

La Maquette

Son but est :

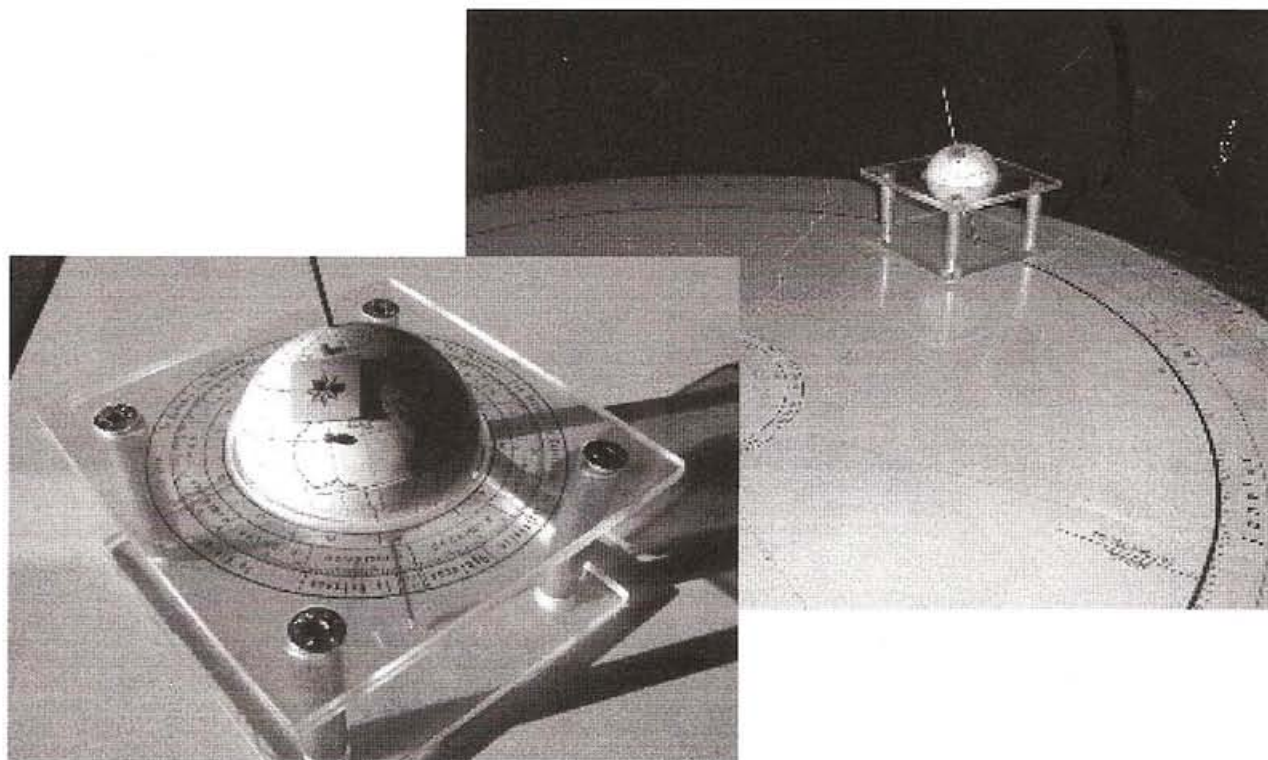
- de visualiser les mouvements de la Terre :

- ♦ son **déplacement autour du Soleil** dans un plan appelé « **plan de l'écliptique** »
- ♦ sa **rotation sur elle-même** autour de l'**axe de pôles** incliné par rapport au plan de l'écliptique,

- puis d'aider à comprendre **comment ces mouvements sont perçus d'un lieu d'observation** situé sur la Terre.

Pour cela, on a besoin de **repères précis et bien matérialisés** :

- un repère héliocentrique, pour représenter les mouvements de la Terre
- un repère géocentrique et un repère local, pour prendre conscience de ces mouvements quand on est sur terre, ce qui n'est pas évident !



