Les Cahiers Clairaut

Automne 2008 n° 123

EDITORIAL

Dans le dernier numéro de notre revue, nous avions présenté la spectrographie, avec un volet important pour les astronomes amateurs. Dans ce numéro, nous terminons le dossier "spectro" avec un bel article d'un grand professionnel : **Paul Felenbok**, grand concepteur de spectroscopes à l'Observatoire de Paris.

Un autre astronome inventeur, **Jean Gay**, nous présente un instrument extraordinaire qu'il inventa : le Solarscope. L'article est à la fois l'histoire et le descriptif de ce génial instrument. Un récit plein d'humour, très agréable à lire. **Daniel Bardin** nous donne aussi les plans, jamais publiés, du célèbre support de lunette astronomique. Une conception qui rivalise avec les réalisations commerciales.

Outre les rubriques habituelles, "B-A, BA de statistiques" et "Convergence", nous découvrons une idée originale sur l'utilisation d'une webcam par **Philippe Jeanjacquot.**

L'école élémentaire n'a pas été oubliée, avec un compte rendu d'actions menées par **Jacques Heulin.**

Enfin, pour préparer la rentrée scolaire et l'année mondiale de l'astronomie en 2009, **Pierre Causeret** nous livre, comme à son habitude, de bonnes idées d'observation.

Alors bonne rentrée et bonnes observations !

La Rédaction
patu@obs.univ-lyon1.fr

Cours

Le B-A-BA de statistiques : les subtilités de la régression linéaire.
G. Paturel p. 2

Réalisation

Un support pour une petite lunette
D. Bardin p. 5

Avec nos élèves

Animations en maternelle
J. Heulin p. 11

Avec nos élèves

Visualisation des phases de la Lune
G. Paturel p.12

Histoire

Le Solarscope
J. Gay p. 14

Avec nos élèves

Convergence : les lentilles interférométriques
G. Paturel p. 19

Dossier spectro (fin)

La spectrographie
P. Felenbok p. 22

Avec nos élèves

Le gnomon et la webcam
Ph. Jeanjacquot p. 31

Observation

Quelques idées d'observations pour 2008-2009
P. Causeret p. 33

Rubriques fixes

Remue-méninges p. 36
Lecture pour la marquise p. 36
La vie associative p. 37
Le courrier des lecteurs p. 39
Solutions et informations p. 40

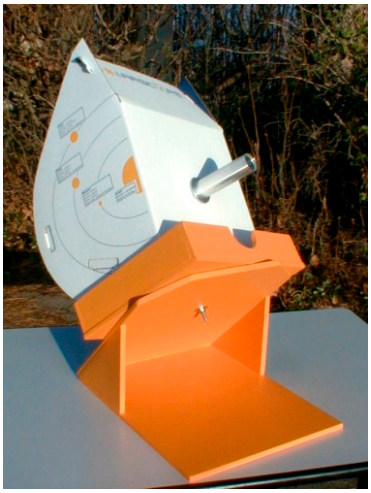


Photo Ph. Merlin

Le Solarscope avec une monture équatoriale réalisée par Philippe Merlin.

Le B-A-BA de statistiques : les subtilités de la régression linéaire

G. Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé : *Dans ce dernier article, nous donnons les grands principes à respecter pour faire correctement une régression linéaire. Nous donnons les relations de la régression linéaire par la méthode des moindres carrés. Nous traitons ensuite un exemple complet.*

Introduction

Nous allons continuer cette brève introduction aux statistiques par la présentation d'une méthode très utilisée : la régression linéaire par les moindres carrés. Le but est de trouver une relation linéaire entre deux grandeurs sous la forme : $Y = AX + B$, où A et B sont les deux constantes que nous voulons déterminer, tandis que Y et X sont les quantités entre lesquelles nous cherchons une corrélation. Les quantités Y et X se présentent comme une collection de mesures (Y_i, X_i). Donnons un exemple concret. Vous voulez savoir si la période de variation lumineuse P d'une étoile Céphéide dépend de sa magnitude absolue M. Vous testez, par exemple, la relation : $M = AP + B$ avec un échantillon de Céphéides, pour lesquelles vous connaissez les magnitudes absolues M_i et les périodes P_i, (i = 1,N).

Les lois ne sont pas toujours linéaires, mais il est souvent facile de se ramener au cas linéaire en prenant le logarithme ou l'exponentielle d'une des grandeurs. Dans l'exemple des Céphéides, la relation théorique est proche de : $P = C.10^{\alpha M}$. La régression linéaire sera recherchée sous la forme $\log P = \log C + \alpha M$, qui peut aussi se mettre sous la forme habituelle :

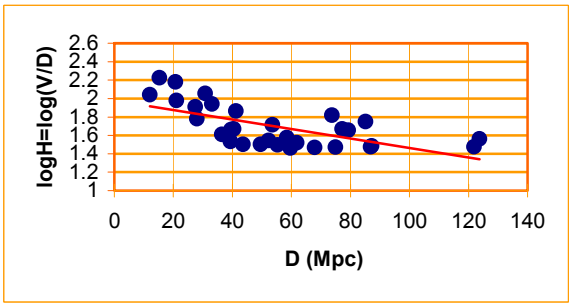
$$M = A \log P + B,$$

avec $B = -\frac{1}{\alpha}\log C$ et $A = \frac{1}{\alpha}$.

Il est donc nécessaire de ne tester que des relations linéaires (ce qui paraît évident compte tenu du nom de la méthode...) en choisissant bien la forme des grandeurs à tester.

Un piège à éviter

Un piège dangereux peut vous faire trouver des corrélations qui n'existent pas. La simulation qui va suivre est inspirée d'une publication réelle. Par exemple, vous voulez savoir si la constante de Hubble H, qui mesure l'expansion de l'Univers, dépend de la distance D. Cette interrogation est bien légitime. L'idée toute simple est de tester avec une régression linéaire la relation : $\log H = AD + B$. (le "log" sert à "linéariser" l'équation). On s'attend à trouver $A=0$, si H est constant quelle que soit la distance.



Faisons une simulation avec un tableur. La constante de Hubble, H, est fixée exactement à 50 (km/s)/Mpc. La vraie distance D' est tirée au hasard entre 10 et 160 Mpc. La distance observée D est égale à $D' + E(D')$, où $E(D')$ est l'incertitude, fonction de D'. Cette incertitude est très grande, compte tenu de la difficulté des mesures de distance. Nous prenons : $E(D') = 1{,}5D'(N-0.5)$, N étant une variable aléatoire entre 0 et 1.

Le graphique $logH = f(D)$ semble montrer que la constante de Hubble décroît avec la distance alors que par construction elle était constante.

L'explication est simple : quand D est surestimé, par suite de son incertitude, $H=V/D$ est sous-estimé et, inversement, si D est sous-estimé, H est surestimé. Finalement, pour les petites valeurs de D

nous aurons plus de chance d'avoir H grand, et réciproquement. Nous aurons une tendance artificielle à trouver une décroissance de H en fonction de D, comme le montre la droite de régression, sensée donner objectivement la tendance.

Que fallait-il faire ? Dans notre exemple, le problème provenait de la corrélation des erreurs entre les deux axes. En effet, la même quantité D intervenait sur les deux axes ($Y=V/D$) et ($X=D$) et, de plus, cette grandeur était affectée d'une incertitude très grande. Il fallait donc tester simplement V en fonction de D et voir si la relation présentait un écart à la linéarité.

Il est donc nécessaire de choisir les variables de telle manière que leurs erreurs soient indépendantes. Nous reviendrons sur la question des erreurs attachées aux variables.

La méthode des moindres carrés

L'idée est de trouver la droite qui passe au milieu des couples de points (Y_i, X_i) (i=1,N), en minimisant les "écarts" entre les points et la droite. Comment résoudre ce problème ?

Pour un X_i donné, le Y correspondant de la droite est $Y=A\ X_i\ +B$, alors que la mesure est Y_i. Ce que nous appellerons "l'écart" sera le carré :

$$\Delta_i=(Y-Y_i)^2=(AX_i+B-Y_i)^2$$

Pourquoi le carré ? Simplement pour éviter qu'il y ait une compensation arithmétique. C'est vraiment la distance géométrique que nous voulons réduire.
Naturellement cette réduction doit se faire pour tous les points (Y_i, X_i). Nous allons donc chercher à minimiser la somme :

$$S=\sum_{i=1}^{N}\Delta_i=\sum_{i=1}^{N}(Y-Y_i)^2=\sum_{i=1}^{N}(AX_i+B-Y_i)^2$$

La méthode générale pour trouver le minimum d'une expression, quand celle-ci varie en fonction d'une quantité, c'est de calculer la dérivée de cette expression en fonction de la quantité. Quand la dérivée est nulle, l'expression est à son extremum (ici le minimum). Nous avons une expression, S, et deux quantités inconnues, A et B. Il nous suffit d'écrire que S doit être minimum quand A et B varient. Nous aurons donc deux relations à satisfaire simultanément :

$$\frac{\partial S}{\partial A}=0 \text{ et } \frac{\partial S}{\partial B}=0 \qquad (1)$$

Or comme nous avons deux inconnues (A et B), notre problème est un système de deux équations à deux inconnues. Il ne reste qu'à résoudre (voir l'encadré à la page suivante).

Un problème insoluble

Dans la méthode que nous venons d'exposer, nous avons minimisé les écarts verticaux, c'est-à-dire selon l'axe Y. Est-ce à dire que les mesures X_i sont sans incertitudes ? Évidemment, dans bien des cas la réponse est non. Donc, la méthode standard des moindres carrés (méthode directe) n'est applicable que dans le cas où seules les grandeurs Y_i sont affectées d'incertitudes. Ce cas arrive, par exemple, quand on étudie la magnitude apparente $Y\equiv m$ d'une étoile en fonction de $X\equiv\sec\zeta=1/\cos\zeta$ pour déterminer l'extinction atmosphérique au cours d'une nuit (C'est la méthode de Bouguer). Dans ce cas l'erreur sur la mesure de la distance zénithale ζ est négligeable devant l'erreur sur la mesure de magnitude. La méthode directe des moindres carrés est tout à fait justifiée. Si nous avons la situation inverse (incertitude sur X seulement), la solution est facile à trouver : il suffit de permuter les axes, pour mettre en Y la quantité qui a une grande incertitude et en X celle dont l'incertitude est négligeable.
Mais qu'en est-il du cas où les deux quantités X et Y sont toutes deux affectées d'incertitudes de mesure ? Nous pouvons faire une régression "directe" (incertitude selon Y) et une régression "inverse" (incertitude selon X). Nous obtenons deux solutions différentes, disons : A et B pour la solution directe et A' et B' pour la régression inverse[1].

La solution correcte se trouve donc entre ces deux solutions extrêmes. Si nous avons de bonnes raisons de penser que les deux axes ont des incertitudes identiques, alors la bonne solution est la moyenne géométrique entre les deux (bissectrice des deux droites de régression). Si nous n'avons aucune information sur les incertitudes, nous pouvons simplement dire que la solution se situe entre les deux solutions extrêmes. Autant dire que le problème est insoluble. Faisons une remarque pour conclure, le coefficient de corrélation, qui mesure la qualité de la régression, est donné par :

$$\rho=\sqrt{\frac{A}{A'}}\ .$$

Test d'hypothèse

Se pose alors le même problème que dans l'article précédent : la corrélation que je trouve entre les quantités Y et X est-elle réelle (on dit significative) ou non ? Il faut effectuer un test d'hypothèse comme nous l'avions vu la dernière fois.

[1] Le calcul de la régression inverse fournit la solution $X=aY+b$. Mais nous pouvons l'exprimer dans le sens direct $Y=A'X+B'$ en posant $A'=1/a$ et $B'=-b/a$.

Droites des moindres carrés

Nous partons des équations (1).

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 2\sum_{i=1}^{N}(AX_i + B - Y_i)X_i = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial B} = 2\sum_{i=1}^{N}(AX_i + B - Y_i) = 0$$

Nous calculons d'abord les sommes des X_i, des X_i^2, des Y_i, des Y_i^2 et des X_iY_i. Nous les désignerons respectivement par *SX, X2, SY, Y2* et *XY*.

Les deux équations s'écrivent donc :

$A.X2 + B.X - XY = 0$

$A.X + B.N - Y = 0$ (*N* est le nombre de mesures)

La résolution de ce système nous donne *A* et *B*.

En posant :

$\alpha = XY - SX.SY / N$; $\beta = X2 - SX^2 / N$ et $\gamma = Y2 - SY^2 / N$

On trouve la pente et l'ordonnée à l'origine :

$$A = \frac{\alpha}{\beta} \qquad A' = \frac{\gamma}{\alpha}$$

$$B = \frac{SY}{N} - A\frac{SX}{N} \qquad B' = \frac{SY}{N} - A'\frac{SX}{N}$$

Nous donnons sans démonstration les erreurs moyennes sur *A* et *B* : $\overline{\sigma}_A = \sqrt{\frac{1}{N-2}\left(\frac{\gamma}{\beta} - A^2\right)}$ et $\overline{\sigma}_B = \overline{\sigma}_A\sqrt{\frac{X2}{N}}$

Dans l'encadré figurent les relations qui donnent les erreurs moyennes sur *A* et *B*, que nous noterons respectivement : $\overline{\sigma}_A$ et $\overline{\sigma}_B$.

Pour tester, par exemple, si la pente *A* est significativement différente de 1 et l'ordonnée à l'origine significativement différente de zéro on calcule :

$$t = \frac{|A-1|}{\overline{\sigma}_A} \text{ et } t = \frac{|B|}{\overline{\sigma}_B}$$

Si la valeur *t* est inférieure à $t_{0,01} \approx 2{,}58$[2] je peux conclure que ma valeur est compatible avec la valeur espérée (1 ou 0, respectivement) avec une probabilité d'erreur de 1% (ou, dit autrement, que la valeur trouvée ne diffère pas significativement de la valeur de l'hypothèse).

On peut chercher si le coefficient de corrélation ρ est significativement différent de zéro. L'erreur moyenne sur ρ s'approxime bien par : $\overline{\sigma}_\rho = \frac{1-\rho^2}{\sqrt{N}}$. Il suffit de calculer : $t = \frac{|\rho|}{\overline{\sigma}_\rho}$,et de comparer à $t_{0,01} \approx 2{,}58$ pour pouvoir conclure.

[2] Cette valeur est valable quand N>30. Si N<30, on peut approximer par : $t_{0,01} = 2{,}5 + \frac{7}{N}$

Un exemple pour vérifier

Il est utile d'avoir un exemple traité complètement pour vérifier un programme. Nous donnons l'exemple réel de la relation Période-Luminosité. Le tableau des mesures est le suivant :

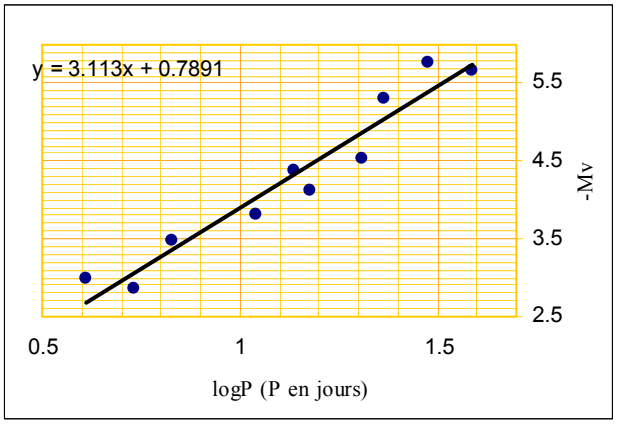
Étoile	logP (P en jours)	$-M_v$ (mag. V)
BF Oph	0.6094	3.00
CV Mon	0.7307	2.85
U Sgr	0.8290	3.49
XX Cen	1.0395	3.81
BN Pup	1.1358	4.38
VW Cen	1.1771	4.13
RY Sco	1.3079	4.54
VZ Pup	1.3650	5.30
AQ Pup	1.4787	5.78
U Car	1.5889	5.67

On trouve :

SX=11.262	*SY*=42.95	
X2=13.6336825	*Y2*=194.3189	*XY*= 51.328942
β = 0.95041806	γ = 9.84865	α = 2.958652
A = 3.113	*B* = 0.7891	
$\overline{\sigma}_A$ =0.289	$\overline{\sigma}_B$ =0.338	
A' = 3.329	*B'* = 0.5461	ρ = 0.967

Dans ce cas la *régression directe* est bien justifiée, l'erreur sur *logP* étant faible par rapport à l'erreur sur la magnitude absolue.

On vérifie que la pente n'est pas significativement différente de 3 (t = 0,39)[3] et que le coefficient de corrélation n'est pas nul ($t \approx 47$). Ceci peut aussi se voir en vérifiant que la pente ne peut pas être considérée comme nulle (t = 10,8).



■

[3] $t_{0,01} \approx 3{,}2$ d'après la note 1. Ici, $t << t_{0,01}$

RÉALISATION

Un support pour une petite lunette

Daniel Bardin

Résumé : *Un petit instrument d'astronomie, lunette, télescope, monture photographique du type « Pierre BOURGE », a pour vocation d'être transportable afin de s'éloigner le plus possible des pollutions lumineuses. Une fois en place, l'appareil doit permettre de scruter efficacement le ciel.*
Nous nous proposons de construire ici un pied et une fourche azimutale pouvant recevoir une petite lunette en prenant en compte certains points: légèreté, stabilité, mouvements doux et vibrations bien amorties, réalisation facile et coût modique. Certaines cotes peuvent être modifiées en fonction de l'instrument supporté et de l'usage que l'on envisage; l'article qui suit ne parlera pas de la construction ou de la provenance de la lunette.

La légèreté et la stabilité peuvent paraître contradictoires mais un objet de grande masse, rigide et stable, rendrait l'instrument difficilement transportable. . .
La douceur des mouvements concerne autant la monture (une petite fourche avec un berceau) que le pied. Certains instruments du commerce «destinés à l'initiation » déçoivent bien vite les débutants: torsions du pied, jeux importants des assemblages, serrages bloquants, sans parler des optiques parfois fort médiocres.

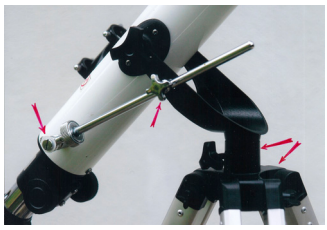


Figure 1

Les focales des petites lunettes avoisinent souvent un mètre: elles ont donc une bonne sensibilité angulaire. Une lunette mal supportée vibrera au moindre contact: les mises au point, les centrages, l'oeil touchant l'oculaire..., l'image devient vite illisible et l'observation très inconfortable!

Proposition pour un tripode en bois

Précautions : Éviter de copier les tripodes à usage photo ou les petits instruments du commerce : dans ces deux cas, la zone assemblée au sommet des jambages est bien trop étroite; à la plus petite sollicitation de pointage, des torsions résiduelles (rotations autour d'un axe vertical) apparaissent et rendent ces solutions inacceptables.

Certains pieds du commerce adoptent une formule comparable à celle que nous allons réaliser, mais notre démarche n'est pas d'acheter mais de construire nous-même.

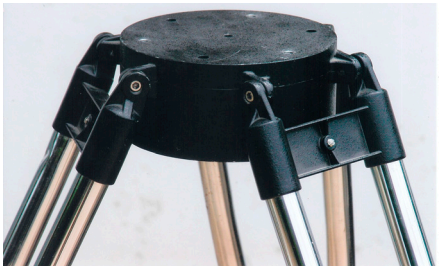


Figure 2

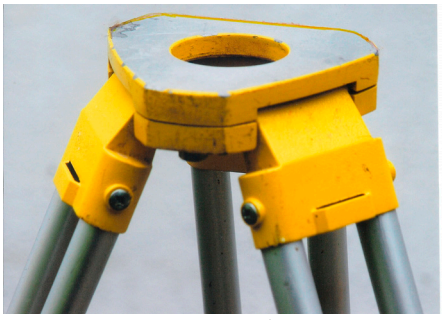


Figure 3

Une solution satisfaisante, la triangulation : un octaèdre comportant un petit triangle équilatéral ABC comme plateau supérieur, trois triangles isocèles ACD, ABE et BCF comme jambages, les autre triangles étant les intervalles entre les jambages et le large triangle de sustentation.
En pratique, on constate que ce montage reste efficace tant que la longueur AD ne dépasse pas 6 à 8 fois celle de AC.

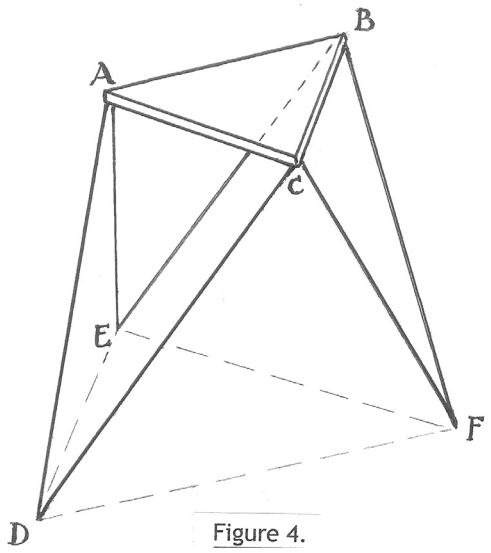


Figure 4.

Le plateau supérieur

Tracer soigneusement sur une feuille de bristol léger la forme de la figure 5 puis la découper avec précision.

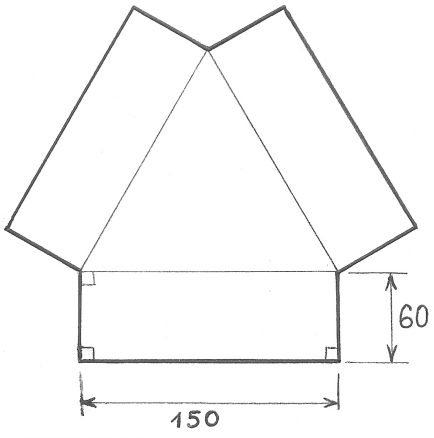


Figure 5 : trois rectangles identiques accolés à un triangle équilatéral.

Reporter ce gabarit, en le détourant, sur du contreplaqué de 15 mm d'épaisseur; pour un tripode, deux pièces sont nécessaires: elles seront dessinées (tête-bêche) dans un rectangle mesurant 220 x 491 mm :

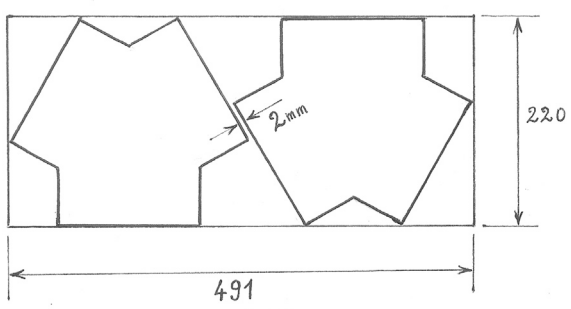


Figure 6.

