

La préparation du concours des Olympiades de Physique 1995 : construire un instrument de musique en cristal

André MEGEL, Marie-Noëlle OLIVE

Lycée Félix Esclangon
04100 Manosque, France.

Résumé

Chaque année, depuis sa création, une équipe du Lycée Félix Esclangon de Manosque est finaliste du concours des Olympiades de Physique. Pour l'année scolaire 1994-1995, elle s'est intéressée aux «modes propres de vibration d'une structure». Le travail réalisé a consisté en une étude expérimentale du phénomène dans un laboratoire de vibrométrie laser du CEA de Cadarache, suivie d'une modélisation avec les logiciels CASTEM 2000 et RDM. Une application a été conçue sous la forme d'un instrument de musique en cristal réalisé en collaboration avec des élèves tchèques du Lycée Slave d'Olomouk, jumelé avec le Lycée Esclangon.

Mots clés : enseignement, physique, projet expérimental, partenariat, jumelage scientifique.

Abstract

Each year, since the Physics Olympiads were created, a team of «Lycée Esclangon» has competed in the finale. In 1994-1995, they became interested in the different vibratory modes of a structure. Their work consisted in conducting an experiment in a laser vibration laboratory at the CEA, Cadarache, followed by a

modélisation with the software programs CASTEM 2000 and RDM. An application has been conceived under the shape of a cristal instrument realized in collaboration with the Czech students of the Slavic School of Olomouk, which is twinned with the Lycée Esclangon.

Key words : *teaching, physics, experimental project, partnership, scientific exchange.*

Resumen

Cada año, desde su creación, un equipo del liceo Félix Esclangon de Manosque es finalista en el concurso de las Olimpiadas de Física. Para el año escolar 1994-1995, ella se interesa a «los modos propios de vibración de una estructura». El trabajo realizado consistió en un estudio experimental del fenómeno en un laboratorio de vibrometría laser del CEA de Cadarache, seguido por una modelización con los software CASTEM 2000 et RDM. Una aplicación ha sido concebida bajo la forma de un instrumento de música en cristal realizado en colaboración con los alumnos Checos del liceo Slave de Olomouk, el cual forma pareja con el liceo Esclangon.

Palabras claves : *enseñanza, física, proyecto experimental, compañerismo, intercambio científico.*

Afin de développer l'enseignement expérimental de la physique dans l'enseignement secondaire, la Société Française de Physique et l'Union des Physiciens organisent, avec le soutien de l'État et d'entreprises privées, le concours des Olympiades de Physique destiné à récompenser les équipes de lycéens qui réalisent et exploitent des dispositifs expérimentaux.

Depuis quatre ans qu'existe ce concours, le Lycée Félix Esclangon de Manosque y participe et il est présent aux épreuves finales à Paris avec une vingtaine d'autres lycées.

Nous pensons que la préparation à ce concours est un excellent moyen de faire de la physique et de montrer à nos élèves l'intérêt d'une approche expérimentale d'un phénomène. D'autre part, c'est l'occasion d'aborder chaque année un sujet de recherche nouveau et de le mener à terme. Pour participer au concours, il faut en effet terminer le travail en

respectant impérativement un délai, puis rédiger un compte rendu écrit, «le mémoire», et enfin présenter oralement l'ensemble devant un jury en temps limité.

Les lignes qui suivent présentent le travail réalisé pour le concours 1995 par l'équipe de notre lycée qui a obtenu un deuxième Prix national.

1. LA MISE EN PLACE

1.1. La constitution de l'équipe

Le concours est ouvert à une équipe de quatre à six élèves de première Scientifique. Trente candidats se sont présentés au mois de mai 1994. Les prix obtenus les années précédentes (troisième, puis deuxième Prix national) ont donné envie à beaucoup d'élèves de tenter l'aventure. Ils savent pourtant que cela représente un travail supplémentaire important, mais connaissant aussi les brillants résultats au baccalauréat des équipes des Olympiades les années précédentes, leurs craintes concernant l'examen ont disparu. Nous avons retenu huit élèves, nous avons donc été obligés d'en éliminer une vingtaine. Le critère principal a été la motivation manifestée par l'élève à faire de la physique pendant son année de seconde.

