

# Apprentissage de l'expérimentation en physique

## II – Apprentissage des techniques expérimentales à l'ENS de Cachan

**Mireille TADJEDDINE, Françoise PERROT\***

Département de Physique  
École Normale Supérieure de Cachan  
94235 Cachan cedex, France.

\* Adresse actuelle :  
Université de Cergy Pontoise  
PSBT  
95806 Cergy Pontoise cedex, France.

### **Résumé**

*Après avoir développé le rôle et le contenu de la formation expérimentale proposée aux étudiants dans le cadre de la préparation à l'Agrégation de physique, nous présentons une expérience d'initiation aux techniques expérimentales dès la première année, qui peut constituer un apprentissage par l'expérimentation. Enfin nous abordons l'évaluation de ce genre d'activité, problème qui s'est posé avec la création d'une option «Techniques expérimentales en physique» dans le cadre du magistère de physique de l'université d'Orsay.*

**Mots clés** : physique expérimentale, objectifs, contenus, évaluation, stratégie pédagogique.

### **Abstract**

*After having developed the role and content of the experimental training proposed to students within the framework of preparation for the «Agrégation de physique», we present an introduction to experimental techniques from the first year of training, which may be considered as a form of learning by experimentation. Finally, we discuss the evaluation of this type of activity, being a problem that has arisen as a result of the creation of an option in «Experimental technics in physics», within the «magistère de physique» of the University of Orsay.*

**Key words :** *experimental physics, goal, contents, valuation, pedagogic strategy.*

### **Resumen**

*Después de haber desarrollado el role y el contenido de la formación experimental propuesta a los estudiantes en el marco de la preparación a la Agregación de física, nosotros presentamos una experiencia de iniciación a las técnicas experimentales desde primer año que pueden constituir un aprendizaje por la experimentación. Por último, nosotros abordamos la evaluación de este género de actividad, problema que es propuesto con la creación de una opción «Técnicas experimentales en física» dentro del marco del magister en física de Orsay.*

**Palabras claves :** *física experimental, objetivo, contenido, evaluación, estrategia pedagógica.*

L'École Normale Supérieure de Cachan est l'une des quatre ENS. Les objectifs de ces écoles sont de former des enseignants et/ou des chercheurs. Le recrutement des élèves s'effectue par concours à l'issue de deux (ou trois) années de classes préparatoires, après le baccalauréat de l'enseignement secondaire.

On peut espérer que le concours de recrutement de 1997 sera celui des nouveaux programmes des classes préparatoires et des nouvelles filières : la section physique de l'ENS de Cachan recrutera alors sur la filière Physique-Chimie. Dans l'état actuel des travaux de la commission de réflexion, on peut dire que la démarche expérimentale occupera une place importante dans l'enseignement. Elle sera également prise en compte au niveau des concours dans les épreuves écrites qui pourront comporter, par exemple, des discussions de protocoles expérimentaux, et dans les épreuves orales où les TP (travaux pratiques) seront revalorisés. Avec du temps et des moyens consacrés à l'expérimentation, les élèves pourront alors apprécier cette activité tout en acquérant les savoir-faire expérimentaux indispensables.

Pour le moment, il n'en est rien ; les élèves ont très peu appris dans les TP trop souvent «presse-bouton» ; ils n'en ont rien retenu. Parfois même, des séances de TP ont été remplacées par des séances de travaux

dirigés jugés plus rentables pour la préparation des concours. Les enseignants des classes préparatoires ne sont pas responsables de cette situation : ils doivent faire réussir leurs élèves aux concours, ils ne sont pas chargés de leur faire acquérir une démarche scientifique !

Par contre, l'acquisition d'une démarche scientifique est l'objectif majeur des enseignants d'une École Normale Supérieure dont les débouchés sont la recherche et l'enseignement pré et post baccalauréat. Comme pour les autres départements de l'ENS de Cachan, l'étape importante est la préparation du concours de l'Agrégation qui constitue la troisième année de scolarité pour la plupart des étudiants. Aussi commençons par rappeler rapidement cette scolarité.