Remarque: si l'on désire construire deux tripodes, les quatre pièces tiendront dans une planche de 220 x 960 mm, ce qui réduit le nombre de chutes de bois.

Le plateau supérieur de notre tripode comporte donc deux demi plateaux : les découper et les poser l'un sur l'autre en coïncidence puis les fixer dans cette position à l'aide de trois petits serre-joints placés dans les angles rentrants.

Poncer à plat les tranches de l'assemblage afin de parfaire la correspondance des faces externes; tracer au crayon une marque en « V» sur une tranche afin de retrouver, ultérieurement, la même position des deux pièces.

Reporter les neuf points cotés à la figure 7 sur le bois et percer des avant-trous au diamètre de 2 mm et sur 28 mm de profondeur (donc sans traverser l'assemblage, autant que possible).

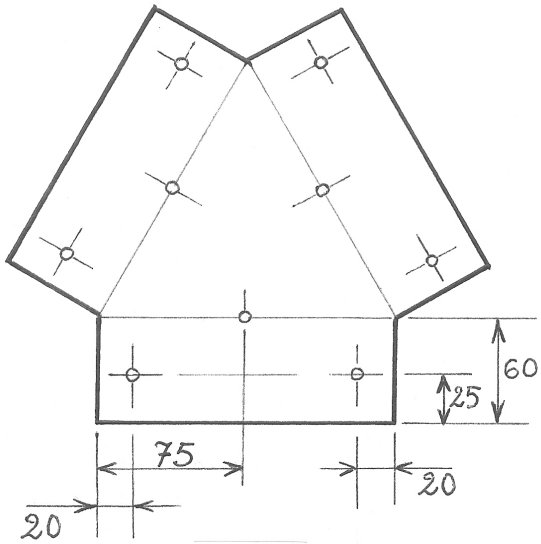


Figure 7.

Démonter les serre-joints, séparer les deux pièces et inscrire le mot « interne» sur les deux plans qui se touchaient ; agrandir au diamètre de 4 mm les trous du demi plateau supérieur (celui qui est percé de part en part).

Sur les faces internes de chaque demi plateau, creuser trois gorges rectilignes en suivant les cotes de la figure 8 :

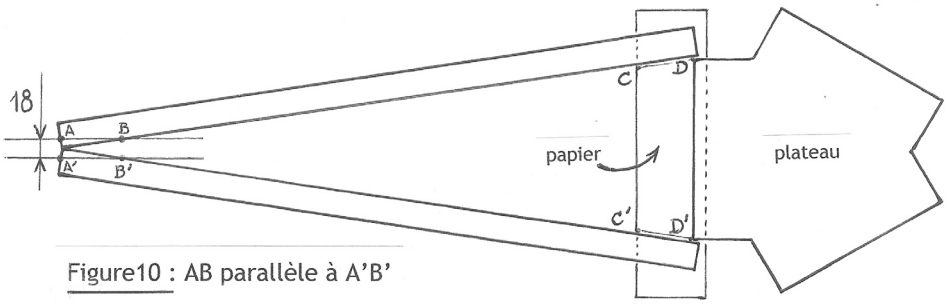


Figure10 : AB parallèle à A'B'

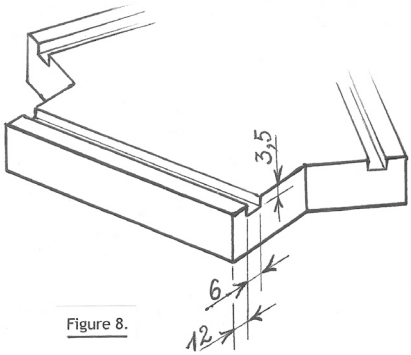


Figure 8.

Utiliser de préférence une toupie défonceuse pour la rapidité et la propreté du travail, sinon exécuter la tâche au ciseau à bois et au bédane (mais c'est alors bien plus pénible). En reposant les demi plateaux l'un contre l'autre (vérifier les repères), les gorges se correspondent et forment trois petits tunnels où passeront les tiges filetées de 220 mm de longueur et de diamètre 6 mm. Pour que celles-ci circulent sans frottement, abaisser les angles au papier de verre gros grain:

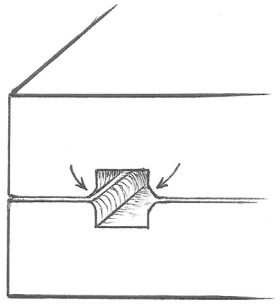


Figure 9

Évaser à la fraise conique la partie supérieure des trous de 4 mm (demi plateau supérieur) pour creuser un petit logement qui recevra les têtes fraisées des vis « de type agglo» de 4 x 25; enduire de colle à bois la face interne du demi- plateau, enfoncer trois vis bien distantes au travers du bois (les vis doivent passer sans difficulté puisque les trous ont 4 mm de diamètre) ; la pointe des vis sert à aligner parfaitement les deux plaques de bois l'une au dessus de l'autre grâce aux avant-trous de 2 du demi plateau inférieur; vérifier l'alignement du repère en « V » et visser à fond. Laisser le collage en attente.

Les jambages

Puisque le tripode doit supporter une petite lunette, il convient d'adopter une hauteur de jambage suffisante afin que l'oculaire de la lunette ne frôle pas le sol quand on vise assez haut dans le ciel. Nous adopterons ici une longueur de 1200 mm (c'est le maximum compte tenu de la cote de 150 mm du plateau); en choisissant une cote plus petite, la procédure expliquée ci-dessous ne change pas.

Les tasseaux peuvent avoir une section comprise entre 18 x 30 mm et 25 x 35 mm, à peu près; il en faut donc six qui seront assemblés deux à deux.

Sur une table plane, poser une feuille de papier à dessin mesurant 50 x 240 mm ; placer au dessus un plateau terminé et deux tasseaux comme indiqué sur la figure 10 ; pour les deux tracés qui suivent, il faut demander à un ami de maintenir fermement les deux tasseaux à leur place :

- Tracer les deux lignes AB et A'B' sur le bois; tracer les deux lignes CD et CD' sur le papier; enlever le papier, prolonger jusqu'au bords les droites puis couper en suivant ces deux traits: le papier devient un gabarit trapézoïdal.

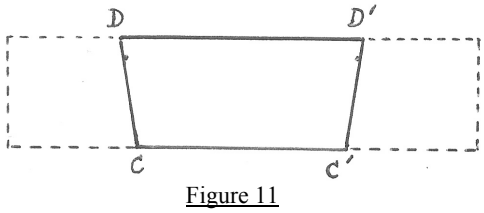


Figure 11

- Scier en biseau la base des tasseaux en suivant AB et A'B' ; poncer les longues arêtes des tasseaux, (mais pas les biseaux): les jambages seront plus doux quand on manipulera le tripode, au cours de

observations; placer le bas des deux pièces de bois l'une contre l'autre, percer de part en part au diamètre 5 mm et assembler à l'aide d'un boulon de longueur appropriée (50 ou 60 mm)et d'un écrou; refaire de même pour les deux autres jambages :

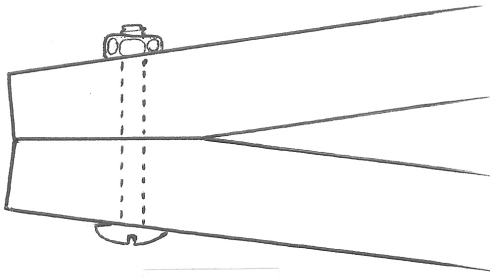


Figure 12.

Poser le gabarit de papier sur une tranche du plateau de telle sorte que les obliques du trapèze passent par D et E et tracer DF et EG (figure 13) :

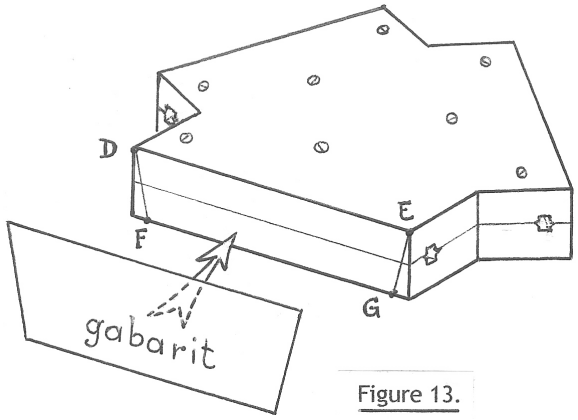


Figure 13.

Tracer sous le plateau les lignes FF' et GG' qui sont parallèles aux petits bords de 60 mm puis retirer à la scie les petits prismes de bois (comme EGJJ'G'E'), figure 14.
Recommencer de même sur toutes les tranches ; poncer toutes les arêtes.

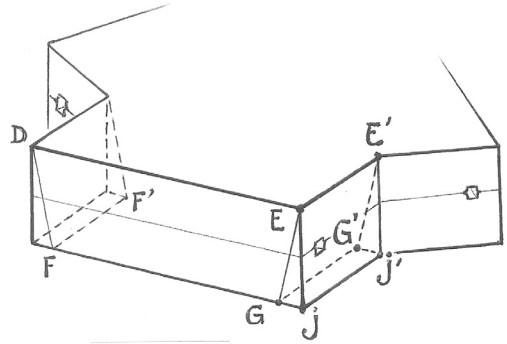


Figure 14.

L'assemblage

Maintenir le plateau (dans un étau) en position verticale, glisser une tige filetée dans le petit tunnel de 150 mm et poser le jambage sur la tige filetée afin de repérer puis de tracer les trous qui ne seront pas perpendiculaires au bois; percer au diamètre de 6,5 mm ; refaire les opérations sur les deux autres jambages (figure 15) :

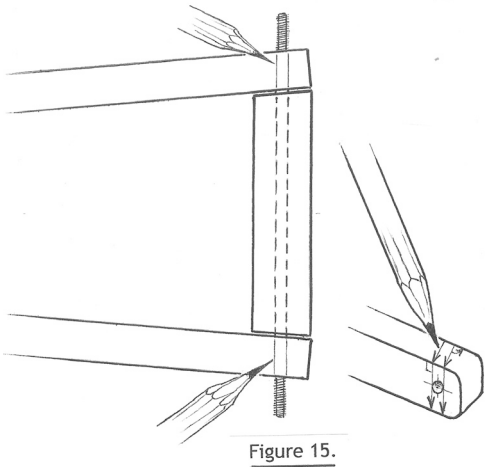


Figure 15.

Enlever la tige filetée, placer le haut du jambage pour que les trous et le tunnel soient alignés, replacer la tige et fixer le jambage au plateau en serrant les écrous papillons sans oublier les rondelles. Fixer de même les deux autres jambages.
Quand les jambages sont bien serrés en position quasi verticale, on constate que la procédure ci-dessus a deux buts : assurer un bon contact des tasseaux et du plateau; fournir un serrage de plus en plus efficace au fur et à mesure qu'on écarte les jambages pour une meilleure stabilité du tripode ; de plus, l'usage des tiges filetées garantit un serrage toujours solide même après de nombreux démontages éventuels.

Laisser les jambages fixés au plateau: il reste à placer deux petits raidisseurs par jambage, à un tiers et deux tiers de la hauteur; on les coupe dans le même bois que les tasseaux; leur repérage, tracé, découpe et fixation (colle à bois et vis ou, à la rigueur, colle et clous) ne posent aucun problème particulier.

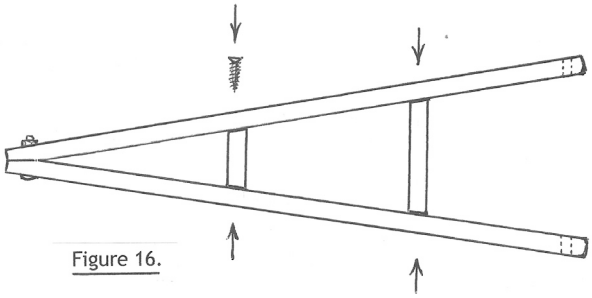


Figure 16.

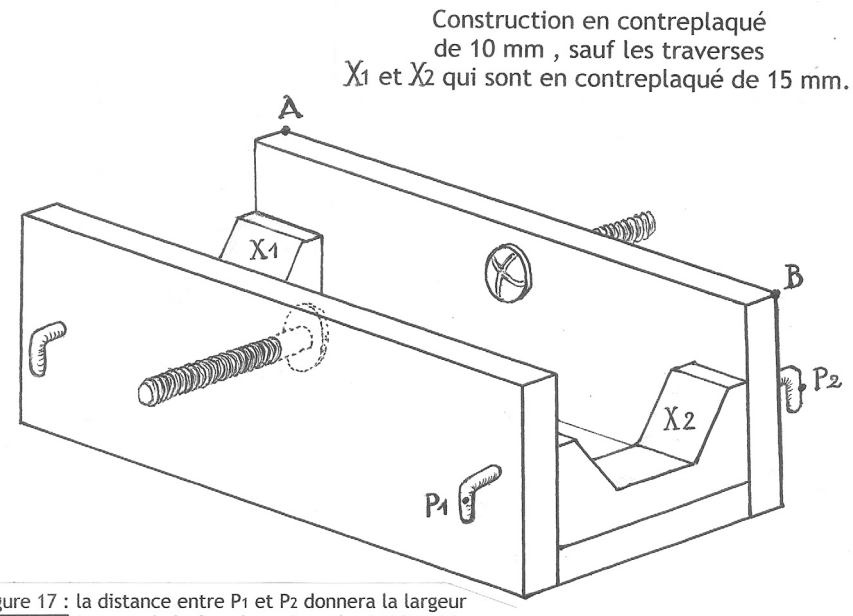


Figure 17 : la distance entre P1 et P2 donnera la largeur interne de la fourche qui vaudra P1P2 + 20 mm.

Le berceau

Pour cette pièce comme pour la suivante (la fourche), de nombreuses cotes dépendent du diamètre du tube de la lunette. Nous donnons donc, avant tout, des croquis de principe que chacun adaptera. (voir le croquis d'ensemble ci-dessus, figure 17).

Le tracé des deux pièces en « V » doit prendre en compte les données suivantes : AB → diamètre du tube de la lunette; l'angle CED → 70° environ (Fig. 18) ; FG = AB + 15 à 20 mm, mesure qui dépend des têtes de boulons de la fig. 19 ; GH = 10 mm environ ; e → espace de quelques mm qui évite à la lunette de toucher le berceau, en bas.

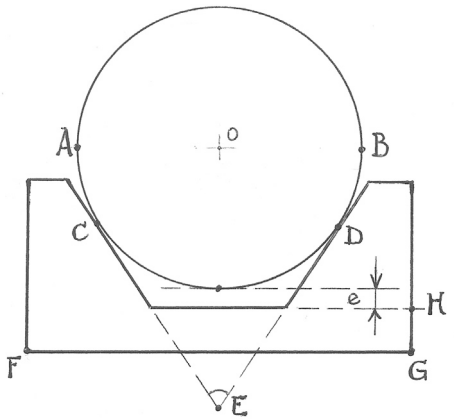


Figure 18 .

Les deux boulons 6 x 60 de type « charron» (à tête large et peu épaisse) seront bloqués avec un écrou et un contre-écrou. On interposera des rondelles de part et d'autre des joues de la fourche sur ces boulons avant de placer les écrous papillons, serrés très doucement afin de permettre, sans effet retour, les visées en hauteur.

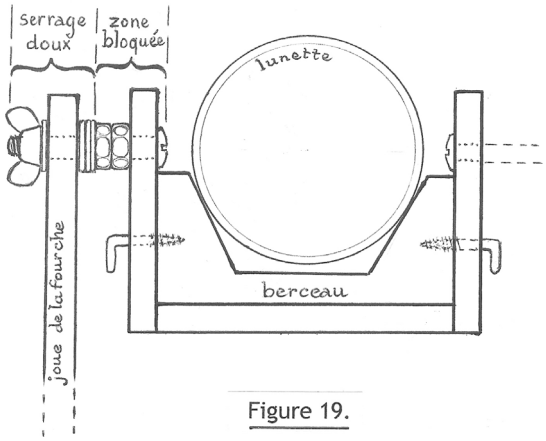


Figure 19.

La fixation de la lunette dans le berceau sera assurée par un procédé à base de tendeur élastique (vendu au mètre dans les magasins d'accessoires de sport) passant par quatre pitons ce qui permet d'équilibrer dans tous les cas la lunette dans le berceau :

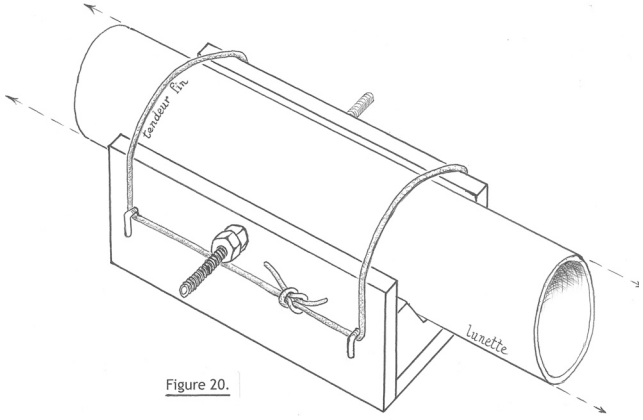


Figure 20.

La fourche

Elle est dessinée pour être supportée par le tripode et doit permettre de viser le zénith (et même un peu au-delà). Vue du principe:

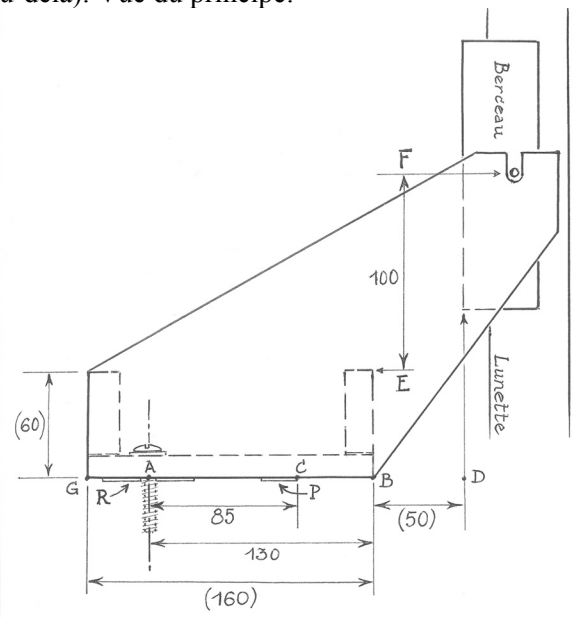


Figure 21.

La petite barre sur le côté et en bas de la fourche sert à faire tourner la lunette en azimut sans toucher à celle-ci.

Quelques repères: Compte tenu des dimensions du plateau du tripode, certaines mesures en dépendent :

AB doit mesurer 130 mm
GB " 160 mm
AC " 85 mm

Pour la question des hauteurs de visée et le dégagement de la lunette, on conseille:

BD doit mesurer 50 mm, au moins
EF " 100 mm, au moins.

La rondelle R et les patins P (de même épaisseur) peuvent être découpés dans des parois de bidons de plastique (du genre lessive liquide) ; ces pièces assurent un frottement doux au cours des rotations en azimut de la fourche.

La rondelle peut avoir 35 ou 40 mm de diamètre; les patins de 20 ou 30 mm de côté, fixés à droite et à gauche, sous la plaque inférieure de la fourche avec de la glue cyanoacrylate ou de petits clous dans les coins, ne doivent pas dépasser la cote AC = 85 mm pour toujours rester en contact avec le plateau au cours des rotations en azimut.

Le boulon de rotation aura au moins 60 mm de long et 8 mm de diamètre, son serrage très doux sera assuré, sous le plateau, par un écrou papillon avec une rondelle; le plateau est percé en son centre au diamètre 8,5 mm.

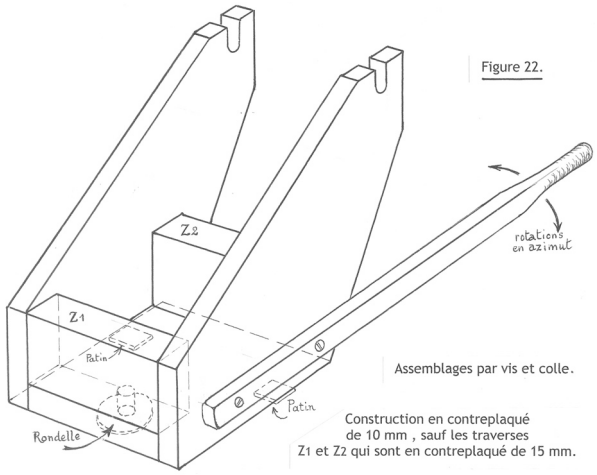


Figure 22.

En guise de conclusion provisoire

Tels qu'ils sont décrits, les éléments de ce montage peuvent être modifiés en fonction d'impératifs variés. Le tripode peut avoir une plus grande hauteur à condition de faire passer à 180 ou 200 mm la cote de 150 mm du plateau et de rajouter un raidisseur dans chaque jambage.

Aux cotes indiquées ici, le tripode a été réalisé en beaucoup exemplaires par les stagiaires de nombreuses écoles d'été du C.L.E.A. qui y ont posé sans problème, entre autres, des montures équatoriales photographiques.

Figure 23.

■

AVEC NOS ÉLÉVES

Animations en maternelle

Jacques Heulin
Association "Ciel d'Anjou"

Résumé *: Le hasard a voulu que, peu de temps après la mini-polémique sur l'astronomie en maternelle exposée dans les Cahiers Clairaut, notre association a été plusieurs fois sollicitée pour des observations.. ...en maternelle. Nous avons une longue expérience des interventions« Découverte de l'Univers» (en 2 h) pour des élèves de Collège, de Lycée ou des groupes d'adultes, par contre nous étions commençants pour des maternelles. Nous avons trouvé normal de vous faire part de nos réflexions de débutants.*

Première intervention

À Brain-sur-l'Authion, commune située à 12 km d'Angers, le jeudi 20 Mars 2008 (printemps).

- Premier groupe de 29 élèves de maternelle (de 9 h à 10 h 30 min)
- Deuxième groupe de 35 grands élèves de maternelle (de 10 h 30 min à 12 h) encadrés par quatre enseignantes.

Les deux groupes avaient déjà travaillé...le système solaire. L'animation a consisté en un échange oral, avec bâton de parole.