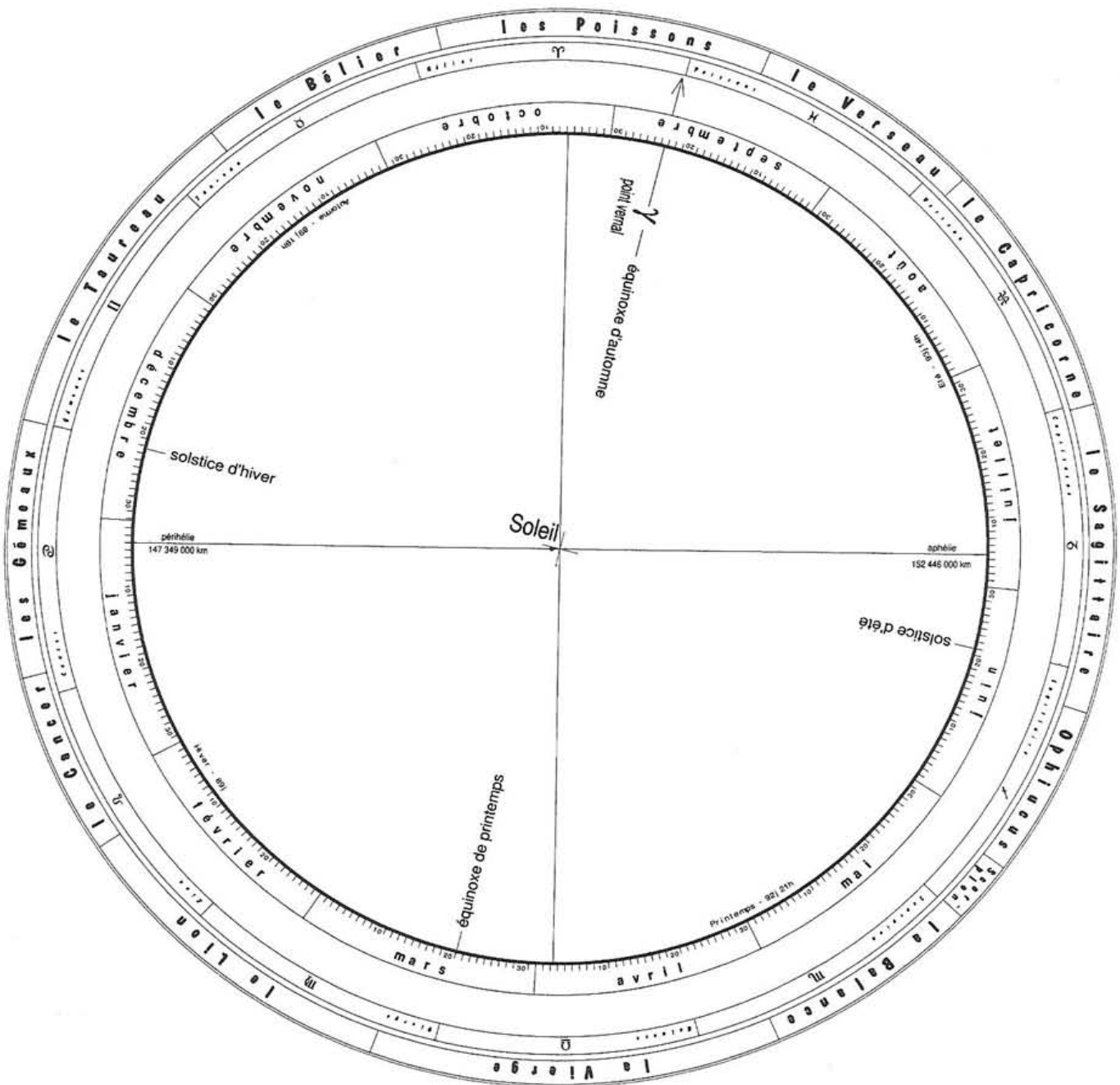
1 – L'orbite de la Terre et le plan de l'écliptique.

a) Ce que l'on sait.

La Terre décrit une trajectoire elliptique autour du Soleil ; celui-ci occupe un des foyers de l'ellipse. L'orbite de la Terre ayant une excentricité faible ($e = 0,0197$), elle a sensiblement la forme d'un cercle. Toutefois son caractère elliptique se manifeste au cours de l'année par une variation de la distance de la Terre au Soleil oscillant entre 147 millions de kilomètres (périhélie) et 152 millions de kilomètres (aphélie).