Notre lycée est par ailleurs jumelé avec le lycée slave d'Olomouk en République Tchèque. Ce jumelage, à caractère scientifique et linguistique, se limitait au niveau des échanges à une découverte des modes de vie des deux pays. Pour lui donner une «coloration plus scientifique», nous avons demandé à nos collègues tchèques de constituer une équipe d'élèves qui pourrait travailler sur le sujet des Olympiades. Un groupe de six élèves tchèques a donc été constitué et s'est joint à notre recherche.

1.2. Le choix du sujet

Nous avons pris des contacts avec le Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN) à Genève pour un sujet sur la «relativité». Le sujet semblait pouvoir être traité avec des élèves de lycée, et une équipe de chercheurs était prête à travailler avec nous. Finalement, cette collaboration a échoué, ce qui nous a conduits à chercher un laboratoire d'accueil plus proche de Manosque.

Le Centre d'Études Atomiques de Cadarache étant à un quart d'heure de notre lycée, nous avons cherché à y réaliser la même expérience qu'au CERN. C'est en prospectant dans différents secteurs du CEA que nous

avons eu l'occasion de visiter un laboratoire de «Vibrométrie Laser». L'accueil très chaleureux que nous avons reçu auprès de Madame Pierrette Fardeau, ingénieur, puis de Monsieur Lusson, technicien, nous a amenés à renoncer au premier sujet, puis à décider de travailler dans ce laboratoire sur les modes propres d'une structure.

D'autre part, la collaboration avec les Tchèques nous a incités à chercher une application dans un domaine d'activité proche de nos correspondants. Lors de la visite de la cristallerie de Karolinka, en Moravie, nous avons décidé de construire un instrument de musique en cristal. D'où le sujet définitif : «Étude des modes propres d'une structure par vibrométrie laser. Construction d'un instrument de musique en cristal».

1.3. Les partenaires

Nous avons pu réaliser ce travail grâce à deux partenaires locaux :

– le Centre d'Études Atomiques de Cadarache (CEA) qui nous a permis de réaliser des mesures de vibrométrie laser dans son Laboratoire d'Hydraulique du Cœur du réacteur (DRN/DEC/SECA/LHC). Il s'agit d'un «labo froid», sans risque pour des élèves mineurs ;

– Électricité de France (EDF) qui nous a aidés à réaliser le voyage en République Tchèque.

2. LES GRANDES ÉTAPES DE NOS ACTIVITÉS

2.1. Les cours théoriques

Une des difficultés à résoudre est l'adaptation du sujet choisi aux connaissances des élèves. Nous avons commencé quelques cours théoriques durant le mois de juin 1994 et pendant les grandes vacances afin que l'équipe soit prête à recevoir les explications lors de la première visite du laboratoire. Les sujets abordés (environ dix heures de cours) : pendule élastique, cordes vibrantes, résonance, notion de fréquence propre et de mode propre dans le cas simple de mouvement pendulaire, effet Doppler.

Certaines de ces notions ont bien sûr été étudiées plus en détail durant le premier trimestre dans le cadre du cours normal de physique. D'autres, comme les cordes vibrantes ou l'effet Doppler, ne figurent pas au programme ; il a été nécessaire ici d'apporter aux élèves des connaissances qui ne viendraient que plus tard pendant l'année scolaire ou même les années suivantes.

2.2. Le travail au laboratoire d'hydraulique du cœur du réacteur

2.2.1. Premier contact

Le 29 août 1994 (pendant les vacances scolaires), toute l'équipe a passé une journée entière au CEA de Cadarache, avec au cours de cette journée :

- présentation des structures du centre,
- prise de contact avec les différentes personnes travaillant dans le laboratoire,
- visite guidée du laboratoire (vibrométrie à effet Doppler, vélocimétrie laser)
- lien entre le travail effectué au laboratoire et le sujet choisi (vibration des aiguilles dans le cœur du réacteur et modes propres d'une structure),
- mise en place d'un calendrier de travail au laboratoire.

Cette journée très riche a permis de bien cerner le sujet et de voir comment il allait être abordé expérimentalement.