Q**ue pouvons-nous voir dans le ciel :** le jour la nuit... avec nos yeux.... avec des jumelles, des lunettes ou des télescopes ? Rappel des précautions...

- ne jamais regarder le Soleil,
- le Soleil est une étoile,
- différence entre étoiles et planètes.

L'astronomie et le calendrier (le jour, le mois, l'année) avec une maquette constituée de boules et en faisant réaliser par les enfants les mouvements de la Terre et de la Lune : l'enfant-Terre tourne sur lui-même, l'enfant-Lune tourne autour de la Terre... en la regardant toujours. Enfin l'enfant -Terre, en tournant sur lui-même, fait le tour du Soleil.

Ensuite, projection de petits films : Sur la Terre (7 minutes) puis sur la conquête spatiale avec la chienne Laïka et le singe américain et enfin, sur les planètes du Système Solaire.

Un planétaire mobile a été présenté également.

Synthèse des enseignantes Satisfaction générale... cependant quelques remarques :

1) alléger le film sur la Terre

2) éviter de parler des satellites des planètes

En ce qui nous concerne, nous avons été impressionnés par le travail déjà amorcé, la discipline des jeunes enfants, la motivation remarquable de l'équipe enseignante.

Deuxième intervention :

à Seiches-sur-le-Loir, commune à 20 km d'Angers:

- Premier groupe de 30 élèves de maternelle le mercredi 9 avril à 20 h 30 min, avec un parent par élève
- Deuxième groupe de 40 grands élèves de maternelle le jeudi 10 avril à 20 h 30 min, avec un parent par élève

Le premier soir la discipline laissait un peu à désirer, jusqu'à l'intervention de la Directrice. Le temps étant peu favorable, les télescopes n'avaient pas fait le déplacement.

Les enfants avaient travaillé sur les constellations, donc le film sur la Terre a été remplacé par une projection sur les constellations.

À 22 h, un faible croissant de Lune est apparu parmi les nuages : observation de la Lune par les enfants et les parents avec des jumelles de 12 X 80.

Le deuxième soir, un télescope de 250 mm était installé dans la cour de l'école, il a fait 1'objet d'une présentation de jour pendant 20 minutes, suivi d'un échange et d'une projection.

Un groupe a pu observer la Lune et Saturne avant la dégradation du ciel.

Meilleur résultat d'ensemble le 2ème soir, avec la présence de membres du bureau.

Synthèse : Nécessité d'un travail préalable pour les maternelles
L'animation sur le temps scolaire est plus cadrée, avec une meilleure discipline, une moindre fatigue pour les jeunes enfants ; inconvénient : pas d'observation.
L'animation en soirée permet un contact avec les parents, ce qui est apprécié par les enseignants. Pour les astronomes amateurs, cela permet de les sensibiliser à l'Univers et d'observer le ciel, à condition d'avoir des conditions favorables ; inconvénient : les enfants sont fatigués à partir de 21 h 30 min - 22 h

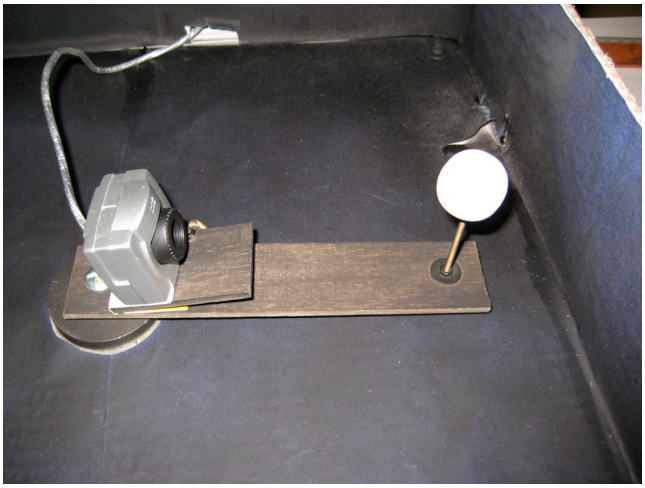
■

Visualisation des phases de la Lune

G. Paturel

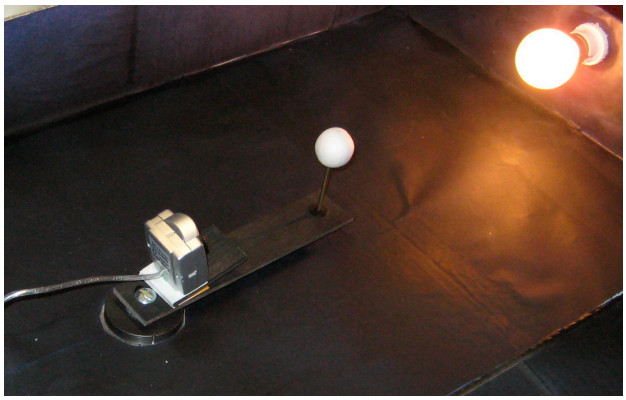
Résumé : *La maquette que nous présentons ci-dessous a été réalisée pour visualiser les phases de la Lune dans une école primaire, l'école des Marronniers de Saint-Quentin-Fallavier. Je vous présente d'abord la maquette. Je vous parlerai ensuite du fruit de cette expérience nouvelle pour moi.*

La difficulté que nous avons souvent est de montrer le point de vue de l'observateur qui occupe une certaine position par rapport à ce qu'il observe. J'ai donc imaginé d'utiliser une Webcam à très bas prix (10 euros) pour prendre la place de l'observateur. D'autres expériences seraient réalisables ainsi.

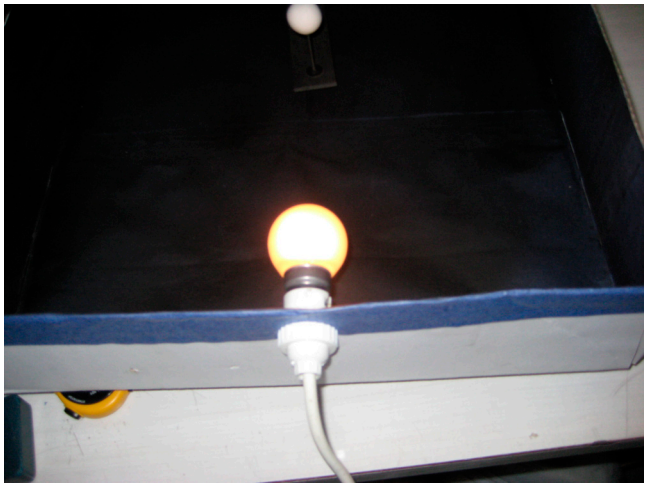


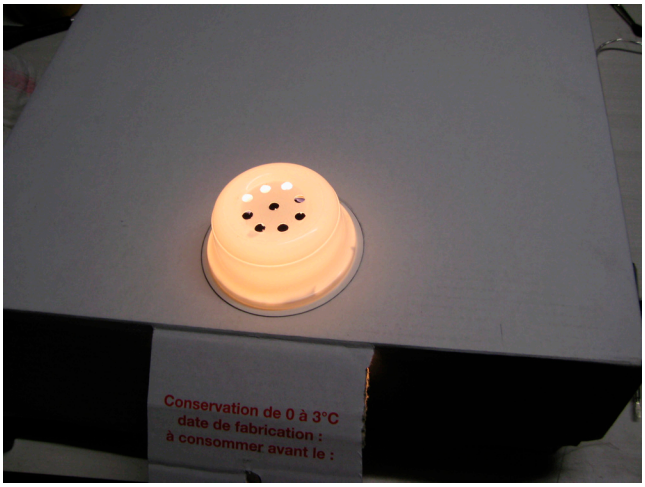
La Webcam sera l'observateur sur la Terre. Nous ferons tourner autour de lui une petite boule en pâte à modeler, qui représentera la Lune. Le système sera éclairé par une lampe, qui représentera le Soleil. Le tout sera enfermé dans une boîte dont l'intérieur sera peint en noir ; ce sera le firmament...

La présentation de l'appareil avec des photos vous en dira plus qu'un long discours. Tout a été construit avec du matériel de récupération (même la Webcam destinée à une autre expérience).



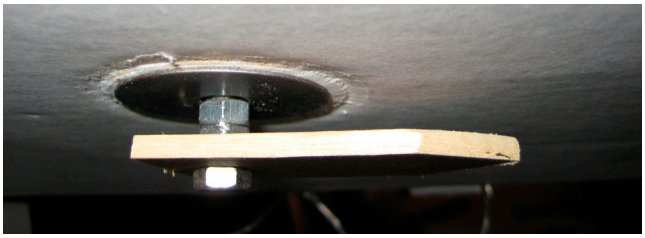
La lampe à photodiodes sur piles, a été remplacée par une lampe à incandescence (25W), plus lumineuse, avec son système d'aération (pot de fromage percé).

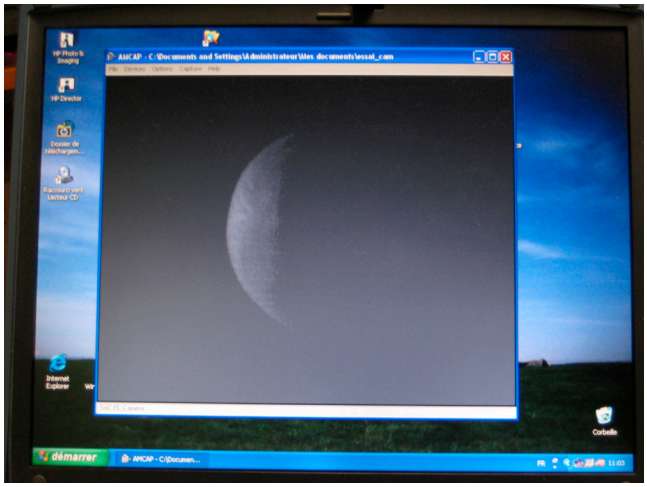


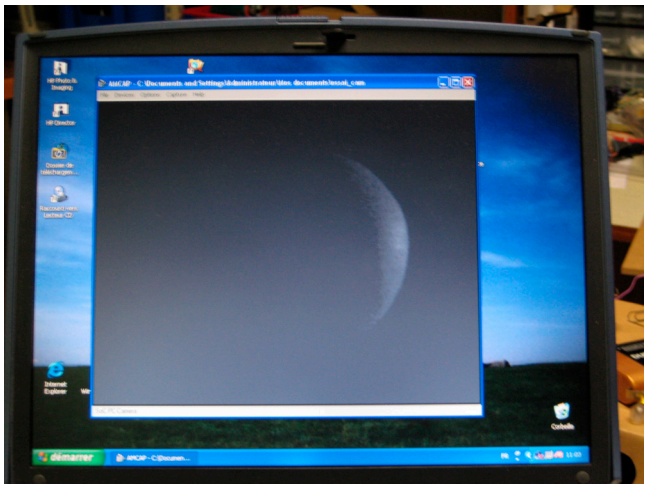


La boîte qui abrite le tout provient d'un traiteur qui nous avait livré des plats cuisinés (à tenir au frais et à consommer rapidement !)

La décoration de la boîte permet d'expliquer le fonctionnement. Ce n'est pas la partie la plus difficile à réaliser. La boîte est munie de quatre pieds pour que l'opérateur puisse manipuler la Lune par le dessous (photo ci-dessous). Il n'y a plus qu'à regarder les phases de la Lune.







On peut donc expliquer pourquoi la Lune n'a pas toujours le même aspect. Dans une certaine position la Webcam fait un peu d'ombre sur la Lune ; on explique les éclipses de Lune. Quand la Webcam voit le Soleil, il fait jour et on voit à peine la Lune.
On ne peut pas faire plusieurs tours, sinon le fil de la Webcam s'enroulerait autour de l'axe. Mais une lunaison suffit pour faire la démonstration (ensuite on repart dans l'autre sens).

En présentant cette maquette j'ai eu l'occasion de parler aux élèves des trois périodes fondamentales : le jour, le mois et l'année. Certains élèves n'avaient pas encore les idées bien claires sur le sujet. J'espère qu'ils auront retenu, au moins, ces trois valeurs et qu'ils sauront désormais que, finalement, l'aspect changeant de la Lune n'est pas si mystérieux que cela.

■

Le solarscope

Jean Gay
Astronome émérite à l'Observatoire de la Côte d'Azur

*En mémoire d'**André Danjon** qui avertit ses étudiants, afin qu'ils ne manquent pas le premier passage de Vénus du prochain millénaire.*

La jeunesse insouciante ressent les échéances astronomiques sans compter le temps qui passe. **André Danjon**, alors directeur de l'Observatoire de Paris et titulaire de la chaire d'astronomie à la Sorbonne[1], recommandait à ses élèves de ne pas manquer, dans cinquante ans, le passage de Vénus dont il nous explicitait la complexe récurrence…

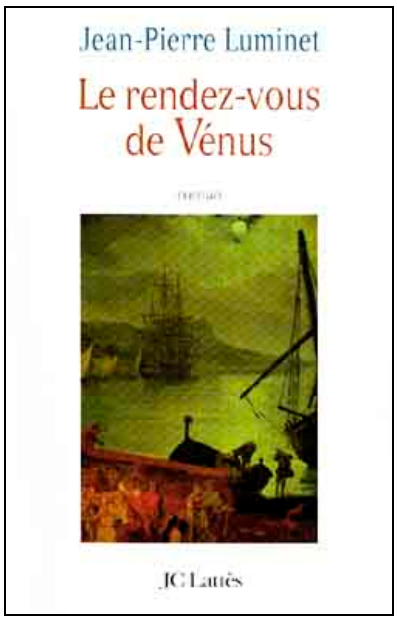


Figure 1-Frontispice du livre initiateur du Solarscope.

Un demi-siècle, ou presque, s'écoula et **Jean-Pierre Luminet** nous offrait son roman astronomique *« le rendez vous de Vénus »* (figure 1) dont j'eus vent par un heureux hasard dû à France Culture qui interviewait l'auteur alors que ma fille était à l'écoute…Voilà comment, en cadeau d'anniversaire j'eus droit à ce livre qui me remit en mémoire les recommandations d'un « maître vénéré » et si fermement directif qu'on l'appelait « Louis XIV », ce qui donne une idée de l'autorité des mandarins avant mai 1968.

La lecture de ce roman, historique à la façon dont Alexandre Dumas nous fit mordre à cette discipline, me confirma qu'il y avait une échéance à ne pas manquer…et que j'ai peut-être manquée, au moins en partie.

Conscient que l'événement serait suivi par tant d'observateurs, je recherchais comment leur assurer une contemplation sans risque du phénomène. L'aspect potentiellement médiatique du phénomène me fit prononcer in petto : « ça va faire un carton »…Carton, dites vous ? Voilà la solution ! J'avais visité au quartier latin un fabricant de chaises et autres bahuts en cartons ; pourquoi pas un instrument astronomique dans ce noble matériau, champion du recyclage ? Avec ma seconde fille, je découpai une structure miniature dans une boite de médicament dont l'efficacité fut ainsi prouvée, puis je calculai une combinaison optique assez ramassée, offrant une image solaire de taille acceptable sur un écran servant en même temps d'écran protecteur. Cette combinaison providentiellement performante venait après de vaines recherches sur un système, certes optiquement plus simple, mais d'un encombrement et d'un maniement si lourds que personne n'en aurait compris le fonctionnement.

Un stagiaire des A&M recruté au cours de l'été à l'Observatoire de la Côte d'Azur, réalisait un prototype en contreplaqué mince, puis en carton rigide, équipé des éléments optiques prévus : un achromat de 450 mm de focale et 40 mm de diamètre, suivi d'un miroir sphérique convexe de 10 mm de focale (figure 2), délivrant des images dont la qualité nous comblait de satisfaction (figure 3).

[1] qui suffisait alors à contenir, certes à grand peine, tous les étudiants de toutes disciplines, tant parisiens que des banlieues

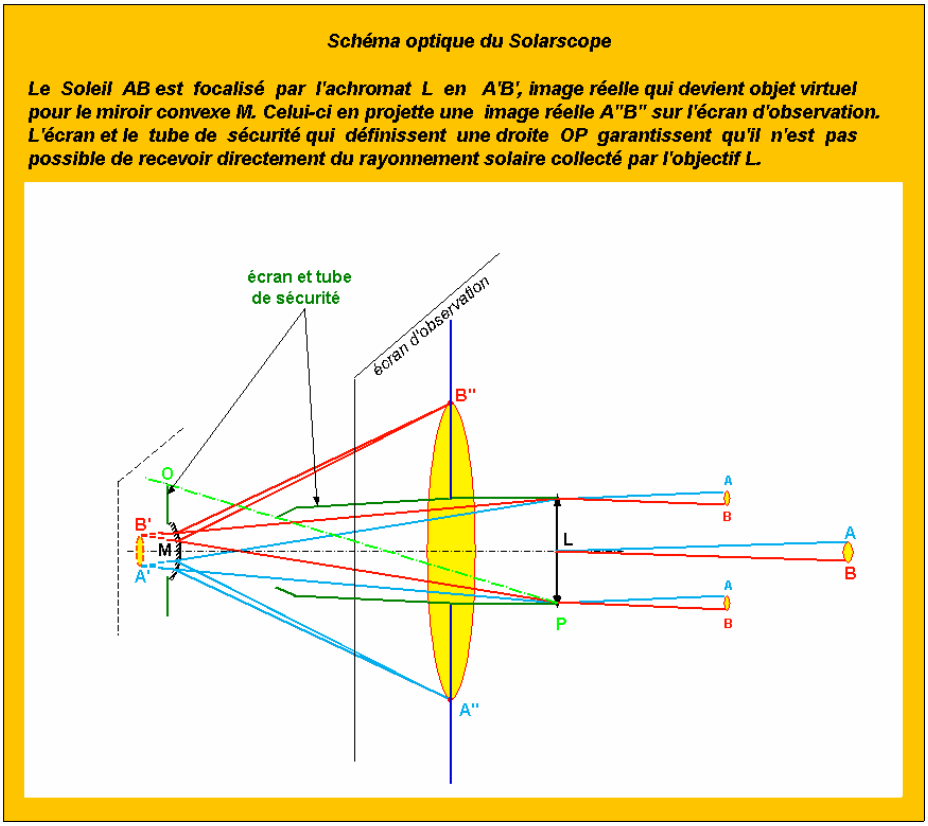


Figure 2 : Schéma optique du Solarscope et aspect extérieur (à droite) dans la version enjolivée.

Un calcul d'aberration ultérieur justifia cette impression, ce qui n'est pas à l'honneur du promoteur qui, une fois de plus, procéda à l'inverse de ce que recommandent les meilleurs praticiens.

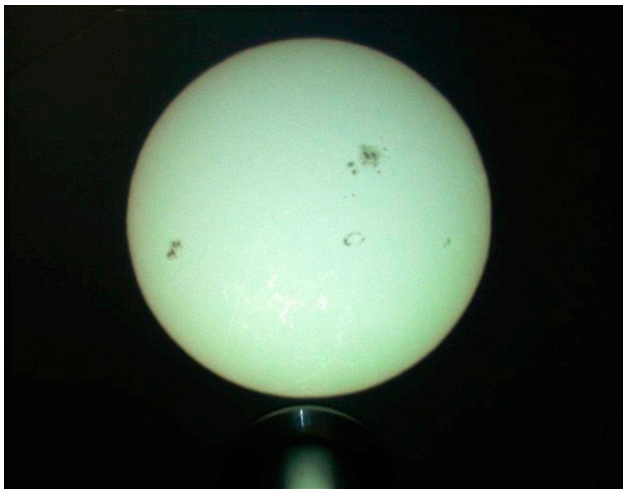


Figure 3-Image solaire délivrée par le Solarscope.

Il restait à en réaliser une version industrielle, car le nombre de clients potentiels était pour le moins astronomique : du Japon aux Açores, en passant par les steppes de l'Asie Centrale, les Indes, l'Orient mystérieux, les pays pétris de romanité et un crochet vers l'Afrique, j'en comptais pour le moins quatre milliards. Mon épouse, réaliste ou pessimiste m'assura « qu'ils n'achèteraient pas tous » ! Certes, la famille est un creuset sévère où l'on est rarement « prophète ». Mais c'est quand même en famille que l'idée d'instrument en carton eut sa primitive répercussion : un cousin cartonnier en Provence n'aurait-il pu soutenir de sa technologie avancée une invention si utile à l'Humanité ? Sollicité par l'astronome familial que chacun suspecte d'une médiocre compétence en affaire, il « botte en touche » en me donnant l'adresse d'un concurrent du Comté de Nice.

Un peu déçu par ce camouflet, j'expédie au directeur de l'entreprise recommandée un très alléchant message de sollicitation.

Dès le lendemain matin, Monsieur Massonet, directeur commercial, venait me retrouver à l'Observatoire de Nice pour me proposer une étude plus élaborée de ma boite en carton. Il m'entraîne vers l'usine SCAL, proche de l'Observatoire, et me présente Monsieur Serge Lemaire, génial maquettiste autodidacte de l'entreprise, qui en trois coups de cutter dans une planche de carton fait jaillir le profil de diablotin (figure 4) qui sera désormais celui de l'instrument. Tout était prévu : montage et démontage aisé par simple pliage, agencement autoporteur et rigidificateur. Il m'a révélé par la suite que cette réalisation avait été couronnée par un prix au sein du groupe dont faisait partie son entreprise.

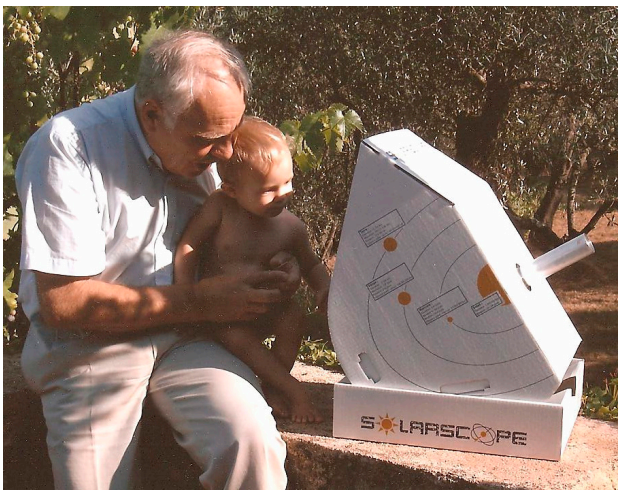


Figure 4-Le Solarscope en batterie ; où l'on surprend l'inventeur en flagrant délit d'initiation de son petit fils aux arcanes de l'astronomie dès l'âge le plus tendre

Mais un cartonnier ne fait pas plus d'optique qu'un opticien ne fait de carton. Une relation de mon fils aîné (encore la famille!) à Sup'Optique me propose d'exploiter le brevet, que j'avais déposé initialement pour une protection limitée à la France, en l'étendant à l'Europe et quelques pays susceptibles d'en copier le principe. Le CNRS venait de me refuser ce soutien au motif qu'un système en carton ne représentait pas une technologie prestigieuse et d'avant-garde ! C'est cet opticien[2] qui invente le nom de marque Solarscope et permet ainsi d'en élargir l'utilisation au delà du seul passage de Vénus.

