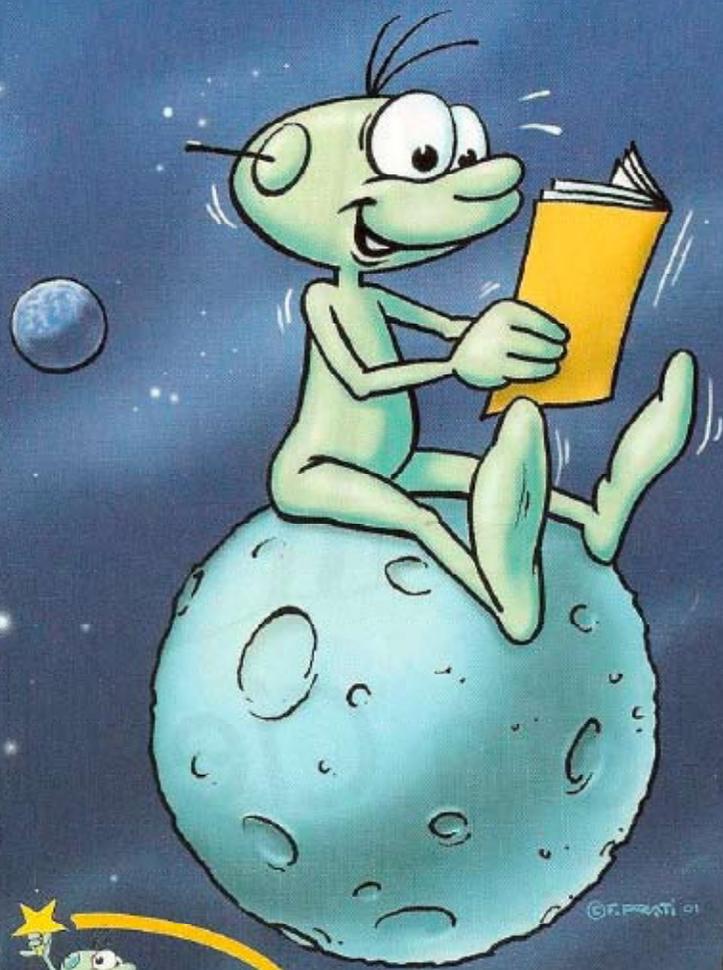


# GUIDE DU PARCOURS

CLAUDE NICOLIER



VEVEY - BLONAY - LES PLÉIADES

# L'idée du projet :

se référer à une même base.

De poste en poste, une nouvelle échelle est prise

La distance de référence reste toutefois la même. (15.6 km)



# ASTROPLÉIADES

Le parcours Claude Nicollier:  
avec nous, découvrez l'astronomie !

Mise à jour : 1<sup>er</sup> décembre 2008



# ASTROPLÉADES

Le parcours Claude Nicollier:  
avec nous, découvrez l'astronomie

Parti d'une idée de Hansjörg Grauer,

Soutenu par  
la Compagnie des chemins de fer électriques veveysans (CEV),  
les communes du district de Vevey,  
l'Observatoire de Genève,

ce parcours d'initiation à l'astronomie a reçu les encouragements de Claude Nicollier,  
astronaute, qui a accepté de le parrainer.

Il a été réalisé avec le soutien de:  
Michel Sandoz, Golden Pass Service (GPS)  
Henri Mamin, Syndic de Blonay  
Jean-François Bopp, Observatoire de Genève  
Gérard Bridevaux et Olivier Nicolet, GPS  
Hansjörg Grauer et René Durussel.

Ont prêté leur tête et parfois leurs mains:  
les mêmes, plus:  
le Centre d'Enseignement Professionnel du Nord Vaudois, (CEPNV), à Yverdon  
Un groupe d'élèves des écoles de Blonay et  
leur maître de travaux manuels Olivier Dormond  
Joseph Abbagnato, Vevey.

La brochure a été réalisée par  
René Durussel et Fabrice Prati, graphiste.

Mise en pages et impression par  
inEDIT Publications SA, Saint-Sulpice.

# LE PARCOURS CLAUDE NICOLLIER:

Une initiation à l'astronomie moderne qui vous fera découvrir l'Univers en quatre grands sauts dans l'espace en faisant travailler vos yeux, vos mains... et votre tête ! à votre niveau, que vous soyez enfant ou adulte, débutant ou connaisseur.

Installé sur la prairie derrière l'Hôtel des Pléiades, le parcours CLAUDE NICOLLIER compte quatre étapes:

1. **Notre observatoire terrestre**
2. **Le système solaire**
3. **Vers les prochaines étoiles**
4. **Notre Galaxie et l'amas local de galaxies.**

## *Votre guide Astrognomus*

«Et maintenant, permettez que je me présente: votre guide Astrognomus.»

«Je vis au royaume des songes, dans les livres.

Selon vos besoins, vous me reconnaîtrez à ma coiffure:



pour les enfants



pour Madame et Monsieur Tout-le-Monde



pour les savants et ceux qui croient l'être.»

«Vous me suivrez fidèlement tout au long du parcours AstroPléiades. Avec ma baguette, je vous donnerai les indications utiles:



Cette expérience ne fonctionne que si le Soleil brille



Observez !



Utilisez votre tête pour réfléchir !



Utilisez vos mains !



Voici une tâche de fourmi, pour gens patients uniquement !



Posez-vous la question !



Consultez le complément théorique...  
et creusez la question chez vous!



C'est une question que vous pourrez traiter, si vous voulez, plus tard, à la maison.



...Mais permettez que je vous souffle un bon conseil.  
Vous trouverez à la fin de la présentation de chaque étape un complément théorique donnant les réponses aux questions posées. Si vous le lisez trop tôt, vous perdrez le plaisir de la surprise!  
Commencez par utiliser votre tête et vos mains.

Et maintenant, en route !»



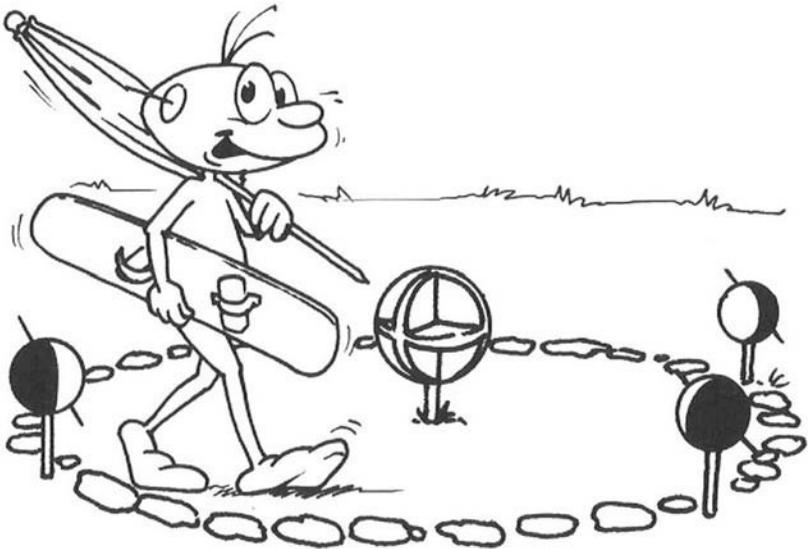
## Première étape

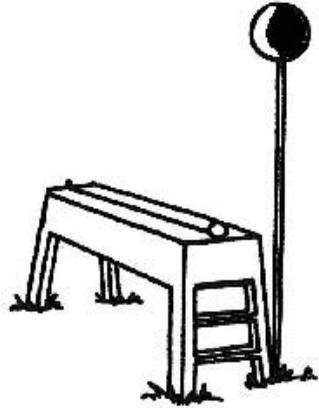
# NOTRE OBSERVATOIRE TERRESTRE

Des Pléiades au Grammont (le sommet qui se trouve de l'autre côté du lac Léman, en face de nous), la distance est de 15'600 mètres ou 15,6 kilomètres. Cette distance nous servira de base.

A cette première étape, puisque nous sommes sur la Terre, cette base représente la réalité, soit une distance de 15,6 km

Cela vous paraît un peu...simple ? Attendez la suite !



**Objet 1: L'éclipse de Soleil.**

Ce modèle est la réplique d'une construction réalisée par l'Université de Genève à l'occasion de l'éclipse totale de soleil du 11 août 1999. Durant tout l'été, elle a fait le plaisir de milliers de visiteurs.

Matérialisé par une grande boule colorée de 4,5 mètres de diamètre, le **Soleil** était installé sur la jetée des Bains des Pâquis. Plusieurs estrades placées le long des quais, toutes à la même distance de la boule, portaient la **Terre** et la **Lune** représentées par une balle de golf et une bille.

Ce modèle a été adapté à l'environnement des Pléiades, le diamètre du disque solaire est de 3.40 m. Il respecte à la fois la taille des astres et leurs distances respectives.

La réduction est à l'échelle de 1 trois cents millionnièmes (1: 300'000'000).



Sur le mât vertical est juchée une boule représentant la lune. Sa partie côté soleil est en blanc, parce qu'elle est éclairée. A une distance de 5 mètres, tournez autour du modèle. Observez les différentes **phases** de la Lune sur cette grande boule.



Identifiez sur l'estrade les petites boules représentant la Terre et la Lune.



Placez-vous dans l'axe du modèle et opérez la visée en suivant les indications des écriteaux. Que remarquez-vous ?



Une question... dans le bleu:

Si, mentalement, vous comparez le Soleil

et la Pleine Lune tels que vous les voyez à l'oeil nu dans la réalité, lequel des deux paraît le plus grand ?



Revenant à l'observation que vous venez de faire, réfléchissez à cette maxime:

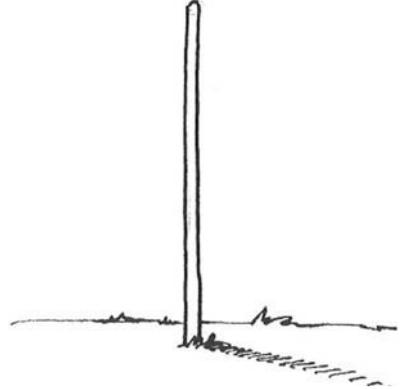
*" Le hasard fait souvent bien les choses ! "*

*Car il y a, à la base de cette éclipse, un heureux hasard. Lequel ?*

**Objet 2: Le gnomon.****Le gnomon.**

Simple bâton planté verticalement dans le sol. La longueur et la direction de son ombre varient selon la position du Soleil.

Le gnomon est le plus ancien instrument de l'astronomie. Malgré sa grande simplicité, il a déjà permis aux astronomes de résoudre des problèmes assez difficiles il y a trois mille ans.



A la pointe de l'ombre du gnomon, sur le sol, posez un objet facile à identifier (corolle de fleur, brindille). Revenez dans environ un quart d'heure. Que constatez-vous ?



Faites la même expérience avec un intervalle de 1 heure.



Comment était l'ombre du gnomon (direction, longueur) au lever du Soleil ? Comment sera-t-elle au coucher du Soleil ?

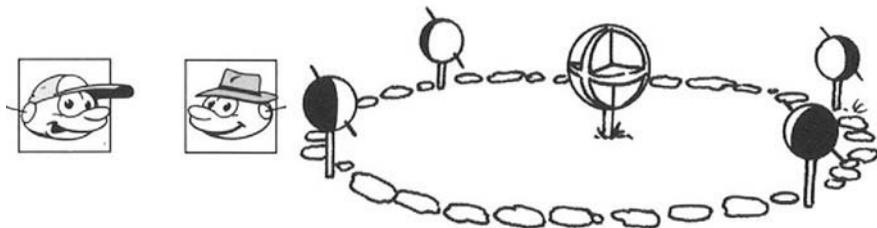


A quel moment de la journée l'ombre sera-t-elle la plus courte ? Quelle sera sa direction ?



A quel moment précis (jour, heure) de l'année l'ombre sera-t-elle la plus courte possible ?

Comment feriez-vous pour mesurer avec le gnomon la **durée de l'année** ?

**Objet 3: Les saisons****Le jour et la nuit.****L'année et ses quatre saisons.****Notre Soleil.**

Notre Soleil est l'étoile la plus proche, sans laquelle la vie ne serait pas possible sur notre planète. Il nous dispense gratuitement la lumière, la chaleur et toute une gamme de rayonnements porteurs, selon leur dosage, de vie ou de mort.

**Les saisons.**

Cette expérience vous propose d'observer le phénomène des saisons. Quatre globes sont placés sur l'orbite terrestre, chacun marquant la position qu'occupe notre planète au début d'une saison.



Regardez la Terre au printemps. Faites-la tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (telle est la réalité) autour de la tige de métal qui représente son **axe**.



Les deux endroits où la tige sort du **globe terrestre** sont le **Pôle Nord** (en haut) et le **Pôle Sud** (en bas). Le grand cercle situé à mi-chemin entre les pôles s'appelle l'**Equateur**.

Sur ce globe, dans un petit trou situé à la hauteur (**latitude**) correspondant à l'Europe, on peut planter un brin d'herbe représentant **Astrognomus**.



Faites un effort d'imagination:

si **Astrognomus**, depuis l'endroit où il est situé, voit le Soleil qui est au centre du modèle, pour lui, il fait jour !

s'il ne voit pas le Soleil, c'est qu'il fait nuit !



Oui, on le sait, mais rappelons-nous: la Terre tourne sur elle-même, en ... jour (= ... heures). En même temps, elle tourne autour du Soleil en ... **année** (ou en .....jours et 1/4).



Prenez un peu de recul et observez, sur les quatre globes, l'axe de la Terre. Que pouvez-vous dire de sa direction ?

*Dans l'hémisphère Nord où nous vivons, cet axe est, par hasard, pointé en direction d'une étoile assez brillante et facile à repérer la nuit.*

*La connaissez-vous?*



Faites tourner lentement le globe dans le sens des aiguilles d'une montre et, comme si vous étiez à la place d'Astrognomus, annoncez les événements suivants:



«je suis encore dans la nuit, mais le Soleil va bientôt se lever.»  
 «Le Soleil se lève... il est levé ! C'est le début du jour »  
 «Il est maintenant midi !»  
 «Le Soleil va se coucher»  
 «Le Soleil est couché, la nuit tombe.»  
 «Il est minuit.»



Allez maintenant retrouver Astrognomus sur le globe «Eté», puis sur le globe «Hiver». En vous imaginant à sa place, faites-les tourner comme précédemment.



Sur lequel de ces deux globes le Soleil éclairera-t-il Astrognomus, pendant une journée:  
 le plus longtemps ?  
 le moins longtemps ?  
 Que pouvez-vous dire des nuits qui suivent chacune de ces journées ?



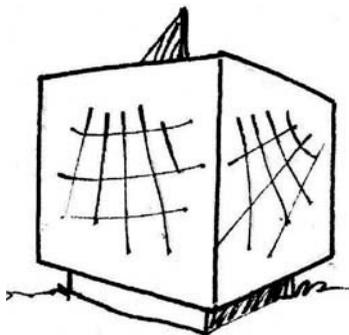
Faites la même chose avec les globes du Printemps et de l'Automne. Que pouvez-vous dire de la longueur du jour et de la nuit à ces deux saisons ?



Pour terminer, revenez au globe correspondant à l'Eté. Imaginez qu'Astrognomus se déplace, de l'endroit où il est planté, dans la région du Pôle Nord.



- Pour l'Esquimau Astrognomus
- Quelle serait là-haut la durée du jour ?
- Que se passerait-il, au même moment, s'il était logé au Pôle Sud ?

**Objet 4: Le cube à trois temps**

*Faisons une exception à la règle !  
Pour comprendre les questions qui suivent, il sera  
utile de consulter sans tarder le «complément  
théorique» qui les suit...*



Commençons par la face verticale Sud du cube. Le Soleil y indique le **Temps Solaire Vrai** aux Pléiades. C'est celui qui rythmait les journées des habitants des Pléiades il y a 100 ans.



Cette horloge indiquerait-elle la même heure à Genève ou à Coire ?

Sur la face supérieure du cube, le Soleil indique le **Temps Civil Moyen**. C'est l'heure de nos montres, mais avec un écart variable pouvant atteindre plus ou moins 16 minutes.

Pour obtenir l'**heure** exacte qu'indique votre montre, il faut appliquer la correction de l'**Equation du Temps**, vous la trouverez sur le graphique figurant au bas du cadran.



