

# LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 150 - Juin 2015 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

# 150

Numéro 150 - été 2015



ISSN 0758-234X

# Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

## Présidents d'honneur :

Jean-Claude Pecker  
Lucienne Gouguenheim  
Georges Paturel

## Bureau du CLEA pour 2014

**Présidente** : Cécile Ferrari  
**Trésorière** : Sylvie Thiault  
**Trésorière adjointe** : Chantal Lecoutre  
**Secrétaire** : Danièle Imbault  
**Secrétaire adjoint** : Jean-Luc Fouquet

## Responsables des groupes

**Vie associative** : Jean-Michel Vienney

**Cahiers Clairaut** : Christian Larcher

**Productions Pédagogiques** : Pierre Causeret

**Communication** : Charles-Henri Eyraud

**École d'Été d'Astronomie** : Danièle Imbault

## Responsables du site :

Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



Merci à tous celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Frédéric Amauger, Francis Berthomieu, Michel Bobin, Christian Bracco, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Jean-Pierre Delavalance, Jacky Dupré, Cécile Ferrari, Thierry Foglizzo, Sören Frappart, Valérie Frède, Michèle Gerbaldi, Samuel Haspot, Alexandra Herrgott, Christian Larcher, Pierre Lauginie, Noël Martin, Georges Paturel, Daniel Paupart, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Isabelle Vauglin,

Les auteurs recevront plusieurs numéros 150, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Photo d'un village bourguignon réalisée avec un simple réseau CLEA devant l'objectif. Chaque source lumineuse a été décomposée par ce réseau pour donner un spectre. On voit surtout les spectres des éclairages publics et les spécialistes pourront rechercher, à l'aide des raies d'émission bien visibles, quels types de lampes sont utilisés ici. Le spectre visible en bas, à gauche de l'église, est celui d'Arcturus, l'étoile étant en dehors de l'image. On remarquera que le spectre d'Arcturus, situé sous l'étoile, a des couleurs inversées par rapport aux spectres des lampadaires, situés au-dessus de ceux-ci. En effet, le réseau crée deux spectres du 1er ordre de chaque côté de la source lumineuse et inversés l'un par rapport à l'autre. Il faut signaler que les lampadaires de ce village sont éteints à 23 h, ce qui lui a permis d'obtenir deux étoiles de l'ANPCEN.

# Les Cahiers Clairaut

Été n° 150

## Éditorial

Avec cette publication nous fêtons la parution du 150<sup>e</sup> exemplaire des Cahiers Clairaut, une occasion de remercier les nombreux et fidèles lecteurs qui nous font confiance parfois depuis fort longtemps. Afin de marquer cet événement nous avons décidé de réaliser un numéro plus conséquent que les précédents ; son thème est consacré à la lumière, puisque l'année 2015 est déclarée par l'ONU : *année internationale de la lumière et des techniques utilisant la lumière*.

La lumière est le symbole de la connaissance (*le siècle des Lumières*), de la vérité, « *La connaissance et la vérité [...] sont, comme la lumière et la vue [...] semblables au Soleil dans le monde visible* » écrit Platon dans *La République*. C'est aussi la base de mythologies : Prométhée dérobe aux dieux le feu (symbole de la connaissance) pour le donner aux hommes. Platon développe l'allégorie de la caverne (les hommes n'accèdent qu'aux ombres du savoir).

Dans de nombreuses religions ou dans les mouvances franc-maçonniques, les adeptes sont conviés à une mort initiatique pour mieux renaître à la lumière. Dans la vie quotidienne la naissance et la mort sont comparés au jour et à la nuit : un nouvel enfant « *voit le jour* », un vieillard « *s'éteint* ».

Les phénomènes lumineux ne cessent de susciter notre curiosité. La nature de la lumière a toujours été assez mystérieuse et le concept a beaucoup évolué : onde ou particule ? Onde et particule ? Ni l'une ni l'autre ? Chaque siècle a « sa vision » reposant sur des expériences qui se veulent décisives. C'est ainsi que, pour Arago, l'expérience « cruciale » consistait à comparer la vitesse de propagation de la lumière dans l'air et dans l'eau.

En astronomie, la lumière véhicule l'essentiel de notre connaissance sur les astres. Pour déterminer la distance de la Terre au Soleil Le Verrier avait besoin d'une valeur précise de sa vitesse de propagation déterminée sans utiliser les astres.

Il n'y a pas de lumière sans ténèbres ; il n'y a pas de vie sans mort.

Nous pensons tous au départ de Lucette Bottinelli et de Lionel Muller dont vous trouverez le souvenir à travers quelques témoignages.

Christian Larcher, pour l'équipe.

## Avec nos élèves

### La fontaine aux supernovae

Noël Martin, Thierry Foglizzo p 2

## Histoire

L'astronomie à portée de main, quand l'astronomie fait signe aux Sourds Frédéric Amauger p 5

## Thème : LA LUMIÈRE

p 10

## Histoire

La longue histoire inachevée des représentations sur la lumière Christian Larcher p 11

## Coin des petits curieux

Arc-en-ciel Jean Ripert p 15

## Article de fond

La vitesse de la lumière au XIX<sup>e</sup> siècle Pierre Lauginie p 18

## Article de fond

Les parhélies Pierre Causeret p 23

## Jeux

Mots croisés lumineux Pierre Causeret p 25

## Témoignage

Le Halo de Boukhara Jean-Pierre Devalance p 26

## Avec nos élèves

Expériences de physique fondamentale à l'observatoire de Lyon Isabelle Vauglin p 28

## Histoire

### Auguste Fresnel

Christian Bracco, Samuel Haspot p 33

## Article de fond

Pourquoi doit-on considérer la vitesse de la lumière comme constante dans un champ de gravitation ? Georges Paturel p 38

## Environnement

### ANPCEN

Paul Blu p 40

## Ciel d'été

Pierre Causeret p 41

## Article de fond

Le développement des connaissances en astronomie Valérie Frède, Sören Frappart p 42

## Jeux

### La navette de l'espace lettres

Michel Bobin p 46

## Vie associative

Hommage à L. Muller et Lucette Botinelli p 47

## Lecture pour la marquise

### À la rencontre des comètes

Les constellations des Potins d'Uranie p 51

## Observation

### L'éclipse totale de Lune du 28 septembre 2015

Pierre Causeret p 53

### Retour sur l'éclipse de Soleil du mois de mars

Pierre Causeret p 55

## Jeux

Solutions navette et mots croisés p 56

# AVEC NOS ÉLÈVES

## La fontaine aux supernovæ

Noël Martin, Institut de Physique Nucléaire, Orsay  
Thierry Foglizzo, Commissariat à l'Énergie Atomique, Saclay

*Les explosions des supernovæ résultent d'un mécanisme complexe à étudier. La modélisation théorique de l'effondrement qui précède l'explosion des SN est très coûteuse en temps de calcul. La fontaine aux supernovæ recourt à une analogie hydraulique qui permet de rendre compte de certains aspects du phénomène. Cette analogie, utilisée par la recherche, débouche sur un excellent outil pédagogique.*

L'espace regorge d'un grand nombre d'étoiles différentes, qui peuvent être plus légères ou des dizaines de fois plus massives que le Soleil. La masse joue un rôle primordial dans l'évolution de l'astre : les plus massives évoluent plus vite et peuvent avoir une durée de vie mille fois plus brève qu'une consœur plus légère. Les supernovæ correspondent à un phénomène d'explosion si lumineux qu'il peut être visible en plein jour. Ce phénomène survient à la fin de l'évolution des étoiles supergéantes. Ces étoiles très rares ne représentent que 0,6 % de la population stellaire.



Fig.1. La fontaine aux supernovæ lors de sa présentation au public au Palais de la découverte.

### Une fin mouvementée

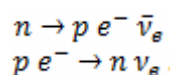
Les étoiles supergéantes se caractérisent par une masse de 10 à 70 fois la masse du Soleil, avec un rayon de 30 à 500 fois celui du Soleil. L'importante masse de ces étoiles leur permet d'atteindre la production du fer  $^{56}\text{Fe}$ , considéré comme l'élément le plus stable car son noyau possède l'énergie de liaison par nucléon la plus forte. Pour

cette raison c'est le dernier noyau accessible par une réaction de fusion thermonucléaire. Toute réaction de fusion du  $^{56}\text{Fe}$  avec un autre noyau – qu'il soit aussi élémentaire que l'hydrogène ou plus complexe – aurait pour produit un noyau moins lié.

Au terme de son évolution, l'étoile supergéante possède donc un noyau de fer en son centre. Les autres éléments sont répartis par couches superposées, de la moins dense à sa surface, à la plus dense dans le cœur. Le cycle de combustion s'amorce avec la fusion de l'hydrogène en hélium ( $^4\text{He}$ ) dans un milieu où la température est d'environ  $2.10^7$  K (1,72 keV). Ce cycle passe par la production de carbone ( $^{12}\text{C}$ ), de néon ( $^{20}\text{Ne}$ ), d'oxygène ( $^{16}\text{O}$ ), de silicium ( $^{28}\text{Si}$ ), pour terminer à environ  $3.10^9$  K (259 keV) par la synthèse du fer ( $^{56}\text{Fe}$ ).

L'effondrement s'amorce quand la masse du cœur de fer s'approche de la *masse de Chandrasekhar* (1,5 masse solaire). Elle correspond à la masse maximale que peut supporter la pression de dégénérescence des électrons avant que l'effondrement gravitationnel ne débute. Le cœur de fer est alors d'un diamètre d'environ 1500 km.

La fraction d'électrons dans le milieu est maintenue par l'équilibre entre deux réactions nucléaires, l'une dite désintégration  $\beta$  car elle s'accompagne de l'émission d'un électron, et l'autre appelée capture électronique ou  $\beta$  inverse :



Lorsque l'effondrement commence, l'équilibre bêta se déplace vers la production de neutrons (via la capture électronique). Cependant, il va provoquer une baisse importante du nombre d'électrons dans le milieu, et va faciliter l'effondrement. Le milieu s'enrichit donc en neutrons, jusqu'à ce qu'ils constituent environ 80% des nucléons.

L'effondrement qui a duré une fraction de seconde s'arrête brutalement lorsque les nucléons sont trop proches les uns des autres. Le cœur dur de l'interaction forte se définit par le moment où elle devient très répulsive.

À ces échelles de densité, parler de noyaux n'a plus de sens : seul subsiste un mélange de neutrons, protons et électrons (matière *npe*) qui forment une protoétoile à neutrons. Le mélange est si dense qu'il en devient opaque aux neutrinos.

Au regard de la faible durée de l'effondrement du cœur de fer on comprend que les couches supérieures (H, He, C, Ne, O, Si) n'en soient qu'à l'amorce de leur chute. Au terme de sa chute, la partie externe du cœur de fer rebondit sur la protoétoile à neutrons. De ce rebond une onde de choc va naître et se propager jusqu'à environ 150 km du centre. Une partie de l'énergie de l'effondrement est consommée pour dissocier le fer en nucléons lorsqu'il traverse l'onde de choc. Le mécanisme de mise en mouvement du choc pour conduire à une explosion soulève encore un grand nombre d'hypothèses. On suppose qu'il est principalement produit par l'absorption d'une fraction du flux de neutrinos par la couche de matière dense intérieure au choc stationnaire. Si le choc n'est pas mis en mouvement assez tôt, la masse qui s'accumule sur la protoétoile à neutrons atteint un seuil critique d'environ 2 masses solaires et celle-ci s'effondre en trou noir qui engloutit toute l'étoile. Si le choc est efficacement poussé par l'absorption des neutrinos, l'explosion des couches externes disperse dans le milieu interstellaire les éléments synthétisés par l'étoile au cours de sa vie.

Lors de l'effondrement une grande quantité de neutrinos sont produits par capture électronique. Les photons qui sont aussi produits ont plus de difficultés à s'extraire car ils interagissent beaucoup plus avec la matière que les neutrinos. Les neutrinos sont donc les premiers témoins de l'explosion d'une supernova. La supernova SN 1987A (23 février 1987) s'est manifestée par une augmentation rapide et soudaine du nombre de neutrinos détectés sur Terre, et ce *trois heures* avant l'arrivée des premiers photons.

## L'expérience

La physique des supernovæ soulève un nombre important de questions qui n'ont pas toutes trouvé de réponse. Ainsi la mise en mouvement du choc est encore partiellement inexplicée. Ces difficultés sont dues à la complexité des phénomènes qui

entrent en jeu lors de l'effondrement du cœur. En effet sa description fait appel à la physique nucléaire, l'interaction des neutrinos avec la matière, l'hydrodynamique et la relativité générale. C'est dans ce cadre qu'est né le projet SuperNova to Neutron Stars (SN2NS) soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Il réunit une dizaine de chercheurs ayant pour objet d'étude les supernovæ et les étoiles à neutrons, abordées par des domaines différents de la physique.

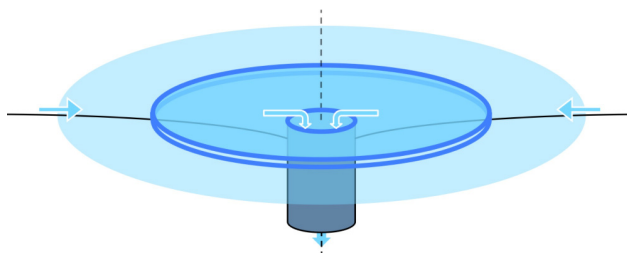
La modélisation théorique de l'effondrement du cœur de l'étoile s'effectue par le biais de simulations numériques. Elles sont très coûteuses en temps de calcul et exploitent les supercalculateurs les plus puissants. Ces simulations numériques ont révélé la présence d'une instabilité hydrodynamique de l'onde de choc d'accrétion sur la protoétoile à neutrons. Cette instabilité appelée SASI (Stationary Accretion Shock Instability) vient rompre la symétrie sphérique lors de l'explosion. Les observations indiquent par ailleurs que l'explosion des supernovæ est effectivement asymétrique, à la fois du point de vue des inhomogénéités de composition des éjectas et par la mise en mouvement de l'étoile à neutron résiduelle. Dans l'étoile les asymétries induites par l'instabilité SASI peuvent accélérer la protoétoile à neutrons à une vitesse de plusieurs centaines de kilomètres par secondes conforme aux observations, pendant que la quantité de mouvement opposée est emportée par la matière stellaire éjectée. Cette asymétrie peut aussi contribuer à faire tourner l'étoile à neutrons jusqu'à 10 tours par seconde, tout en communiquant aux éjectas un moment cinétique opposé.

L'expérience SWASI (Shallow Water Analogue of a Shock Instability, couche d'eau mince analogue d'une instabilité de choc) a mis en évidence ce phénomène d'instabilité grâce à l'analogie d'un écoulement d'eau publié dans la revue *Physical Review Letters* (Foglizzo et al. 2012).

Facile à mettre en œuvre dans le cadre d'une exposition publique, *la fontaine aux supernovæ* a été présentée pendant deux mois au *Palais de la découverte* à Paris dans le cadre de l'événement *Un chercheur une manip'* (décembre 2013-février 2014).

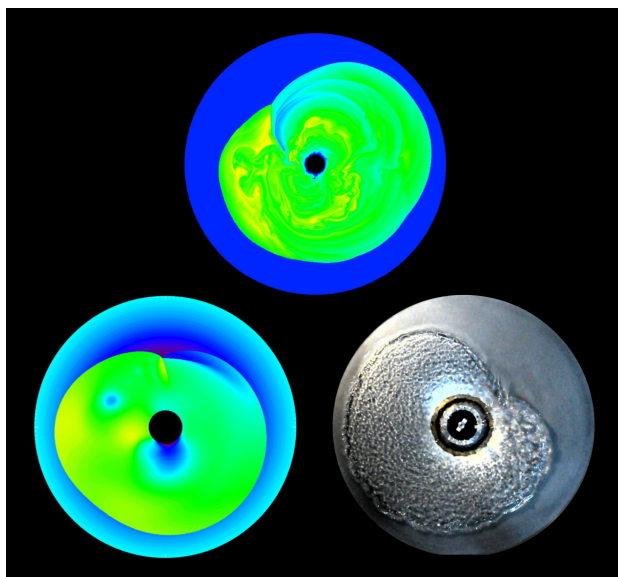
La fontaine se compose d'une zone annulaire d'injection d'eau en couche fine qui s'écoule jusqu'au centre de la fontaine le long d'un profil axisymétrique de forme hyperbolique en  $1/r$ , (figure 2). Comme on l'observe sur la vue en coupe, ce

profil produit une attraction radiale similaire à celle d'une protoétoile à neutron qui serait au centre. Au centre de la fontaine, l'eau s'écoule par le bord supérieur d'un cylindre dont le rayon délimite la surface de la protoétoile à neutrons.



*Fig.2. Vue de la cuve de la fontaine en perspective cavalière.*

Lorsque l'eau circule dans la fontaine (figure 3), deux zones d'écoulement apparaissent. Elles sont délimitées par un ressaut hydraulique qui correspond au choc d'accrétion stationnaire dans l'étoile. Du bord de la fontaine au ressaut, on observe la zone où le liquide se propage plus rapidement que les vagues. Cette zone correspond à la région « supersonique » dans l'étoile, là où le gaz tombe en chute libre. Dans la zone plus profonde située après le ressaut, l'eau se propage moins vite que les vagues. Cette zone correspond à la région dite « subsonique » au sein de l'étoile, où se développe l'instabilité SASI.



*Fig.3. De haut en bas, et de gauche à droite, on observe successivement : (i) la simulation numérique montrant l'instabilité SASI, (ii) les résultats de simulation hydrodynamique SWASI, (iii) une photo du dispositif expérimental (La fontaine aux supernovae) lors de son fonctionnement. Le centre de chacune des figures correspond à la proto-étoile à neutron accrétant la matière.*

La fontaine aux supernovae exploite le parallèle entre les ondes sonores au sein d'un gaz (SASI) et les vagues à la surface de l'eau (SWASI). Le ressaut est initialement circulaire et stationnaire puis commence à osciller avec une période de 3 secondes. C'est à cet instant que le choc perd sa symétrie. Son oscillation se transforme ensuite en mouvement de rotation.

Nous avons disposé au centre de la fontaine un tourniquet mobile qui peut tourner librement et suivre les mouvements de l'eau. Par sa rotation dans le sens inverse du ressaut, ce tourniquet illustre la conservation du moment cinétique.

L'instabilité créée engendre la déformation du ressaut initial jusqu'à ce qu'il atteigne le bord de la fontaine dans une direction aléatoire, en quelques dizaines de secondes. Dans le cas de l'étoile, la taille du choc est un million de fois plus grande et les échelles de temps sont 100 fois plus courtes que dans la fontaine.

Comme il n'y a pas d'équivalent des neutrinos dans l'expérience SWASI, l'analogie astrophysique s'arrête avant la mise en mouvement accélérée du choc vers l'extérieur. Les travaux théoriques indiquent que les mouvements instables de SWASI sont produits par l'interaction entre les tourbillons et les vagues par le même mécanisme qui couple les tourbillons aux ondes sonores dans l'instabilité SASI au cœur de l'étoile.

## Conclusion

La fontaine est devenue un excellent outil pédagogique pour permettre au plus grand nombre de visualiser des phénomènes souvent considérés comme complexes et abstraits. Ces phénomènes se produisent loin de nous, à des échelles sans communes mesures avec notre quotidien et font appel à des processus physiques complexes. En plus du côté pédagogique, elle offre aux étudiants en sciences un exemple concret de ce que la recherche académique peut produire.

À l'issue de l'événement *Un chercheur une manip'*, la fontaine a été choisie par le *Palais de la découverte* à Paris, pour intégrer sa collection permanente. Le dispositif s'est vu récompensé par le prix « Le goût des Sciences » 2014 attribué par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

## L'astronomie à portée de main : quand le ciel fait signe aux Sourds

Frédéric Amauger

*Comment diffuser l'astronomie dans le langage des Sourds ? Comment décrire les phases de la Lune ? Comment désigner chaque planète par un geste ? L'auteur de cet article nous indique que « Raconter les phénomènes astronomiques en langue des signes c'est comme se faire soi-même le projectionniste d'un film qui montrerait en direct ce qui se passe ». L'association Planète Sciences, et l'Observatoire de Paris ont créé le collectif « Astro Vers Tous » puis, à l'occasion de l'Année Mondiale de l'Astronomie, la commission « Animation Astronomie Publics Empêchés »*

L'observation du ciel, même si elle se résume à observer la Lune, quelques étoiles la nuit ou la course du Soleil d'est en ouest, est certainement la chose la plus partagée du monde. Mais lorsqu'il s'agit de raconter, d'expliquer, et de faire naître des images plus abstraites, le langage s'avère un outil précieux. Les mots planète, étoile, galaxie, univers ont toujours fait rêver des générations d'enfants et d'adultes. Mais qu'en est-il pour les Sourds<sup>1</sup> dont la langue des signes est leur langue première ? Le signaire (vocabulaire en langue des signes) de l'astronomie existe-il dans cette langue ? Si oui, comment est-il diffusé chez les Sourds ? Et qui l'utilise vraiment ? Enfin, la langue des signes permet-elle d'exprimer tous les concepts abstraits de l'astronomie ? Quand une langue fait signe aux Sourds, l'astronomie est à portée de main !

### L'abbé de l'Épée, un précurseur du temps de la construction de l'Observatoire de Paris



Dans une lettre adressée à l'un de ses amis, l'abbé de l'Épée, précurseur de l'éducation des sourds, écrit : « Dîtes-moi donc, s'il vous plaît, Monsieur, qui est-ce qui instruira des sourds après moi ? Cet ouvrage est pénible par l'assiduité qu'il demande, il engage à des

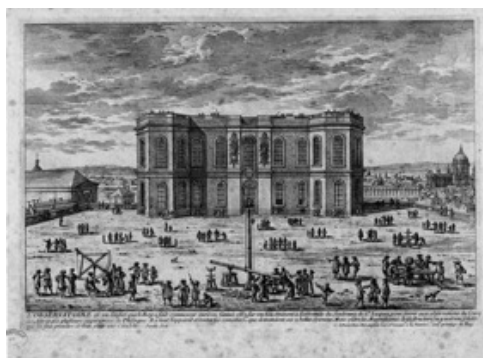
dépenses, et il ne rapporte rien. Trois pierres d'achoppement pour bien des personnes qui seroient d'ailleurs en état de s'y appliquer<sup>2</sup>. »

<sup>1</sup> L'utilisation de la majuscule au mot Sourd renvoie à la personne vue au travers du prisme culturel et linguistique, et dont la langue des signes est la langue d'expression et de construction identitaire.

<sup>2</sup> Lettre de M. l'Abbé, à M. l'Abbé\*\*\*, son intime ami, cité in *L'Abbé de l'Épée*, Maryse Bézagu-Deluy, Sehers, 1990, p. 288.

Malgré cet avertissement, l'abbé, dont la statue trône aujourd'hui au centre de la grande cour de l'Institut National de Jeunes Sourds à Paris, passera toute sa vie à rassembler chez lui de jeunes enfants sourds au contact desquels il développera un alphabet à deux mains. De plus, c'est le rassemblement de ces enfants qui, naturellement, aura développé l'envie de communiquer entre eux, ce qui aboutira à un perfectionnement de la langue des signes elle-même. Sa maison accueillera jusqu'à soixante enfants sourds, il aura pas moins de dix-neuf disciples qui fonderont ensuite dix-sept écoles pour les sourds.

Né en 1712 et vivant à Paris, l'abbé de l'Épée devait connaître l'Observatoire de Paris, construit seulement quarante années avant sa naissance.



Observatoire royal, façade sud, gravure de A. Perelle, Paris, chez N. Langlois, dernier tiers du 17e siècle ?

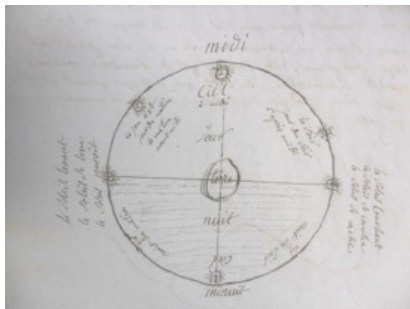
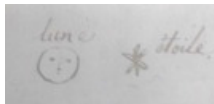
Sur une toile le représentant en présence de Louis XVI, l'abbé de l'Épée est fier de montrer les progrès réalisés par ses jeunes élèves sourds.

Or, sur cette peinture, on peut remarquer la présence d'un globe qui laisse supposer que l'abbé initiait les jeunes sourds à la géographie en particulier et aux sciences en général.



L'abbé de l'Épée instruisant ses élèves en présence de Louis XVI. Toile de Gonzague-Privat, 1875, © INJS de Paris.

Quid de l'astronomie ? Aucun document direct ne nous permet de prouver une initiation à l'astronomie par l'abbé de l'Épée lui-même. Cependant, à sa mort, lui succède l'abbé Sicard, dont nous avons retrouvé les cahiers originaux de ses cours dispensés à Paris aux enfants sourds. Sans ambiguïté, ces cahiers contiennent plusieurs éléments d'astronomie dont en particulier du vocabulaire simple (lune et étoile), mais aussi un schéma détaillé du mouvement du Soleil dans le ciel permettant de comprendre l'alternance jour/nuit.



Extraits des cahiers manuscrits de cours de l'abbé Sicard, archives de l'INJS, Paris, inédit.

Il ne fait donc aucun doute que, dès les débuts de la prise en charge éducative des enfants sourds en langue des signes, l'astronomie faisait partie du corpus enseigné, et ce, dans une période de l'histoire où l'astronomie française était rayonnante.

### Développement du vocabulaire de l'astronomie en LSF<sup>3</sup>

Plusieurs initiatives isolées ont existé en France pour diffuser les connaissances en astronomie auprès des Sourds. L'un des premiers Sourds guide conférencier a été Guy Bouchauveau qui, dans les années 1980 à la Cité des Sciences et de l'Industrie à Paris, a longtemps animé des présentations en langue des signes. Toute une génération de Sourds

se souvient encore de l'extraordinaire pouvoir visuel des images utilisées par ce conférencier qui savait transmettre avec passion les notions scientifiques et en particulier celles relatives aux phénomènes célestes.

Depuis, le vocabulaire de l'astronomie s'est peu à peu enrichi en langue des signes, du fait d'un besoin grandissant. Comme pour toute langue, le besoin crée le mot ou le signe. C'est ainsi que plusieurs nouveaux signes ont émergé au gré des expositions, des conférences, des ateliers qui étaient rendus accessibles aux les Sourds. L'absence d'un signe à un moment donné nécessitait donc de l'imaginer, voire d'en concevoir plusieurs. C'est ensuite l'usage qui, comme par un effet de sélection naturelle, faisait disparaître certaines versions signées d'un même signifié pour en laisser une en particulier se développer au détriment des autres et se voir consacrer ensuite comme signe standard.

Ce vocabulaire s'enrichit au fur et à mesure des besoins qui s'expriment, comme pour toute langue vivante. Prenons l'exemple de l'expression "phases de la Lune". Lors d'un atelier réalisé en 2012 avec

- Ainsi sont apparus les signes
- [COMÈTE],
- [ÉTOILE
- FILANTE],
- [SATELLITE
- NATUREL],
- [SATELLITE
- ARTIFICIEL],
- [VOIE
- LACTÉE],
- [GALAXIE
- SPIRALE],
- [GALAXIE
- ELLIPTIQUE]

Ce sont des dizaines de signes qui existent ainsi et l'essentiel du vocabulaire courant de l'astronomie peut, aujourd'hui, être exprimé en langue des signes.



© Stéphane Gonzalez

<sup>3</sup> Langue des signes française.



des élèves collégiens scolarisés à l'Institut National de Jeunes Sourds de Paris, je réalisais une animation sur le système Soleil-Terre-Lune. Après avoir évoqué les différents mouvements (rotation et révolution), la question du changement de l'apparence lunaire au cours d'un mois est apparue et les élèves Sourds m'ont donc posé la question fatidique : « Pourquoi y a-t-il une pleine Lune, une nouvelle Lune, des quartiers de Lune, etc. ? » Les signes utilisés alors par les élèves étaient compréhensibles par tous car relevant du vocabulaire usuel. Cependant, alors que les élèves disposaient du signaire permettant d'exprimer le nom de chacune des phases de la Lune, aucun signe n'existait pour les rassembler sous l'expression commune en langue française de « phases de la Lune ». Sous cette expression unique se cachent en réalité trois notions qu'il s'agit de montrer d'un seul tenant en langue des signes : la Lune, son apparence vue depuis la Terre et la dynamique d'un phénomène évolutif avec le temps. Comment synthétiser en un signe unique, simple et rapide à exécuter, cette triade de notions ? C'est une élève de la classe de cinquième qui m'a fourni la réponse à ce défi épineux. Avec tout le naturel dont les enfants sont capables, et avec un brin de malice et un sourire aux lèvres, cette jeune fille a proposé au groupe un signe dont le pouvoir évocateur était stupéfiant ! Il réussissait le tour de force de montrer d'un seul mouvement de la main active (celle qui, en langue des signes, bouge, contrairement à la main passive qui reste fixe) la face visible de la Lune de plus en plus illuminée au gré du passage du temps. Ce nouveau signe était d'une telle clarté et d'une telle évidence qu'il s'imposa immédiatement. Le hasard fit qu'une semaine plus tard se tenait une conférence internationale pour célébrer le tricentenaire de la mort de l'abbé de l'Épée, à Paris, où je devais intervenir pour une communication sur l'astronomie en langue des signes. J'ai soumis à l'assistance la proposition de la jeune collégienne pour exprimer « les phases de la Lune » et je sais que ce signe a maintenant voyagé jusqu'aux États-Unis et dans d'autres pays.