## 1. LA SCOLARITÉ DES ÉTUDIANTS DE PHYSIQUE

Au cours des deux premières années, les étudiants suivent les enseignements de second cycle de l'Université d'Orsay dans le cadre du magistère de physique. La plupart des élèves préparent l'Agrégation en troisième année et ils commencent, l'année suivante, leurs études doctorales par la préparation d'un DEA (diplôme d'études approfondies). Dans quelques cas, le DEA est préparé dès la troisième année.

Actuellement, il y a un certain consensus sur ce que doit être la formation des enseignants : les contenus sont d'ordre disciplinaire d'une part et professionnel d'autre part. Dans le domaine disciplinaire, le niveau théorique des futurs professeurs de physique est Bac + 5 (deux années de classes préparatoires, plus deux années universitaires, plus l'année de synthèse que constitue l'année de préparation à l'Agrégation).

La formation professionnelle, quant à elle, est malheureusement beaucoup plus légère, car elle se fait en parallèle sur les deux premières années où l'acquisition des connaissances théoriques occupe l'essentiel de l'emploi du temps. Néanmoins, nous essayons de donner quelques éléments de formation professionnelle à partir de notre discipline et de sensibiliser les élèves aux problèmes de la pédagogie par des stages.

C'est ainsi que nous organisons, en première année, des travaux dirigés (8 heures) sur des problèmes de didactique, à partir des questionnaires élaborés par L. Maurines (1986) sur les phénomènes de propagation et par J.-L. Closset (1983) sur l'électrocinétique. Afin de montrer l'ancrage de la physique sur le réel nous leur proposons des visites ; par exemple, visite du laboratoire scientifique du Louvre et du site de l'Aube où sont stockés les déchets radioactifs de courte durée de vie. D'autre part, les élèves suivent des cours d'histoire des sciences (18 heures) dans les domaines de l'astrophysique, de l'électricité et de l'optique. De plus, ils abordent les

problèmes sociologiques de l'éducation à travers la connaissance de l'institution et de l'organisation scolaire et sont initiés aux techniques audiovisuelles.

Pour les élèves de deuxième année, nous organisons des stages pédagogiques dans des classes de second cycle des lycées classiques ou techniques ; chaque fois que c'est possible, les étudiants font leur stage dans leur lycée d'origine. Ils assurent au minimum deux heures d'enseignement (cours, TP-cours, ou TP) par semaine, d'octobre à mars. Ces stages recueillent, chaque année, l'approbation des élèves et de leurs conseillers pédagogiques comme le montre la réunion de bilan à la fin du stage.

Enfin, nous invitons des conférenciers sur des thèmes actuels de recherche (physique et didactique de la physique).

Pour clore ce paragraphe sur la scolarité, signalons que les étudiants font deux stages : l'un d'une durée d'un mois en fin de première année dans un laboratoire de recherche, l'autre de trois mois en entreprise ou dans un laboratoire de recherche à l'étranger, en fin de deuxième année.

Abordons maintenant la formation expérimentale, formation spécifique des professeurs de physique.

## **2. LA FORMATION EXPÉRIMENTALE DANS LE CADRE DE LA PRÉPARATION À L'AGRÉGATION**

Dans l'article précédent (Perrot & Tadjeddine, dans ce numéro), nous avons développé le contenu des épreuves de l'Agrégation, ce qui permet de situer le niveau des connaissances et des savoir-faire exigés.

Sur le plan théorique, comme nous venons de le rappeler, les connaissances sont acquises pour l'essentiel quand l'étudiant arrive en troisième année, et ceci dans une approche thématique : il acquiert des notions de base en thermodynamique, en mécanique, en électricité, en optique, en physique quantique et statistique. L'année de préparation à l'Agrégation va lui donner l'occasion de développer une approche synthétique qui sera complémentaire de la première approche, en prenant en compte certains concepts de façon transdisciplinaire.

Ainsi, l'étudiant va pouvoir «s'approprier la physique» et cette appropriation va passer par l'expérimentation.