Lisez sur le **cadran** solaire l'heure indiquée par la pointe de l'ombre du triangle noir (que l'on nomme aussi **style**).



En passant... pourrait-on, à l'aide de ce même cadran et grâce à la longueur de cette ombre, dire à quelle saison nous vivons maintenant?

Prenez la peine d'étudier ce graphique.



- Quelle est la valeur maximum possible de l'équation du temps ?
- A quelles dates surviennent les valeurs maximum ?
- Y a-t-il des dates où la concordance du cadran et de votre montre sera parfaite, sans aucune correction ?



Lisez, sur le graphique de l'Equation du Temps, sa valeur pour aujourd'hui. Faites l'opération : heure de l'ombre du triangle noir + ou - Equation du Temps. Comparez le résultat avec l'heure de votre montre.

Lisez enfin le Temps Universel sur l'une des faces latérales du cube, celle éclairée par le Soleil.

De combien d'heures diffère-t-il du temps indiqué par votre montre ?

### Pour prendre congé, une question:



Vous avez acquis, ou rafraîchi, un grand nombre de connaissances tout en gardant vos deux pieds sur la Terre. Avant de nous envoler dans l'espace, assistons à cette crise d'humeur

de notre lutin Astrognomus.

«J'en ai ras-le-bol de ces jours longs et surtout de ces nuits trop courtes ! Si c'était moi qui avais créé le monde, j'aurais fait plus simple: des jours et des nuits de la même longueur, toute l'année.»

Réaction du Créateur:

«Pas sotté du tout, ton idée. Mais pour y arriver, que changerais-tu à ma Création?»

Répondez à la place d'Astrognomus.

### Complément théorique.

#### Les éclipses.

Le schéma ci-dessous montre que, d'une manière générale, une éclipse peut avoir lieu lorsque le Soleil, la Terre et la Lune sont alignés.

On aura une **éclipse de Soleil** si les trois astres sont placés dans l'ordre : Soleil-Lune-Terre (c'est, dans le mois lunaire, l'époque de la **Nouvelle Lune**). Pour l'alignement Soleil-Terre-Lune (époque de la Pleine Lune), on aura une **éclipse de Lune**.

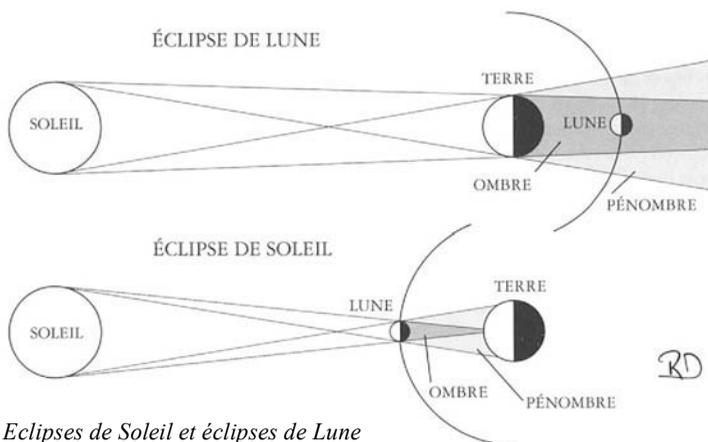


Fig. 1 Eclipses de Soleil et éclipses de Lune

Si l'alignement est parfait, l'éclipse pourra être **totale**, sinon elle restera **partielle**.

Le schéma montre également qu'une éclipse totale de Soleil ne concerne qu'une petite région du globe terrestre. Par exemple, l'éclipse du 11 août 1999 n'a été totale que dans une «tache» circulaire de 120 km de large qui se déplaçait, en raison de la rotation de la Terre, à une

vitesse d'environ 1 km/sec d'Ouest en Est. L'éclipse totale a pu donc être observée par les habitants d'une étroite bande de territoire s'étendant de la Grande Bretagne à l'Iran. En revanche, une éclipse totale de Lune peut être observée dans tout l'hémisphère terrestre qui fait face à la Pleine Lune.

Si l'on s'en tenait à cette explication schématique, on devrait logiquement avoir une éclipse de Soleil à chaque Nouvelle Lune et une éclipse de Lune à chaque Pleine Lune. Mais les éclipses sont plus rares. Le schéma ci-dessous montre pourquoi les conditions d'alignement ne sont réunies, dans la réalité, que tous les 173 jours environ. La Lune gravite autour de la Terre dans un plan qui ne coïncide pas avec celui de l'orbite terrestre autour du Soleil: l'orbite de la Lune est inclinée de 5,3 degrés sur l'**Ecliptique**<sup>1</sup>. En outre, le plan de l'orbite lunaire pivote sur lui-même, un peu comme une toupie, avec une période de 18,6 ans. Concrètement, cela signifie que les points d'intersection de l'orbite lunaire avec l'écliptique (on appelle ces points les **nœuds**) se décalent un peu d'un passage à l'autre.

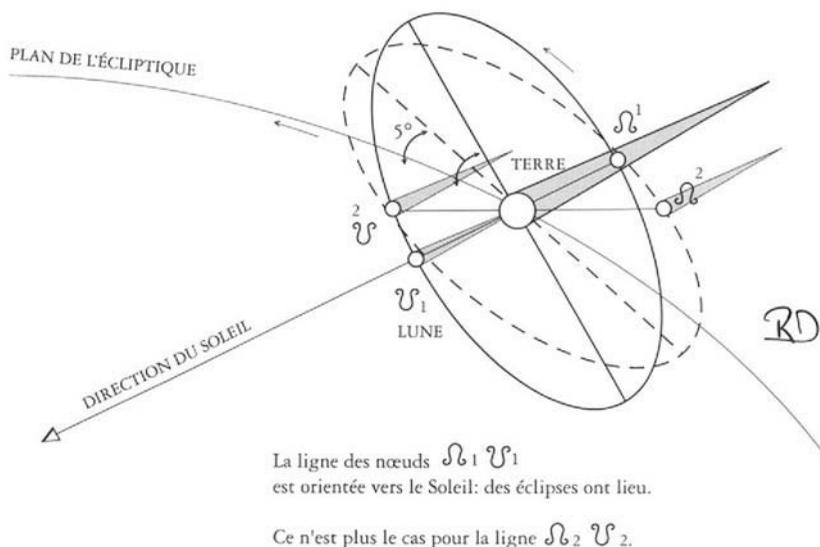


Fig. 2

*L'orbite de la Lune est inclinée sur l'Ecliptique; son plan pivote lentement sur lui-même*

Si le mécanisme des éclipses fonctionne, c'est parce que les distances respectives de ces trois astres sont «juste les bonnes». Pour un observateur terrestre, le Soleil, corps céleste énorme et la Lune, corps céleste minuscule, ont presque le même diamètre apparent. La correspondance n'est certes pas parfaite, notamment parce que l'orbite de la Lune n'est pas circulaire, mais elliptique: lorsque la Lune est la plus proche de la Terre (**périgée**), elle nous

<sup>1</sup> L'écliptique est le plan de l'orbite de la terre autour du soleil : c'est le plan dans lequel peuvent avoir lieu les éclipses.

paraît de 12 % plus grosse que lors de son éloignement maximum (**apogée**). Retenons que, dans les conditions les plus favorables, le disque lunaire a un diamètre apparent légèrement supérieur à celui du Soleil, si bien qu'une **éclipse totale de Soleil** est possible pour une durée limitée à quelques minutes. C'est cette heureuse coïncidence qui donne à ces éclipses leur caractère spectaculaire et en fait des événements inoubliables: En quelques secondes tombe une nuit presque totale, au point que les planètes et les étoiles les plus brillantes sont visibles. Le Soleil masqué révèle alors sa mystérieuse couronne, constituée de gaz très ténus dont la température est de plusieurs millions de degrés.

Lorsque ces conditions optimum ne sont pas réunies, le disque de la Lune ne parvient pas tout à fait à masquer celui du Soleil: l'éclipse est alors **annulaire**

### Le gnomon

Le Soleil se lève à l'Est, monte dans le ciel, passe au Sud à midi, redescend et se couche à l'Ouest.

Dans l'Antiquité et au Moyen-âge on croyait que la Terre est immobile au centre de l'univers que le Soleil tourne autour d'elle en une journée. Nous savons que c'est l'inverse qui est vrai. La Terre tourne sur elle-même (avec nous dessus) d'Ouest en Est, faisant défiler sur la voûte céleste, d'Est en Ouest, de jour le Soleil et de nuit les étoiles. Ce mouvement apparent des astres sur la voûte céleste est appelé **mouvement diurne** (adjectif dérivé du latin «dies», = le jour).

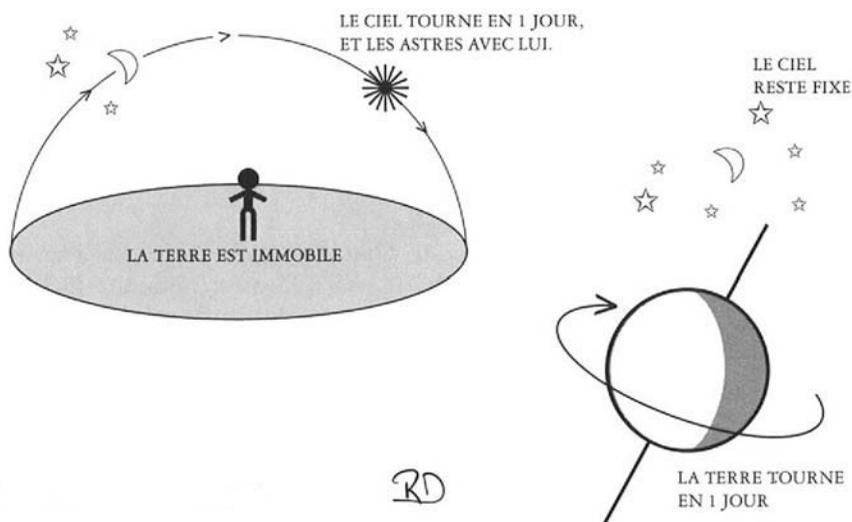


Fig. 3 Apparence et réalité

L'ombre projetée sur le Sol par le **gnomon** (simple bâton planté verticalement dans le sol) permet de déterminer la direction du Soleil aux différents moments de la journée et d'évaluer la hauteur de notre astre au-dessus de l'horizon. Si, heure après heure, on marquait sur le sol la position de la pointe de l'ombre, on obtiendrait un **cadran solaire** rudimentaire.

Une observation importante: repérer avec précision le moment où l'ombre du gnomon est la plus courte. C'est aussi le moment où le Soleil est le plus haut dans le ciel. Il est alors midi et la direction correspondante est le Sud. Les astronomes emploient le terme de **méridien** (du latin «meridies», milieu du jour) pour désigner la direction du Sud.

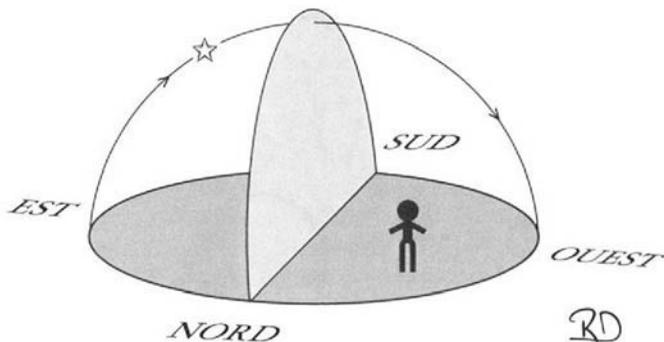


Fig. 4 Le plan du méridien

C'est probablement grâce à cet instrument rudimentaire qu'au quatrième millénaire avant J.-C, des astronomes ont pu mesurer la longueur exacte de l'année. Problème qu'ils ont résolu en recherchant le jour particulier où, à midi, on obtenait du gnomon l'ombre la plus courte de l'année. C'est probablement la technique du gnomon qui a permis au savant grec **Ératosthène** (276 - 195 av. J.-C) de calculer la circonférence du globe terrestre.

### Les saisons.

Tout en tournant sur elle-même en un jour de 24 heures, la Terre se déplace sur son **orbite** autour du Soleil. Le temps de cette révolution est d'une année, soit 365,242 jours (pratiquement en 365 jours et 1/4).

A l'équateur, notre Terre tourne à la vitesse de 465,11 mètres à la seconde, tandis qu'elle avance le long de son orbite à la vitesse moyenne de 29,8 km à la seconde.

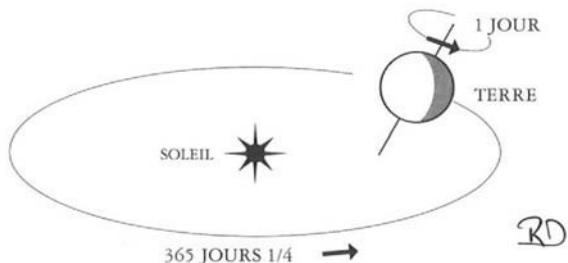


Fig. 5

Le double mouvement de **rotation** et de **translation** de la Terre

Au cours de sa révolution annuelle, la Terre passe par les quatre points correspondant à la position des globes de notre modèle.

Un fait important: l'axe de rotation de la Terre conserve toujours la même direction dans l'espace.

(Ce n'est pas rigoureusement vrai. En réalité, cet axe pivote très lentement sur lui-même. Si, actuellement, il vise, en direction du Nord, une étoile de la Petite Ourse qu'on appelle pour cette raison **l'Etoile Polaire**, ce ne sera plus le cas dans mille ans. Le phénomène de la **Précession des Equinoxes** fait décrire au Pôle, sur la voûte céleste, un petit cercle qui se boucle en 25'760 ans.)

L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite (ce plan s'appelle l'écliptique) forme un angle de 66,5 degrés.

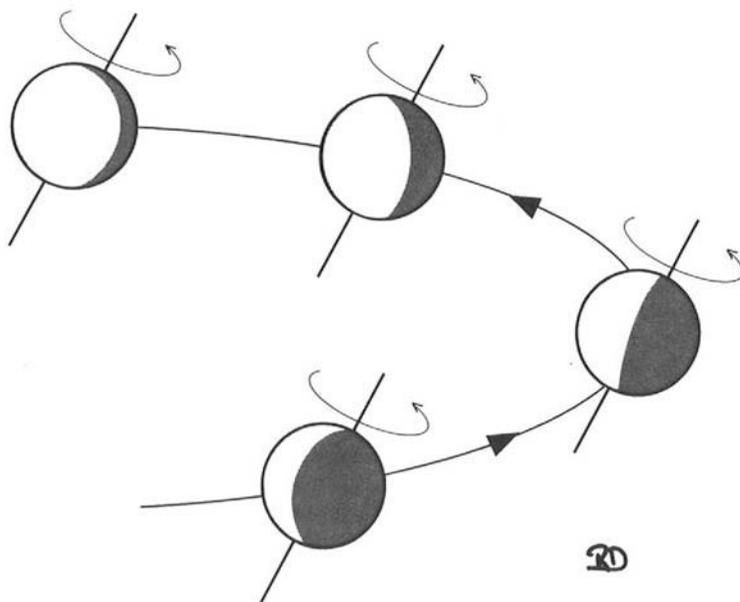


Fig. 6 L'axe des Pôles, incliné, conserve toujours la même direction

De cette inclinaison de l'axe de rotation de la Terre découle le phénomène des saisons.

Astrognomus a pu constater que sur le globe correspondant à l'été, le Soleil monte au-dessus de sa tête beaucoup plus haut dans le ciel que sur le globe de l'hiver. La portion de journée durant laquelle le Soleil l'éclaire est beaucoup plus longue en juin qu'en décembre.

