

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Expériences de physique fondamentale à l'Observatoire de Lyon

ou comment intéresser les jeunes aux sciences

Isabelle Vauglin, Observatoire de Lyon - CRAL, 69230 Saint-Genis-Laval, France

*Nous présentons dans cet article les expériences de physique que nous avons développées à l'Observatoire de Lyon et que nous utilisons avec les classes venues en visite. Les enseignants peuvent nous demander de les présenter pendant une visite ou de les exploiter pour un atelier scientifique. Nous mettons également ces expériences à la disposition des élèves qui nous le demandent pour leur TPE ou leur TIPE<sup>1</sup>.*

L'Observatoire de Lyon est un laboratoire de recherche qui mène depuis longtemps une politique de diffusion des sciences ambitieuse. Chaque année, de nombreuses actions sont destinées aux scolaires, touchant ainsi environ 3800 élèves par an : accueil de classes en visite sur le site, déplacement de chercheurs dans les classes, soutien scientifique et suivi de projets, soutien aux ateliers, TPE et TIPE. Par ailleurs, nous proposons des formations aux enseignants : soutien aux projets (classes à projet artistique et culturel et à atelier scientifique, projet Passion recherche du CNRS...), stages inscrits au plan académique de formation et ateliers mensuels (un mercredi après-midi par mois) dont l'accès est libre.

Conscients et préoccupés du désintérêt persistant des jeunes pour les filières scientifiques, nous sommes persuadés que l'astronomie présente un attrait important. La visite d'un laboratoire de recherche est un moment marquant pour les élèves. C'est donc par le biais de l'astronomie que nous présentons aux jeunes les sciences physiques et que nous tentons de développer chez eux un intérêt pour les études scientifiques.

Afin d'améliorer encore nos offres pour les scolaires, nous avons développé des expériences de physique, résultat d'une collaboration avec Georges Paturel et Philippe Merlin et avec les services techniques de l'Observatoire de Lyon. Pour les réaliser, nous avons obtenu un soutien financier de Sciences à l'École, de l'Université Lyon1 et du CNRS.

Ces expériences sont directement liées à certains thèmes de recherches menées à l'observatoire. Nous espérons ainsi inciter davantage les jeunes à s'intéresser à la physique et leur permettre de « faire pour

comprendre ».

### Les expériences de physique

Les expériences sont rassemblées dans le bâtiment historique de la lunette méridienne de l'observatoire. Nous avons développées cinq expériences :

- mesure de la vitesse de la lumière ;
- banc de spectroscopie ;
- balance de Cavendish ;
- méthode des transits pour la détection des exoplanètes ;
- banc de démonstration d'optique adaptative.

Destinées aux scolaires surtout à partir du niveau lycée, elles peuvent être :

- expliquées et présentées aux classes par des chercheurs ou des ingénieurs lors de visites ;
- utilisées par des classes en petits groupes, pour des TPE, pour les TIPE des classes préparatoires ;
- utilisées pour la formation continue des enseignants et des formations CNRS.

Quand elles sont utilisées en autonomie par de petits groupes d'élèves, un chercheur ou un ingénieur suit bien sûr leur cheminement et assure le soutien nécessaire. Dans ce cadre inhabituel, les élèves sont en général très intéressés et attentifs.

### L'expérience de mesure de la vitesse de la lumière

La lumière a toujours tenu une place importante en physique. Après la question de sa nature, est venu le souci de mesurer sa vitesse de propagation. Galilée, Römer, Fizeau, Foucault... de nombreux physiciens ont redoublé d'imagination pour arriver à la mesurer malgré les difficultés à surmonter. Avec le développement de la théorie de la relativité, la

<sup>1</sup> Travail Personnel Encadré (en 1<sup>ère</sup>) et Travail d'Initiative Personnelle Encadré (en classe préparatoire)

vitesse de la lumière est devenue une constante fondamentale de la physique, qu'aucune vitesse réelle ne peut dépasser. Arriver à faire la mesure de cette vitesse est fascinant pour les élèves.

