

COMPTES RENDUS D'INNOVATIONS

Reports of innovation

Projets de physique et simulation numérique en licence de physique : compte rendu d'innovation

Projects in physics and numerical simulation in «licence de physique» (3 years university) : report of innovation

Jacques LE BOURLOT

Université Denis Diderot - Paris 7
DAEC, Observatoire de Paris, section de Meudon
92195 Meudon cedex, France.

Résumé

L'université Denis Diderot propose, en licence de physique, un module optionnel de modélisation et simulation numérique. Les étudiants peuvent ainsi aborder un problème de physique (quelconque) sur une durée assez longue (un semestre) et avec des outils permettant de dépasser la présentation axiomatique et scolaire habituelle de la physique. Ils apprennent ainsi à formaliser un problème, à émettre, tester et éventuellement rejeter des hypothèses, et découvrent par la pratique que la physique n'est pas une science achevée et qu'il est souvent utile de comparer plusieurs approches complémentaires d'une même question. Au passage, ils acquièrent la maîtrise de techniques utiles à tout physicien : maniement des outils

informatiques, rudiments d'analyse numérique et de programmation, bibliographie et travail en équipe.

Mots clés : *physique, modélisation, projets.*

Abstract

Denis Diderot University (Paris 7) offers a pre-graduate optional one-semester physics course devoted to computational physics and simulations. Students tackle a full scale physical problem in real life conditions using tools unavailable during usual theoretical courses. They learn to set up a question and to formulate, test and reject hypotheses. They discover through experience that physics is still a lively and evolving science, and that different points of view help uncover various aspects of a problem. Meanwhile, they learn various skills useful to any physicist : a practical use of computers, introductory level numerical analysis, bibliography and team work.

Key words : *physics, modelling, projects.*

Resumen

La Universidad Denis Diderot propone, en "licencia de física" (sistema francés), una enseñanza opcional de modelización y simulación numérica. Así pueden los estudiantes tratar una cuestión de física (cualquiera que sea) durante un período bastante largo (un semestre) y con instrumentos que les permitan ir más allá de la presentación axiomática y escolar habitual de las ciencias físicas. De esta manera, aprenden a "formalizar" un problema, formular, controlar y eventualmente rechazar una hipótesis, y descubren por la práctica que las ciencias físicas no son una disciplina acabada, y que a menudo resulta útil comparar varios planteamientos complementarios de una misma cuestión. De paso, adquieren la dominación de técnicas útiles a todo físico : manejo de material informático, bases en análisis numérica y en programación, bibliografía y trabajo de equipo.

Palabras claves : *física, modelización, proyectos.*

1. INTRODUCTION

Il est banal de constater que la pratique de la physique s'écarte sensiblement de la manière dont elle est enseignée. L'aller-retour permanent entre les faits expérimentaux et leur interprétation, le progrès par essais et erreurs sont loin des exercices types, bien calibrés et à solution unique que les étudiants travaillent habituellement en travaux dirigés (TD).

L'introduction de travaux pratiques, pour utile qu'elle soit, ne résout pas le problème. En effet, une après-midi de travail permet tout juste d'utiliser une expérience déjà montée (une boîte noire), mais rarement de

comprendre son fonctionnement détaillé, et jamais les motivations qui ont conduit à choisir tel ou tel arrangement précis au détriment d'un autre, *a priori* aussi raisonnable.

L'introduction de «projets expérimentaux» dans la plupart des cursus universitaires répond en partie à ce souci de confronter les étudiants à la pratique vivante d'une discipline. En travaillant plusieurs semaines sur un même sujet, ils peuvent le découvrir progressivement, monter eux-mêmes les expériences nécessaires et, surtout, assimiler progressivement les notions nouvelles qu'ils auront découvertes.

Le projet purement expérimental laisse cependant de côté un aspect de plus en plus important de l'activité des physiciens aujourd'hui. En effet, qu'il s'agisse d'expérimentateurs ou de théoriciens, il est rare de rencontrer des scientifiques qui n'utilisent jamais, à un titre ou un autre, un ordinateur. Que ce soit pour l'acquisition de données expérimentales, leur traitement statistique, pour accélérer un petit calcul d'ordre de grandeur ou au contraire développer un modèle lourd au sein d'une équipe, une certaine familiarité avec la pratique du numérique fait maintenant partie du bagage obligatoire de l'honnête scientifique au même titre que l'anglais ou les techniques de recherche bibliographiques.

Tenter d'enseigner ce type de connaissance dans l'absolu, lors d'une série de cours magistraux, est aussi absurde que de vouloir apprendre à nager par correspondance. La pratique seule, concrète et répétée, peut permettre de dépasser l'appréhension qu'ont beaucoup d'étudiants face à un clavier et un écran (malgré le nombre toujours croissant de ceux qui ont un micro-ordinateur chez eux), et d'atteindre le stade où cet outil aide à acquérir des connaissances nouvelles, en physique ou dans d'autres disciplines.