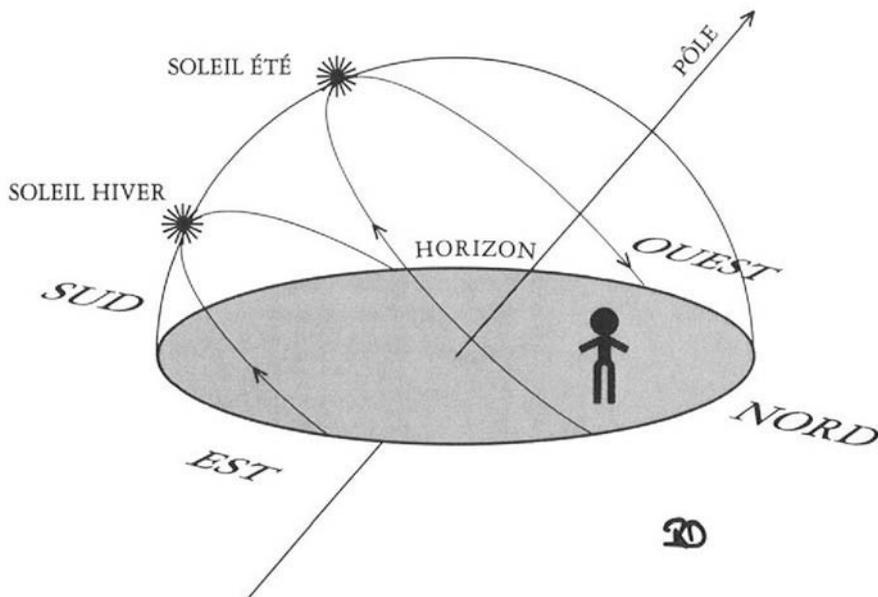


Fig. 7 La course diurne du Soleil en été et en hiver

Les nuits connaissent des inégalités analogues, mais inversées: courtes en été, longues en hiver. Ces conditions extrêmes sont celles du **solstice d'été** et du **solstice d'hiver**. En revanche, aux **équinoxes** de printemps et d'automne, le jour et la nuit sont d'une longueur égale. La transition entre les quatre positions de notre modèle s'opère en douceur: entre le 23 décembre et le 21 mars, la durée de l'éclaircissement solaire s'accroît au rythme de quelques minutes par jour.

En déplaçant Astrognomus à l'un des pôles, nous le mettons dans une situation particulière: la calotte des pôles Nord et Sud connaît un jour ou une nuit continue pendant 6 mois. À proximité du Cercle Polaire (à la latitude de 66,5 degrés Nord) on peut, pour les mêmes raisons, observer le Soleil de Minuit ou les célèbres «nuits blanches» de Saint-Pétersbourg.

### Le cadran solaire.

Comment mesurer la durée du jour avec la plus grande précision possible ?

On peut le faire de la manière suivante: on oriente une lunette astronomique exactement dans le **plan du méridien** (en d'autres termes: en direction du Sud). On note à l'aide d'un chronomètre le moment exact où une étoile déterminée passe au centre de son champ visuel.

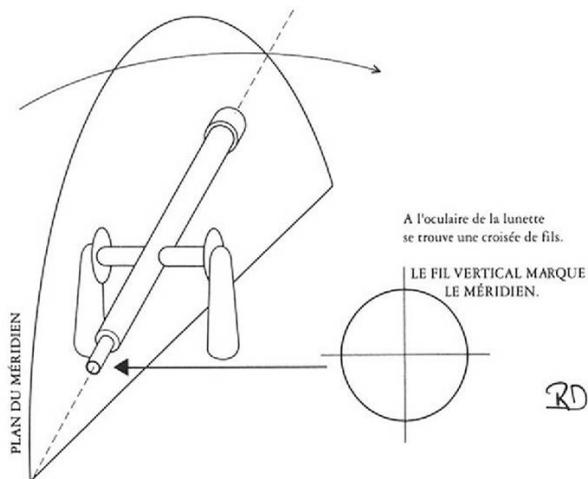


Fig. 8 La lunette méridienne

En prenant garde de ne pas bouger l'instrument, on répète l'opération la nuit suivante. Entre les deux passages de la même étoile au méridien, il s'est écoulé **un jour sidéral** (= «un jour mesuré par rapport aux étoiles»).

Mais il est plus pratique de nous référer à notre astre du jour, le Soleil. En procédant de manière analogue (sauf qu'il est extrêmement dangereux d'observer le Soleil directement à l'oeil nu ou, pire encore, avec des jumelles, des lunettes ou un télescope !) on déterminera la longueur du jour solaire.

Le jour solaire est plus long que le jour sidéral de 3 minutes et 56 secondes, pour une raison simple. Les étoiles, extrêmement éloignées, peuvent être considérées comme un repère fixe. En revanche, en opérant deux visées sur le Soleil à un jour d'intervalle, il faut tenir compte du fait que la Terre a, entre nos deux mesures, accompli un certain trajet sur son orbite: à la vitesse de 29,8 km par seconde, notre lunette de visée s'est sérieusement déplacée dans l'espace!

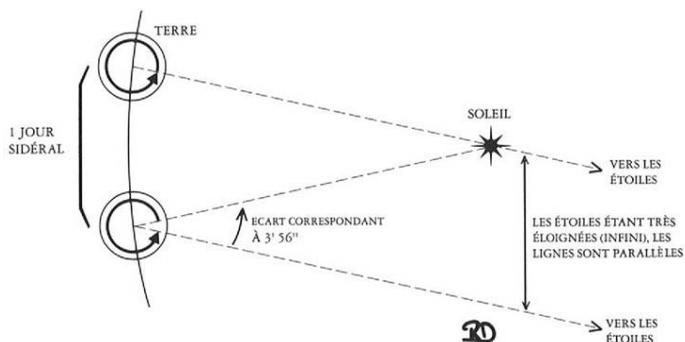


Fig. 9 Jour sidéral et jour solaire

Autre écueil plus gênant: la vitesse de la Terre sur son orbite n'est pas constante (voir plus bas: lois de Képler); la durée du jour solaire n'est donc pas exactement la même tout au long de l'année. Au lieu du jour solaire vrai nous utilisons, pour régler notre montre, le jour solaire moyen. Même s'il n'a pas été possible aux horlogers de reproduire avec exactitude la marche de la Terre autour du Soleil, **l'écart entre le jour solaire vrai et le jour solaire moyen** a pu être calculé avec précision pour chaque jour de l'année. Il est pratique de représenter cet écart sur un diagramme, au moyen d'une courbe appelée **équation du temps**. Elle indique, pour chaque jour de l'année, le nombre de minutes qu'il faut ajouter ou retrancher au temps solaire vrai pour obtenir le temps solaire moyen.

Notre montre divise le temps en journées, heures et minutes toujours égales, comme si la Terre décrivait dans l'espace un cercle parfait dont le Soleil serait le centre. Le jour solaire moyen est donc un jour fictif, une pure invention des savants !

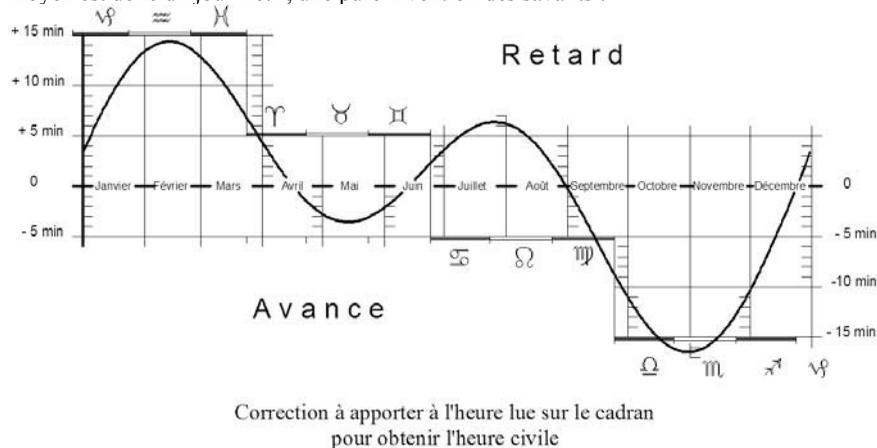


Fig. 10 L'équation du temps

**Le temps solaire vrai** indique toujours l'heure du lieu où l'on a fait la mesure. Mais de nos jours, on ne peut pas avoir une heure de Genève, une heure de Lausanne et une heure des Pléiades; on a donc divisé la surface du globe terrestre en **fuseaux horaires** à l'intérieur desquels on admet que tous les lieux ont la même heure. En Suisse, nous sommes logés dans le fuseau du temps HEC (Heure de l'Europe Centrale). Cela signifie qu'à l'heure indiquée par un cadran solaire il faut ajouter une **correction de longitude** qui, pour le site des Pléiades, est de + 32 minutes et 30 secondes.

(NB: dans la construction du cadran supérieur de notre «cube à trois temps», nous avons tenu compte de cette correction; il indique de ce fait l'heure civile)

Votre montre accuse encore un écart de 60 minutes par rapport au temps mesuré à l'aide du cadran solaire ?

C'est que vous avez oublié une dernière correction due à l'emploi de **l'heure d'été**. Ouf!

Les marins, les aviateurs et les astronomes se réfèrent au Temps Universel (TU). Par convention, c'est le passage du Soleil au méridien de Greenwich qui a été choisi comme origine du TU.

Réponse à la «question pour prendre congé»:

*il faudrait que l'axe de la terre ne soit pas incliné, mais planté verticalement sur le plan de l'Ecliptique*



## Deuxième étape

# LE SYSTÈME SOLAIRE

### Notre premier grand saut !

Imaginez que nous plaçons le Soleil aux Pléiades et qu'au sommet du Grammont, à 15,6 km, se trouve Pluton, la dernière planète du Système Solaire<sup>2</sup>.

Notre base représente maintenant une distance d'environ 5'900 millions de kilomètres.

Un grand saut dans l'espace, n'est-ce pas ?




---

<sup>2</sup> Ce n'est plus vrai !

*Pour des raisons trop longues à exposer ici, l'Union Astronomique Internationale a décidé en 2006 d'exclure **Pluton** de la liste des planètes du Système Solaire. Avec quelques corps semblables, Pluton est devenu une « Planète Naine » - ce nom n'est peut-être pas définitif. Maintenant, notre dernière planète est donc Neptune.*

*Le site d'AstroPléiades datant d'avant 2006, nous n'avons pas jugé utile de modifier les constructions où il est question de Pluton. Il suffit de savoir que la science est toujours en avance sur l'image que nous en donnons. Rien ne vieillit plus vite qu'un livre d'astronomie !*

**Objet 1: le système solaire**



**Construisons le Système Solaire!**

Dans ce modèle réduit du Système Solaire, les anneaux dessinant le contour d'un globe de 3,70 mètres représentent le Soleil qui, dans la réalité, a un diamètre de 1 million 390'600 kilomètres.

Les planètes sont représentées à la même échelle. Vous trouverez des informations détaillées à leur sujet dans le «complément théorique» à la fin de ce chapitre.

Ce qu'on vous présente ici ressemble plutôt à un magasin. Pour construire le Système Solaire, laissons sur place la grosse boule représentant le Soleil et portons les planètes à une certaine distance, dans la région, pour les lancer sur leur orbite afin qu'elles gravitent autour du Soleil.

Astronome aime les voyages !



En vous aidant de la carte géographique, donnez à notre lutin les ordres nécessaires.

Exemple:

«Astronome, prends la boule de Mars et va la porter à une distance de 600 mètres. Arrivé là-bas, tu la lanceras sur son orbite.»

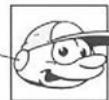


Mais Astronome n'est ni très grand ni très fort...

Mettez les planètes dans la bonne case, selon qu'elles lui coûteront peu ou beaucoup de temps à porter, et selon leur poids.

(Si nécessaire, consultez le tableau «Le système solaire» du complément

théorique.)



à penser,

Facile !

Rien que



d'y

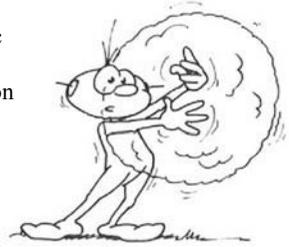
je suis lessivé



_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____



Une boule petite mais solide est facile à transporter. Avec une boule énorme faite de gaz, comment s'y prendre ? Dites quelles planètes Astrognomus pourra charger sur son dos sans difficulté, et lesquelles lui poseront un sérieux problème.



*Facile*

*Une sacrée affaire*

---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



Notre petit savant a lu dans un livre que la lumière, c'est ce qui se déplace le plus vite: elle pourrait faire 7 fois le tour de la Terre en une seconde ! Il a aussi lu que de l'étoile la plus proche, pour venir jusqu'à nous, la lumière met plus de 4 années.



Si on demandait à Astrognomus de nous dire ce qu'il pense de la place du Système Solaire dans l'Univers, que répondrait-il?



Qui va avec qui ? De ces corps célestes, mettez ceux qui vont ensemble dans la bonne case:

Le Soleil - la Terre - les planètes - les étoiles

*Ces corps produisent de l'énergie et émettent de la lumière*

*Ces corps n'émettent pas de lumière; ils brillent d'une lumière empruntée*




---



---




---



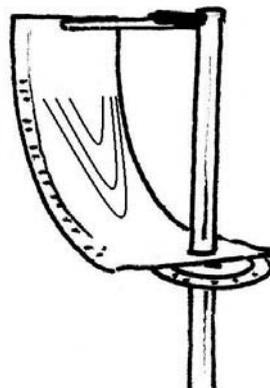
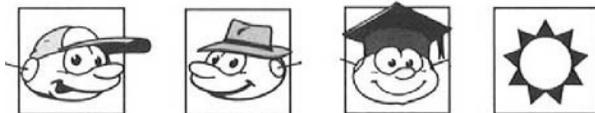
---



---



---

**Objet 2: Le cercle vertical**

Pour découvrir les trois lois expliquant le mouvement des planètes autour du Soleil, l'astronome **Johannes Kepler** (1571-1630) avait besoin de mesures précises, qui ont été effectuées en grande partie par son maître **Tycho Brahé** (1546-1601) avec des instruments simples, mais construits en très grandes dimensions pour accroître leur précision.

Le plus courant était le **cercle vertical** dont vous voyez ici un modèle adapté à l'observation du Soleil (les planètes ne sont visibles que de nuit !)

Toutes les indications nécessaires à la manipulation de ce cercle vertical figurent sur son écran blanc, aux consignes 1 et 2.

Remarquez qu'il faudra lire la position du Soleil sur deux cadrans : en **azimut**, sur un cercle gradué faisant le tour du disque horizontal : c'est la direction le long de l'horizon, mesurée en degrés à partir du point 0 qui coïncide avec la direction du Sud. Si vous lisez sur ce cercle 25 degrés, il faudra préciser en outre « Est » (= côté Soleil levant) ou « Ouest » (= côté Soleil couchant).

Sur l'échelle graduée longeant le côté gauche de l'écran, vous lirez la **hauteur** du Soleil sur l'horizon. Si le Soleil était à l'horizon, sa hauteur serait 0. Elle serait de 90 degrés si notre astre était à la verticale du lieu, juste au-dessus de nos têtes.

Si vous voulez faire une observation « active » (c'est-à-dire réellement valable...), nous vous conseillons de vous munir d'une feuille de papier organisée en 5 colonnes, comme suit :

Date :	Heure	Azimut	Est /Ouest	Hauteur



Visant le Soleil comme indiqué, procédez à une première série de mesures. Inscrivez le résultat dans les 5 colonnes.



Répétez la même opération 15-20 minutes plus tard. Que constatez-vous ?



Essayez de faire plusieurs mesures échelonnées entre 11 heures et 14 heures. Que constatez-vous ? A quelle heure l'altitude mesurée était-elle la plus haute ? Quelle était la valeur de l'azimut à ce même moment ?



Question: pourquoi le constructeur a-t-il arrêté son échelle de mesure des altitudes, en haut à 10 degrés et en bas à 80 degrés ? Négligence ?

Le graphique occupant le bas de l'écran à droite a l'air horriblement compliqué. Et pourtant, il ne contient rien d'autre que vos 5 colonnes. Repérez d'abord l'échelle des azimuts, puis celle des altitudes. Ensuite les dates et enfin les heures.



Appliquez maintenant la consigne indiquée sous chiffre 3. Comparez vos observations à ce que vous dira le graphique.

### Objet 3: *Le gravitest*

Qui ne s'est jamais demandé pourquoi les habitants d'Australie ne tombaient-ils pas de la Terre ?

Ils sont, comme une pomme, irrésistiblement attirés par la terre.

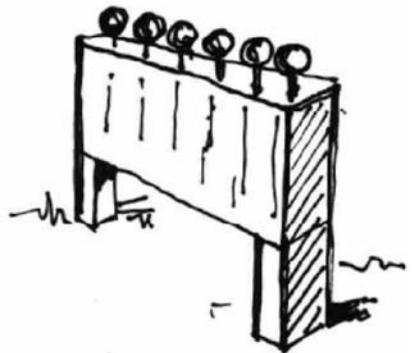
**La gravitation** est l'attraction qu'exercent l'un sur l'autre deux corps possédant une certaine masse.