L'expérience a été développée initialement par Georges Paturel, elle est décrite en détail dans les Cahiers Clairaut n° 96 (2002). C'est une version électronique de la roue dentée de Fizeau (figure 1). La source lumineuse est un laser dont l'intensité est modulée, à une fréquence réglable.

Une partie du faisceau émis est réfléchi par une lame semi réfléchissante puis enregistrée par la photodiode proche. Ce capteur envoie le signal sur une des entrées de l'oscilloscope. L'autre partie du faisceau traverse la lame semi réfléchissante, se réfléchit sur un miroir éloigné puis revient sur un deuxième capteur qui envoie le signal sur la seconde entrée de l'oscilloscope. Le trajet long utilise un miroir placé sur un des piliers de la lunette méridienne, situé à plus de 40 m.

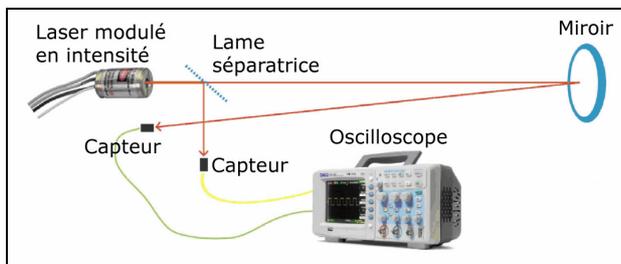


Fig.1. Schéma de principe de notre expérience de mesure de vitesse de la lumière. (SDC observatoire de Lyon)

Le signal du faisceau long est en retard de quelques nanosecondes sur le signal du faisceau court : cela correspond au temps qu'il a fallu à la lumière pour parcourir la différence de distance entre les deux trajets (figure 2). On fait varier la fréquence  $f$  de modulation du signal jusqu'à ce que les signaux coïncident sur l'écran de l'oscilloscope. La période de modulation ( $T=1/f$ ) donne le temps mis par la lumière pour parcourir la distance  $L$ , différence entre le trajet long et le trajet court.

On obtient alors  $c = L / T$ .

L'expérience que nous proposons permet de faire soi-même une mesure de cette vitesse. Quand ils réalisent l'expérience en autonomie, les élèves doivent comprendre le montage, obtenir les signaux sur l'oscilloscope, ajuster la fréquence pour obtenir la valeur correcte et faire les calculs.

Ils doivent également mesurer les distances des trajets courts et longs, obtenir la différence  $L$  entre les deux trajets et peuvent estimer les sources d'erreur pour obtenir une valeur d'incertitude.



Fig.2. Traces des signaux des deux trajets court et long. Un ajustement de la fréquence du laser modulé permet de chercher la superposition des deux courbes.

L'expérience a été présentée à plusieurs reprises à des lycéens. Plusieurs groupes l'ont utilisée pour leur TPE. Un groupe du lycée Chevreul Sala de Lyon a fait un compte-rendu de TPE très soigné en créant des pages Web que l'on peut consulter sur [tpevd11s2.jimdo.com/notre-experience](http://tpevd11s2.jimdo.com/notre-experience).

En 2012, un documentaire de 52 min de la chaîne Cap Canal « de Ptolémée aux neutrinos », basé sur l'utilisation de l'astronomie pour aborder l'enseignement des sciences en classe, a inclus le groupe des lycéens en train de réaliser cette expérience de mesure de la vitesse. Ce fut pour ces élèves de 1<sup>ère</sup> S une grande fierté !

## Spectroscopie

L'univers est totalement inaccessible pour les chercheurs, nous ne pouvons qu'analyser les informations qui arrivent jusque sur Terre, au premier rang desquelles il y a bien sûr la lumière. C'est pour cela que la spectroscopie est d'une importance fondamentale en astronomie.

L'observatoire a conçu et réalisé de nombreux spectrographes pour la communauté scientifique, avec en particulier le développement de la spectrographie intégrale de champ au moyen des instruments TIGRE et OASIS pour le CFHT<sup>1</sup> puis SAURON pour le WHT<sup>2</sup> et enfin MUSE pour le VLT<sup>3</sup>. Faisant le lien avec cet axe de recherche majeur du laboratoire, le banc de spectroscopie est un moyen d'illustrer les notions de spectroscopie abordées dans les cours de physique et d'expliquer comment les astronomes réussissent ainsi à tirer des paramètres physiques sur les astres observés.