Au cours de son déplacement autour du Soleil, la Terre conserve son énergie mécanique totale. Son énergie potentielle variant avec sa distance au Soleil, son énergie cinétique varie donc au cours de l'année : sa vitesse sur son orbite, c'est à dire son déplacement angulaire par jour, sera la plus grande au voisinage du périhélie et la plus faible au voisinage de l'aphélie.

La trajectoire de la Terre autour du Soleil



b) La réalisation.

Sur la maquette, la trajectoire de la Terre est un cercle de 35 cm de rayon.; la position du Soleil, à 7 mm du centre de l'ellipse, respecte l'échelle des distances.

Le calendrier grégorien, associé à la trajectoire, indique la position de la Terre pour chaque jour de l'année. Il a été calé sur les dates du périhélie et de l'aphélie qui sont connues : au voisinage du 4 janvier pour le périhélie et du 5 juillet pour l'aphélie. Les graduations ne sont pas équidistantes en raison de la variation de vitesse de la Terre sur son orbite : plus espacées au voisinage du périhélie et plus rapprochées au voisinage de l'aphélie.

Une couronne, dans laquelle sont inscrits les noms des constellations du ciel traversées par le plan de l'écliptique, est représentée sur le pourtour de la feuille. Les étoiles qui les constituent sont extrêmement éloignées du Système solaire et il est impossible de représenter leurs positions à l'échelle du dessin. Mais la taille de chacune des cellules correspond à la largeur angulaire occupée par chacune des constellations, vue de n'importe quel point du Système solaire.

La direction dans laquelle on voit le Soleil depuis la Terre le jour de l'équinoxe de printemps est appelé **point γ** ou point vernal ; il sert de **référence pour le repérage dans le ciel**.

Pour positionner la couronne de constellations, on place donc le point γ , indiqué par une flèche, de manière qu'il se trouve dans le prolongement de la ligne qui joint la position de la Terre au Soleil, le 21 mars.

Une couronne avec les « signes du Zodiaque » est également représentée; elle n'est rien d'autre que les vestiges d'un calendrier primitif imaginé plusieurs siècles avant notre ère (voir plus loin : paragraphe 4-g).

Une lampe est fixée à l'emplacement du Soleil ; elle permet de visualiser les régions de la Terre qui sont éclairées ou dans l'ombre. C'est une ampoule toute simple en verre clair, dont le filament est plan, ce qui donne sur le globe terrestre un contraste très bien marqué.

Ce plan de l'écliptique avec ses graduations, constitue le repère héliocentrique.

2 – Le globe terrestre et sa rotation.

e) Ce que l'on sait.

La Terre tourne sur elle-même autour d'un axe qui fait avec la perpendiculaire au plan de l'écliptique un angle de $23^{\circ} 27'$. L'écliptique étant le plan dans lequel la Terre se déplace autour du Soleil, il est également le plan dans lequel on observe, depuis la Terre, le mouvement apparent du Soleil parmi les étoiles au cours d'une année. Aux équinoxes, le Soleil se trouve dans le plan de l'équateur. Au solstice d'été, il est au plus haut au-dessus de l'équateur c'est à dire au plus proche du pôle Nord et, au solstice d'hiver, il est au plus bas en dessous de l'équateur c'est à dire au plus loin du pôle Nord.

b) La réalisation.

La Terre est représentée par un globe terrestre sur lequel sont tracés :

- une représentation des continents,
- 24 grands cercles passant par les pôles, délimitant les 24 fuseaux horaires,
- des parallèles correspondant à quelques latitudes remarquables.

Son axe est matérialisé par une tige métallique dont une extrémité est encastrée dans un socle avec la bonne inclinaison.

Autour du globe, un élément plan situé au niveau de son centre, porte une graduation reproduisant les indications du plan de l'écliptique : constellations et calendrier.