Produire, c'est bien, mais il faut distribuer. Par quels canaux ? Le directeur opticien me demande si, comme astronome stipendié par l'Education Nationale, je n'aurais pas la possibilité de proposer le Solarscope aux écoles primaires, collèges et lycées du pays. Mes compétences en « lobbying » ne me permettaient pas de dépasser les limites du rectorat de Nice, et encore, à grand peine malgré l'aide de bienveillants et dévoués collègues.

Or, le Rectorat, c'est un peu limité pour un instrument conçu pour estimer la distance au Soleil par confrontation des observations en différents points du globe. J'imaginais une opération du type « si tous les gars du monde » voulaient bien échanger leurs mesures, on réaliserait une initiation à la coopération, ce que je résumais par l'aphorisme « seul, j'observe un phénomène rare, si j'échange, je mesure l'Univers ! » (figure 5). C'est au cours d'une promenade en vélo dans Paris que, passant devant les prestigieux bâtiments de l'UNESCO, j'imaginais vaniteusement que c'était l'institution idéale pour exploiter cette idée de coopération. J'abrège ici le récit des vaines démarches que j'entreprenais : Il eut fallu m'y prendre juste après l'admonestation d'André Danjon pour avoir quelque chance que la proposition soit examinée dans des délais suffisants : l'UNESCO, par son étendue, ne peut programmer des opérations à moins de dix ans d'avance….Mais j'y ai rencontré des gens charmants !

Figure 5-Image du passage de vénus du 8 juin 2004 avec un Solarscope par les élèves de l'école Buhler (Académie d'Orléans-Tours)

Afin de promouvoir l'idée exprimée dans l'aphorisme, je tentais de créer un comité de soutien dans lequel s'engageaient quelques personnalités aussi réputées que courageuses. Quand, déçu par les délais de l'UNESCO, je les remerciai, l'un d'eux me demanda sournoisement si, comme astrophysicien je savais ce qu'était un trou noir ? De ce qu'on y introduit, rien ne ressort me dit-il ; c'est le cas de l'UNESCO et de l'Education Nationale prétendait-il. Ah ! que non, mon bon monsieur, de l'Education Nationale il me ressort au moins mon salaire ! Vous n'y entendez rien « jeune homme » (de 63 ans alors), vous êtes vous même dans le trou noir.

C'est ainsi que le Solarscope, comme j'en étais prévenu par une clairvoyante épouse, ne put être distribué aux milliards de clients putatifs du Vieux Monde. Seul le bouche à oreille en permit une discrète diffusion « sous le manteau », car les officines de distribution contactées par l'industrieux opticien ne firent aucun zèle pour se ravitailler en Solarscopes.

Voilà comment fut manqué le « rendez vous de Vénus », du moins le premier, car la récurrence,

[2] Yan Cornil, directeur de Light Tec Optical Instruments - Espace Alexandra, 359 rue St Joseph, 83400 Hyères, **sales@solarscope.com**, site web : solarscope.org

plus que séculaire, les fait survenir par couples décalés de 8 ans. Il reste donc le passage, nocturne, du 5-6 juin 2012 (figure 6) dont on ne verra de France métropolitaine que la fin au petit matin d'un mercredi de fièvre électorale, mais dont tous les poissons du Pacifique pourront contempler la totalité du déroulement ; s'y joindront les hawaïens et nos compatriotes de Polynésie et de Nouvelle Calédonie. Qui affrètera un cargo chargé de Solarscopes pour ces contrées lointaines ?

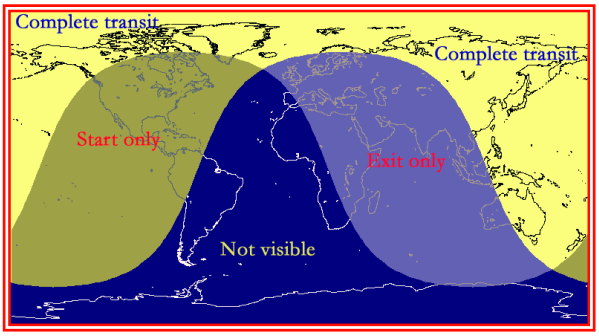


Figure 6-Visibilité du passage de vénus le 5-6 juin 2012 : rendez vous en Nouvelle Calédonie

Mais l'industrieux opticien avait bien compris que le passage de Vénus n'était pas la seule circonstance où pouvait être exploité le Solarscope. Le nom qu'il avait proposé en assurait un usage élargi (un « vénuscope » diffusé par un industriel d'Alsace était une copie autorisée du Solarscope qui n'a de pertinence que deux fois tous les 128 ans). En coopération avec un professeur de Physique de Hyères, il rédigeait un « mode d'emploi » de l'instrument afin de montrer tout le bénéfice pédagogique qu'on en pouvait tirer pour une initiation diurne à l'astronomie dans le cadre scolaire. A l'occasion de quelques éclipses de Soleil, il semble que l'usage de cet outil se répande lentement de-ci de-là dans la nébuleuse Education Nationale, ce qui m'assurera une fortune, posthume probablement, au tarif de 50 centimes par Solarscope au delà du quinze millième vendu. Alors, mon sens des affaires sera enfin reconnu par tous les détracteurs de mes compétences en « affaires » !

Histoire lamentable d'un inventeur incompris ? Non, pas vraiment. On prend tant de plaisir rien qu'à « inventer », mais aussi une certaine « vanité d'auteur » quand, partant observer l'éclipse de 2006 en Turquie, je rencontrai dans l'avion des touristes équipés de Solarscopes. Tel Léopold Mozart parlant du jeune Wolfgang, j'avouai « j'en suis le père ». Ô vanité, que d'âneries on profère en ton nom !

En dehors des éclipses et passages de Vénus ou de Mercure[3], la surveillance des taches solaires constitue une des distractions favorites des utilisateurs du Solarscope (figure 7). Hélas, depuis quelques années le minimum de l'activité solaire ne permet d'observer qu'un disque aussi uniformément chauve qu'un crâne d'astronome (du moins tel que l'imagine un vain peuple). On dit, « dans les milieux bien informés » chers à feu Coluche, que le cycle 24 est commencé depuis janvier 2007, mais l'apparition des taches accuse un retard de plus de six mois qui fait craindre que le Soleil ne nous joue le mauvais tour connu sous le nom de « minimum de Maunder » qui aurait pu expliquer le petit âge glaciaire. Tant mieux pour le réchauffement planétaire qui serait remis à plus tard, et tant pis pour le Solarscope !

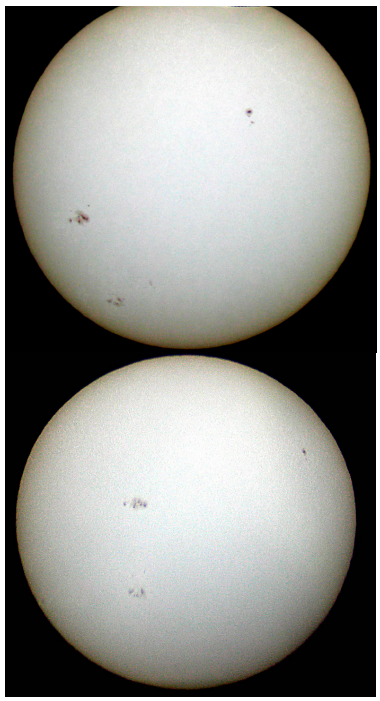


Figure 7-: on voyait en 2003 de nombreuses taches dont le suivi jour après jour par un groupe d'élèves illustrait la rotation du Soleil. Images des taches solaires du 21 et 23 novembre 2003 photographiées par J.J. Cordier (http://cordier2.free.fr) professeur à Auxerre, sur l'écran d'un Solarscope et retraitées pour corriger la distorsion. La rotation du Soleil est bien visible entre ces deux images (avec l'autorisation de l'auteur)

Mais les destinataires de cette longue histoire souhaiteront peut-être connaître les caractéristiques du Solarscope, ne serait-ce que pour en comprendre le fonctionnement ou l'intérêt et en vérifier la sécurité.

[3] 9 mai 2016 après midi, 11 novembre 2019 après midi, 13 novembre 2032 à l'aube, 7 novembre 2039 à l'aube, 7 mai 2049 après midi….

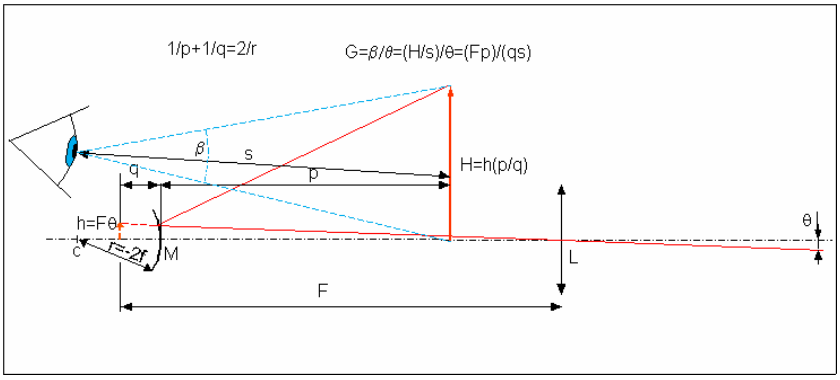


Figure 8-Eléments optiques du Solarscope et expression du grossissement. Tous les paramètres du problème sont exprimés par leur valeur absolue.

La combinaison optique fera utilement l'objet de quelques problèmes en lycée dans les classes où est enseignée l'optique géométrique (figure 8). On s'y gargarisera sans frein de « un sur p plus un sur p prime égale un sur f » (gare aux signes !), mais aussi, dès que la diffraction sera introduite, on examinera la pertinence d'un objectif de 40 mm de diamètre rapporté à l'observation d'une image solaire de 11 à 12 cm de diamètre. Pour les fous furieux du calcul d'aberrations, on évaluera l'astigmatisme qui affecte l'image hors d'axe pour s'apercevoir que la combinaison résiste bien à ce défaut.

La structure en carton qui forme une monture altazimutale est composée d'une embase en V (à lester les jours de mistral) et d'un berceau à joues circulaires qui assure l'orientation en hauteur et supporte l'objectif à l'extrémité d'un tube dont l'ombre portée assure une visée suffisamment précise pour acquérir à coup sûr l'image solaire. Il faut disposer d'une table (non vendue avec l'appareil, car toutes les bonnes familles en possèdent) pour supporter le système et procéder à l'orientation azimutale. Mais ce qui est le plus remarquable, c'est qu'il n'y a aucune possibilité de recevoir directement dans l'œil de rayonnement solaire (figure 2), donc aucun risque d'accident, contrairement à ce que prétendaient des contempteurs peu avertis. Les figures jointes rendent compte de ces divers aspects.

Comme il y a trois modèles de Solarscopes, dérivés du modèle initial jugé encombrant dans un intérieur bourgeois (mais si décoratif avec de petits nœuds artistiques sur les cornes du diablotin), j'en donne ci dessous les caractéristiques (tableau 1)

Pour finir avec un projet d'avenir : rendez vous en 2009 en Chine centrale pour observer la belle éclipse totale de Soleil du 22 juillet avec un Solarscope qui permettra d'en suivre toute la progression (figure 9).

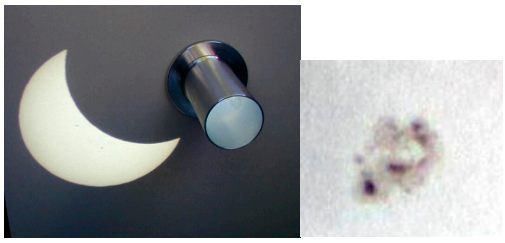


Figure 9- Image de l'éclipse partielle du 3 octobre 2005 observée à Hyères (à gauche) et un détail de taches solaires (à droite), comme on n'en voit plus, observées au Solarscope.

Une monture équatoriale pour le Solarscope- Philippe Merlin a eu l'idée d'adjoindre au Solarscope une monture équatoriale.

Il n'y a plus alors qu'une seule rotation à effectuer pour suivre le déplacement du Soleil.

■

Modèle	Objectif : focale et diamètre utile		focale du miroir secondaire	distance du miroir à l'écran	diamètre de l'image solaire
Grand (en bois) ou Moyen	450mm	38mm	-11,5mm	310mm	117mm
Petit	355mm	38mm	-8,5mm	210mm	85mm

Convergence : lentille interférométrique de Soret

G. Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé : *Nous allons expliquer et montrer qu'il est possible de former une lentille convergente, certes un peu spéciale, avec une sorte de réseau circulaire, le réseau de Soret. Nous l'avions présenté brièvement dans le premier article de cette série, nous allons l'expliquer plus en détail.*

Analyse du problème

Nous allons étudier la propagation d'une onde lumineuse monochromatique allant d'un point source A à un point B.

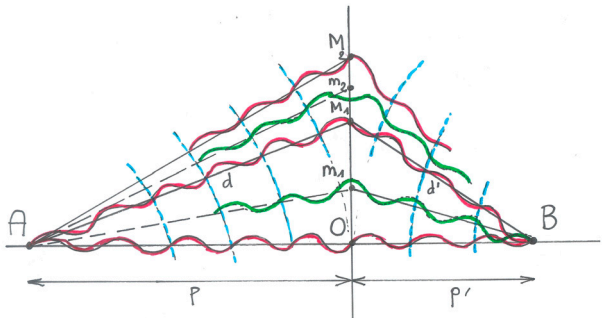
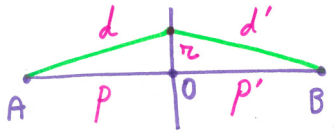


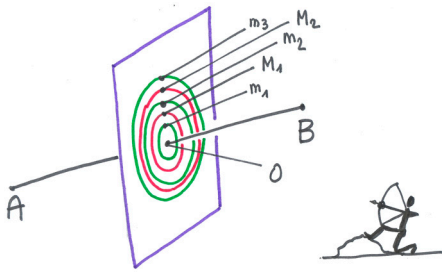
Figure 1 : *L'onde monochromatique émise par la source ponctuelle A se propage vers B en passant par un plan intermédiaire virtuel. Les rayons lumineux* ***en phase*** *avec le rayon central sont en rouge. Ceux en* ***opposition de phase*** *sont en vert.*

S'il n'y a pas d'écran entre les deux points, l'onde émise par la source lumineuse monochromatique ponctuelle A atteint le point B, où qu'il soit sur l'axe optique qui supporte AB. On peut considérer pourtant que l'onde passe par un **plan virtuel**, perpendiculaire, en O, à AB. Chaque élément de cette surface virtuelle se comporte comme une source réémettant dans toutes les directions ce qu'elle a reçu. C'est le principe de Huygens. En raison de la symétrie axiale autour de AB, nous pouvons considérer que les éléments de cette surface virtuelle sont des couronnes centrées sur l'axe optique. La lumière qui arrive en B est le résultat de la combinaison de toutes les ondes réémises par toutes les couronnes virtuelles.

En suivant les idées d'Augustin Fresnel, choisissons les rayons des cercles qui limitent les couronnes de telle façon que le trajet des rayons lumineux augmente de $\lambda/2$ quand on passe d'une couronne à la suivante. Les zones ainsi découpées s'appellent les zones de Fresnel, évidemment. Notons que les couronnes ont une certaine largeur. Le passage de l'une à l'autre se fait par un déphasage continu. Cependant, à un point d'une zone, on peut faire correspondre un point de la zone suivante, tel que le déphasage soit une demie longueur d'onde. Bref, les couronnes délimitées par les cercles ainsi tracés laissent globalement passer des vibrations décalées de $\lambda/2$ les unes par rapport aux autres.



Quand un rayon lumineux parcourt un trajet $d+d'$ qui diffère du trajet direct AB=$p+p'$ par un nombre **pair** de demi-longueur d'onde, la vibration est en phase avec celle passant directement par O. Les deux vibrations se renforcent mutuellement en B. En revanche quand la différence des trajets est un nombre **impair** de demi-longueur d'onde, le rayon est en opposition de phase avec le rayon direct. Les deux vibrations s'annulent en B.



Rayons des zones de Fresnel

Nous allons calculer les rayons des cercles qui limitent les zones de Fresnel. Clarifions tout d'abord la numérotation. Une zone de Fresnel est une couronne limitée par deux cercles concentriques. Mais, pour la première zone, le cercle intérieur a un rayon nul. Cette première zone est donc un disque.

Nous numéroterons les zones par n. Le rayon du cercle qui définira une zone sera celui du cercle le plus grand des deux. Ainsi, la première zone $n = 1$, aura un cercle externe de rayon r_1. La deuxième zone sera une couronne de rayon externe r_2 et de rayon interne r_1, etc.

Le théorème de Pythagore nous dit que :

$p^2 + r_n^2 = d_n^2$ et $p'^2 + r_n^2 = d'^2_n$,

où r_n est le rayon de la zone numéro n. De sorte que la distance $d_n + d'_n$ s'écrit :

$$d_n + d_n^{'} = \sqrt{p^2(1 + r_n^2/p^2)} + \sqrt{p'^2(1 + r_n^2/p'^2)}\,.$$

Nous pouvons approximer cette expression en considérant que r_n est petit devant p et p'.

$$d_n + d_n^{'} = p(1 + r_n^2/2p^2) + p'(1 + r_n^2/2p'^2)\,,$$

soit :

$$d_n + d_n^{'} = p + p' + \frac{r_n^2}{2}\left(\frac{1}{p} + \frac{1}{p'}\right) \qquad (1)$$

Écrivons maintenant que le déphasage entre une zone et la zone centrale est un multiple de $\lambda/2$:

$$(d_n + d_n^{'}) - (p + p') = n\frac{\lambda}{2} \qquad (2)$$

En combinant les équations (1) et (2) ci-dessus, on aboutit à la relation suivante :

$$\frac{n\lambda}{r_n^2} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \qquad (3)$$

Pour les deux points A et B, séparés par la distance $p+p'$, les rayons limitant les différentes zones dans un plan à la distance p de la source, doivent croître comme la racine carré des entiers :

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda}{\frac{1}{p} + \frac{1}{p'}}} \propto \sqrt{n}$$

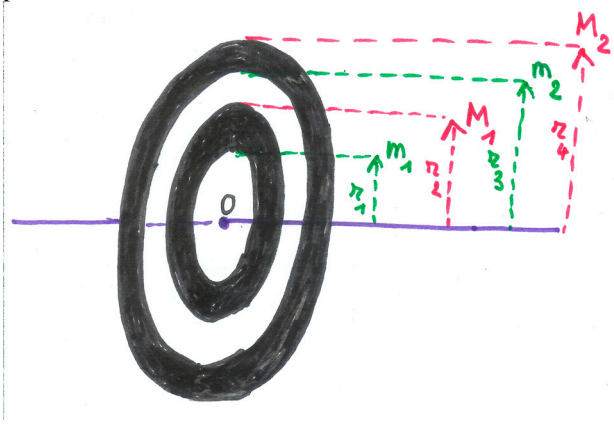
Exemple : Si nous prenons p=2m, p' =2m, λ=0,5µm, on trouve les rayons suivants :

n	1	2	3	4	...	10
r_n (mm)	0,71	1,00	1,22	1,41	...	2,23

On devrait s'attendre à ce que l'émission d'une couronne annule l'émission de la couronne précédente, puisqu'à tout point d'une couronne on peut faire correspondre un point de la couronne suivante, tel que la différence de trajet soit une demi-longueur d'onde.

En réalité deux couronnes consécutives ne se détruiront pas exactement car la transmission de la vibration de la couronne plus externe se fait sous des angles plus grands, ce qui réduit l'amplitude de la vibration en direction de B[1]. On peut considérer aussi que cette couronne externe est partiellement annulée par une autre couronne plus externe, elle-même annulée par une couronne plus externe, etc. Au final la lumière en B résulte de la combinaison de toutes les ondes résiduelles. Dans le calcul formel, l'onde transmise de A à B est donnée par une somme convergente de termes positifs et négatifs qui se compensent progressivement.

À ce niveau d'analyse, on a vraiment l'impression d'avoir enfoncé des portes ouvertes pour dire que la lumière passe de A à B. Comment faire pour former une image de la source A, en un point B et seulement en B ?



Principe du réseau de Soret

Nous avons vu qu'au point B l'émission de chaque zone de Fresnel détruisait presque l'émission de la zone précédente par interférence. L'idée simple est donc de noircir une couronne sur deux, par exemple les couronnes paires (ou les couronnes impaires). Le phénomène de destruction mutuelle ne se produira plus et la lumière sera renforcée au point B, un point où les ondes de toutes les couronnes transparentes arrivent en phase. Ce type de réseau, avec des couronnes alternativement claires et sombres, s'appelle un réseau de Soret.

Équation d'un réseau de Soret

Imaginons que nous ayons un réseau de Soret dont le rayon externe de la "couronne" centrale est R. Toutes les couronnes impaires suivantes, n=3, 5, 7, etc., laissent passer les vibrations qui arrivent en

[1] On pourrait penser aussi que la surface d'une couronne plus externe est plus réduite, en réalité cette variation est très faible et intervient peu.

phase en B pour des valeurs données de p, p' et λ. (voir l'exemple du calcul des rayons des zones de Fresnel).

Écrivons alors l'équation (3) des zones de Fresnel impaires (n est numéroté à partir de 1, pour la zone de Fresnel centrale).

$$\frac{(2n-1)\lambda}{r_{2n-1}^2} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \qquad (4)$$

Si l'un des rayons r_{2n-1} coïncide avec un des rayons des cercles des couronnes transparentes de notre réseau (calculé pour p, p' et λ), alors, toutes les vibrations passant à travers ces zones impaires transparentes arriveront en phase au point B, situé à la distance $p+p'$ de la source.

Le cas le plus simple est $r_1 = R$. Dans ce cas notre réseau de Soret découpe exactement les zones de Fresnel impaires. La lumière issue de A converge en B, situé à la distance $p+ p'$.