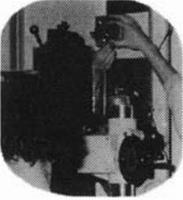
2.2.2. Organisation du travail expérimental

Sept séances ont ainsi été programmées pour venir travailler. Elles se sont déroulées au CEA pendant l'année scolaire le mercredi après-midi. Le CEA a mis à notre disposition un car qui venait chercher l'équipe vers 12h 30 et la ramenait vers 17h 30.

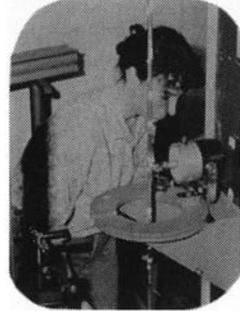
Deux ateliers de travail ont été mis en place :

- l'un, animé par Monsieur Lusson (technicien), a réalisé des mesures avec le vibromètre laser, afin d'établir expérimentalement les lois concernant les modes ;
- l'autre, sous l'autorité de Madame Fardeau (ingénieur), a conduit un travail de modélisation en utilisant les logiciels CASTEM 2000 et RDM.

LE DÉROULEMENT D'UNE MESURE



FIXATION DE LA POUTRE (1)



MISE EN PLACE DE LA MIRE (2)



RÉGLAGE DU FOCUS DU LASER (3)
(Le port de lunette spéciale a été obligatoire
en raison de la forte puissance du laser utilisé)



PRÉPARATION INFORMATIQUE
DE L'EXPÉRIENCE (4)



MISE EN VIBRATION DE LA POUTRE (5)

2.2.3. L'expérience avec le vibromètre laser à effet Doppler

Un faisceau laser est envoyé sur une mire fixée en un point de la structure dont on veut connaître les modes propres. On donne un coup bref sur cette structure qui se met alors à vibrer. Cette vibration entraîne un effet Doppler au moment de la réflexion du faisceau sur la mire. La mesure de la variation de longueur d'onde entre le rayon incident et le réfléchi permet de connaître la vitesse du point de la structure où se trouve la mire. La décomposition en séries de Fourier permet de mesurer les fréquences propres associées à chaque mode propre.

2.2.4. Les résultats

Le travail a été réalisé avec beaucoup de sérieux et d'efficacité :

- découverte expérimentale des lois concernant les modes propres des poutres,
- modélisation des poutres,
- étude expérimentale des modes propres d'un verre en cristal,
- essai de modélisation avec poutre, puis coque.

À l'issue de ce travail, les élèves étaient capables de mesurer les fréquences propres de vibration d'un objet (verre en cristal) et de modéliser cet objet.

D'autre part, c'est à travers ces activités expérimentales que l'équipe s'est structurée d'elle-même en apprenant à s'organiser pour réaliser un travail et obtenir des résultats. Mandelle et Michaël ont pris en charge la structure à étudier, Vincent et Sylvain les réglages électroniques du faisceau, Élodie et Élisabeth la saisie informatique, pendant que Laurent et Valérie s'occupaient de faire tourner les logiciels de simulation (voir les photos de la page ci-contre).

2.3. La mise au point par un élève d'une expérience de résonance

Le travail au CEA fut très intéressant et a conduit à une bonne connaissance du sujet. Il a donné l'idée à un des élèves du groupe de mettre au point un dispositif expérimental permettant de mesurer les fréquences propres d'une poutre.

Pour cela, il a couplé la membrane d'un haut-parleur excité par un générateur basse fréquence à une tige d'acier encastrée à l'une de ses extrémités. En balayant la fréquence de vibration du haut-parleur, il a mis

en évidence les différents modes de la tige chaque fois qu'il y a résonance ; il a pu ainsi mesurer (en dehors du CEA) les différentes fréquences propres et les relier aux formules établies à Cadarache.

L'expérience a été très enrichissante, car si les élèves font de la physique de façon théorique, il est plus difficile pour eux de prendre l'initiative d'une expérience.

2.4. L'échange avec la République Tchèque et l'application

Cette partie du travail est un peu en dehors des objectifs des Olympiades, mais il nous paraît intéressant d'en parler, car elle a contribué à souder l'équipe, formée d'élèves qui ne se connaissaient guère.

