

Initiation à l'astrophysique au collège

par E. HADAMCIK
Collège Courbet, 93230 Romainville

Les maquettes ont été réalisées par les élèves lors de divers PAE. Les expériences et le travail des élèves ont été présentés pendant cinq ans aux stages de Mme LEVASSEUR-REGOURD à Paris VI. L'interactivité entre les stages de formation et les établissements scolaires a été très fructueuse rendant plus expérimentale notre envolée vers l'espace. Plusieurs activités s'inspirent des ateliers des universités d'été du CLEA

A - Analyse de la lumière

1. «ARC EN CIEL» ou décomposition de la lumière blanche

a) à l'aide d'un prisme constitué par un aquarium contenant de l'eau et un projecteur de diapositives. Une fente est placée dans le projecteur à la place de la diapositive (elle est verticale).

L'image de la fente est faite sur un écran, la « cuve » est placée sur le trajet du faisceau de lumière de telle sorte que le faisceau ne soit pas diaphragmé par les surfaces de séparation. La cuve est tournée jusqu'à l'obtention du spectre. La position choisie correspond au minimum de déviation pour le jaune. La mise au point est affinée pour la nouvelle position de l'écran. Les bords du spectre doivent être nets. Il faut jouer sur la largeur de la fente pour avoir suffisamment de lumière et obtenir un spectre aux «belles couleurs».

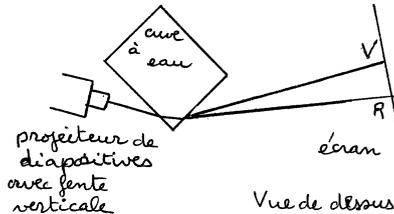


Figure 1

Sur l'écran le spectre se présente sous forme d'un «arc». Tous les rayons ne traversent pas le prisme dans un plan de section principale c'est pourquoi l'image est courbée.

Pour l'arc en ciel l'explication est tout autre puisque c'est l'œil qui a une position centrale.

b) À l'aide d'un réseau

α) *Observation directe* du filament d'une lampe à incandescence (lampe de poche) ou du filament allongé d'une navette de voiture.

β) *Utilisation d'un projecteur de diapositives*

Il faut placer le réseau devant l'objectif, les traits du réseau parallèles à la fente qui remplace la diapositive. Tourner ou déplacer l'écran pour qu'il soit perpendiculaire au faisceau moyen.

Si le réseau est très dispersif ne pas placer l'écran trop loin.

γ) *Utilisation d'un rétroprojecteur*

Placer le réseau sur la lentille de renvoi. Sur le rétroprojecteur placer 2 cartons, à bords nets, bien droits, opaques, écartés de quelques millimètres et jouant le rôle de fente. Faire une mise au point sur l'écran. Si le nombre de traits du réseau est important, projeter à la plus petite distance possible.

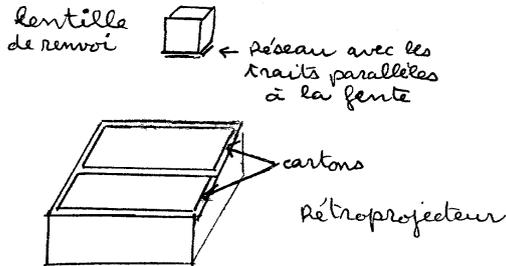


Figure 2

Montrer le rôle de la fente en l'écartant progressivement. Il y a brouillage.

δ) *Petit spectroscopie à réseau* (permettant l'observation de sources larges - B.U.P. n° 829 659-653).

Il suffit d'un tube opaque.

A l'une des extrémités fixons le réseau, à l'autre une fente (montée dans un cache de diapositives) de un demi millimètre de large et parallèle aux traits du réseau.

Il peut être intéressant d'observer la flamme éclairante du bec bunsen (lumière émise par incandescence).

2. COULEUR ET TEMPÉRATURE

Réduire la tension d'alimentation de la source. Dans le spectre, l'intensité lumineuse diminue considérablement du côté du bleu. Si la différence est importante (bleu pratiquement non visible) une recombinaison ou la projection directe (sans dispersion) montre une lumière rosée.

⇒ la répartition de lumière dans le spectre donne une idée de la température de la source.

Si on a la chance de disposer d'un arc électrique, il est possible de montrer qu'une source très chaude émet des rayonnements U.V. Il est indispensable dans ce cas d'avoir une salle où l'on peut faire l'obscurité. On fait alors sur un papier blanc le spectre de la source. Remarquons que le spectre est continu du rouge au violet puis apparaissent une bande noire, une lueur bleue, une bande noire, une lueur bleue. Les rayonnements U.V. émis par la source excitent la fluorescence de la substance de blanchiment du papier.

Dans l'espace la lumière émise par des étoiles très chaudes excite la fluorescence de nébuleuses proches qui alors émettent dans le visible.

Si nous observons directement l'écran éclairé en lumière blanche à l'aide d'un petit spectroscopie, la lumière «bleue» n'est plus au-delà du violet, elle est à sa place dans le spectre.

Les deux bandes noires observées précédemment correspondent à l'absorption d'une partie du rayonnement ultra-violet par les optiques en verre du montage.

Les lampes à iode émettent quelques rayonnements ultra-violet mais la fluorescence provoquée, beaucoup plus faible, est difficile à observer.

Les sources qui n'émettent pas de lumière visible car pas assez chaudes émettent cependant des rayonnements infrarouge qui peuvent être détectés par des photodiodes ou des pellicules photographiques spéciales.

Actuellement il y a un grand développement de l'astronomie dans le domaine infrarouge en particulier pour la recherche des planètes et l'étude des poussières interplanétaires et interstellaires. Les détecteurs infrarouge nécessitent un système de refroidissement (jusqu'à quelques kelvin) important pour éviter le bruit de fond. La technologie actuelle permet leur installation à bord de satellites où cependant leur durée de vie est limitée. Remarquons que cette étude hors de l'atmosphère terrestre permet la recherche de molécules par l'analyse spectrale de bandes d'émission (ou d'absorption).

Il est possible de fabriquer une maquette d'émetteur-récepteur infrarouge (transmission par satellite, kit labo, Sciences et nature n° 50 et 51).

3. SPECTRES DE RAIES (ou de bandes)

a) Émission

- Le cône bleu du bec bunsen
le spectre d'émission est dû aux transitions chimiques au niveau du cône.

A) *Flammes* avec – du chlorure de sodium, du verre
– du sulfate de cuivre
–

B) *Lampes à vapeur* de mercure, lampes à bronzer

① Tubes fluorescents

Pour ces derniers, l'observation à l'aide des petits spectroscopes est facile.

* tubes droits : des raies brillantes apparaissent sur un fond continu (celui-ci est dû à la fluorescence de la substance blanche excitée par les rayonnements U.V. émis lors de la décharge).

* tubes courbés : en général il n'y a pas de fond continu, on est parfois gêné par les canelures de l'enveloppe. Ils sont montés sur une simple douille à vis.

② Lampes à bronzer

Il y a deux façons de faire le montage. Dans chaque cas attention aux yeux en lumière directe ou réfléchiée par des supports (B.U.P. n° 833).

α) En projection

La lentille fait l'image de la fente sur l'écran.

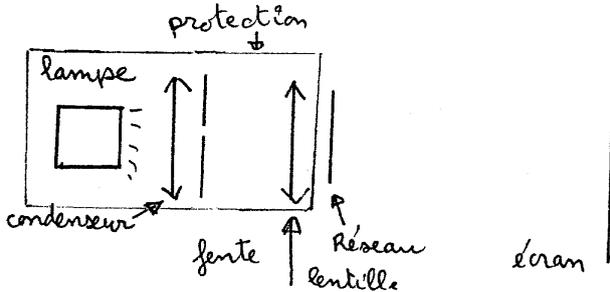


Figure 3

Sur l'écran au-delà des raies violettes nous observons la fluorescence bleue du papier excitée par les rayonnements U.V.

β) En lumière diffusée

La lampe placée dans une boîte éclaire l'écran qui fait face aux observateurs.

Ceux-ci utilisent de petits spectroscopes.

Remarque : la raie bleue est à sa place dans le spectre. La mise en évidence des rayonnements ultra-violet n'est plus possible.

C) Néon

D) Éclairages publics

Remarque : il peut être intéressant de montrer une photographie du spectre d'émission d'une nébuleuse brillante.

b) Absorption

A) Par des substances à l'état condensé (liquides, filtres...)

Il est commode d'utiliser le rétroprojecteur car une portion du spectre d'origine est visible. Le projecteur de diapositives est également utilisable. Certaines «couleurs» du spectre sont très atténuées. Cet effet dépend beaucoup de la concentration du milieu.

Les solutions de permanganate de potassium et de chlorophylle donnent de bons résultats.

B) Par des gaz

L'expérience peut se faire à l'aide d'un projecteur de diapositives ou autre système (le rétroprojecteur lui, demande une autre technique et est plus difficilement utilisable dans le deuxième cas).

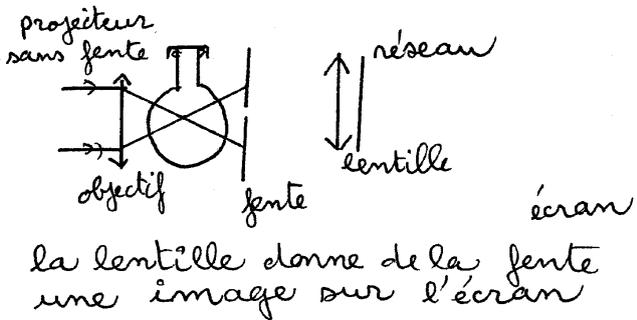


Figure 4

Le dioxyde d'azote donne les bandes d'absorption sur tout le spectre (attention : par sécurité, boucher le ballon).

