

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 132 - Décembre 2010 7 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 132 - hiver 2010-2011



ISSN 0758-234X

Comité de Liaison Enseignants 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 2011

Présidente : Cécile Ferrari
Trésorier : Jean Ripert
Trésorière Adjointe : Roseline Jamet
Secrétaire : Christian Larcher
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 Cahiers Clairaut, nous citerons : Daniel Bardin, Francis Berthomieu, Pierre Causeret, Vincent Coudé du Foresto, Olivier Gayraud, Marie-Agnès Lahellec, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Stéphane Legars, Jacques Montier, Brigitte Proust, Dominique Proust, Jean-Paul Remy-Martin, Jean Ripert, Françoise Suagher, Daniel Toussaint, Jean-Michel Vienney, Liliane Vilas, Saskia Walentowitz.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 132, afin de faire connaître la revue autour d'eux.



Une photo peu commune d'un arc en ciel réalisée par Pierre Causeret, arc-en-ciel se reflétant dans le canal de Bourgogne.

Appareil 300 D Téléobjectif 75 mm 30 mars 2005 à 17 h 26

Un prisme ne produit pas un arc-en-ciel.

Dans un arc-en-ciel, chaque goutte se comporte comme un prisme, mais de plus, multidirectionnel, puisque chaque goutte renvoie chaque lumière colorée suivant un cône dont l'axe est la direction Soleil-goutte.

Parmi tous les rayons produits par la goutte, un seul entre dans l'œil.

Comme la lumière rouge est moins déviée que la bleue, ce sont les gouttes extérieures à l'arc qui enverront dans l'œil le rouge et celles de l'intérieur le bleu.

Les Cahiers Clairaut

Hiver 2010 n° 132

Éditorial

Dans ces Cahiers Clairaut d'hiver nous nous intéressons particulièrement à l'étude de la lumière ; un thème d'une grande richesse. Imaginer un Univers sans lumière. Ce serait un monde sans ombre mais aussi un monde sans mesure du temps puisque ce concept dérive de l'alternance du jour et de la nuit et de celle des saisons. Ce serait également un monde sans mémoire puisque le "Grand Récit de l'Univers" résulte de la vitesse finie de la lumière. Plus un astre est éloigné plus la lumière met de temps à nous parvenir et nous communique des renseignements précieux sur sa jeunesse. Mais la lumière c'est encore d'avantage. En 1835 Auguste Comte (1798 – 1857) déclarait "*Nous ne saurons jamais étudier, par aucun moyen, la composition des étoiles*". En effet celles-ci sont beaucoup trop lointaines et leur fournaise ne permettrait pas de s'en approcher. Une trentaine d'années plus tard en 1868 J. Janssen et J. Lockyer étaient capables de déceler dans l'atmosphère du Soleil un corps inconnu sur Terre qu'ils appelèrent hélium (le gaz du Soleil). Ce gaz ne fut détecté sur notre planète qu'en 1895. De nos jours la presque totalité des informations obtenues sur les étoiles résultent des messages véhiculés par la lumière. Une bonne occasion d'initier les élèves à la spectrographie. Enfin la lumière c'est aussi les couleurs et en particulier celles de l'arc-en-ciel. Partez à sa recherche on dit qu'un trésor se trouve à ses pieds.

Bonnes fêtes de fin d'année

Christian Larcher
Pour l'équipe

Larcher2@wanadoo.fr

Pour simplifier la tâche de tous les bénévoles, merci d'adhérer et de vous réabonner rapidement.

Voir à la page 38 les nouveaux tarifs. La proposition d'un abonnement numérique vous est faite.

Témoignage

Archéo-astronomie et éclipse de Soleil à l'île de Pâques

Dominique Proust, Vincent Coudé du Foresto, Saskia Walentowitz, Brigitte Proust p 2

Thème : SPECTROSCOPIE p 6

Spectroscopie : notions de base

Jean Ripert p 7

Les couleurs : notions de base

Jean Ripert p 11

Viséclipses

p 13

Mots croisés

p 13

Histoire

Spectroscopie, repères historiques

Stéphane Legars p 14

Réalisation

Spectroscopie stellaire

Jean-Michel Vienney p 18

Réalisation

Réalisation d'un spectroscope

Marie-Agnès Lahellec p 23

Article de fond

Quelle couleur pour le Soleil ?

Pierre Causeret p 25

Avec nos élèves

Un nouveau système de planétarium : le Lhoumeau Sky System

Jacques Montier p 30

Lecture pour la Marquise

Olivier Gayrard p 34

Remue-ménages

Christian Larcher p 34

Ciel d'hiver

Pierre Causeret p 37

Vie de l'association

Assemblée Générale à Bordeaux

Jean Ripert p 38

Congrès UDPPC 2010

p 39

Solution mots croisés p 39

Mascaret p 40

Solutions remue-ménages p 40

TÉMOIGNAGE

Archéo-astronomie et éclipse de Soleil à l'île de Pâques

Dominique Proust et Vincent Coudé du Foresto (Observatoire de Paris-Meudon), Saskia Walentowitz (Université de Berne, Suisse), Brigitte Proust (Lycée Louis-le-Grand, Paris)

Dominique Proust, Vincent Coudé du Foresto, Saskia Walentowitz et Brigitte Proust sont allés visiter l'île de Pâques à l'occasion de l'éclipse totale de Soleil du 11 juillet dernier. Ils nous font partager ici leur découverte de la culture pascuane et leur observation de l'éclipse.

Lorsqu'on atterrit sur l'île de Pâques, on a véritablement conscience de débarquer sur un monde exceptionnel, aussi lointain que perdu dans l'immensité du Pacifique sud, où une communauté vous accueille à votre descente d'avion en vous passant un collier de fleurs autour du cou en signe de bienvenue. Cette impression est d'autant plus forte que la société pascuane a développé pendant plusieurs siècles une civilisation totalement isolée du reste du monde, comme perdue sur un astéroïde, et pour laquelle les cycles du Soleil, de la Lune, des planètes et des étoiles étaient les seuls points de repère tangibles. Les travaux des archéologues et des astronomes sont donc tout particulièrement riches d'enseignements afin d'appréhender les conceptions astronomiques d'une civilisation ayant été privée de contacts extérieurs jusqu'au 5 avril 1722, lorsque le navigateur hollandais Jacob Roggeveen jeta l'ancre à proximité.

L'Île de Pâques (figure 1), située à mi-chemin entre le Chili et Tahiti, légèrement au sud du Tropique du Capricorne (109°6' ouest et 27°9' sud), a la forme d'un triangle isocèle dont la base mesure 12 km de long, pour une superficie de 163 km². Il n'y a pas de cours d'eau ni de port naturel, seule la plage de sable fin d'*Anakena* permet d'accéder aisément à la mer. Les avions atterrissent facilement, la piste de l'aéroport de 4 km de long ayant été prévue pour un



Fig.1. L'île de Pâques photographiée par les astronautes de la navette spatiale © Earth Sciences and Image Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center.

retour d'urgence de la navette spatiale. Le *Terevaka* est l'un des trois volcans culminant à 517 m d'altitude ; avec le *Ranau Kau* et le *Rano Raraku* qui constituent l'ossature même de l'île, la lave s'est accumulée au cours du temps pour unir les trois cônes distincts en une structure unique. Si l'île de Pâques offre un véritable laboratoire ethnologique afin de comprendre comment vivait, en totale autarcie, une société de quelques centaines de personnes, son isolement fut aussi prétexte à publier dans les années 1960 des spéculations aussi sensationnelles que délirantes. Ainsi, selon ces auteurs, des extraterrestres seraient venus par le passé visiter l'île et ses habitants, transportant les gigantesques statues par télékinésie, et découpant les blocs de pierre au laser. Ces élucubrations connurent à l'époque un certain succès médiatique.

L'héritage astronomique

Les connaissances astronomiques ancestrales des pascuans sont d'un intérêt primordial, aussi bien pour les astronomes, les archéologues que les ethnologues. La tradition attribue au roi Hotu Matua la colonisation de l'île au 3^e ou 4^e siècle de notre ère. Parti probablement des îles Marquises sur des catamarans de balsa, un groupe d'hommes et de femmes profita des courants, des vents alizés et utilisa le mouvement des étoiles suivant la technique de la boussole stellaire (toujours utilisée par les mélanésiens même si, contrairement à la Polaire, aucune étoile ne correspond au pôle Sud) pour naviguer vers l'est à la découverte de nouvelles terres, sans doute par des sauts successifs d'île en île. Cette navigation, ajoutée à la connaissance des mouvements apparents du Soleil, de la Lune et du cycle des saisons, permettait la détermination de la latitude, mais à l'instar des navigateurs européens, la longitude était notoirement plus difficile à estimer. Mais, tel Christophe Colomb partant vers l'Ouest pour trouver les Indes

et aboutissant sur l'île d'Hispaniola, on peut supposer que Hotu Matua recherchait de nouvelles terres à l'Est. Il lui était naturel de serrer de près le Tropique du Capricorne (là où le Soleil est exactement au zénith vers le 21 décembre) en tenant compte des équinoxes et des solstices ; il aura fini par aboutir à proximité de l'île de Pâques qui se trouve quand même 500 kilomètres plus au sud. Heureusement pour lui, car malgré l'endurance remarquable de ces navigateurs, l'absence totale d'île plus à l'est ne leur aurait laissé guère d'espoir d'atteindre vivant les côtes d'Amérique du Sud.

Les observatoires de l'île de Pâques

D'après la tradition, lorsque Hotu Matua débarque sur l'île, il partage le territoire entre 11 tribus, suivant des limites perpendiculaires à la côte, comprenant une partie intérieure avec un accès à la mer. Chaque lignage construit un *ahu*, centre politique et religieux constitué d'une vaste esplanade bordée d'une longue plate-forme de pierres remarquablement jointives, en général érigée le long de la côte, parallèlement au rivage, très souvent orientée suivant des critères astronomiques, perpendiculaire à la position du soleil, suivant les levers et couchers des solstices et des équinoxes. De hautes statues, les *moai*, taillées sur les pentes du volcan *Rano Raraku* (figure 2) sont dressées sur ces longs socles, tournant toujours le dos à la mer. La hauteur des moai varie entre 3,50 et 5,50 mètres, mais certains atteignant 10 mètres pour un poids allant jusqu'à 87 tonnes.



Fig.2. Les géants de pierre sur les flancs du volcan Rano Raraku.

Ces moai, représentant probablement des divinités ou des ancêtres veillant sur les tribus, auraient été érigés entre le XIV^e et le XV^e siècle ; leur style a évolué au cours du temps, jusqu'au XVIII^e siècle, toujours vers un gigantisme croissant. On a longtemps glosé sur les moyens de déplacement de ces statues (parfois sur plusieurs kilomètres), allant jusqu'à accuser les pascuans d'une totale déforestation de leur île pour utiliser les troncs d'arbre comme essieux ; cette stupide hypothèse fut

notamment soutenue par la filmographie et la littérature anglo-saxonne en veine de sensationnel. Ces dernières années, Catherine et Michel Orliac (Muséum d'Histoire Naturel de Paris) ont mis en évidence une longue période de sécheresse au XVIII^e siècle, qui fut fatale à la majorité des essences fragiles de l'île, comme le *toromiro*.

À trois kilomètres à peine d'Hanga Roa, la "capitale" de l'île de Pâques, l'ahu *Huri a Urenga*, incurvé d'une vingtaine de degrés et installé loin du rivage le plus proche, porte un unique moai, restauré par les archéologues Sergio Rapu et William Mulloy en 1972 (figure 3).



Fig.3. Huri a Urenga, "l'astronome" sur son ahu.

Le moai regarde exactement le sommet pointu d'une colline appelée *Maunga Mataengo* (l'œil à la larme tachée) derrière lequel surgit exactement le Soleil le jour du solstice d'hiver, véritable gnomon naturel. Côté ouest, une seconde colline, *Maunga Taraina*, partiellement arasée par les travaux de l'aéroport, indique avec une précision inférieure à un degré la direction du soleil couchant d'équinoxe : son emplacement ne peut être un effet du hasard. Enfin, il se trouve en alignement presque parfait (à quelques dixièmes de degrés près) avec l'ahu *Ko Te Pei* à 1 600 mètres à l'est, et un autre ahu, anonyme, dans la même direction à une distance double. Ainsi, le géant de lave fut baptisé "l'astronome" par les deux archéologues.

Côté ouest, l'ahu *A Kava* se trouve sur le même méridien, à 1,5 degré près : Ces quatre ahu définissent ainsi une parallèle à l'équateur terrestre, avec une remarquable précision ; en outre, étant construit en élévation, notre astronome de pierre est visible des trois autres ahu. Ultérieurement, Mulloy découvrit cinq cavités circulaires distantes les unes des autres de quelques mètres seulement, et creusées dans le roc à proximité de l'ahu. En les joignant deux par deux, on obtient avec une remarquable précision la méridienne et les trois alignements solaires, aux solstices et à l'équinoxe. Servaient-ils à orienter les ahu et les moai ou bien étaient-ils des emplacements pour des instruments

de type astrolabes ? La question demeure, mais l'étroite relation de la civilisation pascuane avec les différents cycles astronomiques ne peut guère faire de doute.



Fig.4. L'ahu Tongariki, l'un des plus imposants sites astronomiques.

En particulier, l'ahu *Tongariki* (figure 4), détruit par un tsunami en 1960 et restauré depuis les années 1990, est l'un des plus imposants par sa longueur (120 mètres) et le nombre de moai qu'il porte (à l'origine une vingtaine). Sa perpendiculaire indique le Soleil levant au solstice d'été (décembre) avec une précision meilleure que 3°. Vraisemblablement, les ahu étaient des lieux sacrés, sans doute réservés aux chamanes, et dont l'orientation permettait de disposer d'un calendrier de très bonne précision, et d'attribuer ainsi des pouvoirs magiques aux corps célestes. Les archéologues déchiffrent petit à petit les inscriptions lapidaires en les raccordant progressivement aux quelques documents écrits qui ont subsisté. Les vicissitudes de l'histoire des pascuans ont eu pour conséquence une disparition presque totale des traces écrites de leur passé. Seules 21 tablettes de bois sont conservées, gravées de hiéroglyphes anthropomorphiques appelés écriture *rongo rongo*. Leur interprétation reste encore très incertaine car le patrimoine culturel et les traditions disparurent lorsque les sages les dignitaires et les prêtres furent enrôlés de force dans les mines de guano du Pérou, dans un voyage sans retour. Sur l'une d'elles, la tablette *Mamari*, trois lignes suggèrent un calendrier avec les phases de la Lune. Il est vraisemblable que celle-ci gouvernait le calendrier pascuan, avec une année divisée en 13 mois lunaires.

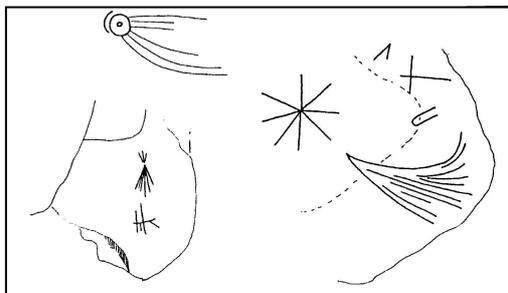


Fig.5. - Quelques pétroglyphes caractéristiques de l'Île de Pâques recueillis par Georgia Lee. On reconnaît aisément des comètes et une étoile brillante (nova ou supernova ?).

De nombreux vestiges subsistent, probablement associés à des concepts astronomiques. Il semble que les Pléiades (*Matariki* = l'œil du roi) jouaient un rôle particulièrement important, car elles symbolisaient Hotu Matua et indiquaient le début de l'année (fin mai, début juin) lorsqu'elles apparaissaient dans les premières lueurs de l'aube.

L'éclipse de Soleil du 11 juillet 2010

Les anciens Pascuans connaissaient aussi bien les éclipses de Soleil (*ra'a*) que de Lune (*mahina*). Le Soleil ou la Lune étaient dévorés lors des éclipses par *Katiki*, dieu malfaisant vivant dans le cratère du volcan *Poïke*, à l'est de l'île. Si les éclipses partielles de Soleil n'ont rien d'exceptionnel (il y a chaque année au moins une éclipse visible depuis une large fraction du globe terrestre), la plupart passent inaperçues à l'observateur inattentif, tant oeil humain est habitué à s'accoutumer à une légère variation de luminosité ambiante. Il faut que le recouvrement du Soleil par la Lune soit particulièrement important pour que le phénomène s'impose.

A contrario, une éclipse totale est un joyau accessible seulement à l'étroite bande de terre balayée par l'ombre de la Lune. Le 11 juillet 2010, un rare alignement cosmique a rendu hommage aux séculaires perspectives mégalthiques de Rapa Nui. Le Soleil avait rendez-vous avec la Lune, et pendant quelques minutes autour de 14 h 11 locale l'ombre de l'astre de la nuit a

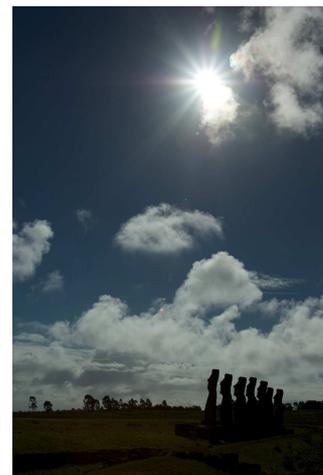


Fig.6. Le Soleil s'éclipse au-dessus des 7 moai de l'ahu Akivi.

recouvrement intégralement *Te Pito O Tenua* (le nombril du monde, nom donné à leur île par les Pascuans). Il était alors 20 h 11 en temps universel - un moment où partout ailleurs sur Terre, l'attention était surtout tournée vers les dernières phases de jeu de la finale de la coupe du monde de football !

Mais les quelques 6 000 habitants de l'île et les 2 800 visiteurs venus pour l'occasion n'avaient d'yeux que pour le ciel. La météo d'hiver, capricieuse, avait pourtant fait planer le suspens.

Cependant après deux jours de pluie continue la veille et l'avant-veille, la chance était également au rendez-vous : un vent inespéré au matin du jour J avait chassé la plupart des nuages. La phase totale de l'éclipse a pu être suivie dans son intégralité.

Le 11 juillet 2010, un mince pinceau de nuit a ainsi traversé le Pacifique sud d'ouest en est. Avant d'aller terminer sa course en Patagonie (où la totalité fut visible au soleil couchant), il a survolé successivement la Polynésie occidentale et Rapa Nui, parcourant en moins de 80 minutes un trajet similaire au long voyage accompli autrefois par les colons navigateurs de Hotu Matua. Pour profiter de la totalité, il faut se trouver précisément à l'intérieur de cette tache d'ombre de 260 km de diamètre. On comprend qu'une telle occurrence est rarissime en un lieu donné : en moyenne une fois tous les trois cents ans.



Fig.7. L'éclipse de Soleil en sténopé à travers le feuillage d'un eucalyptus.

Aucun spectacle naturel n'est aussi prenant que celui d'une éclipse totale de Soleil. L'observateur a beau savoir intellectuellement de quoi il s'agit, voir en noir l'astre du jour est tellement contraire à ce que des millions d'années d'évolution ont codé dans ses gènes d'homo sapiens qu'il s'en trouve bouleversé.



Fig.8. Le site d'observation avant et pendant l'éclipse à 14 h 12 (heure locale).

Après un démarrage plutôt en douceur de la phase partielle, qui fut observée en sténopé à travers le feuillage d'un eucalyptus (figure 7), tout s'accélère dans les quelques minutes qui précèdent la totalité : l'ambiance devient de plus en plus irréelle au fur et à mesure que la source lumineuse (le croissant solaire) devient plus étroite. La température chute et de fantomatiques ombres volantes annoncent la fin du jour. Puis brutalement, l'ombre de la Lune surgit du Pacifique et s'abat sur le paysage : une nuit crépusculaire s'installe dans laquelle trône la couronne solaire.

Les principales étoiles apparaissent (*Castor* et *Pollux* notamment), ainsi que les planètes, en ligne le long de l'écliptique : Mercure, Vénus, Mars et Saturne. L'horizon reste plus clair et prend des teintes cuivrées, comme un coucher de Soleil sur 360 degrés (figure 8b). Après 4 minutes et 36 secondes de temps ainsi suspendu, la nuit se déchire sous les feux intenses des grains de Baily, ces premiers rayons de la photosphère solaire qui passent à travers les cavités de cratères lunaires vus de profil.



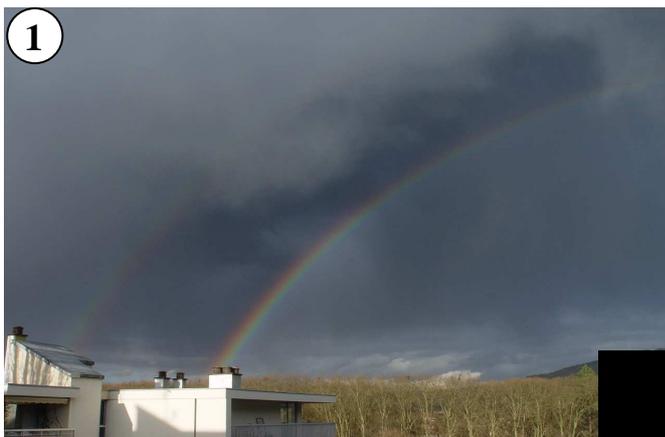
Fig.9. L'éclipse dans sa phase centrale.

Ce phénomène, aussi spectaculaire qu'attendu, est difficile à prédire tant sont complexes les mouvements de la Lune, et le balancement de notre satellite qui modifie le profil de son limbe. Le 10 juillet, il n'y eut pas de grains de Baily au début de la totalité, mais deux de ces diamants éphémères ont pu être admirés en sortie.