## La LSF comme vecteur efficace de conceptualisation en astronomie

L'exemple des noms des planètes du système solaire est particulièrement représentatif de l'iconicité de la langue des signes, c'est-à-dire de sa propension à montrer ce qui est dit. Il n'est pas question d'épeler avec l'alphabet gestuel (dactylologie) le nom des corps chaque fois que nécessaire. C'est pourquoi, des noms-signes leur ont

été attribués, comme cela se pratique pour les personnes signantes. Un nom-signe est un geste attribué à un corps et qui représente son prénom ou son nom de façon synthétique. Le plus souvent, il est formé d'une caractéristique du corps auquel il est associé. Par exemple, le nom-signe d'Albert Einstein est [CELUI QUI TIRE LA LANGUE], en référence à la célèbre photographie qui le montre ainsi. C'est sur ce principe que les planètes du système solaire ont toutes été baptisées d'un nom-signe qui leur est propre, à partir d'une propriété qui les distingue tout spécialement. Ainsi, la Terre est [LE CORPS QUI TOURNE SUR LUI-MÊME], Jupiter est [LA PLANÈTE AVEC LA TACHE ROUGE] et Saturne est [LA PLANÈTE AVEC LE GROS ANNEAU]. Ainsi, les locuteurs de la langue des signes associent immédiatement le nom-signe d'une planète à ce qu'elle est dans la réalité, ou du moins, à l'une de ses caractéristiques physiques.

L'expérience de l'animation d'ateliers d'astronomie en LSF a montré que le caractère iconique, c'est-à-dire monstratif, de cette langue est un atout majeur pour la compréhension des concepts.



La Terre vue par Apollo 17, © NASA (libre de droits).  
Jupiter, © NASA.  
Saturne, © NASA.

Bien plus, il s'agit d'un avantage décisif sur le langage oral qui « dit du dire » sans convoquer d'image dans l'esprit de celui qui écoute ce discours. À l'opposé, en langue des signes, on montre ce que l'on exprime. La déformation de l'espace-temps s'opère ainsi sous nos yeux, et cette expression qui engendre très souvent de l'incompréhension chez les entendants, ne pose aucun problème de conceptualisation pour les locuteurs de la langue des signes. De même, l'organisation générale du système solaire, avec les différents mouvements des corps qui le composent, est montrée visuellement comme si l'on portait un regard de l'extérieur, voyant tout l'ensemble, avec sa distribution spatiale et les mouvements qui l'animent. Les éclipses de Soleil et de Lune ne peuvent être confondues en langue des signes puisque la configuration spatiale des trois corps Soleil-Terre-Lune est physiquement représentée dans le bon ordre, montrant ainsi clairement quel corps éclipse quel autre. Ainsi, raconter les phénomènes astronomiques en langue des signes, c'est comme se faire soi-même le projectionniste d'un film qui montrerait en direct ce qui se passe, sans la médiation souvent confuse des mots qui ne font sens que pour ceux qui leur associent un concept clair. Mais quid des jeunes apprenants dans ce cas ? Les jeunes Sourds signants ont ainsi la chance de *voir* les phénomènes et d'y assister comme s'ils avaient lieu devant eux.

## Se regrouper pour être plus visibles : la naissance d'*Astro Vers Tous*

Face au constat du nombre insuffisant de lieux de transmission de l'astronomie en langue des signes, des bénévoles de l'association d'éducation populaire *Planète Sciences*<sup>4</sup> se sont rapprochés en 2006 de l'Observatoire de Paris pour créer un collectif pouvant porter, à l'échelle nationale, des actions à destination des Sourds. Les astronomes professionnels Dominique Proust et Régis Courtin ont été les premiers à contribuer à la création d'*Astro Vers Tous* (AVT). Puis, en 2009, à l'occasion de l'Année Mondiale de l'Astronomie, plusieurs actions ont été menées par la commission « Animation Astronomie Publics Empêchés », saluées par Catherine Césarsky qui coordonnait au niveau international les actions de AMA2009. Depuis lors, Danielle Briot de l'Observatoire de

Paris et Jean-François Soulier de l'association *Des étoiles pour tous*, ont rejoint le groupe AVT dont les activités se sont étendues à un public plus large que les seuls Sourds : enfants hospitalisés, détenus en prison, personnes en fauteuil roulant, etc.



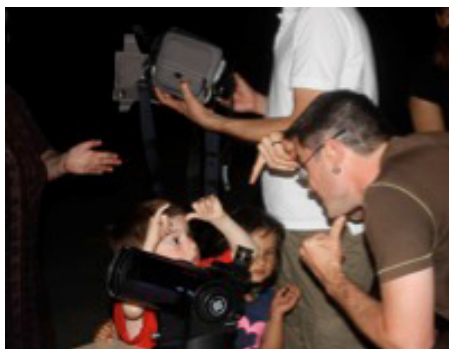
L'union des forces vives de chaque structure partenaire a ainsi permis d'élargir une offre restée jusque-là parcellaire et peu visible. Le collectif AVT propose aux jeunes qui n'ont pas accès à la culture scientifique et technique par les voies classiques de s'initier et de réaliser des projets expérimentaux en astronomie. Il met à leur disposition des moyens techniques adaptés (lumières rouges pour communiquer en LSF la nuit sans être éblouis, cartes 3D pour les malvoyants, handiscope<sup>5</sup> pour les personnes en fauteuil,...). Ce sont des centaines de jeunes qui ont ainsi pu bénéficier de ses animations adaptées.

L'association Planète Sciences poursuit aujourd'hui ses actions à destination des Sourds, dans les

<sup>4</sup> <http://www.planete-sciences.org/astro/>

<sup>5</sup> <http://www.desetoilespourtous.fr/index.php>

structures associatives ou les établissements scolaires, via le dispositif *Arpenter l'Univers*<sup>6</sup>.



## Diffuser pour mieux faire connaître l'astronomie en LSF

Parallèlement aux actions menées sur le terrain, un travail de diffusion a été réalisé via différents supports.

Sur Internet, le site Websourd est un média d'information en langue des signes qui propose des vidéos sur le thème des sciences en particulier. Une série de vidéos sur une trentaine de thèmes liés à l'astronomie a été réalisée entre 2010 et 2014.

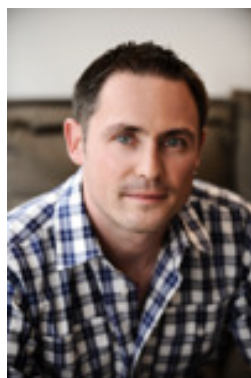
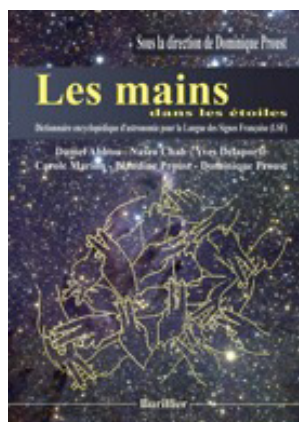


Parmi ces thèmes, on trouvera : la Lune, les étoiles filantes, les éclipses, les aurores polaires, les grands mystères de l'univers, le big-bang, mais aussi les astronomes sourds célèbres, les sites français astro accessibles, etc. Chaque thème inclus en outre une explication du vocabulaire scientifique qui lui est associé, et le signaire (vocabulaire en LSF) est montré en vidéo.

Plusieurs publications papier ont aussi été réalisées, dont un dictionnaire du vocabulaire de l'astronomie en LSF, sous la direction de l'astronome Dominique Proust et une trilogie romanesque, dont l'héroïne Sourde part en quête des grandes questions philosophiques posées par l'Univers et la vie.

Au XIX<sup>e</sup> siècle, Ferdinand Berthier notait que les « signes ne nomment pas les choses, mais qu'ils

peignent, ou pour parler philosophiquement, qu'ils sont la véritable représentation des idées. » C'est peut-être pour cette raison qu'il est si utile et nécessaire de poursuivre la transmission et le partage des savoirs de l'astronomie aux Sourds.

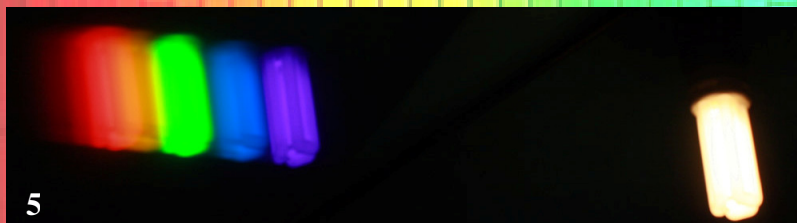


**Frédéric AMAUGER** est professeur agrégé de sciences physiques et diplômé en astrophysique. Locuteur de la langue des signes française, il anime des conférences et des ateliers pédagogiques afin de diffuser les connaissances et la pratique de l'astronomie aux Sourds.

Il est notamment l'auteur de trois romans dont le personnage principal est une jeune fille Sourde, s'exprimant en langue des signes et qui part en quête des mystères de l'Univers : *L'Univers à portée de main*, *Face-à-face avec l'Univers* et *L'Univers en partage* (éditions La compagnie littéraire, 2012, 2012, 2014).

<sup>6</sup> <http://www.planete-sciences.org/astro/En-langue-des-signes> et <http://www.planete-sciences.org/astro/En-scolaire>.

# THÈME : LA LUMIÈRE



1. Rayons parallèles du Soleil ; 2. Double arc-en-ciel ; 3. Spectres de lampadaires à St-Jean-de-Losne ; 4. Laser vert et lampes rouges à l'école d'été du CLEA. ; 5. Lampe fluo et son spectre d'émission.  
Image de fond : spectre du Soleil Crédit & Copyright : Nigel Sharp (NOAO), FTS, NSO, KPNO, AURA, NSF.

## La longue histoire inachevée des représentations sur la lumière

Christian Larcher, Paris

*La lumière et la variété des phénomènes lumineux qu'offre la nature intriguent depuis toujours les hommes par leur beauté et leurs apparitions fortuites. Bien que visibles à l'œil nu, leur interprétation reste délicate. Dans cet article nous relatons quelques interprétations qui furent proposées au cours du temps. Mais à la question « qu'est-ce que la lumière ? », la science contemporaine apporte des réponses qui pourraient encore évoluer.*

L'histoire de la lumière est fascinante ; elle traverse les siècles sans jamais vraiment s'épuiser et garde, même de nos jours, sa part de mystère.

Rappelons tout d'abord les phénomènes qui ont été successivement découverts et pris en compte :

- tout d'abord la propagation rectiligne, la réflexion, la réfraction et la genèse des couleurs ;

- puis au XVII<sup>e</sup> siècle trois autres phénomènes lumineux : la **diffraction** (Francesco Grimaldi 1665), les couleurs à la surface des **lames minces** (anneaux de Newton) et la **biréfringence** du spath d'Islande, c'est-à-dire le dédoublement des images des objets vus par transparence (Erasmus Bartholin médecin danois, 1669).

Notons aussi que la notion de lumière est initialement intriquée avec celle de la vision, et que ce n'est qu'à partir du XVII<sup>e</sup> siècle que l'étude de la lumière devient scientifique, reposant sur des expériences, bien qu'il y ait eu ponctuellement des précurseurs.

Nous indiquerons ici quelques repères de l'évolution des questions et des représentations que les hommes ont développées au cours des âges.

### Comment voit-on ?

#### (Antiquité classique)

Pour les anciens, l'Univers est constitué par 4 éléments de base : feu, air, eau, terre. La lumière entretient un certain rapport avec le feu, sans être du feu, mais une forme idéale du feu. Car c'est principalement le feu et la flamme qui engendrent la lumière. Mais d'où provient ce « feu » ? Des objets eux-mêmes (théorie du « feu externe ») ? De l'œil qui regarde (théorie du « feu visuel ») ? Des deux en même temps ?

**Dans la théorie du « feu externe »** (Démocrite, Épicure, Leucippe) les objets manifestent leur présence en envoyant dans l'espace des « *eidola* », espèces d'enveloppes très fines, qui véhiculent une image réduite semblable à l'objet observé (vraisemblable). Dans le « *De natura rerum* », Lucrèce parle de « *simulacres détachés de la surface des objets* »... « *La superficie de tous les corps étant garnie d'une multitude de corpuscules imperceptibles qui peuvent se détacher sans perdre leur ordre et leur forme primitive* ». La taille de cette émanation issue de l'objet diminue régulièrement jusqu'à l'œil.

L'ensemble est contenu dans un cône dont l'œil est le sommet et l'objet la base. Ces émanations pénètrent dans l'œil, laissent une trace sur la rétine et viennent stimuler nos sensations.

**Dans la Théorie du « feu visuel »**, (Pythagore, Euclide, Hipparque), il existe une entité appelée « *quid* » qui sort de l'œil et qui vient tâter les objets, un intermédiaire qui n'est pas de la lumière (le concept n'existe pas encore). Quelque chose d'analogue aux ondes des radars qui viennent palper les objets pour en révéler la forme. Cette conception perdurera très longtemps. Elle est très fréquente dans les représentations que se construisent les enfants<sup>1</sup>.

**Dans une théorie mixte**, développée par Platon, la vision provient d'une interaction entre ce qui provient de l'objet et de ce qui provient de l'œil. Un choc entre les deux. Pour Platon dans le *Timée* : une « *sorte de flamme qui s'échappe des corps et dont les parties, en s'unissant symétriquement avec la vue (qui est elle-même une flamme), produisent la sensation* ». Ce qui est logique puisque que « *le semblable rencontre le semblable* ».

### Qu'est-ce que la couleur ?

#### (Aristote 385-332 av JC)

Pour Aristote, rien ne provient de l'œil ni de l'objet. Si l'œil, disait-il, pouvait émettre des rayons lumineux nous pourrions voir la nuit... argument difficile à réfuter !

Aristote considère que la lumière blanche issue du Soleil est **pure et homogène**, que les couleurs par contre résultent d'une atténuation de cette lumière. Cette idée s'appuie sur l'observation que la lumière blanche du Soleil devient rougeâtre quand de la brume ou de la fumée sombre s'interpose. De même la lumière du Soleil en pénétrant dans l'eau se trouve tellement affaiblie qu'elle prend une teinte bleu-vert. Il est tentant d'en déduire que les couleurs résultent d'une atténuation de la lumière blanche.

En fait Aristote subordonne la couleur à la lumière, il considère le blanc et le noir comme des couleurs sources de toutes les autres. Chaque couleur résulte d'un mélange

<sup>1</sup> C. de Hosson et W. Kaminski, Les yeux des enfants sont-ils des porte-lumière ?, BUP 840, 2002, p. 143

en proportion simple de blanc et de noir. Comme pour la musique les couleurs les plus belles résultent de certaines proportions harmonieuses. Sous cet aspect les couleurs sont classées en fonction de leur clarté du blanc au noir en passant successivement par le jaune, le rouge et le bleu. Cette conception durera pratiquement jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle.

## La lumière est-elle indépendante de l'observateur ?

(Alhazen 965-1039)

Ibn al-Haytham [appelé Alhazen en Occident] est considéré par certains comme le pionnier de la physique moderne, celle qui associe une expérimentation rigoureuse avec une traduction des phénomènes en lois mathématiques. Il est connu comme l'auteur d'un imposant « *traité d'optique* » en sept volumes dans lequel il étudie la **lumière en elle-même**, indépendamment des corps lumineux et de l'observateur : « *L'œil ne peut sentir l'objet vu, que par l'intermédiaire de la lumière que celui-ci envoie* ». Cet intermédiaire est constitué par les rayons lumineux qui acquièrent une véritable réalité physique alors que l'œil devient un simple appareil d'optique, un récepteur.

La réflexion de la lumière résulte de rebonds sur les objets, comme avec des balles, ce qui esquisse une première conception corpusculaire des phénomènes lumineux. Dans le cas de la réfraction, il décompose le mouvement du rayon lumineux qui traverse le dioptré séparant les deux milieux transparents, en deux composantes : l'une parallèle au dioptré, qui reste constante, et l'autre perpendiculaire, **qui est modifiée** (ralentie ou accélérée selon la nature du second milieu). La réfraction est causée par une accélération ou un ralentissement de la lumière qui change de milieu. Il suppose qu'elle va plus lentement dans les milieux transparents denses, comme l'eau, que dans l'air.

## Comment se représenter les différences de couleur ?

Descartes (1596-1650)

Descartes développe une philosophie mécaniste ; pour lui le monde est plein de tourbillons, la couleur pro-

vient de globules, de petites boules contiguës les unes aux autres qui se déplacent d'une manière rectiligne mais peuvent également tourner sur elles-mêmes : « *ce sont les différents tournoyemens qui font les différentes couleurs* » « *...celles qui tendent à tourner beaucoup plus fort, causent la couleur rouge, et celles qui n'y tendent qu'un peu plus fort, causent la jaune.* » « *...et le bleu où elles tournoient beaucoup moins vite* »<sup>2</sup>

## La lumière blanche est-elle homogène ? Newton (1642 -1727)

Son apport en optique comme en mécanique est considérable. Michel Blay indique que l'étude des carnets de notes de Newton montre que l'expérience du prisme n'est pas celle que l'on croit. En effet la conception aristotélicienne suffit à expliquer la décomposition de la lumière par le prisme (connue depuis longtemps) : si on envoie un pinceau lumineux sur un prisme, les rayons qui passent à proximité de l'arête effectuent, dans le verre, un parcours plus court que ceux qui sont plus éloignés. Plus le chemin de la lumière est long dans le verre, plus celle-ci est atténuée. Il est donc logique que l'on observe les rayons rouges dans la partie supérieure du prisme et le bleu-violet dans la partie inférieure.

C'est l'étude minutieuse de la dispersion de la lumière dans le prisme qui permet à Newton de décrire, en 1672, ce qu'il appellera son « *experi-mentum cruxis* » (son expérience cruciale). Elle prouve que la lumière blanche **n'est pas « pure et homogène »** comme on le pensait, mais que, au contraire, c'est un mélange de couleurs possédant chacune leur degré de réfrangibilité (indice de réfraction).

Les couleurs sont « *des propriétés originelles et innées différentes selon les rayons* ».

L'expérience cruciale de Newton consiste à recueillir sur un écran le spectre de la lumière obtenue à l'aide d'un prisme. Puis à l'aide d'un petit trou percé dans cet écran d'étudier séparément chaque couleur à l'aide d'un second prisme. Newton observe que :

1°) Chaque couleur subsiste sans être décomposée en différentes couleurs, ce n'est donc pas le prisme qui provoque l'apparition des couleurs ; celles-ci sont présentes initialement dans la lumière solaire.

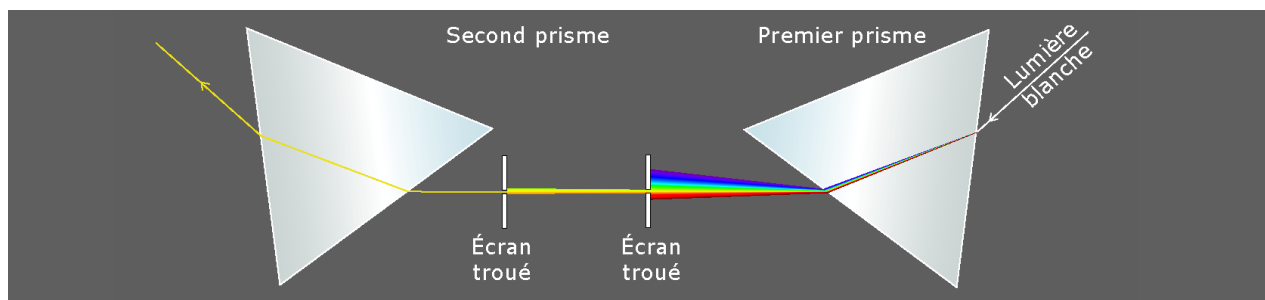
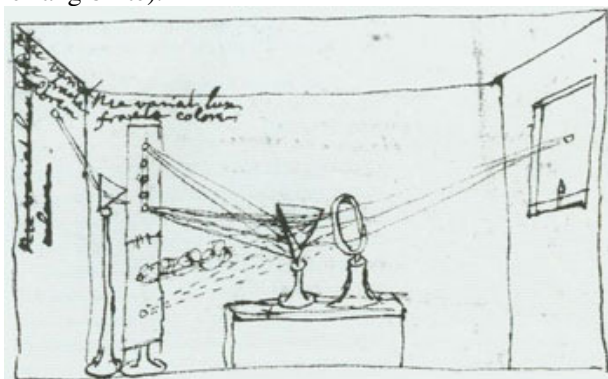


Schéma expérience cruciale.

<sup>1</sup> La Dioptrique et Les Météores (1637).

2°) Que chaque couleur est déviée de la même manière par le premier et le deuxième prisme (même réfrangibilité).



*L'expérience cruciale, dessin de Newton.*

Newton, comme Boyle avant lui, avait remarqué qu'une très fine feuille d'or a des reflets jaunes par réflexion et une teinte bleu-vert par transmission. Pour Boyle la différence provenait d'une atténuation différente de la lumière blanche tandis que pour Newton les rayons réfléchis ne sont pas les mêmes que les rayons transmis ce qui s'explique par le fait que la lumière blanche n'est pas une couleur pure mais la somme de toutes les autres.

## La lumière a-t-elle une vitesse ? Römer (1644-1710)

On pensait jusqu'alors que la lumière était instantanée, même si Galilée 1610 et Fermat 1657 présentaient une vitesse finie, sans réussir à le montrer.

En 1676 l'astronome danois Olas Römer, lors de son séjour à l'Observatoire de Paris, observe que les éclipses des satellites de Jupiter sont régulièrement en avance ou en retard par rapport aux prédictions des éphémérides. Il attribue ces variations au temps que met la lumière pour aller de Jupiter à la Terre. Il en déduit que pour parcourir le diamètre de l'orbite terrestre la lumière met 22 minutes et que par conséquent celle-ci n'est pas infinie comme beaucoup le croyait. Il ne donne pas sa valeur car la distance entre la Terre et le Soleil, l'unité astronomique, était mal connue à cette époque. Ce calcul, qu'il ne fait pas, aurait donné environ 215 000 km/s.

## La lumière est-elle constituée de particules ? (Newton/Hooke, XVIII<sup>e</sup> s)

Dès cette époque, on voit se dessiner deux conceptions sur la nature de la lumière. L'une, celle de Newton, repose sur l'existence de particules matérielles dont les vitesses ou les masses diffèrent.

Cette théorie s'accorde bien avec la théorie de la gravitation élaborée par Newton dans les *Principia*. Elle est censée expliquer la théorie de la réfraction. Par exemple lorsque la lumière passe de l'air dans le verre, le rayon émergent se rapproche de la normale tracée au point d'incidence. Newton en déduit que les particules de lumière sont attirées par les particules constitutives du verre par une force perpendiculaire au dioptre qui modifie la direction du pinceau de lumière. Par conséquent, pour lui, **la vitesse de la lumière dans le verre doit nécessairement être plus grande que dans l'air.**

Cette conception corpusculaire de la lumière est contestée par Robert Hooke.

Newton publiera son traité d'optique en 1704, après la mort de Robert Hooke en 1703.

Newton affirme : je n'avance pas d'hypothèses (« **Hypothèses non fingo** ») ; il écrit :

« *Tout ce qui n'est pas déduit des phénomènes doit être appelé hypothèse, et les hypothèses, qu'elles soient métaphysiques, physiques, se rapportant aux qualités occultes ou mécaniques, n'ont pas de place en philosophie expérimentale. En cette philosophie, les propositions sont déduites des phénomènes et rendues générales par induction* »<sup>2</sup>

Par cette remarque Newton vise Descartes. Pourtant, sans le dire explicitement, il fait clairement l'hypothèse d'une théorie corpusculaire de la lumière, qui durera jusqu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle puis reviendra au début du XX<sup>e</sup> avec Planck et Einstein.

## La lumière est-elle plutôt la propagation d'une déformation ? Huygens (1629-1695)

Dans son traité de la lumière (1690), Huygens défend l'aspect ondulatoire de la lumière.

Pour lui il n'y a pas de déplacement de matière mais la propagation d'une déformation. Sa démarche est typiquement scientifique.

Dès le premier chapitre de son ouvrage il indique que « *Les démonstrations qui concernent l'optique, ainsi qu'il arrive dans toute les sciences où la géométrie est appliquée à la matière, sont fondées sur des vérités tirées de l'expérience ; telles que les rayons de lumière s'étendent en droite ligne ; que les angles de réflexion et d'incidence sont égaux et*

<sup>2</sup> - Livre III des Principia, Scholie général, Newton Isaac : *Principia mathematica* ; Christian Bourgeois, 1985, page 117.

que dans les réfractions le rayon est rompu suivant la règle des sinus »<sup>3</sup>.

Huygens rejette la théorie de l'émission de corpuscules, peu compatible avec l'extrême rapidité de la lumière qu'il évalue à : « plus de six cent mille fois celle du son (...). Or le mouvement successif de la lumière étant confirmé de cette manière, il s'ensuit, comme j'ai déjà dit, qu'il s'étend par des ondes sphériques, ainsi que le mouvement du son<sup>4</sup>. Plus loin<sup>5</sup>, il écrit : « J'ai donc montré de quelle façon l'on peut concevoir que la lumière s'étend successivement par des ondes sphériques, et comment il est possible que cette extension se fasse avec une aussi grande vitesse, que les expériences, et les observations célestes la demandent ».

« La propagation successive des ondes (...) ne consiste point dans le transport de ces parties, mais seulement dans un petit ébranlement, qu'elles ne peuvent s'empêcher de communiquer à celles qui les environnent »... « Chaque petit endroit d'un corps lumineux, comme le Soleil, une chandelle, ou un charbon ardent, engendre ses ondes, dont cet endroit est le centre ».

Au cours de la deuxième partie du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'influence de Newton resta tellement forte que la question n'évoluera pas véritablement.

Il faudra attendre le XIX<sup>e</sup> pour que la question de la nature de la lumière refasse surface avec Fresnel (1788 – 1827), Fizeau (1829 – 1896), Foucault (1819 – 1868). Les travaux et la vie de ces grands physiciens font l'objet d'autres articles de ce numéro et en particulier la fameuse « expérience cruciale », imaginée par Arago et réalisée par Fizeau, qui devait consacrer la prédominance de l'aspect ondulatoire de la lumière à partir de la comparaison de sa vitesse dans l'air et dans l'eau. En attendant une révolution d'une tout autre ampleur au début du XX<sup>e</sup> siècle.

## Les couleurs de l'arc-en-ciel sont-elles équivalentes aux tons en musique ?

Pour terminer ce panorama, voici une question qui incitera à la réflexion personnelle sur les analogies.

Le phénomène d'arc-en-ciel, observé à toutes les époques, est décrit par Xénophane de Colophon au VI<sup>e</sup> siècle avant JC puis par Aristote comme contenant 3 couleurs (ou quatre couleurs avec

Empédocle ou Démocrite). La physique moderne y voit une infinité continue de teintes dispersées à partir de la lumière blanche qui les contient.

Pourquoi apprend-on à l'école : « Les-sept-couleurs-de-l'arc-en-ciel ? ».

Jean-Marc Lévy-Leblond consacre un chapitre entier à cette question dans son livre : *La vitesse de l'ombre*<sup>6</sup>. Il explique que, si Newton décrit correctement les expériences réalisées, il ne peut s'empêcher de privilégier le nombre sept quand il s'agit de donner une interprétation théorique pour mieux s'accorder avec l'analogie sonore et la gamme musicale.

Avec cette même analogie, dans son livre « Opticks », Newton va jusqu'à découper le spectre lumineux en sept espaces bien délimités « dans la proportion des longueurs du monocorde qui donnent les sept tons du mode mineur ». La figure qu'il trace apparaît dans le livre premier, seconde partie, troisième proposition : « Déterminer la réfringibilité des différents rayons homogènes correspondante aux différentes couleurs ».

Cette conception est contestée à la même époque par Robert Hooke (1635-1703) pour qui les couleurs ne préexistent pas dans la lumière du Soleil ; il écrit : «... pas plus que les sons que l'on entend s'échapper des tuyaux d'orgue ne doivent être en premier lieu dans l'air de la caisse de la soufflerie ou bien dans la corde où par la suite ils seront produits en diversifiant les arrêts et les chocs. » (*Lettre à Oldenburg du 15 février 1672*).

Notons que le nombre de couleurs de l'arc-en-ciel dépend du pays, et de la langue qui les distingue. Et que finalement trois suffisent à notre œil pour reconstituer la lumière blanche...

### Bibliographie :

- Beaubois Francis : *Lumière et atomes* ; Vuibert 2008
- Blay Michel : *Lumières sur les couleurs* ; Ellipses 2001
- Koyré Alexandre : *Études newtoniennes* ; Gallimard, 1968
- Huygens Christiaan : *Traité de la lumière* ; Présenté par Michel Blay ; Dunod, 2015
- Lequeux James : *Hippolyte Fizeau* ; EDP sciences, 2014
- Lévy-Leblond : *La vitesse de l'ombre* ; Seuil, 2006
- Maitte Bernard : *Une histoire de la lumière* ; Seuil, 2015
- Newton Isaac : *Optique* ; Présenté par Michel Blay ; Dunod, 2015
- Newton Isaac : *Principia mathematica* ; Christian Bourgeois, 1985
- Rosmorduc & Dufour : *Optique ; l'œuvre de Fresnel* ; Vuibert, 2004
- Suagher Françoise : *Jeux de lumière* ; Cêtre, 1995
- Tobin : *Léon Foucault* ; EDP Sciences, 2002
- Valeur Bernard : *Lumière et luminescence* ; Belin, 2005
- Valeur Bernard : *Sons et lumière* ; Belin, 2008

<sup>3</sup> - Christiaan Huygens *Traité de la lumière* ; Présenté par Michel Blay ; Dunod, 2015, page 49.