Cette attraction est proportionnelle au produit de leurs **masses** et inversement proportionnelle au carré de la **distance** qui les sépare.

La force de gravitation générée par la terre est si importante qu'elle nous plaque au sol. Qu'en est-il sur les autres planètes dont la masse est différente de celle de la Terre ?

Utilisez le "gravitest" et comparez la masse qui correspond à 1 kilogramme à la surface de la Terre avec le poids que l'on mesurerait sur une autre planète.

Comparez en soulevant tout d'abord la boule correspondant à la planète Terre (elle se trouve près du milieu de la rangée), puis les autres. A Pluton correspond la plus légère (0,06 kg) et à Jupiter la plus lourde (2.6 kg).





Vous trouvez, dans les tables n°1 et n°2 du « complément théorique » de cette étape, des données au sujet des corps constituant le système Solaire. Si nous comparons les diamètres des planètes (1<sup>er</sup> tableau, colonne 4), les différences suffisent-elles à expliquer les écarts des poids du gravitest ? Prenez pour exemple le couple : Terre - Jupiter.



Faut-il aussi prendre en considération les données d'une autre colonne ? Si oui, laquelle ?

Indiquez, pour résumer, les colonnes dont les données jouent un rôle dans l'expérience du gravitest.

Réponses : voir *complément théorique « Gravitest »* p. 35

**Pour prendre congé du système solaire, voici quelques suggestions:**



Renseignez-vous (journaux, almanach, observatoire d'amateurs le plus proche) pour savoir si une planète est actuellement visible dans le ciel nocturne en début de soirée.



A l'aide d'une paire de jumelles, repérez-la. Marquez sa position tous les 5 à 10 jours sur une carte du ciel, et ceci pendant un ou 2 mois.



Même s'ils ne possèdent pas de très grands instruments, les observatoires d'amateurs sont bien équipés pour l'observation des planètes. Allez donc par un beau soir à l'observatoire le plus proche !



Essayez, avec son aide ou en cherchant dans les livres, de répondre aux questions suivantes:

- Comment distingue-t-on, à l'oeil nu, les planètes des étoiles ?
- Quelles différences présente leur image vue dans un télescope ?
- Qu'appelle-t-on l'«Etoile du Berger» ?
- Quand et où peut-on la voir dans le ciel ?
- Comment se présente-t-elle dans un télescope?

### *Complément théorique.*

#### **Les planètes.**

Lors de la création du système solaire, voici 4,6 milliards d'années, se formèrent les huit principales planètes ainsi qu'une multitude d'autres corps plus petits. Tous se mirent à graviter autour du Soleil.

Les planètes peuvent être accompagnées de **satellites** en nombre et de tailles variables. La Terre n'a qu'un gros satellite, qui est la Lune. Certaines planètes en ont beaucoup et leur nombre s'accroît d'année en année.

Exemple : Jupiter. Galilée lui en découvrit en 1610 quatre, aisément visibles dans un petit instrument. Les ouvrages publiés vers 1950 en répertoriaient 11. En 2008, Jupiter en compte 63 ! Idem pour Saturne : 9 en 1950 et 56 en 2008.



Les planètes gravitent autour du Soleil sur une **orbite** dont la forme est précisée par la première des **trois lois de Kepler**: c'est une **ellipse** (en réalité une ellipse très peu aplatie qu'il est difficile de distinguer d'un cercle). Sur la partie de son orbite la plus proche du Soleil, la planète se déplace plus rapidement que dans sa partie éloignée (2e loi). Enfin, la durée du trajet de chaque planète autour du Soleil (révolution) s'accroît avec la distance, dans une proportion fixée par la 3e loi de Kepler.

Il est inutile de rechercher les planètes sur une carte du ciel en raison de leur mouvement; en revanche un almanach, un annuaire ou la chronique astronomique de certains journaux indiquent régulièrement leur position. Si on lit, par exemple, que Saturne se trouve dans la **constellation** du Sagittaire, cela signifie qu'actuellement cette planète défile devant une toile de fond d'étoiles dont les plus brillantes dessinent une figure à laquelle on a donné, dans l'Antiquité, ce nom de «Tireur à l'arc».

Les planètes se meuvent dans une bande assez étroite du ciel jalonnée par les douze constellations du **Zodiaque**, de part et d'autre du grand cercle de l'**Ecliptique**.

Une observation attentive permet de constater leur déplacement parmi les étoiles, à l'oeil nu ou à l'aide de jumelles. En raison du fait que notre observatoire terrestre n'est pas fixe dans l'espace, la trajectoire d'une planète sur le ciel paraît capricieuse, comme le montre le schéma ci-dessous.

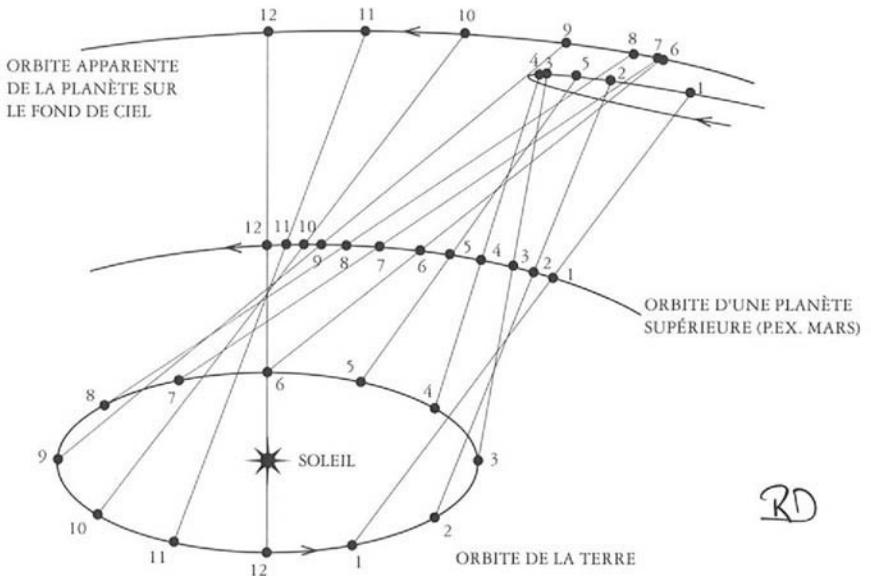


Fig. 11 Déplacement apparent d'une planète sur le ciel

Les planètes **extérieures** (celles situées au-delà de l'orbite terrestre) peuvent être observées durant la nuit à l'aide de petits instruments. Uranus et Neptune sont difficiles à repérer; il faut se référer à un annuaire astronomique et à une carte du ciel assez détaillée.

Jupiter et Saturne offrent des images magnifiques dans des télescopes d'amateurs.

Les planètes **intérieures** (c'est-à-dire situées entre le Soleil et la Terre) se présentent différemment, en raison de leur proximité au Soleil. On ne peut voir ces planètes qu'à certaines époques fixes, juste après le coucher de notre astre du jour ou juste avant son lever. Si la recherche de Mercure est problématique, en revanche Vénus apparaît souvent comme un astre très brillant.

Même un petit instrument permet de constater que Vénus présente des **phases**, comme la Lune et pour les mêmes raisons.

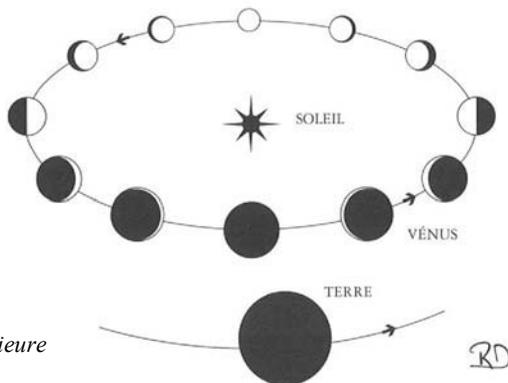


Fig. 12  
Les phases d'une planète intérieure  
(Mercure ou Vénus)

En ce qui concerne leur nature, les planètes peuvent être réparties en deux classes. Les quatre premières, de taille relativement modeste, sont solides comme la Terre (planètes **telluriques**). Les quatre suivantes, beaucoup plus grosses, sont **gazeuses**. Cette répartition des planètes en fonction de leur taille et de leur constitution n'est certainement pas le fruit du hasard.



Il faut ajouter que les orbites des planètes sont toutes situées à peu près dans le même plan que celle de la Terre autour du Soleil, qu'on appelle l'**Ecliptique**.

Le Système Solaire est donc un système «plat».

Table 1: Le système Solaire

	Distance moyenne au soleil (la Terre=1)	Temps de révolution	Diamètre à l'équateur (la Terre = 1)
Le Soleil	---	---	109
Mercure	0.39	87.9 jours	0.38
Vénus	0.72	224.7 jours	0.95
La Terre	1	365,26 jours	1
Mars	1.52	1 an et 322 j	0.53
Jupiter	5.22	11 ans et 315 j	11.2
Saturne	9.54	29 ans et 167 j	9.4
Uranus	19.19	84 ans et 5 j	4.0
Neptune	30.07	164 ans et 290 j	3.8

Table 2: Le système Solaire

	Durée de rotation	Nombre de satellites (référence : 2008)	Densité, nature (eau=1)
Le Soleil	25 j. 9 h. 7 min.	---	1.41 (gazeux)
Mercuré	58 j. 16 h.	0	5.43 (tellurique)
Vénus	243 j.	0	5.24 (tellurique)
La Terre	23 h. 56 min.	1 (la Lune)	5.52 (tellurique)
Mars	24 h. 37 min.	2	3.94 (tellurique)
Jupiter	9 h.50 min.	63 (4 gros)	1.33 (gazeuse)
Saturne	10 h. 14 min.	56	0.70 (gazeuse)
Uranus	17 h.18 min.	27	1.30 (gazeuse)
Neptune	6 j. 9 h.	13	1.76 (gazeuse)

Les astronomes se font maintenant une bonne idée de la manière dont le **Système Solaire** s'est constitué. Le satellite Hubble a enregistré, dans des régions du ciel riches en gaz, des images d'étoiles très jeunes. Certaines sont entourées d'un halo dense de gaz et de matière cosmique qui pourrait être un système planétaire en voie de formation.

D'autre part, par des méthodes indirectes, on a pu prouver l'existence de planètes gravitant autour d'un certain nombre d'étoiles proches du Soleil. Il est probable que dans les années à venir les télescopes géants permettront de voir directement les plus grosses d'entre elles.

Fait remarquable: l'Observatoire de Genève est toujours à la pointe du progrès dans cette recherche de nouvelles planètes.

### Les comètes.

Le système solaire héberge également des **comètes**, dont les origines sont probablement aussi anciennes que celles des planètes. Ce sont des corps constitués de roches et de gaz congelés dont le diamètre varie entre 1 et 100 km (par exemple, la comète Hale-Bopp avait un noyau d'environ 40 km). Elles gravitent sur des orbites plus fortement elliptiques (= plus aplaties et plus allongées) que celles des planètes. Elles sont en général inactives lorsqu'elles sont très éloignées du Soleil, mais lorsqu'elles passent près de lui, leur surface se dégèle et elles émettent des gaz et des poussières visibles sous la forme de queues spectaculaires. Beaucoup de ces comètes reviennent dans la proche banlieue du Soleil à périodes fixes; c'est notamment le cas de celle de Halley, fidèle au rendez-vous tous les 76 ans depuis le Moyen-âge et dont le dernier passage a eu lieu en 1986-87.

D'autres, comme la spectaculaire comète Hale-Bopp, qu'on a pu observer en 1997, surviennent à l'improviste.

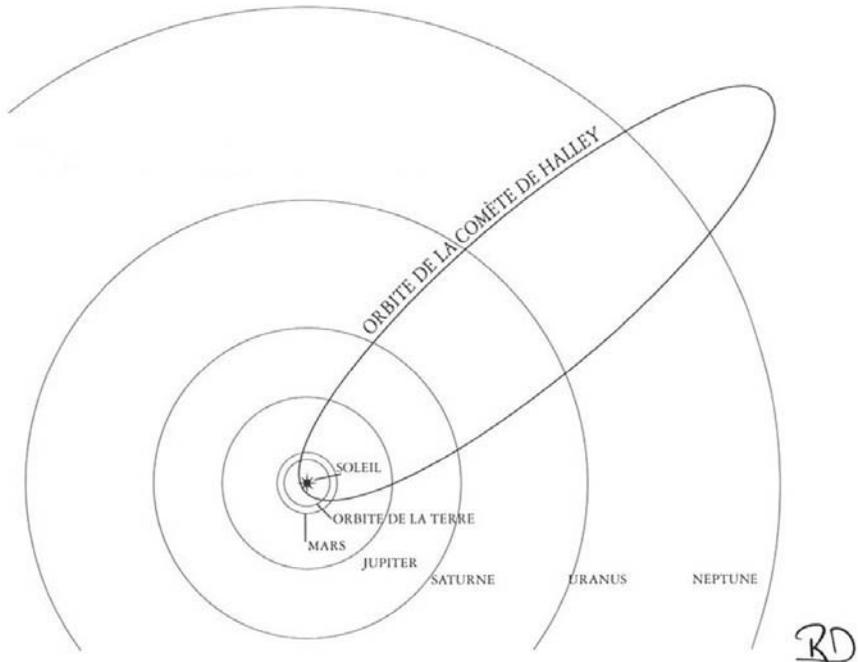


Fig. 13 L'orbite de la comète de Halley

Les prévisions au sujet des comètes ne sont jamais d'une absolue fidélité, car ces petits corps sont fortement perturbés, à leur passage, par l'attraction des «poids lourds» tels que Jupiter.

### Le gravitest

*Réponses aux questions de la page 30 :*

*Les colonnes concernées sont celle indiquant les diamètres et celle indiquant les densités.*

L'attraction exercée par un corps dépend de la quantité de sa matière et de la densité de celle-ci. Ainsi s'explique le fait que la plus grosse planète du Système Solaire, Jupiter, exerce une attraction étonnamment faible si on la compare à celle de la Terre qui est bien plus petite. L'explication : Jupiter est certes la plus grosse planète du Système Solaire, son volume est de 125 fois supérieur à celui de la Terre, mais c'est un corps essentiellement gazeux dont la densité moyenne est très inférieure à celle de notre planète tellurique. La seule différence des tailles n'est donc pas suffisante pour expliquer les chiffres du gravitest.



On peut imaginer ce que pèserait le professeur sur les autres astres si sur terre il pèse 100 kg :

Soleil	27,96	x plus	soit	2796	kg terrestres
Mercure	0,377	x plus	soit	37,7	kg terrestres
Venus	0,91	x plus	soit	91	kg terrestres
<b>Terre</b>	<b>1</b>	<b>x plus</b>	<b>soit</b>	<b>100</b>	<b>kg terrestres</b>
Mars	0,38	x plus	soit	38	kg terrestres
Jupiter	2,53	x plus	soit	253	kg terrestres
Saturne	1,08	x plus	soit	108	kg terrestres
Uranus	0,91	x plus	soit	91	kg terrestres
Neptune	1,14	x plus	soit	114	kg terrestres
Pluton	0,06	x plus	soit	6	kg terrestres
Lune	0,1624	x plus	soit	16,24	kg terrestres
Cérés	0,03	x plus	soit	3	kg terrestres



Selon la légende, c'est en recevant une pomme sur la tête qu'Isaac Newton a déduit la loi sur la **Gravitation Universelle**. Cette découverte est la base de la physique moderne.

La Gravitation est la première interaction fondamentale à avoir été décrite mathématiquement. Son effet direct et permanent dans notre environnement est la **pesanteur**, c'est-à-dire le poids des corps.

La gravité est une notion très importante en astronomie, c'est ce principe qui nous permet d'expliquer la majeure partie des phénomènes (les orbites des corps célestes, la formation des étoiles, des galaxies, des planètes, les marées...).

Pour bien le comprendre, plaçons-nous tout d'abord sur la terre; comme Newton et sa pomme. Tout corps possédant une masse (c'est-à-dire ayant un certain poids) est soumis à l'attraction de la terre. La masse terrestre a la faculté d'exercer une force à distance sur tous les objets pesants qui l'entourent. C'est tellement évident qu'il a fallu des dizaines de milliers d'années à l'homme pour le comprendre.