Fig.10. Le premier croissant de Lune qui a suivi l'éclipse ; Mercure est à droite. ■

THÈME : SPECTROSCOPIE

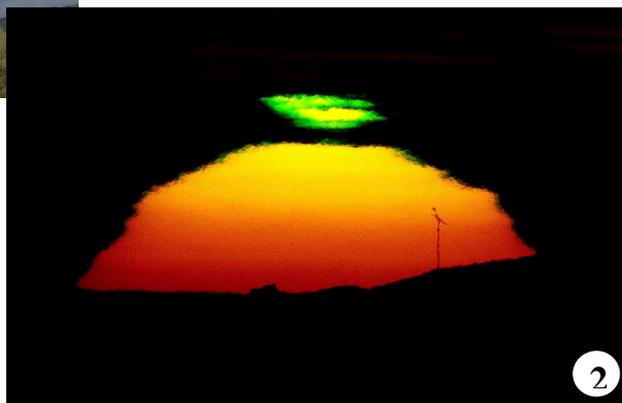


1

- 1** Arc-en-ciel.
On voit les deux arcs sur lesquels
l'ordre des couleurs est inversé.

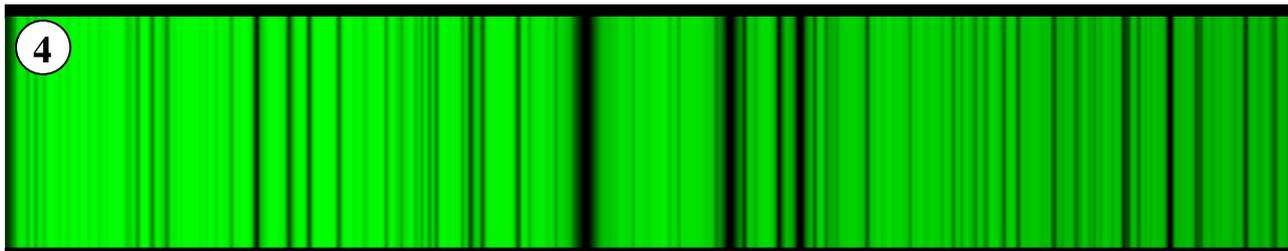
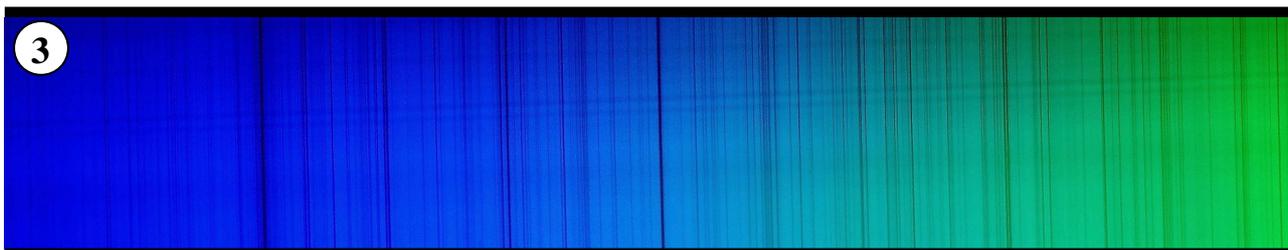
Photo Françoise Suagher

- 2** Coucher de Soleil :
Par réfraction l'image verte apparaît au
dessus de l'image rouge
Photo Jean-Paul Rémy-Martin



2

- 3** Spectre du Soleil : autour de la
raie H β . *Photo Roger Meunier*
- 4** Spectre du Soleil : triplet du
magnésium. *Photo Roger Meunier*



Les Cahiers Clairaut et la spectroscopie

Pour compléter ce court dossier, de nombreux articles sont déjà parus dans les Cahiers Clairaut. Ils sont tous accessibles (sauf le premier) sur le site du CLEA (<http://www.inrp.fr/Access/clea>). En voici quelques-uns :

CC 128 Un atelier astro de lycée en observatoire professionnel (réalisation et analyse de spectres stellaires par des lycéens).

CC 127 Spectroscopie astronomique à l'aide d'un spectromètre à fibre optique (des spectres stellaires de qualité réalisés avec du matériel d'observation d'amateur).

CC 123 La spectrographie (le tour des utilisations de la spectrographie en astronomie).

CC 122 Dossier spectro avec un article sur les spectrographes, sur la réalisation de spectres avec le "Lhires 3", sur les spectres radio et des idées de travaux sur le spectre du Soleil.

CC 111 Les spectres enfin compris (petit cours de spectroscopie).

CC 100 Jeux de réseaux et mystère de nébuleuse (le spectre des nébuleuses).

CC 98 Un spectrographe solaire et Activité en seconde : Étude d'un texte de Janssen (à propos de spectres réalisés pendant une éclipse de Soleil en 1868) et Les étoiles Be.

CC 99 Les étoiles Be (suite) et Huit expériences simples pour débiter en spectro.

Spectroscopie : notions de base

Jean Ripert

Comme le dit le titre d'un fascicule du CLEA "La lumière messagère des astres", la plupart des informations que nous avons de l'Univers viennent de ce que l'Homme a pu déceler dans la lumière reçue. Qu'est-ce donc que cette lumière ?

Historique

Isaac Newton (25 décembre 1642 / 20 mars 1727 ou dans le calendrier grégorien non encore adopté en son pays 4 janvier 1643 / 31 mars 1727).

En 1666, Newton décrit l'expérience faite en décomposant la lumière blanche du Soleil (voir page XX) à l'aide d'un prisme. Ce n'est sûrement pas la première fois que cette décomposition est observée. Ibn al Haytham (965 - 1038) l'a certainement observée, lui qui a étudié en détail la réfraction. Dans l'Antiquité dès la fabrication d'un verre transparent, le phénomène a dû se dévoiler. L'arc-en-ciel était également à la disposition de tous, mais le lien avec la lumière n'était pas fait ou mal interprété.

Newton décrit son expérience dans "Optiks" en 1704. Dès 1662, il taille des lentilles pour réaliser une lunette astronomique en essayant de supprimer le phénomène coloré qui apparaît sur le bord des images (c'est en abandonnant cette idée de lunette qu'il construisit un télescope).

La lumière traversant un prisme donne un ensemble de couleurs appelé spectre (figure 1). Pour Newton ces couleurs étaient contenues dans la lumière blanche. Chaque couleur est déviée différemment, ce qui permet de les séparer. L'ensemble de ces couleurs donne la lumière blanche.

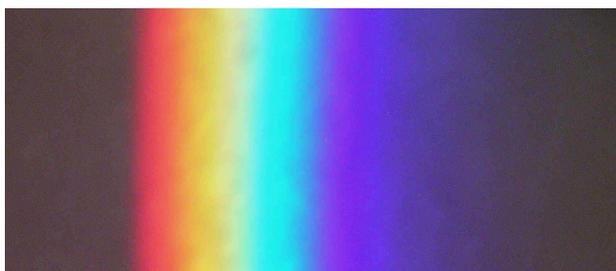


Fig.1. Dispersion de la lumière par un prisme.

Chacun connaît ce disque (appelé disque de Newton) et comportant des secteurs colorés (les couleurs de l'arc-en-ciel) et qui apparaît blanc (un blanc "sale") lorsqu'on le fait tourner rapidement autour de son axe¹.

¹ <http://acces.inrp.fr/clea/lunap/Couleurs/CoulActiv.html>

Grâce à la persistance rétinienne, l'ensemble des couleurs au niveau des cellules réceptrices de la rétine (cônes) est traduit par le cerveau en une sensation de blanc. Pour avoir cette sensation de blanc, il suffit même de trois couleurs : rouge - vert - bleu (pour vérifier on peut observer les luminophores sur une zone blanche d'un téléviseur allumé).

Ce spectre permet d'analyser la lumière que l'on reçoit d'un objet. C'est un spectre continu : les différentes couleurs se juxtaposent sans interruption.

Afin de mieux distinguer les différentes nuances de couleur, il faut étaler au maximum le spectre.

Joseph von Fraunhofer (1787 en Bavière – 1826 Munich).

En 1816, ce physicien allemand réalise un spectre du Soleil. Surprise, sur le spectre continu, apparaissent des raies plus ou moins sombres appelées depuis raies de Fraunhofer (raies déjà observées en 1802 par William Hyde Wollaston). Il en distingue 570, les plus intenses sont nommées par les lettres de A à K (figure 2).

Il invente le réseau de diffraction qui produit également la décomposition de la lumière.

Pourquoi certaines couleurs sont absentes ? Ces raies sombres sont-elles dues à l'atmosphère terrestre ou proviennent-elles du Soleil ?

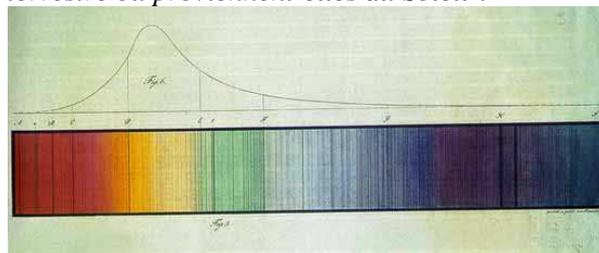


Fig.2. Raies de Fraunhofer.

Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887)

Il travaille beaucoup sur le rayonnement avec entre autre Robert Bunsen (1811 - 1899) à partir de 1860. Cette recherche lui permet d'énoncer des lois qui portent son nom :

Un objet chaud incandescent produit un spectre continu,

Un gaz peu dense et chaud produit un spectre de raies de différentes couleurs (donc non continu),

Un objet chaud entouré d'un gaz froid produit un spectre continu présentant des raies sombres, il y a donc absence de certaines couleurs (figure 3).

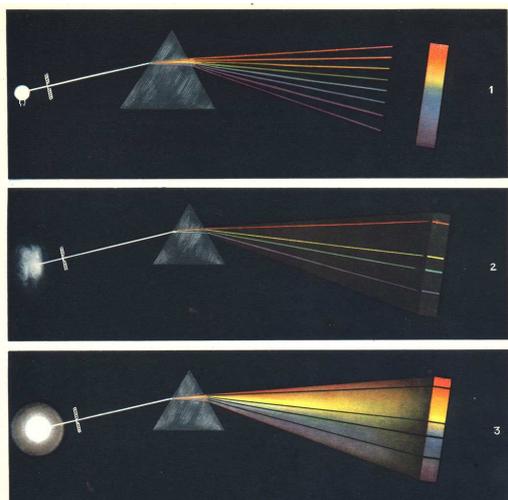


Fig.3. Les différents types de spectres
L'astronomie de Lucien Rudaux et Gérard de Vaucouleur.

C'est la naissance de la spectroscopie. La seconde loi nous dit que le spectre de raies d'un élément chimique correspond à sa carte d'identité. Si dans la lumière émise par un mélange gazeux chaud, on reconnaît toutes les raies d'émission d'un élément chimique, c'est que celui-ci est présent dans le mélange.

Ainsi cette analyse spectrale a permis de découvrir entre autre, l'indium, le gallium, le germanium.

La troisième loi permet d'expliquer les observations de Fraunhofer, les raies sombres présentes dans le spectre du Soleil. Celles-ci sont dues à des éléments chimiques présents dans les couches externes et qui absorbent certaines couleurs (les mêmes que celles qu'ils auraient émis).

En août 1868, Jules Janssen découvre dans le spectre de la couronne solaire des raies inconnues dues à un nouvel élément chimique qui sera appelé hélium (découvert sur Terre 27 ans plus tard par Ramsay).

Lors de l'éclipse totale de Soleil de 1869, on découvrit une raie d'émission verte qui fut attribuée à un nouvel élément le coronium. En fait, on comprit en 1933 qu'il s'agissait de fer ayant perdu 13 électrons.

Dans le cas d'un spectre de raies, pourquoi l'élément chimique n'émet que certaines couleurs et pas toutes ?

Structure de l'atome

Pour comprendre ces phénomènes, il a fallu cerner la structure de la matière, constituée d'atomes. Ernest Rutherford donna une première approche de

la structure de l'atome en 1911. Celle-ci évolua grâce aux apports de Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Max Planck.

Considérons l'atome le plus simple : l'atome d'hydrogène. Il est constitué d'un proton (noyau) et d'un électron. Cet atome ne peut pas avoir n'importe quel niveau d'énergie. On dit que l'énergie de l'atome est quantifiée, c'est-à-dire que les échanges d'énergie ne peuvent se faire que par paquets discontinus.

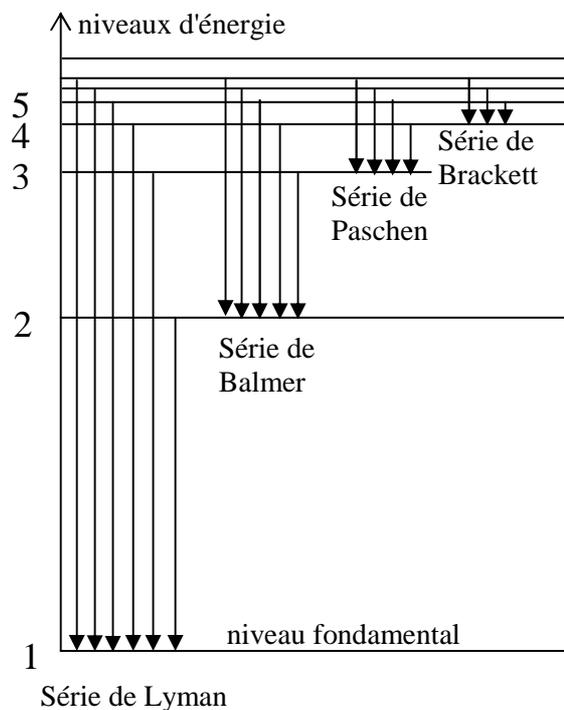


Fig.4. Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène.

Quand l'atome est dans son état stable, son niveau d'énergie correspond au niveau 1 de la figure 4. Lors de chocs entre atomes ou avec un photon, il peut prendre la quantité d'énergie nécessaire à son passage à un état excité (niveaux 2, 3, ...). C'est ce qui se passe dans un gaz chaud sous faible pression. Mais l'atome ne reste pas dans cet état et revient à son niveau 1 en rendant l'énergie ΔE correspondant à l'écart entre le niveau excité et le niveau fondamental. Cette énergie rendue apparaîtra sous forme d'une lumière colorée caractérisée par un photon de fréquence ν tel que $\Delta E = h \nu$. Ceci donnera une raie brillante dans le spectre.

Ainsi le retour depuis les niveaux excités vers le niveau fondamental génère un ensemble de raies correspondant à la série de Lyman. Les échanges d'énergie correspondant à ces transitions donnent des photons de fréquence élevée (raies dans l'ultraviolet).

Le retour vers le niveau 2 (série de Balmer) donnera des raies dans le visible, ce sont les

fameuses raies H_α , H_β , H_γ , H_δ , H_ϵ . Les raies de la série de Paschen apparaissent dans l'infrarouge. Ceci explique les spectres de raies d'émission.

Comment expliquer un spectre d'absorption ?

Supposons que la lumière du Soleil (ensemble de nombreuses couleurs, ou radiations de différentes longueurs d'onde ou de photons de différentes fréquences) traverse un nuage d'hydrogène. Lors de l'interaction lumière-atomes, ceux-ci vont être excités en prélevant les photons correspondants aux transitions n_1-n_2 , n_1-n_3 , ... n_2-n_3 , n_2-n_4 , ... n_3-n_4 , ... Si nous analysons cette lumière venant du Soleil, les couleurs (radiations, photons) correspondant à ces transitions seront manquantes et donc dans le spectre des raies sombres apparaîtront.

Évidemment, ces atomes excités vont revenir à leur niveau fondamental en émettant des photons, mais la plupart du temps dans d'autres directions que celle de l'observateur.

Décomposition de la lumière par un prisme

Dans un milieu homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite. Par contre quand elle rencontre un dioptre (surface de séparation entre deux milieux transparents différents), elle subit une fracture (figure 5), c'est le phénomène de réfraction. La relation de Snell-Descartes permet de calculer l'angle de réfraction (r) connaissant l'angle d'incidence (i) : $n_1 \sin i = n_2 \sin r$

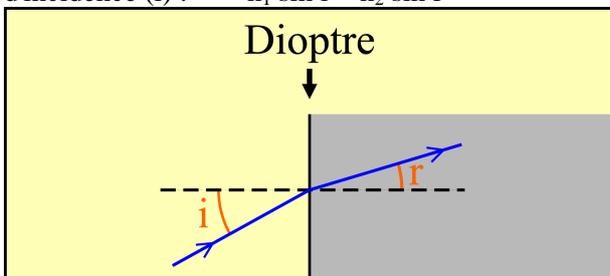


Fig.5. Réfraction d'un rayon lumineux.

Dans le cas d'un prisme en verre, n_1 est l'indice de réfraction de l'air (très voisin de 1) et n_2 celui du verre.

La dispersion de la lumière vient du fait que l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde de la radiation qui traverse le prisme.

La loi de Cauchy donne une bonne approximation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde : $n_\lambda = a + b/\lambda^2$

Si λ croît, n_λ diminue, donc $\sin r$ augmente et pour un prisme donné les angles de réfraction r vont croître quand la longueur d'onde augmente. Ainsi le rouge sera moins dévié que le bleu, contrairement au réseau.

Chaque radiation sera déviée sur le second dioptre du prisme

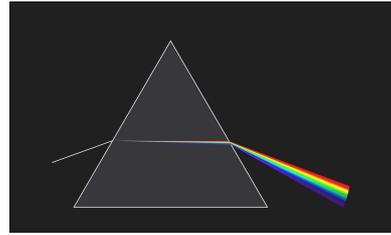


Fig.6. Dispersion de la lumière blanche par un prisme.

Par un réseau

Dans le cas d'un réseau le phénomène n'est pas le même.

Un réseau est constitué d'un ensemble de traits parallèles réalisés par gravure ou par holographie sur un support transparent (réseau par transmission) ou sur un miroir (réseau par réflexion).

Chaque fente va diffracter la lumière et les radiations diffractées par l'ensemble des fentes vont donner des interférences constructives et destructives faisant apparaître de la lumière dans des directions définies par l'angle α tel que :

$$\sin \alpha = k \lambda / a$$

k est l'ordre de diffraction ; 0, 1, 2, ...

λ la longueur d'onde de la radiation

a le pas du réseau ou la distance entre deux traits.

L'encadré page suivante donne plus de détails sur le fonctionnement du réseau.

Nous avons simplifié en prenant un faisceau se déplaçant dans l'air et arrivant perpendiculairement au réseau (cas utilisé le plus souvent par les amateurs).

Si on utilise un laser rouge, la lumière est monochromatique (λ_R). Pour l'ordre 0, $\alpha = 0$, la lumière n'est pas déviée. Pour les autres ordres nous aurons des taches rouges dans les directions correspondantes aux angles α_{1R} , α_{2R} , α_{3R} , tel que :

$$\sin \alpha_{1R} = \lambda_R / a ; \sin \alpha_{2R} = 2 \lambda_R / a ; \sin \alpha_{3R} = 3 \lambda_R / a$$

On comprend aisément que pour une lumière blanche, chaque radiation va subir le même phénomène, mais les angles α_1 , α_2 , α_3 seront différents suivant la longueur d'onde. Ainsi les couleurs seront séparées, le bleu sera moins dévié que le rouge puisque $\lambda_B < \lambda_R$

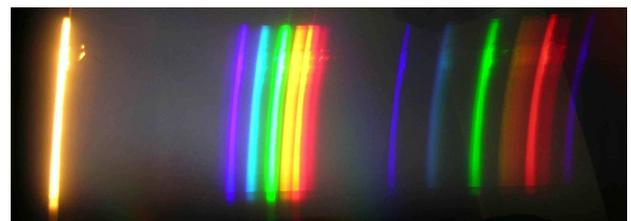


Fig.7. Spectre de la lampe basse consommation. On distingue les ordres 0, 1 et 2 ainsi que le bleu de l'ordre 3.

Comment obtenir un spectre ?

Observation directe

1 À l'aide d'un CD qui se comporte comme un réseau

2 À l'aide d'un morceau de réseau monté dans un cache diapo et placé devant l'œil. On peut alors :

- observer une petite ampoule de lampe de poche (spectre continu),
- mettre en évidence l'évolution du spectre en faisant varier l'intensité du courant traversant la lampe,
- observer la flamme d'un bec Bunsen dans laquelle on introduit des sels de sodium [cristaux ou tige de verre] (jaune), un fil de cuivre (vert), ...
- observer une lampe spectrale (spectre de raies d'émission),
- observer une lampe à économie d'énergie (spectre continu - fluorescence du dépôt blanc et spectre de raies d'émission),

Si la source lumineuse est trop étendue, on place une fente (deux cartons suffisent) devant celle-ci.

3 à l'aide d'un spectroscope (tube de carton muni

d'une fente et d'un réseau) il est possible d'observer les raies d'absorption dans le spectre du Soleil (viser le ciel ou un nuage). Voir l'article page 23.

Spectres sur un écran

1. À l'aide d'un prisme

2. À l'aide d'un rétroprojecteur : on réalise une fente sur la vitre du rétroprojecteur à l'aide de deux feuilles cartonnées et on place le réseau sur la lentille (attention à l'élévation de température du réseau)

3. À l'aide d'un projecteur diapos : on place dans le projecteur une diapo fente réalisée avec deux morceaux de lame de rasoir, on fait le point sur l'écran puis on place le réseau devant l'objectif du projecteur,

4. À l'aide d'un vidéo projecteur : on projette l'image d'une fente et on place un réseau devant l'objectif.

5. Il est possible d'obtenir des spectres d'absorption en plaçant dans un des dispositifs précédents (entre le réseau et l'écran) des solutions colorées. ■

Spectre donné par un réseau

Si on éclaire en lumière monochromatique deux fentes, chacune va se comporter comme une source secondaire (diffraction) et des interférences constructives vont se produire dans des directions privilégiées (figure 1). Les pastilles jaunes, vertes et bleues de la figure 1 indiquent les points où les interférences sont constructives. Ces points sont quasiment alignés surtout quand la distance est grande par rapport à la longueur d'onde.

Dans le cas d'un réseau le nombre de fentes est beaucoup plus important (par exemple 750 par mm). De la même façon, il y aura des interférences dans des directions privilégiées (figure 2).

Attention les figures 1 et 2 ne sont pas à la même échelle.