Je peux aussi considérer le cas où $r_3 = R$. La "couronne" centrale de mon réseau couvrira alors trois zones de Fresnel consécutives '1,2,3'. La couronne suivante (noire) du réseau couvrira les zones de Fresnel '4,5,6', la couronne suivante (transparente) couvrira les zones '7,8,9', etc.. Comme, les vibrations des zones de Fresnel consécutives : 2,3 - 8,9 -14,15 -etc. s'autodétruisent (nous ne parlons pas des zones 4,5,6 - 10,11,12 - etc.. qui sont arrêtées par les couronnes noires du réseau), seules convergent en B les vibrations : 1, 7, 13, etc.. L'image est moins lumineuse que dans le cas précédent.

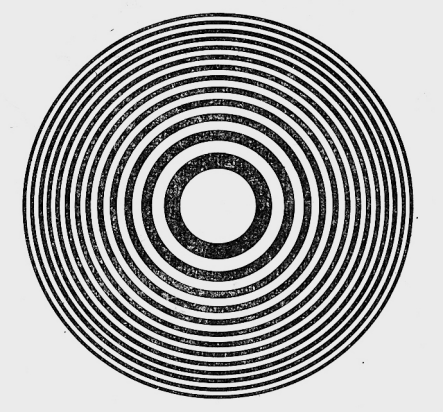


Photo : G. Bruhat, Optique, éd. Masson, 1965

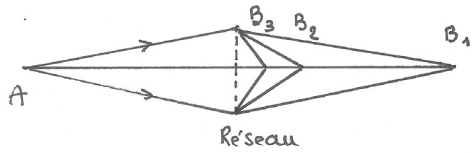
Bref, d'une manière générale, dans l'équation 4, nous pouvons faire coïncider les rayons des cercles de l'une quelconque des zones impaires de Fresnel avec le rayon R de la première couronne de notre réseau. L'équation (4) s'écrit alors :

$$\frac{(2n-1)\lambda}{R^2} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \qquad (5)$$

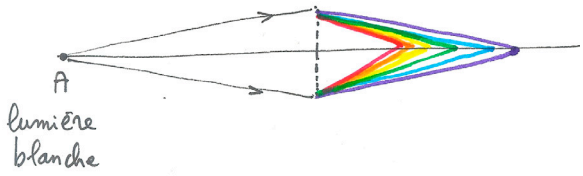
Cette équation s'identifie à l'équation classique des lentilles (la fameuse relation $1/p+1/p'=1/f$, comme le dit Jean Gay dans son article sur le Solarscope p. 14). On trouve donc que la distance focale de notre réseau de Soret est :

$$f = \frac{R^2}{(2n-1)\lambda} \qquad (6)$$

Le réseau se comporte comme une lentille ayant plusieurs valeurs de la distance focale pour n = 1, 2, 3, etc. Pour notre exemple, on trouve les distances focales suivantes : 1m, 0,33m, 0,20m, etc. L'intensité lumineuse aux foyers successifs décroît rapidement.



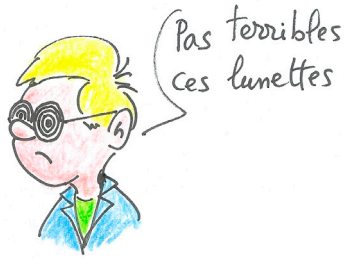
Une autre caractéristique des lentilles interférométriques est leur fort chromatisme. Plus la longueur d'onde est grande, plus la distance focale est courte. Cela se voit aisément sur la relation (6). Dans notre exemple le premier foyer (n = 1) passe de 1,25m pour le bleu (λ = 0,4µm) à 0,71m pour le rouge (λ = 0,7µm).



Encore un délire

Nous avions terminé nos articles précédents de cette série par des délires de jeune astronome. Nous poursuivons encore dans la même veine.

J'avais imaginé de fabriquer un spectro avec un réseau de Soret. Le détecteur n'avait qu'à se déplacer le long de l'axe optique pour enregistrer les spectres de tous les objets du champ. Ce n'était pas une très bonne idée. Pas meilleure l'idée de se fabriquer des lunettes avec de telles lentilles...



■

DOSSIER SPECTRO

La spectrographie

Paul Felenbok, Observatoire de Paris, Associé LESIA

Résumé : *La spectrographie est utilisée dans de nombreux domaines allant du laboratoire de physique à la métallurgie. Cet article est essentiellement consacré à son utilisation en astronomie.*
La spectrographie étudie la composition de la lumière, rayonnement électromagnétique qui se propage dans le vide et qui peut, par conséquent, nous apporter des informations provenant de sources extrêmement lointaines et donc, très anciennes. De ce fait, la spectrographie est un des outils majeurs de l'astronomie, sa capacité à mesurer l'état physique de la matière, est une des principales sources de nos connaissances du cosmos. Tous les instruments cités sont indexés sur Internet et peuvent être consultés pour une connaissance plus approfondie.

Introduction

La spectrographie a longtemps été utilisée pour étudier la composition de la lumière, qui est associée à la partie du spectre électromagnétique que l'on voit. Cette partie, le visible, est un tout petit domaine du spectre qui s'étend des rayons gamma aux ondes radio. En fait, cette division des domaines de rayonnement est principalement liée aux instruments qui dispersent le rayonnement et aux détecteurs qui sont capables de les analyser.

Ainsi, le visible, est le domaine du spectre que l'on voit, mais cela dépend de l'âge et de l'ethnie de l'observateur. Cette notion, qui est liée à la capacité de l'œil à percevoir les longueurs d'onde, du violet au rouge, est également le domaine de la photographie.

On peut dire qu'un « œil moyen » voit de 400nm à 700nm, soit de la raie du calcium ionisé, CaII à 393 nm jusqu'à la raie de l'hydrogène Hα à 656 nm. Cette définition allait assez bien avec la photographie argentique qui couvrait le domaine visible, sans traitements spéciaux. Des plaques photo, sans gélatine, sensibles dans l'ultraviolet lointain, notamment dans le domaine de la spectrographie sous vide, sont apparues plus tard. Dans l'infrarouge, par contre, aller au-delà de 1µm n'a pas été possible sans des artifices qui dégradent trop les performances. L'arrivée des détecteurs électroniques, comme les CCD (*Charge Coupled Devices*), a modifié tout cela.

Le domaine de longueur d'onde visible au sol, cadre assez bien avec toutes ces contraintes. Au niveau de la mer, l'atmosphère est transparente entre 350 nm et disons 850 nm. À 4200m d'altitude, par exemple au sommet du Mauna Kea, à Hawaï, on peut observer l'ultraviolet, jusqu'à 300nm. Dans l'infrarouge, il y a différentes fenêtres atmosphériques accessibles en altitude, mais ces observations, qui se faisaient en ballon, se font actuellement, comme pour l'ultraviolet et l'infrarouge lointains, avec des satellites.

La spectrographie s'effectue également dans le domaine des rayons X du côté des courtes longueurs d'onde ainsi qu'en radio astronomie, du côté des grandes longueurs d'onde. Ce sont les instruments, basés sur des techniques adaptées pour chaque longueur d'onde, qui conduisent à diviser le spectre électromagnétique en différents domaines.
Pour restreindre le développement de cet article, je vais me limiter au domaine visible étendu aux fenêtres atmosphériques de l'infrarouge proche.

Que peut nous apprendre la spectrographie ?

Elle nous permet une connaissance de l'état physique de la matière qui émet le rayonnement ou de la matière qui se trouve sur le chemin d'un rayonnement provenant d'une source plus lointaine, dont elle modifie l'aspect.

1- Température

Émission

Tout corps chauffé émet un rayonnement continu dont l'intensité en fonction de la longueur d'onde dépend de la température. C'est le rayonnement, dit de corps noir, qui ne dépend pas de la composition de l'émetteur et dont l'énergie rayonnée suit la Loi de Planck.

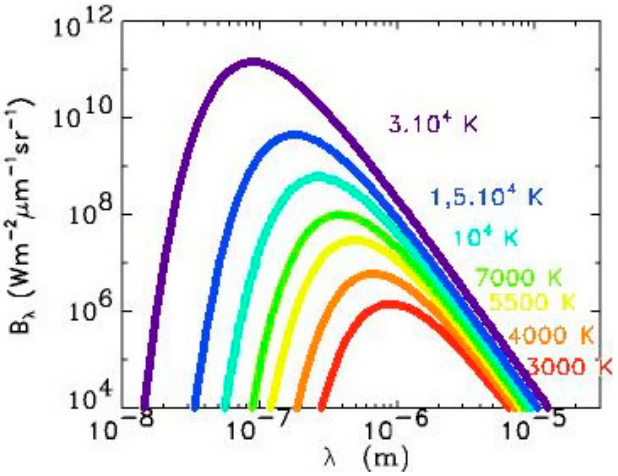


Figure 1 : *Réseau de courbes de Planck de rayonnement du corps noir, pour différentes températures absolues. Le Soleil, dont la température de surface est de 5770 °K, rayonne le maximum de son énergie dans le jaune, à 0,5 μm.*

C'est cette propriété de rayonnement, qui a permis d'établir la classification stellaire, allant des étoiles O, les plus chaudes, aux étoiles M, les plus froides.

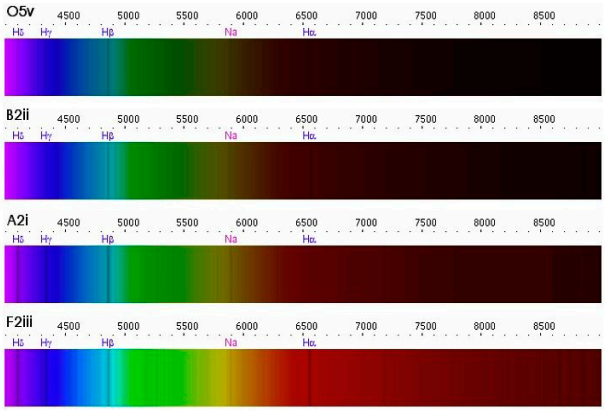


Figure 2 : *Spectres stellaires allant d'étoiles de type P, à 50 000 °K, aux étoiles F, à 6500 °K. On constate, pour l'étoile chaude, la présence de raies d'hélium ionisé et pour l'étoile froide, l'apparition de raies de métaux ionisés, FeII, CrII.*

Spectre atomique et moléculaire, indicateur de la température

Superposées au rayonnement de corps noir, les raies atomiques ou moléculaires des corps présents dans l'émetteur sont un indicateur de la température de certaines régions des étoiles. Ainsi, pour le Soleil, les protubérances émettent la raie Hα qui nécessite une température du milieu de l'ordre de 10 000°K. Pour la couronne solaire, qui émet la raie verte de Fe XIV, c'est une température de plusieurs millions de degrés qui est nécessaire pour que treize électrons puissent êtres arrachés à l'atome du fer.

Absorption

Lorsqu'un corps froid est placé entre l'observateur et une source d'émission chaude, le corps froid absorbe dans le spectre d'émission, des raies qui sont spécifiques de sa composition. C'est ainsi que le rayonnement de corps noir de l'émetteur présente des raies noires qui correspondent aux radiations que le corps froid a pu prélever dans le continu et qui sont une signature de la matière absorbante. Cette situation est typique des nuages froids de matière interstellaire. Un nuage interstellaire devant l'étoile ς Persei, présente, en absorption, dans le spectre de celle-ci, les raies atomiques de Na, K, et les raies moléculaires de CN, OH, etc. C'est à partir de l'intensité relative des raies d'un même élément, intensité qui est fonction de la température du milieu, que l'on déduit la température du nuage interstellaire, qui est typiquement de quelques dizaines de °K.

2- Composition

Tout corps est composé d'atomes et de molécules, qui ont tous une *signature* propre, une sorte de "code barre", qui est leur carte d'identité.

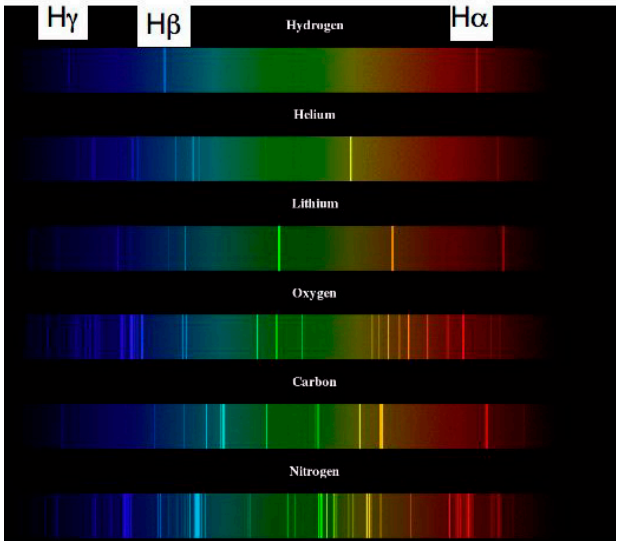


Figure 3 : *Spectres de raies d'émission de différents éléments. On part de l'élément le plus simple, l'hydrogène, ayant un spectre peu peuplé. Le nombre de raies croît avec le numéro atomique, car le nombre de transitions autorisées croît dans le même sens*

Chaque atome possède des électrons qui se meuvent sur des orbites spécifiques. Lorsqu'un électron périphérique change d'orbite, une raie apparaît en émission, si l'électron a perdu de l'énergie, et la même raie est vue en absorption, s'il a capté de l'énergie. La longueur d'onde de la raie observée correspond à ce saut d'énergie, qui est quantifié. On a affaire à une transition électronique.

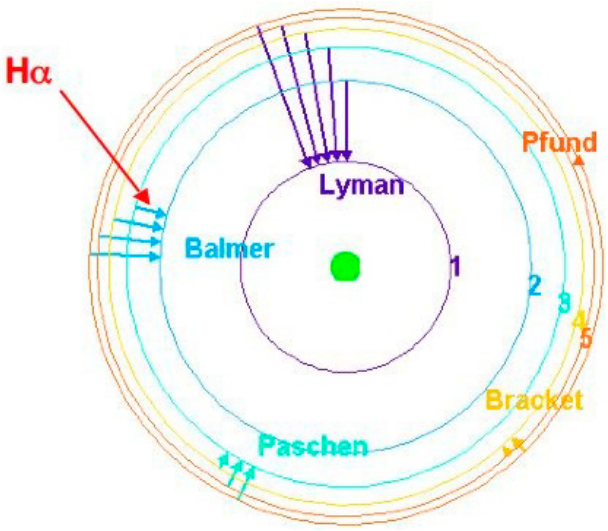


Figure 4 : *Schéma de l'atome d'hydrogène selon Bohr. On reconnaît (en bleu) la série de Balmer, qui rayonne principalement dans le visible et dont fait partie la raie Hα à 656,3 nm, située dans la partie rouge du spectre.*

Dans le cas des molécules, le processus est semblable mais compliqué du fait de l'interaction des atomes, introduisant une énergie de vibration et de rotation entre les noyaux atomiques et créant, de ce fait, un plus grand nombre de transitions électroniques possibles. D'où le remplacement du spectre de raies par un spectre de bandes de vibration, elles-mêmes composées de raies de rotation.

3- Champ magnétique

Certains atomes, soumis à un champ magnétique, ont leurs niveaux d'énergie qui se divisent en sous-niveaux, qui donnent naissance à de nouvelles transitions. C'est l'effet Zeeman

Cet effet est représenté schématiquement pour une transition simplifiée (singlet), pour laquelle seul le niveau d'énergie supérieur est divisé en trois sous- niveaux, sous l'effet du champ magnétique.

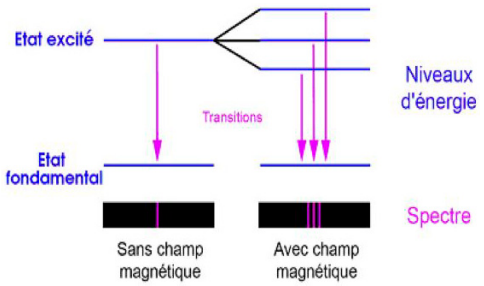


Figure 5 : *Illustration schématique de l'Effet Zeeman. Il s'agit de la transition entre deux niveaux d'énergie simples. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué, le niveau d'énergie supérieur se divise en trois sous-niveaux et le niveau inférieur reste simple, d'où la naissance de trois raies d'émission.*

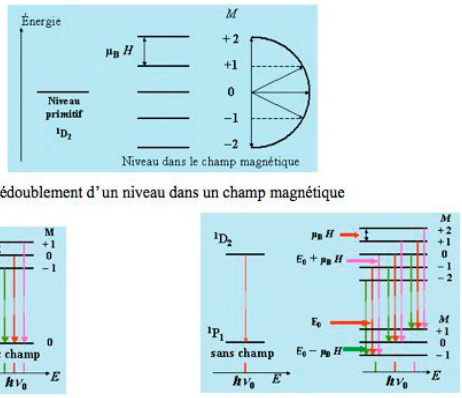


Figure 6 : *Effet Zeeman appliqué aux cas réels de l'atome d'Hélium (à gauche) et de Cadmium (à droite).*

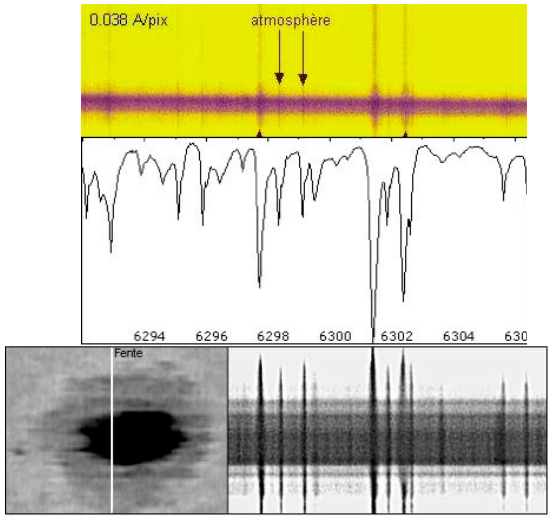


Figure 7 : *Spectre solaire à haute résolution. Les raies atmosphériques se caractérisent par leur finesse. La fente du spectrographe coupe une tache solaire et sa pénombre. Les raies sont plus ou moins divisées par effet Zeeman. Mais la séparation étant insuffisante les raies apparaissent simplement élargies*

L'écartement en longueur d'onde des raies séparées par effet Zeeman est faible et nécessite des instruments à haute résolution spectrale et, par conséquent, beaucoup de photons. C'est l'apanage des spectrographes solaires. À titre d'exemple, la raie du singlet CaI, à 422.7nm, donne des triplets séparés de $\Delta\lambda = 0{,}017\text{nm} / \text{Tesla}$.

4- Vitesse

Lorsqu'un corps en mouvement émet une onde de fréquence ν, elle est perçue à la fréquence $\nu + \Delta\nu$ quand l'émetteur se rapproche de l'observateur et à la fréquence $\nu - \Delta\nu$, quand il s'éloigne de l'observateur ; c'est l'effet Doppler. Autrement dit, quand un corps s'approche de nous, son rayonnement se déplace vers le bleu et quand une galaxie, par exemple, s'éloigne de nous, son rayonnement se déplace vers le rouge.

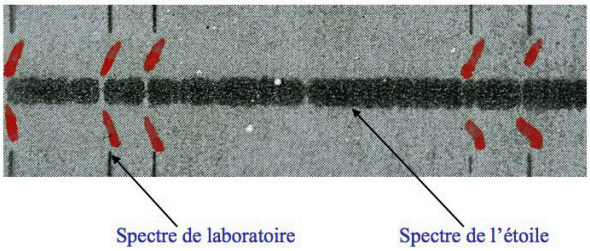


Figure 8 : *Effet Doppler. Déplacement vers le bleu des raies spectrales d'un objet s'approchant de nous.*

De nombreuses découvertes fondamentales de l'astronomie s'appuient sur la mesure de vitesse v par effet Doppler, donné par l'équation $\Delta\lambda/\lambda = v/c = z$, indiquant que le décalage spectral z est proportionnel à la vitesse de l'émetteur. Lorsque la vitesse de fuite des galaxies s'approche de la vitesse de la lumière c, la relation relativiste doit être employée:

$$1+z=\sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}}$$

L'observation de l'effet Doppler permet de mettre en évidence, en temps réel, la rotation du Soleil, dont un bord s'approche de nous alors que l'autre s'en éloigne.

L'effet Doppler nous indique que les galaxies s'éloignent de nous (leur spectre se déplace vers le rouge - c'est le "*redshift z*") d'autant plus vite qu'elles sont lointaines. C'est la Loi de Hubble :
$V = H_o.d$, V étant la vitesse de fuite, d la distance de la galaxie et H_o la constante de Hubble.

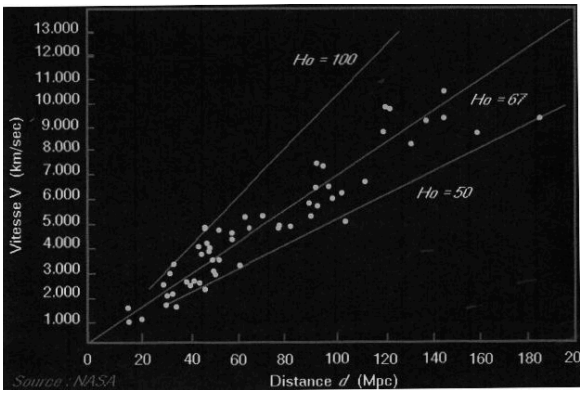


Figure 9 : *Loi de Hubble. Cette loi relie d'une façon simple la vitesse V (en km/s) d'un objet à sa distance d (en Mpc) : $V=H_o.d$. Dans ce diagramme récent, H_o vaut 70 (km/s)/Mpc, ce qui conduit à un temps de Hubble $t=1/H_o \approx 13$ milliards d'années.*

La constante de Hubble, selon les différentes méthodes de détermination, conduit à H_o = 71±3.5 (km/s)/Mpc, valeur généralement admise (Mpc veut dire mégaparsec. Un Mpc vaut 3×10^{22} mètres). Ceci donne un temps de Hubble, ou temps radiatif de 13,8 milliards d'années. Ce temps est dit radiatif, car il correspond à l'époque à laquelle l'Univers est devenu rayonnant et dont la trace est l'actuel Fond Diffus Cosmologique à 2,73°K. Ceci conduisant à un âge de l'Univers de l'ordre de 14 milliards d'années

5- Les planètes extrasolaires

La découverte des planètes extrasolaires est à porter complètement au crédit de la spectrographie à haute résolution, qui a permis la détection d'objets d'une masse comparable à celle de Jupiter. Pour réussir à détecter des objets d'une masse comparable à celle de la Terre, il a fallu avoir recours à des spectrographes d'une très grande stabilité en longueur d'onde et d'une résolution spectrale supérieure à $R = \lambda/\Delta\lambda = 100\ 000$, c'est à dire une capacité à résoudre la 10^5ème partie du spectre étudié **(HARPS à l'ESO).**

Lorsque l'on observe une étoile qui a un compagnon tournant autour d'elle, le centre de masse de l'étoile se déplace au cours de ce mouvement, car chaque membre tourne autour du centre de masse commun. La spectroscopie permet de mesurer les vitesses le long de la ligne de visée. Le spectre de l'étoile a son maximum de déplacement vers le bleu quand le compagnon s'éloigne de l'observateur et son maximum de déplacement vers le rouge, quand le compagnon s'approche de l'observateur. Ce déplacement est d'autant plus important que la masse du compagnon est grande. Ainsi, Jupiter déplace le Soleil avec une vitesse maximale de 13m/s et la Terre, seulement de 1m/s. Comme $\Delta\lambda/\lambda = v/c$ et comme la résolution spectrale est $R = \lambda/\Delta\lambda$, on voit que R = 23 000 est nécessaire pour détecter une planète générant v = 13m/s et R = 300 000 pour v = 1m/s. A cette difficulté, il faut ajouter qu'avec une haute résolution spectrale, le signal de l'étoile va chuter, et partant, le signal/bruit.