Nous abordons le principe de base de la dispersion de la lumière (expérience accessible dès le niveau collège). Utilisant une source thermique puis une tube fluo et enfin trois lasers bleu, vert, rouge superposés, les élèves observent facilement qu'une

<sup>1</sup> Canada-France-Hawaii Telescope, Mauna Kea (Hawaï).

<sup>2</sup> William Herschel Telescope, à La Palma (Canaries).

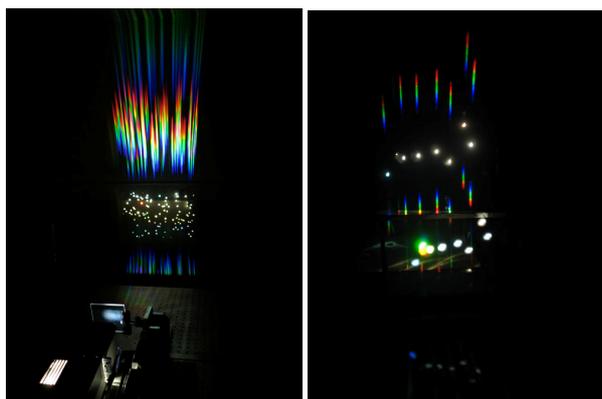
<sup>3</sup> Very Large Telescope, au Cerro Paranal (Chili).

source de lumière blanche peut être de nature différente et que sa simple dispersion donne des spectres différents, continu ou de raies d'émission. De tels spectres permettent d'obtenir, par exemple, la composition chimique de la source.

Pour illustrer ce principe, nous proposons un atelier d'identification des raies dans un spectre du Soleil pris avec un spectroscopie Lhires III. Philippe Merlin a développé sous Géogebra un TP (niveau lycée) qui conduit les élèves à retrouver les éléments chimiques présents dans l'atmosphère du Soleil. Les spectres d'autres étoiles brillantes pris de jour<sup>4</sup> sur le télescope de 1 m de l'observatoire avec le Lhires permettent d'aborder la notion de types spectraux.

En spectro « classique », on place une fente étroite sur une source avant d'en disperser la lumière. Mais le temps de télescope est rare et précieux. Les astronomes doivent le rentabiliser au maximum. C'est pourquoi ils ont cherché le moyen d'obtenir simultanément des spectres de plusieurs objets du champ observé : c'est la spectroscopie multi-objets. Un spectrographe multi-objets va sélectionner plusieurs sources du champ en plaçant une fente étroite sur chacune d'elles. La position des fentes est calculée pour éviter tout chevauchement puis découpée au laser dans un masque métallique.

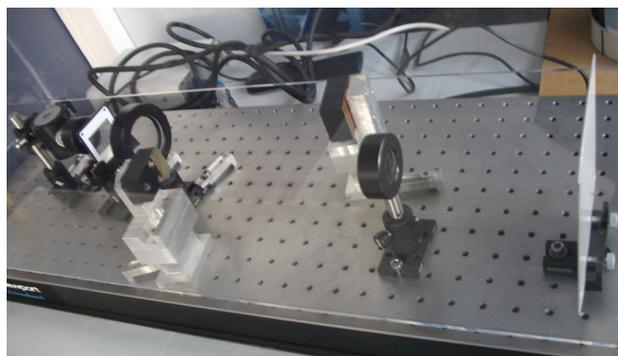
Notre montage permet de montrer le problème de la perte d'information due au chevauchement des spectres dans un champ d'étoiles et donc la nécessité d'utiliser un masque pour sélectionner certaines étoiles et éviter le chevauchement des spectres (figure 3). Un champ réel observé au télescope Keck (Mauna Kea, Hawaï) et le masque correspondant sont montrés aux élèves.



**Fig.3.** Spectroscopie multi-objets : sans masque à gauche (le chevauchement des spectres rend l'image inexploitable) et avec masque à droite (spectres exploitables pour identification).