Dans le cas d'un faisceau provenant d'un laser rouge de longueur d'onde λ_R pour qu'il y ait interférences constructives dans la direction θ , il faut que les faisceaux passant par les fentes 1 et 2 soient déphasés de 2π ou que leur différence de marche Δ soit un nombre entier de longueur d'onde $k\lambda_R$. Toutes les fentes donneront des interférences constructives dans la direction θ .

Or $\Delta = a \sin \theta_R$ relation dans laquelle a est le pas du réseau (distance entre deux fentes). Donc $a \sin \theta = k\lambda$

Pour $k = 0$ $\sin \theta = 0$ spectre d'ordre zéro (le faisceau n'est pas dévié).

Pour $k = 1$ $\sin \theta_R = \lambda_R / a$ spectre d'ordre 1.

Pour $k = 2$ $\sin \theta_R = 2\lambda_R / a$ spectre d'ordre 2 (figure 3)..

D'après ces relations on voit que l'angle dépend de la longueur d'onde. Ainsi pour le bleu nous aurons pour l'ordre 1 $\sin \theta_B = \lambda_B / a$ (figure 4).

Comme $\lambda_B < \lambda_R$ on aura $\theta_B < \theta_R$, le bleu sera moins dévié que le rouge.

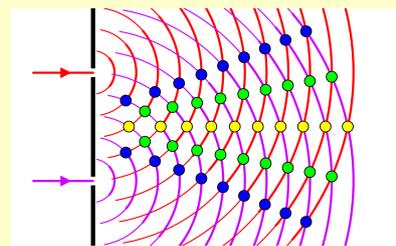


Fig.1. Interférences données par deux fentes de Young.

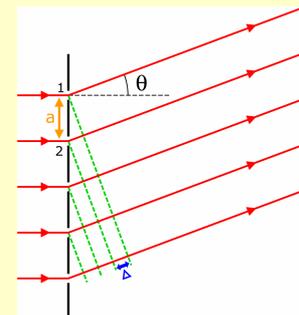


Fig.2. Interférences données par un réseau.

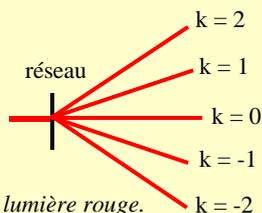


Fig.3. En lumière rouge.

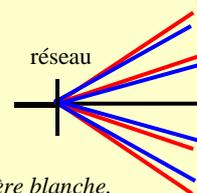


Fig.4. En lumière blanche.

Les couleurs, notions de base

Jean Ripert

Très tôt, les jeunes enfants aiment colorier leurs dessins.

Mais que sont ces couleurs ? La couleur est-elle une propriété intrinsèque des objets ? Pourquoi disons-nous que les feuilles des arbres sont vertes ? La lumière diffusée (renvoyée dans toutes les directions) par les feuilles est reçue par les capteurs de la rétine que sont les cônes et les bâtonnets. Les informations sont transmises au cerveau qui perçoit une sensation qu'il qualifie alors de "couleur verte" parce qu'on le lui a appris. Et notre cerveau nous permet de distinguer un grand nombre de couleurs. Chacun sait que les Inuits qui vivent dans un milieu où le blanc domine disposent de plusieurs dizaines de mots pour désigner cette couleur.

Notre œil dispose de trois types de cônes pour la vision des couleurs. De manière très simplifiée, un des types de cône perçoit les radiations proches du rouge (R), un autre, les radiations proches du vert (V) et un dernier type est sensible aux radiations bleues (B). La lumière du jour (celle du Soleil) est composée d'un grand nombre de lumières colorées (arc-en-ciel, lumière renvoyée par un CD, voir p 7). Nous disons qu'elle est blanche et les trois types de cônes sont excités lorsque l'œil la reçoit.



Fig. 1. La lumière du jour décomposée.

Avant de rentrer plus dans le détail, faisons quelques expériences.

Additionnons des lumières colorées

À l'aide d'un projecteur diapos muni d'un filtre rouge éclairons une partie d'un écran blanc. La zone éclairée paraît rouge. De même, la partie éclairée par un faisceau vert paraît verte. Si sur l'écran on superpose les deux zones éclairées (figure 2), les cônes R et V de notre œil correspondant à cette zone seront excités et notre cerveau aura la sensation de jaune.



Fig.2. Lumières renvoyées par un écran
 $Vert + Rouge = Jaune$.

Avec des lumières verte et bleue, il nous dira que l'on voit du cyan et avec des lumières bleue et

rouge nous verrons du magenta. Si nous superposons les trois faisceaux colorés, dans la partie commune, nous aurons la sensation de blanc (figure 3).

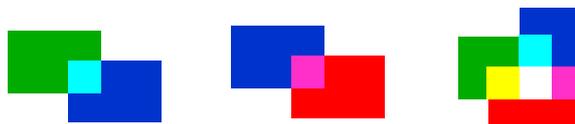
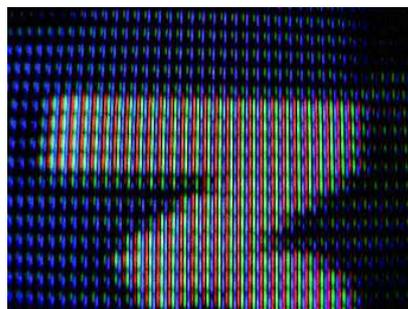


Fig.3. Obtention du cyan, du magenta et du blanc.
 $Vert + Bleu = Cyan$; $Bleu + Rouge = Magenta$;
 $Rouge + Vert + Bleu = Blanc$.

Les trois couleurs diffusées par l'écran se sont ajoutées en excitant les trois types de cônes de la rétine. On parle de synthèse additive des couleurs. Dans cette synthèse, les couleurs primaires sont le rouge, le vert et le bleu.

C'est ce qui est réalisé sur un écran de téléviseur ou d'ordinateur. À l'aide de trois luminophores rouge, vert et bleu on reconstitue toutes les couleurs. Il suffit d'observer avec une loupe un tel écran pour voir la disposition des luminophores.



Observons des livres (figure 4a), nous les voyons bleu, vert, rouge. C'est ce que nous dit notre cerveau. Mais attention, ils sont éclairés avec une lumière blanche.



Fig.4a. Livres éclairés en lumière blanche.

Éclairons-les en lumière verte (figure 4b) ou rouge (figure 4c). Curieux, les sensations perçues ne sont plus du tout les mêmes. Les livres n'étaient donc pas vert ou rouge. Ces caractéristiques ne leur

appartiennent pas, tout dépend de la lumière qui les éclaire.



Fig.4b et 4c. Livres éclairés en lumière verte et rouge.

C'est pour cela que pour choisir un tissu, il vaut mieux qu'il soit éclairé par la lumière du Soleil dite blanche que par les tubes luminescents du magasin. Ainsi les carottes paraîtront bien oranges dans les sachets de cette couleur et les poissons plus appétissants sous la lumière bleutée de la poissonnerie.

Mélangeons des peintures

Il est bien connu qu'en peinture, il n'est pas nécessaire d'avoir une multitude de couleurs. Trois suffisent pour obtenir toutes les autres : jaune, cyan, magenta.

Mais qu'est-ce qu'une peinture jaune, verte ou rouge ? Une peinture se comporte comme un filtre. Elle contient des pigments qui vont absorber certaines radiations

Si on place un filtre rouge devant une lampe donnant une lumière blanche, la lumière transmise paraîtra rouge. Comme son nom l'indique, le filtre va arrêter un grand nombre de radiations et va laisser passer celles voisines du rouge (les filtres ne sont pas monochromatiques et laissent passer une bande de lumières colorées qui absorbées par les cônes sont traduites par le cerveau en rouge.

De même un filtre jaune laissera passer toutes les radiations allant du vert au rouge et un filtre cyan celles du bleu au vert (figure 6).

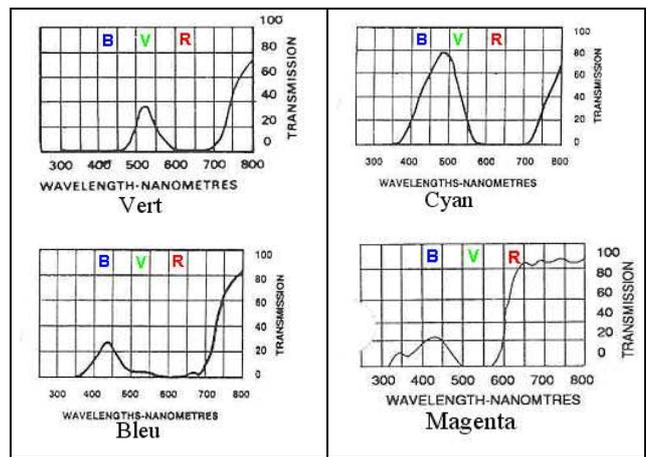
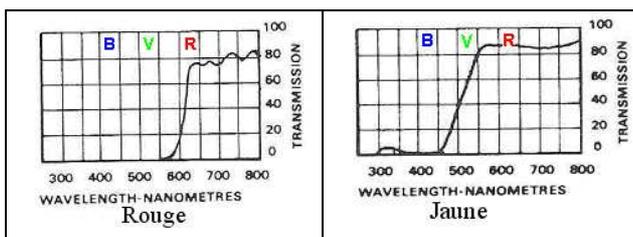


Fig.5. Transmission des filtres CLEA, Rouge Vert Bleu à gauche et Jaune Cyan Magenta à droite.

Si on superpose les deux filtres jaune et cyan, seul le vert pourra passer (figure 7).

Seul le rouge passera par la superposition de filtres jaune et cyan et le bleu avec des filtres cyan et magenta (figure 7).



Fig.7. Superposition de filtres colorés.

Une peinture rouge contient des pigments qui lorsqu'ils reçoivent la lumière blanche du jour (donc composée d'un grand nombre de radiations) ne vont renvoyer que les couleurs voisines du rouge et notre cerveau aura une sensation de rouge.

De même le mélange de peinture jaune (qui renvoie les couleurs du vert au rouge) et cyan (qui renvoie les couleurs du bleu au vert) va donner du vert, telle est la sensation rendue par le cerveau.

À l'aide de peinture jaune, cyan et magenta, il est possible de recréer toutes les nuances de couleurs. Ces trois couleurs sont appelées primaires dans la synthèse soustractive. En effet dans la lumière diffusée, chaque peinture colorée enlève certaines couleurs à la lumière blanche reçue d'où le nom de soustractive.

Si on mélange ces trois couleurs primaires, on obtient un noir. C'est la même chose en superposant

trois filtres jaune, cyan et magenta (cela dépend aussi de la qualité des filtres).

Ces trois couleurs sont celles utilisées en imprimerie (imprimantes). Comme le noir n'est en général pas assez dense par mélange des trois couleurs, on ajoute une encre noire. C'est pour cela

que l'on parle de quadrichromie. Remarque, en imprimerie, certaines couleurs ne peuvent pas être obtenues à partir de ces trois couleurs, elles sont donc ajoutées. C'est le cas de l'argent ou de l'or. ■

Mots croisés spécial spectroscopie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2							■			
3			■							
4							■			
5			■		■					■
6				■						
7						■			■	
8		■								
9			■						■	
10							■			

Horizontalement

1. Elle est la cause de certaines raies spectrales.
2. La raie H alpha fait partie de sa série. Type pas forcément spectral.
3. Connu. Comme Herschel mais plus John que William.
4. Un réseau en donne plusieurs pour un spectre. Mal retenue.
5. Émission à 294 Hz. Se promena.
6. Proche du Pic du Midi. On l'a d'abord découvert sur le Soleil grâce à son spectre.
7. Connu grâce à la raie d'émission à 21 cm. Un tiers de proton.
8. Comme les spectromètres embarqués sur Herschel.
9. Peut briller en émission. Fait davantage penser à un prénom d'astrologue que d'astronome. Direction du coucher d'Antarès.
10. Sur la séquence principale. Davantage dans les régions H II que H I.

Verticalement

1. Elle est la cause de certaines raies spectrales.
2. On y trouve aussi bien de vieilles étoiles comme Aldébaran que des jeunes comme les Pléiades. Étoile égyptienne.
3. 1050. On en voit parfois dans le ciel.
4. Son spectre est affecté par l'effet Zeeman. Affecté d'un fort décalage spectral vers le rouge.
5. Périodes inversées. Constellation la plus vaste du ciel, du moins pour elle.
6. Pour faire un spectre. Ville de dépêche.
7. Avec violet, on y trouve la série de Lyman.
8. Elle est la cause de certaines raies spectrales.
9. Pour faire un spectre. Gère, entre autres, le VLT.
10. Arrivé. Pion, par exemple.

Solutions p.39

Observez l'éclipse partielle de Soleil du 4 janvier sans danger

Pour ne pas rater cette éclipse importante (55 à 70% du disque solaire occultés par la Lune), le CLEA propose à ses adhérents ces filtres testés à prix coûtant : 10 € les 7 (frais de port compris).

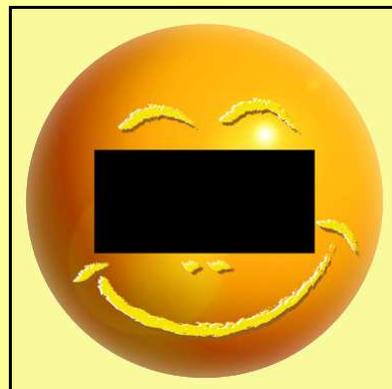
Il s'agit du "Viséclipse Sol Obs 14" un verre de soudeur n°14 sur support antichoc, bénéficiant du label de RETINA FRANCE et recommandé par le Secrétariat d'État à la Santé et par l'Académie Nationale de Médecine. Il est réutilisable pour les prochaines éclipses.

<http://acces.inrp.fr/clea/aLaUne/viseclipses/>

À commander à Jean Ripert jripert@ac-toulouse.fr

Impasse des Mouyracs

46090 PRADINES



La spectroscopie, repères historiques

Stéphane Le Gars, Centre François Viète, Nantes

Stéphane Legars est professeur de sciences physiques et auteur d'une thèse sur l'émergence de l'astronomie physique en France. Il nous présente, dans ce premier article, les tout débuts de la spectroscopie.

La spectroscopie est l'étude des spectres lumineux, c'est-à-dire l'analyse de la nature et de la proportion de chaque couleur simple entrant dans la constitution d'un rayon lumineux, comme la lumière solaire par exemple. Cependant, comme le note Michel Pastoureau dans un ouvrage consacré à l'histoire de la couleur bleue, "le spectre et l'ordre spectral sont inconnus avant le XVII^e siècle."² Effectivement, de l'Antiquité jusqu'aux travaux de Newton, les idées sur la lumière, la vision et les couleurs sont très confuses et imbriquées. Cette confusion des idées sera encore amplifiée par les multiples discussions parmi les scolastiques sur la réalité des couleurs, et notamment celles de l'arc-en-ciel. Dupleix, par exemple, affirme en 1636 que "des couleurs, les unes sont vraies, les autres fausses et seulement apparentes. Les vraies dépendent du mélange et de la confusion des quatre qualités premières : chaud, froid, sec et humide. Les fausses et apparentes procèdent de la diverse réflexion de la lumière et à cause de cela sont changeantes comme au cou d'une colombe et d'un paon".³

Johannes Kepler (1571-1630) va pour sa part nier cette différence entre vraies et fausses couleurs : "Puisque les couleurs que l'on voit dans l'arc-en-ciel sont du même genre que celles que l'on voit dans les choses, elles auront même origine"⁴. Après Kepler, c'est Francesco-Maria Grimaldi (1618-1663) qui, pour la première fois, s'intéresse nettement aux couleurs observées lors de la réfraction de la lumière blanche. Dans son ouvrage *De Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride* (Bononiae, 1665), outre les premières expériences sur la diffraction et l'introduction de ce terme, Grimaldi explique l'apparition des couleurs lors de

la réfraction par l'idée que la lumière blanche, fluide continu se mouvant à grande vitesse dans les corps diaphanes, se colore par les ondulations qui s'y développent. Ainsi, la couleur est dans la lumière et c'est la variation du fluide lumineux qui crée les couleurs : lorsque sa densité augmente, on voit apparaître la couleur rouge ; lorsque sa densité diminue, c'est la couleur bleue. Mais avant les travaux de Newton, il n'y a encore aucune quantification des phénomènes lumineux, les théories existantes restant toujours fortement marquées par les impressions reçues par nos sens, démarche évidemment subjective, frein à une compréhension objective et mathématique de la lumière et des couleurs.

L'apport d'Isaac Newton (1642-1727) en optique et notamment dans la compréhension des phénomènes colorés est fondamental, à tel point que G. Salet le nomme le "Lavoisier de la chromatique"⁵. Dans son *Traité d'Optique*⁶, Newton s'occupe entre autres de la dispersion de la lumière dans les lentilles. Les lentilles donnent en effet des irisations (que l'on appelle aujourd'hui des aberrations chromatiques), explique Newton, à cause de la différence de foyer pour chaque couleur.

Il passe alors à la dispersion dans un prisme et réalise une première expérience où un prisme ABC, réglé au minimum de déviation (l'angle d'incidence est égal à l'angle des rayons émergents, position pour laquelle le spectre est le plus net), est éclairé par un pinceau de lumière solaire, limité par un trou percé dans un volet (figure 2).

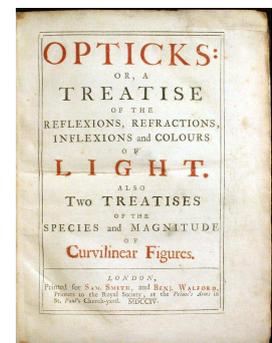


Fig. 1. Première édition datant de 1704 du traité d'Optique de Newton.

² PASTOUREAU, Michel, *Bleu, Histoire d'une Couleur*, Paris, Editions du Seuil, 2000, p.9.

³ S. DUPLEIX, *Corps de Philosophie contenant la Logique, la Métaphysique et l'Ethique*, Genève, 1636, p. 397.

⁴ KEPLER, J., *Paralipomènes à Vitellion*, 1604, Trad. C. CHEVALLEY, Paris, Vrin, 1980, prop.15

⁵ SALET, Georges, *Traité Élémentaire de Spectroscopie*, Paris, Masson, 1888, p.15

⁶ NEWTON, Isaac, *Traité d'Optique*, Ed.1722, Gauthier-Villars, 1955.

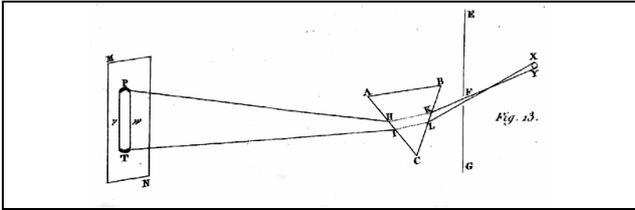


Fig.2. Expérience du spectre solaire de Newton.

L'image PT du soleil obtenue, appelée spectre, est alors une bande arrondie à ses extrémités et composée de la succession des couleurs suivantes : rouge (en T), orangé, jaune, vert, bleu, violet (en P). Cette image compose ainsi le spectre solaire (figure 3).

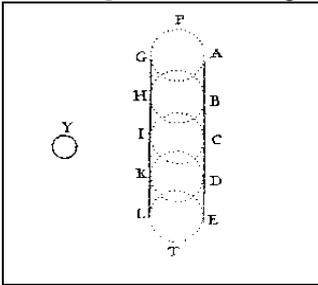


Fig. 3. Interprétation du spectre obtenu par Newton. il est constitué d'une succession d'"images" monocolores du trou circulaire F (planche 1, livre 1, partie 1 du *Traité d'optique*).

À la suite de cela, Newton réalise une deuxième expérience, son *Experimentum Crucis* (figure 4).

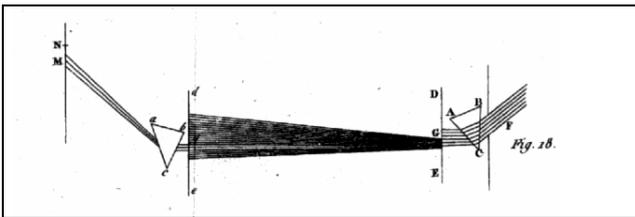


Fig. 4. Preuve fondée sur l'expérience : un faisceau monocolore reçu par le prisme abc subit une déviation mais pas de dispersion (figure 18, livre 1, partie 1, planche IV du *Traité d'Optique*).

Cette expérience contient deux prismes et deux planches percées. La lumière solaire, après être passée dans le premier trou et le premier prisme ABC, est dispersée et forme le spectre solaire sur l'écran DE. Cet écran est lui-même percé d'un petit trou G, suivi d'un autre trou g. Ces deux diaphragmes isolent une couleur donnée du spectre qui tombe alors sur un second prisme abc. En faisant tourner le premier prisme et en maintenant fixes les diaphragmes et le deuxième prisme, Newton peut observer les images des différentes couleurs ordonnées comme dans le spectre solaire et constater que les rayons les plus réfractés par le premier prisme sont encore ceux le plus réfractés par le deuxième prisme. Il peut alors formuler trois propositions "immortelles" :

- Les lumières qui diffèrent de couleur diffèrent aussi de réfrangibilités.
- La lumière blanche du Soleil contient des rayons de différentes réfrangibilités.

- Ces rayons sont réfractés sans dilatation et sont indécomposables. Ce sont les rayons de lumière simple ou homogène.

Ainsi, avec Newton, apparaît pour la première fois la quantification de la réfraction, où chaque couleur est caractérisée par un nombre. Newton montre de plus que les couleurs obtenues à l'aide du prisme sont homogènes et constituent bien la lumière solaire, elle-même perçue maintenant comme hétérogène et formée de lumières de différentes réfrangibilités. Il fabrique aussi en même temps pour la première fois une lumière monochromatique, constituée d'une lumière homogène ne comportant qu'une seule couleur.