Sur le plan expérimental, tout est à apprendre ou presque. L'année de préparation est donc très lourde car l'apprentissage de l'expérimentation nécessite du temps : les débuts sont longs, assez peu rentables. Il faut

atteindre un minimum de savoir-faire pour prendre goût à ce genre d'activités et pour que l'acquisition, enfin, s'accélère. Si ce minimum n'est pas atteint, les élèves sont déçus et ne cherchent plus à faire le moindre effort. De plus, en terme de rentabilité, cet immense effort d'apprentissage est mal récompensé, le jour du concours, avec un coefficient de 2. Les étudiants le savent et nous le disent. Le jury aussi en est conscient, il essaie d'en tenir compte à travers les autres épreuves, comme il a été dit dans l'article précédent.

La préparation à l'Agrégation est donc centrée sur la préparation des montages, sans oublier les autres épreuves. Tous les montages (48 pour le concours 1994) seront préparés et présentés avant l'écrit. Comment ?

En début d'année, sont organisées des séances de TP par demi-groupe, trois en électricité (12 heures), trois en électronique (12 heures), cinq en optique (20 heures), trois sur le traitement du signal (12 heures). En effet il faut que les bases indispensables soient acquises avant le début des montages : savoir utiliser des appareils de mesure, savoir faire une bonne projection. Si l'apprentissage a été déjà fait en première année, l'acquisition sera beaucoup plus rapide et définitive.

Les élèves sont alors répartis en binômes ou trinômes. Pour une promotion de douze binômes, chacun d'eux aura donc à préparer quatre montages avant l'écrit en plus des leçons de physique et chimie. Le rythme de présentation des montages n'est pas constant : au cours des deux premiers mois, un montage par semaine ; puis le rythme s'intensifie : deux à partir de la mi-novembre et trois de janvier à fin mars. Quand un binôme prépare son premier montage, il n'est pas rare qu'il lui consacre toute la semaine qui précède sa présentation, soirées et week-end compris. La préparation consiste à :

- élaborer le plan de présentation : ceci va nécessiter un gros travail de bibliographie puis de synthèse, qui va conduire au choix des concepts à mettre en évidence, des domaines d'application et des mesures à réaliser,
- sélectionner les expériences les plus pédagogiques,
- choisir le matériel,
- «faire marcher» les expériences ou comprendre pourquoi «elles ne marchent pas»,
- effectuer les enregistrements nécessaires.

Au fur et à mesure de la préparation, le plan et le choix des expériences peuvent évoluer. La présentation est faite devant la promotion et l'enseignant. Après la discussion du montage et de ses améliorations possibles, celui-ci

n'est pas défait tout de suite. Il est laissé quelque temps à la disposition des autres élèves qui peuvent ainsi venir étudier par eux-mêmes et utiliser les dispositifs expérimentaux réalisés. Il est donc difficile de chiffrer le temps de préparation. Si l'on tient compte aussi du temps passé à la préparation des expériences pour les leçons, on peut arriver à une moyenne de plus de seize heures par semaine pour le travail expérimental.

Durant les deux mois qui séparent l'écrit de l'oral, le laboratoire de physique devient une véritable ruche par la présence continue et active des élèves. L'emploi du temps est alors organisé de la façon suivante :

- les après-midi sont consacrées à la préparation des épreuves de l'oral, dans les conditions de l'Agrégation : tirage au sort du sujet, quatre heures de préparation et présentation. À tour de rôle, chaque élève prépare et présente les trois épreuves de l'oral ;
- en dehors des trois matinées où l'agrégatif prépare son épreuve, il peut venir en toute liberté «manipuler» au laboratoire : sortir du matériel, réaliser des expériences, faire des mesures, des enregistrements, s'entraîner sur le Michelson...

Il s'agit alors d'une période très enrichissante pour l'étudiant qui passe plus de quatre jours par semaine au laboratoire : les indispensables savoir-faire sont désormais acquis, il peut facilement passer d'un dispositif expérimental à un autre, comparer de façon critique leurs avantages respectifs. Il peut alors repenser les plans de présentation des montages pour mettre en évidence les concepts de base, tirer toutes les conséquences d'une expérience, justifier tel ou tel dispositif... il pratique réellement une démarche scientifique. **À ce stade, il est passé de l'apprentissage de l'expérimentation à l'apprentissage par l'expérimentation.** Ce qui est évident, c'est que pour arriver à ce niveau, il lui aura fallu beaucoup de travail. C'est donc pour faciliter cet apprentissage que nous avons introduit, dès la première année, une initiation au travail expérimental.

