromagnétisme et dans le modèle de l'optique géométrique. Les étudiants comparent les résultats des mesures à ceux attendus dans le cadre de la loi ; l'étude de la dispersion des points expérimentaux conduit à une éventuelle remise en cause des résultats des mesures. Une détermination graphique de l'indice (n) est alors effectuée par le calcul de la pente de la droite. La valeur obtenue est comparée à une valeur de référence, ce qui permet aux étudiants d'apprécier les qualités de la mesure (précision et exactitude).

En électromagnétisme, les connaissances théoriques nécessaires sont les suivantes : structure de l'onde plane progressive, de l'onde stationnaire et de l'onde guidée, phénomène de diffraction à l'infini par des diaphragmes rectangulaires. Pour déterminer la longueur d'onde d'une onde électromagnétique (centimétrique), les abscisses x_{N_n} des noeuds et x_{V_n} des ventres de l'onde stationnaire (n est le numéro du ventre ou du noeud mesuré) conduisent au calcul de λ : $\lambda = 2 (x_{N_n} - x_{N_{n-1}})$ ou $\lambda = 2 (x_{V_n} - x_{V_{n-1}})$.

La direction de polarisation d'une onde plane progressive électromagnétique est déterminée par l'intermédiaire d'une antenne linéaire (voir paragraphe 3.2).

La loi de Fraunhofer permet d'étudier la diffraction d'une onde électromagnétique lumineuse par un diaphragme constitué d'une fente étroite (sa largeur l vaut quelques dizaines de micromètres). Cette loi $I(\theta)$ fournit l'intensité diffractée dans la direction d'observation θ , repérée à partir de la direction de propagation de l'onde arrivant sur le diaphragme :

$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(\Phi/2)}{(\Phi/2)} \right)^2$ avec $\Phi = \pi l \sin\theta / \lambda$, où λ est la longueur d'onde et I_0 l'intensité maximum correspondant à $\theta = 0$. Les minima de la courbe $I(\theta)$ correspondent à des directions d'observation telles que $\sin\theta = n\lambda/l$. Les étudiants repèrent sur l'enregistrement de la courbe $I(\theta)$ les valeurs de θ correspondant à ces minima et en déduisent l .

En ce qui concerne les TP décrits, les modèles et les lois sont imposés ; la comparaison, entre les résultats des mesures et ceux attendus dans le cadre des lois, permet de discuter le domaine d'utilisation des lois et la qualité des mesures. La nécessité de fournir un jugement argumenté sur la qualité des résultats de mesure devrait inciter les étudiants à résister à la tentation d'«arranger» leurs résultats. L'éventuelle non-concordance entre leurs résultats et ceux prévus doit être considérée comme révélatrice d'un mesurage mal conduit ou d'un incident technique. Cette remarque s'applique aussi en chimie.

Ainsi, au cours de cette étape d'exploitation et d'interprétation, il existe en physique une relation entre une loi (ou une relation tirée d'une loi) et les

résultats de mesure. Dans certains cas, pour la détermination de l'indice de réfraction et pour l'étude de la diffraction, la relation entre les lois et les mesures suppose une remise en question éventuelle des mesures. Dans d'autres cas, par exemple pour la détermination de la distance focale et de la polarisation, cette relation est une simple application de la loi sans remise en question des mesures.

En conclusion du paragraphe 3.4., le schéma 3 présente, pour les trois disciplines, les relations mises en évidence au cours de cette étape d'exploitation des mesures. Nous illustrons la relation entre deux éléments du mesurage sans remise en cause de ceux-ci par un trait sans flèche : —.

BIOLOGIE	génétique	loi ←— mesures ↔ PEA
	microbiologie	loi —→ mesures ↔ PEA
CHIMIE	Dosages	loi —— mesures ↔ PEA
	Absorptiométrie	loi —— mesures ↔ PEA
		ou loi —→ mesures ↔ PEA
	cinétique	loi ↔— mesures ↔ PEA
PHYSIQUE		
	Polarisation	
	Longueur d'onde	loi —— mesures ↔ PEA
	Distance focale	
	Indice de réfraction	
	Diffraction	loi —→ mesures ↔ PEA

Schéma 3 : Relations entre les éléments du mesurage au cours de l'étape d'exploitation et d'interprétation des résultats

Dans les cas de la génétique et de la cinétique chimique, la flèche orientée vers l'élément loi indique que les étudiants doivent choisir une loi parmi plusieurs possibles : ce choix passe éventuellement par un rejet préalable des lois testées qui ne conviennent pas pour les faits expérimentaux analysés, mais ne passe pas par une remise en cause de ces lois.