Le calendrier donne la direction du Soleil vu de la Terre pour chaque jour de l'année. Pour placer convenablement les graduations de ce calendrier par rapport à la mappemonde, il faut tenir compte du

fait que l'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique, ce qui introduit une dissymétrie :

- d'une part, les **graduations des deux équinoxes** de printemps et d'automne (le 21 mars et le 23 septembre) devront être **alignées sur la ligne d'intersection des plans de l'équateur et de l'écliptique**.
- d'autre part, les graduations des deux solstices d'été et d'hiver (le 21 juin et le 22 décembre) devront être situées dans le plan perpendiculaire à l'écliptique et qui contient l'axe de rotation de la Terre. Le 21 juin, la hauteur du Soleil est la plus grande de l'année, donc la distance angulaire (pôle Nord - écliptique) devra être la plus petite.

La couronne des constellations a été positionnée en plaçant le **point γ en regard de la date du 21 mars**.

Ces indications centrées sur le globe terrestre constituent le repère géocentrique.

3 – Le plan horizon du lieu d'observation.

Un petit carré en bristol de 1,5 cm de côté sur lequel est dessinée une **Rose des vents** avec les **points cardinaux** complète la maquette. Il pourra être placé en différents points du globe terrestre où il servira à matérialiser l'horizon d'un lieu ; il permettra de repérer une direction dans le ciel pour un observateur situé en ce lieu.

Ce petit élément cartonné portant une **Rose des Vents** constitue le repère local.

4 – Quelques simulations.

a) Nature du mouvement de la Terre autour du Soleil.

On positionne le socle supportant le globe terrestre de manière que son centre soit à la verticale de la date de l'équinoxe de printemps. Puis on l'oriente pour que la limite entre la zone éclairée et la zone dans l'ombre passe par les deux pôles .

On constate alors qu'il y a deux orientations possibles mais une seule est telle que la flèche indiquant la direction du point γ pointe vers le Soleil.

On place ensuite la Terre au solstice d'été en orientant le socle de manière que la région entourant le pôle Nord soit au maximum éclairée. Puis on fait de même pour le solstice d'hiver, mais alors c'est la zone d'ombre qui doit être la plus grande possible.

On constate que, pour les trois positions précédentes, la flèche indiquant la direction du point γ (qui est situé à l'infini) reste parallèle à elle-même et que l'axe de rotation de la Terre garde une direction fixe :

la Terre est animée d'un mouvement de translation circulaire autour du Soleil.

Les distances parcourues en un jour par la Terre sont moins grandes en été qu'en hiver puisque, en période hivernale la Terre est plus près du Soleil et qu'ainsi sa vitesse est plus grande ; donc le nombre de jours qui séparent l'équinoxe de printemps de l'équinoxe d'automne est plus grand que celui qui séparent l'équinoxe d'automne de l'équinoxe de printemps :

les durées des différentes saisons sont inégales

(printemps : 92,8 jours, été : 93,6 jours, automne : 89,8 jours, hiver : 89,0 jours)

b) Mouvement diurne du Soleil et des étoiles.

On fait tourner le globe terrestre autour de son axe et on observe la position du Soleil par rapport au petit carré simulant l'horizon du lieu.

Pour que le Soleil apparaisse à l'horizon Est et disparaisse à l'horizon Ouest il faut que :

la Terre tourne dans le sens direct.

Pour suivre le mouvement apparent du Soleil au cours de la journée, on matérialise la direction des rayons solaires au moyen d'une baguette s'appuyant sur le lieu choisi et pointant vers le Soleil.

On voit le Soleil s'élever au-dessus de l'horizon puis décrire une trajectoire contenue dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre en culminant au milieu du jour :

au cours d'une journée, le Soleil se déplace, par rapport à l'horizon du lieu, dans un plan parallèle à l'équateur.

Comme pour le Soleil, on peut voir la nuit, les étoiles se lever du côté Est et se coucher du côté Ouest, sauf celles qui appartiennent à la zone du ciel qui reste constamment au-dessus de l'horizon du lieu : les étoiles circumpolaires. Elles décrivent dans le ciel des arcs de cercle autour du Pôle.

On peut mesurer, à l'aide d'un rapporteur, l'angle que fait l'axe des pôles avec l'horizon du lieu d'observation.

On constate que cet angle est égal à la latitude du lieu, donc :

la nuit, les étoiles semblent décrire des cercles centrés sur un point situé au-dessus du point cardinal Nord, à une hauteur égale à la latitude du lieu.

c) Variation de la hauteur du Soleil en un lieu, suivant les saisons ; durée des jours.