<sup>4</sup> - Ibid, page 43

<sup>5</sup> - Ibid, page 54

<sup>6</sup> - Lévy-Leblond : *La vitesse de l'ombre* ; Seuil, 2006, p. 45. ■



# LE COIN DES PETITS CURIUEUX

Dans cette rubrique nous continuons à répondre à des questions d'écopliers.

## Arc-en-ciel

**ALEXIS** – Tu sais ce que m'a montré mon père l'autre fois ?

**ÉMILIE** – Non, mais tu vas me le dire.

**ALEXIS** – Il m'a montré comment faire un arc-en-ciel, mais avant c'est moi qui en ai observé un avec le bord du miroir de la salle de bain.

**ÉMILIE** – C'est bien d'avoir observé ce phénomène.

**ALEXIS** – Essaie avec un bout de verre taillé en biseau, on peut le reproduire s'il y a du soleil.

**ÉMILIE** – Ton bout de verre c'est ce que l'on appelle un prisme. Oui, là tu as la décomposition de la lumière du Soleil.

**ALEXIS** – Mon père me l'a dit, toutes les lumières colorées sont dans la lumière blanche du Soleil.

**ÉMILIE** – Tu en sais des choses !

**ALEXIS** – Mais je ne le croyais pas. Alors il m'a montré qu'à partir de ces couleurs on pouvait refaire du blanc.

**ÉMILIE** – Comment a-t-il fait ?

**ALEXIS** – Regarde c'est simple, tu découpes un disque de papier sur lequel tu colories avec des feutres des secteurs violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge. Tu piques au centre du disque un cure-dents. Pour que ça tienne mieux tu mets un peu de Patafix dessous autour du cure-dents. Si tu le fais tourner comme une toupie, tu ne vois plus toutes les couleurs, mais tu vois du blanc.

**ÉMILIE** – Bravo ! C'est une belle expérience.

**ALEXIS** – J'ai apporté le prisme comme tu dis, à l'école. Les copains m'appellent le faiseur d'arc-en-ciel.

**ÉMILIE** – Tu sais ce que tu fais là n'est pas un arc-en-ciel.

**ALEXIS** – Ah bon !

**ÉMILIE** – Tu obtiens ces couleurs sur un écran : le mur, ta main ..., mais dans le ciel, il n'y a pas d'écran.

**ALEXIS** – Mais alors, c'est quoi un arc-en-ciel ?

**ÉMILIE** – Est-ce que tu en as déjà vu un ?

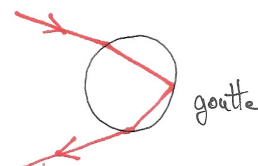
**ALEXIS** – Oui, mon père m'en a fait observer. Il faut qu'il pleuve et qu'en même temps il y ait du soleil.

**ÉMILIE** – Chaque goutte d'eau va décomposer la lumière du Soleil.

**ALEXIS** – Ça fait comme le prisme.

**ÉMILIE** – Oui, mais tu vas voir je vais faire un dessin pour que tu comprennes. Je fais une grosse goutte.

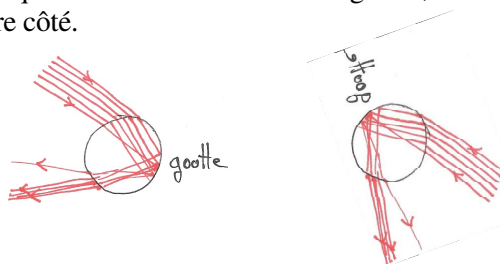
Supposons qu'il n'y ait que de la lumière rouge qui arrive sur une goutte. Quand un rayon de lumière rentre dans la goutte, il est dévié, puis il se réfléchit au fond de la goutte et il ressort en étant à nouveau dévié.



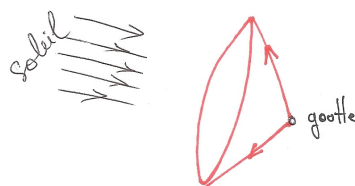
**ALEXIS** – OK.

**ÉMILIE** – Mais il n'y a pas qu'un rayon lumineux qui entre dans la goutte. La plupart de ceux qui entrent sortent dans une direction bien définie. Il y a accumulation de lumière dans cette direction.

Ceux qui entrent d'un côté de la goutte, sortent de l'autre côté.

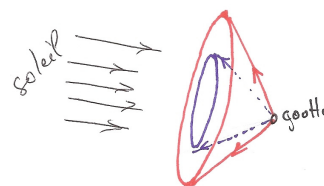


Comme la lumière arrive sur toute la goutte celle-ci va renvoyer la plupart des rayons lumineux suivant un cône, comme cela.



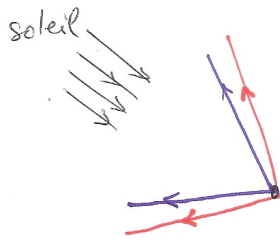
**ALEXIS** – C'est pareil pour les autres couleurs ?

**ÉMILIE** – Presque, par exemple la lumière colorée bleue va sortir sous la forme d'un cône mais qui sera moins ouvert. Chaque goutte va renvoyer toutes les lumières colorées sur des cônes situés entre ceux du rouge et du bleu.

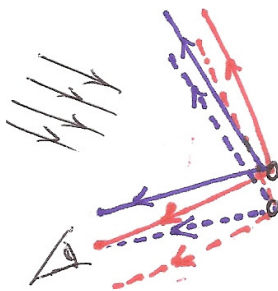


ALEXIS – Oui, mais où est l'arc-en-ciel ?

ÉMILIE – Pour que tu comprennes, je vais simplifier. Chaque goutte ne va renvoyer que du rouge et du bleu dans des directions différentes.



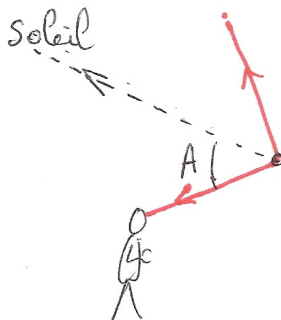
Si ton œil est là, tu verras le rouge venant de la goutte du haut et le bleu de la goutte du bas.



ALEXIS – Il est bien gros mon œil !!

ÉMILIE – Mais remarque aussi que tu regardes vers la droite et que la lumière du Soleil vient de la gauche. Donc pour voir un arc-en-ciel, il faut qu'il y ait de la pluie et du Soleil, mais il faut aussi regarder à l'opposé du Soleil.

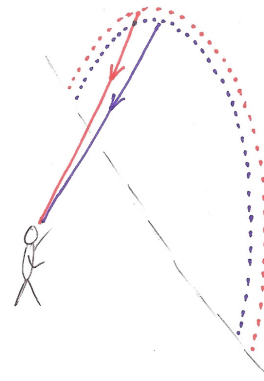
Je représente ceci sur un dessin en ne mettant que la lumière rouge qui entre dans ton œil.



Tu vois que vues depuis la goutte, les directions du Soleil et de ton œil font un angle A. Toutes les gouttes qui feront cet angle A entre les deux directions t'enverront du rouge. Et bien ces gouttes se trouvent sur un arc de cercle centré sur la ligne qui joint le Soleil à ton œil.

C'est pour cela que tu vois un arc rouge. Comme les gouttes qui t'envoient du bleu sont au-dessous, tu

verras un arc bleu au-dessous et tous les autres arcs colorés entre.



ALEXIS – Je comprends, mais c'est un peu dur.

ÉMILIE – Quand il pleut, il n'y a pas qu'une goutte de pluie.

ALEXIS – Évidemment !

ÉMILIE – Tu vois l'arc-en-ciel là où sont les gouttes qui renvoient de la lumière dans ton œil. Toutes celles qui sont dans la direction du trait rouge t'enverront de la lumière rouge.

ALEXIS – Mais si nous sommes deux à regarder le même arc en ciel, la même goutte ne nous renvoie pas la même couleur, puisque nous ne sommes pas au même endroit...

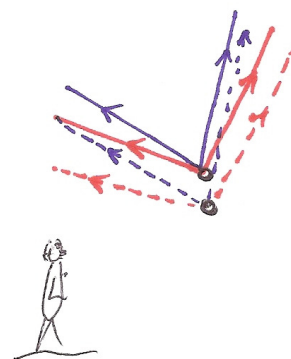
ÉMILIE – En effet, et nous voyons chacun un arc-en-ciel différent !

ALEXIS – Et si nous marchons ?

ÉMILIE – Nos deux arcs-en-ciel nous suivent !

ALEXIS – On a donc chacun son arc-en-ciel !

ÉMILIE – Dis-moi ce qui se passerait si le Soleil était plus haut dans le ciel, toujours dans ton dos ? Est-ce que la lumière provenant des gouttes de pluie arriverait à ton œil ?



ALEXIS – Non. Sauf si je suis très grand.

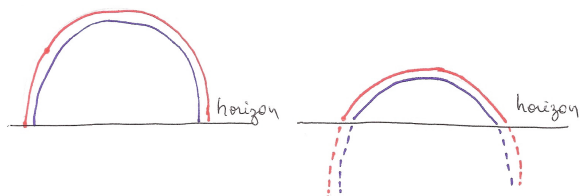
ÉMILIE – Donc pour voir un arc-en-ciel, il ne faut pas que le Soleil soit trop haut dans le ciel. Il doit être à moins de  $42^\circ$  au-dessus de l'horizon. C'est pour cela que l'on voit le plus souvent des arcs-en-ciel surtout en fin d'après-midi.

ALEXIS – Donc si le Soleil est trop haut on ne voit pas d'arc-en-ciel.

*ÉMILIE* – Comme la lumière est renvoyée vers le haut, tu peux le voir depuis un avion. Ce sera alors un arc-en-terre et ce sera un cercle.

*ALEXIS* – Mais dis-moi, pourquoi y a-t-il parfois des petits arcs-en-ciel et parfois des grands.

*ÉMILIE* – Non, ils ont tous la même ouverture. Simplement si le Soleil est à l'horizon on voit un demi-cercle à l'opposé de celui-ci. Mais si le Soleil est plus haut dans le ciel, on ne voit que la partie supérieure de l'arc.



*ALEXIS* – Ah ! D'accord.

*ÉMILIE* – Alors tu as compris ?

*ALEXIS* – J'ai bien aimé les cônes rouge et bleu, mais après je me suis un peu perdu.

*ÉMILIE* – Et je ne t'ai pas tout dit.

*ALEXIS* –.....Dis-moi pour voir si je peux encore comprendre.

*ÉMILIE* – La goutte qui t'envoie du rouge à un moment donné, elle ne va pas toujours t'envoyer du rouge.

*ALEXIS* – Et pourquoi ?

*ÉMILIE* – Réfléchis, c'est quoi une goutte ?

*ALEXIS* – C'est une goutte de pluie.

*ÉMILIE* – Et que font les gouttes de pluie ?

*ALEXIS* – Ah oui, elles tombent, c'est une question trop facile !

*ÉMILIE* – Donc pendant sa chute, elle t'envoie toutes les autres couleurs jusqu'au bleu et elle sera

remplacée par d'autres gouttes qui tomberont à leur tour.

*ALEXIS* – La prochaine fois je ne vais pas regarder l'arc-en-ciel de la même façon.

*ÉMILIE* – Si tu as l'occasion d'en voir un regarde bien, tu auras peut-être la chance d'en voir deux.

*ALEXIS* – Et comment ?

*ÉMILIE* – Parfois l'arc est accompagné d'un deuxième arc, à l'extérieur, moins lumineux et dont les couleurs sont inversées par rapport au premier. Le bleu est à l'extérieur. Et si tu regardes bien tu verras qu'entre les deux le ciel est plus sombre. On appelle cette zone la bande sombre d'Alexandre.

*ALEXIS* – Maintenant il me tarde d'en voir un.

*ÉMILIE* – Tu sais que tu peux en faire dans ton jardin ?

*ALEXIS* – Ah ! Bon et comment ?

*ÉMILIE* – Tu te mets au soleil et avec un tuyau d'arrosage tu crées devant toi une pluie très fine. Tu verras devant toi un arc-en-ciel à quelle condition ?

*ALEXIS* – Si le Soleil est dans mon dos. Comme il y a du Soleil, j'y cours.

*ÉMILIE* – Avant de partir, dis-moi, est-ce que tu as observé l'éclipse de Soleil ?

*ALEXIS* – Oui, c'était trop bien. La maîtresse avait acheté des lunettes spéciales. Il y avait aussi un monsieur du CLEA. Il avait apporté une maquette. On a bien compris qu'une toute petite Lune pouvait cacher un grand Soleil. On s'est même amusé à cacher la maîtresse derrière notre pouce. On a mieux compris. C'est mieux qu'en classe.

*ÉMILIE* – Tu as de la chance d'avoir une maîtresse éclairée. ■



Photo J. Ripert



Photo F Berthomieu

# ARTICLE DE FOND

## La vitesse de la lumière au XIX<sup>e</sup> siècle D'un critère épistémologique à un outil métrologique

Pierre LAUGINIE, Groupe d'Histoire et de Diffusion des sciences d'Orsay (GHDSO), pierre.lauginie@u-psud.fr

*Cet article décrit une page d'histoire portant sur la détermination de la véritable nature de la lumière (onde ou corpuscules) et sur l'expérience cruciale qui devait trancher définitivement la question. Il explique également pourquoi, une connaissance précise de la vitesse de la lumière, présentait beaucoup d'intérêt pour obtenir une mesure exacte de la distance entre la Terre et le Soleil qui définit l'Unité Astronomique.*

### Le point sur la vitesse de la lumière au début du XIX<sup>e</sup> siècle

Au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, la finitude de la vitesse de la lumière est définitivement acquise et sa valeur, uniquement déduite d'observations astronomiques, est déjà centrée sur la valeur moderne – 300 000 km/s environ. Mais cette valeur n'est l'objet d'aucune spéculation théorique et n'a évidemment aucune application. Sur ce sujet, il ne se passera rien de fondamentalement nouveau avant un siècle, sinon une amélioration de la précision des observations.

Un siècle plus tard, grâce à la possibilité nouvelle de mesures terrestres directes, la mesure de la vitesse de la lumière va trouver une motivation dans deux directions. Sous l'impulsion d'Arago, deux types d'expériences vont se développer avec des finalités très différentes : théorique ou épistémologique d'une part, métrologique d'autre part.

### La nature de la lumière : une expérience « cruciale » ?

Le débat sur la *nature de la lumière*, relancé au début du XVII<sup>e</sup> siècle par Descartes, se cristallise avec Newton et Huygens : ou bien une émission de corpuscules, ou bien une « onde » dans un « éther » sur le modèle de l'onde sonore, que propose Huygens.

Après la prééminence du modèle corpusculaire au XVIII<sup>e</sup> siècle, la première moitié du XIX<sup>e</sup> est dominée par l'irrésistible montée en puissance du modèle ondulatoire avec Young, Fresnel et Arago notamment. En 1840, le sort du modèle corpusculaire est virtuellement réglé. Néanmoins, conscient du fait que les progrès technologiques vont permettre des mesures sur Terre et non plus seulement à partir d'observations astronomiques, Arago croit pouvoir proposer une expérience « cruciale » pour départager les deux modèles :

– le modèle corpusculaire – dit « modèle de l'émission » – tel que conçu à l'époque, prévoit que la vitesse de la lumière doit être plus grande dans l'eau que dans l'air ;

– le modèle ondulatoire prévoit l'inverse.

Faisons donc l'expérience et – croit-on – la question sera réglée ! Citons Arago, en 1838<sup>13</sup> :

*L'image supérieure est-elle moins avancée que celle d'en-bas ? Paraît-elle à sa gauche ? La lumière est un corps.*

*Le contraire a-t-il lieu ? L'image supérieure se montre-t-elle à droite ? La lumière est une ondulation !*

Il faudra douze ans avant que Léon Foucault et Hippolyte Fizeau, utilisant un dispositif à miroir tournant, d'abord ensemble puis séparément, réussissent en 1850 une comparaison *qualitative* des vitesses dans l'air et dans l'eau. Foucault arrivera le premier : la lumière *ralentit* en entrant dans l'eau<sup>14</sup>.

### Le dispositif de Foucault

Comment a-t-il fait ? Le principe de l'expérience est décrit dans la figure 1 : il s'agit de transformer une durée – le temps d'aller-retour de la lumière entre deux miroirs – en un déplacement spatial observable. Son dispositif comprend principalement deux miroirs éloignés, dont l'un tourne à plusieurs centaines de tours par seconde, un tour de force mécanique. Il peut visualiser, via le déplacement d'une image, le temps mis par la lumière pour faire l'aller-retour entre les deux miroirs.

Foucault utilise un montage à deux faisceaux, dont l'un traverse un tube d'eau alors que l'autre voyage uniquement dans l'air (fig. 1). Le miroir tournant est entraîné par une petite turbine coaxiale issue d'une sirène de Cagniard-Latour. La turbine est alimentée par de la vapeur d'eau surchauffée sous une

<sup>13</sup> Arago, F. (1838), *C.R. hebd. Acad. Sci.*, 7, 954-965.

<sup>14</sup> Foucault, L. (1854), *Ann. De Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. XLI, 129-164.

pression d'une demi atmosphère environ. Le parfait équilibre du miroir (alignement de l'axe de rotation et de l'axe principal d'inertie) est critique, sous peine de voir le dispositif éclater aux vitesses utilisées. L'expérience est strictement qualitative, on ne mesure pas la vitesse absolue de la lumière. Si Foucault compare le son émis par la sirène à celui d'un diapason à 400 Hz, c'est uniquement pour se rendre compte de la vitesse obtenue – une nécessité technique – mais cette vitesse n'entre en rien dans son résultat. À notre avis, le choix par Foucault d'un entraînement pneumatique du miroir – en comparaison du lourd système d'horlogerie à poids de Fizeau – a été un facteur décisif de succès.

Résultat : l'image correspondant au faisceau ayant voyagé dans l'eau est davantage déplacée (fig. 1), la lumière a mis plus de temps, sa vitesse est donc plus petite dans l'eau.

### Discussion : une expérience « cruciale » ?

Le modèle corpusculaire est donc rejeté. Alors, une expérience « cruciale » ? Non. Mais ceci n'est généralement pas souligné à l'époque et l'expérience de Foucault confortera la suprématie du modèle ondulatoire « classique », classique c'est à dire « avec éther ». De fait, l'expérience de Foucault rejette, non pas *tout modèle corpusculaire*, mais seulement une *hypothèse très particulière* remontant à Descartes dont était affecté le modèle de l'époque : la conservation de la composante de vitesse parallèle au plan de séparation<sup>15</sup>. Descartes, par analogie avec la loi de la réflexion, se basait sur l'idée que « rien ne se passe dans cette direction ». En combinant cette hypothèse avec la loi de la

<sup>15</sup> Pour Descartes, il ne s'agissait encore ni d'ondes ni de corpuscules au sens des siècles suivants, mais de la *propagation successive dans l'espace* d'une « tendance au mouvement » – une sorte de potentialité – obéissant néanmoins aux lois de la Mécanique.

réfraction, on obtient en effet, par un raisonnement élémentaire (théorème de Pythagore), la prédiction que la vitesse de la lumière doit être plus grande dans l'eau que dans l'air.

Une expérience est toujours liée au cadre scientifique, technologique, épistémologique voire philosophique de son époque, elle est élaborée pour répondre, dans ce cadre, à une question posée. Évitions donc l'adjectif « crucial ». Existe-t-il cependant quelque chose de « définitif » dans le résultat de Foucault ? Oui. Désormais, tout modèle, toute théorie devra incorporer le fait que la lumière ralentit en pénétrant dans les corps réfringents. Et, un demi-siècle plus tard, le photon, cet étrange enfant de Planck et Einstein, se conformera sagement au résultat de Foucault. Ainsi, une expérience réussie contraint les théories du futur. La science avance ainsi.

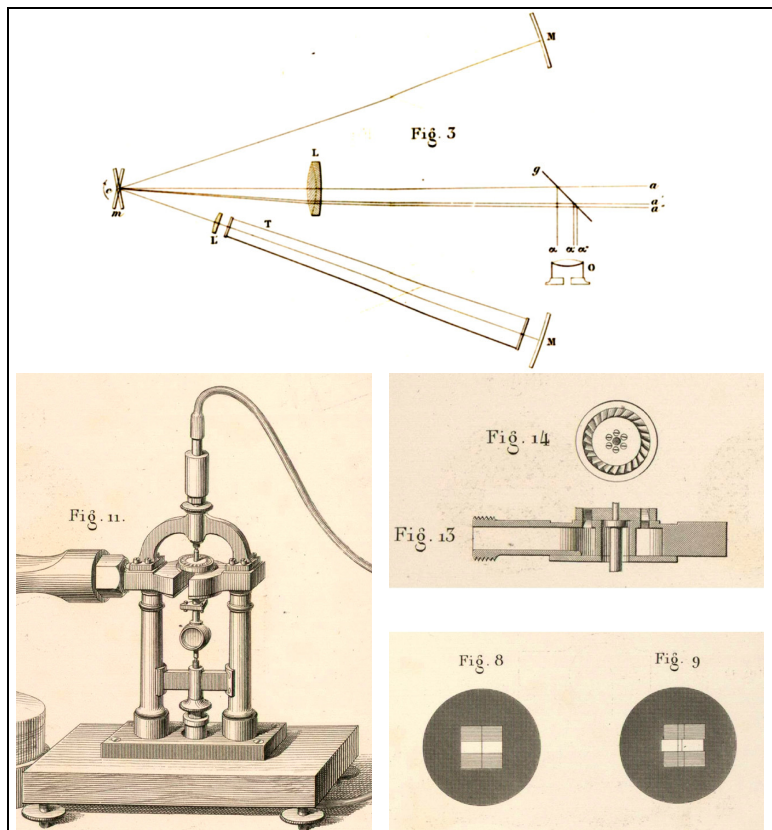


Fig.1. Extraits de la Planche 4 du Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault

Description de l'expérience de 1850

- 'Fig 3'. Schéma général. La lumière issue d'un héliostat vient de droite, traverse la lame semi-transparente g, tombe sur le miroir tournant m, est renvoyée successivement vers les deux miroirs fixes M-M. Pendant le temps d'un aller-retour mMm, le miroir m, en rotation à environ 400 Hz, a pivoté légèrement : le faisceau de retour final est renvoyé dans une direction légèrement différente de l'incidente. L'image finale, observée en a lorsque m est à l'arrêt, est déplacée en a' et a'' respectivement pour le faisceau ayant voyagé uniquement dans l'air et pour celui ayant traversé le tube d'eau T. Important : le miroir M est concave, son centre de courbure est au centre de m afin d'assurer un retour inverse selon le même chemin pendant toute la durée du balayage de M. Distance mM : 4 m. Longueur du tube T : 3 m.
- 'Fig. 11'. Le miroir tournant, son compensateur d'inertie (triangle sur l'axe) et sa turbine.
- 'Fig. 13-14'. Détail de la turbine, 24 pales et deux trous d'injection.
- 'Fig. 8-9'. Ce que voyait Foucault : les parties en grisé correspondent au faisceau ayant traversé le tube d'eau ; l'image est davantage déplacée.

## Un outil pour la mesure des distances

Au milieu du siècle vont apparaître les premières mesures absolues sur Terre de la vitesse de la lumière dans l'air. Pourquoi un tel intérêt tout à coup ? Est-ce important ? La non-observation des parallaxes stellaires<sup>1</sup> a longtemps été un argument contre le mouvement orbital de la Terre. La première d'entre elles n'est mesurée par Bessel qu'en 1838, et sa valeur n'est que 0,31". La base utilisée est le grand axe de l'orbite terrestre, soit environ 300 millions de km, ou deux fois la distance Terre-Soleil (dite « unité astronomique, u.a. »). D'où l'importance d'une connaissance aussi précise que possible de cette distance.

Or, la mesure indépendante de la vitesse de la lumière sur Terre va permettre d'inverser les raisonnements utilisés par les astronomes pour déterminer la vitesse de la lumière.

Par exemple, le temps mis par la lumière pour traverser l'orbite de la Terre est connu à partir de l'observation des satellites de Jupiter ; en le combinant avec la vitesse de la lumière, on obtient le diamètre de cette orbite. De même, une mesure d'aberration stellaire « dans le ciel », combinée à la vitesse de la lumière, conduit aussi à ce diamètre. En effet, l'angle d'aberration est égal au rapport  $v/c$  de la vitesse orbitale de la Terre à la vitesse de la lumière et vaut – pour toutes les étoiles – environ 1/10000 radian ou 20 secondes d'arc. Une mesure indépendante de  $c$  conduit donc à la vitesse de la Terre sur son orbite, d'où l'on déduit la longueur et le diamètre de celle-ci. On pourra ainsi corroborer les distances dans le système solaire jusqu'ici déduites des seules parallaxes planétaires. Arago comprend cela : la vitesse de la lumière est sur le point d'entrer dans le domaine de la Métrologie.

La première détermination terrestre est effectuée en 1849 par Fizeau<sup>2</sup> grâce à un dispositif à roue dentée qui « hache » un faisceau lumineux envoyé en aller-retour de Suresnes à Montmartre (expérience déjà décrite dans les Cahiers Clairaut). Fizeau publie 315000 km/s, valeur sensiblement supérieure à celle des astronomes. Mais il ne s'agit pas encore d'une détermination définitive. Citons Arago rapportant cette expérience à l'Académie des sciences :

*En répétant ces observations avec des appareils mécaniquement plus parfaits, on pourra un jour,*

<sup>1</sup> Parallaxe stellaire : angle sous lequel le demi-grand axe de l'orbite terrestre est vu depuis une étoile. Se déduit de la différence des directions de visée de l'étoile depuis la Terre à six mois d'intervalle.

<sup>2</sup> Fizeau, H. (1849), *C.R. hebd. Acad. Sci.*, **29**, 90-94.

*sans sortir de Paris et de sa banlieue, trouver cette parallaxe du Soleil<sup>3</sup> qui, vers le milieu du siècle dernier, donna lieu à des voyages si longs, si lointains, si pénibles, et à tant de dépenses<sup>4</sup>.*

Cependant, Fizeau, absorbé dans d'autres recherches (notamment l'entraînement de « l'éther » par les fluides en mouvement), ne perfectionnera pas son dispositif. Une douzaine d'années plus tard, Le Verrier, directeur de l'Observatoire, demande à Foucault d'adapter son expérience qualitative de 1850 à une mesure quantitative précise de la vitesse de la lumière. En effet, ses calculs d'interactions mutuelles des planètes, dans lesquels il est passé maître, lui font penser que les valeurs de la distance Terre-Soleil données par les astronomes, comme celle déduite de la mesure de Fizeau, sont surestimées de quelques pourcents. Foucault mène l'expérience à bien en 1862 et publie 298000 km/s<sup>5</sup>. La distance Terre-Soleil s'en trouve immédiatement réduite dans la même proportion.

Le Verrier est satisfait. De ce jour, la vitesse de la lumière, devient, en puissance, l'outil idéal pour la mesure des distances. Cerise sur le gâteau : contrairement aux parallaxes planétaires, cette nouvelle méthode est indépendante de la « figure » et des dimensions de la Terre : voilà un gigantesque saut virtuel dans l'espace.

## D'une expérience qualitative à un outil métrologique

Comment Foucault a-t-il transformé une expérience qualitative en une expérience précise de Métrologie ? Il lui faut *pousser à leurs limites les technologies disponibles*. Cela va lui imposer des modifications importantes, sans toutefois remettre en cause le principe de l'expérience et le matériel de base. Pressé par le temps (Le Verrier !), Foucault n'envisage pas la construction d'un nouveau miroir tournant mais va réutiliser celui de 1850 – avec d'importantes améliorations – et de même avec le miroir fixe. Quelles contraintes s'imposent donc à lui ? Des contraintes *optiques*, des contraintes *mécaniques* et des contraintes d'ordre *chronométrique*.

<sup>3</sup> Parallaxe du Soleil : angle sous lequel le rayon équatorial de la Terre est vu depuis le centre du Soleil. Cela équivaut à connaître sa distance.

<sup>4</sup> Arago fait ici allusion aux lointaines et coûteuses expéditions montées pour observer les passages de Vénus devant le Soleil en 1761 et 1769, afin d'affiner la connaissance de la distance Terre-Soleil selon une variante de la méthode des parallaxes planétaires.

<sup>5</sup> Foucault, L. (1862) *C.R. hebd. Acad. Sci.*, **55**, a) 501-503 et b) 792-796.