La terre est très lourde et crée un champ de pesanteur très puissant.

Mais alors, pourquoi la Lune ne tombe-t-elle pas sur la terre ?

C'est également Newton qui émet en 1687 une hypothèse géniale, mais très risquée: la Lune tombe sur la Terre, comme la pomme, mais la vitesse de la Lune fait que sa trajectoire finale est une courbe fermée autour de la Terre. Il a démontré que deux effets apparemment très différents (la pesanteur et le mouvement des corps célestes) sont en fait le résultat d'une seule et même cause : la gravitation universelle.

De ses lois, nous avons pu déduire la masse du Soleil, de ses planètes et des autres corps dont nous connaissons la vitesse et l'orbite.

Néanmoins, les lois de Newton ne sont qu'une approximation d'une théorie plus fondamentale élaborée en 1915 par Albert Einstein: **la relativité générale**.



## Troisième étape

# VERS LES PROCHAINES ÉTOILES

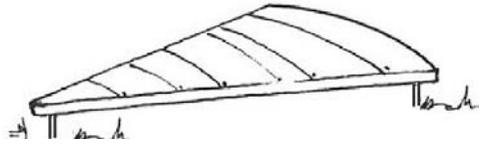
### **Prenons notre élan pour le grand saut !**

Laissons aux Pléiades notre Soleil et sa cour de planètes. Transportons, par l'imagination toujours, au sommet du Grammont le prochain soleil: l'Etoile Alpha du Centaure.

De nouveau, nous avons changé d'échelle. Nous quittons notre banlieue familière pour découvrir le vaste monde des étoiles.



### Objet 1: Le Système Solaire à la nouvelle échelle.



Pour parvenir à notre Terre, la lumière du Soleil met 8 minutes et 19 secondes. En chevauchant un rayon de lumière, un galop de 1 heure nous transporterait à mi-chemin entre Jupiter et Saturne.

Pour traverser le système solaire, la lumière met moins de 11 heures...



Mais pour aller jusqu'à l'étoile la plus proche, il lui faudra 4,3 années ! En langage d'astronome: la prochaine étoile, **Alpha du Centaure**, est située à 4,3 années-lumière de notre système solaire.

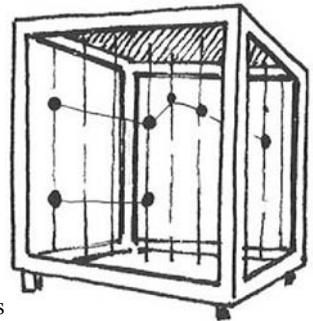
*Sur notre « modèle réduit », la distance entre le Soleil et la dernière planète Neptune est d'à peine 2 mètres. Admettons, pour simplifier, 2 mètres.*



Sur la base de ce modèle, faites un calcul: vous souvenant que le sommet du Grammont est à 15,6 km des Pléiades, la distance du Soleil à l'étoile la plus proche, Alpha du Centaure, est combien de fois plus grande que la distance Soleil-Neptune ?

*(Ce calcul sera très approximatif, il vous donnera simplement un ordre de grandeur).*

### Objet 2: La Grande Ourse.



Les étoiles nous apparaissent comme des diamants qui scintillent au firmament. En réalité, ce sont des masses gazeuses gigantesques, composées d'éléments variés et portées à d'énormes températures par les réactions nucléaires déclenchées en leur sein. Notre Soleil est une étoile.



Observez les 7 étoiles brillantes qui dessinent une figure en forme de casserole. Elles ne sont qu'une partie des étoiles de la constellation appelée «**La Grande Ourse**». Ce dessin familier résulte de la projection de ces sept étoiles sur un plan qui est, pour nous, «le fond du ciel».

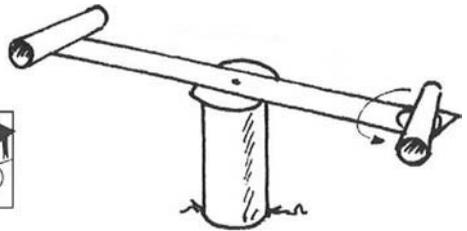


Déplacez-vous sur le côté du modèle. Que constatez-vous ?  
Réussissez-vous à identifier la casserole ?



Sur la planche tirée de l'atlas ancien, identifiez les sept étoiles brillantes dessinant la casserole.  
Si vous comparez l'atlas ancien et l'atlas moderne, qu'a-t-on gagné ?  
Qu'a-t-on perdu ?

### Objet 3: Le télémètre



On se sert d'un **télémètre** pour mesurer la distance à des points éloignés du terrain. Il est utile aux géomètres et aux artilleurs, mais on trouve aussi des télémètres miniaturisés sur certains appareils photographiques.

Pour mesurer la distance aux étoiles les plus proches, les astronomes utilisent un procédé faisant appel au principe du télémètre.

Notre télémètre est composé d'une base, à l'extrémité de laquelle sont placés deux tubes de visée. L'un de ces deux tubes est fixe; il sert à orienter le télémètre en direction de l'objet dont on veut mesurer la distance. A droite, un rapporteur permet de lire l'angle que fait avec la base le second tube, qui est mobile. Cet angle varie en fonction de la distance.

#### **Remarque:**

*Le principe du télémètre est exposé dans le complément technique.*

*On y trouve également une «tablette des angles et des distances» à consulter pour les travaux proposés ci-dessous.*

Organisons notre travail :

L'idéal est de se mettre par groupe de deux. L'observateur de gauche vérifie que la lunette fixe pointe exactement l'objet visé. A droite, son compagnon oriente la lunette mobile sur cet objet, relève l'angle correspondant et note le résultat sur une feuille de papier.

Préparez un tableau à trois colonnes, comme suit :

Objet visé	Angle mesuré	Distance en mètres
1 <sup>er</sup> piquet		2 m
2 <sup>ème</sup> piquet		4 m
3 <sup>ème</sup> piquet		6 m
4 <sup>ème</sup> piquet		8 m
5 <sup>ème</sup> piquet		10 m
Sapin		80 m
Dent de Morcles		34 000 m

Comparez les angles



Effectuez une liste de mesures sur les piquets 1,2,...5.

En partant du télémètre, un piquet rouge est planté tous les 2 mètres. Vous pouvez faire deux mesures supplémentaires sur des objets visibles dans la lunette de gauche : un sapin en bordure du pré (distance : 80 mètres) et le sommet de la Dent de Morcles (distance : 34 km).



Comparez les angles correspondant aux distances successives. Que constatez-vous ?



Considérez les angles correspondant aux objets lointains : le sapin et la Dent de Morcles. Quelle est la différence entre ces deux valeurs ?



Jusqu'à quelles distances notre télémètre donne-t-il des résultats précis ?



Comment pourrait-on l'améliorer pour qu'il donne des résultats précis pour toutes les distances mesurées ? (2 solutions possibles).

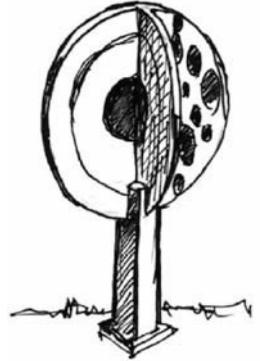
**Objet 4: La structure interne des étoiles**

La connaissance de la **structure interne** des étoiles nous est fournie par l'analyse de leurs rayonnements, par exemple la lumière, que l'on décompose en **spectres** qui se présentent comme une série de raies. Chaque raie fait partie de la signature d'un élément présent dans l'étoile.

Nous avons choisi de présenter sur cet objet 4 étoiles caractéristiques parmi celles que l'on rencontre dans notre Galaxie.

Il s'agit en fait de différents stades dans l'évolution de la vie d'une étoile.

Il est intéressant de comparer les variations de taille, de densité et de température sur chacune des étoiles représentées, soit:



- Notre Soleil
- Une Géante rouge
- Une Naine blanche
- Une étoile à neutrons



Organisez une feuille de papier assez grande comme suit :

	Diamètre	Température de surface	Température au centre	Densité
Le Soleil				
Etoile Géante				
Naine Blanche				
Etoile à Neutrons				



Ensuite, dans l'ordre indiqué, remplissez le tableau toutes les fois que c'est possible

Cette feuille complétée par les informations du complément théorique contribuera à clarifier vos idées sur ces questions fondamentales : qu'est-ce qu'une étoile ? Comment fonctionne-t-elle ? Combien de temps peut-elle vivre ? Change-t-elle au cours de sa vie ? Finit-elle par mourir ?

### *Complément théorique.*

#### **Les étoiles, apparences et réalité.**

Les étoiles que nous comparons à des diamants célestes sont les plus brillantes; en général elles sont relativement proches du Soleil. Depuis la plus haute antiquité, les humains ont imaginé que des groupes d'étoiles brillantes formaient des figures se rapportant souvent à leurs légendes. On appelle ces groupements d'étoiles

« **constellations** »

Dans son *Almageste*, l'astronome Claude Ptolémée (vers 140 après J.-C.) a dressé une liste de **48 constellations** qui s'enrichira à la fin du XVI<sup>ème</sup> siècle grâce aux explorations lointaines qui feront découvrir des portions croissantes du ciel de l'hémisphère sud. Ces constellations ne sont qu'une pure apparence: si nous habitions une planète d'un système solaire lointain, nous verrions un ciel nocturne très différent.

Les constellations se modifient au cours des millénaires, car les étoiles ne sont pas immobiles dans l'espace. Par exemple, notre Soleil fonce à la vitesse de 19,4 km par seconde vers une étoile de la constellation d'Hercule qui ne restera pas sur place pour l'attendre puisqu'elle se déplace aussi. Ces mouvements rapides sont difficiles à déceler d'une année à l'autre en raison de la distance énorme des étoiles. Mais au fil des millénaires, ils ne sont pas négligeables: sur des gravures rupestres très anciennes, la Grande Ourse est représentée différemment de la «casserole» qui nous est familière.

Les noms des étoiles les plus brillantes : Sirius, Altaïr, Aldébaran, Véga, Rigel, sont en général d'origine arabe ou persane.

C'est à Ptolémée aussi que l'on doit le système de classification des étoiles en fonction de leur éclat ou **magnitude**. Les 1028 étoiles qu'il avait répertoriées sont réparties en six classes: aux plus brillantes est attribuée la magnitude 1 tandis que les étoiles juste encore visibles sont de magnitude 6.

A l'oeil nu, il est possible de voir 5 à 6000 étoiles. Mais depuis que les astronomes utilisent des instruments optiques (début du XVII<sup>e</sup> siècle), les **cartes du ciel** se sont enrichies d'étoiles de plus en plus faibles. Les **atlas** photographiques tels que celui du Palomar contiennent plusieurs millions d'étoiles dont les plus faibles avoisinent la magnitude 23. De ces cartes ont été bannies les belles représentations imagées des constellations.

Seule survivance des siècles passés: les étoiles brillantes sont encore désignées par la succession des lettres grecques. Tout astronome, professionnel ou amateur, sait que Bételgeuse est l'étoile «Alpha d'Orion» ou «Alpha Orionis» tandis que «Béta Orionis» désigne sa soeur de la même constellation.

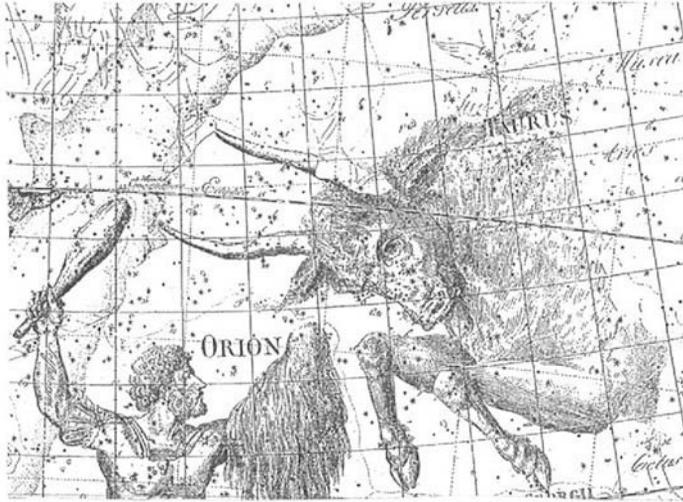
Nous sommes encore dans le monde des apparences. Exemple: si l'étoile Véga (Alpha de la Lyre) domine par son éclat le ciel d'été, c'est certes parce qu'elle est plus brillante que notre Soleil (57 fois), mais surtout parce qu'elle est proche (25 années - lumière). C'est pourtant un astre très modeste comparé à sa proche voisine Dénéb (Alpha Cygni): celle-ci, à peine moins brillante en apparence, est en réalité un astre d'un éclat monstrueux, qui brille comme 76 000 Soleils ! Mais sa distance est d'environ 1600 années-lumière.

Le vrai problème consiste à déterminer, à partir de l'éclat apparent ou **magnitude apparente** d'une étoile, sa **magnitude absolue** (en d'autres termes, son éclat réel). Il faut pour cela connaître sa distance.

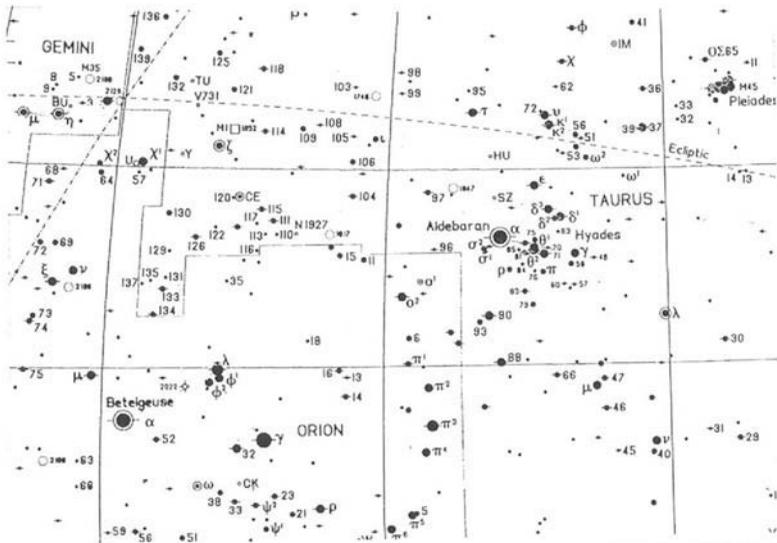


**Distance des étoiles.**

La mesure de l'univers est un des chapitres les plus passionnants de l'astronomie. Si, dans le système solaire, on peut encore mesurer les distances en millions de kilomètres, cette unité ne convient plus à l'échelle des espaces interstellaires. Les astronomes utilisent de préférence **l'année-lumière**, correspondant à la distance parcourue par la lumière en un an, soit 63'240 fois la distance Terre-Soleil. Pour mesurer la distance des étoiles, la méthode classique utilisée par les astronomes est celle de la **parallaxe**, fondée sur le même principe que le télémètre. On vise une étoile depuis les deux bouts d'une base, et la trigonométrie permet aisément, connaissant sa longueur et la valeur des deux angles de visée, de calculer la distance de l'astre.



ATLAS DE BODE (Berlin, 1801)



ATLAS DE NORTON (19<sup>ème</sup> édition, 1998)

Fig. 14 Une ancienne carte du ciel et son équivalent moderne

Mais nous avons constaté, à l'expérience, que notre télémètre perd toute précision dès que la distance dépasse quelques dizaines de mètres. Il y a deux solutions: accroître la précision optique et mécanique de l'instrument (solution des artilleurs) ou augmenter la longueur de sa base.

En utilisant deux points éloignés à la surface du globe terrestre, on obtient une base assez longue pour mesurer les distances à l'intérieur du Système Solaire, mais pour les étoiles, c'est insuffisant. D'où l'astuce suivante: durant sa course annuelle autour du Soleil, la Terre nous transporte gratis à chaque extrémité d'une base dont la longueur équivaut au diamètre de l'orbite terrestre: il suffit de mesurer les deux angles à six mois d'intervalle.

Les astronomes appellent **parallaxe** l'angle sous lequel Astrognomus verrait le rayon de l'orbite terrestre si on le plaçait sur l'étoile dont on veut mesurer la distance.

L'unité de mesure correspondante est le **parsec** (= parallaxe de 1 seconde); 1 parsec équivaut à 3,26 années-lumière.