Ceci explique, en partie, pourquoi on a découvert beaucoup de "Jupiter" et aucune "Terre". Les observations les plus récentes ont mis en évidence des planètes extrasolaires de la taille de dix Terres.

Pour augmenter la détectivité, on va chercher à agrandir le domaine spectral observable par enregistrement, car l'accroissement du nombre de raies observables, qui subissent toutes le déplacement Doppler, va améliorer, par corrélation, la précision des mesures. C'est le spectrographe à dispersion croisée, ou spectrographe "échelle", qui permet d'atteindre cette performance, surtout,

depuis l'apparition des détecteurs bidimensionnels, comme les CCD.

L'instrumentation

Il est impossible, dans le cadre de cet article, de décrire tous les types de spectrographes qui ont été utilisés en astronomie, cependant il est nécessaire de les évoquer pour tracer leur évolution. Tout d'abord, vient **le prisme objectif**. Il consistait à placer un prisme devant l'objectif d'une lunette, et chaque étoile du champ formait au foyer de la lunette un petit spectre provenant de la lumière dispersée par le prisme. Cette méthode a conduit à la classification stellaire. Cet instrument, extrêmement lumineux, car possédant peu d'éléments optiques, était limité d'une part par la taille des prismes disponibles, et d'autre part par la luminosité du ciel qui se superposait à celle des étoiles, ainsi qu'au chevauchement des spectres dans des amas stellaires denses. Pour contourner toutes ces difficultés, on a déplacé l'élément disperseur à la sortie du télescope, en lui adaptant un spectrographe.

Un spectrographe est, schématiquement, un instrument afocal dans lequel on a placé un élément dispersif entre le collimateur et l'objectif de chambre.

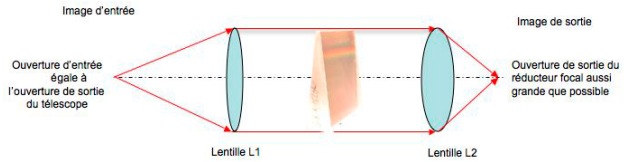


Figure10 : *Un réducteur focal reste en ligne avec l'élément dispersif quand celui-ci est un Grism.*

Lorsque l'élément disperseur est un prisme ou un réseau par transmission, les faisceaux d'entrée et de sortie ne sont pas en ligne. Ceci peut être gênant pour la spectrographie multi-objets. Dans ce cas, on préfère utiliser comme élément disperseur un grism (*grating on prisme*), c'est-à-dire un réseau gravé, ou déposé, sur un prisme.

Figure 11 : *Photo d'un grism (Richardson Grating Labs) constitué d'un réseau par transmission de 150 traits/mmr et d'un prisme de 11° d'angle au sommet.*

Cette méthode permet de remettre le faisceau d'entrée et de sortie en ligne. Le spectrographe à grism est généralisé sur les télescopes de la classe de 10m.

1- Spectrographie "mono-objet"

Spectrographe à prisme

Le spectrographe à prisme est très lumineux, car composé uniquement d'éléments par transmission. Sa résolution est donnée par :

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = B\frac{dn}{d\lambda}.$$

Elle croît comme la base B du prisme et comme la variation de l'indice *n* du verre avec la longueur d'onde.

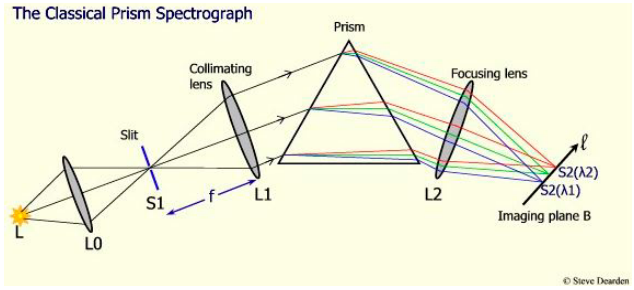


Figure 12 : *Schéma classique d'un spectrographe à prisme. Le faisceau issu de la source entre dans le spectrographe avec la même ouverture que celle du collimateur L1. Ce spectrographe n'est pas en ligne comme celui utilisant un grism. Le plan du spectre est incliné par rapport à l'axe optique de l'objectif de chambre L2.*

L'indice des verres varie plus vite avec la longueur d'onde dans le violet que dans le rouge. Dans le violet, on doit utiliser du quartz et dans l'UV de la fluorine, pour son excellente transparence, mais leurs dimensions sont limitées. Cette caractéristique des verres engendre une grande variation de la dispersion en longueur d'onde. La résolution, qui dépend de B, croît avec la taille des prismes ou avec le nombre de prismes en cascade et cela devient rapidement prohibitif.

Spectrographe à réseau

Les spectrographes à réseau de diffraction sont principalement utilisés en réflexion, notamment pour éviter que le faisceau optique ne pénètre dans le verre dont le moindre défaut pourrait complètement perturber la figure de diffraction de l'onde transmise. Les spectrographes à réseau utilisent généralement des collimateurs à miroir concave, souvent des paraboles, qui sont excellentes

sur l'axe. Les objectifs de chambre, souvent à plusieurs trains de verres, donnent un champ étendu indispensable pour un spectre de bonne couverture spectrale et une grande ouverture donnant accès à une courte focale. Ainsi, l'image de la fente du spectrographe, qui doit pouvoir collecter le flux d'une étoile sous un angle d'une seconde d'arc, est réduite pour concentrer la lumière sur une plus petite surface de détection et augmenter le signal, ainsi que le champ spectral.

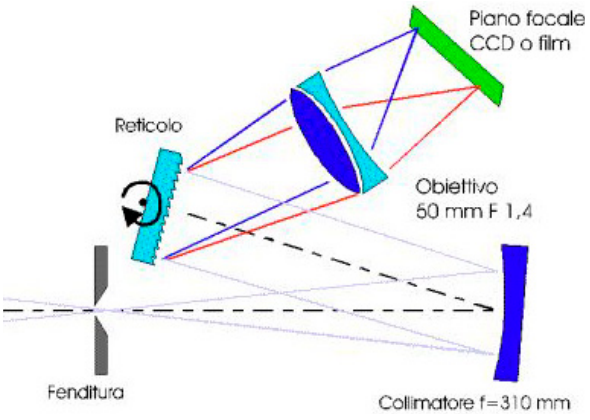


Figure 13 : *Schéma d'un spectrographe à réseau plan. Son collimateur est un miroir concave sphérique ou parabolique, et le réseau est plan, par réflexion. L'objectif de chambre est dessiné comme un doublet achromatique. Il est plus probable qu'il s'agit d'un objectif photo de 50 mm de focale, ouvert à f/1,4. Ce dispositif est le plus simple et le moins coûteux. On constate que l'image de la fente dans le plan focal est réduite d'un facteur 6, dans le rapport des distances focales du collimateur et de l'objectif de chambre.*

En astronomie, on utilise, en général, des réseaux "échelle", dont les traits présentent un profil en marche d'escalier (échelle de meunier), de telle sorte que la lumière diffractée soit concentrée dans une direction donnée, ce qui augmente considérablement le rendement lumineux. Dans ce cas, l'angle de diffraction s'appelle l'angle de "blaze", ou en français, angle de miroitement.
L'équation des réseaux, dans l'air, est :

$$\sin i + \sin i' = nk\lambda$$

où i est l'angle d'incidence, i' est l'angle de réfraction, n est le nombre de traits par µm, k est un nombre entier qui désigne l'ordre et λ est la longueur d'onde en µm. n et λ sont exprimés à partir des mêmes unités de longueur, le produit $n\lambda$ est donc un nombre sans dimension. En dérivant l'équation précédente, on obtient :

$$\cos i'\, di' = n\, k\, d\lambda$$

Si le réseau est utilisé en montage Littrow, c'est-à-dire que le faisceau aller et le faisceau retour sont alignés, l'efficacité lumineuse est maximale et $i' = i$. Les deux équations précédentes donnent :

$$2\frac{\tan i}{di} = \frac{\lambda}{d\lambda} = R$$

R est la résolution du spectrographe. On voit donc, qu'en première approximation, la résolution d'un spectrographe à réseau, ne dépend que de l'angle de blaze. C'est pourquoi, en haute résolution, on cherche à augmenter l'angle de blaze. Les réseaux échelle sont identifiés par leur tangente de blaze, soit :
R1 pour tg 45°, R2 pour tg 63°27', R4 pour tg 76°.
Ceci est fondamental et prouve que la résolution ne dépend pas du nombre de traits, comme on l'entend quelques fois. Mais les choses ne sont pas aussi simples, car si l'on veut enregistrer le spectre, il faut placer un détecteur au foyer de l'objectif de chambre. On a :

$$di = \frac{dx}{f}$$

dx étant l'image de la fente projetée et f la focale de l'objectif de chambre. Donc :

$$R = 2\tan i\,\frac{f}{dx}$$

La résolution croît donc comme f et est inversement proportionnelle à dx. Les CCD utilisés actuellement en astronomie, ont des pixels de 13µm. Pour un bon échantillonnage, on admet que la largeur à mi-hauteur (FWHM) d'une raie spectrale doit avoir 2,5 pixels, soit 32,5µm. Les réseaux utilisés pour la haute résolution spectrale, sont des R2, un R4 étant d'un prix prohibitif. Dans ce cas, si l'on souhaite atteindre une résolution de R = 50 000, il faut une focale de chambre de f = 400mm.

Parlons maintenant du télescope. Si l'on utilise un télescope de 152cm, ouvert à *f*/6, la seconde d'arc vaut 45µm. Disons que pour un "*seeing*" (qualité d'image) moyen de 2 secondes d'arc et si l'on ne veut pas perdre trop de lumière, il faut choisir une fente de 90µm. Le collimateur du spectrographe doit être ouvert à *f*/6, comme la sortie du télescope. Si l'on veut avoir une fente projetée de 30µm, il faut que le spectrographe soit un réducteur focal de γ = 1/3, soit de *f*/6 vers *f*/2.

Si l'on revient vers l'objectif de chambre, à *f*/2 et f = 400mm on remarque que l'objectif doit avoir f=200mm et par conséquent, le réseau R2 qui a

200mm de hauteur de trait doit avoir 400mm de long. C'est déjà une belle pièce, et fort coûteuse. Toutes choses égales par ailleurs, la taille des réseaux croît comme le diamètre des télescopes et l'on doit recourir à des mosaïques de réseaux (R2 **Gecko** du **CFHT,** R4, encore plus coûteux, dans **UVES au VLT**).

Une des façons de contourner ce problème est de monter un dissecteur d'image ou "*slices*" à la place de la fente qui découpe le disque de "*seeing*" en 4 à 6 portions de fente, alignées les unes au-dessus des autres. Des dissecteurs de Bowen-Walraven sont notamment montés sur CAFE au CFHT, Narval au TBL, etc.

Si l'on reprend l'équation des réseaux en montage Littrow, soit :

$$2\sin i = nk\lambda,$$

on s'aperçoit que pour un réseau donné, i et n sont fixes et donc, le produit $k\lambda$ est tel que :

$$k\lambda = \text{Cte}$$

et

$$k_1.\lambda_1 = k_2.\lambda_2.$$

Ainsi,

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{k_2}{k_1}.$$

On a donc, dans une même direction, différentes longueurs d'ondes, provenant d'ordres différents. Pour les spectrographes ayant des réseaux travaillant dans le premier ordre, qui de ce fait ont un grand nombre de traits et une luminosité médiocre, il n'est pas nécessaire de séparer les ordres. Pour les réseaux "blazés", il faut trier les ordres avec un filtre ou un mono-chromateur, ou mieux, les utiliser pour construire un spectrographe à dispersion croisée.

Dans les spectrographes à dispersion croisée, on introduit une deuxième dispersion du spectre, dans la direction perpendiculaire à la dispersion principale. Cette deuxième dispersion, de faible valeur, permet de placer les différents ordres du réseau les uns au-dessus des autres, et augmenter ainsi le domaine spectral couvert simultanément, tout en conservant une grande luminosité dans chaque ordre. Dans cette configuration, le dissecteur d'image ne peut être utilisé que si les ordres sont assez espacés pour accepter une fente équivalente de la hauteur des "slices". Le spectrographe MUSICOS, couplé par fibre optique au télescope de Lyot de 2m du Pic du Midi (T2M), était de ce type.

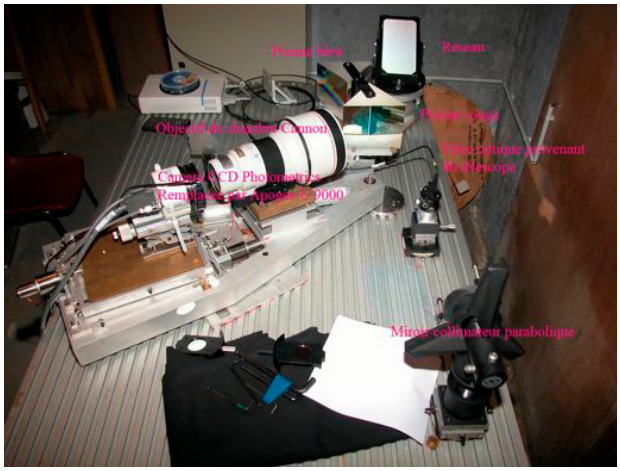


Figure 14 : *Spectrographe MUSICOS, à dispersion croisée, conçu au DAEC pour équiper plusieurs observatoires, au moindre coût. Il est couplé au télescope par fibre optique. Sa résolution spectrale est de 30 000. Il a un réseau R2, un collimateur parabolique et son objectif de chambre est un objectif commercial de la marque "Canon". La dispersion croisée est obtenue par un train de deux prismes commutables, un "bleu" et un "rouge". Il a été utilisé sur le télescope Lyot, de 2m, du Pic-du-Midi. Un exemplaire est actuellement en fonctionnement, sous la responsabilité d'Astroqueyras, au Pic de Châteaurenard, à Saint-Véran.*

2- Spectrographie "multi-objets"

Lorsque des études statistiques utilisant les spectres d'un grand nombre d'objets sont apparues comme un besoin vital, notamment en cosmologie, il a fallu trouver un moyen d'observer le plus grand nombre d'objets simultanément. D'autant plus, que pour l'observation d'objets faibles et lointains, ce sont les télescopes de 4m et de 10m qui sont le plus sollicités. Deux types de spectrographes multi-objet ont été développés:

Spectrographes à masques

Les spectrographes à masques permettent une spectrographie à basse résolution d'objets comme des galaxies lointaines, donc faibles, dont les coordonnées, sur le ciel, sont mal connues. Ils utilisent des grisms comme éléments disperseurs pour que le spectrographe soit en ligne. Ainsi, en enlevant le grism, il est possible de faire une image de la région du ciel, dont on prendra ensuite le spectre des objets qui y sont contenus. A partir de

cette image, on crée un masque dans lequel des fentes sont réalisées par perforation, à l'aide d'un laser piloté par ordinateur. La nuit suivante, il suffit de viser le champ qui a permis la réalisation du masque et chaque mini fente produira un spectre. Cette technique permet d'enregistrer jusqu'à plusieurs centaines de spectres à la fois. Les objets, qui sont souvent plus faibles que la brillance du ciel, bénéficient d'une excellente soustraction du ciel entourant l'objet. Le premier instrument de ce type mis à la disposition de la communauté française était le MOS/SIS du 3,60m CFHT.

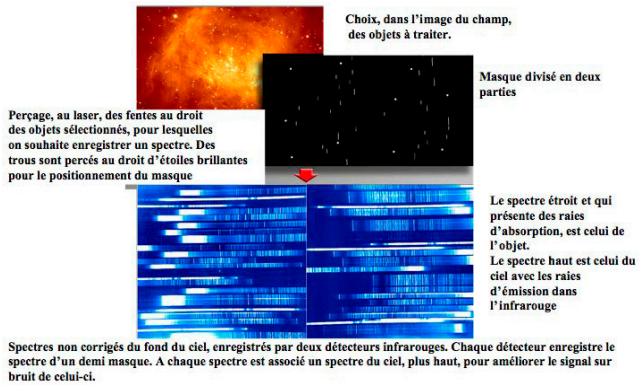


Figure 15 : *Spectrographe multiobjets à masques du télescope de 8m SUBARU.*

Spectrographes à fibres optiques

Les spectrographes à fibres sont installés, à poste fixe, mais couplés au télescope par une fibre optique. Dans le cas de spectrographes mono-objets, le spectrographe peut-être lourd et stable et se connecter facilement au foyer d'un télescope. De plus, la liaison par fibre optique est plus performante qu'un train de miroirs (**CAFE** au **CFHT**). Mais la percée la plus significative des spectrographes à fibres est la spectrographie multi-objets dans un grand champ, qui n'est pas accessible aux spectrographes à masques dont le champ d'observation ne peut dépasser la taille du détecteur. Au foyer du télescope est installé un manipulateur de fibres optiques qui positionne une fibre sur chaque objet à observer et une autre sur le ciel contigu. Le champ que l'on peut exploiter, dans ce cas, est celui du télescope. En sortie, toutes les fibres sont rassemblées en ligne, formant une fente d'entrée de spectrographe. Dans le plan focal du spectrographe, les spectres sont alignés les uns au-dessus des autres et chaque spectre correspond à un objet. Le premier spectrographe de ce type, qui utilisait un manipulateur à bras, est MEFOS, qui était monté au foyer primaire du télescope de 3,60m de l'ESO et qui permettait l'observation de 29 objets dans un champ d'un degré.

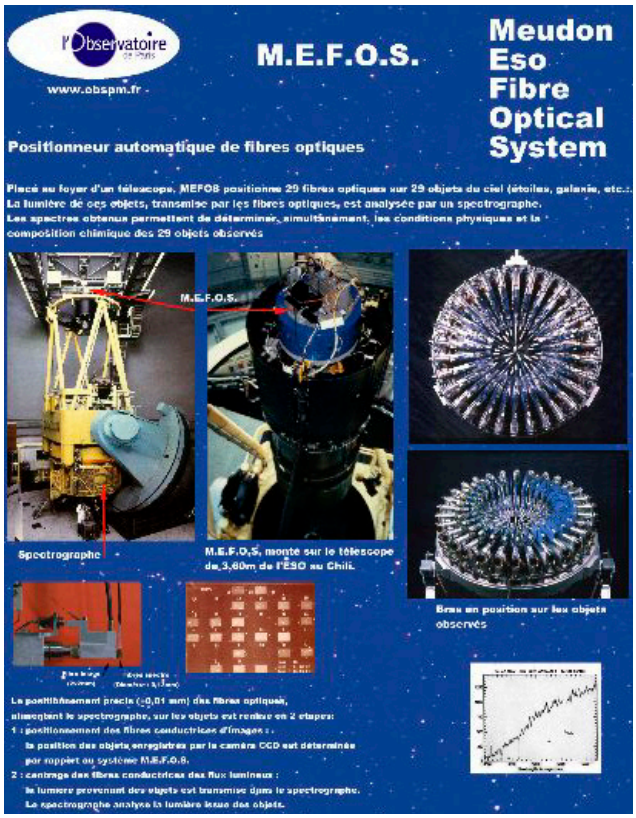


Figure16 : *Spectrographie à l'ESO avec le manipulateur à fibres MEFOS*

Spectrographie par fibres optiques, en astronomie

Bien que très pratiques, les fibres optiques doivent être utilisées avec beaucoup de précautions. Plusieurs contraintes doivent être prises en compte, si l'on veut éviter de grandes déceptions.

Pour la spectrographie, il est indispensable d'utiliser des fibres multi-modes, à saut d'indice, avec un cœur en silice et une gaine d'indice en silice dopée. Le diamètre des fibres doit être choisi en fonction du télescope et de la qualité de seeing du site. Il faut se souvenir que les fibres "brouillent" la distribution du faisceau d'entrée. C'est-à-dire, que, quelle que soit le diamètre du faisceau d'entrée d'une fibre, en sortie, c'est toute la fibre qui est éclairée. Cette propriété est mise à profit pour la stabilité des spectrographes à très haute résolution, utilisés pour la recherche de planètes extrasolaires. Cela veut dire que si l'image d'une étoile, projetée à l'entrée d'une fibre, est plus petite que le diamètre de celle-ci, en sortie, c'est tout le diamètre qui est éclairé. Or, c'est la sortie de fibre qui tient lieu de fente de spectrographe et impose la résolution et,

par conséquent, doit être du plus petit diamètre possible. On trouve difficilement des fibres silice/silice, seules utilisables pour des longueurs de plusieurs mètres, d'un diamètre inférieur à 50µm.

La transmission en longueur d'onde de fibres silice/silice est excellente dans le visible, jusqu'à des longueurs de fibres de quelques dizaines de mètres. Elle baisse dans le bleu et chute fortement dans le violet. Dans l'infrarouge, des fibres spéciales, dopées au zirconium ou aux halogénures, ont aussi été développées, pour des applications spéciales.