## Des contraintes optiques

L'augmentation de la précision requiert une augmentation importante de la distance entre miroirs ; celle-ci est portée à 20 mètres, au lieu de 4 m en 1850. D'où des contraintes optiques : d'une part, éviter la divergence du faisceau (on n'a pas de laser !) ; d'autre part, sachant que le faisceau de retour est intermittent, si l'on veut conserver la même intensité lumineuse moyenne en retour, il faut que le miroir fixe éloigné soit vu, depuis le miroir tournant, sous le même angle qu'en 1850. Afin de n'avoir pas à réaliser un miroir fixe plus grand, Foucault avait envisagé, dès 1850, de « transporter l'image » par un système optique afocal similaire à celui qui sera utilisé ultérieurement dans les périscopes (Foucault, 1854) : le faisceau tombe alors sur le miroir final *exactement comme s'il venait d'un miroir tournant placé à 4 mètres*. En 1862, il ajoute un important perfectionnement : ce qu'on réaliserait avec des lentilles intermédiaires, on peut tout aussi bien le faire avec des miroirs concaves de même focale disposés en zigzag, il n'y a alors plus de pertes par absorption. La solution est géniale, mais demande des réglages extrêmement minutieux. Telle est donc la vraie raison du « repliement du faisceau en zigzag », il ne s'agissait pas de gagner de la place !

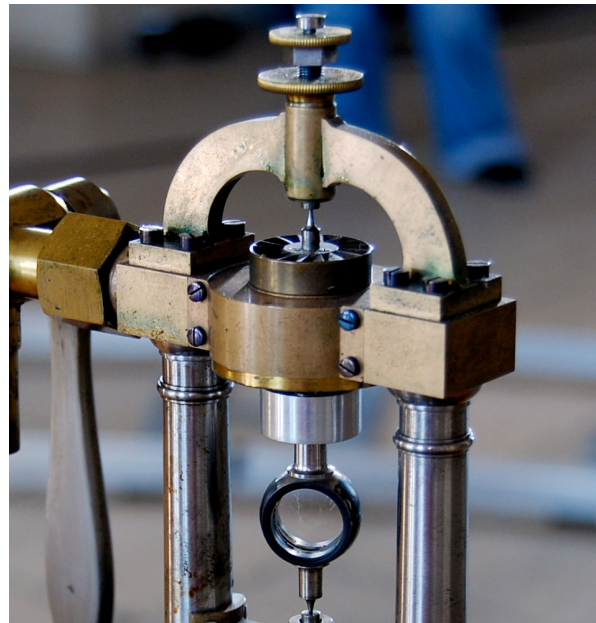
## Des contraintes mécaniques

Les problèmes mécaniques vont conduire à plusieurs adaptations et améliorations décisives. La turbine de 1850 et son entraînement à la vapeur d'eau sous une demi atmosphère (soit 5 m à la colonne d'eau) ne sont absolument pas optimaux : à l'époque, il avait fallu aller vite (concurrence de Fizeau), on attendait une réponse par oui ou par non, la précision n'était pas requise (Foucault, 1854, p. 157). Il en va tout autrement en 1862. Foucault doit impérativement obtenir un fonctionnement absolument régulier et sans vibrations de la turbine, ce qui n'était pas le cas en 1850 avec notamment des problèmes de condensation de vapeur d'eau. Il va donc, avec Froment, réviser entièrement la conception de la turbine et de son système d'alimentation dans lequel la vapeur d'eau va être remplacée par de l'air sous basse pression.

– *le dessin de la turbine* : en 1850, la turbine possède 24 aubes droites et deux trous d'injection (figure 1). La nouvelle turbine de 1862, toujours construite par Froment, a 16 aubes (figure 2) mais cette fois 16 trous d'injection : l'efficacité s'en trouve multipliée par 8 par cette seule raison.

Ce n'est pas tout : Foucault va mettre à profit les progrès récents en *Mathématiques appliquées* qui avaient permis de déterminer la forme idéale des

aubes de turbine. Il fait appel à l'académicien L.-D. Girard (1815-1871), qui décrit le fameux tracé des aubes courbes « à veine d'eau moulée » qui connaîtra un développement considérable en matière de turbines à eau, à gaz ou à air. Il gagnera encore un facteur 2 du fait qu'il utilise de l'air à 290 K au lieu de vapeur d'eau à 373 K (rapport des densités des deux fluides, compte tenu des températures d'utilisation).



*Fig.2. Miroir tournant de l'expérience de 1862 (Observatoire de Paris). On notera les 16 pales de la turbine redessinée, ainsi que le cylindre d'aluminium entourant les trois vis d'ajustage du compensateur d'inertie visibles sur le modèle de 1850 (fig. 1). Le miroir a perdu son argenture.*

– *le cylindre d'aluminium* : Foucault profite de la nouvelle préparation de l'aluminium mise au point entre 1854 et 1859 par son ami, le chimiste Henri Sainte-Claire Deville. Un tambour cylindrique en aluminium entoure maintenant le compensateur d'inertie triangulaire, évitant des turbulences lors de la rotation à vitesse élevée (figure 2) ;

– *la soufflerie de Cavaillé-Coll* : Foucault souhaite donc alimenter sa turbine avec de l'air et grâce aux progrès sur la turbine, une faible pression lui suffit. L'avantage est évident : moins de puissance, moins de « vent », moins de risques de vibrations, contrôle du flux plus aisé. Pour l'alimentation, il a une idée révolutionnaire : il s'adresse à son voisin et ami, le célèbre facteur d'orgue Aristide Cavaillé-Coll. Car qui, mieux qu'un facteur d'orgue, est capable de produire « un vent stable, ni trop fort ni trop faible, et ce, le plus simplement et le plus longtemps possible » ?

Cavaillé-Coll construit la soufflerie sur le principe des *mannequins*, petits orgues d'atelier à deux ou trois rangs, utilisés pour harmoniser les tuyaux

d'orgue. Elle est complétée par un double régulateur à « poids-curseur » spécialement conçu permettant d'obtenir une pression constante et finement ajustable (figure 3).



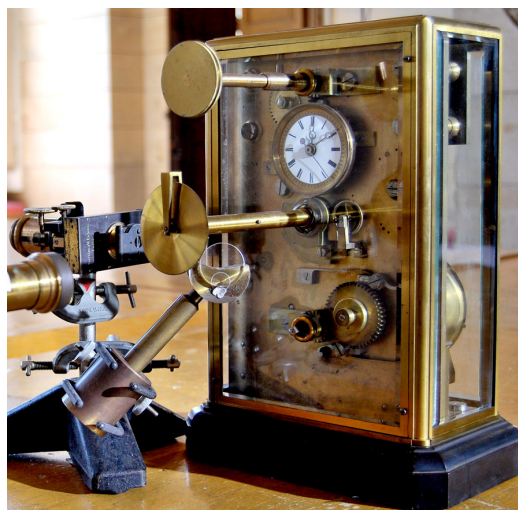
**Fig.3.** La soufflerie de Cavallé-Coll (Musée des Arts et Métiers, Paris). Le soufflet, en cuir clair, est ici dégonflé. Le régulateur « à poids curseur » est sur le dessus. Les pédales situées à la base servent au gonflage.

Finalement, il suffira d'une pression de 30 cm d'eau – soit plus de seize fois inférieure à celle de 1850 – pour entraîner la turbine à la même vitesse et avec une régularité considérablement améliorée<sup>6</sup>.

### Des contraintes chronométriques

Contrairement à l'expérience de 1850, le résultat dépend ici directement de la connaissance *précise* de la vitesse de rotation du miroir. À cet effet, Foucault invente un système stroboscopique qu'il baptise « rouage chronométrique » : il va hacher le faisceau de retour, avant son entrée dans le dispositif d'observation, à l'aide d'une roue dentée portant 400 dents sur sa périphérie entraînée à exactement un tour par seconde. Le faisceau de retour est intermittent, à la fréquence même du miroir tournant. En ajustant le flux d'air de manière que les dents paraissent fixes dans le microscope, il est certain que son miroir tourne exactement à 400 tours/s. C'est Froment, mécanicien hors pair, qui construit l'horloge, une merveille de précision (figure 4). Citons Foucault : « il m'arrive de lancer le miroir à 400 tours/s et de voir les deux appareils marcher d'accord à 1/10 000 près pendant des minutes entières » (Foucault, 1862b).

<sup>6</sup> Cependant, Foucault parle de la « soufflerie à haute pression de M. Cavallé-Coll ». En fait, 30 cm de hauteur d'eau représente deux à trois fois les pressions usuelles dans les soufflets d'orgue. D'où le terme.



**Fig.4.** L'horloge de Froment et le « rouage chronométrique ». L'horloge (Observatoire de Paris) entraîne à raison d'un tour par seconde la roue finement dentée (400 dents) visible au centre, en avant de l'horloge. Les dents hachent le faisceau de retour, venant de droite et réfléchi par la lame semi-transparente, avant son entrée dans le microscope d'observation dont on aperçoit la partie avant à gauche.

### Conclusion

Après Foucault, la vitesse de la lumière n'est pas encore la constante fondamentale que nous connaissons, « indépendante de tout », du mouvement de la source comme de celui de l'observateur. Cependant les premiers indices troublants de cette indépendance remontent au XVIII<sup>e</sup> siècle avec l'observation des premières étoiles doubles. Et aux expériences d'Arago et Fresnel au début du XIX<sup>e</sup>. Le siècle vivra avec ce problème latent. On connaît la suite : cette indépendance, replacée dans le cadre d'une théorie générale – la Relativité d'Einstein – rend aujourd'hui cet outil d'autant plus précieux pour la mesure des distances.

Les deux expériences de Foucault, 1850 et 1862, avec le même principe de base, en partie le même matériel et donc le même expérimentateur, sont emblématiques des deux grandes catégories d'expériences scientifiques. D'une part, des expériences à finalité épistémologique : établir, illustrer une loi ou un modèle, réfuter ou valider des théories. D'autre part, des expériences précises de Métrologie: dans ce dernier cas, personne ne connaît à l'avance le « vrai » résultat. Et c'est très différent. Léon Foucault, lui, s'est illustré dans les deux domaines.

### Pour en savoir plus

William Tobin, (2002) *Léon Foucault*, Les Ulis, EDP-Sciences.  
*Les magiciens de la lumière*, un film du SCAVO, Université Paris-Sud, Faculté d'Orsay. Contact : <christine.azemar@u-psud.fr>  
 Pierre LAUGINIE, Groupe d'Histoire et de Diffusion des sciences d'Orsay (GHDSO), Université Paris-Sud, 91405 Orsay cedex.



# ARTICLE DE FOND

## Les parhélies, de faux soleils dans le ciel

Pierre Causeret

*De nombreux phénomènes lumineux sont visibles dans le ciel. Les parhélies font partie des plus courants, après l'arc-en-ciel.*

Les Anglais les appellent « sun dogs » (chiens du Soleil) car ils ne s'en éloignent jamais beaucoup. Les Allemands parlent de « Nebensonne » (à côté du Soleil). On entend aussi les expressions de faux soleils, de soleils doubles ou triples. Le nom savant est parhélie. Il vient du grec « para » (auprès de) et « hélios » (Soleil). Comme vous l'avez deviné, il s'agit d'un phénomène qui s'observe à côté du Soleil : dans certaines conditions atmosphériques, on peut voir de chaque côté du Soleil deux taches lumineuses irisées, colorées comme un arc-en-ciel, avec le rouge côté Soleil et le bleu à l'opposé. Ces taches sont parfois très lumineuses, parfois tout juste visibles.



Fig. 1. Parhélies observés de chaque côté du Soleil.

### Comment les observer ?

Il n'est pas très difficile d'en voir si on sait comment faire. Il faut tout d'abord que le Soleil ne soit pas trop haut dans le ciel, moins de 30° de hauteur en général.

Il faut ensuite que le ciel soit assez clair mais contienne des nuages d'altitude comme des cirrus ou des cirrostratus, chargés en cristaux de glace, les responsables du phénomène.

Enfin, il faut savoir qu'il s'en produit plus facilement en hiver et dans les régions froides.

Quand les conditions météorologiques sont remplies, il suffit d'observer de temps en temps de chaque côté du Soleil, à environ 20°, ce qui représente, bras tendu, la largeur d'une main, doigts écartés. Il ne faut surtout pas regarder le Soleil en face pour ne pas être ébloui. Le plus simple est de le cacher, avec une main, derrière un arbre..., et d'observer le ciel de chaque côté.

Certains parhélies sont tout juste visibles, d'autres sont si lumineux qu'on peut les prendre pour le Soleil. Les couleurs sont, elles aussi, plus ou moins visibles.

Il est courant de ne voir qu'un seul parhélie s'il y a des cristaux de glace d'un seul côté du Soleil.



Photo Samuel Chailléat

Fig. 2. Un parhélie bien coloré. Le rouge est en général la couleur la plus visible.

Un parhélie peut durer plusieurs minutes ou même plusieurs dizaines de minutes si les cristaux de glace restent présents mais le phénomène peut être plus court, juste le temps que le cirrus passe au bon endroit.

### L'origine des parhélies

Il existe plusieurs formes de cristaux de glace : tablettes, plaquettes, baguettes, crayons... Dans toutes ces formes, on retrouve des hexagones réguliers. Cela provient de l'agencement des molécules d'eau dans ces cristaux.

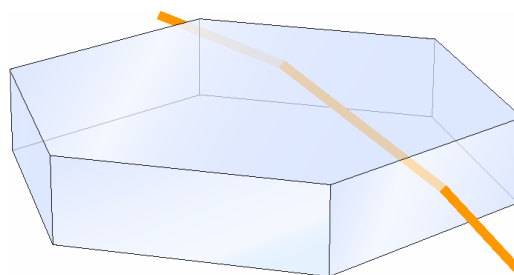
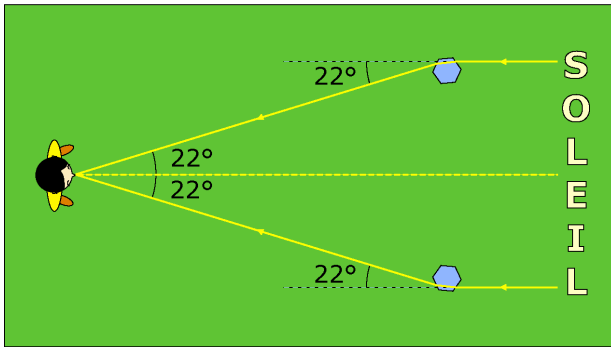


Fig. 3. Rayon lumineux traversant une plaquette en forme de prisme dont la base est un hexagone régulier.

Dans les nuages d'altitude, on trouve de nombreuses plaquettes qui tombent doucement en restant à plat. Lorsque la lumière en provenance du Soleil traverse une plaquette, elle est déviée à cause de la réfraction. Et une grande partie des rayons sont déviés

d'un angle de  $22^\circ$  (cf le paragraphe Calculs). C'est pour cette raison que l'on observe chacun des parhélies à  $22^\circ$  de part et d'autre du Soleil.



**Fig.4.** Cette figure vue de haut montre la déviation des rayons lumineux dans des plaquettes hexagonales. En traversant le cristal de glace, une partie des rayons sont déviés de  $22^\circ$ . L'observateur voit deux faux soleils situés à  $22^\circ$  du vrai.

## Les couleurs du parhélie

Il se trouve que les rayons rouges sont moins déviés que les rayons bleus. Comme la lumière blanche du Soleil contient toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, ses composantes rouges seront les moins déviées et on les verra plus près du Soleil que les composantes jaunes ou bleues. Le parhélie apparaît alors irisé. Il arrive aussi que ce phénomène se produise avec la lumière de la Lune, on obtient alors un « parasélène » moins lumineux qu'un parhélie.



**Fig.5.** La Lune est cachée derrière le cerisier à droite. On peut voir un parasélène au dessus du bananier.

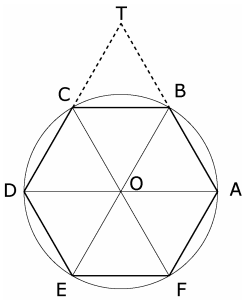
Il est parfois possible de voir en même temps deux parhélies et le petit halo ; dans ce cas, celui-ci passe à proximité des parhélies.

## Les calculs

La démarche est seulement présentée ici, c'est à vous d'effectuer les calculs.

### 1. L'hexagone régulier

Un hexagone régulier est inscrit dans un cercle et ses angles sont égaux. On cherche l'angle  $ATD$ .

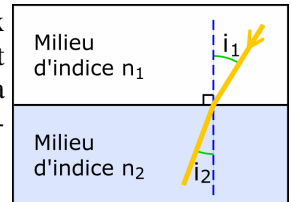


### 2. Rappel sur la réfraction

Quand un rayon lumineux change de milieu en passant par exemple de l'air à la glace, il suit la loi de Snell-Descartes qui s'écrit :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2.$$

$i_1$  et  $i_2$  sont les angles que font les rayons avec la perpendiculaire à la surface séparant les deux milieux.  $n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction de chacun des milieux traversés. On prendra 1 pour l'air et 1,31 pour la glace.



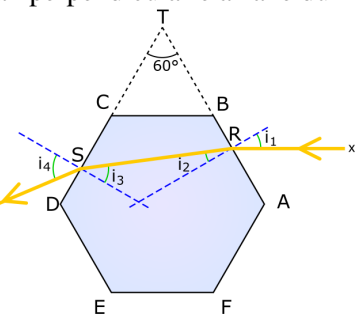
### 3. Calcul d'un angle de déviation

On se place dans un plan perpendiculaire à l'axe du prisme. On a représenté à droite le chemin d'un rayon lumineux.

Choisir un angle d'incidence  $i_1$  ( $15^\circ$  par exemple) puis effectuer les calculs demandés dans une feuille de calcul.

On recommencera en faisant varier l'angle  $i_1$  de  $5^\circ$  en  $5^\circ$ , jusqu'à  $80^\circ$ .

- Calculer  $i_2$ .
- Calculer la déviation du rayon lumineux ( $i_2 - i_1$ ).
- Calculer  $i_3$ . On pourra calculer auparavant les angles TRS puis TSR.
- Calculer  $i_4$ .
- Calculer la déviation du rayon lumineux ( $i_4 - i_3$ ).
- Calculer la déviation totale du rayon lumineux, somme des deux déviations.



### Solutions

$i_1(^{\circ})$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
$d(^{\circ})$	34	28	25	23	22	22	22	22	23	25	26	29	31	35

On remarque que, pour une bonne partie des rayons, la déviation est proche du minimum de  $22^\circ$ . Ce sont ces rayons qui sont à l'origine des parhélies.

Bibliographie "Jeux de lumière, les phénomènes lumineux du ciel" de Françoise Suagher et J-Paul Parisot

## Cristaux de glace et minimum de déviation à 21,8°

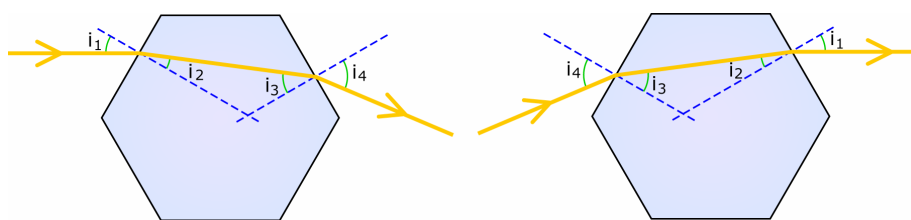
Comment montrer qu'il existe un minimum de déviation lorsqu'un rayon de lumière traverse un cristal de glace (figure page 24) ?

On considère tout d'abord que le rayon incident est situé dans un plan perpendiculaire à l'axe du prisme.

Plusieurs méthodes sont possibles.

1. Par une série de calcul. Le tableau de la page 24 fait bien apparaître un minimum à 22° ;
2. Avec un graphique. Un nombre plus important de calculs permet de tracer le graphique de la déviation en fonction de l'angle d'incidence (voir page 27). On visualise alors bien le minimum ;
3. Avec une dérivée qui s'annule. Mais le calcul est assez long (voir les compléments sur le site) ;
4. Béatrice Sandré nous a proposé une méthode très élégante :

Un rayon lumineux entre dans un cristal sous une incidence  $i_1$  et ressort sous un angle  $i_4$ . La déviation est égale à  $(i_2 - i_1) + (i_4 - i_3)$ . Invertissons le rayon lumineux qui va rentrer dans le cristal sous une incidence  $i_4$ . La déviation est évidemment la même. Ce qui signifie que, pour une déviation donnée, il y a deux angles d'incidence possible,  $i_1$  et  $i_4$ . Cela veut dire que, sur la courbe représentant la déviation en fonction de l'angle d'incidence, il existe deux points de même ordonnée. Comme, de plus, la fonction est continue et dérivable sur cet intervalle, il y a obligatoirement un extremum (minimum ou maximum) où la dérivée est nulle. C'est ce que les mathématiciens appellent le théorème de Rolle.



Pour l'extremum de déviation, les deux solutions pour l'angle d'incidence,  $i_1$  et  $i_4$  doivent être confondues. Donc  $i_2$  et  $i_3$  aussi. Comme la somme de ces deux angles vaut  $60^\circ$  (voir encadré p 27), chacun des angles est égal à  $30^\circ$ . L'extremum est donc atteint si  $i_2 = i_3 = 30^\circ$ , ce qui correspond à  $i_1 = i_4 = 41^\circ$ . La déviation est alors de  $2 \times (41^\circ - 30^\circ)$  donc  $22^\circ$ . On vérifie qu'il s'agit d'un minimum de déviation et non d'un maximum.

Et si le rayon incident n'est pas situé dans un plan perpendiculaire à l'axe du prisme ?

Les calculs sont plus complexes. Si on considère par exemple les rayons faisant un angle de  $10^\circ$  avec ce plan, on trouve un minimum de déviation à  $22,1^\circ$ , puis à  $23,1^\circ$  pour un angle de  $20^\circ$ ,  $24,8^\circ$  pour  $30^\circ$ ...

L'angle de  $21,8^\circ$  est donc le minimum des minima. ■

## Mots croisés lumineux

### Horizontalement

1. Qualifie une théorie lumineuse.
2. Elle émet de la lumière. Variable d'Orion. Cocotte bourguignonne.
3. Premier homme parti dans l'espace avec sa femme. Renvoie la lumière. Jeu en noir et blanc.
4. Bougé. Direction du coucher de Castor. Peut être lumineux.
5. Peu de chose. Importantes pour vendre un journal. Unité de longueur.
6. Qui a reçu une certaine lumière. Envoya de la lumière.
7. Possessif. Elle a proclamé 2015 comme l'Année internationale de la lumière. Pronom.
8. Il a voyagé sur un photon. Elles sont lumineuses en fin d'année.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13

1													
2						■				■			
3				■								■	
4		■			■			■					
5					■							■	
6									■				
7			■		■		■					■	
8									■				

### Verticalement

1. Celle de la lumière est indépassable.
2. Pris. Aller dans le futur.
3. Il a montré que la vitesse de la lumière était finie.
4. Grecque. Paresseux.
5. Sa rue a vu passer des Nobel. Carte mémoire.
6. Centre. Celle de France n'en est pas une.
7. A été indispensable à Fizeau pour mesurer la vitesse de la lumière.
8. Souvent lumineux mais toujours inexplicable. Il émet en général dans le rouge.
9. Faire de la lumière.
10. Ce n'est pas, en général, une lumière.
11. Est anglais.
12. Recouvre la Lune.
13. Isolants.

*Réponses page 40*

# TÉMOIGNAGE

## Le halo de Boukhara

Devalance Jean-Pierre, jpdevalance@orange.fr

*De nombreux phénomènes lumineux sont visibles dans le ciel. Le petit halo est l'un de ceux-là.*

Lors d'un voyage à Boukhara en Ouzbékistan, j'ai pu observer le halo de la photo 1. Habituellement, tous les touristes (ou presque) s'esclaffent, à tort : "Oh le bel arc-en-ciel".



Fig.1. Halo sur un minaret à Boukhara.

### Nature du Halo

Ce halo n'est pas un arc-en-ciel, qui, lui, est formé lorsque les rayons du Soleil frappent un ensemble de gouttes d'eau. On a alors le Soleil dans le dos, l'arc a un angle de  $42^\circ$  et la coloration rouge est à l'extérieur. Dans notre halo, les irisations sont bien moins franches et assez peu marquées, le rouge est vers l'intérieur, et la lumière vient de l'avant (du côté du Soleil) ; on peut le voir aussi avec la Lune. Le rayon du halo est de  $22^\circ$ , on parle du petit halo à  $22^\circ$ , il en existe un autre très peu visible à  $46^\circ$ .

Ce halo se produit lorsque la lumière traverse des cristaux de glace (et non des gouttes d'eau comme pour l'arc-en-ciel) à section hexagonale (hexagone régulier), comme des crayons à papier (figure 2). Ces minuscules cristaux se forment dans des nuages appelés cirrostratus à des températures de l'ordre de  $-10^\circ\text{C}$  à  $-20^\circ\text{C}$ . Ces nuages sont des nuages très

fins (d'épaisseur 500 m ou moins) visibles comme un voile d'aspect laiteux parfois si ténus qu'on ne les perçoit pas dans le ciel. Leur altitude se situe entre 4 500 m et 12 000 m et il n'y a aucune précipitation associée.

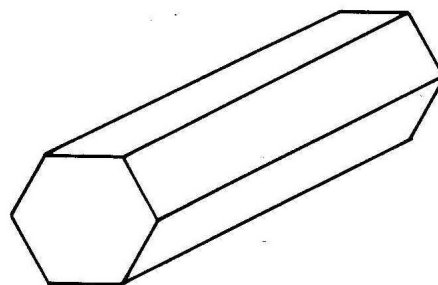


Fig.2. Cristal de glace à section hexagonale.

### Étude d'un rayon lumineux

Intéressons-nous à un rayon lumineux et suivons son trajet à travers un cristal de glace. Nous considérons un rayon incident qui entre dans le cristal de glace par l'une des faces qui s'appuient sur l'hexagone ; par réfraction, il traverse le cristal et ressort vers notre œil.

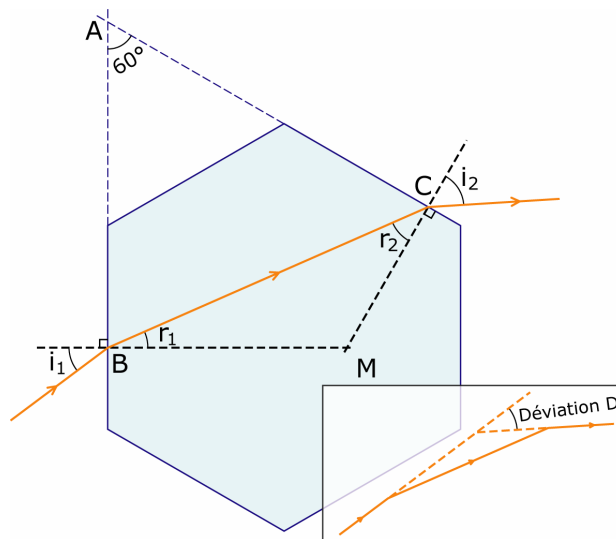


Fig.3. Marche d'un rayon à travers un cristal hexagonal. Le rayon incident est supposé ici contenu dans un plan perpendiculaire à l'axe du cristal.

Les calculs (encadré 1) montrent que la déviation entre le rayon lumineux entrant dans le cristal et le rayon sortant est égal à  $i_1 + i_2 - 60^\circ$  avec  $\sin i_1 = n \sin r_1$ ,  $\sin i_2 = n \sin r_2$  et  $r_1 + r_2 = 60^\circ$ .

**Encadré 1**

**Les calculs**

Tous les angles sont en degrés ici

D'un point de vue géométrique :

Dans le triangle BCM :  $r_1 + r_2 + M = 180^\circ$ .

Dans le quadrilatère ABMC :

$$A + B + M + C = 360^\circ$$

Avec  $B = C = 90^\circ$ , on en déduit :  $r_1 + r_2 = A = 60^\circ$

Lois de Descartes

$\sin i_1 = n \sin r_1$  et  $\sin i_2 = n \sin r_2$  où  $n$  est l'indice de réfraction de la glace ( $n \approx 1,31$ ).

Conditions d'émergence en C

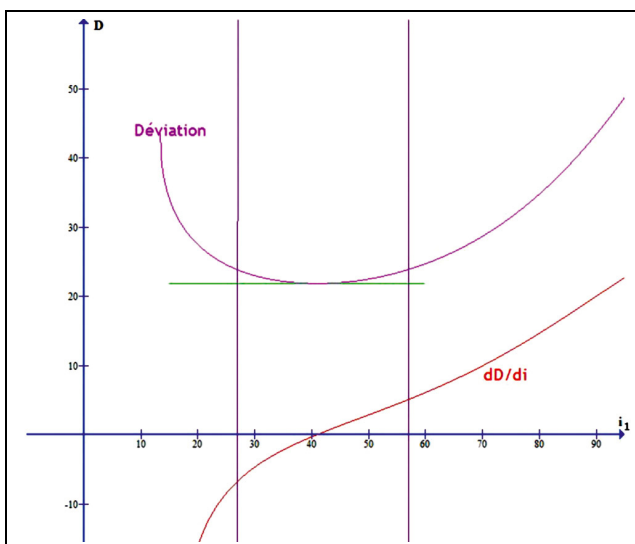
$i_2 < 90^\circ$  donc  $r_2 < 49,8^\circ$  (avec  $\sin i_2 = n \sin r_2$ )

Comme  $r_1 = A - r_2$  et  $A = 60^\circ$ , on obtient  $r_1 > 10,2^\circ$  puis  $i_1 > 13,4^\circ$  (avec  $\sin i_1 = n \sin r_1$ )

Déviations du rayon lumineux (somme des déviations)

$$D = i_1 - r_1 + i_2 - r_2 \text{ soit } D = i_1 + i_2 - A$$

La déviation n'est pas constante, elle dépend de  $i_1$ . On montre qu'il existe un minimum de déviation à  $22^\circ$ , lorsque  $r_1 = r_2 = 30^\circ$ ,  $i_1$  valant alors  $41^\circ$ . Vous trouverez les calculs en compléments sur notre site (productions récentes, Cahiers Clairaut).