La hauteur est l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan horizontal ; elle varie avec la latitude du lieu, la date et l'heure du jour. Quand le Soleil passe au méridien du lieu, on dit qu'il culmine : c'est le milieu du jour.

On utilise un rapporteur placé de manière que sa base soit parallèle au plan horizon et que la direction du Soleil soit contenue dans son plan. La baguette, matérialisant la direction des rayons solaires, sera maintenue parallèle à la ligne joignant le centre de la Terre au centre du Soleil.

L'angle que fait la baguette avec le plan horizon montre :

la hauteur du Soleil est maximum au solstice d'été, minimum au solstice d'hiver à Lyon, quand le Soleil culmine, on trouve respectivement 68° et 21°.

Lorsque le Soleil se couche, la baguette dont la direction est toujours parallèle à la direction Terre-Soleil se trouve dans le plan horizon. Son orientation par rapport à la Rose des Vents montre la direction dans laquelle le Soleil se couche à l'horizon du lieu, à différentes dates de l'année :

Azimut du coucher du Soleil à Lyon :

	21 mars	21 juin	23 septembre	22 décembre
Azimut	270° (Ouest)	304° (Nord-Ouest)	270° (Ouest)	234° (Sud-Ouest)

le Soleil ne se lève à l'Est et ne se couche à l'Ouest qu'aux dates des deux équinoxes.

Pour trouver la durée du jour, il suffit de compter le long du parallèle ayant la latitude du lieu concerné, le nombre de fuseaux horaires existant entre les deux limites de la zone éclairée et de la zone dans l'ombre

Durée des jours à Lyon :

	21 mars	21 juin	23 septembre	22 décembre
Durée du jour	12 heures	15 heures 30 minutes	12 heures	8 heures 30 minutes

aux équinoxes, tous les points de la Terre ont 12 heures de jour et 12 heures de nuit

d) Hauteur du Soleil suivant la latitude du lieu ; expérience d'Eratosthène.

	Tropique du Capricorne	Equateur	tropique du Cancer	Alexandrie	Paris	cercle polaire arctique	Pôle
Latitude	- 23° 27'	0°	+ 23° 27'	31° 12'	46° 50'	+ 66° 33'	90°
Solstice d'été			Zénith	82° 15'	67°	47°	23°
Solstice d'hiver	Zénith	66,5°	47°	39° 15'	20°	0°	

Le jour du Solstice d'hiver :

- les régions situées au-delà du cercle polaire sont dans l'obscurité permanente,
- les lieux situés sur le tropique du Capricorne voient, au milieu du jour, le Soleil passer à la verticale (le Soleil entre dans le signe du Capricorne).

Le jour du Solstice d'été :

- les régions situées au-delà du cercle polaire sont constamment éclairées,
- les lieux situés sur le tropique du Cancer voient, au milieu du jour, le Soleil passer à la verticale (le Soleil entre dans le signe du Cancer)
- à Alexandrie, au milieu du jour, les rayons du Soleil font avec la verticale un angle de 82°. Cet angle correspond aux mesures faites par Eratosthène et qui lui ont permis d'évaluer le rayon de la Terre.

La maquette offre l'avantage d'avoir une vue globale de cette expérience.

e) Comparaison des énergies solaires reçues au sol

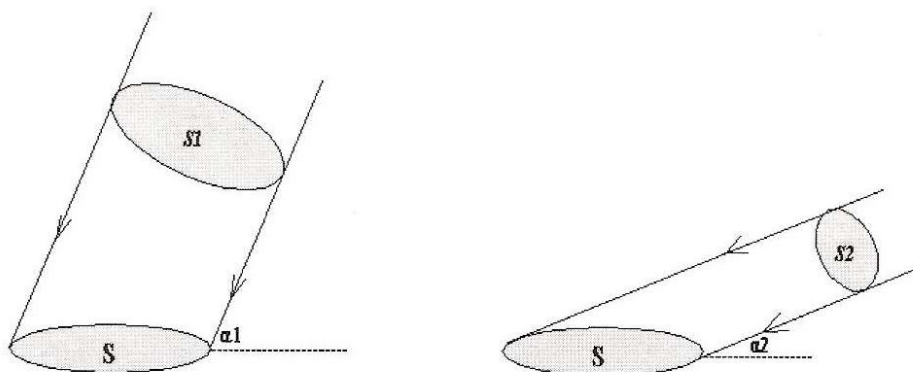
Un faisceau cylindrique de rayons solaires intercepte sur le sol une surface qui a la forme d'une ellipse.