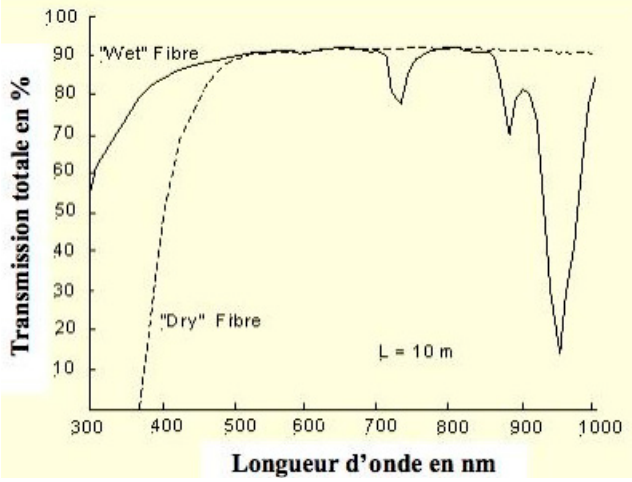


Figure 17 : *Transmission des fibres en fonction de la longueur d'onde. Les fibres "Dry" sont recommandées pour le visible et les fibres "Wet" pour le bleu. Les réflexions aux extrémités sont prises en compte, à hauteur de 8%, ce qui donne une transmission de la silice seule de 98% dans le visible.*

La dégradation d'ouverture des fibres, due à des imperfections infimes de la surface de séparation, entre l'extérieur du cœur et la gaine d'indice, génère une sur-ouverture de sortie de la fibre. Ce phénomène est d'autant plus important que l'ouverture d'entrée est plus faible. Jusqu'à des ouvertures de *f*/4 ou *f*/5, on peut considérer la fibre comme ne modifiant que peu de choses. Il est donc impératif de monter un réducteur focal à la sortie d'un télescope dont l'ouverture est plus faible que ces valeurs.

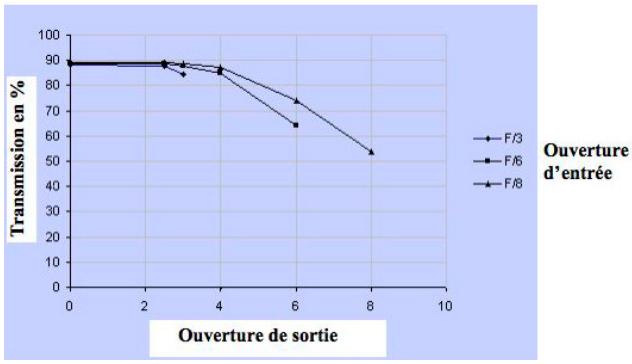


Figure 18 : *Dégradation d'ouverture des fibres optiques (ou FRD pour "Focal Ratio Degradation"). Dans les courbes présentées, les réflexions Fresnel, de 4% par face, sont comprises, ce qui donne une limite de transmission de 90%, sans traitement antireflet des faces. On constate que l'ouverture de sortie est toujours supérieure à l'ouverture d'entrée et cela d'autant plus que l'ouverture d'entrée est plus fermée. D'où l'intérêt d'entrer à f/6 et de sortir à f/4, soit une transmission de plus de 85%.*

En revanche, monter une fibre optique au foyer primaire direct ou au foyer Newton d'un télescope, est une excellente solution, surtout que celle-ci n'introduit pratiquement pas d'obstruction centrale. C'était le cas de MEFOS, au foyer primaire du télescope de 3,60m de l'ESO, ouvert à f/3,8.

L'utilisation des fibres optiques en spectrographie par les astronomes amateurs est peu rentable, pour des télescopes de faible diamètre. En effet, un télescope classique d'amateur possède un diamètre ∅25cm et une ouverture de *f*/10. Pour éviter une dégradation d'ouverture importante, il faut lui coupler un réducteur focal, ramenant celle-ci au moins à *f*/6. Dans ce cas, la seconde d'arc vaut 7,5µm et sa taille est très petite devant le diamètre de 50µm de l'entrée de fibre.

En revanche, pour des télescopes d'un diamètre voisin de 1m, à *f*/6, la fibre de 50µm couvre 3 secondes d'arc sur le ciel, ce qui est en bon accord avec la turbulence atmosphérique des sites moyens.

Remerciements. Je tiens à remercier tout particulièrement Jean Czarny, IR CNRS Honoraire, pour sa lecture attentive du manuscrit et ses nombreuses suggestions ainsi que Jacques Boussuge et Xavier Campi, de l'Association Astroqueyras, pour la pertinence de leur commentaires.

AVEC NOS ÉLÈVES

Le gnomon et la Webcam…

Philippe Jeanjacquot
Philippe.jeanjacquot@gmail.com

Résumé : *Dans le cadre d'un atelier scientifique au lycée, nous avons voulu déterminer expérimentalement la hauteur et l'azimut du Soleil sur plusieurs journées. Un enregistrement automatique avec une Webcam est utilisé.*

Le gnomon

Il s'agit d'une version simplifiée de cadran solaire. En effet, il consiste en une pièce longiligne fixée perpendiculairement sur un plateau horizontal.

Pour obtenir une mesure fiable il faut que le gnomon ne bouge pas pendant toute la durée des mesures et que l'opérateur vienne régulièrement relever la position du bout de l'ombre de la tige sur le plan de travail (la *base*). Il doit aussi marquer l'heure à-côté de chaque point relevé.

Ce système d'acquisition est long et fastidieux, pour le rendre plus simple, précis et attractif, nous avons utilisé une webcam. Le logiciel Cinéris nous a permis de réaliser une image de l'ombre du gnomon toutes les minutes.

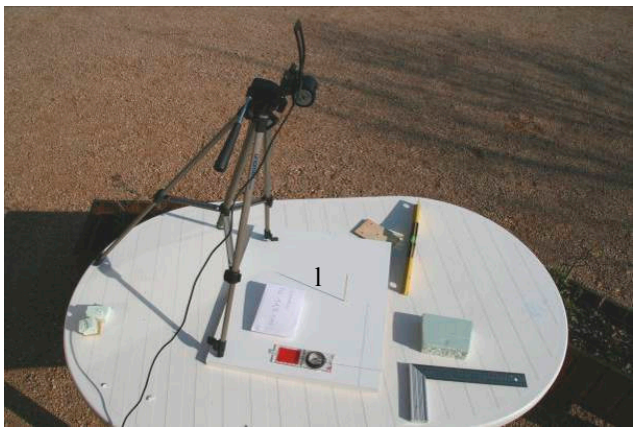


Figure 1 :Installation du dispositif.

Le gnomon est perpendiculaire à la *base* dont l'un des axes est orienté nord–sud à l'aide d'une boussole. Le plan de la base est aussi positionné horizontalement grâce à un niveau et trois vis. Pour éviter que l'image soit déformée, il faut que l'objectif de la Webcam soit bien horizontal. Pour cela, il suffit de régler le pied de la Webcam pour que les bords du plateau soient bien parallèles aux bords de l'image.

Hauteur et azimut de l'ombre

On trouve l'angle h qui correspond à l'angle entre les rayons du Soleil et leur projection horizontale.

Pour calculer *h,* on utilise : $\tan(h) = \frac{L}{l}$

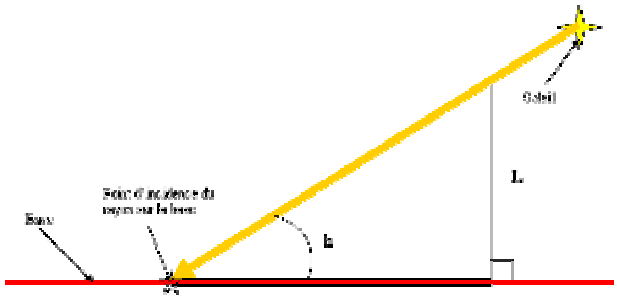


Figure 2 : Calcul de la hauteur

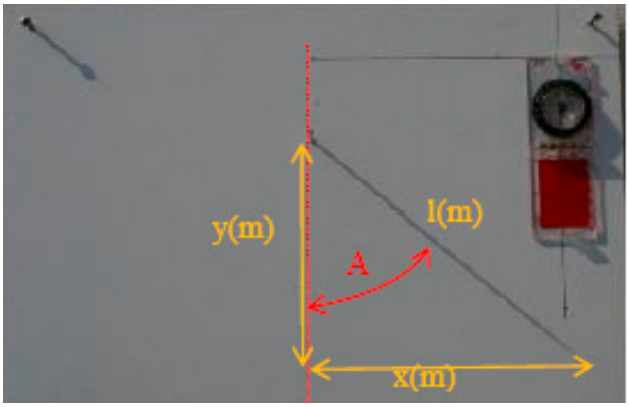


Figure 3 : Longueur et azimut de l'ombre sur une des images capturées par la webcam

Pour calculer l'azimut (A), il suffit de déterminer l'angle entre l'axe nord-sud et l'ombre du gnomon. L'axe vertical de l'image doit bien correspondre à l'axe nord sud. Ici *A=arctan(x/y).*

Traitement de la vidéo.

Exemple d'une mesure réalisée en continu à partir de 7h03min le 11/02/2008. Une image est enregistrée toutes les minutes. L'extrémité de l'ombre du gnomon est pointée sur Cinéris.
Les mesures obtenues sont données sous la forme d'un tableau avec les coordonnées des points x et y et la durée entre l'image et le début de l'acquisition. Elles peuvent être traitées avec tout type de tableur.

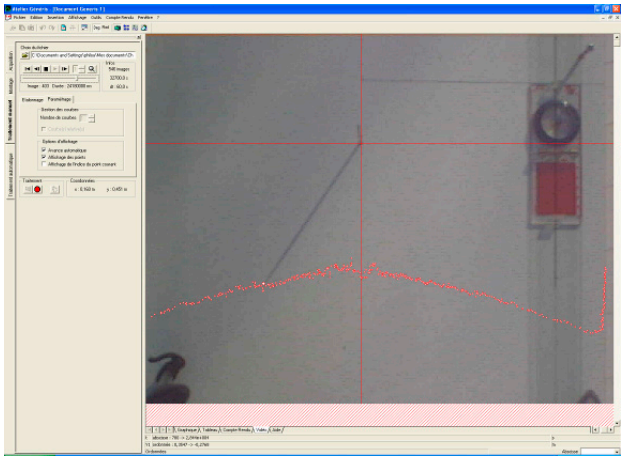


Figure 5 : Pointage sur Cinéris

A et de h en fonction du temps

Ici, les calculs sont effectués dans le tableur de Synchronie : en rouge, on visualise la hauteur et en bleu l'azimut du Soleil.

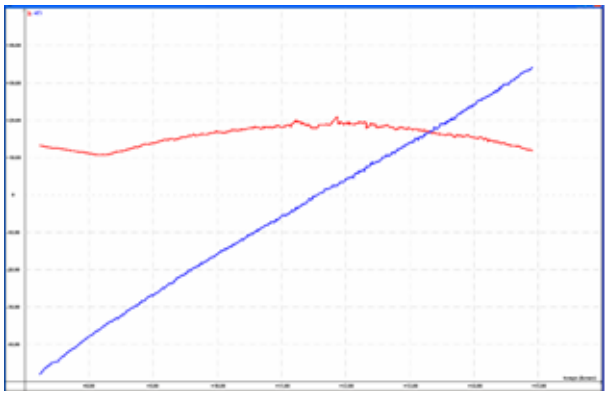


Figure 6 : Courbes de l'azimut et de la hauteur du Soleil en fonction du temps.

Dans notre cas, les premières mesures ne peuvent pas être exploitées pour le calcul de la hauteur. L'ombre est trop grande et son extrémité sort du cadre de l'image.

Le pointage sur le film peut être rendu difficile par les grandes différences de luminosité au cours de la journée. Dans notre cas, le pointage était facile en début et fin de journée mais plus difficile vers 12h. C'est pour cela qu'il y a des fluctuations sur la mesure de la hauteur aux environ de 12h.

L'image exploitée compte 640 pixels pour une longueur de 50cm. La précision de la mesure est de 0,8 mm.

Autre expérience possible, détermination du midi solaire :

Ce type d'enregistrement va également être exploité pour déterminer à différentes dates de l'année l'heure du midi solaire. A partir des mesures du 11 février 2008, il suffit de tracer l (longueur de l'ombre) en fonction du temps.

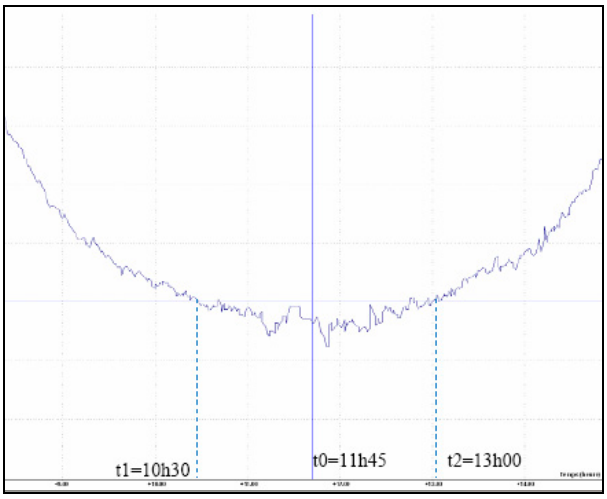


Figure 7 : Détermination du midi Solaire

Après avoir choisi une longueur de l'ombre, par exemple l = 0,25m, il faut déterminer les deux temps pour lesquels la longueur de l'ombre est égale à cette valeur. Ici, t_1 = 10h30min et t_2 = 13h. Le midi solaire est le milieu de l'intervalle de temps :

$$t_o = \frac{t_2 - t_1}{2}$$

Il correspond à l'heure t_o=11h45. C'est l'heure où la hauteur h est maximale. L'azimut est de 2° ouest.
En vérifiant sur les tables d'équation du temps (http://www.imcce.fr) nous avons constaté que pour le 11 février 2008 l'écart entre le midi solaire et 12h est d'environ 14min.

Conclusion

Ce dispositif permet de faire des relevés en continu malgré les contraintes d'emploi du temps de nos classes. Nous pouvons l'améliorer en utilisant des Webcams plus robustes, prévues pour fonctionner à l'extérieur. ■

OBSERVATION

Quelques idées d'observations pour 2008-2009

Pierre Causeret, pierre.causeret@wanadoo.fr

Résumé : *2009 sera l'année mondiale de l'astronomie et les actions en direction des scolaires sont prévues sur l'année 2008-2009. Ce sera peut-être l'occasion pour vous de lancer des observations avec vos élèves. Pour vous y aider, voici les principaux événements astronomiques prévus pour cette année.*

Les planètes

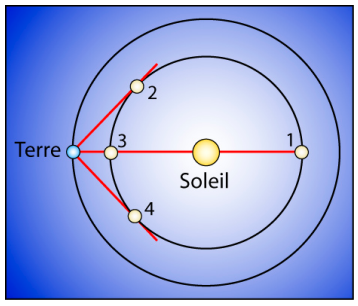
Mercure

Vous pourrez chercher Mercure, le soir, début janvier 2009 une demi heure à une heure après le coucher du Soleil. Mais ce sera plus facile la deuxième quinzaine d'avril. D'autant plus que le 26 avril, jour de l'élongation maximale, la Lune sera juste à côté de la planète pour vous aider à la trouver. Mercure est visible à l'œil nu, mais il vaut mieux la chercher avec une paire de jumelles quand le ciel est encore clair.

Mercure à gauche de la Lune le 6/05/08. Nous retrouverons une situation analogue le 26/04/09.

Mercure sera aussi observable, le matin, lors de la deuxième semaine d'octobre 2008 (et à la mi-février 2009, mais plus difficilement). Rappelons qu'il faut la chercher à l'horizon ouest, quand elle est visible le soir et du côté est le matin.

Elongation maximale est : 11/09/08 (27°)
Conjonction inférieure : 06/10/08
Elongation maximale ouest : 22/10/08 (18°)
Conjonction supérieure : 25/11/08
Elongation maximale est : 04/01/09 (19°)
Conjonction inférieure : 20/01/09
Elongation maximale ouest : 13/02/09 (26°)
Conjonction supérieure : 31/03/09
Elongation maximale est : 26/04/09 (20°)
Conjonction inférieure : 18/05/09
Elongation maximale ouest : 13/06/09 (23°)
Conjonction supérieure : 14/07/09



1 : conjonction supérieure.
2 : élongation maximale est.
3 : conjonction inférieure.
4 : élongation maximale ouest.

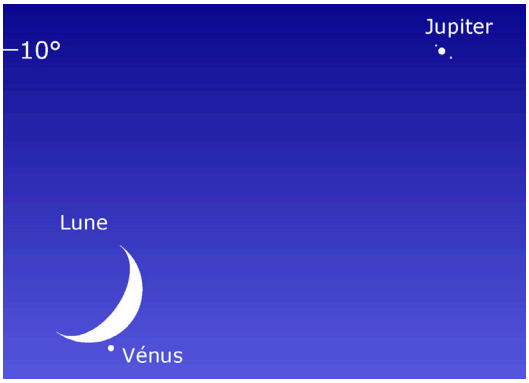
Les différentes configurations des planètes inférieures (Mercure ou Vénus) observées depuis la Terre. Il faut chercher la planète le soir à l'époque de l'élongation maximale est et le matin pour l'élongation maximale ouest.

Vénus

Cette année sera idéale pour observer Vénus. On peut la voir dès maintenant en soirée, encore assez basse sur l'horizon. Elle atteindra son élongation maximale le 14 janvier 2009. Ce jour-là, elle sera visible en quartier dans un télescope. Elle deviendra ensuite un croissant de plus en plus mince jusqu'à début mars.

Elle passera ensuite entre la Terre et le Soleil (conjonction inférieure le 27 mars) pour redevenir planète étincelante du matin.

De plus, elle sera occultée par un croissant de Lune le 1er décembre ; un phénomène à ne pas rater ! De plus, Jupiter sera située juste à côté. Le début de l'occultation aura lieu au coucher du Soleil un peu avant 17 heures et ne sera visible que dans un instrument, le ciel étant encore clair. On pourra voir Vénus ressortir aux alentours de 18 h 20 (heures légales) à l'œil nu. Les horaires dépendent du lieu d'observation.



La Lune, Vénus et Jupiter le 01/12/08 à 18 h 30 depuis Dijon. On peut en profiter pour calculer la distance de la Lune en comparant deux photos pri-ses par des observateurs éloignés à la même heure.

Autre phénomène intéressant : le 30 janvier, alors qu'elle est éblouissante, on pourra profiter de son rapprochement avec la Lune le matin pour la chercher à l'œil nu en plein jour.

Conjonction supérieure : 09/06/2008
Elongation maximale est : 14/01/09 (47°)
Conjonction inférieure : 27/03/09
Elongation maximale ouest : 05/06/09 (46°)

Mars

La planète Mars passe derrière le Soleil le 5 décembre, elle est donc inintéressante cette année.
Il faut attendre l'hiver 2010 pour la prochaine opposition.

Jupiter

Jupiter était au plus près de la Terre début juillet. Elle est actuellement encore bien observable le soir et ce jusqu'en décembre. Elle sera invisible en janvier février (en conjonction avec le Soleil le 24 janvier) et redeviendra planète du matin en mars.
A noter, le plan de l'équateur de Jupiter passera par le Soleil le 22 juin (équinoxe sur Jupiter) et par la Terre le 15 avril. C'est à cette période que l'on peut observer des phénomènes mutuels entre les satellites de Jupiter. L'IMCCE donnera les instants des différents phénomènes (sur www.imcce.fr, choisir éphémérides...)

09/07/08 : dernière opposition de Jupiter.
24/01/09 : conjonction de Jupiter avec le Soleil.
14/08/09 : prochaine opposition de Jupiter.

Saturne

Cela fait deux ans que Saturne se promène dans le Lion. Elle vient de passer derrière le Soleil et on commence tout juste à l'apercevoir le matin. Elle est à observer cet hiver et au printemps. Les anneaux sont malheureusement peu visibles, leur inclinaison n'est que de quelques degrés. Ils disparaîtront complètement en août septembre prochains, lorsque la Terre passera dans leur plan.

04/09/08 : conjonction de Saturne avec le Soleil.
31/12/08 : début de la rétrogradation.
08/03/09 : opposition de Saturne.
17/05/09 : fin de la rétrogradation.
04/09/09 : la Terre dans le plan des anneaux.

Uranus et Neptune

Uranus et Neptune peuvent être recherchées cet automne, en utilisant un instrument ; la première, dans le Verseau et la deuxième dans le Capricorne. Mais il faut une bonne carte pour les trouver.

Conjonctions et occultations

09/09/08 le soir : rapprochement Lune Jupiter.
25/09/08 au matin : rapprochement d'un croissant de Lune avec M44 (la Crèche).
02/10/08 le soir : rapprochement Lune - Vénus.
6 et 7/10/08 : rapprochement Lune - Jupiter
25/10 à l'aube : rapprochement Lune - Saturne
27/10/08 à l'aube : rapprochement Lune - Mercure
01/11/08 le matin : rapprochement Lune - Vénus
03/11/08 le soir : rapprochement Lune - Jupiter
06/11/08 le soir : occultation de Neptune par la Lune.
21/11/08 le matin : rapprochement Lune - Saturne
01/12/08 le soir : rapprochement Jupiter - Vénus et occultation de Vénus par la Lune.
du 29 au 31/12/08 au soir : rapprochement Jupiter - Mercure avec Vénus à proximité et la Lune passant de Jupiter le 29 à Vénus le 31.
21/01/09 à l'aube : rapprochement Lune Antarès.
22/01/09 le soir : rapprochement Vénus Uranus (1,2°).
29 et 30/01/09 le soir : rapprochement Lune - Vénus.
22 et 23/03/09 au matin : rapprochement Lune - Jupiter.
30/03/09 le soir : rapprochement Lune Pléiades.
06/04/09 le soir : rapprochement Lune - Saturne.
19 et 20/04/09 le matin : rapprochement Lune - Jupiter.
22/04/09 le matin : rapprochement Lune - Vénus.

26/04/09 le soir : rapprochement Mercure - Lune - Pléiades.
30/04/09 le soir : rapprochement Mercure - Pléiades.
17/05/09 le matin : rapprochement Lune - Jupiter.
21/05/09 le matin : rapprochement Lune - Vénus.
31/05/09 le soir : rapprochement Lune - Saturne.
14/06/09 le matin : rapprochement Lune - Jupiter.

Éclipses de Soleil

Il y aura deux éclipses de Soleil en 2009, mais aucune visible depuis la France.
Eclipse annulaire de Soleil le 26 janvier 2009 (grandeur 0,96) visible depuis l'océan indien.
Eclipse totale de Soleil le 21 juillet 2009 (grandeur 1,04) visible depuis l'Inde, la Chine, le Japon...

Éclipses de Lune

Ce n'est guère mieux pour les éclipses de Lune : 4 sont prévues en 2009 mais 3 sont des éclipses par la pénombre, donc quasiment sans aucun intérêt (09/02, 07/07, 06/08) et la dernière, pour finir l'année le 31 décembre 2009, sera minuscule (grandeur 0,08)...