**Fig.4.** Déviation en fonction de  $i_1$ . On trouve un minimum à  $22^\circ$ . On a représenté aussi la dérivée de la déviation qui s'annule pour  $i_1$  proche de  $41^\circ$ .

De plus on remarque que  $3^\circ$  de déviation entre  $22^\circ$  et  $25^\circ$  sont produits par 40 % des rayons solaires incidents (de  $25^\circ$  à  $60^\circ$ ) ce qui rend la zone proche de  $22^\circ$  plus lumineuse que le fond du ciel. En réalité le halo a une largeur plus faible, de l'ordre de  $1,5^\circ$  (c'est à peu près la vision que l'on a d'une pièce d'un centime tenue à bout de bras).

Si les rayons frappent les cristaux sur les faces hexagonales pour ressortir par une face rectangulaire, les calculs précédents restent valables en remplaçant  $60^\circ$  par  $90^\circ$  pour A. On obtient alors une déviation minimale à  $46^\circ$  et le halo supplémentaire à  $46^\circ$ .

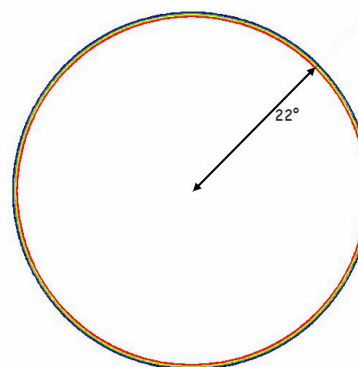
**Dépendance de D avec  $\lambda$**

Les irisations sont dues au fait que  $n$  varie avec la longueur d'onde  $\lambda$  suivant la loi de Cauchy :

$n = A + B/\lambda^2$ . Pour la glace les coefficients A et B valent respectivement 1,301244755 et 3179,38302 (pour  $\lambda$  exprimé en nm)

	$\lambda$ (nm)	n
bleu	480	1,315
vert	540	1,312
jaune	580	1,311
rouge	680	1,308

Pour le halo, les milliards de cristaux de glace ont toutes les orientations possibles, donc les rayons émergents, déviés de  $22^\circ$  par rapport à la direction du Soleil, dessinent un cercle autour de l'axe observateur-Soleil (figure 5).



**Fig.5.**

Le cercle de plus petit rayon est rouge, les autres forment le dégradé observé. Le halo est formé de cercles colorés concentriques aux couleurs délavées, souvent seul le rouge à l'intérieur est assez bien visible, mais l'intensité lumineuse du fond du ciel écrase les autres couleurs.

Dans la photo prise à Boukhara, le minaret ne sert qu'à occulter le Soleil pour donner une image plus lisible. ■

# 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

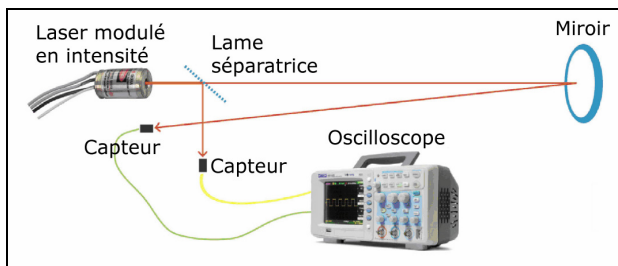
La lumière a toujours tenu une place importante en physique. Après la question de sa nature, est venu le souci de mesurer sa vitesse de propagation. Galilée, Römer, Fizeau, Foucault... de nombreux physiciens ont redoublé d'imagination pour arriver à la mesurer malgré les difficultés à surmonter. Avec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

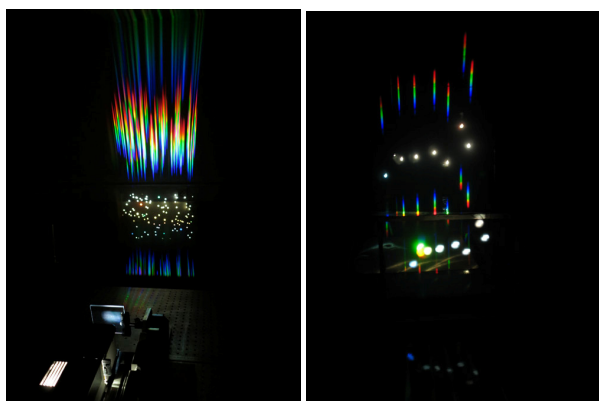
<sup>3</sup> Very Large Telescope, au Cerro Paranal (Chili).

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.

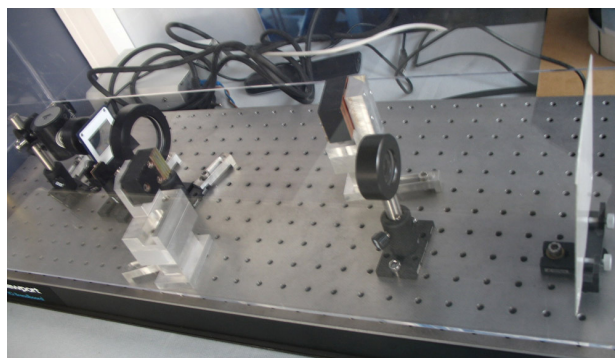
Notre montage permet de montrer le problème de la perte d'information due au chevauchement des spectres dans un champ d'étoiles et donc la nécessité d'utiliser un masque pour sélectionner certaines étoiles et éviter le chevauchement des spectres (figure 3). Un champ réel observé au télescope Keck (Mauna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

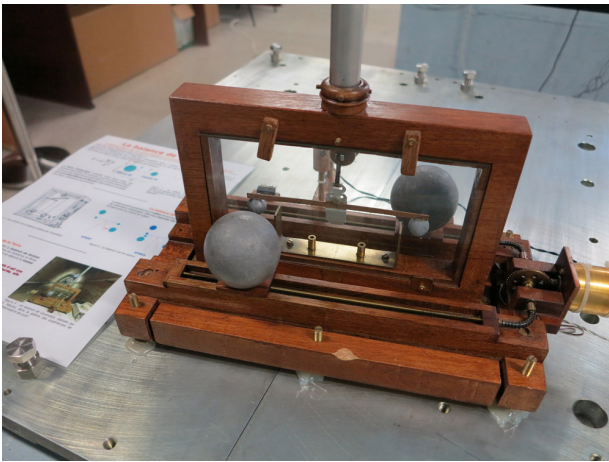
L'expérience que nous proposons a, elle aussi, été développée par Georges Patrel qui a réalisé l'exploit de la fabriquer en totalité. Il l'a décrite dans les Cahiers Clairaut n° 104 (2003), et n° 105 (2004).

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.



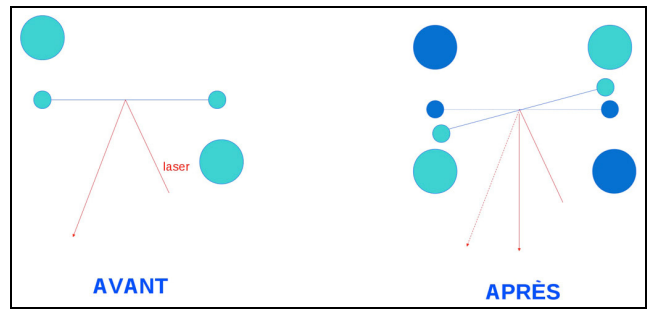


**Fig.5.** La balance de Cavendish et la maquette de la balance historique réalisées toutes deux par Georges Paturel

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

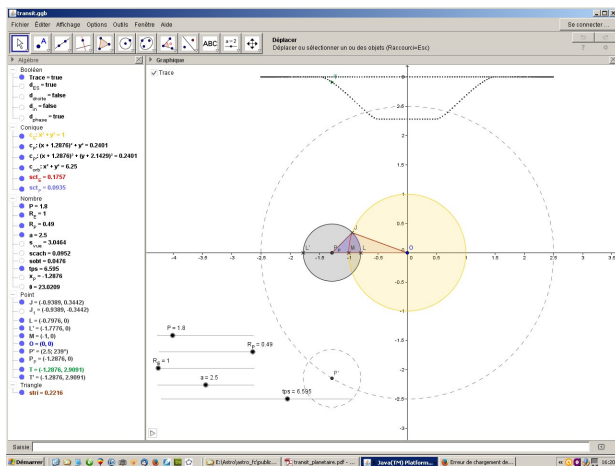
détecter une variation du signal enregistré quand la planète passe devant l'étoile. Les élèves doivent donc définir plusieurs paramètres :

- (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). ■

## Augustin Fresnel

Christian Bracco<sup>1</sup> et Samuel Haspot<sup>2</sup>

*L'œuvre d'Augustin Fresnel durant sa courte vie (il meurt à 39 ans) est impressionnante. Il montre qu'à partir d'une conception ondulatoire de la lumière on peut rendre compte de l'aberration stellaire, des phénomènes de diffraction, de la question jusqu'alors inexplicite de la polarisation de la lumière. C'est lui en particulier qui établit que les vibrations lumineuses s'exercent d'une manière transversale. On lui doit enfin une amélioration très importante de la portée des phares qui bordent nos côtes marines grâce à la mise au point de lentilles à échelons qui de nos jours portent son nom*

Augustin Fresnel a contribué de manière déterminante à la connaissance de la nature ondulatoire de la lumière et au développement de l'optique. L'année 2015, année mondiale de la lumière, est l'occasion de revenir sur son œuvre. Son nom est bien évidemment associé aujourd'hui au principe de Huygens-Fresnel pour l'interprétation de la diffraction et des interférences. Mais nous rappellerons aussi les contributions de Fresnel à l'astronomie, de l'aberration des étoiles au prisme d'Arago, et la problématique relativiste qui en découle. Fresnel établit également le caractère transverse de la vibration lumineuse à travers l'interprétation des couleurs des lames cristallines et la description de la polarisation rotatoire découverte par Biot ; il donne l'expression des coefficients de réflexion en fonction de la polarisation et analyse le phénomène de réflexion totale. Fresnel est enfin connu pour avoir amélioré de façon très significative l'éclairage des phares côtiers, en les dotant du système de lentilles qui porte son nom. Fresnel, ingénieur, physicien et mathématicien, crée les outils dont il a besoin, tant sur le plan expérimental que théorique. Après lui, on parlera de « physique mathématique ».



Une brève présentation de la vie d'Augustin Fresnel

Il y a peu d'ouvrages consacrés à Fresnel, par manque d'informations à son sujet, en dehors principalement de l'éloge de son ami, l'astronome François Arago, reproduit dans les Œuvres complètes ([1] tome 3 pp. 475-526). Le lecteur intéressé pourra principalement se reporter à des ouvrages récents [2, 3, 4, 5], à un

recueil de textes publié en 1927 pour le centenaire de sa mort [6] tenu en présence d'éminents physiciens venus du congrès de Solvay, ou au texte d'une inauguration de 1847 [7].

Augustin Fresnel est né à Broglie, à une vingtaine de kilomètres au sud-ouest de Lisieux, le 10 mai 1788. Il meurt à l'âge de 39 ans, à Ville-d'Avray le 14 juillet 1827. Son père, Jacques Fresnel (1755-1805) est architecte, né à Mathieu, un petit village entre Caen et la côte, où la famille s'installe pendant la révolution. Sa mère, Augustine Mérimée, est la fille de François Mérimée, l'intendant du château de Broglie (famille du physicien). Son oncle, Léonor Mérimée, jouera un rôle important auprès d'Augustin : il est peintre et professeur de dessin à l'École Polytechnique. Il est le père de Prosper Mérimée, qui est donc le cousin d'Augustin. Augustin Fresnel a trois frères : Louis (1786-1809), lieutenant mort en Espagne ; Léonor (1790-1869), inspecteur général des Ponts et Chaussées et Fulgence (1795-1865), consul de France à Djeddah. Après leurs études à l'École Centrale de Caen (de 13 à 16 ans), Louis, Augustin (en 1804) et Léonor entrent successivement à l'École Polytechnique, où ils suivent les cours de Monge, Poisson et Legendre. Augustin poursuit aux Ponts et Chaussées (1806-1808).

Augustin Fresnel est d'abord envoyé en Vendée pour, d'après lui, « niveler de petites portions de route, chercher dans les environs des bancs de cailloux » en participant à la construction de La Roche-sur-Yon. Dès 1810, il s'intéresse à la chimie, en marge de son travail d'ingénieur, comme il l'écrit à son oncle Léonor. Il est nommé en 1813 dans la Drôme à Nyons, pour prolonger la route de Montgenèvre qui mène à Turin. En 1814, il demande des renseignements sur la polarisation à son frère Léonor et lui donne une explication de l'aberration des étoiles. Il fait remettre à André Marie Ampère (1775-1836) ses « Rêveries » par son oncle (manuscrit perdu). En mars 1815, il prend les armes aux côtés des Bourbons contre Napoléon. Destitué pendant les Cent jours, il se retire à Mathieu où il commence ses travaux sur la

<sup>1</sup> SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, LNE, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France, CRHI, EA 4318, Université de Nice-Sophia Antipolis, UFR LASH, BP 3209, 98 Bd Hériot, 06204 Nice Cedex 3. [cbracco@unice.fr](mailto:cbracco@unice.fr)

<sup>2</sup> Lycée des métiers Pierre Mendès France, 1 rue de Goussainville 95400 Villiers-Le-Bel, France. [Samuel.Haspot@neuf.fr](mailto:Samuel.Haspot@neuf.fr)

diffraction et rédige un premier mémoire, qu'il envoie en 1815 à François Arago (1786 - 1853). Ce dernier mettra tout en œuvre pour aider Fresnel, en lui donnant accès au cabinet de physique de l'École Polytechnique et en lui obtenant des congés pour se consacrer à la recherche. Fresnel est réintégré par Louis XVIII, à Rennes puis, grâce à l'intervention d'Arago, à Paris. En 1819, il est nommé à la commission des phares et balises, qu'il ne quittera plus. Il est élu à l'Académie des sciences à l'unanimité en 1823. Sa santé a toujours été fragile, et suite visiblement à la surcharge de travail occasionnée par sa fonction d'examineur à l'École Polytechnique de 1821 à 1824, il est victime d'une hémoptysie, qui le conduit à arrêter ses recherches. En 1825, il est élu à la Société Royale de Londres. Thomas Young obtient pour lui la prestigieuse médaille de Rumford, qui lui est remise peu de temps avant sa mort. Cette reconnaissance vient clore une tension latente entre Young et Fresnel, ce dernier exprimant une certaine amertume dans une lettre de 1824 : « *Cependant, entre nous, je ne suis pas persuadé de la justesse de ce mot spirituel par lequel vous vous comparez à un arbre et moi à une pomme que cet arbre aurait produite : j'ai la conviction intérieure que la pomme aurait poussé sans l'arbre [...]* » ([1] tome 2, p. 770). La correspondance entre les deux hommes a été soutenue : elle compte une vingtaine de lettres entre 1816 et 1827. Fresnel citera notamment Young en rapport avec la transversalité des ondes lumineuses.

## De l'aberration des étoiles au prisme d'Arago

Dès juillet 1814, Augustin Fresnel montre qu'il n'est aucunement besoin d'avoir recours à la théorie newtonienne (corpusculaire) de l'émission lumineuse, alors en vogue, pour rendre compte de l'aberration stellaire ([1] tome 2, pp. 820-825). Il établit qu'il ne s'agit là que d'un effet dû au mouvement de la lunette, celle-ci se déplaçant à la vitesse  $V$  avec la Terre pendant que la lumière se déplace à la vitesse  $c$  de l'objectif à l'oculaire. Par conséquent, le foyer de l'objectif joue le rôle de foyer secondaire quand la lumière de l'étoile lui parvient, expliquant ainsi que la direction « apparente » dans laquelle une étoile est perçue fait un angle  $\delta\theta \approx V \sin \theta / c$  avec la direction « vraie ».

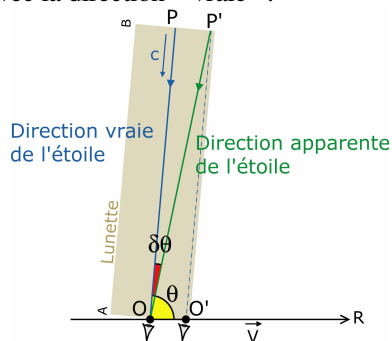


Fig.1. Aberration stellaire.

Fresnel écrit à son frère : « *Suppose que l'œil de l'observateur soit placé en O à l'extrémité d'une lunette AB dirigée vers une étoile fixe et de manière que son axe OP prolongé passe par le lieu vrai de l'étoile. Maintenant considérons l'effet qui résulte du mouvement progressif de la lumière et du mouvement de l'œil et de la lunette dans le sens OR. Imagine que l'extrémité de la lunette ne soit percée qu'au point P. – pendant que la lumière va de P en O, l'œil change de position, et se trouve en O' lorsque la lumière est arrivée en O, en sorte qu'il ne voit rien. – Mène en O' une parallèle à OP, suppose l'œil et la lunette retournés dans leur première position, et perce l'extrémité supérieure de la lunette au point P' : alors, en appliquant l'œil en O, tu verras l'étoile par le trou P' , parce que l'œil arrivera en O' aussitôt que la lumière qui passera par P' : et voilà pourquoi tu crois que l'étoile est dans le prolongement de la ligne OP', tandis qu'elle est effectivement dans la ligne OP [...]. L'hypothèse des vibrations s'accorde alors tout aussi bien que celle de Newton avec le phénomène de l'aberration des étoiles fixes, puisqu'il [...] suffit de reconnaître que la lumière met 8 minutes à venir du soleil à nous, et la terre une année à parcourir son orbite, ce qu'on admet également dans les deux hypothèses ».*

Dans une lettre de 1818 ([1] tome 2, pp 627-636), il répond à une question de François Arago, qui lui demandait d'interpréter, dans le cadre de la théorie ondulatoire, l'expérience du prisme. Il s'agissait pour Arago de viser une étoile, à son lever et à son coucher, ou à des périodes différentes de l'année, de manière à ce que la vitesse de la Terre (sa rotation diurne ou son mouvement orbital) se compose différemment avec la vitesse de la lumière provenant de l'étoile. Arago s'attendait à observer un déplacement du spectre lumineux de l'étoile formé par le prisme, la dispersion de celui-ci dépendant de la vitesse de la lumière. Or, à la précision des observations, à l'ordre  $V/c$ , aucun décalage n'était observé.

Fresnel établit par le calcul que si la vitesse de la lumière dans le prisme, qui se déplace à la vitesse  $V$  dans l'éther (milieu dans lequel les ondes lumineuses se propagent), est  $c/n + V(1 - 1/n^2)$ , où  $n$  est l'indice de réfraction du prisme, le changement d'angle des rayons lumineux à la sortie du prisme compense exactement l'effet d'aberration pour l'observateur (cf. [8] p. 541-542, pour une présentation détaillée). Il en tire la conclusion remarquable « *que le mouvement de notre globe ne doit avoir aucune influence sensible sur la réfraction apparente* ».

Pour tester la formule de Fresnel, Fizeau réalise en 1851 un interféromètre [9-11] sur la base de l'expérience des fentes d'Young (en montage de Fraunhofer). Les faisceaux parallèles parcourent les branches d'un tube en U horizontal où circule de l'eau,

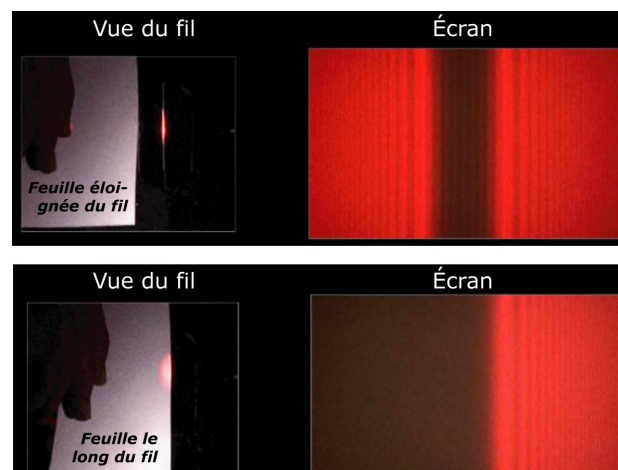
dans le sens de l'écoulement pour l'un des faisceaux et dans le sens contraire pour l'autre. Partant du repos, les franges d'interférences (observées à l'oculaire) sont déplacées en des sens opposés lorsque le sens de l'écoulement est inversé. Fizeau commente ses observations : « *Ce résultat est ensuite comparé à ceux que l'on déduit par le calcul des diverses hypothèses relatives à l'éther. Dans la supposition de l'éther entièrement libre et indépendant du mouvement des corps, le déplacement devrait être nul. Dans l'hypothèse où l'éther serait uni aux molécules des corps, de manière à partager leurs mouvements, le calcul donne, pour le déplacement double [obtenu après inversion du sens de l'écoulement], la valeur 0,92. L'observation a donné un nombre moitié plus faible, ou 0,46. Dans l'hypothèse où l'éther serait partiellement entraîné, suivant la théorie de Fresnel, le calcul donne 0,40, c'est à dire un nombre très-voisin de celui qui a été trouvé par l'observation [...]* ». Cette formule sera interprétée en 1895, par le physicien hollandais Hendrik Antoon Lorentz, sur la base de l'introduction du « temps local »  $t' = t - Vx/c^2$ , prélude à la théorie de la relativité restreinte [8, 12]. Quant aux corps opaques, ils doivent laisser passer librement l'éther, pour expliquer l'aberration, ce que Michelson et Morley tenteront de mettre en évidence en 1887 avec leur célèbre interféromètre. Comme cela est bien connu, Lorentz introduira la contraction des longueurs dans le sens du mouvement pour expliquer, de manière *ad hoc*, l'impossibilité de mettre en évidence ce « vent d'éther », *i.e.* le mouvement de la terre par rapport à l'éther considéré comme un référentiel absolu. L'explication générale viendra avec la théorie de la relativité restreinte.

## L'interprétation ondulatoire de la diffraction

La diffraction de la lumière a été mise en évidence dès le XVII<sup>e</sup> siècle par Francesco Grimaldi (1618-1663) [13]. Toutefois, il faut attendre le début du XIX<sup>e</sup> et les travaux de Fresnel pour avoir une explication convaincante du phénomène.

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, les physiciens balayaient l'hypothèse de la nature ondulatoire de la lumière par le fait que celle-ci ne contournait pas les obstacles. C'est justement cet argument qui a poussé Fresnel, non convaincu par la théorie corpusculaire de Newton, à étudier les ombres. Il reproduisit avec un fil de fer une expérience de Grimaldi, qui s'était placé dans une pièce obscure, avait percé un trou dans son volet, et placé un petit objet sur le trajet des rayons lumineux. Ce dernier avait comparé la taille de l'ombre formée sur une feuille blanche, à celle prévue géométriquement et observé une différence. Il avait également remarqué la présence de raies colorées non seulement

en dehors de l'ombre, mais aussi à l'intérieur de celle-ci. Fresnel s'intéresse dans un premier temps aux franges extérieures et remarque qu'elles ne se situent pas sur des droites mais sur des branches d'hyperbole. En plaçant un petit carré de papier noir sur un des côtés du fil, il remarque que les franges intérieures disparaissent.



**Fig.2.** Disparition des franges intérieures lorsqu'on approche un obstacle d'un des bords du fil (figure de diffraction du bord d'écran) [11].

De cette expérience il en déduit une première interprétation qu'il développera dans son mémoire de 1815 ([1] tome 1, pp. 9-34). Il considère les bords du fil comme des sources secondaires, et le phénomène de diffraction observé se réduirait alors à un phénomène d'interférences, entre les ondes lumineuses émises par les bords de l'obstacle pour les franges intérieures, et entre l'onde issue de la source et celles émises par chacun des bords pour les franges extérieures de part et d'autre de l'ombre. Il précise dans son mémoire : « *J'ai considéré le point lumineux, et les deux bords du fil, comme des centres d'ondulation régulière, et les intersections de leurs cercles devaient me donner la position des franges* ». Pour les franges extérieures Fresnel considère un point  $F$  extérieur à l'ombre et note  $x$  sa position à partir du bord de l'ombre. Il exprime alors les longueurs du rayon provenant de la source et parvenant au point  $F$  et des rayons passant par le bord du corps en fonction de  $x$ , de la distance  $a$  entre la source et l'obstacle et de la distance  $b$  entre l'obstacle et l'écran. Pour les franges intérieures, Fresnel prend un point  $M$  intérieur à l'ombre, note  $y$  sa position et décrit les ondes par des cercles concentriques. Il détermine alors la position des centres des franges intérieures et extérieures en introduisant les différences de marche entre les rayons, et en considérant qu'on a des interférences constructives pour les centres des franges brillantes, et des interférences destructives pour les franges sombres. La position des franges obtenues par le calcul semble en accord avec l'observation, à savoir : des franges lumineuses équidistantes et de même

largeur pour les franges intérieures, et des franges lumineuses de plus en plus proches et de moins en moins larges au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'obstacle pour les franges extérieures. Cependant, Fresnel se rend compte que la position des franges brillantes et sombres est « *presque exactement inverse de celle que donne l'expérience* ». Il propose alors une solution qui consiste en une correction d'une demi-ondulation. Les ondes secondaires, émises au niveau de l'obstacle, ne sont plus en phase avec l'onde incidente. Les valeurs obtenues après correction semblent alors bien s'accorder avec les valeurs expérimentales.

Si son premier modèle lui semble correct, Fresnel, qui cherche toujours à augmenter la précision de ses mesures, conçoit ensuite un micromètre très précis et réalise à nouveau ses expériences en lumière monochromatique produite avec un vitrail de très bonne qualité. Il se rend alors compte que sa première interprétation ne peut convenir : « *On ne peut attribuer les phénomènes de la diffraction aux seuls rayons qui touchent les bords des corps* ». Fresnel élabore alors la théorie des rayons efficaces, qu'il développera dans le *Supplément au deuxième mémoire sur la diffraction de la lumière* en juillet 1816 ([1] pp. 129-170). Il prend sur l'écran un point *P* intérieur à l'ombre. Il divise le front d'onde de l'onde arrivant au bord de l'obstacle en une infinité de petits arcs, de sorte que les rayons qui en sont issus et arrivent en *P* diffèrent d'une demi-ondulation. C'est la méthode des « zones de Fresnel » en optique. Si l'on considère que deux rayons suffisamment éloignés de l'obstacle peuvent être considérés comme parallèles, il en résultera que « *leurs effets se détruiront mutuellement* ». En généralisant ceci à l'ensemble du front d'onde, seuls deux arcs (les plus proches des deux bords de l'obstacle) « *produiront un effet sensible* ». Il restreint ainsi le problème à deux rayons dont la source se déplace sur ces deux arcs selon la position du point sur l'écran (et qui sont donc désolidarisés des bords de l'écran). Si cette approche ne permet pas de déterminer aussi précisément que souhaité les positions des franges, elle constitue une première étape vers le fameux principe, appelé depuis de Huygens-Fresnel, que Fresnel introduit dans son mémoire de 1818, couronné par l'Académie des sciences ([1] tome 1, pp. 247-364). Chaque point atteint par l'onde lumineuse se comporte comme le centre d'une nouvelle source d'ondes sphériques (dans un milieu homogène et isotrope) et « *il faut admettre qu'une infinité d'autres rayons séparés de ces corps par des intervalles sensibles [...] concourent aussi à la formation des franges* ». Le calcul, qui prend en compte une infinité de sources secondaires interférant au point considéré, nécessite la connaissance de nouvelles intégrales, appelées « intégrales de Fresnel », dont Fresnel calcule les tables de valeur.

Leur représentation dans le plan complexe est connue en optique sous le nom de « spirale de Cornu » [14]. Notons que cette courbe est aujourd'hui utilisée pour la construction des échangeurs d'autoroute, du fait de la proportionnalité de sa courbure avec l'abscisse curviligne. Elle est encore appelée « clothoïde » [15], en lien avec Clotho qui filait la destinée des hommes, cette courbe semblant reproduire l'enroulement de la laine sur un métier à tisser. Fresnel aurait été amusé d'apprendre l'utilisation de ses intégrales dans son métier d'origine !