Les caractéristiques de cette ellipse dépendent de l'inclinaison α des rayons du Soleil par rapport à la surface terrestre. Si r est le rayon du cylindre,

- le demi-petit axe de l'ellipse est : $b = r$
- le demi-grand axe de l'ellipse est : $a = \frac{r}{\sin \alpha}$

La surface interceptée au sol vaut alors :

$$S = \pi \times a \times b = \frac{\pi \cdot r^2}{\sin \alpha}$$



Pour **une même surface** au sol S, les rayons solaires sont contenus dans deux cylindres de rayons différents r_1 et r_2 tels que :

$$\frac{\pi \cdot r_1^2}{\sin \alpha_1} = \frac{\pi \cdot r_2^2}{\sin \alpha_2}$$

L'énergie solaire transportée est proportionnelle à la section du cylindre, $s = \pi r^2$.

⇒ Sans tenir compte de l'absorption de l'atmosphère et pendant une même durée, le rapport des énergies reçues sur la surface S serait :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{s_1}{s_2} = \frac{\pi \cdot r_1^2}{\pi \cdot r_2^2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$$

A Lyon, au solstice d'été $\alpha_1 = 68^\circ$ et au solstice d'hiver $\alpha_2 = 21^\circ$

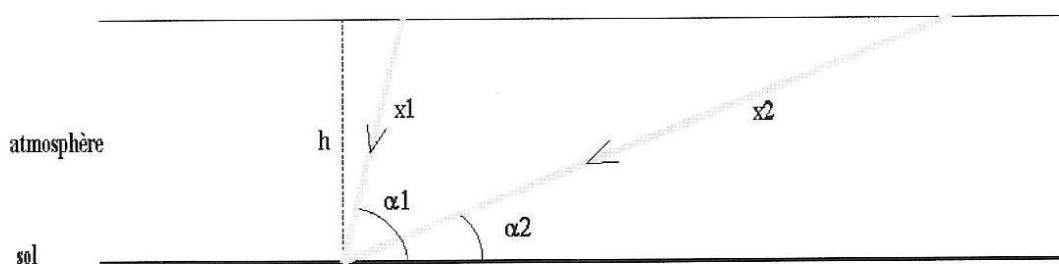
$$E_{\text{solstice d'été}} / E_{\text{solstice d'hiver}} = \sin 68^\circ / \sin 21^\circ = 2,59$$

Quand le Soleil culmine, au milieu de la journée :

	$E_{\text{solstice d'été}} / E_{\text{équinoxe}}$	$E_{\text{équinoxe}} / E_{\text{solstice d'hiver}}$	$E_{\text{solstice d'été}} / E_{\text{solstice d'hiver}}$
à Lyon	$\sin 68^\circ / \sin 46^\circ = 1,29$	$\sin 46^\circ / \sin 21^\circ = 2,00$	$\sin 68^\circ / \sin 21^\circ = 2,59$

	$E_{\text{tropique du Cancer}} / E_{\text{Lyon}}$	$E_{\text{Lyon}} / E_{\text{cercle polaire arctique}}$
au solstice d'été	$\sin 90^\circ / \sin 68^\circ = 1,08$	$\sin 68^\circ / \sin 47^\circ = 1,27$

En réalité, l'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère varie avec la hauteur du Soleil.



La longueur d'atmosphère parcourue est : $x = h/\sin\alpha$.

Pour $\alpha_1 = 68^\circ$ et $\alpha_2 = 21^\circ$: $x_1/x_2 = \sin 68^\circ / \sin 21^\circ = 2,6$

La loi générale de l'absorption est de type exponentiel

Si l'énergie hors atmosphère est E_0 , l'énergie reçue au sol, après que le rayonnement solaire ait parcouru une distance x à travers l'atmosphère, est donnée par l'expression :

$$E = E_0 \cdot e^{-kx}$$

$\Rightarrow$ Le rapport entre les énergies reçues en été et en hiver à Lyon est donc encore plus grand que 2,59.

f) Visibilité des constellations zodiacales et les saisons.