Pour ne pas alourdir ce schéma, nous n'avons pas fait figurer ici la remise en cause éventuelle des résultats de mesures (et donc du protocole et de l'appareillage associés), par l'intermédiaire des valeurs de référence. Cette relation est présentée plus loin sur le schéma 4 de synthèse. Les valeurs de référence sont très souvent disponibles auprès des enseignants en chimie (concentration, coefficient d'extinction molaire, constante de cinétique) et en physique (distance focale, indice de réfraction, longueur d'onde, direction de polarisation, dimensions des objets diffractants). En ce qui concerne la biologie, l'objectif principal n'est pas de rechercher la

meilleure qualité possible des mesures, en termes de précision et d'exactitude, mais d'obtenir un accord jugé suffisant entre les valeurs mesurées et celles attendues dans le cadre d'une hypothèse ou d'une loi.

4. SYNTHÈSE DES RELATIONS ENTRE LES ÉLÉMENTS DU MESURAGE

Le schéma 4 présente les relations, telles que nous les avons analysées, entre les éléments du mesurage au cours des différentes étapes. Rappelons que l'étape 1 est celle de la réalisation des mesures, l'étape 2 celle de la gestion de l'ensemble des mesures, et l'étape 3 celle de l'exploitation des mesures et de l'interprétation des résultats.

mesures	BIOLOGIE	CHIMIE	PHYSIQUE
réalisation	mesures ↔ PEA	mesures ↔ PEA Loi → mesures ↔ PEA	Loi → mesures ↔ PEA
gestion	mesures ↔ PEA	mesures ↔ PEA	mesures ↔ PEA
exploita tion	Loi ← mesures ↔ PEA Loi → mesures ↔ PEA	Loi — mesures ↔ PEA Loi → mesures ↔ PEA Loi ↔ mesures ↔ PEA Valeur de référence → mesures ↔ PEA	Loi — mesures ↔ PEA Loi → mesures ↔ PEA Valeur de référence → mesures ↔ PEA

Schéma 4 : Relations entre les éléments du mesurage au cours des trois étapes

Ce schéma fait apparaître, pour ces TP, dans les trois disciplines et pour les trois étapes, une double flèche entre l'élément «mesures» et l'élément «protocole expérimental/appareillage». Rappelons la signification de cette double flèche : dans le sens protocole expérimental et appareillage vers mesures, elle signifie, pour l'étudiant, la remise en cause éventuelle de ses mesures après un jugement sur celles-ci et donc sur son savoir-faire technique (voir paragraphe 3.2.) ; dans le sens mesures vers protocole expérimental et appareillage, elle signifie la remise en cause éventuelle du protocole et de l'appareillage utilisés, après un jugement argumenté sur les performances de ceux-ci, en lien avec le savoir-faire technique (voir paragraphe 3.3.)

Dans les trois disciplines, quelle que soit l'étape, les mesures ne remettent pas en cause les lois ; en génétique et en cinétique chimique, il y a un choix à effectuer entre plusieurs hypothèses ou lois, mais sans remise

en cause de celles-ci. La mise en relation des mesures, avec les lois et avec les valeurs de référence, devrait permettre à l'étudiant de situer son savoir-faire technique et les performances de l'appareillage.

Les résultats obtenus ici mettent en lumière une intention didactique possible pour l'enseignement expérimental, celle «*d'apprendre un art que les scientifiques et les technologues ont développé d'une manière spécifique : celui de la négociation*» (Fourez, 1994, pp. 65-66). En effet, dans le schéma 4, cette négociation est traduite par la présence de flèches simples ou doubles : l'étudiant qui remet en cause un ou plusieurs éléments du mesurage cherche un compromis entre l'«économie manipulateur» (temps, produits et matériel utilisés, etc.) et la qualité du résultat.

5. SAVOIRS ET COMPÉTENCES EN JEU

5.1. Au cours de la mise en relation du PEA avec les mesures

Nous avons montré comment l'étudiant, dans les trois disciplines, est amené à porter un jugement sur la cohérence interne de ses résultats et à apprécier les performances de l'appareillage et du protocole utilisés (PEA), ainsi que son savoir-faire technique (paragraphes 3.2. et 3.3.) Dans les trois disciplines, l'étudiant peut ainsi prendre conscience qu'il existe une relation entre les performances d'un protocole et/ou d'un appareillage et la qualité des mesures. Ceci lui permet de porter un **jugement global sur les performances d'un appareillage et sur ses propres capacités à l'utiliser** ; ce jugement peut conduire à une remise en cause du protocole, de l'appareillage et de l'utilisation qui en est faite.