## La transversalité de la vibration lumineuse

En quoi consiste la polarisation de la lumière par réflexion vitreuse découverte par Etienne Louis Malus en 1810 et qui permet d'expliquer les propriétés, connues depuis Huygens [16], des faisceaux lumineux après la traversée d'un milieu biréfringent ? La lumière étant une onde, la composante de la vibration est-elle longitudinale et/ou transversale ? Fresnel considère un dispositif d'interférences (fentes d'Young) et polarise les faisceaux après chacune des fentes. Il conclut dès 1819 ([1] tome 1 p 521) : « *Les expériences que nous venons de rapporter conduisent donc en définitive aux conséquences suivantes :*

1° *Dans les mêmes circonstances où deux rayons de lumière ordinaire paraissent mutuellement se détruire, deux rayons polarisés en sens contraires n'exercent l'un sur l'autre aucune action appréciable ;*

2° *Les rayons de lumière polarisés dans un seul sens agissent l'un sur l'autre comme les rayons naturels : en sorte que, dans ces deux espèces de lumières, les phénomènes d'interférences sont absolument les mêmes ;*

3° *Deux rayons primitivement polarisés en sens contraires peuvent ensuite être ramenés à un même plan de polarisation, sans néanmoins acquérir par là la faculté de s'influencer ;*

4° *Deux rayons polarisés en sens contraires, et ramenés ensuite à des polarisations analogues, s'influencent comme les rayons naturels, s'ils proviennent d'un faisceau primitivement polarisé dans un seul sens [en italiques dans le texte] ».*

Cette expérience est connue sous le nom d'expérience de Fresnel-Arago. Mais ce n'est qu'en 1821 que Fresnel ose l'explication ([1] tome 1 pp. 629-630) : « *Nous sentîmes l'un et l'autre [avec Ampère] que ces phénomènes s'expliqueraient avec la plus grande simplicité, si les mouvements oscillatoires des ondes polarisées n'avaient lieu que dans le plan même de ces ondes. Mais que devenaient les oscillations longitudinales suivant les rayons ? Comment se*

trouvaient-elles détruites par l'acte de polarisation [...]. Ce n'est que depuis quelques mois qu'en méditant avec plus d'attention sur ce sujet, j'ai reconnu qu'il était probable que les mouvements oscillatoires des ondes lumineuses s'exécutaient uniquement suivant le plan de ces ondes, pour la lumière directe comme pour la lumière polarisée ». Cette transversalité de la vibration lumineuse lui permet alors d'expliquer les couleurs des lames cristallines. Elles résultent des interférences constructives de la lumière polarisée rectilignement dont la direction de polarisation se décompose, à l'entrée de la lame, suivant les lignes neutres perpendiculaires de celle-ci. Ces deux composantes traversent la lame avec des vitesses différentes et acquièrent un déphasage proportionnel à l'épaisseur de la lame. À la sortie, un analyseur ramène les deux directions perpendiculaires sur une direction commune, permettant l'interférence des deux ondes [11].

Fresnel déduira que le pouvoir rotatoire de certains cristaux ou liquides peut être considéré comme une biréfringence circulaire en décomposant la polarisation rectiligne incidente en deux polarisations circulaires (droite et gauche), se propageant dans le milieu avec des vitesses différentes. La recombinaison avec un analyseur à la sortie met en évidence une rotation de la direction de polarisation initiale, fonction de l'épaisseur traversée et de la longueur d'onde.

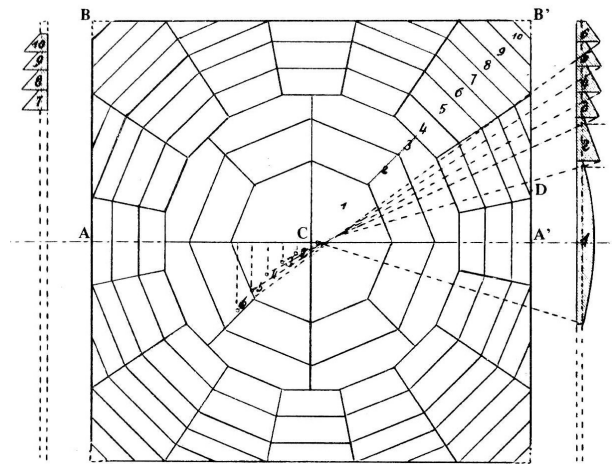
Il calculera les coefficients de réflexion et de transmission en lumière polarisée, sur la base d'un modèle mécanique de l'éther permettant de propager une vibration transverse, en utilisant la conservation de l'énergie et la continuité de la vitesse des molécules d'éther à l'interface entre deux milieux réfringents.

Dans le cas du passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent, pour une valeur de l'angle d'incidence supérieure à celle de l'angle limite, il étudiera le phénomène de réflexion totale, fonction de la polarisation. Il introduira dans son analyse les nombres « imaginaires » pour rendre compte des valeurs prises par les fonctions sinusoïdales ; on parle aujourd'hui d'onde évanescente de Fresnel.

## Phares et lentilles de Fresnel

Le système d'éclairage des phares côtiers était jusqu'à Fresnel basé sur des réflecteurs (catoptriques) constitués de miroirs paraboliques. Le type de source et les pertes de la lumière collectée entraînaient une portée modérée des phares. Si les ingénieurs avaient conscience qu'ils gagneraient à utiliser la réfraction de la lumière, comment concevoir un système de grande dimension, de courte focale, à la fois léger et facilement réalisable ? Si l'idée des lentilles à échelon

est attribuée à Buffon, et celle de leur réalisation, en utilisant des morceaux de lentille, du moins théoriquement, à Condorcet, c'est cependant Fresnel qui réalise les premières lentilles de ce type, en collant sur un même plan des anneaux concentriques de rayons de plus en plus grands et de même focale.



**Fig.3.** Plan et profils d'une lentille échelonnée à zones polygonales de 76 cm de côté et de 92 cm de foyer, ([1] tome 3).

Utilisant les meilleurs verres, dessinant son propre système d'assemblage des lentilles (et découvrant la biréfringence provoquée à cette occasion), il réalise une première lentille testée avec succès sur l'Arc de Triomphe en 1821. Peu après, le système de lentilles de Fresnel équipe tous les phares côtiers, non seulement en France, mais aussi à l'étranger. La marine lui témoigne sa reconnaissance en baptisant, du nom de Fresnel, un sous-marin en 1929. La portée des phares devient dès lors bien supérieure à ce qu'elle était et la limitation n'est plus due qu'à la rotondité de la Terre. Fresnel améliore au passage le dispositif d'éclairage et de codage des phares.

Les travaux scientifiques de Fresnel en optique couvrent à peine une dizaine d'années, entre 1814 et 1824. Il n'en demeure pas moins que son œuvre, dans toutes les parties qu'il a abordées, est toujours d'actualité.

**Remerciements :** L'un des auteurs (C.B.) tient à remercier tout particulièrement Gisèle Krebs, son ancien professeur à l'École Normale Supérieure de Cachan, pour lui avoir fait découvrir les travaux de Fresnel, en particulier au cours de la réalisation du *cédérom Histoire des idées sur la lumière*, et pour ses remarques.

### Bibliographie [1] à [16].

Vous trouverez toutes les références sur le site du CLEA. ■

# ARTICLE DE FOND

## Pourquoi doit-on considérer la vitesse de la lumière comme constante en présence d'un champ de gravitation?

Georges Paturel, astronome retraité de l'Observatoire de Lyon

*Cet article aborde quelques points particuliers concernant la relativité restreinte et la relativité générale. Dans les deux cas Einstein recherchait une unification des lois de la physique. La relativité restreinte permet d'établir des équations entre différents référentiels d'inertie. La relativité Générale dérive de la relativité restreinte mais elle englobe aussi la gravitation. Une gravitation qui ne se conçoit plus comme une force mais comme une courbure de l'espace-temps, dépendant de la répartition des masses. L'article relève quelques difficultés spécifiques lorsque l'on cherche à passer d'une théorie à l'autre.*

### Introduction

La question du titre peut paraître étrange alors qu'on pense admis depuis Einstein que la vitesse de la lumière est une constante universelle, au point que sa valeur a été fixée conventionnellement. Souvent d'ailleurs, dans certains ouvrages la valeur est fixée à la valeur unité (i.e.,  $c_0=1$ ).

Pourtant si on lit Einstein lui-même dans son petit livre : "La Relativité" voici ce qu'on trouve (chapitre 22) :

"... cette conséquence [observation de la courbure d'un rayon lumineux au voisinage d'une masse] montre que, conformément à la théorie de la relativité générale, la loi déjà souvent mentionnée de la constance de la vitesse de la lumière dans le vide, qui est une des deux suppositions fondamentales de la Théorie de la relativité restreinte, ne peut pas prétendre à une validité illimitée. En effet, une courbure des rayons lumineux ne peut se produire que si la vitesse de propagation de la lumière varie avec le lieu."

Plus loin (chapitre 27), nous trouvons encore cette mention.

Cette affirmation sous la plume d'Einstein peut même sembler naturelle. En effet, en optique, on considère que la lumière se propage dans un milieu quelconque avec une vitesse différente de celle qu'elle aurait dans le vide ( $c \neq c_0$ ). Le rapport  $n = c_0/c$  s'appelle l'indice de réfraction. Si l'indice de réfraction change le long du trajet lumineux, le rayon lumineux se courbe. Par exemple, un rayon lumineux traversant l'atmosphère terrestre, où l'indice de réfraction varie de manière continue, change de direction.

Ne serait-ce pas un progrès d'expliquer de manière unitaire la courbure d'un rayon lumineux dans un

champ de gravitation par un effet comparable à la réfraction (i.e. changement de la vitesse de la lumière) ? Nous allons voir que, dans l'interprétation de la relativité, ce n'est pas ainsi qu'il faut comprendre la courbure d'un rayon lumineux au voisinage d'une masse.

### Le principe d'équivalence

Le principe d'équivalence stipule que, *dans une région limitée de l'espace*, vous ne pouvez pas faire la différence entre un champ de gravitation et une accélération. Il découle de l'expérience de Eötvös, qui montre que la masse qui intervient dans l'inertie d'un corps est la même que celle qui intervient dans la gravitation. Il s'ensuit que si vous êtes en chute libre dans un champ de gravitation, vous avez l'impression d'être dans un repère libre de tout champ de gravitation, dans un repère euclidien.

Si donc, dans un champ de gravitation, on choisissait un référentiel en chute libre dans ce champ, le champ disparaissant, la vitesse de la lumière serait constante, exactement comme dans tout repère euclidien. Il semble que ce soit donc facile de se ramener au cas de la relativité restreinte, par ce choix. C'est vrai, mais c'est un peu plus compliqué.

### Peut-on définir un repère euclidien dans un champ de gravitation ?

Pour définir un repère euclidien, il faut un point origine et des axes représentés par des droites distinctes, passant par l'origine et munies de vecteurs définissant le sens et la mesure.



En présence d'un champ de gravitation, comment fait-on pour construire une droite ? Vous allez dire qu'il suffit de choisir deux points et qu'entre les deux on aura une droite, par définition. Est-on sûr que la ligne entre les deux est une droite au sens d'Euclide ? Notre univers est-il euclidien ? Comment le savoir ?

Une méthode imaginée par Gauss consiste à prendre trois points pour former un triangle et à mesurer la somme des angles. On mesure ainsi une propriété intrinsèque de l'espace. C'est ce que pourrait faire des êtres infiniment plats sur une sphère, même s'ils étaient incapables de visualiser la sphère en trois dimensions. Si le triangle est très petit, la somme de ses angles vaudra  $180^\circ$ . Mais si on considère une région très étendue, le résultat sera différent.

Dans le livre cité en introduction, Einstein montre avec l'exemple d'un disque tournant (chapitre 23), qu'on ne peut pas y définir un repère euclidien. Un observateur participant à la rotation peut considérer qu'il est dans un champ de gravitation et il peut prouver que son espace tournant n'est pas euclidien puisque le rapport de la circonférence par le diamètre ne donne pas le nombre  $\pi$ , ceci en vertu de la Relativité Restreinte.

En conclusion, dans un champ de gravitation, un repère euclidien ne peut être défini que dans une région très petite, car on ne peut pas trouver un même repère euclidien en chute libre et annulant partout le champ de gravitation. Que faire ?

## La Relativité Générale

La Relativité Générale résout le problème en abandonnant l'hypothèse que l'univers est euclidien. En chaque point de l'espace quadridimensionnel on définit un repère euclidien en chute libre dans le champ gravitationnel local. Ce repère n'est pas utilisé loin du point considéré, mais seulement dans son voisinage infiniment proche où le champ est uniforme. Comme nous l'avons vu, en vertu du principe d'équivalence, la chute libre efface le champ gravitationnel. La vitesse de la lumière doit y être constante.

Pour passer au point voisin, on choisit un nouveau repère euclidien, infiniment proche du précédent et on décrit le passage de l'un à l'autre. Par exemple, un vecteur du second repère est exprimé dans le premier en prenant en compte le transport non seulement des composantes de ce vecteur mais aussi le transport des vecteurs de bases de ce second repère. C'est ce que réalise le calcul tensoriel. On parvient ainsi à rester toujours dans un espace euclidien, mais jamais le même, en passant *de proche en proche* de l'un à l'autre. Un avantage est

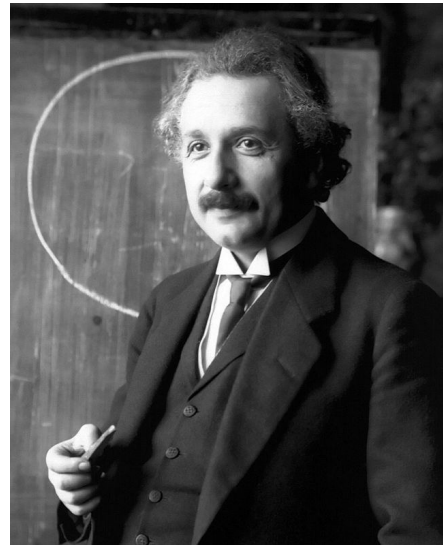
que, la description mathématique d'une loi, ne dépend plus du tout d'un référentiel particulier. On obtient ainsi un espace courbe, dont la courbure définit les trajectoires des corps en chute libre, y compris les photons. Ces trajectoires, qu'on appelle des géodésiques, sont, de fait, les nouvelles "droites" de l'espace courbe.

Comme le souligne C. Will dans son merveilleux livre "*Les enfants d'Einstein*", on est tenté en mesurant l'accroissement du temps de parcours d'un signal lumineux passant dans un champ gravitationnel intense, d'interpréter ce retard comme un ralentissement de la vitesse de la lumière. Il s'agit en réalité d'un allongement du trajet à cause de la courbure de l'espace.

## Une vitesse limite universelle

Terminons par un résultat intéressant démontré par J.M. Levy-Leblond<sup>1</sup> : la transformation de Lorentz utilisée en Relativité Restreinte découle simplement de quatre hypothèses, sans qu'il soit besoin de parler de la vitesse de la lumière : 1) l'espace-temps est homogène et les transformations cherchées sont linéaires ; 2) l'espace est isotrope ; 3) la transformation a les propriétés d'un Groupe (i.e. existence d'une transformation neutre, d'une transformation inverse, et d'une loi de composition) ; 4) la transformation respecte le principe de causalité.

Une vitesse particulière apparaît comme vitesse limite. On l'identifie à  $c$ , qui devient ainsi une constante universelle.



<sup>1</sup> Publié en anglais dans *American Journal of Physics* Vol. 44, N°3, mars 1976, mais traduit en français par O. Castéra et disponible sur internet sous le titre : "Une dérivation de plus des transformations de Lorentz".

# ENVIRONNEMENT

## L'Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes

*La lumière est le matériau de base des astronomes. Mais les sources humaines de lumière sont très gênantes pour l'observation du ciel étoilé sans parler des nuisances pour la faune nocturne. L'ANPCEN, qui lutte contre la pollution lumineuse, nous est présentée ici par Paul Blu, son secrétaire et président honoraire.*

L'Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes (ANPCEN) est depuis près de 20 ans, la seule association nationale dont l'objet social est entièrement dédié aux enjeux pluriels de la qualité de la nuit et de l'environnement nocturne.

Avec ses adhérents, dont 100 associations membres, l'ANPCEN est agréée « association de protection de l'environnement », elle représente plus de 5 500 personnes mobilisées.

L'ANPCEN est membre de la Fédération France Nature Environnement

### Un plaidoyer national

L'ANPCEN a été la première association à donner l'alerte quant à l'augmentation de la lumière artificielle nocturne et ses différents impacts. Elle a acquis une expertise originale et unique sur ces enjeux. L'association sensibilise tous les interlocuteurs nationaux utiles aux enjeux de l'évolution incontrôlée et exponentielle de l'éclairage public, entraînant des halos de pollution lumineuse, des lumières intrusives, des éblouissements, la disparition de la nuit et du ciel étoilé par dégradations de l'environnement nocturne. Elle demande un plan national de lutte contre les nuisances lumineuses, une mobilisation derrière les objectifs publics de tous les acteurs concernés, une révision des cahiers des charges actuellement utilisés pour les diagnostics de l'éclairage public.

**Plans d'actions :** Elle a contribué à faire reconnaître l'enjeu de l'environnement nocturne désormais pris en compte dans les lois Grenelle de l'environnement. Elle a par exemple contribué à l'arrêté sur l'extinction du secteur non résidentiel. L'ANPCEN est associée au processus de discussions de la norme expérimentale Afnor sur les nuisances lumineuses extérieures, dont elle a demandé la révision.

**Biodiversité :** L'ANPCEN porte la recommandation nationale d'une gestion de la lumière dans les Schémas Régionaux de Cohérence Écologique et trames vertes et bleues sous la forme d'une « trame nocturne » ainsi que la reconnaissance de la fragmentation des milieux écologiques par la lumière artificielle. Elle propose de manière complètement originale de coupler dès

maintenant une cartographie de la pollution lumineuse avec celle des trames verte et bleue.

**Santé :** L'ANPCEN recommande la prise en compte des effets de la lumière dans la révision du plan national santé environnement (PNSE) et souhaite une expertise collective indépendante des fabricants quant aux Leds, avant leur généralisation et installations massives.

**Énergie :** L'ANPCEN produit des recommandations sur les pratiques, les matériels et leur installation. L'ANPCEN a mis au point des étiquettes environnementales originales, sur le modèle des étiquettes énergie déjà connues du grand public, pour permettre aux élus de situer la performance des dispositifs existants et/ou de fixer leurs objectifs en termes d'éclairage public. Les étiquettes permettent également aux élus de promouvoir ces objectifs de manière lisible et simple auprès des citoyens.

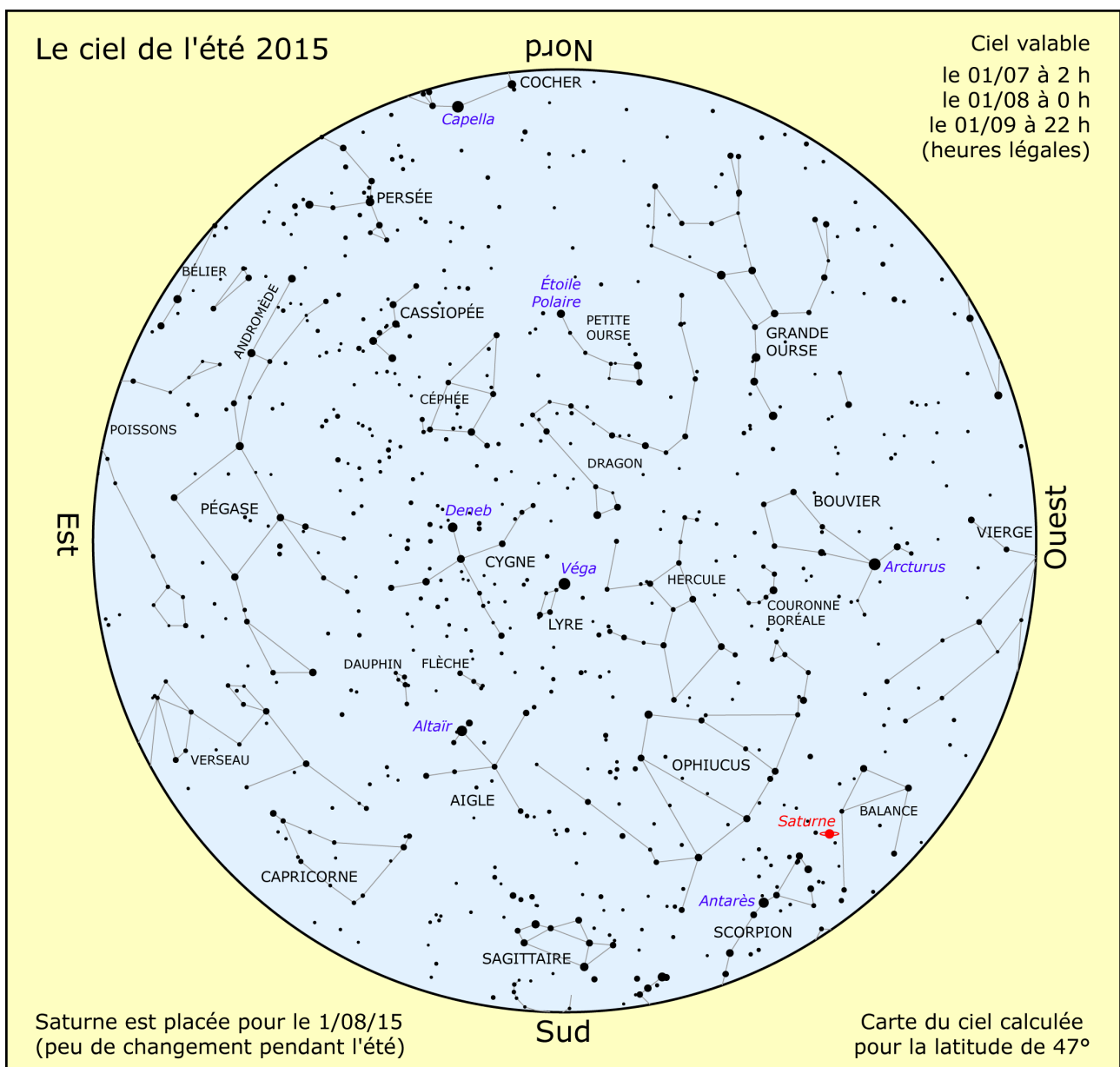
**Extinctions :** L'ANPCEN recense les communes pratiquant l'extinction nocturne en milieu de nuit. Afin d'encourager plus de sobriété énergétique chaque fois que possible, elle recommande un meilleur recours à l'extinction partielle ou totale en milieu de nuit, ainsi que sa prise en compte dans les certificats d'économie d'énergie, ce qui n'est pas aujourd'hui le cas.

### Une action locale, au plus près des communes et des citoyens

70 correspondants locaux de l'association alertent et sensibilisent toute l'année citoyens et décideurs publics nationaux et locaux sur les nuisances lumineuses : conférences, animations, expositions... L'ANPCEN organise depuis 2009 le concours Villes et villages étoilés qui valorise toutes les communes qui agissent ou veulent progresser dans la protection de l'environnement nocturne.

Par ailleurs, l'ANPCEN propose une charte à la signature des communes qui acceptent de s'engager volontairement à revoir leur éclairage extérieur. L'ANPCEN organise des échanges et rencontres, apporte des solutions et des conseils à tous ceux qui souhaitent notamment mieux gérer l'éclairage public. Cette charte a été renouvelée en 2012. Elle est consultable sur [www.anpcen.fr](http://www.anpcen.fr) ■

# LE CIEL DE L'ÉTÉ 2015



## Visibilité des planètes

**Mercure** sera difficile à observer cet été. On peut tenter de la trouver le matin fin juin ou le soir début septembre.

**Vénus** est à observer, très brillante et visible au télescope en croissant, le soir jusqu'à fin juillet puis le matin à partir de début septembre (invisible autour du 15 août). À noter, un rapprochement avec Jupiter les 30/06 et 1/07 au soir.

**Mars** est passée derrière le Soleil en juin et redevient visible le matin en août, encore très lointaine.

**Jupiter** reste observable le soir au début de l'été. Elle se trouve derrière le Soleil fin août donc invisible.

On pourra voir **Saturne** le soir encore tout l'été.

**Uranus** pourra être recherchée cet été dans la constellation des Poissons.

## Quelques événements (heures légales)

21 juin Solstice d'été à 18 h 38.

30 juin & 1<sup>er</sup> juillet Beau rapprochement de Vénus et Jupiter, distantes de moins de 0,5°.

6/07 La Terre est au plus loin du Soleil (1,0167 ua).

12/08 Maximum des Perséides. L'observation de ces étoiles filantes sera facilitée par l'absence de Lune.

13/09 Éclipse partielle de Soleil visible du sud de l'Afrique.

23/09 : équinoxe d'automne à 10 h 20 min.

28/09 (matin) : éclipse totale de Lune (voir page 53-54).

## Lune

Nouvelle Lune : les 16/07, 14/08, 13/09.

Pleine Lune : les 2/07, 31/07, 29/08.

# ARTICLE DE FOND

## Le développement des connaissances en astronomie

Valérie Frède et Sören Frappart, ECCD, Université Toulouse - Jean Jaurès

*Les auteurs nous présentent les principaux résultats de recherche relatifs au développement des connaissances en astronomie chez l'enfant dans le cadre d'un débat théorique et méthodologique de la littérature.*

### Connaissances "cohérentes" ou "fragmentées" ?

La nature des connaissances des enfants à propos du monde physique a été largement étudiée (Tiberghien *et al.*, 2002). Les études ont mis en évidence le fait que des connaissances alternatives aux savoirs scientifiques sont répandues et plus ou moins persistantes au cours de l'ontogenèse. L'identification de ces connaissances, en vue de comprendre les processus de développement conceptuels, a été effectuée dans divers domaines de la physique. Il en ressort que les enfants ne sont pas sans *a priori* au moment où ils sont confrontés aux théories scientifiques. Ils possèdent déjà des connaissances initiales, formées à partir de leurs observations spontanées du monde physique et des informations issues du contexte culturel auquel ils prennent part. Ces connaissances initiales peuvent être décrites *via* deux cadres différents : la théorie des connaissances fragmentées ou la théorie des modèles mentaux.

La *théorie des connaissances fragmentées*, développée notamment par Andrea di Sessa à la fin des années 80, est basée sur l'idée selon laquelle les connaissances des enfants consistent en une collection de fragments relativement indépendants qui proviennent d'interprétations, ou d'abstractions minimales de la réalité. Au cours du temps, les enfants acquièrent et construisent divers fragments de connaissances simples qui ne sont pas nécessairement reliés entre eux. De ce point de vue, les processus d'acquisition et de construction des connaissances consistent en une accumulation graduelle et une (ré)organisation de ces fragments sous la forme de structures de plus en plus complexes, jusqu'à ce qu'elles coïncident avec les conceptions scientifiques. Dans ce cadre, les réponses des enfants, lorsqu'on les interroge à propos de concepts scientifiques, sont plurielles et leurs connaissances sont conçues comme fondamentalement « fragmentées ». Cette fragmentation est mise en évidence quand des questions similaires, du point de vue du physicien, sont posées à un enfant

et que celui-ci fournit des réponses qualitativement différentes.

La *théorie des modèles mentaux* est basée sur l'idée selon laquelle des présupposés, c'est-à-dire des connaissances initiales précoces, contraignent le développement conceptuel au sein de domaines spécifiques. Ces présupposés, supposés innés et universels, orientent le processus de développement ultérieur qui évolue du fait de l'acquisition de connaissances culturelles, notamment scientifiques. Dans ce cadre, l'apparente pluralité des réponses est interprétée comme reflétant une organisation conceptuelle sous-jacente erronée mais structurée de manière cohérente, appelée modèle mental. Les modèles mentaux sont vus comme des structures dynamiques stables qui sont créées pour répondre à un problème spécifique (Philippe Johnson-Laird, 1983). Dans ce cadre, le développement conceptuel des enfants est conçu comme fondamentalement unitaire et leurs connaissances sont conçues comme cohérentes.

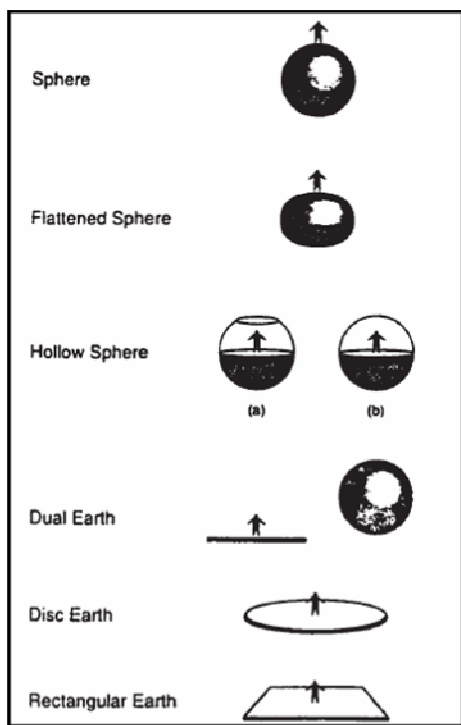
### Développement conceptuel en astronomie

Les concepts en astronomie sont difficiles à acquérir dans la mesure où l'explication scientifique diffère de la perception quotidienne de l'enfant. En ce sens, ils sont contre-intuitifs. Dans l'histoire de l'évolution des connaissances en astronomie, plusieurs "révolutions scientifiques" ont été nécessaires afin de dépasser les conceptions naïves, en particulier au sujet de la forme de la Terre, de sa place dans l'Univers et de ses mouvements. À l'échelle du développement de l'enfant, de nombreuses recherches ont été menées pour caractériser les processus d'acquisition et de construction des connaissances en astronomie et leurs étapes.

#### L'exemple de la forme de la Terre Modèles mentaux

En 1992, Stella Vosniadou et William Brewer ont mené une étude sur les connaissances relatives à la

Terre chez des enfants américains d'école élémentaire. Les auteurs ont conclu que les enfants développent des modèles mentaux cohérents qui sont potentiellement différents du modèle scientifique. L'identification de ces modèles a été réalisée grâce à l'utilisation de questions ouvertes et de tâches de production graphiques. Les réponses et les dessins de l'enfant sont interprétés comme rendant compte de sa compréhension de la Terre, c'est-à-dire de son modèle mental. Ce travail a permis d'identifier (1) des modèles mentaux dits "initiaux" (Terre plate, rectangulaire ou circulaire), (2) plusieurs modèles "synthétiques" (Terre creuse, Terre aplatie, double Terre) reflétant un effort de conciliation entre les connaissances intuitives et les savoirs scientifiques, et (3) le modèle scientifique (Terre sphérique, figure 1). La découverte d'un nombre limité de modèles mentaux cohérents de la Terre permet d'expliquer, selon les auteurs, les incohérences apparentes dans les réponses des enfants et revêt un caractère universel.