Les constellations visibles en milieu de nuit au voisinage du méridien sont celles qui se trouvent à l'opposé du Soleil. Par exemple les constellations du Taureau et des Gémeaux en hiver, les constellations du Sagittaire, Capricorne et Verseau au mois d'août.

Le 21 juin en milieu de nuit, alors que les constellations d'Ophiucus et du Sagittaire culminent au Sud, la constellation de la Vierge se couche à l'Ouest et celle des Poissons se lève à l'Est.

Les levers et couchers matinaux (en fin de nuit) ou vespéraux (en début de nuit) d'étoiles remarquables, qui se reproduisent à des périodes bien déterminées de l'année, ont permis aux Anciens de suivre le mouvement apparent du Soleil parmi les étoiles sur une ligne située dans une bande du ciel appelée « Zodiacue ». La place du Soleil dans le Zodiacue leur permettait de se repérer dans l'année, de prévoir ainsi le retour de phénomènes atmosphériques saisonniers propices aux semailles ou aux récoltes.

Ainsi le poète Virgile, dans ses *Géorgiques*, rappelle que le coucher matinal d'un petit amas d'étoiles appelé « les Pléiades » appartenant à la constellation du Taureau et proche de la constellation du Bélier se produit aux environs du 15 novembre, date qui doit être attendue pour semer le froment ou l'épeautre.

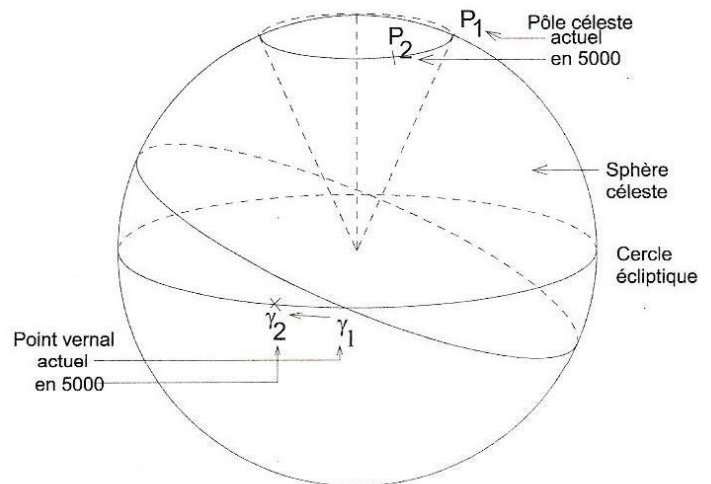
On peut observer l'événement sur la maquette à la date du 15 novembre et en faisant tourner le globe terrestre pour placer l'horizon du lieu juste avant la sortie de la zone d'ombre : la direction des « Pléiades » (à la limite de la constellation du Taureau et celle du Bélier) est alors rasante à l'horizon Ouest.

g) Phénomène de précession des équinoxes.

L'axe de notre planète ne conserve une direction fixe dans l'espace que pour des durées restreintes : il décrit en 25800 ans, un cône centré sur la perpendiculaire au plan de l'écliptique. Conséquences :

- mouvements des pôles célestes sur la sphère céleste,
- glissement du point γ qui entraîne un retour de l'équinoxe de printemps 50" avant que la Terre n'ait effectué une rotation complète autour du Soleil (d'où le nom donné au phénomène)

Ce phénomène peut être mis en évidence avec la maquette car la partie centrale du plan de l'écliptique, sur laquelle est tracée la trajectoire de la Terre, peut tourner par rapport à la couronne des constellations.



