

Initiation à la pratique expérimentale en DEUG :

une expérience pédagogique en hydrodynamique

par C. ALLAIN, M. CLOÎTRE
FAST Université Paris-Sud
Bâtiment 502 - 91405 Orsay Cedex
C. BÉTRENCOURT, P. BINÉTRUY, J.-C. DEROCHE, P. JENFFER
Service DEUG-SNV - Université Paris-Sud
Bâtiment 336 - 91405 Orsay Cedex
et E. GUYON
École Normale Supérieure
45, rue d'Ulm - 75230 Paris Cedex 05

L'initiation à la pratique expérimentale dans les formations scientifiques est un enjeu considérable. P.-G. de GENNES s'en est fait l'avocat médiatique et convaincant après son prix Nobel. Il est amusant de voir que, avec un style différent mais une expérience professionnelle personnelle plus conforme à l'image de l'expérimentateur bricoleur que de GENNES, Georges CHARPAK a souligné encore cette nécessité auprès d'un large public. Il serait cependant tout à fait erroné de voir en cette prise de conscience un phénomène récent. Une étude de Nicole HULIN [1] montre comment à travers deux siècles d'histoire des sciences les réformes successives ont rappelé, de façon répétée, cette évidence que les sciences physiques sont d'abord des sciences de la nature et ont cherché à renforcer la part de l'observation et de l'expérimentation. C'est bien ce même souci qui avait animé la réforme Lagarrigue et la longue marche que rappelle utilement l'ouvrage de Michel HULIN «Le mirage et la nécessité» [2]. C'est aussi cette préoccupation qui se dégage de l'analyse concrète du physicien Pierre BERGÉ dans le cadre du rapport Gros-Bourdieu. Il apparaît donc que le problème est profond et que des pratiques didactiques originales plus que de simples ajustements de programmes ou de procédures d'évaluation, sont à rechercher dès la formation initiale [3].

Enseignants en premier cycle universitaire dans le cadre du DEUG, nous avons rarement la possibilité de mettre en application notre désir de faire de ce cycle un véritable temps d'initiation expérimentale et,

indirectement, une initiation pré-professionnelle pour l'enseignement (IUFM) ou toute autre activité à laquelle peut conduire ce cursus. Le plus souvent, nous n'avons l'occasion que de prolonger la forme de l'enseignement classique (cours + TD + TP) pour des problèmes de locaux et d'heures d'enseignement. C'est donc sur un ensemble restreint (une vingtaine) d'étudiants motivés que nous avons expérimenté un enseignement d'option centré sur l'approche expérimentale active d'un domaine nouveau pour eux : l'hydrodynamique physique (voir par exemple la référence [4]).

D'autres essais de ce type existent en faculté et connaissent un grand succès au niveau du second cycle. Citons l'Université Paris VII où les élèves physiciens suivent un projet annuel autour d'expériences originales qu'ils montent, expérimentent et qui pour plusieurs d'entre elles ont été à l'origine de programmes de recherche universitaires de tout premier plan (par exemple l'hydrodynamique à deux dimensions utilisant des films de savon). Dans le cadre de l'expérience pédagogique que nous avons menée il s'agit toutefois d'étudiants plus jeunes¹.

CONDITIONS

Plusieurs raisons nous ont amené à choisir le thème de l'hydrodynamique physique pour cette expérience.

Premièrement, le sujet se prête bien à des manipulations simples («de coin de table»), et conduit à des observations souvent spectaculaires. Les expériences renvoient au réel et à l'observation en sciences de la nature et de la vie.

Deuxièmement, ce domaine n'est pas ou est incomplètement traité à ce niveau d'étude (la notion de viscosité ne fait même pas partie du programme de l'agrégation de physique). Nous avons montré dans un article au B.U.P. [6] combien était pauvre (et incohérent) un enseignement basé uniquement sur la dynamique du fluide parfait². Dans l'expérience présente, il s'agissait pour nous de voir l'attitude des

1. Une initiative similaire est aussi conduite à Paris VII dans le cadre général de la physique de DEUG première année ; voir à ce propos [5].
2. The Feynman Lectures in Physics (vol. II, chap. 40) parle de l'«écoulement de l'eau sèche» par contraste avec les problèmes réels de l'hydrodynamique des fluides visqueux.