5.2. Au cours de la mise en relation du PEA et des mesures avec les lois et modèles

En physique, pour les TP décrits ici, le modèle théorique et les lois permettant l'exploitation des résultats sont imposés. Les étudiants doivent donc **les connaître**. Ils doivent mettre en oeuvre leurs **capacités d'observation** et leur **savoir-faire technique** pour **vérifier** les conditions d'adéquation de l'appareillage et du protocole expérimental au modèle de référence.

En chimie des dosages, pour **prévoir** les quantités de produits, la dilution et/ou l'indicateur adéquats, les étudiants doivent utiliser la loi de conservation de la matière. Ceci leur permet de **justifier le choix** du protocole et du matériel adaptés au dosage.

Ainsi, dans les deux disciplines, les étudiants doivent mettre en oeuvre leur **savoir-faire technique** et **connaître les lois et modèles** ; cela leur permet de remettre en cause éventuellement le protocole utilisé ; ils sont ainsi amenés à **porter un jugement fondé** sur le protocole expérimental et l'appareillage choisis.

Au cours de l'exploitation des résultats, les étudiants confrontent les résultats des mesures à des valeurs prévues par les lois. Ils comparent les écarts obtenus aux incertitudes sur les valeurs mesurées (qui dépendent du protocole expérimental). Pour comparer ces écarts, ils **mettent en oeuvre un calcul d'incertitude** ou **utilisent l'outil statistique**. Cet outil sert à quantifier la dispersion des résultats expérimentaux et à en estimer la précision. Ils **analysent** ensuite de façon critique la différence entre les écarts et les incertitudes. Dans le cas de la génétique, **l'outil statistique** sert à exploiter les résultats des dénombrements par comparaison avec les valeurs attendues dans le cadre d'une hypothèse (voir paragraphe 3.4.)

Dans les pratiques que nous avons décrites, un désaccord entre les résultats observés et les résultats attendus dans le cadre d'une loi ou d'un modèle ne remet pas en cause cette loi, ce dont les étudiants sont conscients. C'est seulement grâce à la **connaissance préalable de la loi** que l'accord résultats de mesure/modèle peut être discuté. Prenons comme exemples la loi de Descartes en physique, la loi de Beer-Lambert en chimie des dosages, la loi de cinétique du premier ordre en microbiologie. Les étudiants exploitent les résultats expérimentaux à l'aide de ces lois et modèles dont ils ont validé le domaine d'utilisation. Ils sont ainsi amenés à **porter un jugement** sur la qualité des mesures, qualité qui dépend du savoir-faire de l'expérimentateur et du protocole utilisé.

5.3. Au cours de la mise en relation du PEA et des mesures avec les valeurs de référence

En chimie et en physique, quand les étudiants comparent les résultats de leurs mesures aux valeurs de référence (fournies par un fabricant ou par l'enseignant), les écarts sont analysés de la même façon que ci-dessus (paragraphe 5.2.) : ces écarts sont comparés aux incertitudes sur les valeurs mesurées. Les étudiants sont amenés à **mettre en oeuvre un calcul d'incertitude** ou à **utiliser l'outil statistique**. Ils **analysent** ensuite de façon critique la différence entre les écarts et les incertitudes sur les valeurs mesurées et **portent un jugement** sur la qualité des mesures.

Dans notre description des pratiques, nous avons largement montré l'importance accordée à l'acquisition d'un **savoir-faire technique**. En effet, à chaque remise en cause d'un élément du mesurage, ce savoir-faire

intervient. Nous avons montré également que cette acquisition est indissociable de celle d'un **jugement fondé** sur la qualité du mesurage effectué. Ce jugement exige la mise en oeuvre de critères, ce qui conduit à des activités intellectuelles spécifiques liées à des capacités à développer au même titre que les habiletés manipulatoires. Ces capacités apparaissent au cours de l'analyse précédente : analyser des causes d'incertitude et quantifier ces incertitudes, prévoir, justifier un choix, analyser de façon critique des différences, apprécier l'adéquation des conditions expérimentales à un modèle.

6. CONCLUSION

À partir des activités proposées aux étudiants pour des TP «classiques» de DEUG, en biologie, chimie et physique à Orsay, l'analyse des mises en relation des éléments du mesurage a conduit à proposer une lecture particulière de l'ensemble des activités expérimentales. Celle-ci permet de considérer cet ensemble comme une gestion complexe et non linéaire des éléments du mesurage. Malgré les objets d'étude offerts aux étudiants et les techniques, différents dans les trois disciplines, il apparaît que la même interprétation peut être utilisée.