### 3. INITIATION À L'EXPÉRIMENTATION

#### 3.1. Formation des élèves de première année

Cette initiation expérimentale est le fruit d'un travail de plus de quinze années. Son but est de faire acquérir aux étudiants une attitude raisonnée devant les montages qu'ils doivent réaliser, quelques savoir-faire expérimentaux, et si possible le plaisir de monter des dispositifs expérimentaux en utilisant les ressources du laboratoire. L'objectif est peut être aussi social : leur montrer qu'ils appartiennent à une école, à un cursus de formation.

Les élèves de première année viennent au laboratoire de physique à raison d'une séance hebdomadaire de quatre heures au cours des deux premiers trimestres. Les séances sont centrées sur un thème qui peut être l'étude d'un phénomène physique ou l'utilisation d'un appareil. Pour cette année, nous avons dégagé les thèmes suivants :

1. Principe et utilisation de l'oscilloscope
2. Principe des appareils de mesure et caractérisation d'un signal
3. Mesure du facteur de forme sur des courants redressés
4. La diode : redresseur et détecteur d'enveloppe
5. Le circuit oscillant RLC : choix des éléments et étude
6. La modulation : étude et applications
7. Lentilles convergentes et divergentes : projection
8. Réalisation de quelques instruments d'optique : lunettes, microscope...
9. Expériences simples d'optique ondulatoire (interférences, diffraction, bleu du ciel...)
10. Autres expériences de physique ondulatoire : acoustique, ondes centimétriques...
11. Oscillations libres et entretenues en mécanique ; systèmes couplés ; chaos
12. Thermodynamique : flux de chaleur, transition de phase.

Comme on peut le voir à travers ces douze thèmes, les montages sont en général des expériences de base relativement simples qui permettent d'aborder les principales techniques utiles en électricité, optique, mécanique et thermodynamique. Nous amenons les étudiants à réfléchir à l'illustration expérimentale du concept physique énoncé, à se poser les questions suivantes :

**Quelle illustration ? Quelle expérience ?**

**Mesure ou observation démonstrative ?**

**Quels sont les paramètres pertinents pour la réaliser ?**

**Quels sont les ordres de grandeur ?**

**Quel appareil ? Pour quelle mesure ?**

À ce stade, la réflexion est globale : elle concerne toute la promotion. La séance est dirigée par l'enseignant mais aucune manipulation n'est montée. L'expérience va être pensée collectivement. On fera des schémas pour la représenter au tableau et parfois plusieurs versions seront données.

Par exemple si l'objectif est de visualiser une caractéristique, le circuit à réaliser doit tenir compte du fait que le générateur utilisé est isolé de la terre ou non. Alors différentes questions peuvent se poser :

«Peut-on mettre deux masses dans un circuit ?»

Si le générateur est isolé :

«Où place-t-on la masse du circuit ? Que visualise-t-on,  $+V$  et  $-I$ , ou  $-V$  et  $+I$  ?»

Si le générateur n'est pas isolé :

«Peut-on jouer sur les ordres de grandeur pour visualiser  $+V$  et  $+I$  ?»

Les étudiants devront alors choisir et réaliser leur montage en fonction des appareils dont ils disposent.

Autre exemple de discussion collective, à propos de la mesure d'un signal : «Quelle grandeur mesure-t-on ? la valeur moyenne ( $\bar{V}$ ), la valeur efficace ( $V$ ) ou la valeur crête à crête ? Y-a-t-il un rapport constant entre ces différentes grandeurs ? Quels sont les appareils adaptés à telle mesure ? Est-ce que cet appareil peut convenir à tous les types de signaux ?»

À ce propos, l'enseignant sera conduit à apporter les compléments nécessaires et à faire calculer le facteur de forme ( $f = V/\bar{V}$ ) pour différents signaux. Le but du montage sera alors d'élaborer ces signaux et de mesurer leur facteur de forme avec les appareils adaptés.