L'autre expérience est plus délicate car elle nécessite du chlorure de sodium fondu. Pour cela il faut chauffer dans une coupelle métallique un mélange chlorure de sodium (1/3) et chlorure de calcium (qui joue le rôle de fondant). La couleur jaune caractéristique de la lumière émise par le sodium excité apparaît rapidement.

Le ballon précédent est remplacé par la coupelle.

Le réseau doit posséder au moins 500 traits/mm et avoir une bonne transmission.



Figure 5

Il est important que la lumière blanche converge juste au-dessus de la coupelle. Normalement sans lumière blanche sur l'écran nous devrions voir les raies d'émission mais elles sont peu intenses et à peine visibles. Il est cependant possible de pointer leur position. Lorsque le faisceau de lumière blanche traverse la vapeur de sodium, sur l'écran le spectre continu apparaît. Dans le jaune nous distinguons une fine raie noire.

Il faut attendre suffisamment longtemps après le début du chauffage pour qu'il y ait une densité de vapeur suffisante. Nous pouvons remarquer que dans les autres directions il y a toujours émission. La position de la raie noire correspond à la position de la raie d'émission précédente.

Une expérience plus spectaculaire est réalisable mais il faut prendre de sérieuses précautions car elle est dangereuse du fait de la projection de sodium incandescent.

Autour de la coupelle précédente plaçons d'abord un cylindre métallique protecteur. La pailleuse aussi doit être protégée.

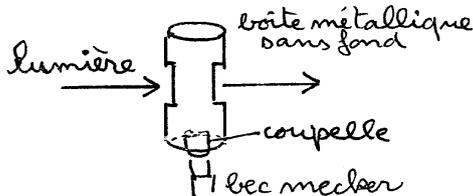


Figure 6

Plaçons alors dans la coupelle à l'aide de pinces un petit morceau de sodium. Il s'enflamme rapidement, de la vapeur se dégage. La lumière jaune dans toutes les directions est intense. Sur l'écran nous avons toute une bande d'absorption visible de loin.

La largeur de la raie dépend en effet de la densité de vapeur.

L'étude des spectres d'absorption donne la composition des gaz traversés par la lumière, des idées sur la densité, la température et d'autres indications mais qui ne peuvent être montrées par des expériences simples.

c) Spectre solaire

Il est dangereux de l'observer directement. Par contre nous pouvons regarder la lumière diffusée par le fond du ciel ou une surface blanche.

Le spectre est continu avec un maximum de lumière vers le jaune.

A l'aide d'un spectroscopie constitué par un tube en carton d'environ 1 m, d'un réseau d'au moins 500 traits par millimètre et d'une fente ouverte de 1 ou 2 mm à bords nets (par exemple $\frac{1}{2}$ lames de rasoir dans une monture de diapositive) il est possible de voir, en observant la lumière diffusée, des raies noires, très fines sur le fond continu. Ces raies sont dues à l'absorption par la chromosphère, dont l'atmosphère est plus froide, d'une partie des rayonnements émis par la photosphère. Quelques raies supplémentaires résultent de l'absorption par l'atmosphère terrestre (par exemple par les molécules de dioxygène). Pour les distinguer il faudrait faire une analyse plus fine de chaque raie.

d) Spectre des étoiles

Il permet une classification en température et la recherche des éléments principaux.

Le document du fascicule de Strasbourg qui présente une série de spectres (p. 38) est facile à exploiter.

B - Astronomie

Étant donné le peu de temps réservé à l'astronomie dans le programmes de 4^{ème} et malgré l'intérêt de nos élèves, la plus grande partie de ce travail a été faite en club (en particulier pour ce qui concerne les mouvements).

Tous les exercices ont été testés avec des élèves de 4^{ème} ou de 3^{ème} (parfois de 5^{ème}). Certains constituent des devoirs à faire à la maison d'autres des études en petits groupes. Les maquettes réalisées en club sont exploitées en classe. Les exercices proposés ici sont de niveaux très divers (de très facile à très difficile pour les élèves de 1^{er} cycle).

1. LE MOUVEMENT DIURNE

A) Observation

La meilleure prise de conscience du mouvement diurne est l'observation avec un instrument fixé sur pied, soit du mouvement des étoiles, soit de la projection du Soleil sur un écran (les élèves disent de l'instrument «il se dérègle !!! tout le temps»).

B) Photographies

Elles nécessitent un appareil photographique possédant la pose B, un déclencheur souple et un support stable, de la pellicule 400 iso ou 1600 iso (B.U.P. n° 620).

1) Étoiles

Loin des villes une pose de 1/2 h à 1 h est intéressante. Au bout de 10 min, nous distinguons déjà des arcs de cercle.

En ville des poses de plus de 2 min sont rarement réalisables (à 80 km de Paris une pose d'une 1/2 h est limite).

Si l'enregistrement est de moins de 1/2 h, il vaut mieux exploiter les résultats sur un autre cliché. Chaque élève reçoit une photocopie et fait l'exercice à la maison.

Pour déterminer le centre il faut tracer les médiatrices de 2 arcs (les résultats sont corrects si ces 2 arcs font un angle supérieur à 60°).

Il ne reste plus qu'à mesurer l'angle de rotation (pour ici 1/2 h) et à trouver en combien de temps les étoiles semblent avoir fait un

tour complet (faire plusieurs mesures pour plusieurs étoiles et calculer la moyenne en éliminant les résultats dits aberrants).

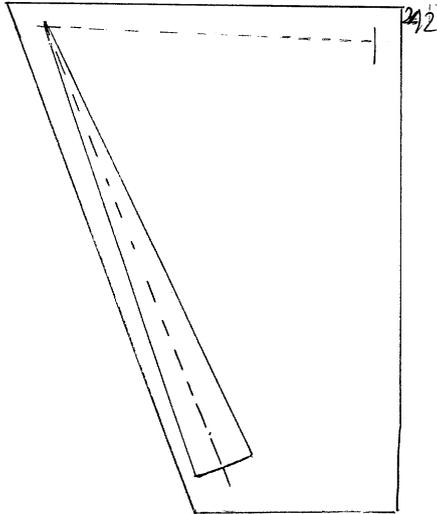


Figure 1

2) *La Lune, Jupiter et Vénus*

En retirant le cache toutes les 5 (ou 10 min) et avec 5 poses les clichés sont réalisables, même en plein Paris (se mettre en pose B et, obturer à l'aide d'un carton). Les clichés réalisés lors de conjonction sont particulièrement intéressants.

C) Le cadran solaire

1) *Le baton*

Observation de l'ombre portée au cours d'une journée. Variations au cours de l'année.

Détermination du méridien (ombre la plus longue sur une journée).

Le pointage peut se faire lors de récréations.

2) *Le cadran équatorial* (à construire en club) (B.U.P. n° 640)

Le gnomon est dans la direction du nord céleste. En été on utilise la face supérieure, en hiver la phase inférieure. Le plan du cadran est le plan de l'équateur céleste. Chaque heure correspond à $\frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$

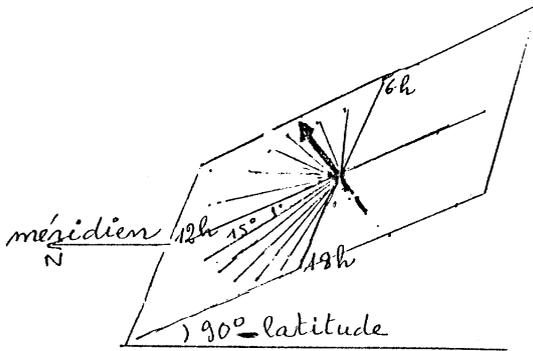


Figure 2

Pour avoir l'heure légale, il faut faire des corrections :

(1) • la Terre tourne sur elle-même en 23 h 56 min 4 s (jour sidéral donné par la rotation des étoiles) ;

• le Soleil lui, culmine dans le ciel toutes les 24 h (jour solaire moyen). Donc le Soleil est en retard de 3 min 56 s toutes les 24 h sur les étoiles. En 1 an (365,25 jours) cela fait exactement un jour sidéral. Au bout d'une année la position du Soleil par rapport aux étoiles est à nouveau la même.

• en réalité c'est plus compliqué car la Terre décrit une ellipse et non un cercle donc sa vitesse varie au cours de l'année.

⇒ Il faut utiliser «l'équation du temps» soit sous forme de courbe soit sous forme de tableau de correction.

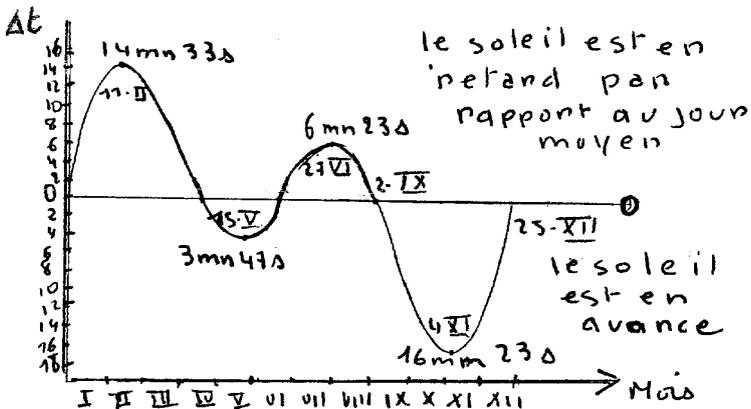


Figure 3

(2) temps sidéral local : temps solaire moyen local + 12 h. Il est com- mode de changer de date la nuit et non le jour.