Un module de projet se prête bien à ces différents objectifs. En proposant aux étudiants de travailler quatre mois sur un même sujet, on peut se permettre d'aborder des problèmes plus réalistes, dont l'étude est impossible dans le cadre restreint d'un TD. En choisissant d'étudier ces problèmes à l'aide de l'outil numérique, on s'affranchit également des contraintes expérimentales : coût du matériel, difficultés techniques, temps.

Les difficultés intrinsèques à la simulation numérique ne se laissent cependant pas oublier. Au-delà du langage de programmation lui-même et de l'utilisation des logiciels et du matériel, il faut des semaines (voire des années) pour acquérir l'esprit critique nécessaire à l'interprétation de résultats bruts : il n'est que trop tentant de croire qu'un résultat est vrai parce que «l'ordinateur l'a dit». Cet article fait le bilan d'une telle expérience de projets de «physique et simulation numérique» en licence de physique.

2. DESCRIPTION

Notre expérience en matière de projets de simulation numérique s'étend sur six ans. Les projets se déroulent sur un semestre, à raison de deux demi-journées par semaine avec les enseignants. Les étudiants travaillent en binôme et disposent d'un accès à des stations de travail UNIX (IBM RS/6000) *via* des terminaux X. Ces terminaux sont accessibles en libre service en dehors des heures de cours. Le déroulement du semestre est le suivant :

– **première séance** : présentation des sujets par les enseignants et choix par les étudiants. Dans la mesure du possible une liste de sujets a été distribuée à l'avance,

– **semaines 1 à 3** : en parallèle, prise en main du matériel pour les étudiants qui ne le connaissent pas, et surtout analyse «théorique» du problème physique (bibliographie, mise en équations, choix de paramètres) afin de bien cerner et préciser la question posée. Les étudiants présentent alors, devant l'ensemble du groupe, un exposé d'une vingtaine de minutes, décrivant la problématique et comment ils ont l'intention de travailler. Cet exposé permet de vérifier qu'ils ont bien compris ce que l'on attend d'eux (les questions des autres étudiants sont, à cet égard, très éclairantes), et constitue, également, un exercice de présentation orale que la plupart dominant encore très mal,

– **semaines 4 à 10** : construction du modèle numérique, tests, validations. Les imprévus sont en général nombreux, et il n'est pas rare qu'il soit nécessaire de réorienter légèrement le sujet en fonction des difficultés rencontrées. Un deuxième exposé, présentant les résultats provisoires, permet de préparer la soutenance finale et de détecter les défauts de présentation majeurs. Cet exposé n'est pas noté afin de limiter le «trac» des étudiants,

– **semaines 11 à 13** : exploitation du modèle et rédaction du rapport. C'est le moment où l'on peut réellement «faire de la physique» et aller au-delà de ce que l'on aborde habituellement en licence. Dans quelques cas favorables, les étudiants peuvent également rencontrer des spécialistes du problème étudié (dans leurs laboratoires). Une soutenance d'une demi-heure (notée) et la remise d'un rapport concluent le module. De façon très classique, les résultats les plus intéressants sont souvent obtenus la veille au soir de la soutenance, et beaucoup d'étudiants se plaignent d'avoir manqué de temps.

Techniquement, la plupart des étudiants ont, au départ, des connaissances à peu près nulles en matière de programmation ou même

d'utilisation du matériel. Lorsque les projets se déroulent au deuxième semestre, on peut profiter du premier pour inciter les élèves à s'auto-former s'il n'y a pas d'enseignement spécifique de prévu. Si les projets démarrent dès la rentrée, on est contraint de s'attaquer simultanément au fond et à la forme, ce qui demande un effort important de la part des étudiants et limite significativement les objectifs que l'on peut se donner.

Nous n'imposons pas de langage de programmation particulier : si les étudiants en connaissent un, ils l'utilisent. Le travail d'apprentissage est diminué d'autant. S'ils n'en connaissent pas, le choix se porte le plus souvent sur «Pascal» qui reste répandu en premier cycle (et donc évoque «quelque chose» pour beaucoup). Nous avons, depuis l'origine, la tentation d'imposer le C à tous, mais l'effort nécessaire nous a toujours paru trop important.

Indépendamment du langage, l'accent est mis sur la nécessité de structurer le programme en isolant soigneusement les parties spécifiques au problème (entrées-sorties) des outils généraux (algorithmes numériques), en commentant au mieux le code numérique, et en gardant une syntaxe et une présentation cohérente du début à la fin du texte du programme. La pratique montre que ces efforts restent souvent des vœux pieux : ce n'est que le jour où ils ne comprennent plus eux-mêmes ce qu'ils ont écrit que les étudiants admettent que l'effort demandé est une nécessité vitale et non une perte de temps.