Concernant les appareils, lors des premières séances, le matériel nécessaire sera présent sur les tables de travail ; mais progressivement les étudiants iront chercher eux-mêmes les appareils dans les placards. Ainsi ils apprendront à mieux connaître les ressources du laboratoire. Il nous semble également important de leur apprendre à consulter les notices des appareils. Une séance est consacrée à connaître les fonctions principales de l'oscillographe, à savoir les «reconnaître» sur les panneaux avant et arrière ; par contre, pour utiliser à bon escient les possibilités de mémoire de tel oscillographe, nous analysons la notice avec l'étudiant intéressé.

**Parfois la discussion va porter sur le choix du domaine d'application du fait physique que l'on veut étudier.** Pour les phénomènes de propagation d'ondes, les propriétés fondamentales sont les mêmes, mais la longueur d'onde variant, les observations peuvent être totalement différentes : les plans d'onde correspondant à la propagation d'un phénomène vibratoire à la surface d'un liquide sont bien visibles, alors qu'en optique on ne visualise que les rayons. Dans le même ordre d'idées, les ondes évanescentes se mettent bien en évidence dans le domaine centimétrique, même si leur application est plus fréquente en optique (cube séparateur). Le fait de traiter les oscillations en mécanique après les avoir discutées en électricité nous amène à utiliser les analogies électromécaniques, afin de trouver là encore les expériences les plus démonstratives pour illustrer les différentes propriétés : le régime transitoire sera illustré en mécanique alors

que le régime permanent pourra facilement être visualisé à partir d'un circuit électrique.

La valorisation de ce travail va se faire à travers la réalisation d'un montage en responsabilité, par binôme.

Le thème est choisi par les élèves à partir de la liste des montages d'Agrégation ou de leurs propres inspirations. À titre d'exemple, voici les thèmes illustrés cette année :

- ondes sonores, harmoniques, battements ; illustration sur des instruments de musique
- interférences
- capillarité
- biréfringence
- illustration de quelques phénomènes chaotiques
- modulation et détection d'ondes radio.

Le jour de la soutenance, le montage est présenté à l'ensemble de la promotion avec, au tableau, le plan et les schémas des dispositifs expérimentaux utilisés. **Il n'est pas rare de voir des élèves consacrer beaucoup de temps à l'élaboration d'expériences originales alors que ce travail n'est pas sanctionné.**

Conjuguant les techniques de l'expérimentation avec celles de la communication, des élèves ont conçu et réalisé, il y a deux ans, une bande vidéo sur deux expériences de physique :

- le filtrage optique
- la corde de Melde.

### **3.2. Option : «Techniques expérimentales en physique» pour le magistère de physique d'Orsay**

Si au départ, cette initiation avait un but utilitaire (aider les futurs agrégatifs dans leur préparation à l'épreuve du montage), elle est devenue, devant l'intérêt porté par les élèves à la démarche expérimentale, une composante que nous pensons fondamentale de la formation du physicien, futur enseignant, futur chercheur, futur ingénieur...

C'est ainsi que nos collègues d'Orsay nous ont demandé de créer une **option expérimentale**, à partir de notre expérience, dans le cadre du magistère de physique. Sous une forme plus réduite, nous avons donc expérimenté cette année cette formule auprès des étudiants de première année de magistère et de licence. Nous avons dû nous limiter à douze étudiants, ce qui nous semble le nombre maximum pour l'efficacité de notre encadrement.

Pour les douze premières semaines d'enseignement, nous avons fonctionné de la même manière qu'avec les élèves de première année. Les résultats sont tout autant enthousiasmants. Nous avons posé des questions aux étudiants ; leurs réponses traduisent leur intérêt mais aussi leur regret qu'une telle expérience ne puisse se prolonger.