(3) la différence par rapport au méridien international (Greenwich) dépend de la longitude du lieu d'observation. 1° d'angle correspond à 4 min de temps.

$$\begin{array}{cccccc}
 H & = & H & + & E & + & \lambda & + & 1 \text{ ou } 2 \text{ h} \\
 \text{légale} & & \text{solaire} & & \text{équation} & & \text{longitude} & & \text{heures d'été} \\
 \text{(à la montre)} & & & & \text{du temps} & & \text{(en h)} & & \text{heures d'hiver}
 \end{array}$$

Le gnomon représente l'axe du monde, en été le Soleil est au-dessus du plan de l'équateur et en hiver en-dessous. Sous nos latitudes il est toujours au-dessus de l'horizon mais sa hauteur à midi vrai change au cours des saisons (sans jamais atteindre 90°).

3) *Héliographe* (à placer le matin et à retirer le soir)

Appareil qui permet d'enregistrer la trajectoire apparente du Soleil et de mesurer sa déclinaison. C'est une chambre noire particulière.

Matériel : boîte métallique cylindrique, support, papier diazo, ammoniaque.

Le plan méridien du lieu doit passer par l'axe et le trou.

Le couvercle est fixé sur le support. Il est opaque (s'il est en plastique il vaut mieux calfeutrer avec de l'adhésif noir). La boîte est métallique.

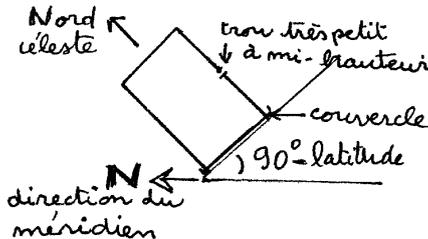


Figure 4

Dans la boîte dans la pénombre nous avons placé un papier diazo sur toute la hauteur seul le trou n'est pas couvert. (La manipulation avec du papier photographique devrait se faire dans l'obscurité complète ainsi que le développement). Pour développer il suffit de retourner la boîte sur un récipient contenant quelques gouttes d'ammoniaque.

Nous laissons la boîte sur un support horizontal (et le long du méridien) toute la journée.

Après développement nous indiquons le haut du papier et la date. Nous obtenons une courbe blanche sur fond violet ou noir.

Allure des courbes

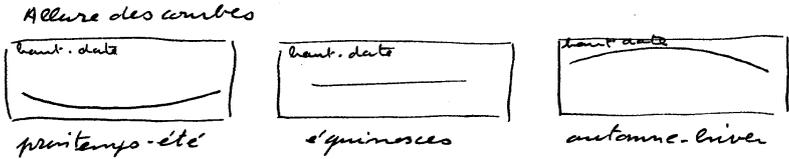


Figure 5

Les astres dans le ciel sont repérés par leur direction angulaire par rapport à des plans de référence.

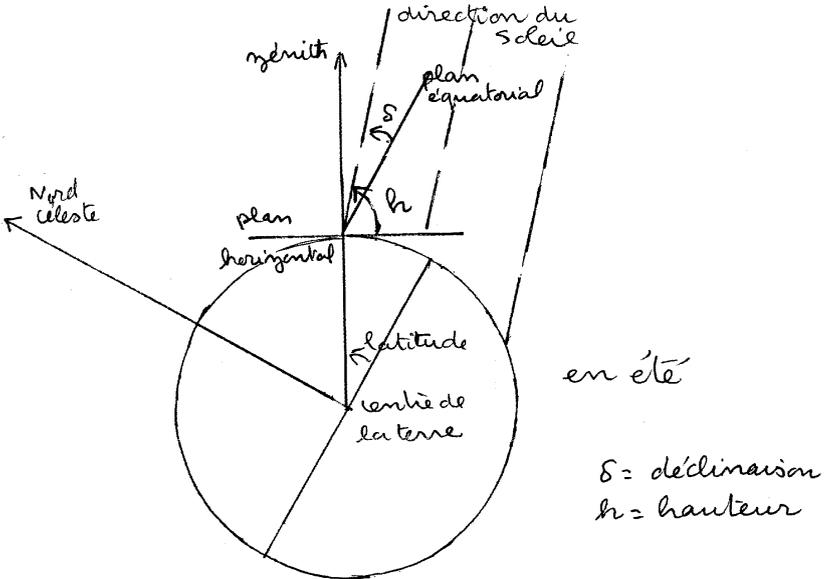


Figure 6

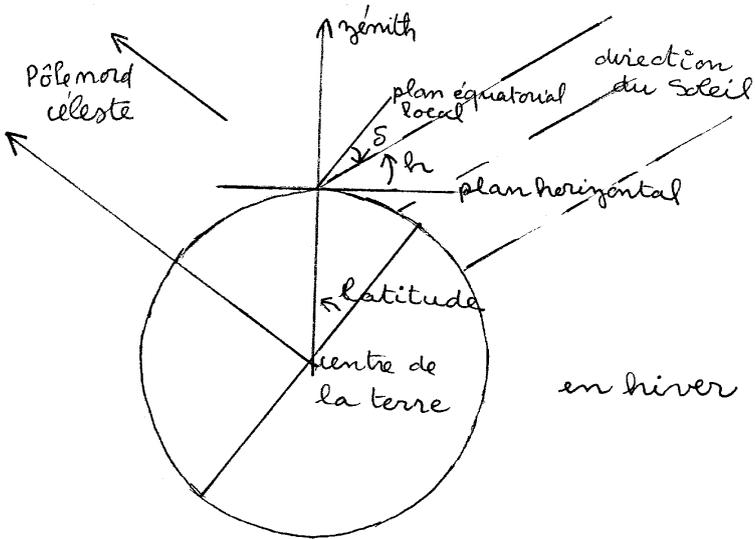


Figure 7

La hauteur correspond à l'angle de la direction de l'astre avec le plan horizontal. La déclinaison est l'angle de la direction de l'astre avec le plan équatorial local.

– Exploitation d'une courbe

- le Soleil semble tourner dans le ciel,
- le midi solaire.

Détermination de la déclinaison à midi vrai.

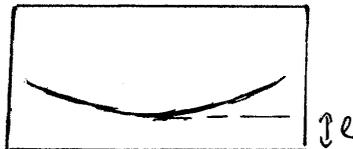


Figure 8

Il est facile de déterminer d , D et l (si le papier touchait le fond de la boîte).

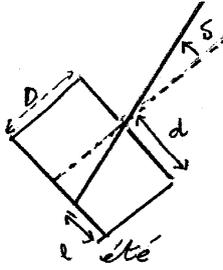


Figure 9

Nous calculons $d-l$.

Sur une construction mesurons.

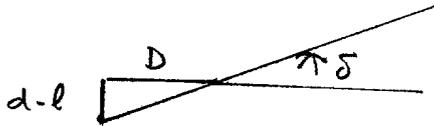


Figure 10

Remarques : en hiver la déclinaison est négative.

Calculons la hauteur du soleil dans le ciel :

- en été $90^\circ - \text{latitude} + \delta$
- en hiver $90^\circ - \text{latitude} - \delta$

⇒ Le soleil ne passe pas au zénith.

Le début et la fin de l'enregistrement sont notés soigneusement, ce qui permet de montrer que le midi vrai n'est pas le même que le midi civil ou même moyen (cf. cadran solaire).

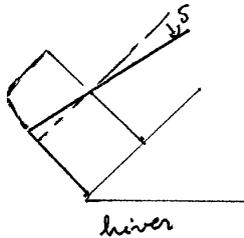


Figure 11

D) Comparaison des courbes enregistrées aux différentes saisons

E) Maquette de la sphère céleste (en club)

Un modèle de sphère très élaboré est donné dans les cahiers Clairault mais elle peut être réalisée simplement à l'aide d'un ballon de chimie à fond rond. La «sphère» doit pouvoir tourner autour de l'axe nord-sud (inclinaison par rapport à la verticale égale à la latitude). Au centre une balle de ping-pong représente la terre.

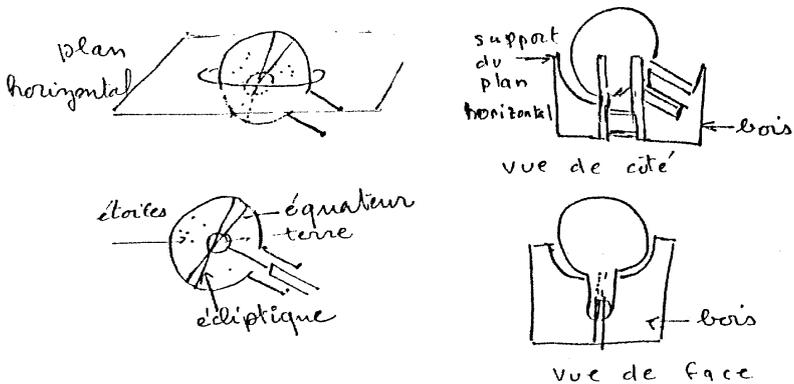


Figure 12

Une gommette permet de déplacer le soleil sur l'écliptique au cours de l'année. Pour une position du soleil (un jour) il semble tourner sur un cercle centré sur l'axe des pôles. Les étoiles tournent (semblent tourner) autour du même axe.

Le plan horizontal est matérialisé par un carton. Un personnage sur la sphère «Terre» regarde vers le nord.

F) Représentation graphique du mouvement apparent au cours d'une journée (exercice)

I) Les proportions ne peuvent être respectées. Le repérage de la position du Soleil se fait par rapport au zénith plus commode à tracer que le plan horizontal.

Texte :

Nous donnons la position du Soleil, de la Terre. La Terre est supposée

garder la même position par rapport au Soleil. La Terre est divisée en 12 secteurs horaires. Nous ne nous intéressons qu'aux angles. Sur un calque pointer C, un point à la surface de la Terre (qui va tourner au cours de la journée) et la direction de zénith. Pointer les positions successives du Soleil en faisant tourner la Terre (donc le calque).