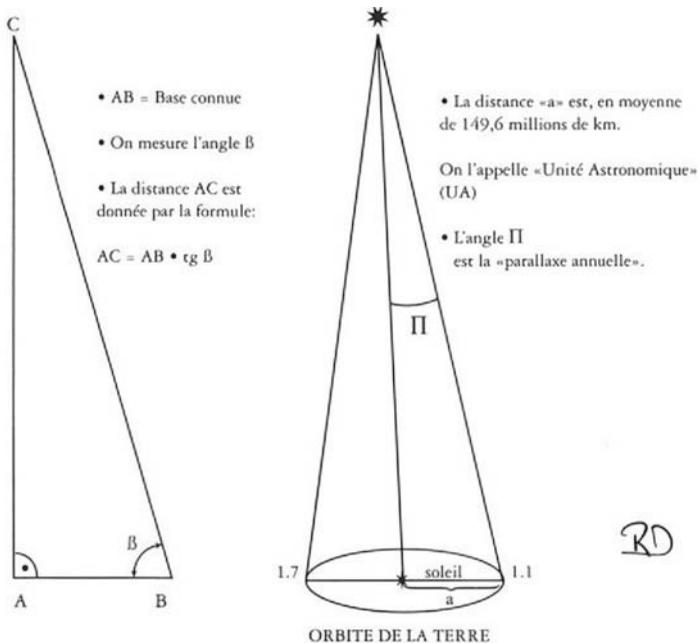


Fig. 15 Le principe du télémètre et son application à la mesure des distances des étoiles

Même pour les étoiles les plus proches, les angles de parallaxe sont très petits et leur mesure est, de ce fait, délicate.

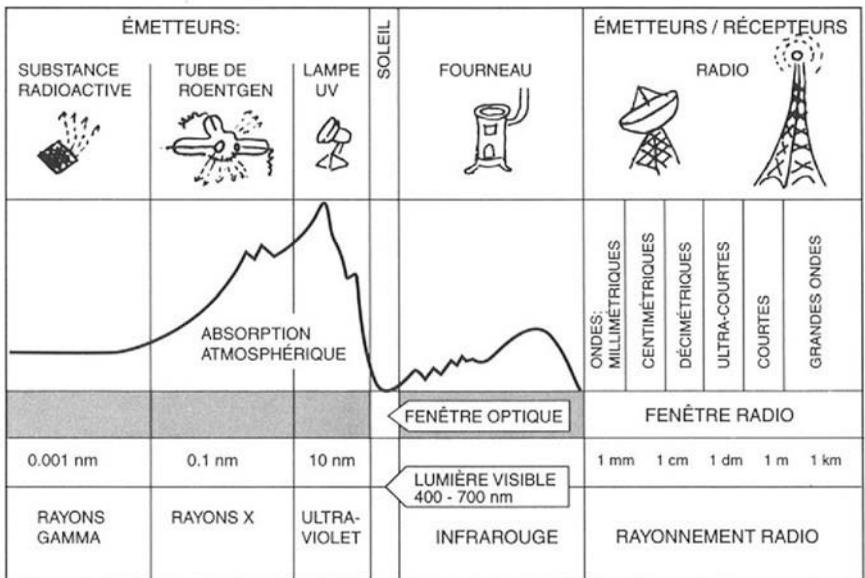
Dans le passé, cette méthode dite des **parallaxes géométriques** a permis de mesurer avec une précision acceptable la distance de quelques dizaines d'étoiles voisines du Soleil. Pour des étoiles plus lointaines, on recourt à d'autres méthodes qui sont toutes fondées, en dernière analyse, sur celle des parallaxes qui sert d'étalon; elle est donc d'une importance fondamentale.

L'envoi récent de **satellites astrométriques** comme Hipparcos a permis de faire un gain spectaculaire. Nous connaissons maintenant, avec une précision dix fois meilleure, les distances d'environ 120'000 étoiles peuplant notre banlieue interstellaire.

**La structure interne des étoiles.**

La plupart de nos connaissances sur les étoiles nous sont fournies par l'étude de leur lumière que l'on décompose en **spectres (analyse spectrale)**.

Mais la lumière visible directement accessible à nos yeux, à nos télescopes optiques et leurs récepteurs ne constituent qu'une très petite partie du message émis par les astres sous forme de **radiations**. Les radiotélescopes, puis les satellites artificiels grâce auxquels nous nous affranchissons de l'atmosphère terrestre, ont permis d'élargir le champ d'étude aux rayonnements infrarouges, aux rayons ultra-violet, aux rayons X et aux rayons gamma. Depuis quelques décennies, notre connaissance de l'Univers s'est enrichie de façon prodigieuse.



*Fig.16 Le spectre électromagnétique*

Notre **Soleil** est une étoile moyenne, il y en a de beaucoup plus grosses, mais aussi de plus petites. C'est de lui que nous allons parler tout d'abord. C'est une énorme boule composée essentiellement de deux gaz, les plus simples de la nature : l'hydrogène, H, (75%) et l'hélium, He, (23%). Alors même que ce n'est pas un corps solide, pourquoi cette boule conserve-t-elle la même taille depuis probablement des milliards d'années ? Répondons de la manière la plus simple possible : « parce qu'il est en équilibre ». Chaque décimètre cube de gaz à l'intérieur

de notre étoile a un certain poids, mais il supporte encore le poids de tous les décimètres cubes de gaz entassés sur lui. Ceci parce qu'une force fondamentale appelée **Gravitation** attire toutes les masses vers le centre de gravité, qui se trouve au milieu de la boule. Cela explique, sur votre tableau de la page 36, qu'un décimètre de gaz solaire pris au centre pèse 14 fois plus que du plomb ! Et il pourrait peser énormément plus encore, si... Mais où est ce bel équilibre dont a parlé plus haut ?

La gravitation est compensée, par une autre force s'exerçant en sens inverse. Cette force, c'est l'**énergie rayonnée** du noyau vers l'extérieur. Quelle est la source de cette énergie ? On s'est autrefois demandé si ce n'était pas simplement le gaz qui brûlait, ou encore du charbon...

Il faut savoir que l'énorme pression du gaz au cœur du Soleil engendre un accroissement de la température. Et lorsque cette température atteint 5 millions de degrés démarrent les **réactions thermonucléaires** qui sont la source de l'énergie des étoiles. L'hydrogène se transforme en hélium au cours d'une série de réactions en chaîne qui libèrent une énergie colossale, infiniment plus que ne le pourrait faire un feu de charbon.

Et si le Soleil est en équilibre, c'est parce que ces deux forces antagonistes se compensent exactement. Miracle ? Disons que, heureusement, notre Soleil est sur ce point semblable à la majorité des étoiles qui ne cèdent pas à la fantaisie d'enfler le mardi pour se ratatiner le samedi. Mais cela ne va pas de soi ! Il existe des étoiles moins ou peu stables, qu'on appelle **variables**. Et nous verrons que le Soleil ne conservera pas cette belle régularité jusqu'à sa mort.

Vous avez pu remarquer sur les quatre modèles d'étoiles une analogie de structure : on distingue toujours une couche superficielle et au centre un noyau plus ou moins gros. Ce noyau, siège des réactions thermonucléaires, s'enrichit progressivement de la « cendre » de ces réactions ; pour le Soleil c'est l'hélium. Selon les types d'étoiles (Géantes, Naine Blanche, Etoile à Neutrons) on relève des différences de nature et de proportions.

La zone intermédiaire entre la couche extérieure et le noyau peut être animée de vastes courants « de brassage » (convection) qui transportent l'énergie vers l'extérieur ; c'est notamment le cas dans les étoiles géantes. A certains moments de leur évolution, les grosses étoiles peuvent comprendre plusieurs couches concentriques (structure en oignon).

### L'évolution des étoiles, leur vie et leur mort.

Dès 1913, les deux astronomes Herzprung et Russel ont eu l'idée de placer sur un tableau à deux entrées – un diagramme – les étoiles proches dont on avait pu établir le **spectre** (disons ici, pour simplifier, la couleur) et la **magnitude absolue** (ce qui postulait qu'on avait pu d'abord mesurer leur distance).

Nous avons un peu simplifié la présentation de ce **diagramme H-R**, comme on l'appelle couramment.

A gauche de bas en haut : l'éclat des étoiles en « nombre de Soleils ».

En bas, de gauche à droite, les couleurs des étoiles, qui sont liées à leur température de surface : bleu (20' à 10'000 °), blanc (9-8'000°), jaune-orange (7 – 5'000°), rouge (4'-3'000°). Nous avons suggéré à l'aide de disques les différences de tailles des étoiles.

Herzprung et Russel ont obtenu un curieux résultat : leurs quelques centaines d'étoiles ne se répartissaient pas au hasard. Jugez-en vous-même par la figure ci-après.

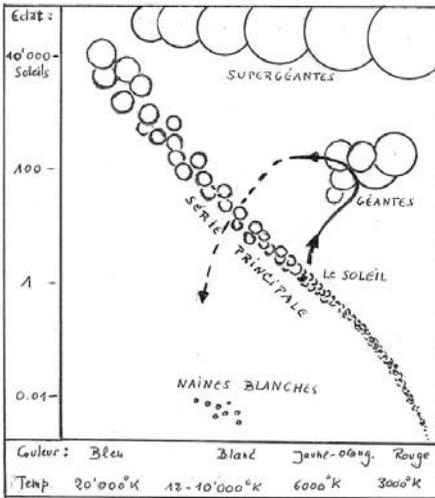


Fig. 17 Le diagramme Hertzsprung-Russell

La grande majorité des étoiles étaient logées dans une bande oblique traversant tout le diagramme, et qu'on baptisa **Série principale**. S'y ajoutaient d'autres groupements : à droite vers le haut, un tas de quelques étoiles rouges nettement plus brillantes que le Soleil – environ 100 fois ; on les baptisa « **Géantes Rouges** ». Tout en haut du diagramme, les monstres – de 1'000 à 10'000 Soleils, et même encore plus ; notez que leur couleur peut varier du bleu au rouge en passant par le blanc. Nom : les **Supergéantes**. Enfin, tout en bas à gauche, un groupe assez pauvre d'étoiles blanches de très faible éclat, ce sont les **Naines Blanches**.

Très rapidement, les astronomes se sont demandé si ce diagramme HR n'exprimait pas, en arrière-fond dirions-nous, **l'évolution des étoiles**.

Réponse : oui !

Mais ce n'est que très récemment, grâce à la **modélisation** par ordinateurs, que l'on est parvenu à dessiner des parcours évolutifs satisfaisants, et surtout à décrire les causes profondes de ces parcours. Nous donnons sur le diagramme, sous la forme d'une courbe noire, le parcours du Soleil.

Voici, très simplifiée, son évolution probable.

Passé le stade d'une protoétoile, lorsque la température centrale a atteint les 5 millions de degrés nécessaires, le Soleil s'est allumé sur la Série Principale. A mi-hauteur, parce que c'était un astre de masse moyenne. Cela s'est passé il y a 5 milliards d'années. Il demeurera à cet endroit encore 5 autres milliards d'années – aussi longtemps qu'il lui restera assez d'hydrogène pour alimenter ses réactions thermonucléaires.

Lorsque le plus gros de la masse solaire se sera transformée en hélium, les choses changeront radicalement : le Soleil quittera la Série Principale pour grimper vers la droite – il deviendra donc à la fois plus rouge – donc plus froid, et aussi plus lumineux : il sera devenu une **Géante Rouge**. Mais tout se passera beaucoup plus vite que sur la Série Principale : l'évolution se comptera désormais en millions d'années.

La suite du parcours est un peu incertaine. Une chose est sûre : le Soleil aura perdu au stade de géante rouge une importante quantité de matière « par évaporation » de sa couche extérieure très ténue.

Son voyage s'achèvera dans le bas gauche du diagramme HR. Il sera devenu une **Naine Blanche** : un astre ratatiné, mais d'une densité énorme, dont seule encore une mince couche extérieure émettra de la lumière avant de s'éteindre.

Le sort du Soleil sera partagé par toutes ses sœurs, pour autant que leur masse initiale ne soit pas 8 fois supérieure à la sienne. En revanche, les étoiles plus lourdes connaîtront un sort plus dramatique. Tout d'abord, elles seront soumises à une règle impitoyable : « plus riche tu seras, d'autant plus vite tu mourras. » Traduisons : plus l'évolution d'une étoile démarre haut sur la Série Principale, plus elle est rapide : pour une grosse étoile, on ne compte plus en milliards, mais en millions d'années, ce qui est un temps très court.

Une étoile de masse supérieure à 8 Soleils achèvera son parcours sous la forme d'une **Etoile à Neutrons**. Une très grosse étoile dont la masse initiale dépasse 40 Soleils peut donner un **Trou Noir**. Mais ce stade ultime sera précédé par un effondrement provoquant un des phénomènes les plus violents de l'Univers : une **Supernova**.

Les « cendres » des réactions nucléaires dont nous avons parlé, ce sont pour les étoiles de type solaire tous les éléments chimiques légers : carbone, silicium et jusqu'au fer. Les noyaux atomiques les plus lourds sont fusionnés lors de l'explosion d'une supernova.

Cette matière résiduelle est restituée à l'univers déjà au cours du parcours évolutif (Géante Rouge), et aussi en fin de vie de l'astre. Une étoile de formation récente est donc plus riche en métaux qu'un astre très ancien dont la matière est plus proche de l'hydrogène originel.

Chaque nouvelle génération d'étoiles s'enrichit ainsi des cendres des astres déjà morts.

## ANNEXE :

### Tableau des angles et des distances pour le télémètre

Les angles sont indiqués à l'approximation utile: on peut lire sur notre télémètre le degré.

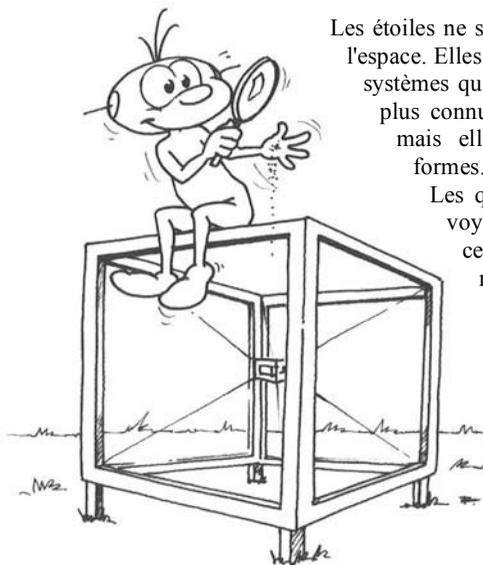
Objet visé	Angle mesuré	Distance en mètres
1 <sup>er</sup> piquet	45 °	2 m
2 <sup>ème</sup> piquet	63°	4 m
3 <sup>ème</sup> piquet	71°	6 m
4 <sup>ème</sup> piquet	75°	8 m
5 <sup>ème</sup> piquet	77°	10 m
Sapin	87°	80 m
Dents de Morcles	89.9°	34 000 m



## Quatrième étape

# NOTRE GALAXIE

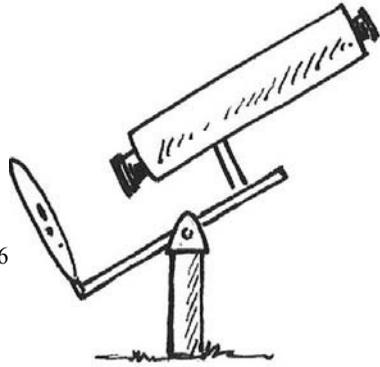
## ET LE GROUPE LOCAL



Les étoiles ne sont pas disséminées au hasard dans l'espace. Elles sont groupées à l'intérieur de vastes systèmes qu'on appelle **galaxies**. Leur image la plus connue est celle de spirales en rotation, mais elles peuvent avoir aussi d'autres formes.

Les quelques milliers d'étoiles que nous voyons dans le ciel à l'oeil nu ainsi que celles, beaucoup plus faibles, que nous révèlent nos télescopes, ne sont qu'une toute petite partie des 200 milliards d'étoiles qui constituent **notre Galaxie**.

Comme le montrent les clichés pris à l'aide des plus grands télescopes, notre Galaxie n'en est qu'une parmi des millions de galaxies, dont l'ensemble constitue l'**Univers**

**Objet 1: Le microscope.**

Au sujet de notre base de 15,6 kilomètres allant des Pléiades au Grammont, récapitulons:  
à l'étape 1, elle avait sa valeur réelle, soit 15,6 km;  
à l'étape 2, elle donnait la mesure du système solaire, représentant la distance du Soleil à Pluton;



puis survint le grand saut:  
à l'étape 3, notre base représentait la distance qui nous sépare la prochaine étoile, Alpha du Centaure.