En décrivant les activités proposées au cours de ces TP, nous montrons que la gestion des éléments du mesurage est liée à la mise en oeuvre de savoirs et de compétences d'ordre à la fois pratique et intellectuel. La prise en compte des relations entre les éléments du mesurage, telle que nous la décrivons, permet de considérer les TP comme un ensemble interactif d'activités manuelles et intellectuelles. Un enseignement expérimental, utilisant au maximum les mises en relation entre les éléments du mesurage, pourrait ainsi être un cadre formateur à l'apprentissage de la démarche expérimentale, en guidant l'étudiant à la fois dans l'acquisition de savoir-faire techniques et dans la formation de son jugement et de son argumentation.

Notre étude pluridisciplinaire permet de préciser le sens que peuvent prendre les activités de mesurage proposées par les enseignants, en rapport avec un contexte, des choix et une finalité, éventuellement différents selon les disciplines. Cette prise de sens nécessite alors, de la part des étudiants, l'exercice d'un jugement argumenté sur les résultats du mesurage à chaque étape de celui-ci. Les spécificités disciplinaires mises en évidence portent en particulier sur les critères utilisés lors de l'exercice de ce jugement.

Notre travail sera prolongé en analysant dans quelle mesure une telle interprétation des activités expérimentales est utilisée par les enseignants

sur le terrain. L'étude des activités réelles des étudiants et de leurs productions écrites devrait permettre de valider cette interprétation. L'évaluation du travail de l'étudiant porterait alors, non seulement sur le résultat obtenu, mais également sur la qualité du travail expérimental effectué. En effet, un étudiant placé dans ce contexte devrait produire des comptes rendus témoignant de sa capacité à porter un jugement sur la qualité des résultats qu'il a obtenus. Ceci devrait permettre d'échapper à une évaluation réductrice souvent déplorée : « dans de nombreuses universités, les compétences pratiques sont évaluées seulement à partir des résultats fournis (comptes rendus) et sans aucun regard sur la qualité du travail expérimental. » (Meester & Maskill, 1995, p. 713).

BIBLIOGRAPHIE

- DE KETELE J.-M. & ROEGIERS X. (1993). *Méthodologie du recueil d'informations*. Bruxelles, De Boeck.
- DUHEM P. (1989). *La théorie physique, son objet, sa structure*. Paris, Vrin.
- FONDÈRE F. & SÉRÉ M.-G. (1997). An innovative sequence of laboratory work to teach data processing. À paraître dans *Ensenanza de las Ciencias*, vol. 15, n° 3, pp. 423-429.
- FOUREZ G. (1992). *La construction des sciences*. Bruxelles, De Boeck.
- FOUREZ G. (1994). *Alphabétisation scientifique et technique*. Bruxelles, De Boeck-Wesmael.
- GUILLON A. (1995). Démarches scientifiques en Travaux Pratiques de physique de DEUG à l'Université de Cergy-Pontoise. *Didaskalia*, n° 7, pp.103-116.
- I.S.O., O.I.M.L., I.E.C. & B.I.P.M. (1984). *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie*. International Organization for Standardization.
- MEESTER M.A.M., MASKILL H. & MASKILL R. (1995). First year chemistry practicals at universities in England and Wales : aims and scientific level of the experiments. *International Journal of Science Education*, vol. 17, n° 6, pp.705-719.
- PERNOT C. (1991). Apprentissage et évaluation dans des modules indépendants de chimie expérimentale. *Séminaire international «Evaluation Enseignement Expérimental»*, Pau.
- PERNOT C. (1993). Une gestion de l'apprentissage de la chimie expérimentale en premier cycle universitaire. *Didaskalia*, n° 2, pp. 101-119.
- PINELLI P. & LEFÈVRE R. (1993). «Etudiants-chercheurs» : une proposition en Electrocinétique. *Aster*, n° 17, pp. 65-87.
- RICHARD-MOLARD C. (1996). L'introduction des didacticiels « génétique » dans l'enseignement de Premier Cycle Universitaire : conditions d'utilisation, résultats d'observations et d'enquêtes. *Didaskalia*, n° 8, pp. 159-178.
- 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. et JOURNEAUX R. (1995). Le traitement statistique des mesures en TP de physique de DEUG : une innovation à Orsay. *Didaskalia*, n° 6, pp.165-177.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Claudine Larcher, professeur à l'Institut National de la Recherche Pédagogique à Paris, pour ses conseils judicieux au cours de ce travail.