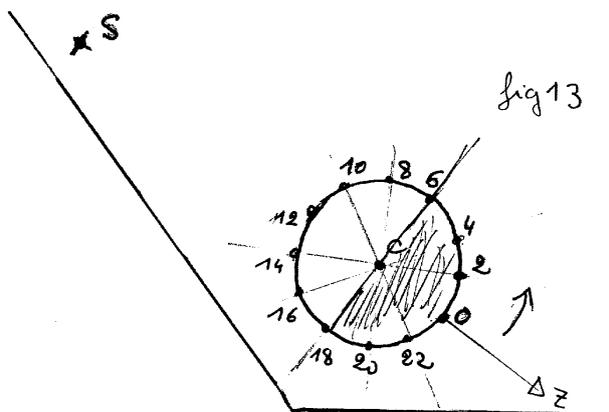


Figure 13

2) Résultat

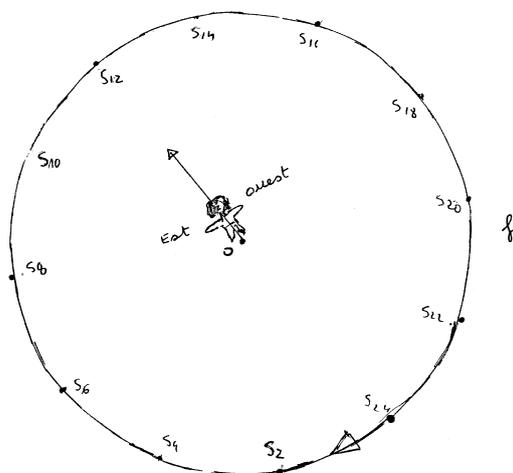


Figure 14

Résultat :

Mouvement apparent du Soleil vu de la Terre.

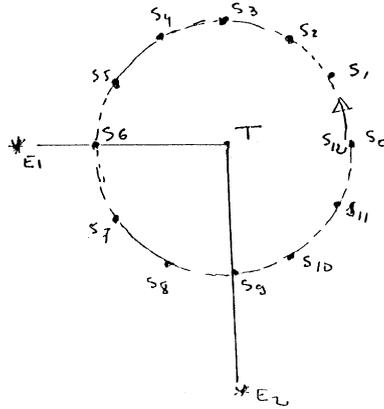


Figure 16

3. LES PHASES DE LA LUNE - LES ECLIPSES

Rappelons un certain nombre de maquettes et de documents permettant de travailler cette question.

- 1) Transparent animé vendu par le CLEA
- 2) Maquette achetée ou fabriquée à l'aide d'un globe et d'une balle
- 3) Document du fascicule du CRDP de Strasbourg (astrophysique en 4^{ème}) associé à une série de photographies (ex. D2 du CLEA).

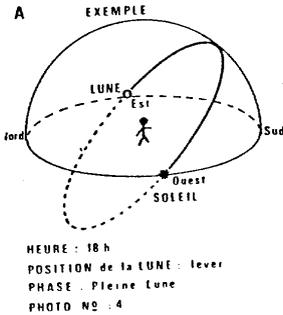


Figure 17

sphère transparente



Figure 18

Pour aider à la résolution de cet exercice une sphère céleste et deux gommettes, l'une pour la Lune, l'autre pour le Soleil aide à la compréhension des schémas. La matérialisation à l'aide d'une balle de ping-pong pour la Lune et par exemple d'une torche pour le Soleil permet de placer correctement l'un par rapport à l'autre. La «torche» tenue par un élève tourne autour de l'observateur.

Remarque : la torche doit être légèrement au-dessus de la tête de l'élève sinon il y a éclipse...

1/2 sphère transparente

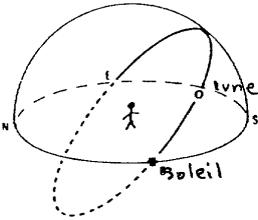


Figure 19



Figure 20



4) Pour se persuader de la double rotation de la Lune, d'une part révolution autour de la Terre, d'autre part rotation autour de son axe, une balle marquée d'un côté et montée sur tige aide à la compréhension.

La Lune présente toujours la même face à la Terre donc sa période de rotation est égale à sa période de révolution.

5) Travail à partir de photographies

Détermination du diamètre d'un cratère, appréciation de sa hauteur.

- Calculer le diamètre d'un cratère connaissant le diamètre de la Lune (exercice facile pour tout cratère de la zone centrale),
- Sur une photographie du même cratère à plus grande échelle, calculer la hauteur du cratère en mesurant la longueur de l'ombre portée. Il faut déterminer la direction du Soleil par l'observation des ombres. Cet exercice est difficile sans trigonométrie, il nécessite une double projection.

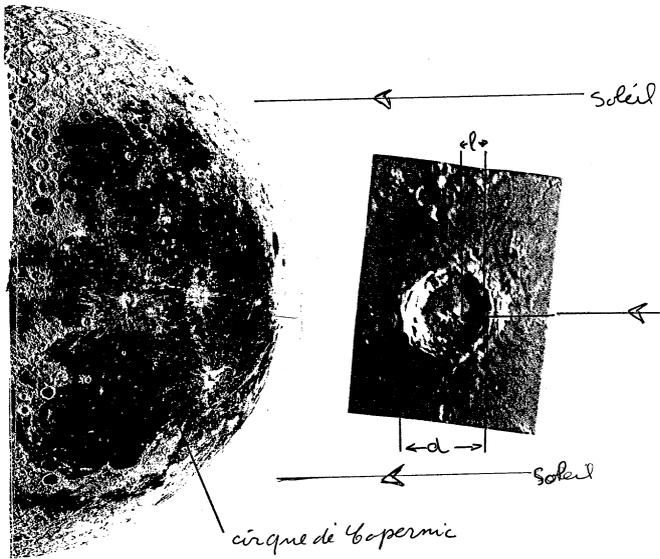


Photo 1

Photo 2

La mesure de d sur la photo 1 permet de calculer l'échelle de la 2^{ème} photographie (par la détermination du diamètre du cratère).

Pour déterminer la hauteur du cratère par la mesure de la longueur l de l'ombre il nous faut l'angle entre la verticale du cratère et la direction solaire. Nous pouvons le faire par construction géométrique (difficile pour des élèves de 1^{er} cycle mais certains peuvent le comprendre au niveau 4^{ème} à condition de matérialiser la sphère, les plans, les droites).

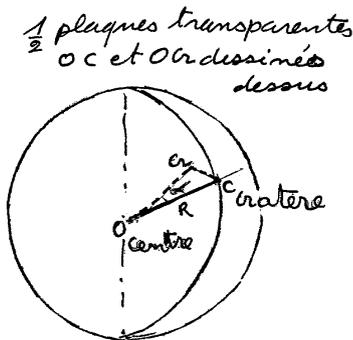


Figure 21

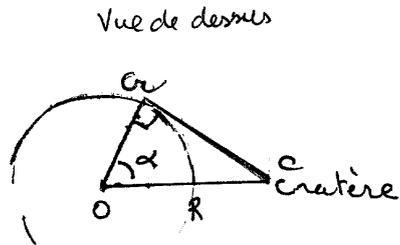


Figure 22

O Cr est la distance, centre cratère sur la photographie 1, elle est mesurable. Le rayon O C est le rayon de la lune. Nous pouvons par une construction, déterminer α . La suite est très facile car l'angle entre la direction des rayons solaires et le plan horizontal est $90^\circ - \alpha$. La connaissance de l permet de déterminer h.

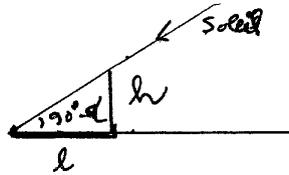
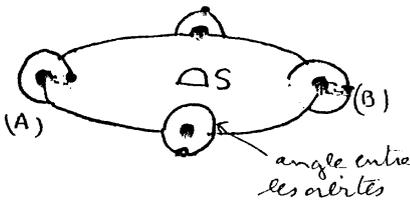


Figure 23

Il aurait bien sûr été plus facile et plus précis d'utiliser la trigonométrie.

6) Les éclipses

- utilisation de maquettes géorama ou autre,
- transparent du CLEA,
- maquette en carton décrite par le manuel de l'UNESCO montrant qu'il n'y a pas d'éclipse à chaque lunaison car l'orbite de la Lune est inclinée par rapport à l'écliptique (angle de 5° environ). Sur la maquette les angles sont exagérés.



A) éclipse de Soleil
 B) éclipse de Lune
 S boule de ping-pong
 Tet L en pâte à modeler

Figure 24

Remarques sur les schémas des livres

- 1) dans les représentations des phases de la Lune on ne comprend pas pourquoi il n'y a pas d'éclipse à chaque lunaison.
- 2) les rayons solaires sont représentés parallèles et sur le même schéma en faisceau cône pour les éclipses.

Il faut rappeler les ordres de grandeur :

– A l'échelle du laboratoire : celui-ci est très petit devant les dimensions astronomiques donc la lumière qui provient d'un point de l'espace forme pratiquement un faisceau de lumière parallèle.

– A l'échelle Soleil, Terre, Lune cette approximation n'est plus valable.

⇒ l'ombre portée de la Lune sur la Terre a des dimensions beaucoup plus petites que le diamètre lunaire.

4. PLANÈTES

1) Planétaire

Plusieurs réalisations sont possibles et faciles (B.U.P. n° 653 et n° 700). Nous pouvons par exemple tracer les orbites sur du papier fixé sur un panneau magnétique. Les planètes sont de petites punaises magnétiques.