<sup>4</sup> Nous avons obtenu des spectres d'étoiles brillantes en plein jour mais le rapport signal / bruit est faible.

Pour les lycéens, on présente ensuite une maquette expliquant le principe de la spectroscopie intégrale de champ (figure 4), principe de base de l'instrument MUSE, spectrographe 3D, qui est à la fois un imageur et un spectrographe. Le concept de MUSE, dû à l'astronome Georges Courtès, permet d'obtenir simultanément un spectre pour chaque point du champ de vue<sup>5</sup>. Grâce à un tel instrument il est alors possible d'explorer l'univers en 3 dimensions : deux dimensions d'espace et une dimension spectrale.



**Fig.4.** Maquette d'un élément du spectrographe intégral de champ MUSE.

## Balance de Cavendish : peser la Terre et mesurer G

Tous les corps s'attirent. La gravitation est partout ; où que nous soyons sur Terre, nous ressentons ses effets. Cette force universelle qui dépend des masses et du carré de leur distance, est extrêmement difficile à mettre en évidence entre deux objets sur Terre. Capitale dans l'homogénéisation de la loi de Newton  $F = G M.m / d^2$ , la constante universelle de la gravitation G fait partie des constantes fondamentales régissant la physique.

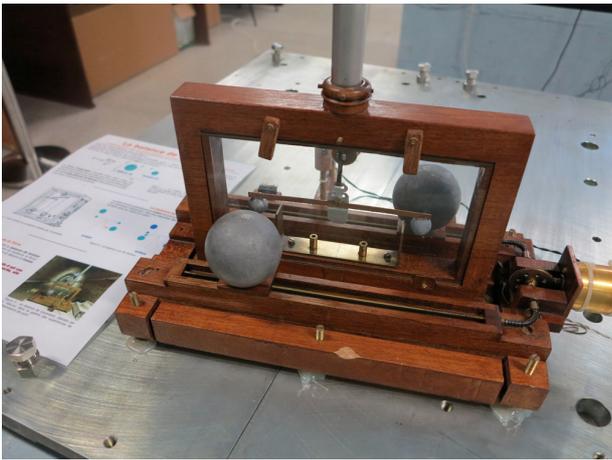
Construite initialement en 1798 par Cavendish pour connaître la masse de la Terre et donc mesurer sa densité moyenne, cette balance permet aussi de mesurer la constante de la gravitation universelle G, constante de la physique qui est encore très mal mesurée<sup>6</sup>.

L'expérience que nous proposons a, elle aussi, été développée par Georges Patrel qui a réalisé l'exploit de la fabriquer en totalité. Il l'a décrite dans les Cahiers Clairaut n° 104 (2003), et n° 105 (2004).

Georges Patrel a fait aussi une maquette de la balance pour en expliquer clairement le principe avant de procéder à l'expérience (figure 5).

<sup>5</sup> Vous trouverez les détails du fonctionnement sur <http://muse.univ-lyon1.fr/spip.php?article111&lang=fr>

<sup>6</sup> L'incertitude sur G est de l'ordre de  $10^{-4}$ , ce qui est beaucoup comparée aux autres constantes de la physique.

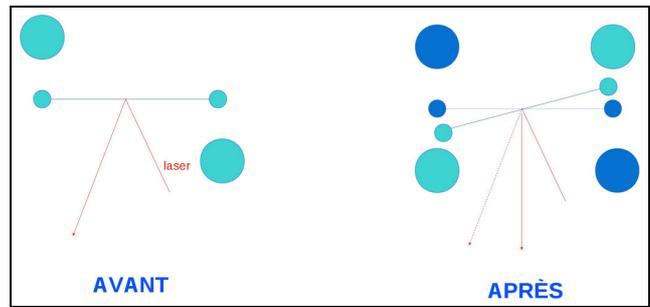


**Fig.5.** La balance de Cavendish et la maquette de la balance historique réalisées toutes deux par Georges Paturel

Le principe est simple mais cette expérience est particulièrement délicate à réaliser et rares sont celles qui ont été montées. L'atelier proposé est particulièrement marquant puisqu'il permet d'arriver à la masse de la Terre !