Un nouveau grand saut nous transporte au coeur de notre Galaxie: la base Pléiades-Grammont représente maintenant la distance séparant le centre de notre Galaxie d'une étoile jaune assez modeste, logée dans les régions extérieures d'un bras de la spirale...

... mais c'est notre étoile préférée, que nous appelons «le Soleil».



*La lumière met environ 30'000 ans pour couvrir la distance séparant le Soleil du centre de notre Galaxie qui, dans son entier, a un diamètre d'environ 110'000 années-lumière. Si nous voulions dessiner notre Galaxie à la nouvelle échelle, elle recouvrirait une grande partie du canton de Vaud de Lausanne à Aigle,*

Que devient, à cette échelle, la «petite» distance de 149'597'870 kilomètres séparant la Terre du Soleil ?

Astrognomus vous tire par la main, suivez-le:



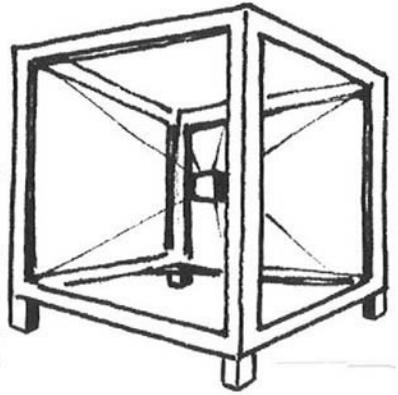
«Par ici, Messieurs-Dames ! Venez coller votre œil à mon microscope! Il grossit dix mille fois ! Vous allez voir ce que vous allez voir !»



Que représentent, à l'échelle de notre Galaxie et grossis dix mille fois, les deux points que vous voyez dans le microscope ?

Il y en a un gros au milieu, et un petit posé sur un cercle.



**Objet 2; Le sable de Jordanie**

*...Oui, vous aviez raison: les deux points dans le microscope représentaient la Terre, qui sur son orbite tourne autour du Soleil.*

D'un voyage en Jordanie, nous avons ramené une petite bouteille pleine d'un sable très fin. En appliquant une règle métrique contre la bouteille, nous avons fait une observation intéressante:



sur 1 millimètre, nous pouvons aligner trois grains de sable, donc 30 sur un centimètre et 300 sur un décimètre.

Un astronome doit savoir manier les grands nombres!  
Sur un carré de papier de 1 dm de côté (10 cm x 10 cm), combien pourriez-vous disposer de grains de sable ? (une seule couche!)



Combien de grains de sable contient approximativement le cube de 1 décimètre d'arête suspendu à l'intérieur du modèle ?



Considérez maintenant le grand cube métallique représenté par cette construction. Chacun de ses cotés mesure 1,90 mètre.

*Le Docteur Astrognomus va maintenant lever le voile sur le mystère du Grand Cube et du sable de Jordanie.*

«C'est ici, Messieurs-Dames, que l'infiniment petit rejoint l'infiniment grand. Si, de sable de Jordanie, vous remplissiez entièrement ce grand cube, chaque grain représenterait une des 200 milliards d'étoiles de notre Galaxie. Notre Soleil est un de ces grains. Et notre Terre tourne autour du grain!»  
«A propos, vous êtes toujours le super caïd de votre quartier ?»



### Objet 3: Notre Galaxie



Ce modèle tente de représenter une galaxie semblable à la nôtre. A cette échelle on ne peut distinguer que des nuages formés de millions d'étoiles, répartis en plusieurs **bras** qui se développent à partir d'un **noyau central**.

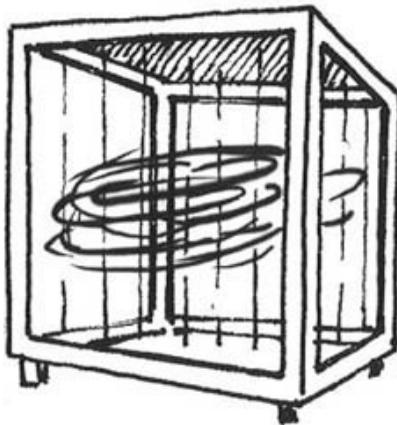
Remarquez la minceur du disque par rapport au noyau.

Notez la position qu'occuperait notre Soleil à l'intérieur de cette galaxie.

Cette galaxie est en rotation; elle accomplit un tour sur elle-même en 250 millions d'années.

La courbe en forme de trèfle illustre le parcours d'une seule étoile pendant une rotation de notre Galaxie. Comme chacune de ses consœurs, elle accomplit un périple fantastique dans cette masse où tout est en mouvement.

Notre galaxie n'est pas seule de son espèce, les grands télescopes en montrent des millions, réparties sur toute la voûte céleste.



Essayez de décrire notre Galaxie.



- Quelle place occupe le noyau de la Galaxie ?  
(peu- moyennement- beaucoup de place).
- Autour du noyau, la galaxie est-elle construite de manière régulière?
- Combien compte-t-elle de bras spiraux ?



- Ont-ils tous approximativement la même longueur ?

Considérons maintenant notre situation dans la Galaxie.



- Avez-vous l'impression que nous y occupons une place de choix (par exemple au centre)?
- où sommes-nous situés ?



- Vous servant de l'échelle des distances qui accompagne ce modèle, dites combien de temps un rayon de lumière mettrait:
- pour aller du Soleil au centre de la Galaxie;
  - pour parcourir la Galaxie dans sa plus grande longueur;
  - pour traverser le bras de la Galaxie à l'endroit où se trouve le Soleil.



D'un coup de baguette magique, Astrognomus va maintenant vous transporter à un endroit particulier de la Galaxie: là où se trouve notre Soleil entouré de son cortège de planètes, dont notre Terre.

Cette question fait appel à votre imagination !



Depuis l'endroit où Astrognomus vient de vous transporter, dans quelle direction le ciel vous paraîtra-t-il lumineux ? Dans quelle direction le ciel vous paraîtra-t-il noir?

Revenons sur terre. Si, par une belle nuit d'été, en rase campagne ou à la montagne, loin des lumières parasites et en l'absence de lune, vous regardez le ciel, vous est-il



possible de faire la liaison entre vos réponses à la question précédente et ce que vous voyez ?

Essayez de trouver une carte du ciel assez détaillée; au besoin allez en consulter une dans un observatoire. Sur une telle carte, les galaxies sont en général représentées par une petite ellipse.



Etudiez la répartition, sur la carte, des galaxies extérieures à la nôtre.

- Sont-elles réparties sur toute la carte de manière uniforme?

- Y-a-t-il des régions entières où l'on n'en trouve pas?

Si c'est le cas, à quoi correspondent ces régions ?



Participant à la rotation de la Galaxie, notre Soleil y fait aussi un tour en 250 millions d'années.



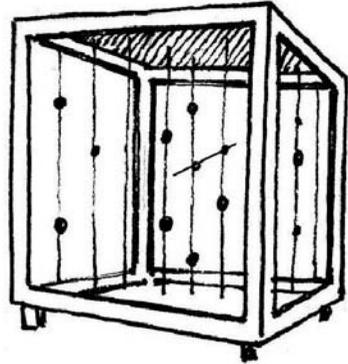
Dans le tableau ci-dessus, repérez notre situation lors du précédent passage du Soleil au même point

**Il y a :**

**Evolution :**

4.6 milliards d'années	Création du système solaire
3-4 milliards	Premières traces de vie sur terre
500-300 millions	Invertébrés, poissons, premiers vertébrés
200-100 millions	Ammonites, grands sauriens, premiers petits mammifères, premiers oiseaux
70 millions	Grands mammifères, primates
4 millions	Australopithèques
2 millions	Apparition de l'homme

Objet 4: Les étoiles proches du Soleil.



Ce modèle représente les étoiles qui entourent le Soleil dans un rayon de 5 parsecs (= environ 16 années-lumière).

C'est vraiment un tout petit coin de notre Galaxie !

Si nous voulions construire un modèle de notre Galaxie entière à la même échelle, l'épaisseur du bras où est logé notre Soleil serait d'environ 70 mètres, et le centre de la Galaxie serait à 1800 mètres d'ici.

*Attention! Pour qu'on puisse voir les étoiles sur ce modèle, elles ont été grossies un million de fois par rapport aux distances qui les séparent*

Repérez les étoiles suivantes:

Le Soleil - Alpha du Centaure - Sirius - Altaïr.



A l'aide de l'échelle graduée, en parsecs ou en années-lumière, estimez les distances:

Soleil - Alpha du Centaure

Soleil - Sirius

Soleil - Altaïr



Comptez:

- les étoiles égales au Soleil ou plus grosses que lui;

- les étoiles plus petites que le Soleil.

Quelles conclusions tirez-vous de ces deux décomptes ?



Il existe des étoiles doubles et des étoiles multiples; il y en a un certain nombre dans ce modèle. Comptez-les et soulignez, dans la phrase qui suit, la bonne réponse:

«Les **étoiles doubles** ou **multiples** sont:

très rares / assez nombreuses (environ 1/3 de la population globale) / les plus nombreuses.»



Vous remarquez que les étoiles de ce modèle sont colorées. C'est une indication de leur **température de surface**.

*Une étoile rouge ou orangée est relativement «froide», tandis qu'une étoile blanche ou bleue est très chaude. Le Soleil a une température «moyenne» d'environ 5600 degrés, d'où sa couleur jaune.*

Quelle est l'affirmation correcte ?

«Les étoiles proches sont, en majorité:

- plus chaudes que le Soleil,
- plus froides que le Soleil,
- de la même température que le Soleil.»



Rappel: sur ce modèle, les étoiles ont été grossies un million de fois. Que pouvez-vous dire de la place qu'occupe la matière dans l'espace ?

### Objet 5: Les Pléiades



Cet amas ouvert est déjà mentionné par des annales chinoises datant de l'an -2357 ; il est également mentionné dans la Bible au livre de Job.

Il compte plus d'un millier d'étoiles dont les plus brillantes sont des géantes bleues très chaudes. Une douzaine sont visibles à l'oeil nu. Aux jumelles, le spectacle est enchanteur: des dizaines d'autres étoiles apparaissent.

C'est un amas « jeune », son âge est d'environ 70 millions d'années. Sa distance est de 410 AL.

On a longtemps cru que ses étoiles très chaudes de formation récente baignaient dans la nappe de gaz à partir de laquelle elles s'étaient concentrées. La réalité est différente : comme on le voit sur notre modèle, les nébulosités ne font pas partie de l'amas, elles sont situées, par rapport à nous, devant lui. C'est donc comme si on voyait ses étoiles derrière une gaze très fine, ce que les photos mettent bien en évidence.

De tous les objets célestes, c'est un des plus étudiés par les astronomes professionnels. C'est aussi un des préférés des amateurs, car il est aisé à photographier avec de petits instruments.



L'origine du nom « Pléiades » provient de la mythologie grecque : les Pléiades sont sept soeurs, filles d'Atlas et de Pléioné : Astérope, Mérope (ou Dryope, ou Aéro), Électre, Maïa, Taygète, Céléno (ou Sélène) et Alcyone.

Quand au nom du sommet sur lequel nous nous trouvons, il résulte d'une déformation du terme «Laplayau», qui désignait l'endroit où l'on attelle les chevaux après dévillage du bois abattu.

Une anecdote à propos des Pléiades : le nom japonais de l'amas est «Subaru», qui signifie « unité ». En 1953, 5 firmes japonaises ont fusionné pour former «Fuji Heavy Industries Ltd ». Ce groupe a donné ce nom et son logo à la marque de voitures bien connue.

**Objet 6: Le Groupe Local de galaxies.**

Voici les 25 galaxies repérées dans notre voisinage.

Le cube de notre modèle a une arête équivalant à 2 Mégaparsecs (= 2 millions de parsecs ou 6,52 millions d'années-lumière). Notre Galaxie est cerclée de rouge, tandis que la galaxie M 31 dans la constellation d'Andromède est cerclée de jaune.

Le trait rouge indique la distance parcourue par la lumière en 1 million d'années, à raison de 300'000 km par seconde



Dans le **Groupe Local**, quelles sont les plus grandes galaxies ?



Sont-elles comparables ? Quelle est leur forme ?

Que pouvez-vous dire de la majorité des galaxies du Groupe Local ?

*Dans ce modèle, par rapport aux distances, les dimensions des galaxies ont été augmentées de 10 fois, pour qu'on les voie bien.*



Vous souvenant de ce que vous avez appris au sujet des étoiles: les galaxies sont-elles plus serrées, ou moins serrées, les unes contre les autres, que les étoiles ?

**Pour prendre congé... deux suggestions:**

La galaxie **M 31** se trouve dans la constellation d'Andromède, qui est visible dans le ciel d'automne. C'est la seule galaxie extérieure qui puisse être repérée à l'œil nu et étudiée à l'aide d'un petit instrument



Allez-la voir à l'observatoire le plus proche.

Vous pourriez la photographier à l'aide d'un petit téléobjectif. C'est à votre portée si vous êtes un peu bricoleur. Mais comme cet objet exige une « longue pose » et que pendant la pose le ciel se déplace, il vaut la peine, si l'on veut réussir sa photo, de demander des conseils dans un observatoire d'amateurs. Vous en trouverez l'adresse en consultant le site Internet indiqué dans l'annexe à la fin de l'ouvrage.



**Complément théorique.**

(Réponses à deux questions posées à propos du sable de Jordanie:

1 dm<sup>2</sup> recouvert de 1 couche de sable:  $300 \times 300 = 90'000$  grains.

1 dm<sup>3</sup> rempli de sable:  $300 \times 300 \times 300 = 27'000'000$  de grains.)



La science des galaxies est encore très jeune. C'est en 1923 que l'astronome américain E. Hubble, à l'aide du télescope de 2,5 mètres du Mount Wilson (le plus grand de l'époque), parvint à résoudre en étoiles la nébuleuse M31 d'Andromède. Il établissait de manière définitive le fait qu'il s'agit d'un objet situé très loin en dehors de la Galaxie à laquelle nous appartenons.

Réglons au passage quelques points de terminologie.

Lorsque nous voulons parler de notre galaxie, nous l'appelons «**la Galaxie**», avec une majuscule. Nous disons et écrivons «**les galaxies**» pour parler de l'ensemble de ces systèmes dont le philosophe Kant, au XVIII<sup>e</sup> siècle, avait déjà pressenti l'existence et pour lesquels Humboldt avait proposé, vers 1850, le nom évocateur d'«univers-îles».

Lorsque nous parlons de la galaxie M31, cela veut dire que cet objet porte le numéro 31 du **catalogue de Messier** (1730-1817). Cet astronome français est l'auteur du premier catalogue d'objets nébuleux. Mais sa petite lunette ne lui permettait pas de préciser la nature de ces corps célestes. Parmi les objets répertoriés par Messier, on trouve des galaxies relativement proches (M31, M33, M51, M81, M 101), mais aussi des nébuleuses gazeuses appartenant à notre Galaxie (M8, M20, M42), des amas d'étoiles plus ou moins concentrés (M13, M44) et même des résidus d'explosions d'étoiles (M1, M27, M57). Il existe des catalogues beaucoup plus complets, par exemple le New General Catalogue. C'est ainsi que notre galaxie voisine M31 répond aussi à la désignation de NGC224.

Nous avons déjà, à l'étape précédente, introduit l'unité de mesure du parsec qui équivaut à 3,26 années-lumière. Pour mesurer les distances à l'échelle des galaxies ou les distances intergalactiques, les astronomes utilisent ses multiples:

1 Kiloparsec (Kpc) = 1'000 parsecs

1 Mégaparsec (Mpc) = 1'000'000 parsecs

Notre Galaxie, comme sa voisine M31, est une grande galaxie dont les dimensions sont les suivantes:

plus grand diamètre:	34 Kpc	(110'000 AL)
diamètre du noyau:	5 Kpc	(16'500 AL)
distance du Soleil au centre:	9 Kpc	(30'000 AL)
épaisseur du bras à la hauteur du Soleil:	0,3 Kpc	(1'000 AL)

Grâce à leurs grands télescopes et surtout grâce à des instruments spécialement conçus pour photographier des régions étendues du ciel (télescopes de Schmidt), les astronomes du XX<sup>e</sup> siècle ont dressé un inventaire très complet du monde des galaxies. C'est à Hubble aussi que l'on doit une classification des galaxies encore en usage de nos jours.