Le planétaire doit être mis à jour régulièrement. Il montre que les planètes ne sont pas alignées et permet de déduire les conditions de visibilité.

Une fiche mensuelle, à côté, indique où et quand les planètes sont visibles. Nous indiquons également les principaux phénomènes astronomiques, ce qui incite les élèves à lever le nez.

2) Maquette à l'échelle du système solaire

Une idée commode est l'utilisation d'un mur de classe, les planètes sont des $\frac{1}{2}$ sphères (ballons, balles, pâte à modeler...). Deux échelles sont nécessaires si nous voulons que les planètes aient des dimensions visibles. A côté de chaque planète une fiche donnant les principales caractéristiques est intéressante.

3) Pour chaque planète nous soulignons les conditions d'observation à l'œil nu, avec de petits instruments, avec les gros et ce qu'a apporté l'observation spatiale. Un certain nombre d'exercices et de maquettes sont réalisables sur les différents mouvements apparents. L'unité astronomique qui représente environ la distance moyenne Soleil-Terre est très commode à introduire (sans en donner de définition plus précise).

L'observation des surfaces planétaires à partir de l'espace s'appelle télédétection. Celle-ci trouve des applications importantes pour la planète Terre (B.U.P. n° 701).

a) *Mercur*e $d_0 = 0,4$ u.a

(1) Conditions de visibilité

Exercice : Faire le schéma à l'échelle. A quels moments de la journée a-t-on des chances de voir Mercure ?

En 1^{ère} approximation nous considèrerons les trajectoires circulaires et centrées sur S.

$$\alpha \approx 28^\circ$$

la planète n'est observable que peu après le coucher ou peu avant le lever du Soleil, elle est visible à l'œil nu.

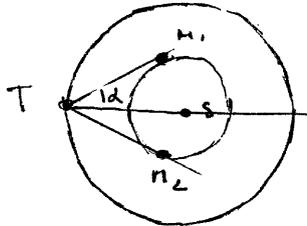


Figure 25

(2) Mercure tourne autour du Soleil en 88 jours. Des mesures par écho radar ont montré que la planète tourne sur elle-même en à peu près 59 jours. Une journée occupe quelle fraction de l'année ?

(3) Nous pouvons faire tracer la trajectoire apparente du Soleil vue d'un point de l'équateur de Mercure. Le travail doit être préparé avec soin car il est délicat. C'est une synthèse des deux constructions précédentes sur le mouvement apparent journalier et annuel du Soleil.

Il nécessite de tenir compte du mouvement elliptique de la planète sur son orbite.

Préparation du travail

L'orbite de Mercure a une excentricité de 0,2. Si le $\frac{1}{2}$ grand axe est représenté par 10 cm, le $\frac{1}{2}$ petit axe mesure 9,8 cm ce qui est très peu différent de 10 cm.

Par contre la distance au centre du Soleil est de $10 \times 0,2 = 2$ cm donc il faut en tenir compte. Nous représenterons la trajectoire de Mercure par un cercle, le Soleil étant excentré.

Pour la suite du travail, seules les variations angulaires nous intéressent. Nous pouvons donc représenter Mercure à une autre échelle nous prendrons 1,5 cm de rayon (afin que les figures ne se superposent pas et que cependant la précision soit suffisante).

Le jour mercurien représente les $2/3$ de l'année. Le pointage se fera tous les $1/9$ e de période (environ 10 jours terrestres). Pendant chaque intervalle de temps la planète tourne de $1/6^e$ de tour.

- tracé de l'orbite,
- utilisation de la loi de Képler pour trouver la position pour chaque intervalle de $\frac{T}{9}$.

t	$\frac{T}{9}$	$\frac{2T}{9}$	$\frac{3T}{9}$	$\frac{4T}{9}$
u°	58	103	137	166

Ces valeurs sont données par les tables.

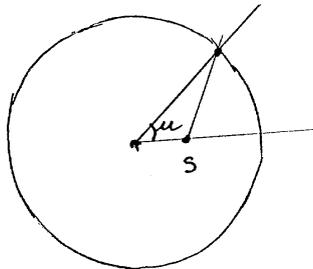


Figure 26

Le reste est obtenu par symétrie. Nous avons ainsi 9 positions sur l'orbite.

- en chaque point nous représentons la planète,
- repérons la direction d'une étoile fixe,
- sur la planète, pour chacune de ses positions inscrivons la place du point d'où l'observation est faite. Il se décale à chaque fois de 60° . Deux années s'écoulent (position 18) pour que la même configuration soit à nouveau obtenue.

b) *Travail* (assez facile s'il a été correctement préparé)

- A chaque position de l'observateur, traçons la direction du zénith et la partie de la planète qui est dans l'ombre.
- Sur un papier calque repérons le centre de Mercure, la position de l'observateur et la direction du zénith.
- Passons d'une position à l'autre en superposant les directions du zénith sur le calque et la feuille initiale. Pointons la position du soleil à chaque fois. La rotation du papier calque fait bien comprendre le phénomène rotation, révolution.
- La courbe trouvée fait deux boucles : le soleil semble s'arrêter dans le ciel au périhélie et aller très vite à l'aphélie.
- Sur le premier tracé, nous voyons que l'observateur reste 90 jours à l'ombre et 90 jours au Soleil (il suffit de hachurer la partie dans l'ombre). Ceci explique la très forte différence de température entre les deux faces de -170°C à 400°C . Rien ne vient tempérer la différence de durée d'ensoleillement puisque Mercure n'a pratiquement pas d'atmosphère (des traces de sodium et potassium résultent probablement du dégazage).

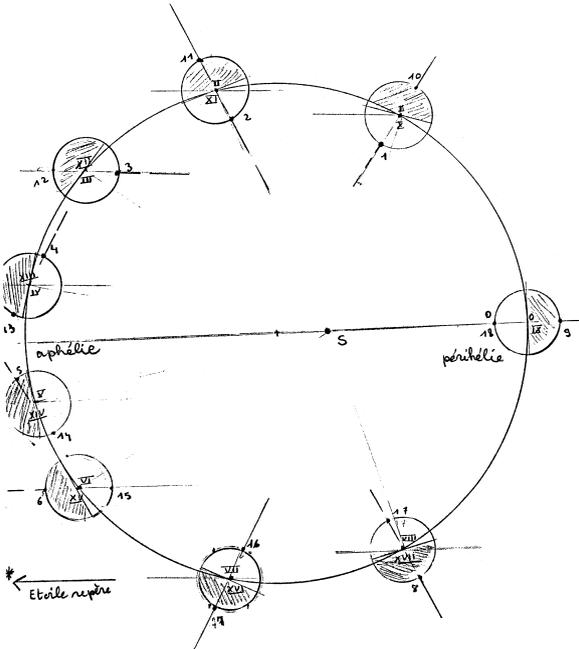


Figure 27 : Trajectoire de Mercure autour du Soleil.

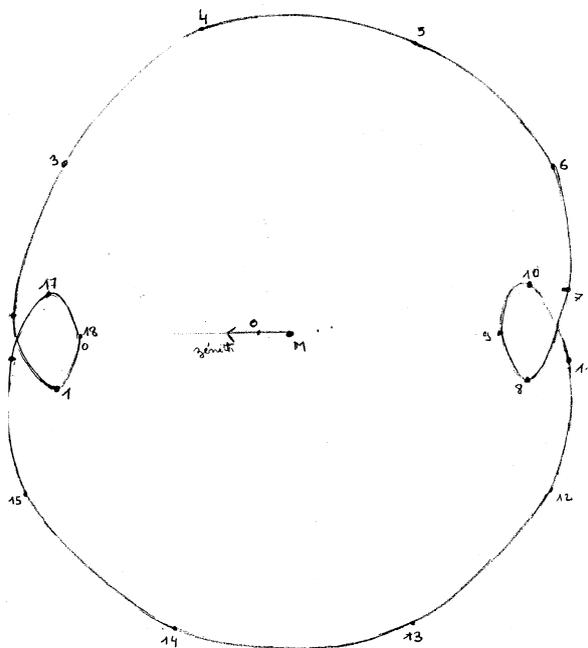


Figure 28 : Trajectoire apparente du Soleil vue à partir d'un point de Mercure.

b) *Vénus* $d_0 = 0,7$ u.a.

• Conditions de visibilité

Même exercice que pour Mercure $\alpha \sim 47^\circ$

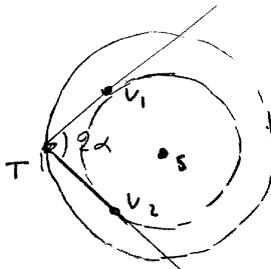


Figure 29

⇒ la planète est observable le soir ou le matin. Elle est souvent baptisée «l'étoile» du berger. Elle possède une épaisse atmosphère qui réfléchit la lumière solaire, elle est donc très brillante, sa distance à la Terre peut être relativement faible donc son diamètre apparent grand (par exemple dans les cas de la Figure 29). Vénus présente deux phases.

Exercice :

Comment voit-on Vénus à son élongation maximale ? (cas de la Figure 29). Les phases sont visibles avec de petits instruments.

• Particularités

Vénus tourne autour du Soleil en 225 jours et elle tourne sur elle-même en 243 jours dans le sens inverse des autres planètes. Cette mesure a été faite par écho radar car pour la lumière visible le sol de Vénus est caché par les nuages et ceux-ci tournent dans l'autre sens en 4 jours.

Son atmosphère est constituée surtout de dioxyde de carbone qui par «effet de serre» empêche la chaleur de s'éliminer d'où une température au sol voisine de 470°C partout. Entre 48 et 68 km d'altitude il y a des nuages d'acide sulfurique. La pression au sol est environ 100 fois celle sur le sol de la Terre.