Comme nous l'avons dit plus haut (1.1.), un groupe de six élèves tchèques du lycée slave d'Olomouk, ainsi que leur professeur de physique, se sont joints à notre équipe. Les élèves se sont d'abord écrit et se sont transmis ainsi le sujet de notre recherche.

Le groupe de Manosque a organisé, pendant les vacances de Toussaint, un voyage de huit jours à Olomouk. Les matinées ont été consacrées à un travail scientifique (le groupe de Manosque a présenté son travail et en particulier les résultats du travail expérimental fait à Cadarache), les après-midi et certains jours au tourisme (en particulier à la découverte de Prague). Les deux groupes ont recherché en commun une application. À la suite de la visite de la cristallerie de Karolinka, ils ont décidé de faire fabriquer un instrument de musique en cristal.

Le groupe tchèque est venu à Manosque du 8 au 15 décembre 1994. Une journée de travail a été organisée à Cadarache. L'équipe de Manosque a montré comment manipuler le vibromètre. À cette occasion, des mesures de fréquences propres sur des structures en cristal (verres, comptoir, tiges...) ont été réalisées.

2.5. La recherche d'une application

2.5.1. Lien entre un son et les modes propres de la source

C'est donc au cours de l'échange avec la République Tchèque que l'idée est venue de créer un instrument de musique en cristal. L'idée première est d'utiliser les connaissances acquises lors de l'étude expérimentale à Cadarache avec le vibromètre laser. Les élèves savent déterminer expérimentalement les modes propres d'une structure. Ils savent aussi modéliser les poutres et les coques.

Lors de l'étude de la vibration d'une «flûte à champagne», ils ont pu constater que la modélisation n'est pas simple, car ce n'est ni une poutre, ni une coque. L'étude du son émis par cette flûte a pu être faite avec le logiciel SON. Ce logiciel a permis de décomposer la vibration sonore enregistrée en séries de Fourier, et de mettre en évidence le fondamental ainsi que quelques harmoniques. Les résultats obtenus ainsi ont pu être reliés à l'étude vibrométrique et donc aux modes propres du verre.

2.5.2. Le projet d'application

Après beaucoup d'hésitations, chaque équipe a décidé de construire un instrument de musique : les Tchèques, à partir de cylindres en cristal, modélisables par des poutres ; les Français, à partir de cloches, modélisables par des coques.

L'idée est de définir, à partir des connaissances acquises lors de l'étude expérimentale, les caractéristiques à donner à une structure en cristal (cylindre ou cloche), pour qu'elle donne un son dont la hauteur soit celle d'une note de la gamme.

Le travail s'est fait en quatre temps :

- 1) prévisions par le calcul des dimensions à donner à la structure pour qu'elle produise un son correspondant à une note
- 2) réalisation de la structure en cristal par un maître verrier
- 3) contrôle du résultat à l'aide de deux méthodes :
 - par analyse du son (micro + interface CANDIBUS + logiciel SON)
 - par vibrométrie laser
- 4) essai d'interprétation des résultats obtenus (résonance et tuyaux sonores).

Les diagrammes de la figure 1 montrent les résultats précis qui ont été obtenus.

3. LES DOMAINES DE LA PHYSIQUE EXPLORÉS

Nous avons déjà dit que l'intérêt des Olympiades est que tout doit être prétexte à faire de la physique, et si possible sous forme expérimentale. Pour cela, la démarche qui nous paraît la plus intéressante consiste, le plus tôt possible, à mettre en place une expérience. Il faut, peu à peu, la faire fonctionner, l'analyser, l'améliorer et «la faire parler».