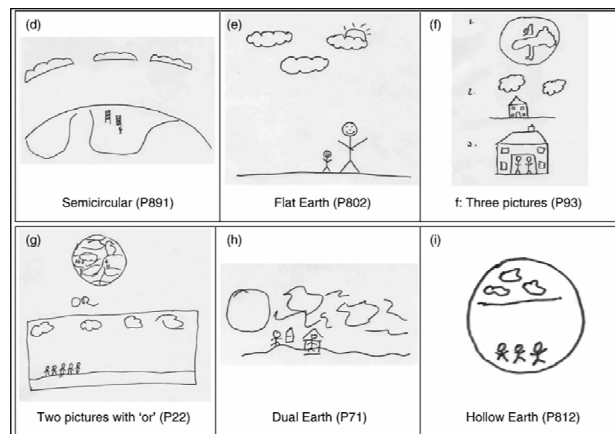


*Fig.1. Modèle développemental de la conceptualisation de la forme de la Terre (d'après Stella Vosniadou & William Brewer, 1992, p.549)*

### Connaissances fragmentées

Récemment, une série d'études a discuté le cadre théorique précédent à partir d'un changement de méthodologie. En effet, l'utilisation de la méthodologie précédemment présentée auprès d'adultes montre que ces derniers produisent des dessins assez proches de ceux des enfants bien qu'ayant une compréhension scientifique de la

forme de la Terre (c.f., figure 2.). Gavin Nobes et Georgia Panagiotaki (2007) concluent que la production d'une représentation graphique de la forme de la Terre génère des biais du fait du passage de 3 dimensions (i.e., sphéricité de la Terre) à 2 dimensions (i.e., production graphique) et que la formulation des questions est ambiguë.



*Fig.2. Productions graphiques de la forme de la Terre par des adultes anglais. (d'après Gavin Nobes & Georgia Panagiotaki, 2007, p. 652)*

Afin de tester une nouvelle méthodologie, Gavin Nobes et collaborateurs ont conduit en 2003 une étude à propos de la compréhension de la Terre en interviewant des enfants britanniques. Ils ont construit un questionnaire fermé, à partir du questionnaire ouvert de Stella Vosniadou et William Brewer (1992) et un jeu de modèles de la Terre en trois dimensions (3D). Leurs résultats suggèrent que les connaissances des enfants sont fragmentées et aucun modèle mental n'est identifié. Michael Siegal et ses collaborateurs ont étudié en 2004 les connaissances d'enfants âgés de 4 à 9 ans à propos de la Terre en utilisant la même méthodologie. Là encore, des inconsistances sont apparues dans les réponses des enfants mais aucun modèle mental initial ou synthétique n'a pu être identifié. De plus, aucune preuve n'est trouvée en faveur de l'hypothèse selon laquelle des présupposés issus du domaine de la physique contraignent le processus d'acquisition de connaissances dans le cas de la Terre.

Ainsi, les diverses critiques quant aux conclusions de Stella Vosniadou et William Brewer sont imputées essentiellement à leur méthodologie, c'est-à-dire à l'utilisation de dessins (modélisation en 2D) et de questions ouvertes identiques répétées.

### Considérations culturelles

Vosniadou et ses collègues font l'hypothèse que les modèles mentaux en cosmologie sont influencés par

deux sortes de contraintes. Le premier ordre de contraintes est supposé être inné et universel, ce sont les présupposés : (1) les objets physiques tombent s'ils ne sont pas soutenus (la Terre initialement conçue comme un objet physique, répondrait à cette contrainte, c'est pourquoi les êtres vivants habitent nécessairement au-dessus de la Terre), (2) nous percevons quotidiennement que la Terre est plate, nous la concevons donc initialement comme étant plate. Les contraintes de second ordre sont supposées être dépendantes du contexte culturel. Ce deuxième ordre de contraintes dépend de cosmologies locales et génère des différences quant aux spécificités des modèles mentaux.

Alla Samarapungavan et ses collaborateurs ont étudié en 1996 les réponses et les productions d'enfants indiens qui expliquent que la Terre repose sur de l'eau. En effet, dans la cosmologie indienne, l'Univers ressemble à un œuf, la Terre ressemble à un disque et "flotte" sur un océan. Diakidoy *et al.* (1997) ont répliqué l'étude avec des enfants amérindiens (Dakota du Nord et du Sud aux États-Unis), pour lesquels la culture traditionnelle est essentiellement animiste. Le modèle de la Terre creuse y apparaît dominant ce qui concorde avec la mythologie. Enfin à Samoa, la recherche conduite par William Brewer et ses collaborateurs (1987) a montré que le principal modèle initial de la Terre était celui d'un anneau. La forme « en anneau » a pu être associée à l'organisation sociale et physique de l'espace samoan (*c.f.*, figure 3.).



**Fig.3.** Modèle samoan de la Terre en anneau. (d'après Stella Vosniadou, 1994, p.425).

Lors de leur étude en 2003, Gavin Nobes et ses collaborateurs ont également réalisé une comparaison entre les performances d'enfants britanniques et asiatiques (originaires de l'Ouest de l'Inde, mais vivant à Londres) à propos de leur compréhension de la forme de la Terre. Les auteurs supposaient que les enfants originaires de l'Inde auraient de meilleures connaissances en astronomie du fait d'une sensibilisation plus forte à la présence

d'habitants de « l'autre côté » de la Terre. Néanmoins, aucune différence n'a été observée entre ces enfants évoluant dans un contexte culturel commun. Michael Siegal et ses collaborateurs en 2004 ont quant à eux comparé les connaissances d'enfants australiens et anglais évoluant dans des contextes culturels relativement similaires (*i.e.*, société occidentale) mais ayant un curriculum scolaire différent. Des enseignements en astronomie sont proposés dès l'école maternelle en Australie alors qu'ils ne sont introduits qu'en cours élémentaire de deuxième année en Angleterre. Il s'avère que les Australiens ont plus de connaissances scientifiques que leur homologues anglais. Toujours dans une perspective comparative, Valérie Frède et ses collaborateurs ont mis en évidence que des enfants qui évoluent dans un contexte culturel où le mode narratif est similaire à celui adopté à l'école (explications majoritairement mécanistes) ont plus de facilités à développer une compréhension scientifique en astronomie comparativement à des enfants évoluant dans un contexte culturel où le mode narratif diffère de celui proposé à l'école (explications majoritairement animistes *versus* mécanistes à l'école).

Ces études, si elles diffèrent quant au rôle accordé au contexte culturel et à l'influence des présupposés dans le développement cognitif, attestent de l'importance de prendre en compte les spécificités culturelles et scolaires dans la compréhension des processus de développement conceptuel en astronomie. En effet, l'acquisition de concepts en astronomie est un phénomène culturellement et historiquement situé.

### Connaissance où es-tu ?

Les études réalisées sur le développement conceptuel en astronomie ont également permis de s'interroger sur le rôle des objets créés par l'homme pour penser. Les deux cadres théoriques jusqu'ici présentés convergent en effet quant à leur manière de concevoir la localisation des connaissances : elles sont internes, dans la « tête » des enfants. Cependant, nombreux sont ceux qui supposent qu'elles sont indissociables des contextes matériels et humains dans lesquels elles émergent.

En 2001, Jan Schoultz et ses collaborateurs font ainsi remarquer que le contexte d'entretien proposé dans les précédentes études est pauvre et parfois incongru. Notamment lorsqu'il est demandé à l'enfant d'indiquer où se situe l'Angleterre et l'Australie sur son propre dessin ou sur une boule de polystyrène peinte en bleu. De ce fait, ces auteurs ont réalisé des entretiens en présence d'un artefact considéré comme

pertinent au regard de la thématique abordée. Cet objet est le globe terrestre. Ainsi, ils ont pu montrer que dès 7 ans les enfants expriment sans ambiguïté la rotondité de la Terre et utilisent la notion de gravité pour expliquer que l'on peut habiter « au-dessus » mais aussi « au-dessous » de la Terre. Ainsi, dans un contexte de discussion approprié, les enfants suédois expriment des connaissances scientifiques beaucoup plus précocement que ceux des études précédentes. La question se pose alors de savoir si l'aide apportée par un artefact réside « dans » l'objet ou dépend plus largement de la connaissance qu'en a l'enfant. En 2009, Bertrand Troadec et ses collaborateurs ont ainsi montré que le globe terrestre ne permet pas à l'enfant d'exprimer des connaissances scientifiques du fait de sa seule présence lors de l'entretien. Il ne peut jouer le rôle de mémoire externe que si l'enfant en a construit une signification, notamment suite aux enseignements formels. Ainsi les auteurs ont montré qu'au Maroc, où le globe est moins présent qu'en Suède, c'est vers 10 ans et demi que les enfants expriment, en sa présence, la rotondité de la Terre.

Ces derniers résultats suggèrent la nécessité de prendre en considération l'interdépendance entre le sujet et son environnement dans l'étude du développement conceptuel en astronomie.

## Conclusion et perspectives

L'étude du développement conceptuel en astronomie permet de s'interroger sur les processus d'acquisition et de construction de connaissances lorsque les phénomènes concernés ne sont que partiellement observables (ou contre intuitifs), et largement dépendants des explications culturelles. Les travaux ici présentés soulignent le rôle clef des conceptions initiales, du contexte culturel, des artefacts et des enseignements dans l'acquisition et la construction de connaissances en astronomie chez l'enfant.

Du point de vue pédagogique, il semble que la nature contre intuitive des connaissances en astronomie encourage un enseignement visant à répondre au questionnement de l'enfant. D'ailleurs, plusieurs études ont évalué les changements conceptuels consécutifs à des enseignements en astronomie basés sur la prise en compte explicite et la réfutation des connaissances intuitives des apprenants en comparaison avec des méthodes plus classiques basées sur la mémorisation. Un gain systématique pour ces méthodes « non traditionnelles » a été reporté, par exemple, lorsque les explications fournies visent à maximiser la plausibilité des conceptions scientifiques (Irene Diakidoy et Panayiota Kendeou en 2001), lorsque l'enseignement se base sur les

expériences et perceptions propres des enfants (Eve Kikas en 2000) ou lors de l'utilisation d'activités de réfutation d'hypothèses (Valérie Frède en 2008). De plus, Hayes et al. (2003) ont montré qu'un enseignement qui questionnait plusieurs aspects des connaissances intuitives quant à la forme de la Terre produisait davantage de gains conceptuels qu'un enseignement remettant en cause chacune des connaissances indépendamment.

## Bibliographie

- Brewer, W.F., Herdrich, D.J., & Vosniadou, S. (1987). *A cross-cultural study of children's development of cosmological models: Samoan and American data*. Paper presented at the Third International Conference on Thinking, Honolulu.
- Diakidoy, I.A., & Kendeou, P. (2001). Facilitating conceptual change in astronomy: a comparison of the effectiveness of two instructional approaches. *Learning and Instruction, 11*, 1-20.
- Diakidoy, I.-A., Vosniadou, S., & Hawks, J.D. (1997). Conceptual change in astronomy: models of the Earth and of the day/night cycle in American-Indian children. *European Journal of Psychology of Education, 12*(2), 159-184.
- diSessa, A.A. (1988). Knowledge in pieces. In G. Forman & P.B. Pufall (Eds.), *Constructivism in the computer age* (pp.49-70). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Frède, V. (2008). Teaching astronomy for pre-service elementary teachers: A comparison of methods. *Advances in Space Research, 42*(11), 1819-1830.
- Frède, V., Frappart, S. & Troadec, B. (soumis). Acquisition de connaissances en astronomie auprès d'enfants d'école élémentaire vivant dans un contexte culturel animiste versus mécaniste.
- Hayes, B., Goodhew, A., Hei, E., Gillan, J. (2003). The role of diverse instruction in conceptual change. *Journal of Experimental Child Psychology 86*, 253-276.
- Johnson-Laird, P.N. (1993). La théorie des modèles mentaux. In C. Vogel (Ed.), *Les modèles mentaux: approche cognitive des représentations* (pp. 1-22). Paris : Masson.
- Kikas, E. (2000). The influence of teaching on students' explanations and illustrations of the day/night cycle and seasonal changes. *European Journal of Psychology of Education, 15*(3), 281-295.
- Nobes, G., Moore, D.G., Martin, A.E., Clifford, B.R., Butterworth, G., Panagiotaki, G., & Siegal, M. (2003). Children's understanding of the Earth in a multicultural community: mental models or fragments of knowledge? *Developmental Science, 6*(1), 72-85.
- Nobes, G. & Panagiotaki, G. (2007). Adults' representations of the Earth: Implications for children's acquisition of scientific concepts. *British Journal of Psychology, 98*, 645-665.
- Samarapungavan, A., Vosniadou, S., & Brewer, W.F. (1996). Mental models of the Earth, Sun, and Moon: Indian children's cosmologies. *Cognitive Development, 11*, 491-521.
- Schultz, J., Säljö, R., & Wyndham, J. (2001). Heavenly talk: Discourse, artifacts and children's understanding of elementary astronomy. *Human Development, 44*, 103-118.
- Siegal, M., Butterworth, G., & Newcombe, P.A. (2004). Culture and children's cosmology. *Developmental Science, 7*(3), 308-324.
- Tiberghien, A., Buty, C., Cordier, F., Cornuéjols, A., Veillard, L., Laborde, C., Bouchard, R., Coquidé, M., & Rogalski, J. (2002). *Des connaissances naïves au savoir scientifique*, <http://edutice.archives-ouvertes.fr/docs/00/00/17/89/PDF/Tiberghien.pdf> Programme École et Sciences cognitives [2007, Octobre].
- Troadec, B., Zarhbouch, B., & Frède, V. (2009). Cultural artifact and children's understanding of the shape of the Earth: The case of Moroccan children. *European Journal of Psychology of Education, 24*(4), 485-495.
- Vosniadou, S. (1994). Universal and culture-specific properties of children's artifact and children's understanding of the shape of the Earth: Mapping the mind : domain specificity in culture and cognition (412-430). New York : Cambridge University Press.
- Vosniadou, S., & Brewer, W.F. (1992). Mental models of the Earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology, 24*, 535-585. ■

# JEUX

## La navette de l'espace lettre

Michel Bobin

Michel Bobin a composé pour ce numéro 150 un nouvel "espace lettre" qui vous donnera à découvrir une phrase d'un auteur fameux. La règle n'a pas changé. Il s'agit de trouver des mots à partir de leur définition puis de reporter, grâce aux numéros des cases, les lettres ainsi trouvées dans la grille du bas. Le texte s'étouffant, cette grille elle-même vous aidera à reporter, grâce à leur codage, des lettres dans la grille de définitions. Pour vous aider, la première colonne entourée en rouge de la grille de définitions contient le prénom et le nom de l'auteur du texte suivi du titre de l'ouvrage où l'extrait fut puisé.

Pas grossissante au Puy, quoique...	A	1	74	163	45	127	136	154	43	
N'est plus opaque depuis longtemps	B	203	173	133	14	106	180	52		
Allende, par exemple	C	29	69	168	16	111	132	181	110	60
Aspire	D	12	72	96	177	42	205			
Cogne et recogne	E	170	145	114	47	83				
Parfois professionnelle	F	66	162	50	2					
Exhibition	G	67	198	48	171	103	201	41		
Il étudia la météorite d'Orgueil	H	196	91	109	5	82	64	176	79	77
Fit la lumière sur la nuit	I	30	115	157	197	26	149			
Qui n'écoute que lui	J	101	46	164	155					
Souvent avec caddies	K	126	137	183	10					
Seul son intérieur est chaleureux	L	38	204	21	94					
Évoque lumière et naissance	M	56	6	199	124					
Dans la première loi	N	190	184	23	92	153	68	202		
Grandeur photométrique	O	24	178	78	100	113	51	44	117	62
On peut y mesurer la susdite	P	86	20	175	134					
Modifie la vitesse lumineuse	Q	7	129	130	159	65	148			
Un article banal	R	90	4	120						
André B. lui trouva des anneaux	S	58	191	76	119	31	138			
Ses lunettes n'ont pas de lentilles	T	169	57	63	112					
Pas matériel	U	22	139	122	179	147				
Dans plus d'une lampe	V	107	99	95	165	34	158			
Le premier révéla Van Allen	W	85	142	11	123	70	189	151	98	
Se fit entendre à Chambord	X	71	125	185	160	97				
Le gamma est violent	Y	18	193	84	3	116	141	59		
Un familier du Pic	Z	27	131	32	161	40	13	152		
Patrie d'un troubadour célèbre	a	25	182	200	15	144	89	105	156	
Ne pas l'ouvrir avant l'épreuve	b	61	49	102	28	188				
Gravitent dans la Terre du Milieu	c	174	93	39	195	166				
Hollande y siégea	d	53	187	150	75	9				
Forte pour Hercule	e	55	88	36	186	17	172	35	143	
A la même lumière	f	146	167	128	81	19	192	121	108	
Peut se faire dans l'intérieur chaleureux	g	8	118	194	140	54				
Abritait un arbre bien connu	h	33	37	87	135					
En pôle position	i	80	104	73						

A1	F2	Y3		R4	H5	M6	Q7	g8	d9	K10		W11	D12	Z13	B14	a15	C16	e17		Y18		F19	P20	L21	U22	N23	O24	a25	I26		Z27	b28		C29
I30	S31	Z32	h33	V34	e35	e36		h37	L38	c39	Z40	G41	D42	A43	O44	A45	J46	E47		G48	b49	F50		O51	B52	d53	g54	e55	M56	T57	S58	Y59	C60	b61
	O62	T63	H64	Q65	F66	G67	N68		C69	W70	X71	D72		i73	A74		d75		S76	H77	O78	H79	i80	f81	H82	E83	Y84	W85		P86	h87		e88	a89
R90	H91	N92	c93		L94	V95	D96	X97	W98	V99	O100	J101		b102	G103	i104	a105	B106		V107	f108	H109	C110		C111	T112	O113	E114		I115	Y116		O117	g118
S119	R120	f121	U122	W123	M124	X125	K126	A127	f128	Q129		Q130		Z131	C132	B133	P134	h135		A136	K137	S138		U139	g140	Y141	W142		e143	a144	E145	f146	U147	Q148
I149		d150	W151	Z152		N153	A154	J155	a156		I157	V158	Q159	X160	Z161	F162	A163	J164	V165	c166		f167	C168	T169	E170		G171		e172	B173	c174		P175	H176
D177	O178	U179		B180	C181	a182	K183	N184		X185		e186	d187	b188	W189	N190		S191	f192	Y193	g194	c195		M196	I197	G198	M199	a200	G201	N202	B203	L204	D205	



# VIE ASSOCIATIVE

*Le mois de mars 2015 a été tristement marqué par la disparition de deux membres actifs du CLEA. Le 1<sup>er</sup> mars disparaissait Lionel Muller, un jeune professeur de physique, un des derniers à avoir rejoint le groupe des animateurs des Écoles d'Été d'Astronomie et le 21 mars Lucette Bottinelli nous quittait, une des fondatrices du CLEA, astrophysicienne.*

## Lionel MULLER

Lionel était professeur de physique au lycée Jeanne D'arc de Mulhouse. Il regrettait beaucoup que l'astronomie ne soit pas plus présente dans les programmes.

Depuis 25 ans il faisait partie de l'association "Chasseurs d'éclipses" dont il était secrétaire, fonction qu'il occupait avec soin en envoyant chaque mois l'invitation à la réunion mensuelle et des informations sur les observations célestes.

Lors des interventions publiques, il était chargé d'animer une "conférence" sur les bases de l'astronomie et également sur l'histoire de l'astronomie.

Il aidait souvent aux observations et même s'il n'avait pas de télescope, il favorisait l'observation à l'oeil nu et montrait les constellations d'été aux curieux. Toujours présent, il a beaucoup apporté à l'association. Pour les 30 ans de celle-ci, il avait organisé un voyage à Paris pour les membres.

Il écrivait régulièrement des articles pour le journal "l'Alsace".

Depuis quelques années il venait régulièrement aux écoles d'été du CLEA, il avait intégré le Conseil d'administration et était correspondant académique pour l'académie de Strasbourg.



Fidèle de l'école d'été d'astronomie du CLEA où il animait régulièrement des ateliers ces dernières années, Lionel brillait par son humour, son coup d'œil, toujours à l'affût d'une situation cocasse à photographier, tapi dans une discrète et généreuse timidité.

Il a porté haut les couleurs de l'Alsace et de ses douceurs, prompt à nous offrir chaque année l'élixir adéquat pour entretenir la bonne humeur du groupe réuni au Col Bayard.

Personne ne lui a jamais disputé la synthèse en images de l'EEA, pleine de tendresse ironique... et tant attendue le dernier soir.

Il signalait chaque automne avec enthousiasme un compte-rendu de l'école dans les Cahiers Clairaut.

Lionel nous manquera.

## Lucette BOTTINELLI

### Georges Paturel, astronome retraité de l'Observatoire de Lyon

*J'évoquerai le travail scientifique de Lucette Bottinelli en même temps que celui de Lucienne Gouguenheim, car elles étaient inséparables et complémentaires.*

Lucette a commencé son travail d'enseignement et de recherche à la Faculté des Sciences d'Orsay avec V. Kourganov. Elle a notamment collaboré au livre remarquable *Introduction à la Physique des intérieurs stellaires*, en rédigeant les exercices corrigés. Ce livre m'avait passionné, bien avant que je connaisse Lucette. Je ne savais pas alors que je travaillerai avec elle.

En 1962, la première partie du miroir plan du radiotélescope de Nançay entra en service. Lucette et Lucienne entreprirent les premières mesures radio en étudiant les passages au méridien de la nébuleuse de la Rosette sur les fréquences de 1430 et 2315 Mhz. La résolution angulaire n'était pas très bonne (de l'ordre de 20' ou 10' selon la fréquence). L'enregistrement de ces passages, à différentes déclinaisons, leur permit de faire une cartographie de la nébuleuse. Au terme de deux ans de travail, elles publièrent leurs mesures et un modèle dans lequel elles durent résoudre une équation intégrale, montrant ainsi des qualités tant expérimentales que théoriques. L'article publié dans les *Annales d'Astrophysique* de 1964, a été souvent cité et l'a même encore été en 2009. Ce mémorable travail valut à Lucette et Lucienne leur surnom de "Rosettes". Un astronome étranger, en visite à Meudon, crut que la nébuleuse portait ce nom à cause des "Rosettes".

Mais le plus important de la contribution scientifique de Lucette et Lucienne était à venir. En 1965 le grand radio télescope de Nançay, enfin terminé, était inauguré. Avec Jean Heidmann, Lucienne et Lucette ont commencé alors une carrière "extragalactique". Le faible signal des galaxies était difficile à détecter. Il fallait pousser à la main le chariot récepteur pour suivre une source radio et effectuer l'équivalent d'une pose. Il fallait réduire le "bruit" en consacrant parfois des week-ends à étaler du grillage par terre pour réduire l'émission parasite du sol. Il fallait mettre au point les procédures de mesure. Tout était à inventer. Ce travail de pionnier a conduit Lucienne et Lucette à ouvrir le champ de la mesure des distances extragalactiques par la radioastronomie. Il fallait combiner les mesures radio et les mesures optiques : la radio donnait une indication de la masse d'une galaxie (et donc indirectement de sa magnitude absolue) ; l'optique donnait la magnitude apparente de la galaxie. En combinant tous les paramètres on obtenait la distance. Quelques années plus tard, B. Tully et R. Fisher ont montré que cette relation, était même plus directe que ce qu'on imaginait. La relation porte le nom de relation de Tully et Fisher. Elle a révolutionné la mesure des distances et ainsi contribué à améliorer l'estimation de la constante de Hubble, constante qui mesure l'expansion de l'Univers.

La réputation internationale de Lucette et Lucienne les a amenées à collaborer avec les plus grands spécialistes de cette discipline. En particulier G. de Vaucouleurs. C'est à ce moment que je les ai rencontrées. Nous avons travaillé ensemble pour essayer de résoudre l'épineuse question de la valeur de la constante de Hubble. G. de Vaucouleurs trouvait une valeur élevée (90 (km/s)/Mpc), tandis que l'équipe de Sandage prônait une valeur faible (50 (km/s)/Mpc). Lucienne et Lucette ont compris très tôt que les idées d'un jeune Finlandais, Pekka Teerikorpi, étaient d'une importance capitale. C'est la collaboration avec ce collègue qui a permis une avancée cruciale en montrant qu'il fallait prendre en compte un subtil biais statistique qui conduisait à une valeur intermédiaire de la constante de Hubble. Les mesures les plus récentes ont largement confirmé ce résultat.

En perdant Lucette nous perdons plus qu'une collègue ; c'était une amie. Sa grande rigueur mathématique et son analyse méthodique étaient rassurantes dans le travail quotidien. Sa faculté de parler avec franchise, mais toujours amicalement, rendait la communication toujours très sereine, dans le travail comme dans la vie de tous les jours. Je n'ai découvert ses engagements citoyens qu'assez tard, mais je dois dire, qu'ils tendent à me rassurer. Tant qu'il y aura des esprits aussi lucides, bienveillants et désintéressés, la société, dans ses multiples facettes, pourra progresser. ■



En septembre 1976, à Grenoble lors de l'AG de l'Union Internationale d'Astronomie, des astronomes échangèrent avec des enseignants de mathématique et de physique. Ce fut la rencontre de l'équipe d'Orsay (Lucette Bottinelli, Lucienne Gouguenheim, Michèle Gerbaldi, Jacky Dupré) avec Gilbert Walusinsky. De leur commune volonté naquit le CLEA, première école d'été organisée en 1977 et le n° 1 des Cahiers Clairaut publié en 1977. Lucette prit une part importante dans l'organisation des EEA, transport méthodique du matériel, planification des activités, proposition de nombreux cours et ateliers présentés avec rigueur. Dans les Cahiers Clairaut elle a tenu pendant de nombreuses années la rubrique « les potins de la Voie Lactée » dans laquelle elle faisait le point sur les derniers résultats de la recherche. En plus de ses activités d'enseignante, de chercheuse, elle était engagée comme citoyenne à ATTAC et comme croyante auprès du CCFD-Terre solidaire.

*Nous reprenons ci-dessous des témoignages lus lors des obsèques.*

### **Témoignages de Michèle Gerbaldi et Jacky Dupré**

Octobre 1962 ... Octobre 1963 ... à l'université, à Orsay, deux étudiants rencontrent pour la première fois Lucienne et Lucette assistantes de Vladimir Kourganoff, en astronomie

Tout y est si différent des autres enseignements et des autres assistants !

Nous ne savions pas encore que les principes de pédagogie, de rigueur, d'écoute, de confiance que vous étiez en train de nous inculquer avec toute votre attention allaient modeler de façon indélébile notre carrière...

Lucette, ta précision dans les raisonnements, ta confiance dans le travail de l'étudiant, ton ouverture vers toutes les formes d'enseignement t'ont amenée à façonner des générations d'étudiants dont certains utilisent encore en 2015 tes cours pour peaufiner leur enseignement en Master !

1977 : une nouvelle ère s'ouvre avec l'envol possible de l'enseignement de l'astronomie hors de l'université : c'est la première université d'été d'astronomie.

Voici l'avant propos du compte-rendu de cette première école, tu l'as écrit avec Lucienne :

Partant d'un fait d'évidence – il existe dans les classes secondaires une grande curiosité pour tout ce qui touche à l'astronomie – nous avons pris l'initiative en septembre 1976, à l'occasion d'un congrès de l'Union

Astronomie Internationale à Grenoble, d'une réunion d'information et de concertation entre astronomes et enseignants.

Une large convergence s'était alors fait jour pour souhaiter l'organisation ultérieure d'une école d'été pour les enseignants désireux de compléter leur formation en astronomie.

Première expérience de ce genre en France, l'école d'été de Lanslebourg a réuni plus de 60 participants et une douzaine d'astronomes du 17 au 24 juillet 1977.

Un seul regret : malgré leur désir, de nombreux enseignants n'ont pu participer à l'école, faute de place. Cette constatation, jointe au souhait exprimé par la majorité des participants de développer leur formation nous indique qu'il faudra renouveler cette expérience.

Et effectivement elle sera reconduite sans interruption, chaque été, en différents lieux, avec des animateurs sans cesse plus nombreux, plus motivés, plus enthousiastes.

De cet engouement partagé naîtront : l'association " Le CLEA " et la revue " Les Cahiers Clairaut " qui plus de 35 ans plus tard est toujours attendue à chaque équinoxe ou solstice !

Lucette, ta rigueur, ton sens de l'organisation, du rangement étaient sans égal.... difficile à suivre et à respecter parfois... mais indispensable pour faire tenir tout le matériel nécessaire à l'École d'été dans un tout petit camion...

Merci à toi Lucette, à toi Lucienne d'avoir su créer et entretenir un esprit d'équipe, qui certes au début était pédagogique mais qui très vite s'est épanoui en une amitié si chaleureuse et si humaine.

### **Témoignages de Jean Ripert**

Lucette,

Ils sont nombreux autour de toi et tous n'ont pas pu venir.

Cette présence est un résumé de ta vie, militante et professionnelle comme enseignante et astronome.

Et c'est grâce à l'astronomie que nous avons été nombreux à te rencontrer.