C'est une balance de torsion, dont le principe a été développé par Charles Coulomb pour mesurer la force entre deux charges électriques. Le fléau de la balance est suspendu à un ruban de quelques microns d'épaisseur. Il peut tourner en tordant plus ou moins le ruban. Dans l'expérience de Cavendish, c'est la force de gravitation qui est compensée par la torsion du ruban. Deux petites sphères de masse  $m$  sont fixées au fléau à une distance  $b$  du ruban, un petit miroir est collé au milieu sous le fléau. Un faisceau laser se réfléchit sur le miroir et forme un spot sur un écran millimétré placé à une distance  $L$ .

Pour commencer, les deux grosses sphères sont en position et le fléau est stable (figure 6 « avant »). Quand on translate les grosses sphères pour inverser leur position par rapport au fléau (figure 6 position bleu clair « après »), les deux petites sphères vont être attirées par la grosse sphère la plus proche et le fléau va donc tourner d'un angle  $\alpha$  jusqu'à ce que la torsion du ruban équilibre la force gravitationnelle.



**Fig.6.** À gauche, la position de départ de l'expérience, le fléau est en équilibre, le spot laser est repéré sur l'écran millimétré. À droite, la rotation du fléau et donc du spot laser après que les grosses sphères aient été translatées de la position bleu foncé (état initial) à la position bleu clair (état final).

L'angle  $\alpha$  est mesuré par le déplacement du spot sur l'écran. Le fléau va osciller avant de retrouver une position d'équilibre. La mesure de la fréquence  $T$  d'oscillation permet d'obtenir la valeur la constante de torsion du ruban  $C = 8\pi^2 mb^2/T^2$ .

Quand la balance est de nouveau stabilisée, c'est qu'il y a équilibre entre le couple de torsion du ruban  $C\alpha$  et le couple gravitationnel exercé par les 2 paires de sphères dans un sens puis dans le sens opposé. On en tire la valeur de  $G$ .

Pour les calculs, on pourra se reporter au n° 104 des Cahiers Clairaut (2004) disponible en ligne.

Une fois que l'on connaît  $G$ , on peut déterminer la masse de la Terre puisque l'on connaît son rayon et l'intensité du champ de pesanteur.

La balance est d'une sensibilité extrême, les mesures doivent être faites dans un environnement parfaitement stable, sans que personne ne s'approche de la balance. Après avoir eu une présentation de la balance et de son principe de fonctionnement, les élèves font les mesures de déplacement du spot et c'est seulement après qu'ils s'en approchent pour la détailler.

## La détection des exoplanètes par la méthode des transits

La maquette permettant d'expliquer la détection des exoplanètes par la méthode des transits est basée sur des mesures de photométrie, notion abordée dans les programmes de physique du lycée.

La maquette réalisée consiste en une petite sphère (la planète) qui tourne à une vitesse ajustable autour d'une sphère lumineuse (l'étoile). Les paramètres variables sont : la distance étoile-observateur, l'inclinaison du plan de révolution de la planète par rapport à la ligne de visée, la dimension de la sphère-planète. Le photomètre enregistre le flux à une cadence choisie par les manipulateurs afin de définir les conditions qui permettront ou non de

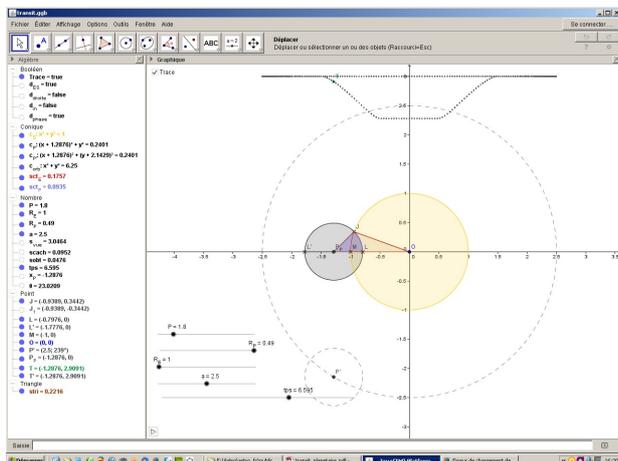
détecter une variation du signal enregistré quand la planète passe devant l'étoile. Les élèves doivent donc définir plusieurs paramètres :

- (1) l'inclinaison maximale du plan de l'orbite permettant la détection du passage ;
- (2) l'influence de la distance observateur-étoile sur la possibilité de détection ;
- (3) la taille minimale de la planète détectable.