Par la suite, c'est l'anglais William Wollaston (1766-1828) qui va faire la découverte la plus déterminante après les travaux de Newton. Nous avons vu plus haut que le dispositif utilisé par Newton ne lui avait pas permis d'observer de raies dans le spectre solaire : son spectre était une suite d'images circulaires du Soleil empiétant les unes sur les autres et donnant lieu par leur ensemble à une image unique, allongée et constituée de diverses couleurs. Cependant, "si l'on s'arrangeait de manière que l'image produite par chacune des lumières composantes fût très étroite, on devait avoir l'espoir d'empêcher par là la superposition partielle des diverses images les unes sur les autres. Or, il était facile d'y arriver en [donnant] à l'ouverture par laquelle la lumière du dehors pénètre dans la chambre obscure, la forme d'une fente de peu de largeur"⁷. Ainsi, l'innovation apportée par Wollaston consiste à réduire la largeur de la fente : il observe alors un spectre dans lequel des raies sombres découpent l'image colorée (figure 5).

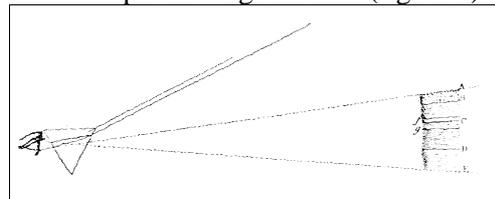


Fig. 5. Décomposition de la lumière et raies spectrales.

Il distingue pour sa part cinq raies noires (A, B, C, D et E) et quatre couleurs, et non pas sept comme Newton l'avait noté. Et avec Wollaston se termine une époque durant laquelle, seuls étaient utilisés un prisme et une fente. À partir de là, les études spectrales vont être dépendantes de la convergence de diverses techniques, notamment celle, décisive, de l'opticien munichois Joseph Fraunhofer.

⁷ DELAUNAY, Charles, "Notice sur la constitution de l'Univers, Première partie: Analyse Spectrale", *Annuaire du Bureau des Longitudes*, Paris, Gauthier-Villars, 1869, p. 457.

En 1814 et 1815, voulant déterminer avec soin les indices de réfraction de différents verres pour des couleurs données en vue de perfectionner les lunettes achromatiques, Fraunhofer imagine d'associer le système fente-prisme à une lunette astronomique : son appareil est constitué d'un théodolite répétiteur sur la plate-forme duquel est disposé un prisme de flint⁸ très pur réglé au minimum de déviation, situé à 8 mètres de la fente. Son objectif était ainsi de trouver des points de repère dans les spectres qu'il observait. Il étudie la flamme d'une chandelle (et remarque la raie jaune que l'on sait aujourd'hui être due au sodium), des flammes carbonées, la flamme de l'étincelle électrique et sera aussi le premier à pointer son appareil vers les corps célestes. Mais c'est surtout l'étude du spectre solaire qui va l'intéresser. En analysant la lumière solaire, Fraunhofer, qui ignorait les découvertes de Wollaston, constate l'existence de raies sombres dans le spectre : il en dénombre 576. Il choisit les huit raies noires les plus visibles, qu'il nomme A, B, C, D, E, F, G, H et s'en sert comme points de repère pour la détermination des indices de réfraction des différents rayons colorés dans un milieu donné. C'est ainsi que les raies du spectre solaire sont toujours appelées "raies de Fraunhofer". Ainsi, en introduisant une lunette astronomique puis un objectif de grande focale devant celle-ci pour agrandir l'image des spectres des corps célestes, en inventant et construisant des réseaux, plus exploitables quantitativement que les prismes, en nommant des raies noires dans le spectre solaire, en donnant une estimation photométrique de l'intensité des différentes couleurs dans le spectre d'une précision étonnante, Fraunhofer jette une moisson de faits qui vont, jusqu'aux années 1840, intéresser principalement les scientifiques anglais.

Dès 1822, sir David Brewster (1781-1868) s'intéresse en effet à la question des spectres. En cherchant à obtenir une lumière "homogène" (on dirait aujourd'hui monochromatique) pour éclairer des objets vus au microscope, il étudie tout d'abord des plaques de verres colorés. L'examen du spectre obtenu lui révèle un "degré d'homogénéité" peu satisfaisant. Il se tourne donc vers la combustion de substances inflammables et étudie la flamme de l'alcool salé : il obtient un spectre constitué presque uniquement de deux raies brillantes dans le jaune, très proches l'une de l'autre. Par la suite, c'est John Herschel (1792-1871) qui, dans une lettre à Brewster, annonce l'analyse spectroscopique qu'il a

effectuée sur des flammes d'alcool salé contenant en solution des substances comme les chlorures de strontium, calcium, baryum, mercure, cuivre, etc. En 1826, William Henry Fox Talbot (1800-1877) énonce pour la première fois l'idée d'une analyse chimique fondée sur l'observation de spectres. Dans le Journal de Brewster (t.5, avril-octobre 1826), il écrit ainsi :

"Le feu rouge des théâtres donne un très beau spectre, avec beaucoup de lignes brillantes ou de maxima de lumière [...]. Par exemple, la raie orangée peut être l'effet de la strontiane, puisque M. Herschel a trouvé dans la flamme du muriate de strontiane une raie de cette couleur. Si cette opinion était exacte et applicable aux autres raies définies, un coup d'œil jeté sur le spectre prismatique d'une flamme pourrait suffire pour y indiquer la présence de substances qui autrement n'y auraient été découvertes qu'à l'aide d'une analyse chimique laborieuse"⁹.

Après cette période "anglaise", l'événement le plus important dans l'évolution de l'instrumentation réside dans l'introduction du collimateur. Celui-ci est constitué d'une lentille convergente placée après la fente et ayant pour rôle de rendre parallèles les rayons entrant dans le prisme ou le réseau. Cet ajout important dans l'appareillage fut introduit indépendamment par Zantedeschi en Italie et par Swan en Angleterre en 1847 (Swan est l'inventeur de la lampe à incandescence avant Edison, avec qui il s'associera par la suite). Avec ce collimateur apparaît donc réellement le spectroscopie tel que nous le connaissons aujourd'hui :

"L'appareil tout entier destiné à l'étude spectrale d'une lumière prend ainsi des dimensions restreintes ; il peut être transporté, installé, manié avec une très grande facilité. Cet appareil, désigné sous le nom de *spectroscope*, se compose des trois parties suivantes, que l'on monte habituellement sur un même support, sur un même pied :

- 1° un tuyau de lunette portant à la place de l'oculaire une fente étroite, et muni d'un objectif dont le foyer principal est occupé par la fente même ;
- 2° un prisme réfringent placé tout près de cet objectif ;
- 3° enfin une lunette véritable, dont l'objectif se trouve tout près du prisme."¹⁰

Après des décennies passées à contempler les spectres sans avoir pu donner une explication des raies noires et en particulier de la multitude des raies noires du spectre solaire, c'est le physicien français Léon Foucault qui va réaliser pour la

⁸ Type de verre avec un haut indice de réfraction

⁹ Cité in DELAUNAY, Charles, *op.cit.*, p.465-466.

¹⁰ DELAUNAY, Charles, *op.cit.*, p.473-474.

première fois l'inversion d'un spectre au laboratoire, c'est-à-dire le passage d'une raie brillante à une raie noire correspondante. En 1849, Foucault réalise en effet deux expériences déterminantes au cours desquelles il remarque dans l'arc voltaïque du charbon une double raie brillante entre le jaune et l'orangé qui rappelle la double raie obscure appelée D dans le spectre solaire. Cependant, Foucault, à l'issue de ces manipulations, ne propose aucune hypothèse et ignore de plus que la raie D est due au sodium. Sur ce point, les travaux des savants allemands Gustav Kirchhoff et Robert Bunsen apparaissent comme beaucoup plus complets et plus profonds dans leur signification et leur portée. Ces recherches s'appuient surtout sur des innovations techniques majeures. En premier lieu, il s'agit de l'invention par Bunsen de son célèbre brûleur (il suffit de regarder le matériel des collèges et lycées aujourd'hui pour se rendre compte de la pérennité de son invention !). Spécialement créé pour l'analyse spectrale, le brûleur de Bunsen permet d'obtenir une flamme presque transparente, idéale pour ne pas gêner l'observation de la couleur des flammes après introduction d'un produit à analyser. Ensuite, Kirchhoff et Bunsen vont mettre au point un spectroscopie amélioré par rapport aux travaux de leurs prédécesseurs. Le spectroscopie des deux savants de Heidelberg possède de plus une échelle divisée projetée sur le spectre à l'aide de la flamme d'une bougie et d'une lentille : grâce à cette échelle divisée, Kirchhoff et Bunsen vont pouvoir faire des déterminations très précises des raies (figure 6).

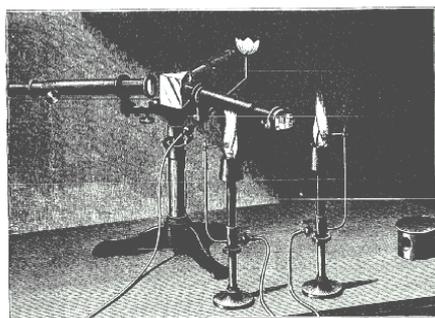


Fig. 6. Le spectroscopie de Kirchhoff et Bunsen.

Kirchhoff, grâce aux produits très purs préparés par Bunsen et à son brûleur, peut alors donner à la fin de l'année 1859 une interprétation théorique du phénomène. C'est ce que nous appelons aujourd'hui les lois de Kirchhoff : " la relation entre la puissance de l'émission et le pouvoir absorbant de chaque sorte de rayon [...] est la même pour tous les corps à la même température"¹¹. En termes

modernes, nous disons aujourd'hui que, placé dans des conditions d'excitation déterminées, un corps ne peut émettre que les radiations qu'il est capable d'absorber.

Les découvertes de Kirchhoff et Bunsen vont vivement émouvoir le monde scientifique et montrer que la spectroscopie est un outil précieux et unique pour la chimie : en 1861, ils découvrent le rubidium en examinant au spectroscopie une flamme contenant à l'état de vapeur une substance extraite de la Lépidoïte de Saxe ; la même année, ils trouvent également le césium dans les eaux mères des salines de Durkheim. S'enchaînent alors les succès : en 1862, Crookes, puis Lamy, découvrent le thallium ; en 1863, c'est la découverte de l'indium par Reich et Richter dans la blende de Freyberg ; en 1874, Lecoq de Boisbeaudran isole les raies de ce qu'il va nommer le gallium...

Suite à ses travaux conjoints avec Bunsen, Kirchhoff s'intéresse au spectre solaire. Sa loi lui permet d'affirmer que "nous pouvons savoir comment les raies noires du spectre révèlent les constituants de l'atmosphère solaire"¹². Pour cela, il utilise un spectroscopie à plusieurs prismes, le premier du genre (figure 7).

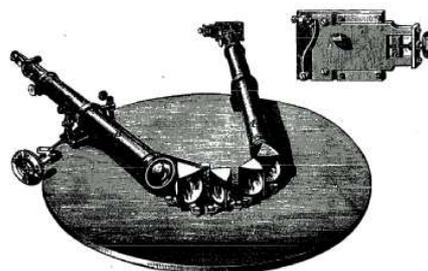


Fig. 7. Spectroscopie à plusieurs prismes de Kirchhoff.

En introduisant en même temps par deux parties différentes de la fente la lumière du Soleil et celle d'un corps connu, il peut observer facilement des coïncidences et réaliser l'analyse chimique et physique du Soleil.

Désormais, astronomie, physique et chimie seront liées par la spectroscopie. Ces domaines vont s'influencer sans cesse, et participer à modifier les habitudes des uns et des autres. Les années 1860 marquent ainsi un tournant évident : c'est à partir de ce moment que va émerger une nouvelle discipline, l'astronomie physique ou astrophysique, et que va apparaître un nouveau genre d'observatoire où observation et expérimentation vont se mêler. ■

¹¹ KIRCHHOFF, Gustav, " Contribution towards the History of the Solar Spectrum", *Philosophical Magazine*, 1863, 25, p.255.

¹² KIRCHHOFF, Gustav, *op.cit.*

Quelques variations autour de la spectroscopie stellaire

Jean-Michel Vienney

Nul n'ignore la richesse des messages portés par la lumière, et combien les données issues de la spectroscopie sont essentielles en astrophysique. Encore faut-il pouvoir les décoder, et ce n'est pas toujours simple. Cet article n'a pour ambition que de montrer qu'il est possible, avec un budget raisonnable et en se limitant à des moyens de traitement relativement simples, d'illustrer quelques unes des techniques utilisées en spectroscopie, et montrer quelques unes des nombreuses et délicates étapes du traitement des données préalables à l'obtention des spectres qu'on peut voir dans les publications scientifiques.

L'acquisition des spectres

Selon le matériel et le budget dont on dispose, de nombreux montages sont possibles. Nous nous limiterons ici aux plus simples qui ont une particularité en commun : ils n'utilisent pas de fente pour isoler la lumière de l'étoile étudiée.

Montage minimal

Matériel

- Un APN¹³ (même compact) pouvant prendre des photos en "pose longue" (15 secondes peuvent suffire),

- Un pied photo.

- Un réseau : on peut bien sûr utiliser des réseaux sur feuille plastique, tels que ceux qu'on trouve au CLEA mais pour obtenir des spectres assez lumineux et bien résolus, il est tout de même préférable d'utiliser un réseau blazé (voir le lexique en fin d'article) en verre tel que le Star Analyser (100 traits/mm) proposé par la société Shelyak (<http://www.shelyak.com/>) ou d'autres qu'on peut commander à l'étranger par Internet (se méfier dans ce cas des droits de douane qui peuvent faire beaucoup gonfler la facture).

On dispose simplement le réseau devant l'objectif, le plan du réseau perpendiculaire à l'axe. On peut pour cela imaginer divers bricolages : bagues carton, en PVC, bouchon d'objectif bricolé, ruban adhésif...

La dispersion dépend du pas du réseau et de la distance focale de l'objectif : elle est d'autant plus grande que le nombre de traits au mm est important et que la focale est grande (penser à utiliser le zoom).



Fig.1. À gauche, réseau CLEA sous cache diapo et à droite, réseau blazé fixé sur un zoom.

Protocole de prise de vue

L'appareil photo fixé sur le pied est directement dirigé vers l'étoile (on est limité aux plus brillantes) dont on veut obtenir le spectre. On essaie de cadrer de manière à avoir à la fois l'image de l'étoile (ordre 0) et celle de son spectre (ordre 1).

On oriente le réseau de telle sorte que ses traits soient approximativement parallèles au plan de l'équateur céleste ou que l'axe du spectre soit dirigé vers l'étoile Polaire : avec cette disposition le mouvement diurne aura pour effet d'étaler l'image perpendiculairement à la direction du spectre.

On fait une image en pose longue (15 secondes à 1 minute). Il est rare de réussir du premier coup, avec certains appareils la mise au point peut s'avérer délicate, mais avec de la patience et après quelques essais on finit généralement par arriver à un résultat satisfaisant.



Fig.2. Deux spectres de Véga, obtenus avec le réseau CLEA et un objectif de 35 mm en haut, avec un réseau lumineux et un objectif de 49 mm en bas (poses de 60 s).

¹³ La signification des abréviations est donnée à la fin de l'article.

Avec cette méthode, on peut aussi photographier la nébuleuse d'Orion et obtenir la raie d'émission H α à 656 nm.

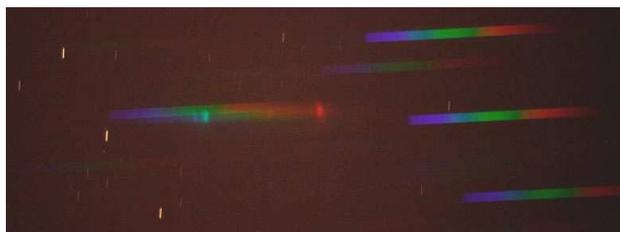


Fig.3. De gauche à droite, les étoiles du baudrier d'Orion, le spectre de la nébuleuse M42 avec des raies d'émission bien visibles et les spectres des étoiles du baudrier.

Montage avec une Webcam

Matériel

Il faut disposer d'une lunette ou d'un télescope. Sa distance focale n'est pas critique (elle a tout de même une influence sur la résolution finale).

Une monture motorisée en ascension droite n'est pas indispensable, mais elle rend les réglages beaucoup plus aisés, surtout si la focale de l'instrument est longue car on n'a pas à recadrer.

Il faut ensuite une webcam (type ToUcam), une bague d'adaptation au coulant du porte oculaire (le plus souvent 31,75 mm), un réseau (par exemple Star Analyser) pouvant s'adapter sur la bague.

Un ordinateur et un logiciel d'acquisition comme le logiciel libre QcFocus sont indispensables. (à télécharger par exemple sur :

<http://www.astrosurf.com/astroqc/qcam/programme.html>)

Le montage photographié utilise un réseau monté dans une bague qui se visse directement sur le filetage de l'adaptateur. On peut bien sûr tenter de bricoler son propre système. La dispersion dépend du pas du réseau et de la distance réseau-captur. Selon le pas et la distance, on peut cadrer à la fois l'image de l'étoile et celle de son spectre, ou seulement l'image du spectre (mais cela rend l'étalonnage plus difficile).

Compte tenu de la petite taille des capteurs, il vaut mieux orienter l'axe du spectre selon la diagonale de l'image.

Une des particularités de ce montage est qu'en retirant l'objectif de la webcam, on a aussi retiré le filtre qui arrêtaient le rayonnement infrarouge. Le spectre obtenu s'étend donc de ce côté (au point parfois de recouvrir le violet du spectre du second ordre...). La webcam et le réseau sont directement montés à la place de l'oculaire de la lunette.



Fig.4. Montage avec une webcam. À gauche, la webcam (sans son objectif), l'adaptateur et le réseau. À droite, l'ensemble fixé sur le porte oculaire d'une lunette.

Protocole de prise de vue

On vise l'étoile dont on veut le spectre, on oriente éventuellement la webcam et le réseau. La mise au point peut s'avérer délicate, et on n'arrive pas toujours à la faire simultanément sur l'étoile et sur le spectre (dans ce cas mieux vaut privilégier ce dernier et faire la mise au point sur lui).

On règle la luminosité (temps de pose et sensibilité de la caméra) et le contraste de l'image en faisant attention à ce que les photosites ne soient pas saturés. On acquiert alors une séquence vidéo de quelques dizaines de secondes à partir de laquelle on pourra obtenir une image brute après tri, registration et addition des meilleures images, comme dans le traitement des images planétaires (voir CC 130).



Fig.5. Spectre de Sirius (addition des 30 "meilleures" images d'une séquence vidéo de 150 images avec un ciel très turbulent).

Plus sophistiqué mais plus cher : APN et lunette

Matériel

Le montage est presque le même qu'avec la webcam mais cette dernière est remplacée par le boîtier de l'APN. Il faut alors disposer d'une bague d'adaptation (bague T) dédiée au boîtier utilisé et d'une bague de raccord adaptée au coulant de l'oculaire de l'instrument, sur laquelle on va monter le réseau (avec éventuellement une ou plusieurs bagues allonge). On monte le tout à la place de l'oculaire de la lunette. Là aussi, une monture équatoriale motorisée n'est pas absolument indispensable, mais elle est très conseillée si on ne veut pas passer son temps à recadrer l'image lors des phases de réglage (la mise au point peut s'avérer longue et délicate !).

Un ordinateur portable et un câble permettant de télécharger les images au fur et à mesure faciliteront la mise au point (écran plus large et zoom) et l'analyse des images (dynamique et saturation) au cours de la prise de vues. On pourra de plus les nommer, évitant ensuite les confusions.

Attention : beaucoup de capteurs sont munis de filtres qui limitent la bande passante, aussi bien du côté du violet que du côté du rouge, or beaucoup de raies intéressantes sont précisément dans ces domaines (notamment les raies de Balmer de l'hydrogène : $H\alpha$ dans le rouge, $H\beta$, $H\gamma$ et $H\delta$ dans le bleu). Le défiltrage est bien sûr possible mais très délicat, coûte relativement cher et modifie la balance des blancs de l'appareil.

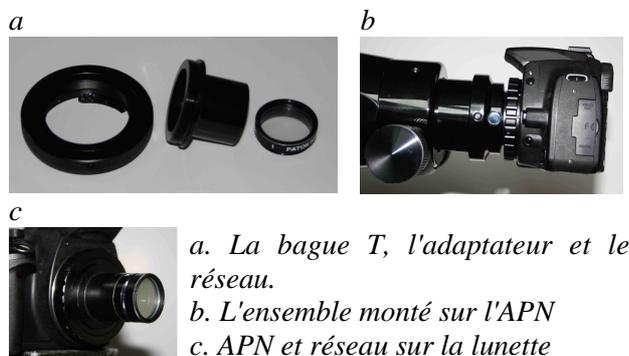


Fig.6. Montage avec un APN.

Protocole de prise de vue

On oriente la lunette de manière à avoir sur la photo l'image de l'étoile et le spectre d'ordre 1.

On s'assure que ce dernier s'étale sur une région sans étoiles brillantes et que la direction des traits du réseau est proche de la parallèle au plan équatorial. On fait une mise au point aussi soignée que possible en faisant des poses courtes (il faut trouver un compromis, c'est plus facile si le spectre présente des raies bien marquées).

On arrête le suivi et on déclenche la pose : le spectre de l'étoile va alors s'étaler et former une image d'autant plus large que la pose sera longue (cela dépend aussi bien sûr de la focale de l'instrument utilisé).

Il faut ensuite s'assurer que la pose est correcte : la photo doit être assez lumineuse mais les photosites ne doivent pas être saturés. Dans le doute, on peut faire plusieurs poses en modifiant à chaque fois la sensibilité de l'appareil.

On peut aussi, au lieu d'arrêter la monture, utiliser les mouvements lents (rattrapage) en ascension droite ou en déclinaison (dans ce cas les traits du réseau doivent bien sûr être perpendiculaires au plan équatorial). Pour conserver toute la dynamique et la résolution de l'image, il faut enregistrer celle-ci dans un format non compressé (format RAW).

Si on veut faire un traitement rigoureux, il faut faire en plus une série d'images d'obscurité (noir ou dark) avec le même temps de pose en occultant l'objectif de l'instrument, une image d'éclaircissement uniforme (PLU ou flat-field) en plaçant un écran uniformé-

ment éclairé devant l'objectif, et une image d'offset. Ce traitement sophistiqué dépasse les ambitions de cet article et le lecteur intéressé pourra trouver sur Internet de nombreux tutoriels, par exemple à partir du site de Christian Buil (l'auteur du logiciel IRIS que nous allons utiliser pour traiter les spectres).