Saisons et orbite de la Terre

Equinoxe d'automne : 22/09/08 à 15 h 44 TU
Solstice d'hiver : 21/12/08 à 12 h 03 TU
Equinoxe de printemps : 20/03/09 à 11 h 43 TU
Solstice d'été : 21/06/09 à 05 h 45 TU
Périhélie : 04/01/09 à 15 h TU.
Distance Terre Soleil : 147 096 000 km
Aphélie : 04/07/09 à 2 h TU.
Distance Terre-Soleil : 152 091 000 km

Phases de la Lune (heures TU)

Nouvelle Lune	Premier Quartier	Pleine Lune	Dernier quartier
30/08/09 08h12	07/09/09 14h04	15/09/09 09h14	22/09/09 05h05
29/09/09 08h12	07/10/09 09h05	14/10/09 20h03	21/10/09 11h56
28/10/09 23h14	06/11/09 04h04	13/11/09 06h18	19/11/09 21h32
27/11/09 16h55	05/12/09 21h25	12/12/09 16h38	19/12/09 10h30
27/12/09 12h22	04/01/09 11h55	11/01/09 03h27	18/01/09 02h46
26/01/09 07h55	02/02/09 23h12	09/02/09 14h49	16/02/09 21h38
25/02/09 01h35	04/03/09 07h45	11/03/09 02h37	18/03/09 17h49
26/03/09 16h07	02/04/09 14h33	09/04/09 14h55	17/04/09 13h38
25/04/09 03h23	01/05/09 20h44	09/05/09 04h01	17/05/09 07h27
24/05/09 12h11	31/05/09 03h22	07/06/09 18h11	15/06/09 22h15
22/06/09 19h35	29/06/09 11h28	07/07/09 09h21	15/07/09 09h53
22/07/09 02h34	28/07/09 21h59	06/08/09 00h55	13/08/09 18h55
20/08/09 10h01	27/08/09 11h41	04/09/09 16h03	12/09/09 02h16

Passages au périgée en 2008-2009 : 20 septembre, 17 octobre, 14 novembre, 12 décembre, 10 janvier, 7 février, 7 mars, 2 avril, 28 avril, 26 mai, 23 juin, 21 juillet, 19 août.

Avec ces données, on peut, par exemple :
- calculer la durée de chaque lunaison et en faire une moyenne,
- comparer ces dates avec le début des mois des calendriers musulmans ou chinois,
- calculer la durée écoulée entre deux phases de la Lune et comparer avec la date de passage au périgée...

Étoiles filantes

Il est toujours difficile de prévoir le nombre d'étoiles filantes d'un essaim. Seules certitudes, on en voit habituellement plus le matin quand la Terre va à leur rencontre et il vaut mieux éviter la Lune pour bien les voir. Voici quelques essaims avec la date du maximum (certains essaims sont actifs pendant plus d'un mois).
8/10 Draconides
21/10 Orionides
17/11 Léonides (Lune gênante)
22/12 Ursides
3-4/01 Quadrantides
24/03 Virginides
6/05 Eta Aquarides
27/06 Bootides
Le REseau Français d'ObseRvation de MEtéores (REFORME) a son site hébergé par l'IMCCE http://www.imcce.fr/host/reforme/)

Tous ces renseignements proviennent de l'institut de mécanique céleste (www.imcce.fr) ou du guide du ciel de Guillaume Cannat (amds)

■

REMUE MÉNINGES

Conjonction

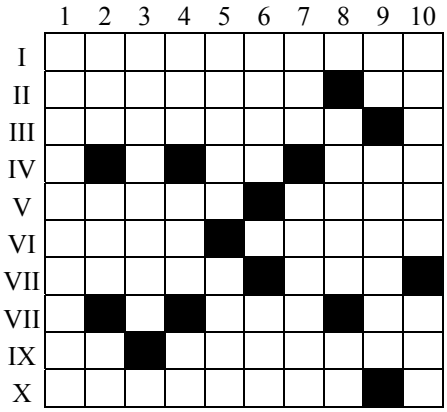
Le 10 juillet, nous avons pu voir un rapprochement serré de Mars et Saturne (moins d'un degré). Dans combien de temps approximativement (à un an près) pourra-t-on voir la prochaine conjonction Mars - Saturne ? Je vous rappelle que la Terre effectue sa révolution autour du Soleil en un an, Mars en 687 jours (environ 1 an et 10 mois et demi) alors que Saturne met 29 ans et demi. **PC**

Rapprochement de Saturne (en haut à gauche) et Mars (en bas à droite) trois jours avant la conjonction du 10 juillet. Crédit photo : Pierre Causeret

Mots-croisés

Horizontalement

I. Jupiter s'y trouve.
II. Comme moi, pas comme Georges."150 millions of kilometers".



III. Recherchés par les observateurs de ciel profond.
IV. Le PC du PC. En photo, moins ça brille, plus il en faut.
V. Sur les Schmidt Cassegrain mais pas sur les Newton. Entre le Scorpion et le Centaure.
VI. Les astronomes le préfèrent noir, certains gastronomes aussi.
VII. Elles furent britanniques un siècle après Jaïpur. Une lunette méridienne n'en a qu'un.
VIII. Couple mélangé. C'est celui de Greenwich.
IX. Dans la Baleine. Pour la lumière, c'est c.
X. M104.

Verticalement

1. Jupiter en a.
2. On n'en a pas encore trouvé une seule qui vive sur Mars. On y trouve le premier cadran analemmatique. Proche de Jupiter.
3. Un peu moins proche de Jupiter.
4. Go. Attrapée. Deux couleurs sur trois.
5. Tubes en désordre. Le moment d'installer son télescope.
6. Il a un croissant de Lune sur son drapeau. Il a pratiqué la danse du Soleil.
7. Beau bout de jardin. Il mène.
8. On les a mis en réserve. Direction du coucher de Jupiter.
9. Soleil égyptien. Acidulés.
10. Assez proche de Jupiter. Unité de chercheur.

La solution commentée est donnée à la page 40

LECTURES POUR LA MARQUISE

Microbes de l'enfer

Patrick Forterre, éd Belin, ISBN 978-2-7011-4425-2

Non, pas d'erreur, vous lisez bien les Cahiers Clairaut ! Pourquoi présenter un livre racontant la découverte des microbes hyperthermophiles, c'est-à-dire capables de vivre à des températures supérieures à 80°C, voir à 100°C ? Parce que leur existence nous conduit à réfléchir sur les conditions nécessaires à la vie, et sur les cas extrêmes.

L'eau liquide semble toujours nécessaire, mais si la pression est suffisante pour qu'elle le soit au-delà des 100°C, la vie semble pouvoir s'en accommoder.

L'histoire de la découverte de ces « microbes de l'enfer « est aussi très intéressante. Elle commence dans les sources chaudes du parc de Yellowstone en

1897 et continue sous les océans de nos jours. Peut-être dans de rudes conditions sur Mars, Europe dans le futur ?

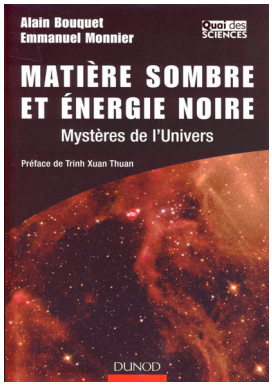
L'introduction est un peu austère, et la lecture est parfois un peu ardue pour le non-spécialiste. Mais le sujet est original, traité par un chercheur spécialiste du sujet, donc n'hésitez pas à vous informer sur ce sujet « en mouvement ».

Jean-Noël Terry

Matière sombre et énergie noire

Alain Bouquet et Emmanuel Monnier, éd Dunod, ISBN 978-2-10-050658-3

À la fin du livre, les auteurs comparent la recherche de la matière sombre et de l'énergie noire à la recherche de l'éther du 19ème siècle. En effet dès 1933, Fritz Zwicky ouvre la voie en notant l'incompatibilité entre la masse de l'amas de Coma et la vitesse de ses objets. En 1965, Vera Rubin pointera le problème posé par les courbes de rotation des galaxies, ce qui conduira à « l'invention » d'un halo de matière invisible.



Ce n'est pas la découverte de l'effet de lentilles gravitationnelles en 1986, ou les microfluctuations détectées dans les images du rayonnement primordial (COBE, WMAP), et encore moins l'accélération de l'expansion de l'univers qui vont simplifier les choses.

Certaines idées intéressantes ont été apportées : modifier les lois de Newton (Milgrom), prendre en compte la masse des nuages d'hydrogène atomique, des naines brunes, des étoiles éteintes ou, dernièrement, celle de l'hydrogène moléculaire, rien n'y fait. L'ouvrage nous guide donc dans cette recherche : réédition actualisée du livre de 2003, il est clair et d'une lecture aisée, tout en regrettant la piètre qualité des photos qui l'illustrent.

Mais quel astrophysicien écrira le dernier chapitre de l'histoire, et en quel siècle ?

Jean-Noël Terry

Les alignements du Ménec

André Maucherat , éd. Actilia Multimedia
ISBN 978-2-915097-13-9

André Maucherat, chercheur au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, se passionne pour l'archéoastronomie, science difficile à la frontière de deux disciplines qui se connaissent mal. La première partie nous fait vivre, de manière romancée, la découverte du ciel par les premiers hommes. La seconde partie, résolument scientifique, cherche à expliquer les vestiges mégalithiques à la lumière des connaissances modernes.

Curieusement, j'ai eu plus de plaisir à lire la partie romancée, qui nous transporte dans l'imaginaire plausible, que la seconde partie, qui me fait toujours craindre des extrapolations erronées, même étayées par des faits étonnants. Rendons justice à l'auteur qui mentionne ces incertitudes : "on peut penser...", "il est probable...".

Nous ne pouvons terminer ce petit commentaire sans signaler que les belles illustrations de la première partie sont dues à notre ami Daniel Bardin, dont on reconnaît le style.

GP

LA VIE ASSOCIATIVE

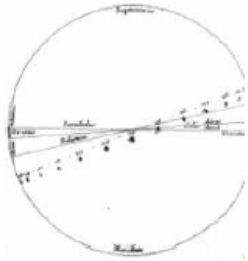
"*Sidereus Nuncius*"

Nous préparons le kit pédagogique en collaboration avec la Société astronomique de Lyon (SAL) et le service de diffusion des connaissances de l'Observatoire de Lyon (SDC). Avec la traduction commentée du célèbre ouvrage de Galilée, "Sidereus Nuncius", chaque mallette contiendra : une lunette de Galilée ; des expériences de physique sur la lumière, la chute des corps et l'isochronisme des pendules ; des posters sur Galilée ; des fiches d'utilisation pour les élèves, avec une version pour le maître.

Sur le site de l'Observatoire de Lyon www-obs.univ-lyon1.fr, il y aura, fin septembre, une page pour demander la réservation d'une des six mallettes pédagogiques. Naturellement, un lien permettra d'y accéder depuis le site du CLEA ou depuis le site de la SAL. **GP**

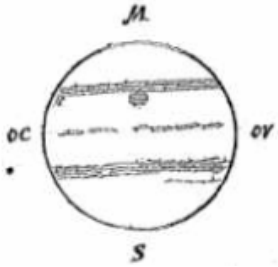
Les sources de l'Astronomie dans le texte : documents d'époque

Ph. Merlin, Observatoire de Lyon



Pour l'Astronomie moderne, nous savons tous que Copernic, Tycho Brahe, Kepler, Galilée, Newton en sont les grands fondateurs. Accéder à leurs textes, est devenu aisé. Internet le permet et des sites comme l'Université de Strasbourg (http://num-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/) mettent en lignes leurs ouvrages complets en images. Les consulter devient plus problématique, car la plupart sont écrit en latin. Qui lit le latin dans le texte ? Peu de monde et encore moins nos élèves. On trouve pour les plus importants des traductions en français. Mais leur lecture est souvent difficile, car une traduction de texte scientifique ancien doit essayer simultanément de respecter l'expression de l'auteur dans le langage de son époque, et de traduire en français scientifique actuel, des éléments qui étaient perçus d'une tout autre façon jadis.

On le voit bien dans les mathématiques utilisées qui nous semblent très complexes soit par la notation qui s'est beaucoup transformée et simplifiée, soit par les outils qui n'existaient pas alors ou qui étaient à l'état embryonnaire. Un exemple probant est la description du cadran analemmatique par Lalande. Il disait que c'était un des problèmes les plus compliqués de gnomonique, alors qu'avec les mathématiques actuelles, sa description ne pose pas de difficultés particulières. Les travaux et publications de Galilée (1564-1642) et Kepler (1571-1630) furent le départ de nombreuses recherches scientifiques dans toute l'Europe. En France, avec la création de l'Académie Royale des Sciences (A.R.S.) en 1666, la plupart de ces travaux ou leurs résumés apparaissent dans l'*Histoire et les Mémoires de l'Académie* (H.A.R.S.).



À la même époque le *Journal des Sçavans* (départ 1665) donnait les comptes-rendus ou même des extraits de ce qui se publiait en Europe, et surtout les échanges de lettres entre les "Sçavans". Si le latin était à l'époque la langue scientifique, la majorité de ce qui est écrit dans le *Journal des Sçavans* et l'*Histoire et Mémoires de l'A.R.S.* est en français. Il est encore possible avec un peu d'acclimatation de lire sans difficulté le français de la fin XVIIème siècle et facilement celui du XVIIIème. On y trouve, au fil des ans les découvertes du ciel, les nouveaux outils mathématiques, l'éclosion des sciences modernes, l'évolution des concepts, des instruments, des notations scientifiques, etc., bref une mine d'or pour les curieux des sciences et de leur histoire. Tous ces documents se trouvent numérisés sous forme de fichier PDF à la BNF (gallica.bnf.fr).

Liste des volumes disponibles :

Histoire et Mémoires de l'A.R.S. :
http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb32786820s/date
Journal des sçavans :
http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343488023/date

Année mondiale de l'Astronomie

2009 sera l'**Année mondiale de l'Astronomie** en souvenir des premières observations de Galilée avec sa lunette. C'est une excellente occasion de retrouver et relire ces textes avec tout ce qu'ils ont de pédagogique. Pour faciliter l'accès à ces documents, l'Observatoire de Lyon (Service de diffusion des Connaissances) propose, sous forme de fichier PDF de taille réduite, les articles se rapportant à l'Astronomie (au sens large), actuellement de 1666 à 1700.

1) les pages du *Journal des Sçavans* (pages_jdsc.htm) ayant rapport à l'Astronomie ou aux Mathématiques et à la Physique apparentées : http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/ama09/pages_jdsc.htm

2) les pages de l'Histoire de l'Académie (pages_hars.htm) se rapportant à l'Astronomie et à la Mécanique céleste : http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/ama09/pages_hars.htm

3) des extraits des Mémoires de l'Académie (pages_hars_memoires.htm) sur les mêmes sujets :
http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/ama09/pages_hars_memoires.htm

De plus vous trouverez des éléments bibliographiques de la période Copernic - Newton - Laplace
http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/ama09/livres_astro.htm
et autres documents de travail disponibles (Iconographie, éphémérides) :
http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/ama09/ama09_projets.htm#docs

LE COURRIER DES LECTEURS

La balance de Cavendish revisitée

Notre ami, Roger Marical, nous fait part de son entreprise pleine de bonnes idées : une excellente raison de descendre à la cave.

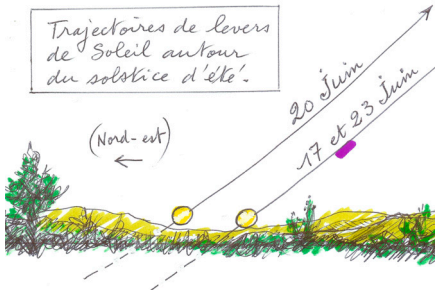
Je viens de me lancer depuis 6 semaines, dans la construction de cette balance selon les idées et trouvailles de ... [l'] article des Cahiers Clairaut de 2003-2004. Merci infiniment pour ces deux articles qui nous placent sur le bon chemin. J'ai bien sûr opté pour le ruban de cassette audio qui remplit son rôle pour des masselottes de 100 g environ chacune. A 200 g le ruban s'étire.....sans rompre pour autant. La période de l'équipage mobile est de 2 min 40s. Le tout est dans ma cave à température constante. En cherchant à rendre le montage plus facile à réaliser j'ai opté pour des cylindres en plomb de 120 g et 2270 g très faciles à couler dans des boîtes ou tubes que l'"on décortique à la pince coupante afin de retirer tout métal magnétique. J'ai en conséquence utilisé un plateau tournant sous la boîte du balancier, porté par une poulie de courroie de distribution pour déplacer les deux grosses masses. Il n'y a aucun jeu, la rotation est très douce sans vibration aucune. A vide la rotation de ce plateau n'a aucune action sur le fléau. Depuis trois semaines, je multiplie les observations: le spot laser va dans le bon sens, lors des changement de positions des grosses masses. La gravité n'est jamais en défaut!.... Le déplacement du spot est inférieur à 6 mm à 4 mètres de distance, pour la première élongation, avant amortissement qui dure plus de 4 heures. A l'équilibre le spot a bougé en moyenne de 2 à 3 mm. Je ne travaille pas en 'retournement 'complet des grosses masses compte tenu de la géométrie de l'ensemble. [...]

J'ai déterminé la période à vide du fléau afin d'accéder à C. Elle est de To = 63s. Les masselottes sont distantes de 19 cm et lors de la mise en interaction masses et masselottes sont distantes de 5cm environ.

Quand je calcule les moments du couple de forces d'après mes mesures et le moment théorique, les intervalles d'incertitude se recoupent. Je pense que j'observe effectivement des forces selon la gravitation. D'autres collègues se sont-ils lancés dans cette expérience? [...]. Très cordialement

Roger Marical - Rouen -
N° CLEA 623 et Comité de rédaction de L"Astronomie

Étymologie du mot "Solstice"



À quelques jours d'intervalle, Le Soleil peut très bien se lever dans la même direction, par exemple aux solstices, quand le Soleil "revient sur ses pas". On retiendra facilement quelle en est la raison après le commentaire d'Olivier Gayrard, à propos de la lettre de Daniel Bardin, CC N°122, page 38.

Celle-ci est « pleine de finesse », et, personnellement, j'avais rempli le questionnaire sans y penser. Mais des professeurs de langue allemande auraient-ils formulé ainsi cette troisième question ? En effet, en allemand, solstice se dit : «sonnenwende», du verbe «wenden», retourner, et de «Sonne», soleil. Voici une étymologie toute indiquée à la remarque de Daniel Bardin, et à sa belle illustration. Souvenons- nous que notre propre étymologie latine de solstice est «sol» soleil, et «sistere», s'arrêter, retenir.

Olivier Gayrard

Les perles des enseignants, des astronomes et des autres...

Deux de mes petits enfants âgés de cinq ans discutaient du jour et de la nuit, avant de s'endormir. L'un d'eux demanda à l'autre : "C'est bien la nuit que ça change le jour ?".

Rappel important : L'Assemblée du CLEA aura lieu, à Dijon le 30 novembre 2009. Venez nombreux pour participer à la vie de l'association et allez voir notre site pour avoir le programme.

SOLUTION DU REMUE-MÉNINGES

Conjonction

Une solution précise n'est pas évidente avec trois planètes en mouvement. Mais on peut donner un résultat approximatif. Dans un an, Saturne se retrouvera à peu près au même endroit alors que Mars sera à l'opposé. Mais dans deux ans, la Terre aura fait un tour complet, Mars 1 tour + 20° et Saturne aura avancé d'une bonne vingtaine de degrés. On retrouvera donc une situation similaire à celle de cette année avec une conjonction Mars Saturne. Un logiciel de simulation permet de dater l'évènement : ce sera le 30 ou le 31 juillet 2010.

Commentaires

S	A	G	I	T	T	A	I	R	E
A	M	A	T	E	U	R	■	A	U
T	E	N	E	B	R	E	S	■	R
E	■	Y	■	U	C	■	I	S	O
L	A	M	E	S	■	L	O	U	P
L	I	E	U	■	H	E	U	R	E
I	N	D	E	S	■	A	X	E	■
T	■	E	■	O	U	D	■	T	U
E	I	■	V	I	T	E	S	S	E
S	O	M	B	R	E	R	O	■	R

Horizontalement

II AU pour *Astronomical Unit,* ou Unité Astronomique en français, c'est à dire 150 millions de km (distance moyenne Terre Soleil).
IV UC Unité Centrale, le poste de commandement d'un ordinateur.
L'ISO est l'unité de sensibilité d'un film photo ou d'un capteur.
V. Les télescopes de types Schmidt Cassegrain possèdent une lame de fermeture.
VII Axe : une lunette méridienne reste dans le plan nord sud et ne possède qu'un axe horizontal est-ouest. Elle sert à repérer une position d'étoile précisément en mesurant sa hauteur qui donnera sa déclinaison et en chronométrant l'instant de son passage au centre de l'oculaire qui donnera l'ascension droite.
VIII. Duo. TU, le temps universel, c'est en gros le temps moyen de Greenwich.
X. M104 s'appelle aussi galaxie du Sombrero à cause de son aspect caractéristique.

Verticalement

2. Ain : le premier cadran analemmatique a été construit à Bourg en Bresse devant l'église de Brou en 1513.
4. VB de RVB (Rouge Vert Bleu)
10 UER : Unité d'Enseignement et de Recherche.

PC

Articles à venir

Les ondes gravitationnelles - Le coronographe interférométrique - Activités "Science à l'École" -L'orbilune - La nébuleuse du Crabe revisitée - Le chaos - L'étoile "laser" artificielle - Mesure de la distance Terre Lune par la méthode de Ptolémée.

RE-ABONNEMENT ET/OU ADHESION

Pour vous abonner aux Cahiers Clairaut et/ou adhérer au CLEA en 2008, envoyez **l'information** ci-dessous avec **un chèque** à l'ordre du CLEA à : Jean RIPERT, C.L.E.A. Impasse des Mouyracs 46090 PRADINES

VOTRE NUMERO D'ABONNE (voir sur l'enveloppe d'expédition) :
E-MAIL :
NOM (en lettres capitales) : PRENOM :
RUE : VILLE : CODE POSTAL
ABONNEMENT AUX CC EN 2008 ---------- 30 €
ADHESION AU CLEA EN 2008 ---------- 5 €

TOTAL :

Liste de diffusion, ou, "Comment pouvoir poser des questions et recevoir des réponses", avoir accès à des images du CLEA etc., via le Web

Les adhérents qui souhaitent être inscrits peuvent envoyer un message à : jripert@ac-toulouse.fr
C'est gratuit !

Encore un cadeau pour les abonnés 2008 : le CD "Explorer l'Univers" produit par l'APLF.

Ont participé à la rédaction de ce numéro : Daniel Bardin, Pierre Causeret, Paul Felenbok, Jean Gay, Olivier Gayrard, Jacques Heulin, Philippe Jeanjacquot, Roger Marical, Philippe Merlin, Georges Paturel, Anne-Marie Paturel, Jean-Noël Terry.