élèves devant un sujet neuf pour eux et approché par une méthode essentiellement inductive.

Enfin, l'approche théorique directe de l'hydrodynamique est souvent très complexe et son approche physique est rendue beaucoup plus aisée par à un aller et retour entre l'expérience et la théorie. Compte tenu du niveau des élèves nous ne pouvions être tentés de faire une approche théorique qui se situe au-delà de simples arguments de dimension, d'ordre de grandeur et de correspondances analogiques précises.

Cet enseignement s'inscrit d'autre part dans un projet plus vaste associant le Palais de la Découverte, notre laboratoire d'enseignement et le laboratoire d'hydrodynamique et de mécanique physique de l'ESPCI³. Ce projet concerne l'étude et la mise en place d'un ensemble d'expériences de mécanique des fluides pouvant être présenté en manipulation aux visiteurs d'un musée. En impliquant des étudiants dans la réalisation d'études expérimentales pouvant éventuellement faire partie de ce projet, nous répondions à un souci muséologique trop souvent négligé au cours des études scientifiques. Dans la séquence diachronique qui va de la conception d'une expérience à son utilisation répétée, la phase de la réalisation technique et des tests est souvent ignorée par les concepteurs et sous-traitée. C'est pourtant dans cette phase intermédiaire que se fera la différence entre un bon objet interactif de musée et un montage sans intérêt, par le savoir-faire technique et concret qui rendra le projet intelligible et véritablement interactif à travers le dimensionnement, l'ergonomie, la fiabilité et en fin de compte l'homogénéité sémiologique. Il nous a semblé devoir demander aux étudiants le même soin dans la réalisation et la clarté de la présentation que dans la précision des mesures, le fond et la forme ayant souvent la même importance dans la réalisation d'un projet.

DÉROULEMENT DES SÉANCES

Notre enseignement se déroule sur un semestre dans le cadre d'une option de DEUG A. Le but est d'amener les étudiants, groupés en binômes, à réaliser un projet expérimental sur un thème choisi en commun avec eux. La partie expérimentale proprement dite s'étale sur

3. Contrat REMUS n° 93 09 03 : C. BÉTRENCOURT, P. BINÉTRUY, J.-C. DEROCHÉ, M. FERMIGIER, E. GUYON, J.-P. HULIN, P. JENFFER, V. JEUDY.

deux mois à raison d'un après-midi hebdomadaire et est précédée par une période d'un mois où les notions de base sont introduites et où les étudiants sont conduits petit à petit à formuler plus précisément leur projet.

La mise en place de cet enseignement nous a demandé environ une année. Les problèmes immédiats à résoudre étaient les questions d'encadrement et de matériel puisqu'une telle démarche requiert des besoins dans ces domaines bien supérieurs à un enseignement traditionnel.

Un fort encadrement technique est tout à fait nécessaire puisqu'un grand nombre de questions des étudiants porte sur la faisabilité technique de leur projet. La présence dans notre laboratoire d'enseignement d'un atelier nous a aussi permis de réduire grandement les coûts et les délais, certaines pièces pouvant être fabriquées sur place. L'expérience acquise par la collaboration avec le Palais de la Découverte a été particulièrement utile puisqu'il s'agissait là aussi de mettre au point des projets conceptuellement simples et facilement manipulables.

En ce qui concerne l'encadrement pédagogique, un point important a été l'intégration dans notre équipe de chercheurs du CNRS. Un des aspects de cette participation était l'ouverture de notre enseignement à la pratique différente de la recherche, à laquelle les étudiants de premier cycle ont rarement accès. L'intervention de spécialistes dans le domaine nous semblait aussi une façon supplémentaire d'échapper au côté scolaire de l'enseignement.