Nous travaillons sur des terminaux X reliés à un serveur UNIX (IBM RS/6000). Passée la période d'accoutumance à un système d'exploitation complexe, ceci présente un double avantage. D'une part, la compétence technique ainsi acquise est directement valorisable auprès d'un employeur éventuel (ce type de poste de travail constitue un standard du marché). D'autre part, il existe toute une gamme d'outils d'analyse et de traitement dans le domaine public, ce qui permet de disposer de moyens sophistiqués pour un coût défiant toute concurrence. Concrètement, nous utilisons «gnuplot» ou «xmgr» pour les tracés de graphiques, «LaTeX» pour la rédaction et présentation de rapports (ce dernier est facultatif étant donné l'effort d'apprentissage nécessaire), les bibliothèques numériques standard peuvent être explorées sur le «Web» grâce à «Netscape» (procédures tirées de Mathews (1992), voire de la «netlib» pour les cas les plus difficiles).

Afin de pallier le manque d'enseignement spécifique, toutes les informations nécessaires au bon déroulement du projet ont été rassemblées sur un serveur «Web» accessible à tous (<http://ibm4.cicrp.jussieu.fr/~lebourlo>). On y trouve un manuel de prise en main de base (rudiments d'UNIX, éditeur «vi», une bibliographie, une introduction à l'analyse numérique), des pointeurs vers d'autres ressources similaires sur le «Web»,

les informations pratiques sur l'année en cours (calendrier, liste des étudiants), et quelques projets réalisés les années précédentes.

3. CHOIX DES SUJETS

Nous n'imposons que deux contraintes dans le choix des sujets : un sujet ne doit pas avoir été traité auparavant (contrainte de nouveauté), un enseignant, au moins, doit se sentir apte à le dominer correctement (contrainte de viabilité). La deuxième contrainte se comprend aisément : il n'est pas raisonnable d'entraîner des étudiants de licence dans des domaines aventureux qui, soit font appel à des connaissances très spécialisées (par exemple : calcul de structure par éléments finis), soit auraient l'ampleur d'une thèse. La première se révèle une nécessité à l'usage : face à un sujet qu'il connaît déjà, dont il a éventuellement une solution dans ses archives, l'enseignant se montre trop pressé et trop directif. Très rapidement les étudiants prennent une attitude passive et se contentent d'appliquer des recettes dont ils n'ont pas eu l'initiative et dont ils ne voient pas forcément la motivation. En revanche, face à un sujet neuf, les hésitations (voire les erreurs) de l'enseignant laissent à l'étudiant la possibilité d'apporter des idées originales et de choisir l'orientation que prend son projet.

Cette obligation de se renouveler chaque année oblige, bien sûr, l'enseignant à rassembler en permanence de nouvelles idées et de nouveaux sujets. Les sources sont multiples mais rentrent pour la plupart dans quatre grandes catégories :

- articles de journaux scientifiques : «Pour la science», «American journal of physics», «Journal des physiciens», etc.,
- ouvrages spécialisés : par exemple «Gould & Tobochnik» (1996), ou «Eminyan & Rubin» (1994),
- travaux de recherche personnels : sous une forme simplifiée, évidemment,
- enseignement : version élaborée de problèmes d'examens ou de TD.

Un peu d'imagination est souvent nécessaire pour extraire une question simple et stimulante d'un problème trop complexe s'il est pris dans toute sa généralité.

(Une liste partielle de sujets traités ces dernières années est donnée en annexe.)

On peut distinguer quelques grands types de sujets qui montrent qu'en fait un petit nombre seulement d'outils numériques est nécessaire.

A) Problèmes se ramenant à un système d'équations différentielles

C'est le champ d'application par excellence de la mécanique classique (problème à trois corps, voile solaire, pendules variés, gyroscopes, etc.), mais aussi de la cinétique chimique, de l'optique géométrique en milieu inhomogène, etc.

L'outil de base est un bon intégrateur à pas variable (un Runge-Kutta est souvent suffisant) en étant attentif à deux difficultés numériques possibles :

- le système d'équation peut être «raide», ce qui nécessite un algorithme spécifique (et un peu d'expérience de la part de l'enseignant),
- d'éventuelles intégrales premières du système peuvent être délicates à conserver (cas de la mécanique céleste où, là encore, il existe des algorithmes spécifiques).

B) Problèmes basés sur une méthode statistique

C'est le cas, bien sûr, de la physique statistique proprement dite (marche au hasard, etc.), mais aussi de tous les problèmes abordables par des méthodes de type «Monte-Carlo». Nous avons ainsi traité la formation de halos atmosphériques par diffraction dans des cristaux de glace orientés aléatoirement dans la haute atmosphère.