Les images suivantes, découpées et recadrées pour les besoins de la mise en pages, ont été obtenues par cette technique avec un APN défiltré, un réseau blazé à 200 traits par mm et une lunette de 80 mm d'ouverture et 500 mm de focale. (Les images originales au format RAW sont téléchargeables sur le site du CLEA : www.clea-astro.eu, rubrique Cahiers Clairaut, sommaire n°132).

Sur ces images brutes, on peut déjà voir des différences et des similitudes : dans les spectres de Véga et d'Alioth (deux étoiles très chaudes, de type A), on distingue nettement deux raies d'absorption ($H\beta$ et $H\gamma$ dans le bleu) et on voit que la partie bleue est beaucoup plus brillante que la rouge, alors que dans le cas d'Arcturus (de type K, beaucoup moins chaude) c'est le rouge qui domine et on distingue de nombreuses raies fines.



Fig.7. Spectres de Véga, Arcturus et Alioth (de haut en bas), obtenus avec une lunette de 500 mm de focale, un réseau blazé à 200 traits/mm et un APN.

De l'image brute au spectre 1D

Nous allons maintenant voir comment on peut à partir de l'image brute, obtenir un spectre dont la dynamique sera améliorée, faisant apparaître de nouveaux détails et permettant une analyse un peu plus poussée.

Pour cela nous allons utiliser le logiciel IRIS.

Il faut pour commencer préciser qu'IRIS est un logiciel de traitement d'images extrêmement puissant, dont les fonctions vont de l'acquisition des images (avec un APN ou une Webcam) aux traitements les plus sophistiqués en passant par la photométrie et l'astrométrie. On trouve sur le site de son concepteur, Christian Buil (<http://www.astrosurf.com/buil/iris/iris.htm>) la liste complète des commandes des tutoriels et exemples d'utilisation, et les instructions nécessaires pour le télécharger et l'installer (IRIS a été fourni sur le CD accompagnant le n° 130 des Cahiers Clairaut).

Les lignes qui suivent décrivent très sommairement les opérations à effectuer. Ceux qui voudront effectivement réaliser le traitement ont intérêt à lire l'article complet avec les lignes de commandes et des captures d'écran sur le site du CLEA (www.clea-astro.eu, rubrique Cahiers Clairaut, sommaire n°132)

Précisons aussi à nouveau que nous avons pris le parti de laisser de côté le prétraitement des images RAW.

Première étape : la visualisation

On charge et on visualise l'image brute. On peut ensuite faire une première analyse du spectre en y faisant une coupe longitudinale. On peut lire ainsi les niveaux de luminosité de chaque pixel et vérifier qu'aucun n'a été saturé (le niveau maximum étant fixé à 255). On peut repérer les "creux" correspondant aux raies sombres. On voit aussi que ce qui paraissait noir ne l'est pas tout à fait : le niveau du ciel n'est pas strictement nul.

En allant faire une coupe du côté de l'image de l'étoile, on pourra voir que cette dernière est saturée.

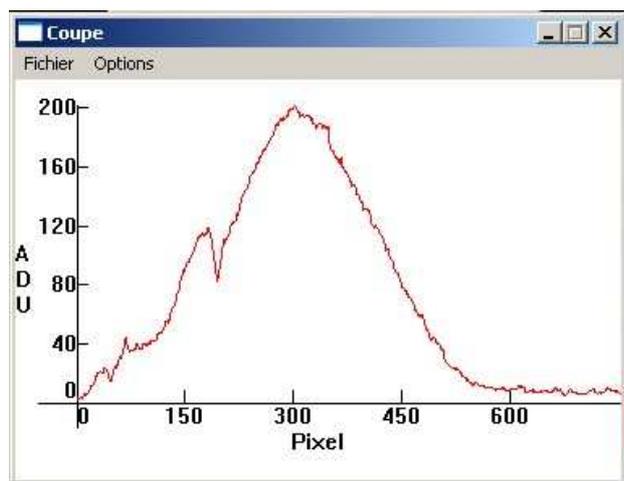


Fig.8. Coupe du spectre brut dans le logiciel IRIS.

Deuxième étape : découpage et corrections géométriques

Afin de limiter la place occupée par les images et le temps de traitement, on découpe l'image afin de n'en conserver que la partie utile (figure 9).

On lui fait ensuite subir quelques corrections géométriques. Il faut d'abord déterminer approximativement l'angle d'inclinaison pour redresser l'ensemble du spectre (figure 10).

La dernière correction géométrique consiste à redresser les raies du spectre (figure 11).



Fig.9. Découpage de l'image.



Fig.10. Le spectre est horizontal à l'écran.



Fig.11. Le spectre est redressé.

Troisième étape : du spectre couleur 2D au spectre 1D

Le spectre est maintenant redressé géométriquement, mais l'image est toujours constituée des 3 plans couleur correspondant à ce qu'on verrait si on le regardait à travers trois filtres respectivement rouge, vert et bleu. Si on veut étudier la luminosité en fonction de la longueur d'onde, il va falloir additionner ces trois plans, ce qui nous donnera une image en niveau de gris, moins jolie certes, mais plus pertinente.

L'addition des plans fait gagner un peu de dynamique (les niveaux vont de 0 à 350) mais une partie de l'image est saturée !

Il est donc nécessaire de régler les "seuils de visualisation". En jouant sur ces seuils, on peut mettre en évidence des détails ou faire apparaître des raies peu profondes.



Fig.12. Le spectre est maintenant en niveau de gris. On remarque la présence d'une raie bien visible dans le rouge (à droite), c'est la raie H α de l'hydrogène. On remarque aussi un segment brillant près de la raie H γ (la plus à gauche). Il pourrait s'agir d'une raie en émission ou de la trace laissée par une étoile peu brillante. Pour trancher, il faudrait faire d'autres spectres en orientant le réseau différemment pour voir si cette trace persiste ou non.

Les deux dernières opérations consistent à évaluer et soustraire le niveau moyen du ciel, puis à additionner par colonne les niveaux de luminosité de chaque pixel du spectre.

On espère ainsi, sous réserve qu'elles soient réparties de manière aléatoire, minimiser les fluctuations de luminosité et améliorer le rapport signal/bruit et la dynamique de l'image.

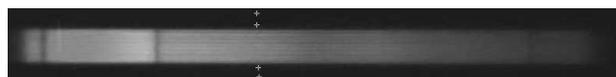


Fig.13. Le spectre après soustraction du fond de ciel.

On peut maintenant vérifier que les raies observées sont bien les raies de Balmer de l'hydrogène.

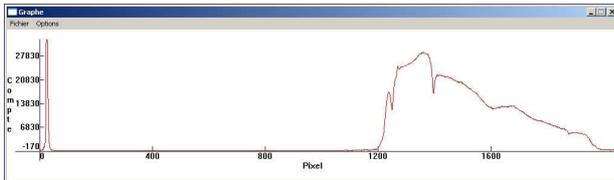


Fig.14. Le spectre transformé en graphique par Iris.

Dans notre montage, le pas p du réseau vaut $5 \mu\text{m}$ (200 traits par mm), la distance d réseau-capteur vaut 90 mm (mesuré au pied à coulisse) et le capteur est une matrice de $3\,456 \times 2\,304$ pixels de côté a valant $6,42 \mu\text{m}$.

Au prix de quelques approximations, on peut montrer que la différence entre l'abscisse x de la raie de longueur d'onde λ et l'abscisse x_0 du centre de l'image de l'étoile (en pixels) est donnée par la relation $x - x_0 = d \times \lambda / (a \times p)$

On en déduit la dispersion :

$$\Delta\lambda / \Delta x = a \cdot p / d \approx 0,356 \text{ nm/pixel}.$$

À partir du graphique, ou en déplaçant le pointeur sur l'image, on détermine l'abscisse (en pixel) du milieu de l'étoile, soit $x_0 = 27$ pixels puis celle du milieu de chaque raie. On peut alors dresser le tableau suivant :

	Raie 1	Raie 2	Raie 3
	(H_γ)	(H_β)	(H_α)
Abscisse du centre (x en pixel)	1251	1397	1877
Différence ($x - x_0$ en pixel)	1224	1370	1850
λ calculé (nm)	436	488	659
λ table (nm)	434,0	486,1	656,3

On retrouve avec une très bonne précision (mieux que 1 %) les longueurs d'onde données par les tables. On ne peut pas espérer mieux, la principale cause d'incertitude venant ici de la mesure de la distance réseau-capteur.

Il ne nous reste pour aujourd'hui qu'à enregistrer nos fichiers. Dans un prochain article, nous verrons comment on peut, à l'aide du logiciel VSpec, analyser plus finement le spectre 1D, déterminer la courbe de réponse instrumentale, et finalement estimer la température d'une étoile à l'aide de son "profil de Planck".

Lexique

APN : appareil photo numérique.

RAW : le format d'enregistrement non compressé de certains APN.

Avantage : c'est celui avec lequel on aura la meilleure dynamique et perdra le moins d'informations.

Inconvénient : l'acquisition (il faut acquérir des images de plages noires (Dark), de lumière uniforme (PLU), et de d'offset (bias...)) et le traitement (soustraction de l'offset et du dark, division par la PLU, ... sont plus compliqués)

BMP : un des formats (peu ou pas compressé) d'enregistrement des images sous Windows.

Chacun des 3 plans couleurs (rouge, vert, bleu) est codé sur 8 bits (soit 256 niveaux).

Avantage : peu ou pas compressé.

Inconvénient : donne des fichiers assez lourds et la dynamique est limitée

JPG (ou JPEG) : un autre format (souvent le seul disponible sur les APN compacts) d'enregistrement des images.

Avantage : les images sont compressées, donc le volume des fichiers est raisonnable.

Inconvénients : la dynamique est limitée (256 niveaux par plan couleur).

FTS, FITS : deux formats d'enregistrement des images scientifiques très utilisés dans les bases de données. Les images sont en niveau de gris (il faut donc 3 fichiers FITS pour une image en couleurs). Le fichier comporte un en-tête avec des données sur les caractéristiques de l'image.

PIC : le format d'enregistrement des images couleur sous IRIS. Chacun des 3 plans image y est codé sur 16 bits (32768 niveaux). Pas de compression.

Avantage : pas de perte d'information lors de l'enregistrement, et une bonne dynamique.

Inconvénient : des fichiers plutôt volumineux.

Réseau blazé : c'est un réseau taillé de telle manière que la majeure partie de l'énergie lumineuse (pour d'une longueur d'onde donnée) est concentrée dans un des ordres du spectre (le plus souvent le spectre l'ordre 1).



Fig.15. Le spectre final.

Quelques sites

Une série de spectres obtenus avec un LHIRES III

<http://bmauclair.free.fr/astonomie/spectro/atlas/seriebr/>

Un article de C Buil sur l'utilisation du Star Analyser <http://astrosurf.com/buil/staranalyser/obs.htm>

Un autre du même Christian Buil mais en anglais <http://astrosurf.com/buil/us/spe1/spectro4.htm>

RÉALISATION

Un spectroscope pour la classe

Marie-Agnès Lahellec

Ce spectroscope permet d'obtenir un spectre du Soleil suffisamment fin pour que les raies d'absorption (raies de Fraunhofer) soient présentes. Le résultat final est simple : le tube en carton présente une fente source à une des extrémités et un réseau diffractant à l'autre extrémité, protégé par un bouchon.

Le matériel

- Un tube en carton ou en PVC d'environ 600 mm de longueur et 50 mm de diamètre intérieur.
- Une lame de rasoir neuve pour réaliser la fente source (ou du canson noir rigide ou encore une diapo noire). La qualité de la fente permet d'obtenir les raies d'absorption. Pour cela, il faut que les bords soient bien nets et plans.
- Un réseau diffractant 740 traits / mm (à acheter par l'intermédiaire du CLEA).
- Un cache pour diapositives qui sera le support de la fente.
- Un « regard » de plomberie de diamètre 50 mm sur lequel on collera le réseau.
- Un rouleau d'adhésif noir (travaux d'électricité).
- Un morceau de papier millimétré.
- Un tube de colle scotch.

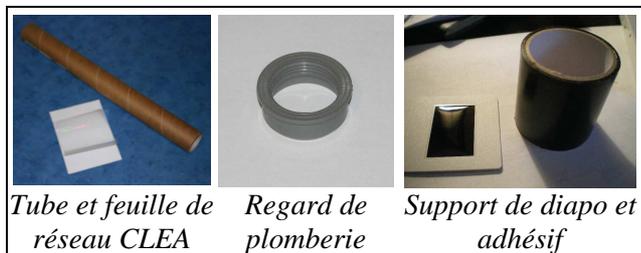


Fig.1. Une partie du matériel nécessaire.

Réalisation

Confection de la fente source

Méthode 1 (lame de rasoir)

Le résultat sera meilleur car les bords de la lame de rasoir sont bien rectilignes. Mais pour éviter tout accident, ce type de spectroscope sera réservé à l'utilisation par l'enseignant.

- Casser la lame de rasoir au milieu, dans le sens de la longueur, retourner les morceaux et les coller grâce à l'adhésif noir sur le cache pour diapositives (figure 2). Il faut que les bords de la fente soient bien parallèles entre eux, pour cela, on peut utiliser

un morceau de papier millimétré. L'écartement doit être compris entre 0,5 et 1 mm.

- Coller le cache de diapositive équipé de la fente à une extrémité du tube, grâce à l'adhésif noir.

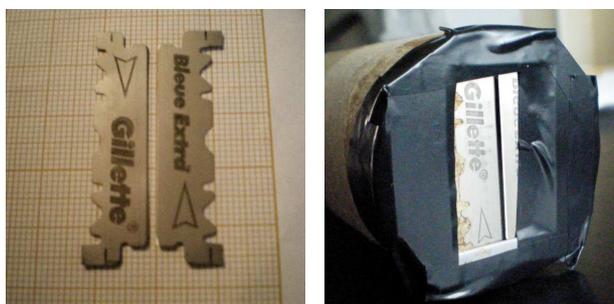


Fig.2. Réalisation de la fente source.

Méthode 2

Dans un rectangle de papier noir (type Canson) de 35 mm par 38 mm, découper proprement une fente de 0,5 à 1 mm de large puis l'insérer dans le cache diapositive.

Si on dispose d'une ancienne diapositive noire, on peut découper directement la fente dans la diapo.

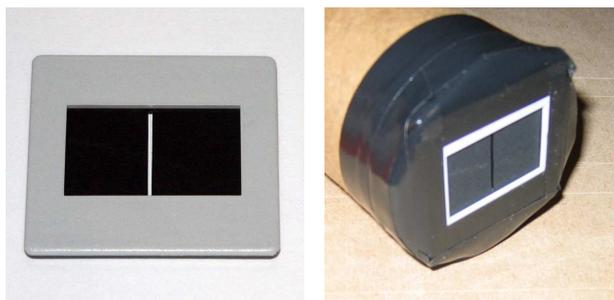


Fig.3. Fente source découpée dans une feuille noire.

Mise en place du réseau diffractant

- Par précaution, fabriquer un calibre pour le réseau en découpant dans du papier un disque à la taille du "regard" de plomberie.
- Découper le réseau à la taille du calibre et le coller sur les bords du regard.

Attention : c'est une partie délicate, il ne faut pas mettre les doigts sur le réseau, placer la partie mate du réseau vers l'intérieur du tube. Le bouchon aura pour fonction de protéger le réseau.

- Fixer le "regard" équipé du réseau à l'autre extrémité du tube. Il doit pouvoir tourner dans le tube.



Fig.4. Le réseau installé.

Observation

- Diriger le tube vers le ciel bien éclairé, la lumière entrant par la fente, observer en plaçant l'œil derrière le réseau.

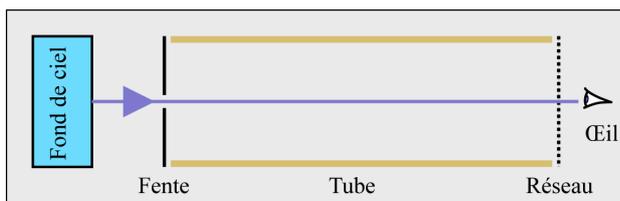


Fig.5. Observation avec le spectroscopie.

- Tourner le "regard" pour orienter le réseau avec les traits parallèles à la fente : le spectre observé doit être bien rectangulaire (figure 6), et non pas en forme de parallélogramme écrasé.

- On peut pointer le fond bleu du ciel ou mieux, des nuages blancs.



Fig.6. Le spectre observé.

Discussion

- Le spectre observé est virtuel et à grande distance. Pour voir les raies noires, qui sont très fines, il faut donc que l'observateur ait une bonne vue ou qu'elle soit bien corrigée.

- Si la fente est trop large, les raies d'absorption ne seront plus visibles. Si elle est trop fine, le spectre sera peu lumineux et des poussières peuvent créer des raies sombres perpendiculaires à la fente.

- Un tube en PVC de 1 m de long et 2,5 cm de diamètre intérieur (plomberie) ne donne pas de meilleurs résultats et il est plus lourd et encombrant.

Un tube en carton de 37 cm de long et 2,5 cm de diamètre intérieur (intérieur d'un rouleau de papier pour cuisson) ne permet pas une bonne résolution des raies noires. Le résultat est décevant.

- Pour éviter de se couper avec les bords de la lame de rasoir, on peut placer un manchon sur ce côté du tube ou encore un cache en carton par dessus.

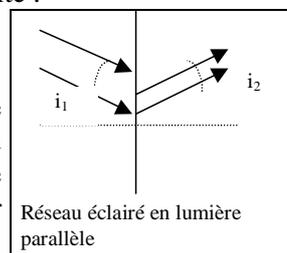
La théorie

On trouve la théorie pour les réseaux éclairés en lumière parallèle, on n'en est pas très éloigné ici.

Dans cette hypothèse, si on considère un faisceau parallèle arrivant sous l'incidence i_1 , l'intensité du rayonnement est maximum dans la direction i_2 si la condition suivante est satisfaite :

$$\sin i_2 - \sin i_1 = k \frac{\lambda}{d} = k \lambda N$$

où λ est la longueur d'onde du rayonnement, d le pas du réseau, N le nombre de traits par unité de longueur et k l'ordre du spectre.



Cette expression s'obtient en écrivant la condition pour avoir une interférence constructive.

Dans notre spectroscopie, on a $i_1 = 0$ (incidence normale) et $N = 740$ traits/mm. On trouve, pour $k = 1$ (le premier ordre, le plus lumineux) :

$i_2 = 17,2^\circ$ pour $\lambda = 0,40 \mu\text{m}$ (lumière bleue)

$i_2 = 31,2^\circ$ pour $\lambda = 0,70 \mu\text{m}$ (lumière rouge).

Ce qui explique le spectre : les différentes radiations sont séparées.

La résolution et l'étendue du spectre sont meilleures pour un réseau comportant un grand nombre de traits par unité de longueur et une surface éclairée large.



Fig.7. Exemple de spectroscopie terminée avec un réseau CLEA dans un cache diapo (autre montage possible) et une fente en carton.



Fig.8. Lampe fluo observé dans ce spectroscopie. On obtient des raies d'émission.

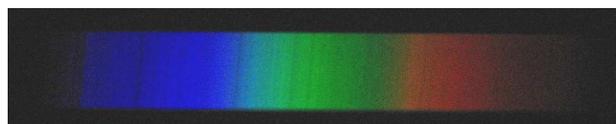


Fig.9. Le fond de ciel observé dans ce même spectro. Les raies d'absorption sont parfaitement visibles.

ARTICLE DE FOND

Quelle est la couleur du Soleil ?

Pierre Causeret

Le problème n'est pas si simple et la question revient régulièrement au sein du CLEA. Les réponses varient du jaune au bleu en passant par le blanc et le vert. Nous allons essayer d'apporter des éléments de réponse les plus clairs possibles.

Voici trois opinions différentes mais on peut en entendre encore d'autres :

- Le Soleil est jaune, tout le monde le sait ; d'ailleurs même les enfants le dessinent jaune.

- Le Soleil est blanc puisque, par définition, le blanc c'est la lumière naturelle.

- Le Soleil est vert puisque son maximum d'émission est dans le vert.

Qui a raison ? Pour tenter de répondre à la question "quelle est la couleur du Soleil ?", il faut tout d'abord définir ce que l'on entend par couleur. Pour les physiciens, chaque radiation a une longueur d'onde. On peut dire que la couleur d'un laser, c'est sa longueur d'onde, la notion est bien définie car la lumière est monochromatique, ce qui signifie qu'il n'y a qu'une seule longueur d'onde. Il ne faut pas confondre ce terme avec monochrome : dans un tableau monochrome, les différentes parties du tableau sont vues d'une même couleur mais cette couleur unique est constituée de différentes longueurs d'onde.

La figure 1 représente les couleurs des différentes longueurs d'onde entre 380 et 780 nanomètres, donc dans le domaine de la lumière visible, telles que nous pouvons les observer dans un spectroscope dirigé vers une lampe à incandescence.

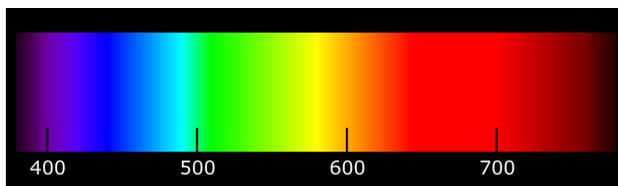


Fig.1. Couleur et longueur d'onde (en nanomètres).

Mais, pour la plupart des sources lumineuses comme le Soleil, la lumière n'est pas monochromatique, elle est composée de différentes longueurs d'onde. On s'en convainc facilement en regardant un arc-en-ciel ou en décomposant la lumière avec un prisme comme Newton ou encore avec un réseau. Le problème de la couleur de la lumière se complique.



Fig.2. Dans un arc-en-ciel, les gouttes de pluie décomposent la lumière du violet au rouge à la manière d'un prisme même si, comme le montre la théorie, chacune des zones colorées n'est pas monochromatique.