Pour les questions matérielles, nous avons décidé de démarrer avec les «moyens du bord». Une aide ponctuelle du Département de Physique de l'Université Paris-Sud nous a permis d'acquérir du matériel de base. Et surtout notre ouverture sur le monde extérieur (laboratoires, Palais de la Découverte...) nous a facilité l'accès temporaire à du matériel plus sophistiqué qu'il n'était pas question d'acheter. L'achat du matériel se heurtait d'ailleurs à une contradiction inhérente au type d'enseignement choisi : comment discerner le matériel qui se révélerait nécessaire tout en laissant aux étudiants la plus grande latitude pour faire évoluer leur projet dans le sens qu'ils souhaitaient. Nous voulions éviter de leur donner l'impression qu'ils n'avaient la possibilité de faire que ce que nous avions prévu qu'ils fassent. Rétrospectivement, nous avons pu résoudre ce dilemme sans trop de difficultés.

La période de démarrage de l'enseignement s'est étendue sur quatre semaines, pendant lesquelles des cours ont présenté aux étudiants les notions de base (lignes de courant et champ de vitesses, viscosité, nombre de Reynolds, Bernoulli et Poiseuille, couche limite, turbulence). Ces cours se déroulaient dans les salles de travaux pratiques, de la manière la moins formelle possible, privilégiant au maximum l'approche expérimentale par des manipulations simples ou des exemples de la vie quotidienne. Une partie du temps a été consacrée à la présentation de films⁴ dont nous sélectionnions et commentions certains passages. Parallèlement à cette introduction aux notions de base, nous avons entamé dès la deuxième semaine une discussion des thèmes proposés pour amener les étudiants à se répartir entre eux les projets et à en préciser le contenu au cours des troisième et quatrième semaines. Citons comme exemples de thèmes proposés : *l'étude de la sédimentation, la fabrication d'un viscosimètre, la vérification de la loi de Poiseuille, la construction d'un circuit hydraulique modélisant la circulation sanguine*. L'intitulé en était suffisamment court pour laisser aux étudiants le plaisir de la découverte et la liberté de construire et de faire évoluer leur projet au gré des succès et des échecs. Nous désirions en effet que leur apprentissage de la pratique expérimentale se fasse, en partie au moins, sur la base du «trial and error». Parmi les sujets proposés nous avons constaté que les étudiants se sentaient plus intéressés par des thèmes pouvant être associés à des phénomènes de la vie quotidienne (circulation sanguine, vagues, gisements de pétrole...).

Au bout de quatre semaines, après discussion avec l'équipe et consultation d'ouvrages généraux et spécialisés (parfois même de thèses et de documents trouvés directement par eux-mêmes), les étudiants étaient prêts à passer à la phase expérimentale proprement dite. Ils avaient dressé une première liste de matériel nécessaire, qui recoupait en partie la liste que nous avions établie quelques mois plus tôt. Les discussions que nous avons eues tous ensemble avaient même amené certains étudiants à nous proposer de nouveaux thèmes. Ainsi trois étudiants ont travaillé sur leur propre idée : réaliser une petite soufflerie et y étudier les forces qui s'exercent sur un modèle d'aile d'avion.

4. Films du «National Committee for Fluid Mechanics Films». Ces films sont accompagnés d'un manuel très intéressant : «Illustrated experiments in fluid mechanics», PIT Press (1974).

Les séances expérimentales se sont déroulées sur une période de deux mois. Les étudiants tenaient à jour un cahier de manipulation où ils reportaient à chaque séance le détail de leurs discussions, de leurs calculs d'ordre de grandeur ou d'estimation des résultats à attendre, des tentatives fructueuses ou infructueuses qu'ils faisaient, des conditions des expériences, etc. Outre l'intérêt évident pour une pratique expérimentale qui n'était par la force des choses que hebdomadaire, cela nous paraissait un moyen de leur enseigner une méthodologie fondée au moins autant sur l'analyse des échecs que sur la présentation des succès. Ce cahier de manipulation nous a aussi été très utile pour l'évaluation du travail accompli et des conditions dans lesquelles le projet expérimental avait été réalisé. Il faut toutefois dire que ces cahiers ont été très diversement tenus, entre une description scrupuleuse du déroulement des séances jusqu'à quelques notes bâclées au fil des pages. L'utilité d'un tel cahier n'est souvent apparue aux étudiants qu'après quelques déboires : ainsi ce n'est qu'a posteriori que les binômes pour lesquels la viscosité du fluide utilisé était une grandeur sensible, se sont aperçus que la température ambiante (qui a varié de 18°C à plus de 30°C) était un paramètre déterminant : un thermomètre figure d'ailleurs en bonne place dans nos salles expérimentales. De la même façon, pour ne pas avoir noté les conditions dans lesquelles une série de photos de gouttes posées avaient été prises, le binôme étudiant la tension superficielle a été obligé de reprendre cette série à zéro.