C) Problèmes à base d'automates cellulaires ou de systèmes sur réseau

Techniquement très simples, ces outils permettent d'aborder beaucoup de problèmes (souvent à la pointe de la recherche) de façon intuitive. Par exemple, les feux de forêts (modèle de percolation) ou les mécanismes de réaction-diffusion qui sont à l'origine des motifs tachetés des pelages se modélisent très bien de cette façon.

Nous avons choisi de n'accepter qu'exceptionnellement des problèmes faisant appel à des systèmes d'équations aux dérivées partielles (fluides, transferts). L'aspect proprement numérique est trop lourd pour le peu d'expérience de nos étudiants et ces problèmes ne devraient être réservés, au plus tôt, qu'à une fin de maîtrise.

4. CONCLUSION

Le bilan est très positif : les étudiants apprécient l'autonomie qui leur est laissée et se passionnent généralement pour leur sujet. À plus long terme, l'expérience qu'ils ont acquise est souvent utile aussi bien dans le reste de leur second cycle que comme élément de réflexion au moment de choisir leur orientation définitive. C'est également un élément apprécié par beaucoup de responsables de DEA.

Il faut, cependant, bien évaluer le prix à payer pour un tel module. Nous avons la chance, à l'université Paris 7, de pouvoir profiter des services du CICRP (Centre Interrégional de Calcul de la Région Parisienne), qui nous fournit «clé en main» les services informatiques dont nous avons besoin (maintenance logicielle, salles en libre-service, etc.). C'est un travail de professionnel, qu'un enseignant ne peut assurer seul au-delà d'une vingtaine d'étudiants. Malgré tout, il n'est pas rare que les projets les plus ambitieux saturent la puissance de calcul disponible. Une bonne gestion des ressources relève alors autant de la diplomatie que de la technique, et la difficulté croît très vite quand le nombre d'étudiants augmente.

L'investissement en temps des étudiants eux-mêmes est, paradoxalement, parfois excessif. Profitant du libre-service ou de micro-ordinateurs personnels, certains en viennent à négliger les autres enseignements, avec des résultats globaux très dommageables. Ce phénomène reste minoritaire, mais ne doit pas être oublié.

Enfin, la principale contrainte reste l'absence de formation initiale des étudiants aux techniques de programmation et aux méthodes de l'analyse numérique. Ils sont ainsi trop souvent bloqués par des problèmes de forme qui les empêchent de s'intéresser au fond. Dans un monde scolaire idéal, cette formation préalable devrait être acquise dès le DEUG (dans le cadre d'un module de mathématiques appliquées, par exemple).

S'il faut exprimer un regret, il concerne certainement, pour l'instant, l'isolement relatif dans lequel ces projets se sont déroulés. De nombreux problèmes abordés se prêtent aussi bien à l'expérimentation traditionnelle qu'à une modélisation numérique. Nous n'avons pu qu'exceptionnellement proposer le même sujet à un binôme d'expérimentateurs et à un binôme de numériciens. La confrontation est cependant passionnante, et la synergie éclairante pour tout le monde, y compris les enseignants. C'est dans cette voie que nous cherchons à faire évoluer cet enseignement.

BIBLIOGRAPHIE

- EMINYAN M. & RUBIN K. (1994). *Introduction à la simulation des systèmes physiques*. Paris, InterÉditions.
- GOULD H. & TOBOCHNIK J. (1996). *An introduction to computer simulation methods - Applications to physical systems*. Paris, Addison-Wesley Pub. Co.
- MATHEWS H. (1992). *Numerical methods for mathematics, science and engineering*. Londres, Prentice Hall.

REMERCIEMENTS

Cette expérience pédagogique est le fruit d'un travail d'équipe. Elle doit en particulier beaucoup à Gérard Rebmann (université Paris 7) que je remercie de m'avoir initié à ce type de problèmes.

ANNEXE

Exemples de sujets traités

- modèle statistique de la conduction thermique,
- configuration à l'équilibre d'un polymère en solution diluée,
- tracé d'un faisceau laser à l'interface entre deux liquides diffusant l'un dans l'autre,
- rebond d'une balle sur un sol oscillant et chaos,
- modélisation par automate cellulaire de la formation de spirales dans une galaxie,
- le régulateur à boules,
- le refroidissement d'atomes par lasers,
- le billard ovale,
- le modèle d'Ising du ferromagnétisme,
- la voile solaire,
- dynamique d'une population d'insectes,
- propagation d'un paquet d'ondes quantique Gaussien 2D,
- écoulement hydrodynamique par gaz sur réseau,
- croissance de dendrites,

- dynamique d'un pendule magnétique,
- mouvement d'une boussole dans un champ magnétique oscillant,
- croissance de spirales végétales,
- y-a-t'il criticalité auto-organisée dans le jeu de la vie ?,
- les halos atmosphériques.