Qu'est-ce que la couleur d'une lumière polychromatique ? Et si c'était simplement la couleur de la longueur d'onde dans laquelle l'intensité est maximale ? La lumière que l'on reçoit du Soleil a son maximum entre 500 et 550 nanomètres (figure 3) donc dans le vert. Il faudrait donc dire que le Soleil est vert (figure 4). Cela choque puisque le Soleil ne nous apparaît pas de cette couleur. Le maximum d'émission est une notion intéressante pour les physiciens, mais ce n'est pas ce que voit notre œil. Il nous faut donc raisonner autrement.

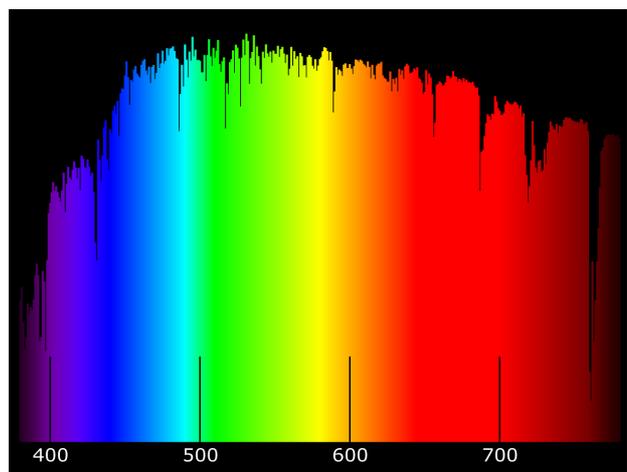


Fig. 3. Spectre de la lumière solaire reçue au niveau de la mer (schéma réalisé d'après les données du Renewable Resource Data Center).

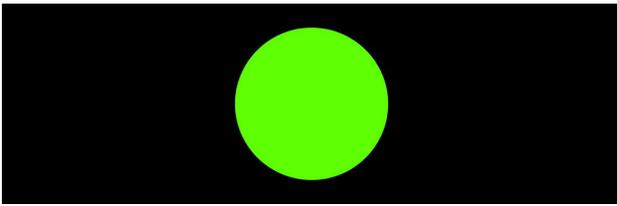


Fig.4. Soleil vert. Voici comment apparaîtrait le Soleil si on ne voyait que son maximum d'émission à 530 nanomètres.

La question "de quelle couleur **est** le Soleil ?" n'a pas de sens puisqu'il émet dans toutes les longueurs d'onde. La vraie question qui nous intéresse ici et à laquelle nous allons essayer de répondre est "de quelle couleur **voit-on** le Soleil ?", ce qui est très différent. La couleur est en réalité une notion physiologique.

Le problème est que l'on ne peut pas regarder le Soleil sans se brûler les yeux. Pour préciser encore la question, il faudrait se demander de quelle couleur on verrait le Soleil si on pouvait atténuer sa luminosité de la même manière dans toutes les longueurs d'onde.

La couleur et l'œil

Pour trouver une réponse à notre question, il faut commencer par nous interroger sur la manière dont nous percevons les couleurs. La rétine est composée de deux sortes de cellules, les bâtonnets, qui sont sensibles à la luminosité, et les cônes qui nous permettent de voir les couleurs. Ceux-ci sont de trois types différents, chacun étant spécialisé dans un domaine de longueur d'onde :

- pour les grandes longueurs d'onde autour de 560 nm, les cônes rouges ou L (comme Long),
- pour les moyennes longueurs d'onde autour de 530 nm, les cônes verts ou M (comme Medium),
- pour les courtes longueurs d'onde, autour de 420 nm, les cônes bleus ou S (comme Small).

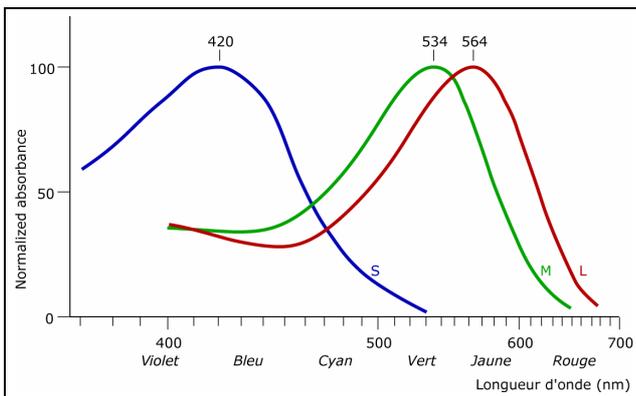


Fig.5. Sensibilités des cônes aux différentes longueurs d'onde (d'après l'article sur la couleur de wikipedia).

Lorsque de la lumière arrive sur la rétine, les différents types de cône réagissent et envoient

l'information au cerveau qui la traduit en terme de couleurs :

- Cônes verts et cônes rouges également excités (et sans bleu) = Jaune ou vert clair
- Cônes verts moins excités que les rouges (toujours sans bleu) = Orange
- Uniquement cônes rouges excités = Rouge...

Ce mécanisme fait que des sources lumineuses totalement différentes peuvent nous apparaître de la même couleur. Par exemple une lumière monochromatique à 580 nm nous apparaîtra jaune car les cônes rouges et verts seront excités à peu près à égalité. Mais une source de lumière composée de deux raies d'émission, l'une rouge à 650 nm et l'autre verte à 540 nm, sera vue exactement de la même manière (figure 6).

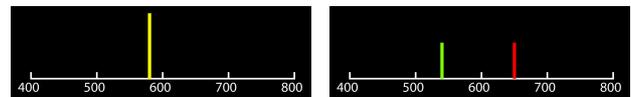


Fig.6. Ces deux sources de lumière seront vues exactement de la même couleur par un œil humain car les cônes rouges et verts seront excités de manière identique dans les deux cas. Par contre, on pourrait imaginer qu'un extra terrestre voie deux couleurs totalement différentes.

Pour bien comprendre notre perception des couleurs, il faudrait parler aussi d'autres facteurs comme l'intensité de la source ou le fonctionnement du cerveau qui voit différemment une même couleur sur deux fonds différents...

Le codage des couleurs en RVB (Rouge Vert Bleu) ou RGB (Red Green Blue) est copié sur le fonctionnement de l'œil. Un écran plat d'ordinateur fonctionne avec trois cellules par pixel, une rouge, une verte et une bleue. Si vous photographiez un beau Soleil couchant bien jaune avec votre appareil numérique et que vous affichez l'image sur votre ordinateur, votre œil verra à peu près la même couleur sur l'écran et dans le ciel. Par contre, si vous regardez les deux images avec un spectroscope, vous aurez deux résultats totalement différents : le Soleil réel montrera un spectre continu avec un maximum à plus de 550 nm, alors que l'image affichée à l'écran se décomposera en raies d'émission, principalement une rouge et une verte. Mais, dans les deux cas, les cônes de l'œil seront excités de la même manière et nous verrons donc la même couleur.

Le blanc

"En 1666, Newton montre que la lumière blanche se décompose en différentes couleurs". Dans cette phrase qu'on peut lire dans de nombreux manuels, la lumière blanche désigne la lumière du Soleil. Mais qu'est-ce que le blanc ? Par définition, le

blanc, c'est la lumière naturelle, celle à laquelle les yeux humains sont habitués depuis des millions d'années. La difficulté de cette définition, c'est qu'elle est très floue : la lumière naturelle dépend de l'heure de la journée, de la saison et même du lieu d'habitation. Le soir, quand le Soleil est bas, on remarque que le paysage est baigné d'une lumière jaune (figure 7).



Fig.7. Le même paysage en milieu et en fin de journée. La lumière passe du blanc au jaune.

Et pourtant, pour nous, le blanc existe sans avoir besoin de définition plus précise, un enfant sait dire approximativement si un objet est blanc ou non. La plupart du temps, on peut donc se contenter de cette définition ambiguë de la lumière blanche : c'est la lumière naturelle en milieu de journée. Une autre difficulté provient du fait qu'on n'observe pas directement la lumière blanche, mais un objet supposé blanc comme une feuille blanche, éclairé par cette lumière. On suppose alors que la feuille ou l'objet blanc renvoie de la même manière les radiations de différentes longueurs d'onde.

Les photographes et les éclairagistes ont essayé de proposer des définitions plus précises du blanc en prenant pour modèle le rayonnement d'une source à une température donnée, en général autour de 5 500 ou 6 000 K (voir encadré). Dans le réglage des écrans d'ordinateur, on peut vous proposer un blanc chaud à 5 000 K (chaud veut dire ici tirant vers le jaune) ou un blanc froid à 9 000 K (froid pour dire bleuté). En réalité, le blanc des ordinateurs ne présente pas un spectre de corps noir puisqu'il n'est constitué que de rouge, de vert et de bleu mais il doit, pour notre œil, en avoir l'apparence.

Température de couleur

Tout corps émet un rayonnement électromagnétique. Un homme à 37 °C émet dans l'infrarouge. Un morceau de fer chauffé à 3 000 °C apparaît rouge ; il émet dans toutes les longueurs d'onde mais davantage dans le rouge. Plus chaud, on le verra blanc puis bleuté.

Pour un corps opaque, totalement isolé et maintenu à température constante que les physiciens appellent corps noir, le rayonnement émis dépend uniquement de la température et a un profil bien défini (figure 8).

La température est habituellement donnée en Kelvin (K), comptés à partir du zéro absolu (il suffit d'ajouter 273,15 à la température en °C pour obtenir la température en K). Quand la température augmente, le maximum se déplace vers les courtes longueurs d'onde et sa couleur se décale donc vers le bleu.

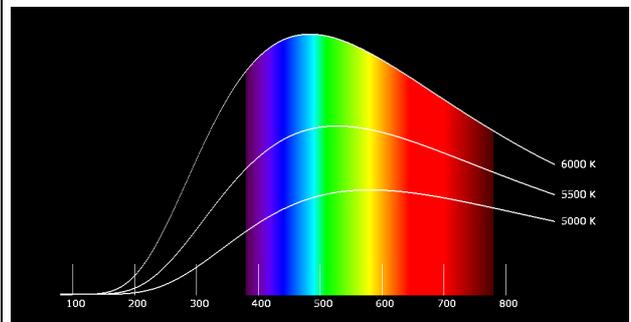


Fig.8. Émission d'un corps noir à une température de 5 000 K, 5 500 K et 6 000 K.

La définition du blanc comme étant la lumière naturelle pourrait nous laisser penser que le Soleil doit nous apparaître blanc. Mais la lumière naturelle arrivant au sol n'est constituée que pour une partie des radiations provenant en ligne directe du Soleil. Une autre partie provient du ciel bleu, donc du Soleil aussi mais de manière indirecte après diffusion. Quelques expériences vont nous aider à savoir si on voit le Soleil blanc ou non.

Expériences

Pour savoir de quelle couleur on voit le Soleil, la première expérience qui vient à l'esprit est de le regarder. Bien évidemment, tous les astronomes savent qu'il ne faut surtout pas le faire sans protection sous peine d'endommager sérieusement ses cellules rétinienne.

Le brouillard peut jouer un rôle de filtre. Il n'apparaît pas coloré donc on peut le considérer très grossièrement comme un filtre neutre, laissant passer dans la même proportion toutes les longueurs d'onde. Le Soleil observé à travers le

brouillard apparaît pâle, à peu près blanc, à condition qu'il soit déjà assez haut dans le ciel. Étant donné la qualité du filtre, la méthode est très approximative. Mais on peut quand même en conclure que le Soleil n'est ni bleu, ni vert, ni jaune vif. Cette observation étonne de nombreuses personnes qui croient voir la Lune alors qu'ils observent le Soleil. Ce qui surprend, c'est son petit diamètre apparent mais aussi sa pâleur, son manque de couleur. Voir un Soleil quasiment blanc n'est pas habituel.



Fig.9. Le Soleil vu à travers le brouillard apparaît blanc.

Pour être sûr de la couleur observée, il faudrait se passer de filtre. Une méthode simple qu'utilise Lionel Ruiz (bien connu dans le milieu des planétariums) consiste à projeter le Soleil sur une surface blanche et à comparer sa couleur avec la même surface éclairée par l'ensemble du ciel. On s'aperçoit alors que le Soleil projeté est très légèrement jaune. Et pourtant, la lumière n'a fait que traverser des lentilles non colorées. C'est donc que la lumière du Soleil nous apparaît jaune.

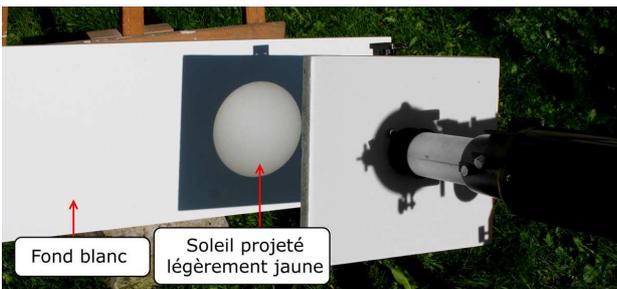


Fig.10. Le Soleil projeté à l'aide d'une lunette astronomique sur une surface blanche apparaît jaunâtre comparé à la surface voisine éclairée par l'ensemble du ciel.

Pour terminer, voici une dernière expérience. Quand le ciel est découvert, la lumière qui nous éclaire provient pour une part en ligne directe du Soleil après traversée de l'atmosphère (ce que j'appellerai lumière directe) et d'autre part de la lumière du Soleil diffusée par l'atmosphère qui donne la couleur bleue du ciel (ce que j'appellerai lumière indirecte). Pour comparer la couleur et la luminosité de ces différentes parties, trois photos

ont été réalisées un jour de beau temps, sans nuage. Pour la première (figure 11a), votre revue préférée était placée dans une pièce sombre possédant juste une ouverture. Seule la lumière directe du Soleil venait l'éclairer. Pour la deuxième (figure 11b), le sujet était à l'extérieur et recevait la lumière globale du Soleil (directe et indirecte). Et enfin pour la troisième photo (figure 11c), un carton avait été placé pour mettre à l'ombre le sujet qui ne recevait plus que la lumière indirecte du Soleil en provenance du ciel bleu. Pour les deux dernières photos, il n'y avait aucun objet alentour (à l'exception de l'appareil photo et de son pied) pour éviter de perturber l'expérience en réfléchissant la lumière du Soleil. Pour avoir une luminosité comparable, on a posé 1/100 s dans le premier cas, 1/125 s dans le deuxième et 1/20 s dans l'autre. Les différences de couleur sont très nettes. La première apparaît jaune, la deuxième blanche et la troisième bleue.

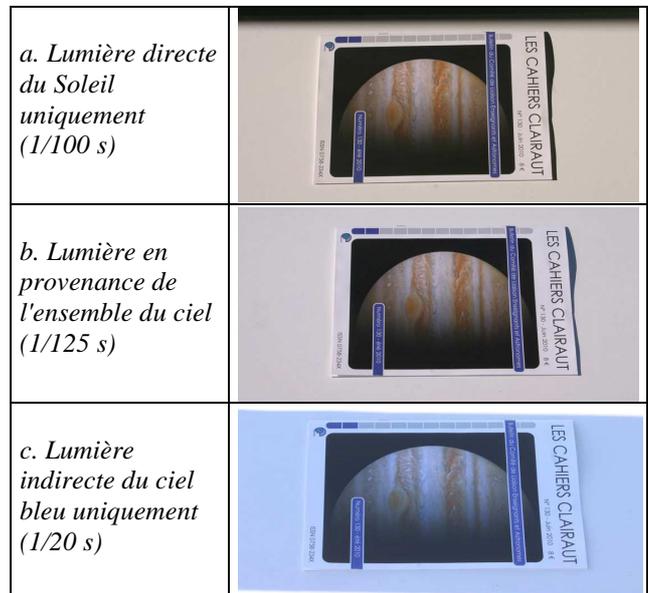


Fig.11. Trois photographies du même objet avec trois éclairages différents. Les différences de couleur sont nettes. Les temps de pose ont été choisis pour que les trois images aient à peu près la même luminosité.

Comment expliquer ces différences de teinte ? Il est normal que le fond blanc de la deuxième photo apparaisse blanc puisqu'il est éclairé par l'ensemble de la lumière du ciel (lumière directe et indirecte) et c'est ainsi que l'on a défini la lumière blanche comme étant la lumière naturelle. Que la troisième photo soit bleue semble aussi logique puisqu'elle est éclairée par la lumière indirecte du Soleil en provenance du ciel bleu. D'ailleurs, de nombreux peintres représentent les ombres en bleu. Pourquoi la première photo apparaît-elle jaune ? La lumière globale (directe et indirecte) est blanche, la lumière indirecte est bleue, donc la lumière directe

est de la lumière blanche à laquelle il manque du bleu. Lorsque nos yeux reçoivent cette lumière, les cônes rouge et vert seront donc davantage impressionnés que les bleus ; et rouge plus vert donne du jaune. La lumière directe du Soleil doit donc apparaître jaune, ce qu'avait déjà montré l'expérience précédente.

De plus, les temps de pose montrent que la lumière indirecte en provenance du ciel bleu n'est pas négligeable puisqu'elle représente en gros un cinquième de la luminosité du Soleil seul ou un sixième de la luminosité totale. Il est bien évident que ces résultats doivent beaucoup varier en fonction de l'état du ciel.

Le Soleil hors atmosphère

Une autre question peut se poser : « de quelle couleur voit-on le Soleil hors atmosphère ? ». Si on suppose que l'ensemble de la lumière parvenant au sol est la même que celle émise par le Soleil, il devrait apparaître blanc. Et pourtant, une partie de la lumière bleue diffusée par l'atmosphère repart dans l'espace sans avoir atteint le sol. Ce qui signifie qu'il y a une perte de radiations bleues entre la lumière émise par le Soleil et celle qui arrive au niveau de la mer. Ce qui voudrait dire que la lumière du Soleil vu de l'espace contient davantage de bleu que la lumière blanche arrivant au sol et devrait donc apparaître légèrement bleuté. Mais là encore, puisqu'on ne peut pas le regarder en face, il faudrait projeter son image sur un écran blanc et comparer avec une lumière blanche étalonée. Qui veut faire l'expérience ?

Certains seront peut-être surpris que l'on parte de la Terre pour comprendre quelle est la couleur du Soleil dans l'espace et non l'inverse. Mais il faut bien comprendre que le problème de la couleur est un problème physiologique à la base duquel il y a l'œil humain qui a évolué à la surface de la Terre.

Conclusion

On lit souvent que le Soleil est jaune parce que son maximum d'émission est dans le jaune. C'est faux, il est dans le vert.

Les expériences précédentes montrent pourtant que l'on voit le Soleil très légèrement jaune, la raison en est simple, c'est parce que le ciel est bleu. La lumière que l'on dit blanche est celle à laquelle l'œil humain s'est habitué depuis des millions d'années, c'est la lumière naturelle du ciel composée pour une petite partie de la lumière indirecte du Soleil en provenance du ciel bleu et pour une grande partie de la lumière légèrement jaune provenant en ligne directe du Soleil.

Quand au Soleil vu de l'espace, il semble qu'il devrait apparaître blanc légèrement bleuté.

On peut se demander pourquoi les enfants dessinent naturellement un Soleil franchement jaune. La raison me semble simple. Quand le Soleil est haut dans le ciel, il est trop éblouissant et on ne peut pas le regarder. Ce n'est qu'à son lever ou à son coucher qu'il est observable car il est davantage filtré par l'atmosphère et à ces moments là, il est souvent jaune.

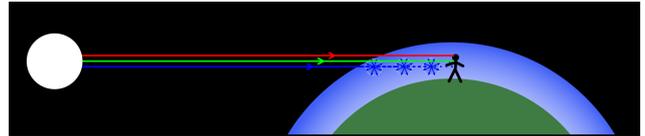


Fig.12. La couleur du Soleil couchant. Au coucher du Soleil, la lumière qui nous en parvient doit traverser une épaisse couche d'atmosphère. Les molécules de l'atmosphère diffuse une grande partie des radiations bleues. Notre œil reçoit alors principalement des rayons verts et rouges, ce que l'on voit comme du jaune. Si le vert est aussi diffusé, nous verrons un Soleil orange ou même rouge.

Longueur d'onde et codage RVB

Pour réaliser les figures 1, 4, 6 ou 8, il faut transformer une longueur d'onde en couleur donc, pour l'impression, en codage RVB. Ce n'est pas un problème simple puisque la solution dépend de la réponse des cônes. On trouve différentes correspondances.

J'ai utilisé ici le site <http://www.physics.sfasu.edu/astro/color/spectra.html>. Il faut aussi signaler <http://www.efg2.com/Lab/ScienceAndEngineering/Spectra.htm>, un site qui contient un petit logiciel permettant de transformer une longueur d'onde en codage RVB.

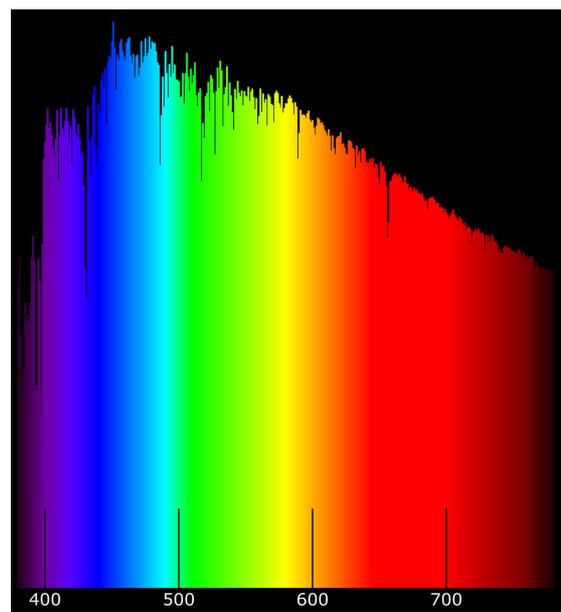


Fig.13. Spectre du Soleil hors atmosphère.

AVEC NOS ÉLÈVES

Un nouveau système de planétarium, le Lhoumeau Sky System (LSS)

Jacques Montier, Société d'Astronomie de Rennes

De nombreux enseignants utilisent des petits planétariums, fixes ou itinérants. La plupart des systèmes étaient optiques mais on en trouve maintenant équipés de systèmes numériques à des prix accessibles. Un utilisateur nous parle de son expérience avec ce type de matériel.