Son exploration par l'URSS a été très importante (sondes Vénéra de 1970 à 1983 et sondes Véga en 1985). Des sondes et des ballons ont permis des mesures et l'étude dynamique de l'atmosphère. Les USA ont envoyé des sondes Mariner et Pioneer qui ont permis par écho radar de cartographier l'ensemble de la planète. D'autres missions de cartographie plus précise sont prévues par les USA dans un proche avenir.

c) *Mars* $d_0 = 1,5$ u.a.

Des exercices et maquettes sur Mars semblent particulièrement intéressantes quand les médias en parlent beaucoup.

• Pour comparer le mouvement de la Terre et de Mars autour du Soleil il est possible de réaliser une maquette animée par des engrenages mécanos. Cela permet d'illustrer l'étude des mouvements apparents et de mieux les visualiser. La période de révolution de Mars est d'environ le double de celle de la Terre.

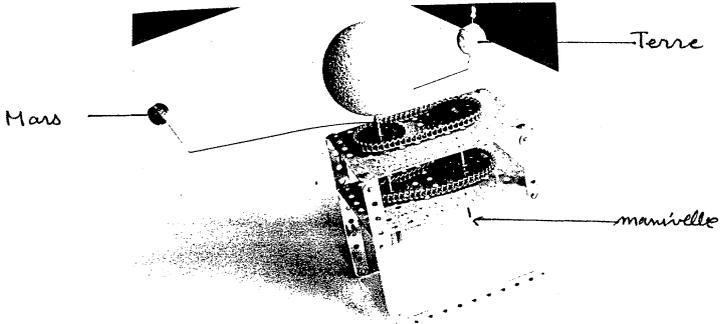


Photo 3

- Mouvement apparent de Mars vu de la Terre (B.U.P. n° 653).
Pour mieux fixer les idées sur les durées écoulées nous pouvons pointer les positions tous les mois terrestres.
- Mouvement apparent de la Terre et du Soleil vu par un terrien explorant Mars
Pour ces deux exercices le repérage se fait par rapport à des étoiles fixes comme pour le mouvement annuel du Soleil.

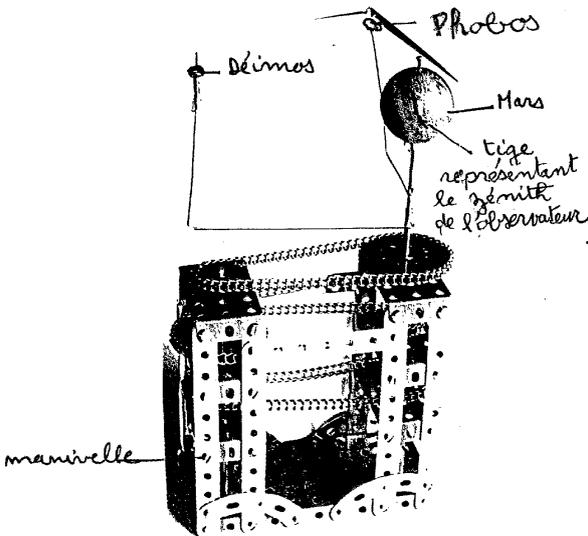


Photo 4

• Mouvement apparent des satellites de Mars

Une maquette réalisée en mécano permet de montrer les mouvements réels. Les axes sont des tiges de laiton s'emboîtant les unes dans les autres. Nous nous plaçons sur l'équateur de Mars et nous observons le mouvement des satellites. Le repérage se fait par rapport au zénith de l'observateur.

La planète et les trajectoires peuvent se représenter à la même échelle.

En effet : diamètre de Mars 6 794 km ;
 diamètre de l'orbite de Phobos 18 760 km ;
 diamètre de Deimos 46 920 km.

Seule la dimension des satellites est exagérée. Nous avons pris :
 période de rotation de Mars : 24 h 37 mm ~ 24 h ;
 période de révolution de Phobos : 7 h 39 mm ~ 8 h ;
 période de révolution de Deimos : 30 h 18 mm ~ 32 h.

Les élèves ont reçu une feuille représentant les positions successives de l'observateur, de Phobos, de Deimos (voir Figure 30).

Sur papier calque ils ont représenté le centre de Mars, le point d'observation et la verticale (zénith) puis ils ont pointé avec soin les positions des satellites pour chaque position de l'observateur.

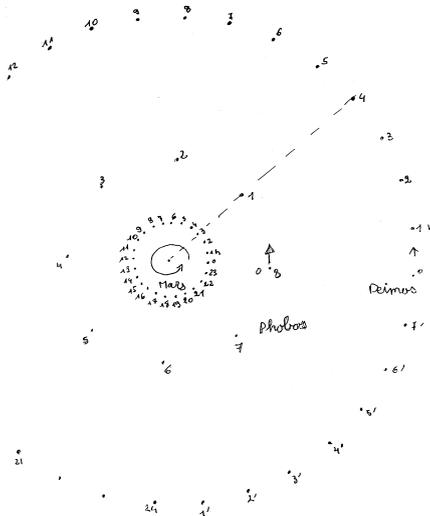


Figure 30 : Mouvements réels de Mars et de ses satellites.

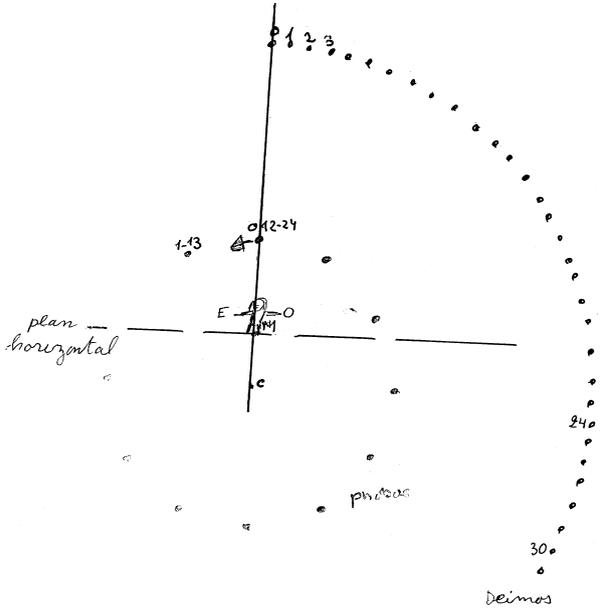


Figure 31 : Mouvements apparents vus d'un point de l'équateur sur Mars.

Conclusions :

L'observateur est en M. Il voit tourner Phobos dans le sens réel et Deimos dans le sens rétrograde.

Représentons le plan horizontal qui passe par M. Nous voyons qu'en 24 h, Phobos passe deux fois alors que Deimos n'est visible que tous les trois jours.

Dans le cas choisi, il est possible de trouver les heures de lever et de coucher et surtout de voir que Phobos se lève à l'ouest et Deimos à l'est. Pour repérer les directions utilisons une maquette constituée par une boule de polystyrène montée sur axe et sur l'équateur de laquelle est fixé un personnage debout.

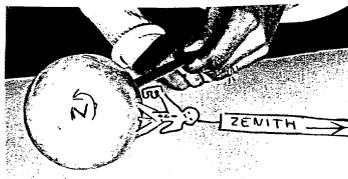


Photo 5

- Panneau avec les orbites de Mars, de la Terre et de la sonde Phobos.

L'orbite la plus commode pour aller de la Terre à Mars est celle qui est tangente aux 2 orbites des planètes. Le grand axe de l'ellipse décrite par la sonde est donc la somme des grands axes des orbites terrestre et martienne.

En première approximation supposons les orbites de la Terre et de Mars circulaires et centrées sur le Soleil. Le demi grand axe de l'ellipse vaut donc 1,25 u.a. D'après le 3^e loi de Képler $\frac{T^2}{a^3} = 1$ (autour du Soleil). La sonde parcourt son orbite en $T = 1,397$ ans = 16,8 mois ~ 17 mois. Il faut donc 8 mois 1/2 pour arriver jusqu'à Mars.

Pour positionner les deux planètes chaque mois nous savons que la Terre décrit son orbite en 12 mois et Mars pratiquement en 24 mois terrestres.

Pour la sonde il nous faut tenir compte de la loi des aires.

Calculons l'excentricité de l'ellipse $e = \frac{OS}{OT} = 0,2$.

T position de la Terre au départ

M position de Mars à l'arrivée

O milieu de MT.

Cette excentricité est faible et nous considèrerons sur la maquette que la trajectoire de la sonde est un cercle centré sur O. L'angle u est donné par les tables.

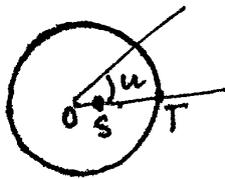


Figure 32

Nous avons trouvé :

t mois	1	2	3	4	5	6	7	8
u	32°	62°	87°	108°	136°	150°	162°	175°

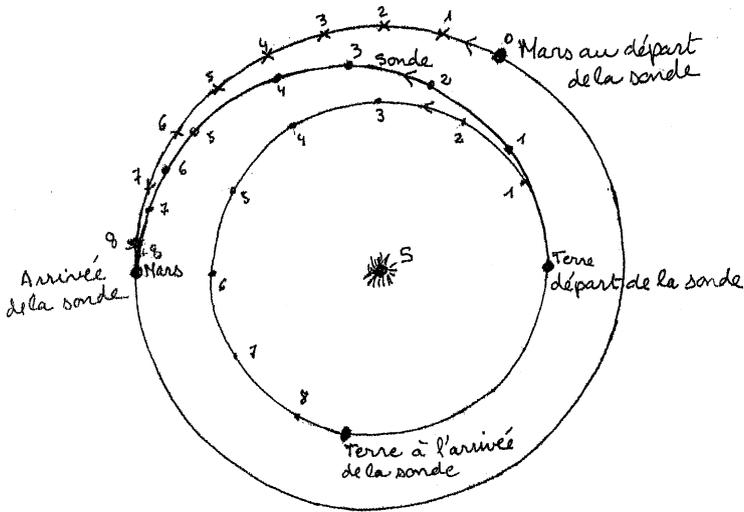


Figure 33

d) *Jupiter* $d_0 = 5,2$ u.a.