Si leur forme la plus connue est celle de belles spirales aux bras plus ou moins développés, c'est loin d'être la seule, comme le montre le tableau ci-dessous. On a cru, au début, que cette structure en fourchette était évolutive. Ce n'est probablement pas le cas : une galaxie ne commence pas par être elliptique avant de devenir spirale ou irrégulière.

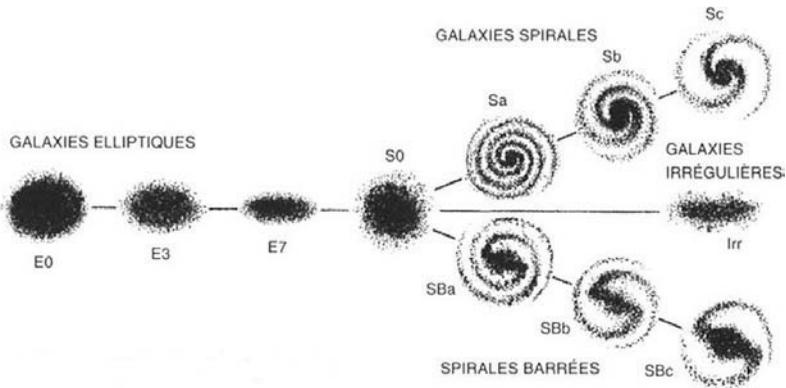


Fig. 17 La classification des galaxies

En pratique, l'étude des galaxies est compliquée par le fait qu'elles ne sont pas toutes vues de face. Par exemple, M31 est vue de trois-quarts. Certaines galaxies se présentent par la tranche, et cet aspect est très instructif, témoin cette image de la galaxie M104 dans la constellation de la Vierge.

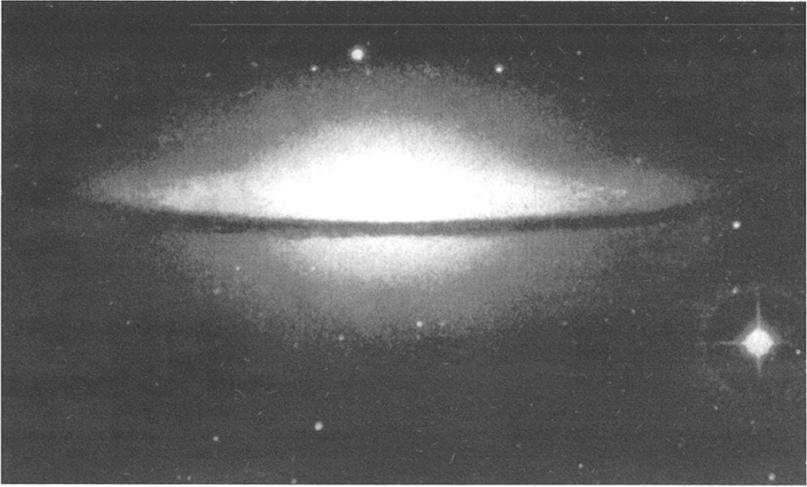


Fig. 18 Galaxie M 104

A propos de cette image de M104, insistons sur deux points. La bande médiane sombre est constituée de vastes nuages de **gaz et de poussières** à l'intérieur desquelles naissent constamment de nouvelles étoiles très brillantes et très chaudes. Sur une galaxie vue de face, ces «nurseries» de nouvelles étoiles s'égrènent le long des bras auxquelles elles donnent, sur les photos, leur typique aspect grumeleux.



Une galaxie spirale comme M31 ou comme la nôtre est, à première vue, une structure plate. Mais en réalité ce disque mince baigne dans un vaste halo en forme de sphère où sont dispersées des myriades d'étoiles. Ce halo est également peuplé d'objets impressionnants appelés **amas globulaires**. Imaginez une pelote serrée de plusieurs centaines de milliers d'étoiles: c'est l'aspect qu'offre, dans un télescope d'amateur déjà, l'amas globulaire M13 dans la constellation d'Hercule, le plus beau de l'hémisphère Nord.

Nous avons mis très longtemps à nous faire une idée précise de notre Galaxie, parce que nous y sommes placés à l'intérieur, dans une position marginale.

Mais à la vue de la figure 18, tout s'explique: la **Voie lactée**, qui entoure notre ciel nocturne d'une ceinture d'aspect laiteux et irrégulier, c'est le plan médian de la Galaxie vu comme sur notre photo de M104, mais de l'intérieur. Si vous en doutez encore, regardez à la jumelle, par un soir d'été, en direction des constellations de l'Aigle, de l'Ecu et du Sagittaire: vous y verrez ces grumeaux de matière mêlés à des myriades d'étoiles très faibles.

Cette direction est précisément celle du noyau de la Galaxie, que nous ne pouvons pas voir. En effet, dans ce milieu très opaque, notre vue ne porte pas très loin: environ 10 000 années-lumière. Et pourtant des signaux nous parviennent du coeur

de la Galaxie sous forme d'ondes radio, de rayons X et de rayons Gamma. Le noyau, qui tourne plus vite que les bras, est le siège d'événements qui peuvent être beaucoup plus violents que les réactions nucléaires. Il est possible qu'un **trou noir** géant, ou même plusieurs trous noirs, se trouvent au coeur du noyau. Leur masse (environ 1 million de fois le Soleil) serait telle que la **gravitation** qui en résulte empêcherait toute lumière d'en sortir.

Si nous avons pu voir et photographier l'Univers, c'est grâce à notre chance d'être logés sur un bras de la Galaxie: dans les deux directions perpendiculaires au plan de la Galaxie, la matière, peu dense, ne gêne presque pas notre vue.

Aujourd'hui, grâce aux grands télescopes et grâce aux vaisseaux spatiaux qui nous ont permis de nous affranchir de l'atmosphère terrestre, nous pénétrons toujours plus loin les profondeurs de l'Univers. On estime à 150 milliards le nombre des galaxies semblables à la nôtre, qui tournent, se collisionnent sous l'effet de la gravitation, se rejoignent et s'évaporent dans un ballet sans fin.

Leur répartition dans l'Univers n'est pas uniforme. Les galaxies sont généralement regroupées en amas. Le **Groupe Local** auquel nous appartenons est un amas de galaxies plutôt modeste. Mais certains comptent des centaines, voire des milliers de membres; par exemple l'amas Virgo, dans la constellation de la Vierge, compte quelque 2500 objets.



A l'intérieur des amas en tous cas, les galaxies sont plus serrées que ne le sont les étoiles à l'intérieur des galaxies.

Il a fallu attendre les plus puissants ordinateurs pour que les astrophysiciens puissent aborder avec succès les problèmes de **structure et d'évolution** des galaxies. Il est notamment possible, grâce à eux, d'étudier les mouvements des étoiles (ou mieux: des flux d'étoiles) à l'intérieur de la Galaxie. Comme le montre notre modèle, les étoiles y parcourent des mouvements épicycliques à l'intérieur d'une certaine limite.

Comparée aux 250 millions d'années que met notre Galaxie pour effectuer une rotation sur elle-même, la vie de l'humanité sur la terre (sans parler de notre propre vie) est extraordinairement brève, d'où notre impression que l'Univers est immuable. Et pourtant... Si nos lointains ancêtres nous ont laissé, de la Grande Ourse, une image légèrement différente, ce n'est pas l'effet de leur manque de rigueur dans l'observation. Nos puissants ordinateurs, grâce à la **modélisation** qui permet de faire circuler en accéléré les flux d'étoiles dans la Galaxie, confirment cette intuition des philosophes de l'Antiquité (Héraclite, Ve siècle, Platon, IVe siècle): «Toutes choses s'écoulent». L'Univers est en perpétuelle évolution.



## ANNEXES

### *Annexe 1 : Sociétés d'astronomie et observatoires en Suisse Romande.*

L'Union Romande des Sociétés d'Astronomie (URSA) possède un site Internet bien organisé et tenu à jour dont voici l'adresse :

<http://www.astrosurf.com/ursa/>.

Vous y trouverez toutes les adresses utiles sous les rubriques « Sociétés » et « Observatoires ».

Nous conseillons à ceux de nos lecteurs qui veulent suivre certaines de nos suggestions de s'adresser à un observatoire ou une société d'astronomes **amateurs**.

La Suisse Romande possède un observatoire universitaire où travaillent des astronomes **professionnels**, celui de Genève (Sauverny). Il peut assurer certaines prestations à l'égard du public. Se renseigner sur le site indiqué ci-dessus.

**Annexe 2 : Index**

D'une manière générale, les termes figurant dans l'index apparaissent dans le texte en lettres grasses.

<b>Comètes</b>	34-35	<b>Etoiles (suite)</b>	
<b>Distance</b>		doubles ou multiples	56
Télémetre	39,40,45,49	variables	47
Parallaxe	43,45	<b>Galaxies</b>	51-64
Parsec	45,60	La Galaxie et les galaxies	51,60
année-lumière	38,43,52,60	Historique	60
lumière, vitesse	27,38	distances	60
Unité Astronomique	45	dimensions de la Galaxie	52, 60
<b>Eclipses de Lune et de Soleil</b>	10,15-17	structure, noyau et bras	54,62
Eclipses partielles,		rotation	54,55
totales, annulaires	15,17	position du Soleil dans...52-54,62	
l'Ecliptique	16,19,31,33	notre situation dans...	63
nœuds de l'orbite lunaire	16	la Voie Lactée	62
<b>Etoiles</b>	37-49	catalogues de galaxies	
noms des étoiles	42	(Messier, NGC)	60
constellations	31,38,42	le Groupe Local	59,63
atlas et cartes du Ciel	42,44	Galaxies particulières:	
Ptolémée: l'Almageste	42	M 31, M 104	59,62
La Grande Ourse	38,42	constituants : étoiles, gaz, amas	
Le Zodiaque	31	globulaires...	62-63
L'Etoile Polaire	19	trou noir au cœur de...	63
constitution des étoiles	27,38	classification, évolution	61, 63
distances	38,39,42-43	modélisation	
les plus proches	38,56	(étoiles et galaxies)	48,63
éclat, magnitudes apparente		<b>Gravitation</b>	29,35-36,47,63
et absolue	42	Gravitest	29-30
radiations	46	Masse	29
couleur liée à la température	47,57	Pesanteur	36
analyse spectrale, spectre		Universelle, Newton	36
électromagnétique	46	Relativité, Einstein	36
structure interne	41,46	<b>Lune</b>	10,34
évolution	41,47-49	phases	10,32-33
Diagramme HR,		orbite lunaire	16
Série Principale	48	apogée, périgée	17
ét.de type solaire, géantes,		pesanteur sur...	36
naines, à neutrons	48-49	<b>Microscope</b>	<b>52</b>
supernovae	49		
trous noirs	49		

**Les Pléiades**

(dans le ciel et lieu - dit) 57-58

**Sable de Jordanie** 53,60**Système Solaire,** 31,34**Planètes** 25,27,31-34,

âge 31,55

orbite, ellipse 31

lois de Képler 28,31

pl. intérieures et extérieures 32

phases (des pl. intérieures) 32-33

nature des pl. 33-34

Pluton 24

satellites des planètes 31,34

satellites artificiels,

astrométriques 46

**Le Soleil**

Composition 46

énergie, source 47

équilibre 47

température et couleur 47-48,57

dans le diagramme HR 48

évolution probable 48

**la Terre, Notre observatoire****terrestre 9-23**

globe terrestre 10,13,19

mesure de la T., Eratosthène 18

axe de la Terre 12,19

Précession des Equinoxes 19

Equateur, Pôles 12

cercle vertical 28

azimut 28

hauteur sur l'horizon 28

latitude, longitude 12,22

mouvement diurne 17

jour et nuit 13

orbite de la Terre 18

translation et rotation 18

pesanteur sur... 36

**Le Temps et l'heure** 14-15,21-23

Le gnomon 11,17,18

cadrans solaires 14,18,21-22

style 14

le Méridien 18,20,21

jour et nuit, durées 12-13,18-20

jour (sidéral, solaire, etc.) 21-22

**Le Temps et l'heure (suite)**

l'Equation du Temps 14, 22

heure d'été 23

fuseaux horaires 22

année, durée 12,13,18

Les saisons 12-14,18-19

équinoxes, solstices 20

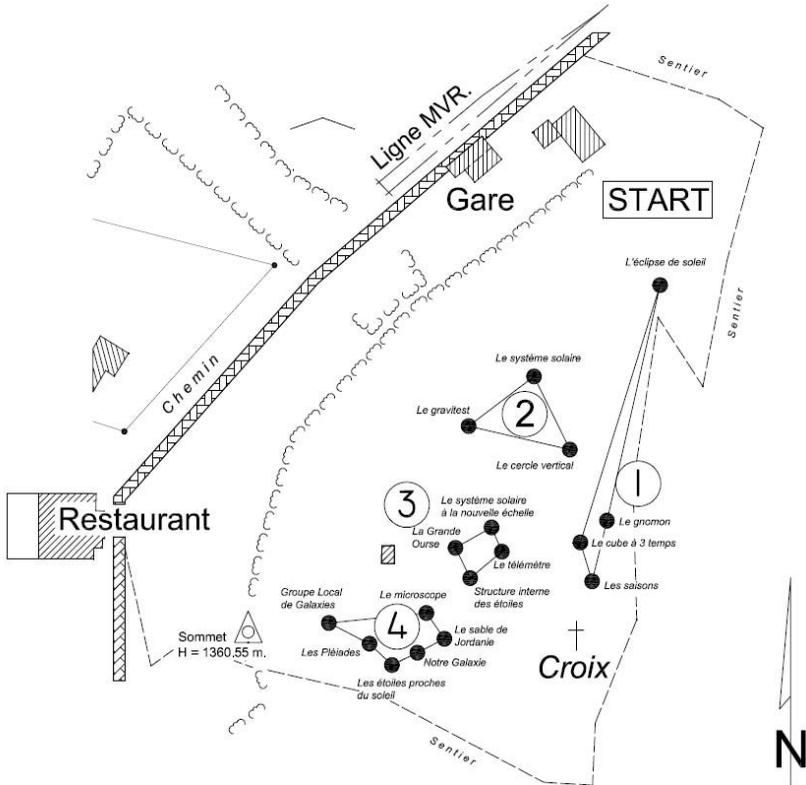
Le Soleil de Minuit 20

**L'Univers**

51,63

## Annexe 3 : Plan du site

## AstroPléiades



## TABLE DES MATIERES

LE PARCOURS CLAUDE NICOLLIER: .....	6
Votre guide Astrognomus .....	6
NOTRE OBSERVATOIRE TERRESTRE.....	9
Objet 1: L'éclipse de Soleil .....	10
Objet 2: Le gnomon.....	11
Objet 3: Les saisons.....	12
Objet 4: Le cube à trois temps .....	14
Complément théorique .....	15
Les éclipses .....	15
Le gnomon .....	17
Les saisons.....	18
Le cadran solaire.....	20
LE SYSTÈME SOLAIRE .....	25
Objet 1: le système solaire .....	26
Objet 2: Le cercle vertical .....	29
Objet 3: Le gravitest .....	30
Complément théorique .....	32
Les planètes.....	32
Les comètes.....	35
Le gravitest.....	36
VERS LES PROCHAINES ÉTOILES .....	39
Objet 1: Le Système Solaire à la nouvelle échelle.....	40
Objet 2: La Grande Ourse .....	40
Objet 3: Le télémètre .....	41
Objet 4: La structure interne des étoiles.....	43
Complément théorique .....	44
Les étoiles, apparences et réalité .....	44
Distance des étoiles .....	45
La structure interne des étoiles .....	48
NOTRE GALAXIE ET LE GROUPE LOCAL .....	53
Objet 1: Le microscope .....	54
Objet 2: Le sable de Jordanie.....	55
Objet 3: Notre Galaxie.....	56
Objet 5: Les Pléiades .....	59
Objet 6: Le Groupe Local de galaxies.....	61
Complément théorique.....	62
ANNEXES .....	67
Annexe 1 : Sociétés d'astronomie et observatoires en Suisse Romande.....	67
Annexe 2 : Index .....	68
Annexe 3 : Plan du site.....	70