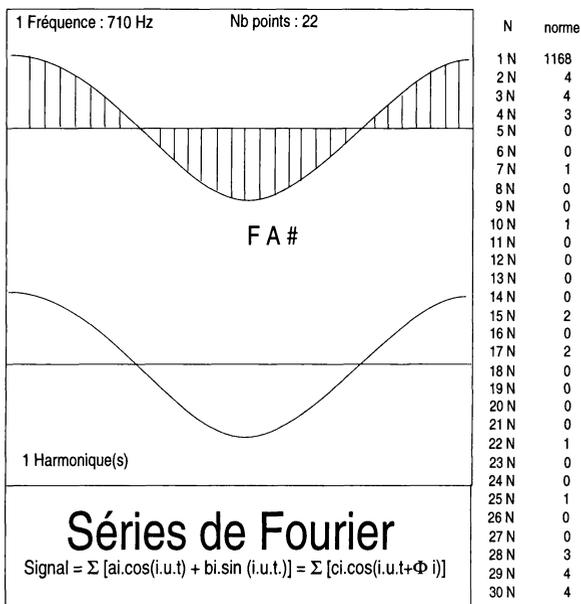
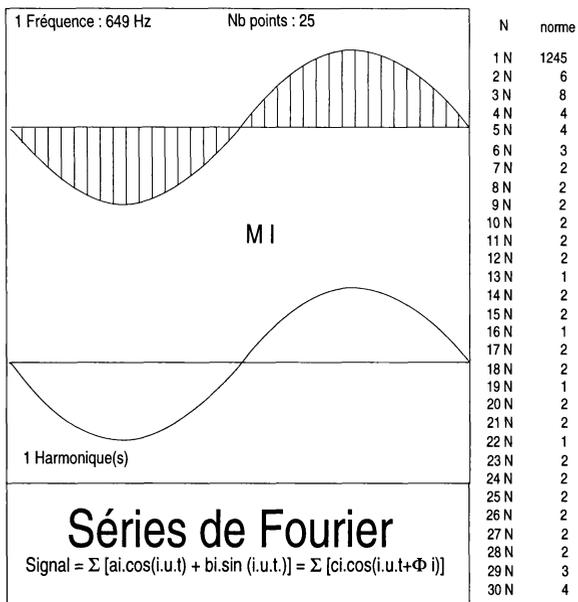
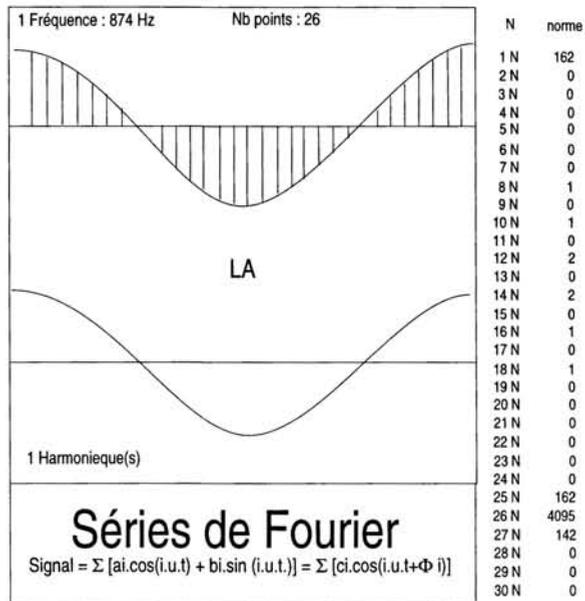
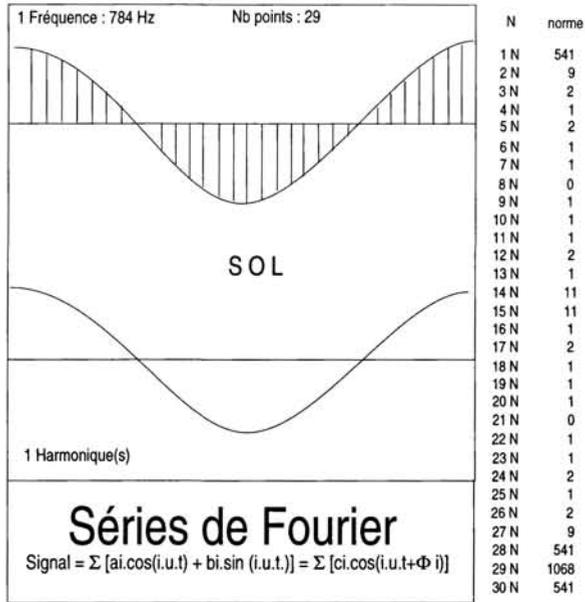


Figure 1 : Analyse des sons produits par les différentes cloches



Le rôle de l'enseignant est d'aider les élèves à la compréhension de ce qui se passe en apportant les notions de physique qu'ils ne connaissent pas, ou en approfondissant celles qui font partie de leur programme.