Pour compléter cette expérience, Philippe Merlin et Sylvie Thiault ont développé un atelier GeoGebra dans lequel les élèves simulent les transits planétaires et tracent les courbes de lumière observées pendant une orbite complète de l'exoplanète. Pour simplifier le problème, l'orbite est considérée circulaire et l'observateur situé dans le plan de l'orbite. Le but est de calculer les surfaces occultées pour obtenir la diminution de luminosité due au passage de la planète devant son étoile (figure 7).

Des curseurs permettent de faire varier le rayon de la planète et celui de l'étoile, la distance étoile-planète, la période de la planète et le temps. L'ensemble pourra être animé en validant un bouton d'animation sur le curseur temps.

Dans le cas d'un travail personnel, les élèves sont encouragés à élaborer leur propre modélisation du phénomène sous GeoGebra ; dans le cadre d'une classe en visite, les élèves construisent l'animation en étant guidés pas à pas dans la résolution du problème.



**Fig.7.** Résultat de la modélisation d'un transit planétaire sous GeoGebra : la courbe de lumière est tracées en haut. Des curseurs permettent d'ajuster la taille de la planète, le rayon de son orbite et sa période de révolution, le diamètre de l'étoile et de faire varier le temps.

## Banc de démonstration d'optique adaptative

Obtenir des images à haute résolution angulaire est un but recherché sur tous les télescopes du monde. Avec ce banc, nous souhaitons montrer et faire comprendre aux lycéens et enseignants la raison et le principe de la correction d'images par l'optique adaptative pour améliorer la qualité des images obtenues avec les télescopes au sol. C'est un domaine de recherche dans lequel une des équipes de l'observatoire, l'équipe Airi, est très fortement impliquée et reconnue au niveau national et international. Ce domaine de la haute résolution angulaire est un domaine de recherche très actif et en pleine évolution avec une forte activité de Recherche & Développement.

Le but de ce banc est de favoriser l'apprentissage par une formation expérimentale et d'améliorer la diffusion des techniques innovantes développées pour l'astrophysique.

Encore en phase de développement, ce banc didactique permettra d'expliquer cette technique complexe et d'aborder les techniques optiques mises en œuvre et les développements informatiques requis. La lumière provenant des astres est perturbée par son passage dans l'atmosphère. Les images obtenues avec les télescopes sont donc dégradées et ont une résolution bien inférieure à la résolution théorique. Il est cependant possible de corriger cette dégradation des images dues à la traversée de l'atmosphère terrestre par les techniques d'optique adaptative en modifiant en temps réel la courbure des miroirs. Les techniques sont délicates et continuent à faire l'objet de R&D en astrophysique. Mais les résultats obtenus sur les télescopes tels que les télescopes européens VLT implantés au Chili permettent de rivaliser avec la qualité des images obtenues avec des télescopes spatiaux.

Nous basons cette expérience sur le kit complet de banc d'optique adaptative proposé par Thorlabs qui comprend un miroir déformable avec 36 « actuateurs », un analyseur de front d'onde Shack-Hartmann et toute l'optique et les logiciels nécessaires. Il fonctionne dans le domaine du visible et du proche infra rouge, entre 400 et 1100 nm, et satisfait aux normes de sécurité pour l'accueil du public.

### Bibliographie

<http://tpevd11s2.jimdo.com>

Documentaire CapCanal 52 min, 2012 : « de Ptolémée aux neutrinos », disponible en DVD chez C Productions Chromatics.

Cahiers Clairaut : n° 96 (2002), n° 104 (2003), n° 105 (2004). ■