En ce qui concerne l'orientation et les suggestions données par les enseignants, nous avons décidé de ne pas nous répartir les binômes mais au contraire d'intervenir chacun sur l'ensemble des projets. Cela a quelque peu désorienté les étudiants au démarrage : ils se trouvaient devant un ensemble de suggestions, orientations, critiques pas toujours cohérent, parfois même contradictoire. Notre but n'était évidemment pas de les désorienter mais plutôt de les responsabiliser, les amener à choisir leur propre solution. Nous voulions à tout prix éviter qu'ils se tournent vers un enseignant responsable pour savoir quoi faire à l'étape suivante. Il semble que ce but ait été atteint, même s'il faut reconnaître que cette façon de procéder a pu ralentir le démarrage des projets.

De façon générale nous avons laissé aux étudiants la plus grande initiative possible : ils ont pu ainsi passer des commandes eux-mêmes aux fournisseurs (ils se sont d'ailleurs révélés des clients redoutables, très soucieux de ne pas dépasser le budget prescrit et discutant les prix), contacter des physiciens travaillant dans le domaine concerné pour avoir des informations pratiques (type de matériel ou de milieu à

utiliser : taille de billes, type de sable, nature d'huile, etc.) ou même se procurer des thèses. Cette façon de concevoir l'approche d'une méthode a certainement beaucoup contribué au plaisir que les étudiants ont retiré de leur expérience.

BILAN

La présentation finale du projet s'est déroulée suivant trois étapes distinctes : rédaction d'un rapport, présentation-démonstration devant l'ensemble de l'équipe et des étudiants, oral individuel de contrôle des connaissances. Les deux premières nous ont permis d'insister sur la forme, la troisième sur le fond. En particulier, il nous a semblé important de vérifier que les étudiants n'avaient pas uniquement «bricolé» pendant deux mois mais qu'ils avaient acquis une connaissance des concepts et une pratique des lois de l'hydrodynamique.

En ce qui concerne la présentation écrite et orale il faut noter que les étudiants se sont refusés à nous en parler à l'avance. Ils disaient en avoir compris l'esprit et semblaient désireux de nous en faire la surprise. Nous étions évidemment inquiets du résultat, craignant qu'ils ne recopient des encyclopédies ou des manuels à pleines pages dans le rapport écrit ou qu'ils ne nous fassent une sorte de mini-cours théorique dans la présentation orale.

Nos inquiétudes se sont révélées sans fondement : les étudiants avaient compris ce que nous attendions d'eux et, dans leur ensemble, se sont attachés dans leurs présentations à :

- identifier les phénomènes physiques qu'ils étudiaient,
- expliquer les différentes possibilités expérimentales qu'ils avaient envisagées,
- décrire les solutions retenues (pourquoi celles-ci et pas d'autres),
- faire le lien autant que possible avec des phénomènes naturels ou quotidiens,
- ouvrir des perspectives sur l'avenir (que reste-t-il à faire ? «conseils» aux étudiants des années suivantes, etc.).

L'aspect théâtralisation n'était pas même absent de la présentation orale. Ainsi le binôme qui avait fabriqué un viscosimètre à bille avait utilisé le caméscope familial pour filmer tout au long des deux mois les différentes étapes de leur étude et nous en a montré un court montage.