Pour la compréhension du sujet (la notion de modes propres)

Il nous a fallu étudier de façon théorique et expérimentale (équation différentielle, formules des fréquences propres) :

- le pendule élastique
- le pendule simple
- les cordes vibrantes
- les poutres
- les coques.

Nous avons également abordé la notion de modèle grâce à l'utilisation des logiciels de modélisation CASTEM 2000 et RDM.

Pour la compréhension du dispositif expérimental

- la vibrométrie laser
- le laser
- l'effet Doppler
- la décomposition en séries de Fourier.

Pour la conception de l'instrument de musique

- les qualités d'un son (hauteur, intensité, timbre)
- la gamme tempérée, les tons, les intervalles de Savart...
- l'étude expérimentale d'un son (fondamental, harmoniques)
- les phénomènes de résonance
- les tuyaux sonores et les cordes vibrantes.

4. LA PRÉSENTATION DU CONCOURS

Régulièrement, les élèves ont rédigé les cours théoriques, les comptes rendus d'expérience. Ce travail manque d'unité ; il faut trouver un fil conducteur pour harmoniser l'ensemble en liaison avec le sujet choisi. Pour la présentation devant le jury, il reste à préparer la rédaction d'un mémoire ainsi que la présentation orale du travail.

Ces deux activités sont difficiles et très formatrices pour des jeunes peu habitués à rédiger un travail personnel et à s'exprimer devant un jury.

4.1. Le mémoire

C'est la trace écrite de toutes nos activités de recherche. Il doit parvenir au jury une dizaine de jours avant la présentation, et sera étudié en détail, à l'avance, par l'un de ses membres (le rapporteur). L'expérience des années précédentes nous a permis d'habituer nos élèves à l'utilisation d'un traitement de texte dès le début de l'année. Pour cela, nous avons installé au CDI (centre de documentation du lycée) un ordinateur réservé aux sciences physiques avec WordPerfect que nos élèves manipulent très bien.

De nombreuses journées ont été nécessaires pour arriver à un résultat correct : concision, précision du langage. Le document écrit a été réalisé en une quarantaine d'exemplaires (trois sont envoyés au jury ; un certain nombre est conservé par l'administration, les autres resteront la propriété des élèves).

4.2. La présentation orale

Il s'agit de présenter l'ensemble des travaux au jury en vingt minutes. C'est donc une épreuve décisive : à quoi bon avoir effectué un travail si l'on ne sait pas raconter ce que l'on a fait ? Cette présentation est suivie par des questions du jury pendant dix minutes.

Pour organiser cette présentation, il faut tout d'abord répartir les tâches en découpant l'ensemble en séquences qui seront présentées par chaque membre du groupe.

Les premiers essais sont en général catastrophiques (trop long, des oublis, les expériences présentées en direct ne marchent pas, etc.). Il semble impossible d'arriver à réduire la durée. Les élèves ont tendance à parler plus vite au lieu d'améliorer la concision. Certains élèves s'expriment mieux que d'autres. Faut-il laisser la parole à tout le monde ? Tout cela est bien compliqué.

Mais quel soulagement et quelle satisfaction lorsque le jour de la présentation, en vingt minutes, chacun a trouvé sa place, et que l'ensemble de l'équipe (franco-tchèque) a réussi à tout dire, sans précipitation, et à jouer deux morceaux de musique sur les deux instruments qui ont été réalisés !

5. CONCLUSION

Tout doit être prétexte à faire de la physique, mais il n'est pas évident pour des élèves de première d'assimiler des notions telles que la recherche des harmoniques d'un son à partir de la décomposition en séries de Fourier, l'effet Doppler ou encore le fonctionnement du laser.

L'informatique nous a beaucoup aidés en restant à leur niveau. Il nous a fallu souvent anticiper sur le programme de terminale. Ce n'est qu'une fois le mémoire rédigé que toutes ces notions ont été bien assimilées. En tout cas, rien ne doit être laissé sans explications, et l'enseignant doit constamment trouver le moyen de se mettre à la portée des élèves.

La formule des Olympiades de Physique permet à des jeunes lycéens de faire de la véritable Physique avec beaucoup d'enthousiasme. Malgré les difficultés rencontrées, nous pensons que cela est possible.