La Société d'Astronomie de Rennes, créée en 1974 et constituée d'une soixantaine de membres, œuvre depuis de nombreuses années pour le développement de la culture scientifique dans le domaine de l'astronomie.

Outre les activités destinées à ses membres (ateliers, cours, stages, observations, collaborations entre professionnels et amateurs), l'association organise de nombreuses animations en direction du public et des interventions en milieu scolaire.

L'année 2002 voit la naissance de l'observatoire de La Couyère (Ille et Vilaine) dont la commune est propriétaire. La Société d'Astronomie de Rennes est chargée d'assurer la maintenance, l'accueil et les animations auprès du public et des groupes scolaires.

En 2008, la Communauté de Communes du Pays de Moyenne Vilaine et du Semnon s'est dotée d'un planétarium fixe de 5 mètres de diamètre, situé sur le site de l'Observatoire de La Couyère, complétant ainsi les installations existantes.



Fig.1. L'observatoire de La Couyère (35) avec son planétarium.

Pourquoi un nouveau planétarium ?

À l'origine, le planétarium était équipé du système optomécanique Cosmodyssée 4 fixe réalisé par la Société RSA-Cosmos (Sorbiers près de St Étienne). Très vite est apparue la nécessité de faire évoluer le planétarium à l'image des grands planétariums numériques. Le coût de ces systèmes numériques étant prohibitif pour une petite structure, la Société d'Astronomie de Rennes s'est orientée vers une nouvelle formule inventée par Yves Lhoumeau en collaboration avec Lionel Ruiz : le Lhoumeau Sky System ou LSS.

Qu'est-ce que le système LSS ?

Le système LSS, c'est :

- * un ordinateur équipé du système d'exploitation libre Mandriva Linux,
- * un logiciel de planétarium ; ici le logiciel Nightshade LSS, qui est une version adaptée au système LSS du logiciel libre Nightshade, lui-même basé sur le logiciel de planétarium libre et gratuit Stellarium.
- * un vidéo projecteur avec la meilleure qualité (luminosité, contraste et résolution) possible à un prix raisonnable (Yves Lhoumeau conseille un vidéo projecteur de résolution 1920×1080 Full HD et un contraste minimum 1:2000).

* un système optique classique de 50 mm environ le plus ouvert possible, un miroir à 90° et un objectif fish eye, permettant ainsi de projeter une image en pleine voûte avec une excellente résolution.

On peut obtenir un système LSS de deux manières différentes :

1. La version économique pour un budget d'environ 2 000 € : c'est la solution adoptée par la Société d'Astronomie de Rennes qui a acheté les éléments séparés disponibles dans le commerce puis qui a fabriqué le support des optiques pour le système de

projection. Le système d'exploitation et le logiciel sont libres, gratuits et téléchargeables sur Internet.
 2. La version commerciale pour un budget voisin de 10 000 € : il est possible d'obtenir un système clé en main auprès de la société "Aula del cosmos" (Barcelone).

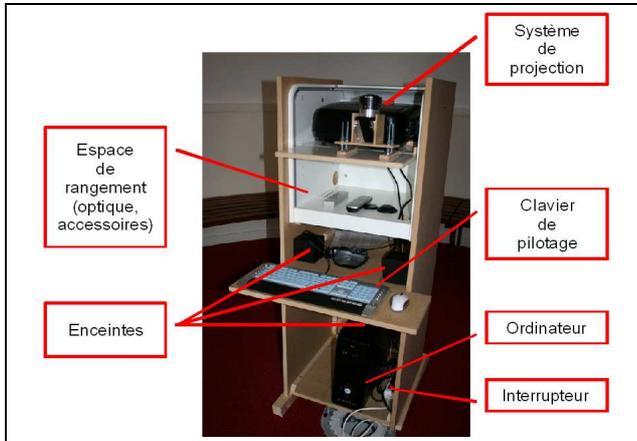


Fig.2. Le système LSS utilisé par l'auteur.

Un exemple d'utilisation

L'objectif de cette séance est de montrer que les saisons sont liées aux différences de hauteur du Soleil et aux durées du jour et de la nuit.

Déroulement

Chose impossible à faire dans un grand planétarium classique, les enfants entrent dans la coupole équipés d'une feuille de papier (sur support rigide ou cahier), d'un crayon et d'une lampe de poche ou mieux, d'une petite lampe frontale dispensant une lumière rouge (effet garanti auprès des enfants !).

Le script est lancé et Monsieur Astro apparaît, posant la question :

"Pourquoi fait-il plus chaud en été qu'en hiver ?"

C'est l'occasion de tester les enfants sur ce qu'ils connaissent, mais sans donner de réponse et surtout sans les corriger sur leurs éventuelles idées fausses.



Fig.3. Pourquoi fait-il plus chaud en été qu'en hiver ?

Distance et hauteur du Soleil

Ils découvrent ensuite le premier paysage projeté correspondant au ciel du 21 juin 2010 vers 12 h TU au Centre d'Astronomie de La Couyère (Bretagne). L'animateur leur montre les diverses informations qu'ils auront à noter pendant la séance (figure 4) :

- * la date et l'heure,
- * la température ambiante donnée par un thermomètre virtuel,
- * la hauteur du Soleil sur l'horizon,
- * la distance Terre-Soleil qui est donnée en Unité Astronomique ; cela nécessite évidemment une explication auprès des enfants pour leur montrer l'intérêt de cette unité à l'échelle du système solaire. On ne leur demande pas de calculer cette distance en kilomètres, mais simplement de la noter...

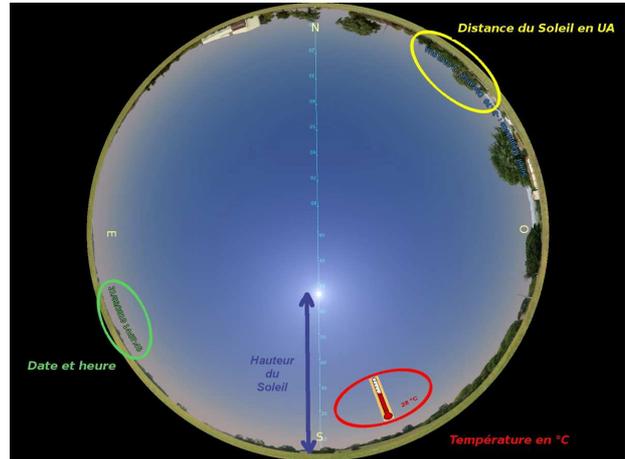


Fig.4. Les différents paramètres à noter.

La séance se poursuit sans explications supplémentaires de la part de l'animateur, mais une aide peut être dispensée individuellement en cas de besoin. Les enfants peuvent ainsi observer le Soleil aux solstices d'été et d'hiver (une animation permet aussi de voir l'évolution tous les quinze jours d'un solstice à l'autre).

Durée du jour et de la nuit

Il s'agit maintenant de faire déterminer aux enfants la durée du jour et de la nuit aux solstices d'été et d'hiver. La question est posée par Monsieur Astro : "Quelle est la durée du jour ? Quelle est la durée de la nuit ?"



Fig.5. Quelle est la durée du jour ? Quelle est la durée de la nuit ?

Pour cela, ils assistent à un lever et un coucher de Soleil en un même lieu le 21 juin 2010 et le 21 décembre 2010. En consultant l'horloge située à l'horizon sud-est, ils doivent noter approximative-

ment les heures de lever et de coucher du Soleil aux solstices d'été et d'hiver.



Fig.6. Démarrage du chronométrage.

Les valeurs obtenues sont parfois assez dispersées car le mouvement diurne a été accéléré pour éviter une trop longue durée de la séance ; il est nécessaire alors de se mettre d'accord avec les enfants pour choisir la même heure de lever et la même heure de coucher pour tout le monde (on cherchera des valeurs assez simples pour éviter de compliquer les calculs par la suite). À partir des valeurs trouvées, les enfants doivent ensuite calculer la durée de la journée, puis en déduire celle de la nuit le 21 juin, puis le 21 décembre.

Bilan et exploitation des activités

La question initiale est reposée ; les enfants peuvent constater qu'en été la hauteur du Soleil sur l'horizon à midi est plus grande et la durée du jour plus longue. D'autres activités avec du matériel plus classique doivent ensuite entrer en jeu pour justifier les observations précédentes et compléter l'étude (mappemonde, expériences d'exposition à la lumière de thermomètres ou morceaux de chocolat, etc.).

Les avantages d'un tel système

* Ce système peu coûteux est parfaitement adapté aux petites structures fixes ou mobiles tels que les planétariums gonflables.

* Dès le lancement de Nightshade, le ciel du moment apparaît sur la voûte, avec les dispositions précises des planètes, des étoiles et autres objets du ciel profond. Nul besoin de positionner les planètes à la main avant la séance puisque tout est géré par l'ordinateur.

* Le paysage et le ciel sont projetés avec un réalisme saisissant, à tel point que les enfants peuvent facilement croire qu'il s'agit d'un ciel réel. Ils prennent alors le dôme du planétarium pour un toit ouvrant sur le ciel étoilé. L'animateur doit cependant bien préciser qu'il ne s'agit que d'une projection.

Les textures des planètes, les nébuleuses et les galaxies ont été réalisées à partir de photographies de qualité. Il est possible de remplacer le paysage fourni par Nightshade par un paysage personnalisé, comme par exemple la cour de l'école.

* Des informations utiles comme l'heure, les noms et les distances des astres peuvent apparaître sur le ciel. Les enfants peuvent ainsi constater que les étoiles d'une constellation sont en fait situées à des distances très différentes de la Terre.

* Le pilotage de l'ensemble peut se faire :

- soit au clavier dont chaque touche est programmée pour une action précise,

- soit à la souris,

- soit à l'aide d'une télécommande par liaison bluetooth (la manette de Wii fonctionne très bien), si l'ordinateur est équipé d'un dongle bluetooth.

L'avantage évident est de pouvoir manipuler tout le système à distance tout en restant au milieu du public ; on perçoit beaucoup mieux les réactions des enfants.

* Les touches du clavier sont programmées de façon à lancer des actions comme faire apparaître les lignes, les figures et les noms des constellations, l'écliptique, l'équateur céleste, le méridien, etc.



Fig.7. Les figures des constellations apparaissent en appuyant simplement sur une touche.

Il est possible de faire apparaître chaque ligne puis figure de constellation individuellement. On peut ainsi faire découvrir progressivement le ciel aux enfants.

* On peut non seulement changer de lieu d'observation sur la Terre (latitude et longitude), mais également quitter notre planète pour avoir une vision du ciel à partir de la Lune, ou de n'importe quelle autre planète. Par exemple, il est possible d'observer depuis la planète Mars le transit de Phobos devant le Soleil.

* On peut également agrémenter la séance avec de la musique et des vidéos projetées en pleine voûte (missions spatiales, mouvement des planètes, galaxies, etc.)

* Un des points forts de ce système est de pouvoir faire appel à des stratoscripts (voir encadré). Ce sont des fichiers au format texte, facilement modifiables avec un petit éditeur de texte (Notepad ou autre) et comportant des lignes de commande qui sont lues et exécutées par le logiciel Nightshade.

Cela permet non seulement d'automatiser certaines tâches, mais également de lancer de véritables spectacles avec animations, musiques et vidéos.

* Un dernier avantage, **qu'on ne trouve dans aucun planétarium classique** : la boule magique !

Il suffit de poser une boule de lampadaire dans le faisceau de lumière à la sortie du système optique. Des commandes au clavier ou des scripts permettent de projeter à l'intérieur de la boule la texture

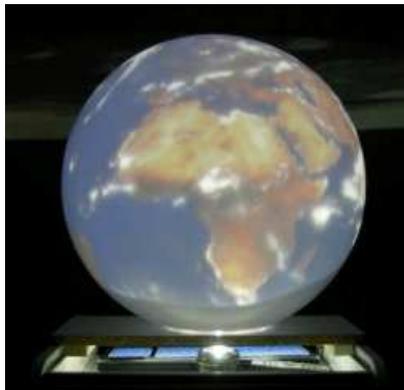


Fig.8. La boule de projection.

d'un astre du système solaire, et l'on voit apparaître, la Lune ou tout autre planète du système solaire.

Un appui sur une touche du clavier ou de la télécommande et la planète se met en mouvement de rotation ! L'effet visuel est très spectaculaire et

impressionne tout le monde, à commencer par nos animateurs !

Les inconvénients

* Le vidéo projecteur et les optiques doivent être alignées de façon très précise pour obtenir une image de qualité sur l'ensemble de la voûte.

Le problème ne se pose plus si l'ensemble est réglé et fixé définitivement sur un support rigide.

* Du fait de la projection par un vidéoprojecteur, la salle n'est pas dans une obscurité aussi complète que dans un planétarium classique.

Cet éventuel inconvénient peut s'avérer être un avantage, car si l'animateur et le public se voient, le dialogue peut s'en trouver facilité.

* Selon la qualité du vidéo projecteur, les étoiles, le Soleil ou les objets de taille apparente relativement importante sont plus ou moins pixélisés.

* La projection sur la boule ne permet pas de mettre en évidence les différentes tailles des planètes...à moins de disposer de plusieurs boules et de les utiliser successivement.

De l'intérêt du stratoscript...

Un script est une suite de commandes enregistrées. On peut, par exemple, montrer le mouvement apparent du Soleil le 21 décembre 2010 à Rennes en appuyant simplement sur une touche sans avoir à régler la date, le lieu, la vitesse... On peut réaliser soi-même ses scripts pour des logiciels comme Nightshade ou Stellarium ou en trouver sur Internet.

Un bref exemple de lignes de commandes avec les commentaires...

```

timerate rate 0           # l'écoulement du temps est arrêté
moveto lat 47.9 lon -1.50 alt 89 # On se place à la latitude et longitude de La Couyère
date utc 2010:06:21T12:07:45 # On fixe la date et l'heure UTC
flag show_tui_datetime on # la date et l'heure vont s'afficher sur l'horizon Est
flag cardinal_points on # affichage des points cardinaux
flag show_tui_short_obj_info on # affichage de courtes informations sur l'astre sélectionné
flag atmosphere on # faire apparaître l'atmosphère
flag planets on # visualiser les planètes
flag stars on # visualiser les étoiles
flag landscape on # projection du paysage
wait duration 2 # délai de 2 secondes pour le temps d'affichage
timerate rate 3600 # le temps est accéléré 3600 fois ; une heure par seconde.
wait duration 10 # on visualise le mouvement diurne pendant 10 secondes
timerate rate 0 # l'écoulement du temps est arrêté
script action pause # le script fait une pause et attend l'appui sur la touche k du clavier (ou sur la
                    # touche de la télécommande) pour continuer les commandes suivantes.

```

NOTE : de nombreux scripts existent déjà et sont téléchargeables librement sur Internet.

ATTENTION : ces scripts ne fonctionnent pas avec la version 10 de Stellarium.

Quelques liens

Le site d'Yves Lhoumeau et Lionel Ruiz <http://lss-planetarium.ovh.org/>

Site de Stellarium <http://www.stellarium.org/fr/>

Site de la Société d'Astronomie de Rennes <http://www.astro-rennes.com/>

Quelques scripts personnels <http://sites.google.com/site/jacquesfr35/planetarium/scripts>

Site de l'Association des Planétariums de Langue Française (APLF) : <http://www.aplf-planetariums.info/>

Vidéos pleine voûte <http://www.aplf-planetariums.info/index.php?onglet=activites&menu=compendium>

Le système d'exploitation Mandriva Linux <http://www2.mandriva.com/fr/>

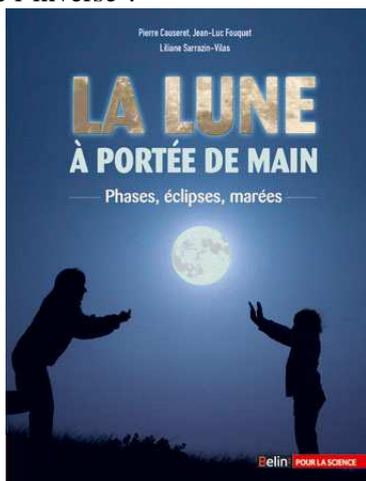
La société aula del cosmos : <http://www.auladelcosmos.com/bloc.htm>

LECTURES POUR LA MARQUISE

Olivier Gayrard

La Lune à portée de main Phases, éclipses, marées

Le ciel débute aux pieds de chaque Homme. Il appartient à la fois aux rêveurs et à tous ceux qui cherchent à le décrypter. S'agissant parfois des mêmes personnes, le scientifique se fait artiste, ou bien est-ce l'inverse ?



Dans ce nouveau livre de la collection BELIN Pour la Science, Pierre Causeret, Jean-Luc Fouquet et Liliane Sarrazin-Vilas, ne dérogent pas à ce caractère universel et pluridisciplinaire. Les auteurs font à la fois acte de scientifiques avertis, par la rigueur avec laquelle ils expliquent les phénomènes, mais ils n'oublient pas de rechercher une autre réalité : celle qui est née de la confrontation de la Lune et des Hommes.

Ce livre d'environ 200 pages est divisé en 40 chapitres répartis en 5 parties : les phases de la Lune, les éclipses de Lune, les éclipses de Soleil, les marées, à la découverte de la Lune. Les chapitres courts permettent d'aborder clairement chacune des questions traitées.

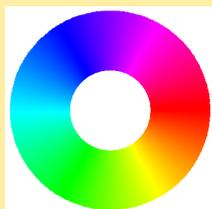
En formateurs soucieux de l'évolution de la démarche pédagogique, les auteurs débudent, autant

que possible, l'investigation des phénomènes par une phase d'observation. Le chapitre un s'ouvre donc sur la réalisation d'une frise, et, brièvement, par quelques techniques de photographie de la Lune. L'expérimentation peut alors suivre son cours. À ce stade, il n'est jamais évident de rendre compte de ces conceptions. Le passage par la schématisation permet de mieux cerner le problème. J'insiste ici sur la grande précision apportée aux nombreuses illustrations de ce livre. Pour valider, ou invalider les hypothèses ainsi faites, les rédacteurs s'appuient sur des maquettes, mais aussi sur la mise en scène des mouvements célestes, en faisant participer les élèves à des rondes. L'astronomie pratiquée ici, tout en étant ludique, est d'une grande clarté et formatrice.

L'analyse scientifique dans sa quête de vérité est passionnante. Mais être attentif au monde qui nous entoure, et connaître la place de l'Homme dans l'Univers, c'est aussi, par exemple, tenir compte de celui qui s'émerveille devant le simple spectacle de la nature. Les auteurs illustrent ce propos par une mise en perspective historique et une approche culturelle globale. Ainsi, dans le quatrième chapitre, sont exposés les mythes de Séléné, dont "la dégradation tout au long de la lunaison confronte l'Homme à sa propre temporalité et à sa mort". Les couleurs de la Lune dans la littérature et la peinture, son influence sur l'imaginaire sont aussi évoquées. Pour finir la lecture de ce livre, il vous sera proposé "une escapade sur la Lune". N'hésitez pas, embarquez pour la Lune. L'agence SELINA VOYAGES organise des voyages de 38 jours tout compris. Pour ce faire, vous aurez besoin de toutes vos connaissances scientifiques et culturelles.

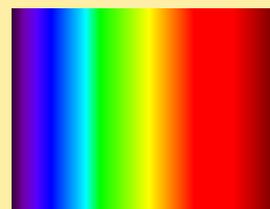
Il ne fait aucun doute que ce livre sera particulièrement précieux pour les enseignants et les clubs d'astronomie.

Remue-méninges



Pour le peintre, le violet contient du rouge. Pour le physicien, le rouge et le violet sont les deux extrémités du spectre visible. Alors, le violet est-il proche ou éloigné du rouge ? Sur le disque chromatique à gauche, les deux couleurs sont proches alors que, sur le spectre de droite, il n'y a pas plus éloigné que rouge et violet dans la lumière visible. Il y a vraiment de quoi se mélanger les pinceaux...

Solution page 40



Lecture pour la Marquise - suite

Christian Larcher

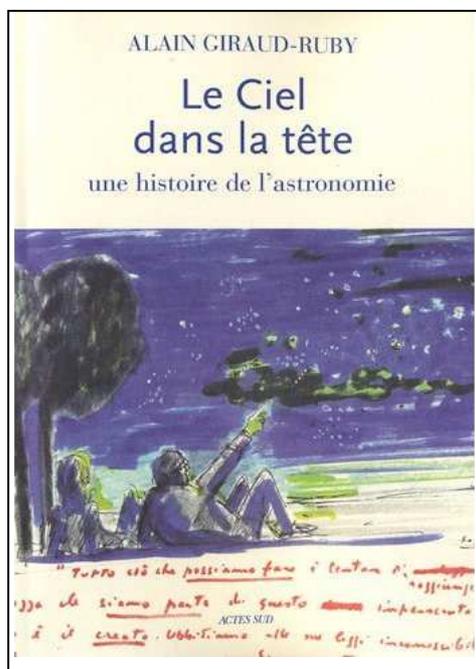
Le Ciel dans la tête

Une histoire de l'astronomie

Cet ouvrage écrit par Alain Giraud-Ruby et publié aux Éditions Actes Sud (mai 2010) comprend un peu plus de 500 pages.

Dans son introduction, l'auteur indique qu'il s'est refusé à introduire des schémas ou graphiques ou la moindre formule mathématique et justifie son choix : les mathématiques, dit-il, sont le langage de la démonstration : "il faut se servir des mathématiques comme l'ivrogne se sert des réverbères : pas pour s'éclairer mais pour s'appuyer".

Cette remarque serait de nature à susciter un vrai débat.



Ce livre épais est une sorte d'histoire racontée, répartie en quatre sous livres, avec un épilogue :

- L'impérieuse nécessité des définitions du temps et de l'espace ;
- L'inépuisable curiosité pour l'Univers des étoiles ;
- Les remous idéologiques autour des planètes ;
- L'étonnante popularité des mythes cosmologiques ;
- Épilogue : Le sacré, l'utilitaire et le culturel.