- Observation des plus gros satellites aux jumelles ou avec de petites lunettes.
- Attention à l'affirmation «Jupiter est un étoile ratée». La masse de la planète est beaucoup trop faible donc il n'est pas question d'étoile. L'énergie dégagée est supérieure à l'énergie reçue ce qui montre que les phénomènes de contraction gravitationnelle ne sont pas terminés. Jupiter possède des anneaux photographiés par les sondes Voyager. Une mission avec exploration par des ballons est prévue (mission Galileo).

e) *Saturne* $d_0 = 9,5$ u.a.

- Observation des anneaux avec de petits instruments (ex. lunette 60 mm).
- Comme Jupiter, Saturne continue à se contracter (bilan énergétique).
- Parmi ses nombreux satellites le plus gros, Titan, fascine les astronomes. Ils y ont découvert des molécules organiques et se demandent si celles-ci ne ressembleraient pas à celles qui ont été à l'origine de la vie.

f) Uranus $d_0 \sim 19$ u.a.

Il a son axe de rotation très incliné sur son orbite. Il possède de nombreux satellites très variés dont l'un d'eux Miranda intrigue particulièrement. Uranus possède de fins anneaux.

g) Neptune $d_0 \sim 30$ u.a.

La sonde Voyager 2 l'a survolée en 1989. Un exercice intéressant est le calcul du temps nécessaire aux informations pour nous parvenir à partir de la sonde.

h) Pluton $30 \text{ u.a.} < d_0 < 50 \text{ u.a.}$

Son orbite est très elliptique et son plan très différent de celui des autres planètes (angle de 17° avec l'écliptique). Planète très mal connue et vers laquelle il sera difficile d'envoyer une sonde. Elle et son satellite Charon constituent un système double.

i) Les «petits corps»

Les astéroïdes sont surtout situés entre Mars et Jupiter mais on en trouve en d'autres lieux. Des projets sérieux veulent utiliser certains astéroïdes comme source de métaux dans un avenir plus ou moins proche.

Les comètes : l'exploration de la comète de Halley par les sondes Véga et Giotto a montré quelques faits inattendus. La surface est très noire et en conséquence la température de surface élevée. Dans les poussières il y a présence de molécules déjà complexes contenant les éléments C, H, O, N. La sonde survolera la comète Grigg-Skjellerup en juillet 1992.

Les comètes proviennent d'une région de l'espace que l'on situe à environ 50 000 u.a.

5. ÉTOILES

A) Maquette en relief d'une constellation

Pour la Grande Ourse le schéma de principe est donné par le fascicule 4^e de Strasbourg. Avec les diapositives d'accompagnement nous avons celui de la Constellation d'Orion. Elle permet de montrer des étoiles dont les couleurs sont visibles même à Paris, et des nébuleuses.

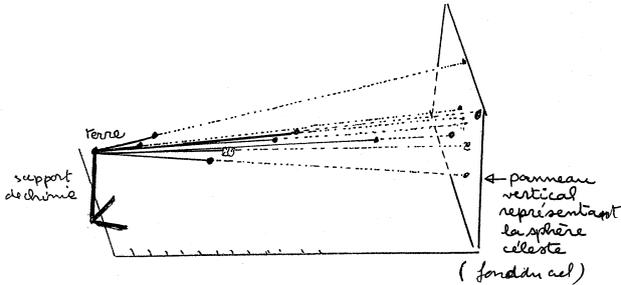


Figure 34

Les rayons de lumière provenant de chaque étoile sur la Terre sont représentés par un fil de nylon. Ce qui est derrière l'étoile et qui représente la droite de projection sur la sphère céleste est en laine noire. Les étoiles sont de petites perles ou des boules de cotillon. Leur couleur est respectée (par exemple Bételgeuse rouge, Rigel bleutée). La grande nébuleuse est une boule de cotillon défaits. Le fond du ciel est un panneau vertical peint en noir et les étoiles sur ce fond sont représentées par des attaches parisiennes qui permettent également d'attacher le fil. Sur le plan horizontal, il est possible de tracer l'échelle des distances.

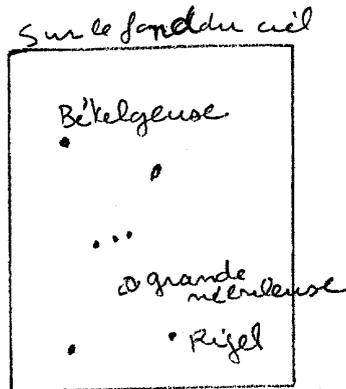


Figure 35

Un panneau accompagne le montage expliquant pourquoi les étoiles ne peuvent être représentées à l'échelle et indiquant que la grande nébuleuse a une extension dans l'espace énorme comparée à la dimension des étoiles.

Sur le panneau nous montrons des photographies de la Constellation et de la nébuleuse, véritable «pépinière» d'étoiles. Les distances de la Terre aux étoiles sont proportionnelles aux distances réelles. Le panneau a au moins 1,5 m de long. La longueur des « fils» noirs est la plus courte possible. Sur la Terre un œil collé montre la direction de visée.

B) Les distances dans l'Univers

Nous nous sommes inspirés du film et du livre les puissances de 10 pour faire un panneau sur les différentes échelles.

Nous utilisons également le schéma tiré du document de Strasbourg.

Quelques remarques nous paraissent importantes à propos des étoiles et constellations :

- Les étoiles sont tellement éloignées de nous qu'elles semblent ponctuelles. Il est utile de donner les diamètres de quelques étoiles comparé au diamètre du Soleil.

- La distance des étoiles les plus proches et les plus brillantes, par exemple :

Proxima du Centaure : plus de 4 a.l.

Sirius : 8,6 a.l.

Bételgeuse : 650 a.l.

Véga : 26,5 a.l.

L'étoile polaire : 300 a.l.

Remarquons que celle-ci n'est pas exactement au pôle et que sa position varie au cours du temps. L'éclat apparent des étoiles dépend de leur éclat propre mais aussi de leur distance à la Terre.

- Les étoiles d'une même Constellation ne sont pas situées de façon immuable dans la même direction. Leur position varie les unes par rapport aux autres. Ce résultat a été obtenu par comparaison des cartes du ciel actuel et des cartes très précises du monde antique (surtout chinois).

C) Le Soleil

1) *Le mouvement du Soleil par l'observation des taches solaires*

A l'aide d'une petite lunette ou de jumelles il faut faire l'image du Soleil sur un écran.

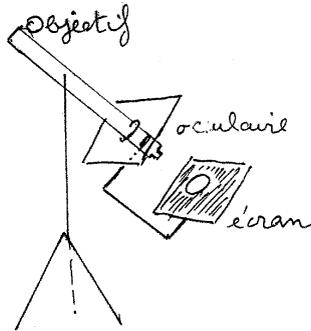


Figure 36

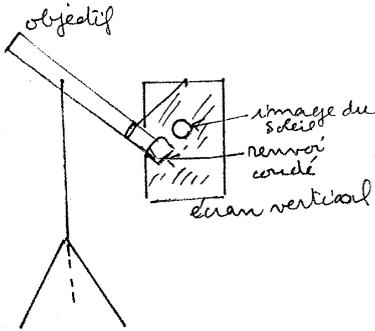


Figure 37

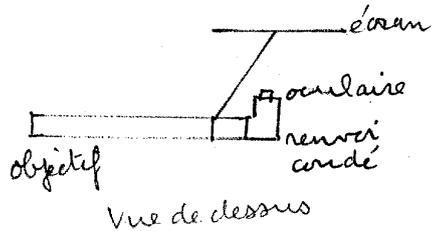


Figure 38

Dans le montage utilisé lors des relevés nous avons placé en bout de lunette un renvoi coudé mais la mesure est réalisable sans celui-ci.

Il est possible de s'arranger pour que le diamètre de la tache soit de 7 cm (diamètre réel $\sim 700\,000$ km).

Sur un papier millimétré traçons un cercle de ce diamètre et faisons coïncider l'image du Soleil avec le cercle. Pointons les taches sur le papier. Laissons défiler et notons la direction du « défilement » cela donne la direction EO terrestre.

Effectuons ce pointé plusieurs jours de suite sur des papiers différents. Les taches se sont déplacées. Elles disparaissent en quelques jours. A chaque pointé il faut noter le jour et l'heure.

Interprétation et exploitation des résultats :

- le Soleil a un mouvement propre,
- sur le même papier calque reportons les points successifs pour une

tache. Les points sont alignés sur une droite qui est la trace du petit cercle sur le Soleil. C'est donc la direction OE du Soleil. Nous pouvons en déduire le pôle nord solaire et comparer avec la direction du nord terrestre...

Déterminons sur le relevé cette direction.

L'observateur voit le faisceau s'inverser dans le plan horizontal après la lunette. Après le renvoi coudé il y a redressement.