Tu as participé à la création du CLEA avec Lucienne, Michèle, Gilbert et Jacky. Le CLEA, un creuset fécond pour la formation des enseignants.

Chaque année tu participais aux écoles d'été, tu arrivais au volant de la camionnette emplies à ras bord de tout le matériel nécessaire.

Tout au long de la semaine, tu nous apportais tes connaissances, tes compétences avec gentillesse et discrétion.

Lors des discussions, on sentait ta soif de comprendre pour donner sens.

Nombreux sont les membres du CLEA qui ont fait part de leur tristesse, mais aussi qui ont souhaité te remercier pour tout ce que tu leur as apporté.

Tu as attendu l'arrivée du printemps pour nous quitter au lendemain d'une éclipse de Soleil.

Quelqu'un a dit « une personne qui meurt, c'est une bibliothèque qui brûle ». C'est vrai, mais en partie seulement. Je ne crois pas qu'il ne reste qu'un tas de cendre. Tu sais Lucette, partout où tu es passée tu as laissé une trace, tu as semé dans les esprits, tu as semé dans les cœurs.

Toutes celles et tous ceux qui t'ont connu se souviendront de ton exemple toi qui avais soif de justice et de vérité.

Lucette, tu avais des convictions, une foi, quand nous regarderons le ciel, nous te verrons là, parmi les étoiles.

Au nom de tous les membres du CLEA, je te dis un grand merci. Nous poursuivrons ce que tu as commencé avec nous au sein du CLEA. Au revoir Lucette.

### **Texte de Daniel Paupart paru sur la liste de diffusion**

Fidèle à son habituelle discrétion, Lucette  
a profité des derniers événements astronomiques  
pour s'éclipser sur la pointe des pieds, nous  
laissant orphelins sur un chemin tout au long  
duquel elle nous a si souvent accompagnés...

Nous lui souhaitons un bon voyage parmi les étoiles,  
dans un univers où elle était déjà comme en son jardin,  
et où elle restera ce petit point brillant, au loin, là-bas,  
qui continuera encore longtemps à nous montrer la voie,  
à travers l'espace, sans elle un peu plus vide,  
et le temps, sans elle un peu plus long...

# LECTURE POUR LA MARQUISE

## À la rencontre des comètes

James Lequeux – Thérèse Encrenaz

Belin 2015

Ce livre sur l'étude des comètes s'intègre logiquement parmi tous les autres de la même collection dont l'objectif vise à transmettre à un large public les connaissances de base les plus récentes en astronomie. Le spectaculaire atterrissage du module « Philae » sur la comète « Tchouri » le 12 novembre 2014 donne à cet ouvrage une actualité toute particulière.



L'ouvrage comprend six chapitres :

- Les comètes, du mythe à la réalité
- La nature des comètes
- Le passage de la comète de Halley en 1986
- Après Halley : observation au sol et campagnes spatiales
- La mission Rosetta, ambitieuse et historique
- Un pas vers le futur : les exocomètes

Le premier chapitre concerne l'aspect historique. Ces astres appartiennent-ils au monde sublunaire (imparfait et variable) ou au monde supra-lunaire (parfait et immuable) ? Ce chapitre débouche sur la Comète de Halley qui porte le nom du scientifique britannique qui le premier parvint à prouver la périodicité d'un bon nombre de comètes. Il pronostiqua le retour de cette comète pour 1758-1759, ce qui effectivement se vérifia après sa mort.

Le second chapitre s'intéresse à la nature des comètes et particulièrement à leur origine. On sait maintenant que les noyaux des comètes se sont formés dès l'origine du Système solaire et que le modèle dit de

« la boule de neige sale » énoncé par Fred Whipple en 1950 est globalement confirmé. De même l'existence de deux grands réservoirs de comètes : la ceinture de Kuiper et le nuage de Oort.

Le passage de la Comète de Halley en 1986 suscita un intérêt tout particulier pour les comètes. De nombreuses sondes participèrent à ce rendez-vous : deux sondes soviétiques (Véga 1 et 2), deux sondes japonaises et surtout la sonde Giotto de l'ESA qui s'approcha très près de son noyau (540 km). Cette sonde, équipée d'un spectro IR, permit de détecter les signatures des molécules mères et d'identifier directement la vapeur d'eau. Ce troisième chapitre débouche sur une hypothèse selon laquelle les astéroïdes pourraient être d'anciennes comètes ayant perdu totalement leur glace d'eau.

Après Halley, une succession de comètes permit, dans les années quatre-vingt-dix, de faire de nombreuses observations au sol et dans l'espace. En 1992 la comète SL 9, passant très près de Jupiter, se disloqua sous l'effet des *forces de marée* en une vingtaine de fragments dénommés *collier de perles*. Lors du passage suivant, en 1993, tous ces fragments vinrent percuter successivement la planète. En 1996 la comète Hyakutake passa très près de la Terre ce qui permit de faire de précieuses observations. La comète Hale-Bopp dont le noyau faisait une cinquantaine de km fut désignée comme comète du siècle. Elle fut en effet visible à l'œil nu pendant plusieurs mois. Ces observations fournirent des mesures du paramètre D/H qui donne une estimation de la température de formation des comètes mais aussi des indications pour savoir si l'eau des océans sur Terre provient des comètes.

Le chapitre cinq est entièrement consacré à la mission *Rosetta*. Ce chapitre fourmille d'informations très récentes et de superbes photos prises à 510 millions de km de la Terre...

Dans le dernier chapitre, les auteurs posent la question de l'existence de comètes qui se trouveraient dans les systèmes planétaires observés autour d'étoiles autres que le Soleil. Ils répondent qu'effectivement, il existe bien des « exocomètes », même si pour l'instant le phénomène n'a été détecté que près de l'étoile proche :  $\beta$  Pictoris.

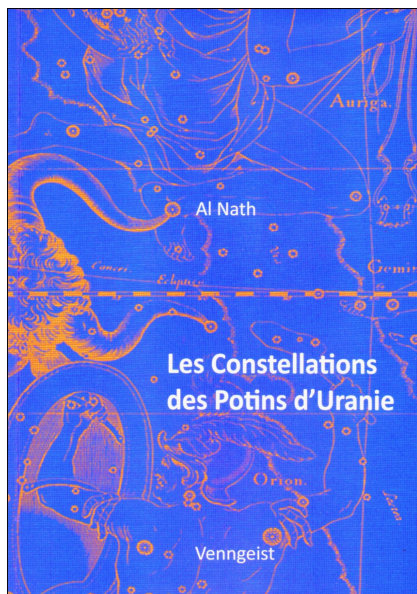
De par ses qualités tant scientifiques que pédagogiques cet ouvrage trouvera une place de choix dans les centres de documentation, les clubs d'astronomie et chez tous ceux qui s'intéressent aux objets célestes de notre Univers.

**Christian Larcher**

## Les constellations des Potins d'Uranie,

par Al Nath – éditions Venngeist

ISBN 978-2-9542677-2-2



À l'heure où nos regards se tournent vers le ciel étoilé, nous avons tous un jour ou l'autre entendu (ou raconté) une légende originale, venue d'un lointain pays, ou une anecdote croustillante à propos de tel ou tel personnage, mythologique ou scientifique...

Depuis bientôt quarante ans, sous le nom de plume d'Al Nath, et dans diverses revues, un astronome professionnel a rassemblé ses « Potins d'Uranie ». Une cinquantaine de ces courtes chroniques traitaient, d'une manière ou d'une autre, du thème des constellations. Les voilà rassemblées en un agréable

ouvrage que l'on peut, selon ses goûts, lire d'un seul jet, ou savourer au goutte à goutte.

Tantôt drôles et tantôt mélancoliques, ces courts récits nous ramènent toujours au Ciel.

C'est celui des constellations officielles, bien sûr, abondamment illustré de légendes ou de mythes peu connus, d'anecdotes mystérieuses ou trucu-lentes issues de ces « Hauts Plateaux Marécageux », où l'auteur passa son enfance.

C'est aussi celui, plus savant, des constellations disparues, telles la Cithare de Georges, l'Écureuil volant ou le Chat de Lalande... ou de celles à venir : un beau W ne pourrait-il pas évoquer un jour dans le ciel le tout puissant World Wide Web ?

C'est enfin l'occasion de faire de drôles de découvertes : saviez-vous que les castors pourraient bien être les inventeurs du planétarium ?

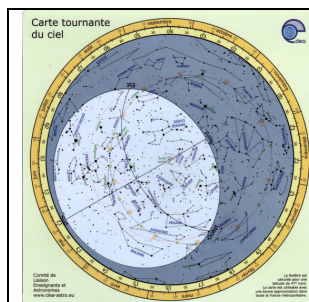
Ne nous méprenons pas, si ce livre regorge d'anecdotes pleines de fantaisie, c'est surtout une mine d'informations astronomiques : abondamment illustré de documents anciens, de cartes et de photographies, il est complété par des tables fournissant des informations pratiques sur les constellations, une brève présentation des personnages cités, un index détaillé qui permet de se retrouver facilement dans le labyrinthe de ces cinquante « Potins ».

On peut se procurer le livre en écrivant à l'éditeur : [venngeist.books@gmail.com](mailto:venngeist.books@gmail.com)

On peut aussi retrouver « les Potins d'Uranie » sur Internet : <http://www.potinsduranie.org/>

**Francis Berthomieu** ■

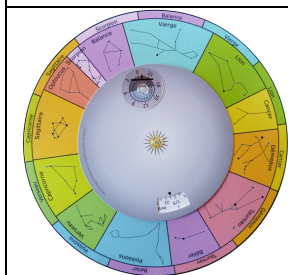
## Deux nouvelles productions proposées sur le site de vente du CLEA



La carte tournante du ciel est constituée de deux parties :

- un fond de forme carrée avec le dessin de l'ensemble des constellations visibles depuis la France métropolitaine ainsi que la position du Soleil pour le 1<sup>er</sup> et le 15 de chaque mois ;
- un disque transparent représentant la partie visible du ciel à une latitude moyenne de 47° N.

Pour régler la carte, il suffit de placer l'heure en face de la date. On sait alors quelles sont les constellations visibles dans le ciel. La position du Soleil étant aussi indiquée sur la carte tous les 15 jours, on peut savoir s'il est levé ou non, déterminer la durée de la journée... Cette carte permet d'apprendre à se repérer dans le ciel.



Le disque du zodiaque est constitué de trois parties :

- un petit disque transparent pour représenter la rotation de la Terre sur elle-même ;
- un disque grisé simulant la révolution de la Terre autour du Soleil ;
- un grand disque montrant les constellations du zodiaque, elles-mêmes entourées des signes zodiacaux.

Une fois l'heure et la date réglées, on peut savoir quelles sont les constellations du zodiaque visibles dans le ciel. On peut savoir quelles sont les planètes visibles si l'on sait dans quelles constellations elles sont situées. Enfin, on visualise facilement le décalage entre constellations et signes du zodiaque.

Ces maquettes à assembler (boutons pression fournis) sont vendues actuellement par lot de 10 (18 € les dix) pour permettre des animations en classe. Elles sont accompagnées d'un mode d'emploi.

# L'éclipse totale de Lune du 28 septembre 2015 au matin

Dans la nuit du 27 au 28 septembre 2015, la Lune va traverser l'ombre de la Terre. Depuis la France, on pourra l'observer en totalité à condition de se lever tôt (et que le ciel soit dégagé). Profitez-en, la prochaine éclipse totale de Lune visible en France aura lieu le 27 juillet 2018 et on n'en verra pas le début.

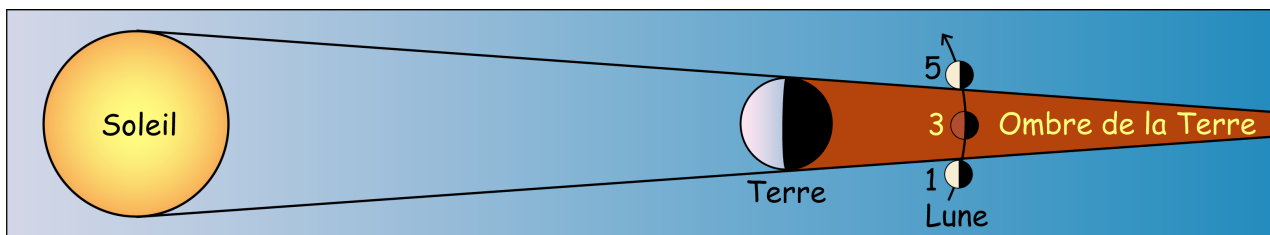


Fig.1. Principe d'une éclipse de Lune (le schéma n'est pas à l'échelle).

## Les horaires de l'éclipse (heures légales)

1. 3 h 07 : Entrée dans l'ombre.
2. 4 h 11 : Début de la totalité.
3. 4 h 47 : Maximum de l'éclipse.
4. 5 h 23 : Fin de la totalité.
5. 6 h 27 : Fin de l'éclipse.

Toute l'éclipse sera visible depuis la France métropolitaine puisque la Lune ne se couchera qu'aux alentours de 7 h 30, quelques minutes après le lever du Soleil.

À l'île de la Réunion, la Lune se couchera un peu avant la fin du spectacle alors qu'aux Antilles, l'éclipse débutera environ 2 h après le coucher du Soleil et sera visible dans sa totalité.

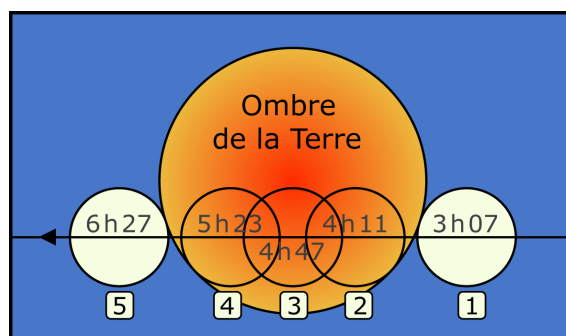


Fig.2. La Lune traversant l'ombre de la Terre entre 3 h 07 et 6 h 27 (heures légales). En réalité, cette ombre n'est pas visible dans le ciel. Pour la voir comme sur le schéma, il faudrait installer un immense écran dans l'espace.

## Comment observer l'éclipse ?

Au début de la totalité, la Lune sera située au sud-ouest, assez haute dans le ciel ( $34^\circ$ ) et sera donc facile à observer. Sa hauteur au dessus de l'horizon ne sera plus que de  $24^\circ$  à la fin de la totalité, et de  $14^\circ$  à la fin de l'éclipse, côté ouest. Il faudra donc avoir un horizon ouest assez dégagé (ces hauteurs sont données pour le centre de la France et varient un peu d'une région à l'autre).

Une éclipse de Lune peut s'observer à l'œil nu, mais c'est encore mieux avec des jumelles.

Juste avant ou juste après l'éclipse (donc avant 3 h 07 ou après 6 h 27), on voit la Lune entièrement éclairée (c'est la pleine Lune).

Pendant l'entrée dans l'ombre de la Terre (entre 3 h 07 et 4 h 11) ainsi que pendant la sortie de l'ombre (de 5 h 23 à 6 h 27), la Lune est en partie éclipsée et on distingue bien la forme de l'ombre (figure 3). On peut en déduire que la Terre est ronde. Grâce à cette ombre, on a même pu montrer que le diamètre de la Terre vaut entre 3 et 4 fois le diamètre de la Lune.

Pendant la totalité, la Lune apparaît rouge sombre (figures 3 et 4)

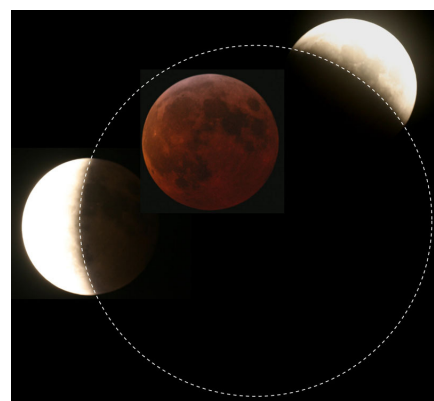


Fig.3. Montage de trois photos de l'éclipse de Lune du 3 mars 2007 faisant apparaître l'ombre de la Terre.

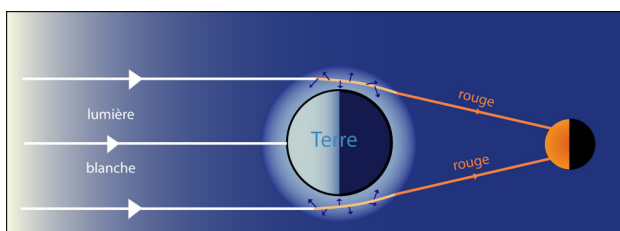


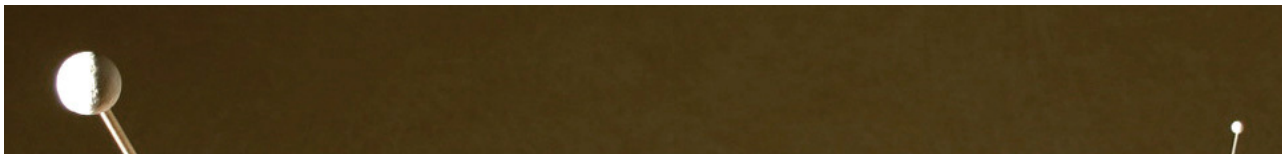
Fig.4. Au moment où l'éclipse est totale, la Lune n'est pas totalement invisible comme on pourrait le croire ; elle apparaît rouge plus ou moins sombre. Elle est faiblement éclairée par des rayons lumineux en provenance du Soleil qui ont été déviés et rougis en frôlant la Terre et en traversant la haute atmosphère.

# Activités autour de l'éclipse du 28 septembre 2015

## Représenter une éclipse de Lune

Pour simuler une éclipse, il faut une source lumineuse et deux boules, l'une pour la Terre et l'autre pour la Lune, la première étant si possible 3 à 4 fois plus grande que la seconde. Pour que l'ombre de la Terre soit conique, la source lumineuse doit être plus grande que la Terre.

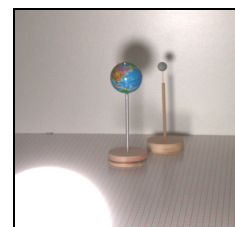
Première solution : la source lumineuse est le Soleil. La boule Terre étant éclairée par le Soleil, on place un écran (une simple feuille de papier) à 30 fois le diamètre de cette Terre. On observe sur l'écran que l'ombre de la Terre est un peu plus petite que la Terre elle-même. Pour simuler une éclipse totale, la Lune doit traverser l'ombre de la Terre au niveau de l'écran. Pour qu'il n'y ait pas d'éclipse à la pleine Lune, il suffit de faire passer la Lune au-dessus ou au-dessous de l'ombre de la Terre.



Terre et Lune au Soleil, et à l'échelle.

Deuxième solution : on utilise une ampoule d'assez grande taille pour représenter le Soleil. On peut là encore visualiser l'ombre de la Terre sur un écran. La distance de l'écran à la Terre se règle approximativement, à vue, pour que l'ombre de la Terre ne soit pas trop petite.

À droite, Soleil, Terre et Lune. L'ombre et la pénombre de la Terre comme de la Lune sont visibles sur l'écran.



## Quelques calculs à faire sur l'éclipse du 28/09

On peut retrouver ces exercices (avec le détail des solutions) dans "Maths et Astronomie" le hors-série n° 10 des Cahiers Clairaut (p 36-40). Il est nécessaire de connaître les théorèmes de Thalès et de Pythagore.

### Les données

Distance Terre Soleil : 149 900 000 km

Distance Terre Lune : 357 000 km

Heure du maximum de l'éclipse : 4 h 47

Vitesse de la Lune : 3 710 km/h

Rayon de la Lune : 1 740 km

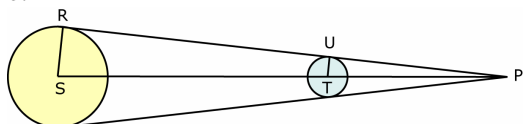
Rayon de la Terre : 6 370 km

Rayon du Soleil : 700 000 km

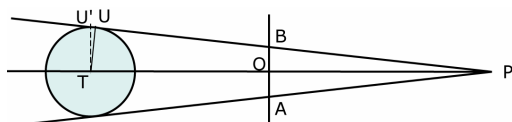
$OX = 2\,000$  km (figure de droite)

### 1. Dimensions des ombres

a. Calculer TP, la longueur du cône d'ombre de la Terre.

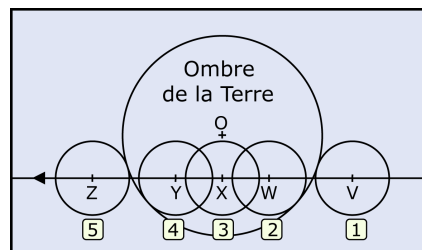


b. On coupe ce cône d'ombre par un plan perpendiculaire à la ligne Terre Soleil et situé à 357 000 km du centre de la Terre. Calculer OB, le rayon de l'ombre de la Terre.



### 2. Les horaires de l'éclipse

On demande de calculer les longueurs VX et WX (figure ci-dessous) puis les heures d'entrée (1) et de sortie de l'ombre (5), ainsi que de début (2) et de fin (4) de la totalité, ce qui correspond au passage du centre de la Lune en V, Z, W et Y sur la figure ci-contre. Pour ce calcul, on a besoin de connaître le diamètre de l'ombre que l'on peut calculer avec la question 1. On peut aussi donner le résultat pour éviter un trop long exercice.



Quelques remarques : on considère que, pendant la durée de l'éclipse, la Lune se déplace dans le plan de la figure ci-dessous, plan perpendiculaire à la ligne Soleil Terre, et passant par le centre de la Lune au moment du maximum (point X). La vitesse de la Lune (3710 km/h) est donnée dans ce plan.

### Solutions

1. Long. cône : 1 376 600 km. Rayon ombre : 4 718 km

2.  $XV = 6\,141$  km ;  $XW = 2\,207$  km ;

durée de V à X : 99 min ; durée de W à X : 36 min.

Horaires : 3 h 08 ; 4 h 11 ; 5 h 23 ; 6 h 26. ■



# OBSERVATION

## L'éclipse de Soleil du 20 mars 2015

Ils ont quand même été nombreux les jeunes et moins jeunes à pouvoir observer l'éclipse de Soleil malgré une météo parfois maussade et des consignes de confinement souvent absurdes... Merci à tous ceux qui ont permis de faire admirer un phénomène céleste pas si courant...

Voici quelques images et commentaires parmi les nombreux reçus sur la liste CLEA.



*Avec les lunettes éclipses à Pierry (51)*



*Trois images prises avec une caméra PLMI sur lunette Lunt de 60 mm MS, club astroaspach (68)*

Jeudi, répétition de l'usage des lunettes.

Vendredi, observation à l'occasion des éclaircies.

Tous sont ravis, ils ont vu le soleil éclipsé.

À 12 h, on notait qu'il n'y avait ni borgne ni aveugle !  
*GD (24)*



*L'écumoire, un instrument toujours efficace*

Je viens d'apprendre que l'aide maternelle de mon village a été chargée de scotcher les rideaux pendant l'heure de confinement !!!!!



*Filtre pleine ouverture, solarscope et viséeclipse à Baume les Dames (25)*

### Contre l'obscurantisme

#### Pour l'obscurantisme du Soleil visible pour tous...

Au Moyen Âge, on s'en prémunissait : qui sait ce que peut apporter une partie de cache-cache entre le Soleil et la Lune ? N'est-ce pas un signe du malin dont il faut se prémunir ?

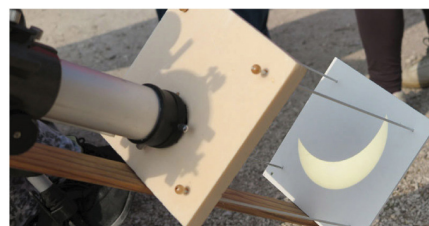
Au XXI<sup>e</sup> siècle, nos responsables politiques ne s'émeuvent pas que dans certaines écoles de la République, on fasse masquer les fenêtres des classes, ou que l'on supprime les récréations : au contraire, ces pratiques résultent en droite ligne des consignes dites de « précaution » élaborées par le Cabinet du Ministre de l'Éducation Nationale.

Faut-il braver les consignes et faire prendre des risques aux enfants ?

Ne faut-il pas, au contraire, prévoir l'événement en procurant aux enseignants et aux parents les moyens simples et peu onéreux de faire une belle observation dont ils se souviendront la vie durant ?

Comment faire pour que la Science, dont d'aucun se plaint qu'elle n'attire plus les jeunes, ne soit considérée que comme un domaine réservé à une toute petite élite qui n'intéresse pas le grand public ?  
*PM (13)*

Bravo à tous ceux qui ont organisé des observations lors de l'éclipse de ce matin et qui ont permis à leurs élèves de faire un pas dans la Connaissance, certes un petit pas ! *AM*



*Observation par projection à Esbarres (21)*



Photomontage de l'éclipse du 20 mars 2015 (photos Damien Stoessel club astroaspach 68)

## JEUX solutions

### Solution de la navette de l'espace-lettres

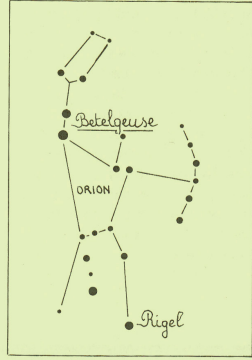
Extrait de l'**Univers des étoiles**,  
de Lucette Bottinelli

### L'ARC-EN-CIEL DES ÉTOILES

**La couleur,  
thermomètre des étoiles**

Les étoiles peuvent s'habiller de couleurs différentes. Aux astronautes éjectés hors de l'atmosphère, le Soleil apparaît jaune-vert. Dans la constellation d'Orion, les deux étoiles les plus brillantes sont l'une bleue (Rigel), l'autre rouge (Bételgeuse).

Mais pourquoi la couleur trahit-elle la température externe de l'étoile ? Chacun de nous sait que, placé dans une pièce obscure, un morceau de métal est invisible aux températures habituelles. Chauffé à 600°C il émet une pâle lueur rou-



16. Constellation d'Orion

### Solutions des mots croisés page 25

#### Horizontalement

1. Corpusculaire ; 2. Étoile. Fu (Fu Orionis est une étoile variable, une étoile jeune éruptive). SEB ; 3. Lee (Mark C. Lee est parti en 1992 dans la navette Endeavour avec sa femme Jan Davis). Miroir. Go ; 4. Mu. NO. Rayon ; 5. Riens. Unes. Li ; 6. Irradiée. Émit ; 7. Ta. ONU. Te ; 8. Einstein. Rues.

#### Verticalement

1. Célérité ; 2. Ôté. Irai ; 3. Roemer ; 4. Pi. Unaus ; 5. Ulm (à l'ENS de la rue d'Ulm à Paris). SD ; 6. Sein. Île ; 7. Roue ; 8. UFO (Unidentified Flying Object, l'OVNI des Anglais). Néon ; 9. Luire ; 10. Raseur ; 11. Is ; 12. Régolite (on écrit aussi régolithe) ; 13. Ébonites.

## École d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

Vous avez envie de développer vos savoir-faire pédagogiques au contact de collègues expérimentés ?

Venez participer au col Bayard, à une école d'été d'astronomie, dans un cadre majestueux.



Exposés accessibles à tous, ateliers pratiques et observations du ciel : toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements et vidéo sur :  
[acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea](http://acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea)

## Les productions du CLEA

*En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.*

*Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :*

### Fiches pédagogiques

Ce sont des hors série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, ...

### Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, ...

### Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

### DVD

Les archives du CLEA de 1978 à 2006 (Cahiers Clairaut et Écoles d'Été d'Astronomie).

*Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>*

Le formulaire de commande est sur le site.

## Le site internet

**Une information toujours actualisée**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)



# LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 141 - Mars 2013 7 €



**Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :**

Articles de fond  
Réflexions  
Reportages  
Textes (extraits, citations, analyses)  
Pédagogie de la maternelle au supérieur  
TP et exercices  
Curiosités  
Histoire de l'astronomie  
Réalizations d'instruments et de maquettes  
Observations  
Informatique  
Les Potins de la Voie Lactée

# COMMENT NOUS JOINDRE ?

**Informations générales :**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)

OU

[www.ac-nice.fr/clea](http://www.ac-nice.fr/clea)

**Siège social :**

CLEA, c/o CFEED  
case courrier 7078  
Université Paris Diderot  
5, rue Thomas Mann  
75205 PARIS Cedex

**École d'Été d'Astronomie :**

[daniele.imbault@cea.fr](mailto:daniele.imbault@cea.fr)

**Cahiers Clairaut :**

[christianlarcher3@gmail.com](mailto:christianlarcher3@gmail.com)

**Ventes des productions :**

<http://ventes.clea-astro.eu/>

**Site internet :**

[berthomi@ac-nice.fr](mailto:berthomi@ac-nice.fr)  
[charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr](mailto:charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr)

**Adhésion / Abonnement :**

Adhésion CLEA pour 2015 :	<b>10 €</b>
Abonnement CC pour 2015 :	<b>25 €</b>
Adhésion + abonnement CC :	<b>35 €</b>
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	<b>40 €</b>

**Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : <http://ventes.clea-astro.eu/>**

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari  
Rédacteur de publication : Christian Larcher  
Imprimerie France Quercy 46090 MERCUÈS

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979  
Numéro CPPAP : 0315 G 89368  
Prix au numéro : 9 €  
Revue trimestrielle : numéro 150 juin 2015