*«Est-ce que ça correspond à votre attente ?*

*– Non, nous ne pensions pas qu'on pouvait travailler ainsi ! Vos élèves ont de la chance, ils peuvent venir quand ils veulent, refaire des manipulations. Nous, on n'aura jamais plus l'occasion de monter des expériences par nous-mêmes !*

*– Est-ce qu'on peut améliorer ce type d'enseignement ?*

*– Oui, en faisant plus de séances, avec du matériel qu'on voit rarement !»*

Par contre, ce qui a inquiété les étudiants, c'était l'évaluation de ce travail, sa prise en compte dans le cursus universitaire, problème qui ne se pose pas pour les élèves de Cachan. Nous avons proposé de faire cette évaluation à travers la réalisation d'un montage – par groupe de deux étudiants – sur un sujet limité pour qu'ils puissent préparer les expériences en deux heures et demie, le temps de présentation étant fixé à une demi-heure.

Nous avons alors établi une liste de six sujets qui correspondaient aux thèmes traités pendant l'année.

– Étude de la résonance en électricité et mécanique : étude des analogies.

– Étude comparée d'une diode et d'une photodiode : visualisation de la caractéristique et application.

– Application de l'oscillographe pour des mesures de fréquences acoustiques et électriques : balayage, Lissajous, Wehnelt, battements.

– Illustration du phénomène d'interférences dans différents domaines de la physique ; application à une lame de savon.

– Réalisation d'un projecteur de diapositives et d'une lunette astronomique ; étude des propriétés de ces deux dispositifs.

– Mesure de la capacité calorifique d'un solide donné : méthode des mélanges et méthode électrique.

Cette liste a été communiquée aux étudiants lors de la onzième séance. Au cours des deux semaines qui les séparaient des séances d'évaluation, ils ont réfléchi collectivement aux sujets et se sont partagé les études bibliographiques.

Lors des séances d'évaluation, les étudiants ont été convoqués par binômes (deux binômes par séance) à une heure d'intervalle. Une fois le sujet communiqué, nous les avons aidés dans le choix des expériences et des appareils, lorsque cela s'est avéré nécessaire, et nous les avons observés au cours de leurs manipulations.

Les présentations ont été bonnes, voire excellentes, certains étudiants montrant une parfaite maîtrise des savoir-faire expérimentaux que nous avons enseignés au cours des semaines précédentes. Pour le montage de calorimétrie, les mesures réalisées conduisaient à des résultats aberrants. Les étudiants ont analysé, devant nous, de façon très critique, les conditions dans lesquelles ils avaient manipulé, ce qui les a conduits à proposer un autre mode opératoire.

La note finale attribuée à chaque étudiant a pris en compte :

- sa participation au cours des douze premières séances,
- la présentation le jour de la séance d'évaluation (plan, mise en évidence des concepts, mesures, critiques des résultats), chaque étudiant ayant présenté une partie du montage.

Les notes ont été comprises entre 13 et 19.

Après discussion avec les étudiants, cet enseignement nouveau pour eux les a satisfaits dans la forme proposée. Nous reconduirons donc cette expérience pédagogique dans le cadre du magistère de physique d'Orsay et nous espérons qu'elle pourra se mettre en place bientôt dans le cadre de l'option expérimentale de la licence de physique de l'Université de Cergy Pontoise.

## 4. CONCLUSION

**Nous souhaitons que l'apprentissage par l'expérimentation puisse devenir un axe fondamental de l'enseignement de la physique.** Le nombre de séances doit être suffisant pour faire acquérir les savoir-faire expérimentaux indispensables et susciter l'intérêt des étudiants ; mais ce nombre ne nous apparaît pas comme un facteur déterminant, ce qui est important est la qualité de la démarche de l'étudiant. Le «prix à payer» réside dans la disponibilité de l'enseignant et, pour cela, il faut qu'il travaille avec des petits groupes d'étudiants. Comme nous l'avons dit, douze est un nombre tout à fait raisonnable : il permet aux élèves de manipuler sans perdre trop de temps, l'enseignant pouvant intervenir assez rapidement en cas de difficulté.

## BIBLIOGRAPHIE

MAURINES L. (1986). *Premières notions sur la propagation de signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants*. Thèse, Université Paris 7.

CLOSSET J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse de troisième cycle, Université Paris 7.

## Remerciements

Les auteurs remercient Gisèle Krebs pour sa contribution dans la mise en place de l'option du magistère d'Orsay au cours de l'année 1993-94, ainsi que Gérard Fortunato, directeur du département de Physique de l'ENS Cachan.