Le trinôme chargé de l'élaboration d'une soufflerie utilisait une balance pour mesurer les forces s'exerçant sur un profil d'aile : ils ont demandé l'aide d'un étudiant dans l'assistance pour effectuer les lectures sur la balance, en l'absence et en présence de l'écoulement d'air. En ce qui concerne le rapport écrit, à notre grande surprise l'ensemble des étudiants a tenu à le rédiger en utilisant un traitement de texte. Nous avons alors dû en faciliter l'accès aux deux binômes qui ne possédaient pas chez eux d'ordinateur personnel.

Nous attendions beaucoup de l'oral individuel, épreuve qui inquiétait quelque peu nos étudiants qui la ressentaient comme un retour ultime à un enseignement traditionnel. C'était pour nous une manière de tester le succès ou l'échec de notre méthode du point de vue de l'enseignement de la physique : en un mot, qu'avaient retenu les étudiants des notions de base et des lois de l'hydrodynamique ? Là aussi nos inquiétudes - et celles des étudiants - étaient vaines. Nous avons été particulièrement frappés de voir que les étudiants avaient acquis une connaissance approfondie des concepts que nous avions voulu leur inculquer. Certes les facteurs numériques (2 ou π) restaient un peu flous mais nous n'avons pas relevé une seule de ces erreurs de sens physique qui font le désespoir des enseignants. Chaque étudiant pouvait reconstruire par raisonnement comment varie telle ou telle grandeur avec la viscosité, la vitesse de l'écoulement, la masse volumique, etc. Ils avaient acquis une connaissance solide des phénomènes et se référaient systématiquement à leur propre expérience pour répondre à nos questions. Nous avons eu ainsi la surprise de les voir analyser correctement des problèmes qui nous paraissaient non triviaux ; ainsi un étudiant qui avait travaillé sur la sédimentation pouvait répondre à la question suivante (et fournir un raisonnement correct pour justifier sa réponse) : deux billes en chute dans un fluide l'une au-dessus de l'autre vont-elles plus ou moins vite qu'une seule ?

Une fois l'option terminée, nous avons demandé aux étudiants de répondre à un questionnaire détaillé. A partir de leurs réponses, on peut noter les points intéressants suivants :

- leur choix de cette option était fondé pour une moitié sur son aspect expérimental et pour l'autre sur le sujet (l'hydrodynamique) ;
- presque tous les étudiants ont noté comme point positif le fait d'avoir rédigé un rapport par traitement de texte. C'était en quelque sorte leur première «œuvre» au sein de l'Université (une copie d'examen ne constituant pas une œuvre). Le soin qu'ils y ont apporté montre l'importance qu'ils y attachaient ;

- le temps consacré par les étudiants à cet enseignement dépassait largement celui habituellement requis par une option, «au point de devenir quasiment notre matière principale» note une étudiante. Les étudiants s'en sont plaints pour l'organisation de leur emploi du temps mais ont trouvé ce temps passé nécessaire pour réaliser leur projet dans le cadre de l'option ;
- les étudiants ont vu comme objet principal de ce type d'enseignement une initiation à la recherche, ce qu'ils ont apprécié même s'ils ne se destinaient pas particulièrement à ce type d'activité. Acquérir une méthode et en particulier apprendre à gérer son temps et son matériel (les deux nécessairement très limités dans un projet de ce type) leur a paru très positif ;
- les orientations qu'ils désiraient prendre après le DEUG étaient extrêmement diverses : enseignement, école d'ingénieurs, recherche, filières appliquées...
- enfin la plupart des étudiants se sont situés dans une continuité temporelle. Nous avons été surpris en cours d'année de voir que d'eux-mêmes ils allaient rechercher du matériel qu'ils avaient utilisé en travaux pratiques au cours des années précédentes. Dans le même esprit, presque tous les rapports contenaient des conseils aux futurs étudiants qui utiliseraient leurs montages. Certains sont aussi revenus nous voir depuis, pour nous demander de prolonger l'expérience, cette fois-ci au niveau du stage de licence ou de maîtrise.