Ce livre se lit facilement ; il reprend beaucoup d'aspects déjà largement développés par ailleurs dans la littérature, accompagnés de nombreuses

citations, dont la provenance n'est pas toujours indiquée.

Je vais ici relever les anecdotes originales (en indiquant les pages) avant de présenter les aspects philosophiques développés dans le chapitre 19.

➤ Tycho Brahé (1546-1601), "l'homme au nez d'or", a construit l'Observatoire Uraniborg sur l'île de Svin grâce aux largesses du roi Frédéric II de Danemark. Cette générosité récompensait (dit l'auteur de ce livre, p.300) l'action du père de Tycho Brahé qui aurait sauvé le roi de la noyade. C'est la première fois que je rencontre cette version qu'il faudrait vérifier.

➤ Le père de Galilée, Vincenzo Galilèi, était compositeur et luthiste virtuose (p.306).

➤ La "loi" dite de Titius Bode semble indiquer que les distances des planètes au Soleil suivent une loi mathématique. La procédure pour trouver ces distances consiste à partir de la suite 0-3-6-12-24-48 à ajouter 4 à chaque terme puis à diviser par 10. On obtient alors pour chaque planète la distance au Soleil en UA. (0,4 ; 0,7 ; 1,0 ; 1,6 ; 2,8 ; 5,2) respectivement pour Mercure, Venus, la Terre, etc.

➤ Le grand physicien américain d'origine russe Georges Gamow (1904–1968) aurait envoyé au comité de lecture de la prestigieuse revue Nature un article portant sur le rôle de la force de Coriolis sur le sens de mastication des vaches : dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud (p.453).

➤ Dans un autre article sur l'origine des éléments chimiques (très sérieux celui-là), rédigé en 1948 en collaboration avec Ralph Alpher et publié dans la revue Physical Review, Gamow ajouta arbitrairement le nom d'un de ses bons amis Hans Bethe. Les débuts des trois noms permettaient de référencer l'article sous le sigle : alpha, bêta, gamma..... !

Le chapitre 19 (p.463) aborde d'intéressantes questions d'ordre philosophique dont je vais présenter quelques éléments.

Il s'ouvre sur une remarque de Richard Feynmann : "C'est toujours une redoutable aventure d'imaginer l'Univers en faisant abstraction de l'homme. J'entends par là de le contempler tel qu'il serait si les êtres humains

n'existaient pas. C'est à dire pendant la quasi-totalité de son histoire, et tel qu'il se trouve encore pratiquement partout" (p.470).

Notre vision du monde est par nature anthropocentrique il est difficile d'imaginer un Univers sans vie. Mais que dire d'étapes antérieures ? "D'un univers sans minéraux ? D'un univers sans molécules, sans éléments chimiques ?? Un univers sans particules élémentaires ??? À chaque stade la suite était-elle déjà inscrite dans des "lois" préexistantes, ou bien les "lois" se créaient-elles au fur et à mesure ?" (p.471).

"On peut toujours à posteriori reconstituer ce qui s'est passé, par une démarche historique et/ou réductionniste remontant le temps (les effets ont des causes sous-jacentes clairement identifiables (...). En revanche on ne peut jamais prévoir à priori les émergences où irait, où va l'évolution avec l'écoulement du temps. Et cela parce que les causes sous-jacentes ne provoquent aucun effet prévisible de manière déterministe et univoque". Il y a une absence de corrélation entre causes et effets, "un caractère a-causal" (p.474).

"Il y a un piège auquel n'échappent pas les ouvrages de vulgarisation sur (...) l'évolution cosmique qui, en général (sont) remplis de métaphores finalistes et d'images anthropocentriques pour décrire le comportement de la Nature".

H. Reeves a fait son choix : "J'ai pris le parti de l'anthropomorphisme le plus simpliste. Parce que de toute façon je suis convaincu qu'on n'y échappe pas".

La question n'est pas nouvelle déjà Blaise Pascal écrivait : "Toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, il est impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties".

L'auteur aborde (p.476) l'une des questions les plus anciennes de la science et de la philosophie : la "querelle des causes finales".

Il rappelle (p.478) que Fred Hoyle (l'inventeur du mot Big Bang) avait noté que "sans une correspondance fortuite entre les niveaux d'énergie de leurs noyaux (...) la nucléosynthèse de l'élément carbone à partir de noyaux d'hélium ne pouvait avoir lieu". "L'existence de carbone dans l'Univers ...et toute la chimie organique qui en découle (la vie en particulier) ...reposait donc,

au niveau nucléaire sur une pure coïncidence, extraordinaire, inexplicable, miraculeuse".

Hubert Reeves dans "L'heure de s'enivrer" observe que les paramètres physiques fondamentaux semblent précisément ajustés pour mener jusqu'à nous. Si l'on assignait des valeurs différentes à ces constantes le physicien qui calcule l'évolution "arrive à la conclusion que, dans la quasi-totalité des cas possibles, de tels univers seraient stériles, incapables de gravir les échelons de la complexité".

Dans les thèses actuelles de "l'intelligent design" l'Univers "obéirait à un projet".

Le physicien et cosmologiste Freeman Dyson indique que "d'une certaine manière, tout se passe comme si l'Univers savait que nous allions arriver".

Quant à Brandon Carter, autre cosmologiste il part du principe peu contestable que "Puisque nous sommes là, les lois de la physique doivent nécessairement avoir mené jusqu'à nous" (p.479).

Une autre théorie citée est celle des "multivers". Pour Andreï Linde cosmologiste américain : il existerait une foule (une infinité ?) d'"univers parallèles" obéissant à toutes sortes de lois physiques différentes, l'un au moins de ces univers menant à l'apparition de la vie et de la conscience, les autres non ; et, naturellement, nous vivons dans le bon !

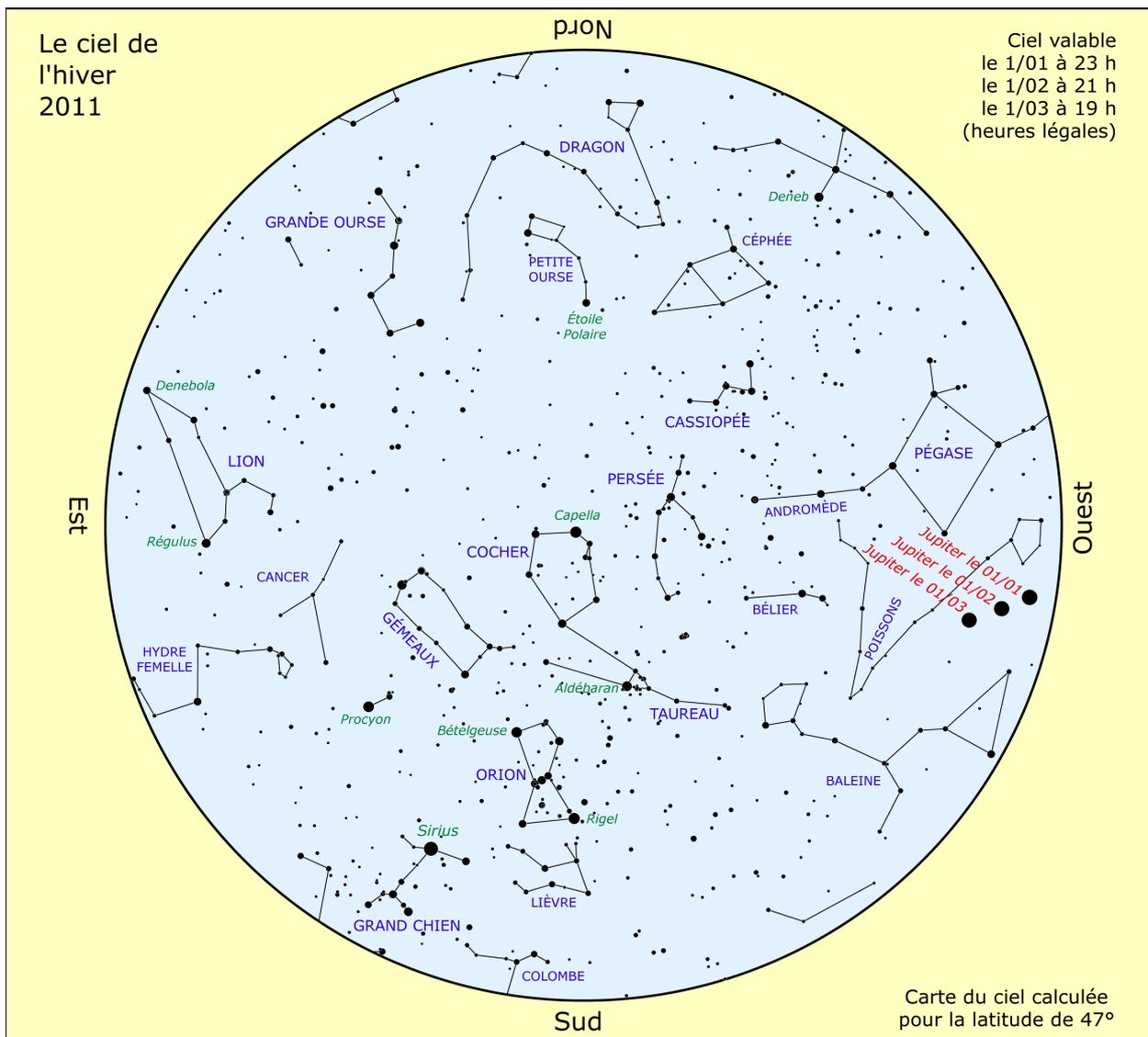
Le dernier chapitre propose des remarques pessimistes, particulièrement sur la théorie des cordes. Toutes ces théories, dit l'auteur, risquent fort "de ne jamais pouvoir être validées, étant intestables, infalsifiables ; Même pas fausses ...la physique renvoyée dans ses cordes" pour reprendre le titre du livre de Peter Woit (Dunod 2007).

La conclusion permet de retrouver les propos du préambule. Je la résume à partir d'une citation de David Lindley datant de 1993. "La physique théorique, aujourd'hui à peu près déconnectée de toute base expérimentale, sans aucune sorte d'applications – et tirant la cosmologie dans son sillage -, est devenue une pure mythologie mathématique".

L'auteur de ce livre déclare quant à lui (p.507) : "La vérité est que nos physiciens/cosmologistes mégalomanes, plongés dans leur mythologie mathématique, leurs visions holistiques de grande unification, de théorie du tout et leur fixation sur l'origine de l'Univers, perdent totalement de vue la réalité". ■

Le ciel de l'hiver 2011

Document à photocopier



Visibilité des planètes

Jupiter est la seule planète visible le soir cet hiver (dans la constellation des Poissons avec un court passage dans la Baleine). Elle se couche 6 h après le Soleil début janvier puis de plus en plus tôt chaque mois.

Saturne est visible en deuxième partie de nuit dans la constellation de la Vierge. Elle sera à l'opposition au plus près de la Terre début avril.

Dans le ciel du matin, **Vénus** est l'astre le plus lumineux. Elle est à son maximum de luminosité en décembre et à son élongation maximale le 8 janvier. Vue au télescope, elle passe d'un croissant en décembre à un quartier début janvier pour devenir ensuite gibbeuse.

Mercure sera visible le matin en janvier (élongation maximale le 9) mais, étant plus proche du Soleil, elle est plus difficile à repérer. Il faudra la chercher 30 min à 1 h avant le lever du Soleil, 5 à 10° au-dessus de l'horizon sud-est. On retrouvera Mercure le soir fin mars.

Quelques événements

- 21/12 (matin) : Éclipse de Lune (voir le site ou CC131).
- 21 ou 22/12 : Solstice d'hiver le 21 à 23 h 38 en Temps Universel mais le 22 à 0 h 38 en heure légale.
- 3/01 : Périhélie, la Terre est au plus près du Soleil, à 147 106 000 km.
- 4/01 : Éclipse de Soleil (voir le site ou CC131).
- 8/01 : Élongation maximale de Vénus.
- 9/01 : Élongation maximale de Mercure.
- 3/02 : Nouvelle Lune et nouvel an chinois.
- 19/03 : Pleine Lune et périgée qui entraînent de forts coefficients de marée (118 le 21 mars).
- 20/03 : Équinoxe de printemps le 20 à 23 h 20 (TU).
- Conjonctions Lune Vénus les 31/12, 30/01, 1/03 (matin).

Lune

Pleine Lune : 21/12, 19/01, 18/02, 19/03.
Nouvelle Lune : 4/01, 3/02, 4/03.

LA VIE ASSOCIATIVE

Assemblée Générale du CLEA

Le compte rendu de l'AG sera publié dans le prochain Cahiers Clairaut. En attendant nous vous informons de quelques modifications concernant les adhésions et les abonnements.



L'assemblée Générale a eu lieu à Bordeaux dans les locaux de Cap Sciences qui est un des CCSTI d'Aquitaine.

La veille, lors du Conseil d'Administration nous avons été accueilli par Bernard Alaux qui est directeur de la structure.

Sur place, les régionaux (Liliane Vilas, Roseline Jamet et Daniel Paupart) ont été actifs dans la préparation de la pause café et du repas, aidés à la fin par quelques hommes balai en mains (ils ne seront pas cités, de peur d'en oublier).

La photo ci-contre présente la plupart des présents, quelques-uns ont échappé aux photographes. L'image est truquée puisque les deux photographes apparaissent (merci Daniel et Denis).

Des décisions ont été prises modifiant le montant de l'abonnement et en introduisant un abonnement numérique.

L'adhésion simple est de 5 € et permet :

- d'être membre du CLEA et de participer aux AG,
- d'acheter des productions,
- de faire partie de la liste "adhérents" sur le site INRP et voir les documents mis à disposition de ce groupe,
- de faire partie de la liste de diffusion.

L'abonnement aux Cahiers Clairaut est de 25 € (avec 2 € de réduction pour ceux qui s'abonnent avant l'équinoxe de mars).

Adhésion et abonnement aux CC est de 30 € (avec 2 € de réduction pour ceux qui s'abonnent avant l'équinoxe de mars).

Une nouvelle possibilité est offerte.

Adhésion + abonnement papier aux CC + abonnement numérique pour 35 € (avec 2 € de réduction pour ceux qui s'abonnent avant l'équinoxe de mars). Ce qui correspond au montant de l'ancien abonnement et de l'adhésion. Ceci permet :

- d'être membre du CLEA et participer aux AG,
- d'acheter des productions,
- de faire partie de la liste "adhérents" sur le site INRP et voir les documents mis à disposition de ce groupe,
- de faire partie de la liste de diffusion,
- d'avoir accès aux CC des deux dernières années en ligne et à des nouveautés en ligne avec accès réservé,
- de participer à tous les groupes de travail et ainsi avoir accès aux documents en cours d'élaboration.

Congrès de l'UDPPC à Reims



Frédéric Mangeard et Éric Jougulet ont tenu le stand du CLEA lors du congrès de l'UDPPC à Reims.

Des Cahiers Clairaut étaient mis à disposition des congressistes, ainsi que les CD avec les traitements d'images avec Iris. Tout a disparu avant la fin de la journée.

Nos collègues ont répondu aux questions qui leur étaient posées concernant les possibilités du logiciel Iris et les travaux de

traitements d'images qui pourraient être faits avec des élèves.

Le CD préparé par Francis Berthomieu a permis à nos collègues de présenter le site du CLEA et d'en faire la publicité.

La disparition de tous les flyers présentant les productions CLEA sur les nouveaux programmes de seconde, nous permet d'espérer de nombreuses visites sur le site du CLEA hébergé à l'INRP à Lyon.

Frédéric Mangeard avait disposé son télescope devant le stand, ce qui a attiré l'attention des congressistes et suscité beaucoup de questions.

Le fait de feuilleter les cahiers Clairaut, de voir les différents articles sur des expériences menées par des collègues à tous les niveaux (école, collège, lycée) en a fait réfléchir plusieurs. Beaucoup connaissent le CLEA, mais n'ont pas encore sauté le pas de l'inscription.

Certains ont fait remarquer "l'ancienneté" des hors séries.

Frédéric et Éric ont été très satisfaits de tenir ce stand, qu'ils en soient remerciés.

Solutions des mots croisés

Horizontalement.

1. Atmosphère. 2. Balmer (Dans un spectre, la série de Balmer contient les raies de l'hydrogène $H\alpha$, $H\beta$... qui correspondent à une transition du niveau 2 à des niveaux supérieurs). Mec. 3. Su. British (William Herschel est né à Hanovre et a vécu ensuite en Angleterre alors que son fils John est né et mort en Grande-Bretagne). 4. Ordres. Seu (sue dans le désordre). 5. Ré. Musa. 6. Pau. Hélium (il fut découvert en 1868 dans le spectre d'émission du Soleil lors d'une éclipse avant d'être identifié en 1895 dans l'atmosphère terrestre). 7. Tully (la relation de Tully Fischer lie la magnitude d'une galaxie à la largeur de la raie à 21 cm de l'hydrogène neutre). TO (2 lettres sur 6 de proton). 8. Modernes. 9. Or. Irma. SO. 10. Naines. Ion.

Verticalement

1. Absorption. 2. Taureau. Ra. 3. ML. ULM. 4. Ombre (dans une tache solaire, l'ombre est la partie centrale et le champ magnétique important y dédouble les raies par effet Zeeman). Loin. 5. Sere (Eres). Hyde (l'Hydre femelle est la plus vaste des 88 constellations). 6. Prisme. Ems. 7. Ultra (les raies de Lyman de l'hydrogène sont dans l'ultraviolet). 8. Émission. 9. Réseau. ESO (European South Observatory). 10. Échu. Méson.

Le mascaret

Des adhérentes nous ont envoyé les photos ci-dessous prises en 2009 et 2010.

Liliane Vilas nous dit : "Nous sommes au bord de la Garonne, à 150 km de l'océan à marée basse le 20 août à 17 h 30. Soudain un bruit sourd et nous apercevons une vague de 1m qui arrive de l'aval à 15 km/h environ. C'est le mascaret.

Pourquoi cette vague est-elle si haute aujourd'hui ?



Photo Liliane Vilas



Photo Françoise Suagher

Plusieurs facteurs se conjuguent :

- c'est la nouvelle Lune
- le coefficient de marée est de 103,
- le débit de la Garonne est faible,
- le lit du fleuve est resserré à cet endroit.

La marée monte par palier de 5 à 10 cm à l'encontre du courant de la Garonne. Or le niveau du fleuve est bas et la marée est importante : les paliers se rattrapent et forment une grande vague pour le plaisir des surfeurs et des badauds !"



Photo Françoise Suagher

Réponse au remue-méninges de la page 34

Le problème des couleurs est un problème physiologique complexe. Ce remue-méninges a donné lieu à de longs échanges de courriers et la réponse ne nous a pas paru évidente. Et pourtant, c'est un sujet sur lequel il me semble important de faire la lumière. Je vous propose ci-dessous un essai d'explication à prendre avec précaution car elle ne fait pas l'unanimité, en attendant la réponse d'un spécialiste.

Pourquoi voit-on du rouge dans le violet ? Tout vient du fonctionnement de notre œil qui contient trois types de cônes pour voir les couleurs. Chaque type de cône réagit à sa manière aux différentes longueurs d'onde. Les cônes "rouges" ou "L" ont un maximum de sensibilité du côté du rouge, dans les grandes longueurs d'onde. Mais il se trouve qu'ils réagissent aussi aux courtes longueurs d'onde. Ainsi, une radiation violette à 400 nm arrivant dans notre œil va exciter principalement les cônes bleus mais aussi, dans une moindre part, les cônes rouges. Comme s'il y avait beaucoup de bleu et un peu de rouge. Les radiations rouges et violettes sont bien très éloignées dans le spectre mais elles excitent toutes les deux les cônes rouges et du coup, elles nous semblent relativement proches.

Une radiation violette à 400 nanomètres est perçue par notre œil comme la couleur codée (130, 0, 180) en RVB contenant un peu de rouge et beaucoup de bleu.

Écoles d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter en astronomie ?

Vous souhaitez vous perfectionner ?

Vous avez le projet d'animer un club ?

Venez participer à une école d'été d'astronomie, au col Bayard, à 1 200 m d'altitude, dans un cadre prestigieux.



Des exposés accessibles à tous



Des ateliers pratiques et des observations

Toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements sur le site du CLEA

Les productions du CLEA ⁽¹⁾

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)

Le formulaire de commande est sur le site.

(1) vente aux adhérents uniquement

Planétarium

Il est possible également de louer le planétarium gonflable (starlab) du CLEA. Cette année 2011, il sera en Région Midi-Pyrénées. (uniquement pour le planétarium contact : jean.a.ripert@wanadoo.fr)

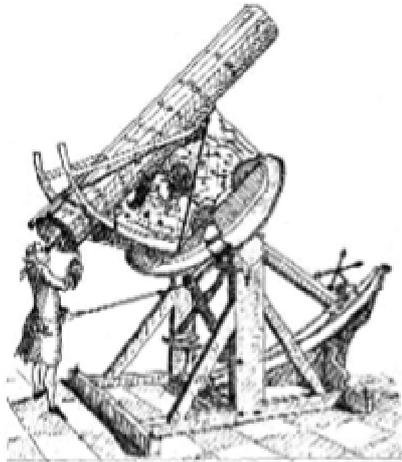
Le site internet

Une information toujours actualisée

www.clea-astro.eu



LES CAHIERS CLAIRAUT



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

OU

www.ac-nice.fr/clea

Siège Social :

CLEA,
Observatoire de Lyon
69561 ST-Genis Laval CEDEX

École d'Été d'Astronomie :

daniele.imbault@cea.fr

Cahiers Clairaut :

larcher2@wanadoo.fr

Ventes des productions :

www.clea-astro.eu

Site internet :

berthomi@ac-nice.fr
charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2011 :	5 €
Abonnement CC pour 2011* :	25 €
Adhésion + abonnement CC* :	28 €
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique* :	35 €

* réduction de 2 € avant le 21 mars

Chèque à l'ordre du CLEA, à envoyer à :

Jean Ripert
Impasse de Mouyracs
46090 PRADINES

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

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979

Numéro CPPAP : 0310 G 89368

Prix au numéro : 7 €

Revue trimestrielle : numéro 132, décembre 2010