On peut ainsi remonter dans le temps et montrer que :

il n'y a pas toujours eu une Etoile polaire pour indiquer le Pôle Nord géographique

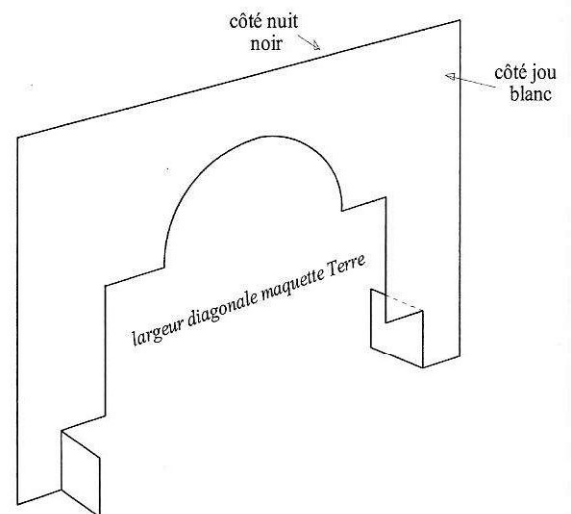
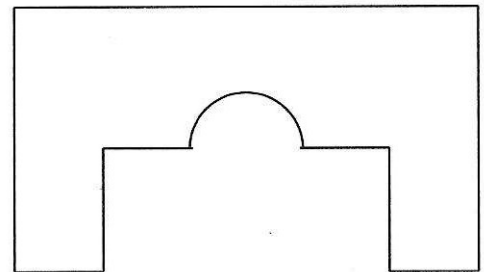
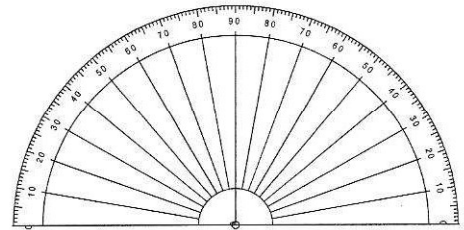
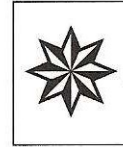
D'autre part, quand les Anciens ont attribué leurs noms aux douze signes de leur calendrier zodiacal, il y a environ 2,5 mille ans, le Soleil entrait à l'équinoxe de printemps dans la constellation du Bélier (d'où le signe γ).

Comme ce calendrier était divisé en douze parties égales, chacune portant le nom de la constellation dans laquelle se trouvait alors le Soleil, tous les signes du Zodiaque sont actuellement décalés d'une constellation. Le calendrier zodiacal est donc maintenant périmé et les prévisions des astrologues n'ont-elles pas toutes les chances d'être erronées ?

Accessoires complémentaires.

Ils peuvent être trouvés ou construits très facilement :

- Un petit carré en bristol de 1,5 cm de côté sur lequel sera dessiné une Rose des vents et qui servira à matérialiser l'horizon d'un lieu.
 - Une baguette rectiligne assez fine de 15 à 20 cm de longueur qui servira à concrétiser la direction du Soleil.
 - Un rapporteur en forme de demi-cercle de diamètre inférieur à 10 cm pour des mesures de hauteur.
 - Une plaque en carton rigide d'environ 28 cm × 16 cm, ayant une face claire (côté lumière), une face sombre (côté ombre) et dans laquelle est découpée une silhouette de la maquette.
 - Une reproduction agrandie, au format A3 ou plus, de la figure de la page 1 représentant l'orbite de la Terre avec le Soleil au milieu. Cette reproduction servira de plateau pour positionner la maquette Terre.
 - Une lampe avec une ampoule ordinaire en verre clair dont le filament doit être visible et parallèle à son socle. Cette lampe sera située sur l'emplacement du Soleil indiqué dans la reproduction citée ci-dessus et son filament devra être au niveau du centre de la mappemonde.
- L'utilisation d'une lampe sert à créer des zones d'ombre et de lumière pour simuler le jour et la nuit mais elle n'est pas indispensable, les rayons du Soleil pouvant être matérialisés au moyen de la baguette.



Préparation du repère local.

Inscrire les quatre points cardinaux sur le petit carré cartonné de 1,5 cm de côté sur lequel est dessinée une Rose des Vents.

Placer ce petit élément de l'horizon local à l'emplacement choisi sur la mappemonde en veillant à l'orienter correctement, puis le fixer au moyen d'un adhésif double face.

Cette maquette a été réalisée par les élèves du club astronomie du Lycée Saint-Exupéry de Lyon pour les olympiades de physique 2000 sous la direction de Madame Claude Piguet professeur de physique.