CONCLUSION

Ce bilan peut apparaître à la lecture, un peu idyllique, mais reflète bien la réalité. Plusieurs d'entre nous avaient déjà été impliqués dans des stages expérimentaux à un niveau supérieur (élèves de seconde et troisième années à l'ESPCI) et ont trouvé chez les étudiants, en tenant compte du bagage scientifique plus limité au niveau du DEUG, une imagination et une qualité tout à fait comparables. Ceci montre bien qu'avec une bonne motivation de la part des étudiants, un encadrement suffisant, un apport complémentaire très apprécié de chercheurs bénévoles, et un environnement technique adéquat, certaines hiérarchies trop rapidement établies au niveau du recrutement entre facultés ou grandes écoles, tombent.

La valorisation des approches expérimentales vaut moins par une attaque en règle contre l'enseignement de mathématiques qui doit rester un facteur de formation essentiel, que par une réelle prise en charge par

les enseignants de science expérimentale de véritables enseignements pratiques. De tels enseignements pratiques ne peuvent alors que conforter, pour les meilleurs éléments, la formation initiale acquise par ailleurs.

Enfin, nous avons vu revenir, après plusieurs mois, des étudiants que nous avons eus pendant la première année de stage et qui gardent le souvenir de cet enseignement limité comme un temps déterminant pour leur orientation. Il va sans dire que l'expérience est reproduite cette année.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. HULIN : «*Caractère expérimental de l'enseignement de la physique*» XIX^e, XX^e siècles, B.U.P. 86 1403 (1992).
- [2] N. HULIN : «*Le mirage et la nécessité*», Presses de l'ENS et Palais de la Découverte.
- [3] A. GUILLON : «*Travaux pratiques de physique en DEUG et démarches scientifiques*», troisième séminaire de Recherches en Didactique des Sciences Physiques. Toulouse, 1993 ; «*Démarches scientifiques en travaux pratiques de physique de DEUG à l'Université de Cergy-Pontoise*», Didaskalia 7 (1995) 103-116.
- [4] E. GUYON, J.-P. HULIN et L. PETIT : «*Hydrodynamique physique*». Interéditions 1992.
- [5] J.-C. BACRI, J. BERGER et F. LENOIR, Bulletin de la SFP (84) p. 18, avril 1992.
- [6] B.U.P., n° 721 (1987) 185.

Annexe

Nous indiquons ci-après les sujets retenus par les étudiants. Il n'est pas possible (dans cette revue) de donner le détail de chaque sujet. A titre d'exemple, nous donnons un résumé pris dans un rapport de stage.

a) Construction d'un viscosimètre à chute de billes et mesure de la viscosité de liquides.

Description de montage (voir schéma ci-après)

Le viscosimètre est constitué d'un tube de plexiglas ① de diamètre intérieur de 30 mm et de longueur 600 mm dont l'extrémité inférieure est fermée par un bouchon ②, à l'autre extrémité du cylindre une pince à sucre ⑨ permet de lâcher les billes dans le fluide ⑥. On utilise des billes ⑦ en polyamide de densité $\rho_s = 1,14 \text{ g/cm}^{-3}$ et de diamètre $10, \pm 0,02 \text{ mm}$. La mesure du temps de chute est assurée par un dispositif électronique ⑧ qui relie deux cellules photoélectriques distantes de 350 mm à un chronomètre. Pour étalonner le montage on utilise comme fluides ⑥ des huiles silicones de viscosité connue : 10 ctpoises - 100 ctpoises - 500 ctpoises - 1000 ctpoises. La masse volumique est de $\approx 0,97 \text{ g/cm}^3$. Les deux cellules photoélectrique sont alignées à l'aide d'un fil à plomb. Le statif ③ a une hauteur de 800 mm. Le tube est maintenu à l'aide d'une seule pince ⑤ située à mi-hauteur ce qui lui assure un réglage vertical. La pince est fixée au statif par une noix ④.

b) Construction et étude d'une soufflerie : mesure des forces qui s'exercent sur une aile.

c) Réalisation de milieux poreux. Étude de la loi de Darcy. Construction d'un modèle de barrage poreux.

d) Visualisation et mesure des fronts de sédimentation. Effet Boycott.

e) Étude des phénomènes de surface : gouttes posées et gouttes pendues.

f) Construction d'un réseau hydraulique, modèle de circulation sanguine. Étude de la perte de charge.