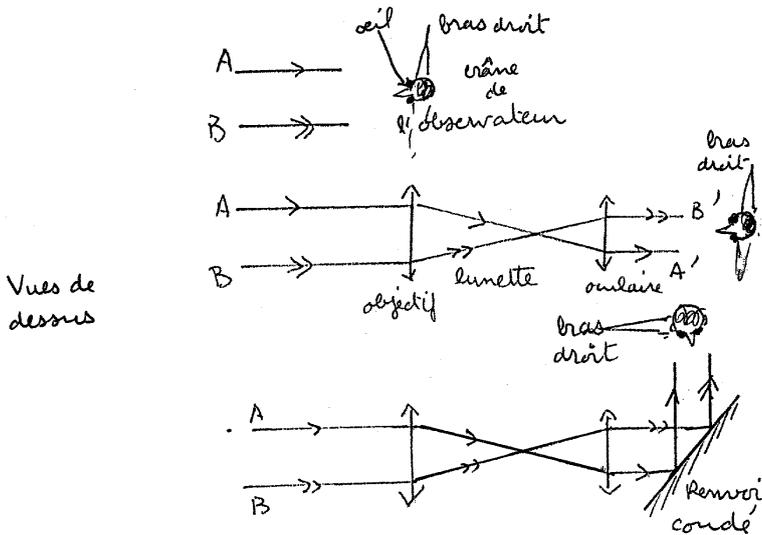


Figure 39 : Observation des faisceaux dans un plan horizontal.

Par contre si nous considérons le plan vertical, il y a inversion après la lunette et celle-ci est conservée après le renvoi coudé.

Sur les relevés Ouest et Est sont rétablis, Nord et Sud sont inversés. Ceci est valable pour les points cardinaux terrestres. Pour l'orientation du Soleil nous définissons le nord par le sens direct de rotation des taches.

Nous remarquons alors que l'axe du Soleil fait un angle avec l'axe terrestre. Nous pourrions déterminer cet angle et vérifier si la valeur trouvée correspond à celle donnée par les éphémérides pour la période.

Pour trouver l'angle dont la tache a tourné il faut rabattre le petit cercle (pour les élèves il est nécessaire de matérialiser la sphère).

Dans l'exemple nous avons trouvé $\alpha \sim 50^\circ$ pour une durée de 4 j 30 m. Ce qui donne une période de rotation $\frac{360}{50} \times 4 \sim 29$ jours valeur qui semble raisonnable (la période de rotation du Soleil est plus faible mais la Terre s'est déplacée). Il est possible mais plus délicat étant donné les incertitudes de montrer par cette méthode que les points les plus éloignés de l'équateur tournent moins vite (le Soleil est une masse fluide).

2) *Bleu du ciel et Soleil couchant*

a) *Le fond du ciel est une source diffusante*

Hors de l'atmosphère le ciel est noir. Cette diffusion est due aux molécules de l'air. Elle est d'autant plus importante que la couche d'air traversée est plus importante.

Le Soleil semble rose au coucher.

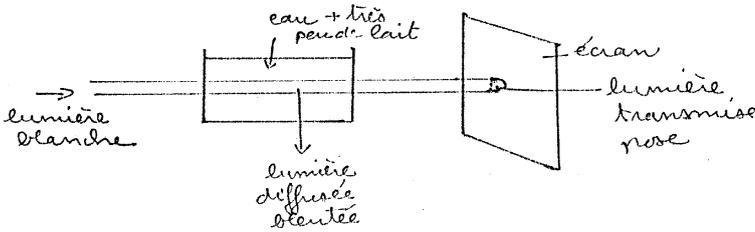


Figure 40

b) *Au coucher, le Soleil semble aplati*

Ce phénomène n'a rien à voir avec l'aplatissement réel dû à la rotation.

Il est d'autre part encore visible alors que l'heure de son coucher est passée. C'est un phénomène de «mirage» qui permet d'expliquer ces observations. Les couches d'air de l'atmosphère ont un indice qui décroît en moyenne avec l'altitude.

N.B. le phénomène de réfraction atmosphérique existe de la même façon pour les étoiles. Le milieu n'étant pas homogène et isotrope la lumière ne se propage pas en ligne droite.

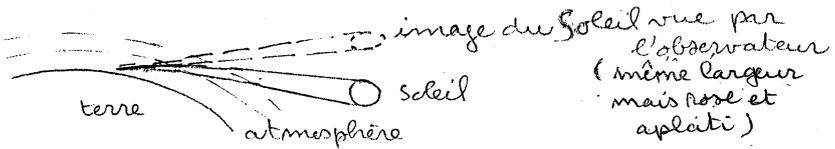


Figure 41

Plus les couches traversées sont denses plus le phénomène s'accroît.

Expériences :

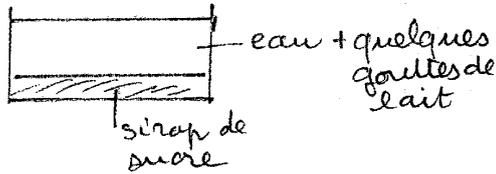


Figure 42

Il se forme rapidement un gradient d'indice.

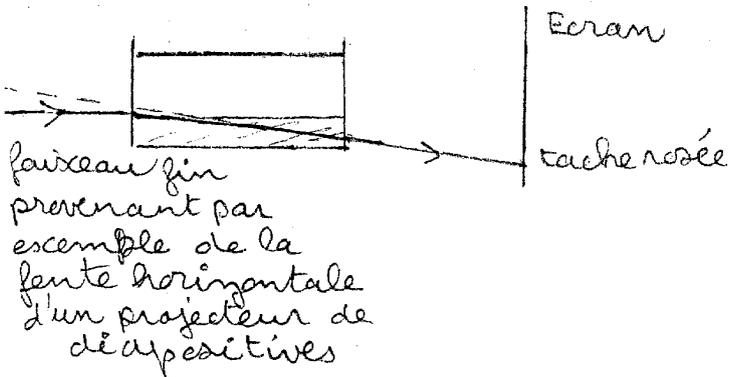


Figure 43

Si l'œil de l'observateur se trouvait en ce point il verrait la lumière venir de «plus haut» que la source réelle.

Pour simuler le Soleil et l'atmosphère nous pouvons prendre une lampe de poche et l'observer à travers la cuve. Il faut choisir par

tâtonnements la position de la lampe et celle de l'œil. L'image de la lampe est «surélevée», aplatie et rose.

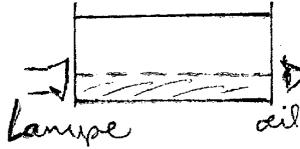


Figure 44

3) Principe du four solaire

Expérience :

L'élévation de température est visible rapidement.

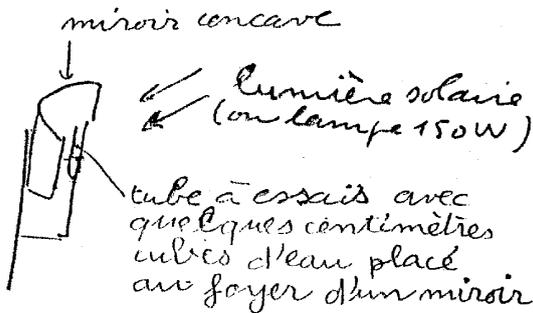


Figure 45

4) Principe du chauffe-eau solaire

Mise en évidence du rôle des différentes parties.

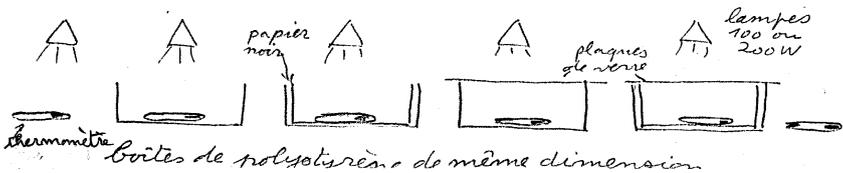


Figure 46

Température extérieure dans le voisinage 20°C au début 25°C à la fin.

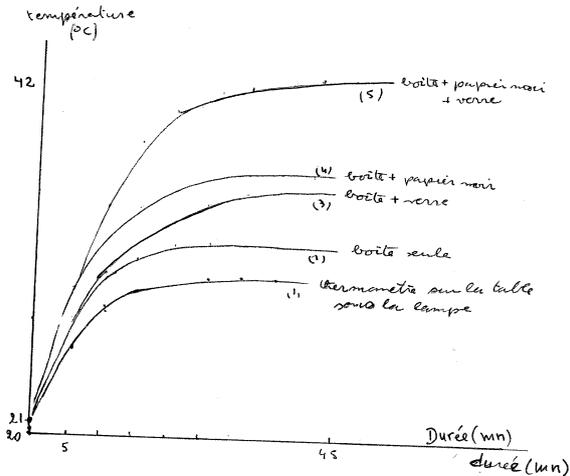


Figure 47

Boîte de 25 cm de diamètre et 6 cm de haut, lampes 200 W.

- (1) → (2) Les courants de convection sont réduits (la table est en bois).
 (2) → (3) Léger effet de serre et réduction des courants de convection.
 (2) → (4) Le papier noir a absorbé la lumière visible et s'est échauffé.
 (5) La «chaleur» ne peut pas sortir de la boîte car celle-ci est isolante. Le verre en première approximation est isolant. A la température atteinte, le papier noir émet des rayonnements infrarouges. Le verre est «opaque» à ce rayonnement alors qu'il est «transparent» à la lumière visible et aux proches infrarouge.

N.B. Dans la boîte formant un réel «chauffe-eau» la circulation de l'eau dans le serpentin placé au fond permet d'éliminer progressivement la chaleur.

BIBLIOGRAPHIE EN ASTRONOMIE

- Cahiers Clairault - CLEA laboratoire d'astrophysique - BAT 470 - Université Paris Sud - 91405 ORSAY.
- Rapports d'activité des stages d'été du CLEA.
- Astronomie 4^e - CRDP de Strasbourg.
- Pratique de l'astronomie - éditions CEDIC.
- Fiches pédagogiques du CLEA.