

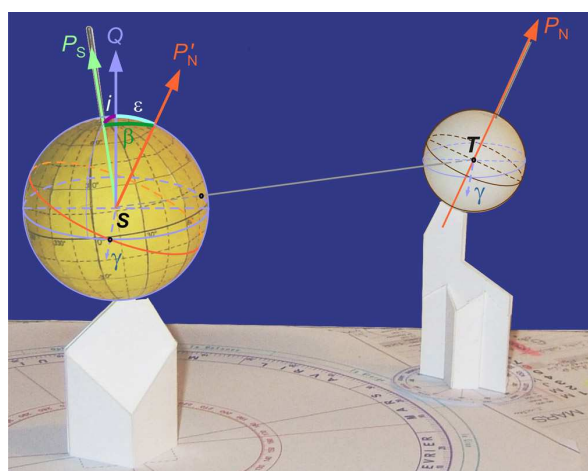
## La maquette Tournesol ou comment comprendre et visualiser les rotations du Soleil et de la Terre

Ph. Merlin Observatoire de Lyon

*Regarder le Soleil c'est bien, en faire des images, aussi, mais pour utiliser pleinement les observations et les documents obtenus, il faut connaître les positions et orientations respectives du Soleil et la Terre lors des acquisitions afin de redresser les images pour qu'elles présentent toutes la même orientation. Or la rotation du Soleil sur lui-même, la rotation de la Terre sur elle-même et sa translation annuelle sur son orbite compliquent sérieusement la compréhension des orientations relatives. Une maquette et quelques explications concrétisées par son maniement, permettront d'en comprendre les rouages. On pourra appliquer aux observations les transformations nécessaires qui les rendront homogènes pour leur exploitation.*

Si l'on reprend la citation célèbre, peut être prononcée en aparté par Galilée devant les juges de l'Inquisition, «Et pourtant elle se meut», on pourrait l'élargir et dire «Ils se meuvent». En effet, dès les premières observations du Soleil à la lunette, par Galilée et ses contemporains, le mouvement de rotation du Soleil sur lui-même, même s'il fut contesté au début, est apparu clairement grâce à l'observation des taches.

Ainsi pour se repérer sur le Soleil, il faut connaître la rotation du Soleil, mais de plus connaître la position de la Terre sur son orbite car elle change l'angle de vision que l'on a du Soleil, et entre autres, celui de la direction de son axe de rotation qui conditionne les positions des détails que nous pouvons voir à sa surface.



**Fig.1.** Les différents axes du système Soleil Terre.  $P_N$  et  $P'_N$  représentent la direction du pôle Nord terrestre,  $P_S$  le pôle Nord du Soleil et  $Q$  le pôle Nord de l'écliptique.  $SQ$  fait un angle de  $7,25^\circ$  avec  $SP_S$  et de  $23,44^\circ$  avec  $SP'$ . L'angle  $P_S P'_N$  mesure  $26,15^\circ$ .

L'observation du Soleil avec les quelques précautions habituelles absolument nécessaires est une pratique courante qui a beaucoup d'intérêt par la découverte et le suivi des structures essentiellement changeantes à la surface et sur le bord.

En faire des images est facile avec les appareils actuels disponibles. Un bon appareil numérique avec un zoom conséquent, permet de détecter la présence des plus grandes taches.

Relier diverses images échelonnées dans le temps demande quelques précautions. Il faut, lors de la prise des images, que l'orientation de l'appareil soit connue. Habituellement, sur un instrument équatorial, on règle l'appareil pour que les images soient orientées Nord-Sud et Est-Ouest<sup>21</sup>. L'orientation horizontale-verticale demande des corrections plus complexes qui sont fonction de l'heure et du lieu, à moins d'en rester à la photo artistique. Il serait quand même possible d'orienter ses images en se rattachant à d'autres images obtenues aux mêmes moments et d'orientation connue<sup>22</sup>.

Lorsque toutes nos images sont orientées, on s'aperçoit que le Soleil ne se présente pas sous le même aspect tout au long de l'année. La cause en est

<sup>21</sup> Le côté est-ouest doit être parallèle au plan de l'équateur. Le côté de la photo que l'on appelle nord-sud ici est perpendiculaire au côté est-ouest. Il correspond à la projection orthogonale de l'axe de la Terre sur le plan de la photo (un plan perpendiculaire à la direction Terre Soleil).

<sup>22</sup> Pour orienter une photo quand on n'a pas de monture équatoriale, une méthode consiste à prendre une première photo cadrée suivie d'une deuxième une minute plus tard sans avoir bougé l'appareil. Le mouvement apparent du centre du Soleil d'une photo à l'autre est parallèle à l'équateur.

la variation apparente de l'inclinaison de son axe de rotation par rapport à notre axe polaire. Il faudrait pouvoir tracer l'axe polaire et l'équateur du Soleil et redresser de façon homogène les images en mettant l'axe de rotation du Soleil dans le plan de l'image, parallèle à un côté de celle-ci et l'équateur solaire parallèle à l'autre côté de l'image. La maquette proposée ici permet de comprendre et de résoudre le problème.

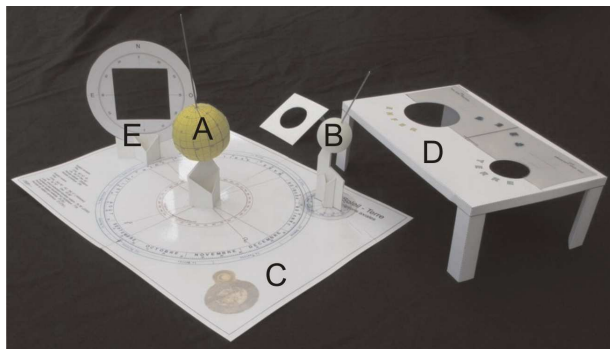


Fig.2. Les éléments de la maquette.

### Le système géométrique

La géométrie du système est simple (figures 1 et 3) : un plan de référence, l'écliptique, deux axes de rotation, celui du Soleil et celui de la Terre, et un axe d'observation dans le plan de l'écliptique, la direction Terre Soleil. L'axe de rotation du Soleil est fixe par rapport au repère des étoiles et l'axe de la Terre est affecté par la précession. Mais la lenteur de la variation ne gêne guère pour la compréhension annuelle du phénomène.

Le côté géométrique du repérage est développé dans des documents donnés en référence [2] et [3].

L'observateur sur la Terre en  $T$  (fig. 3), dans un repère géocentrique et équatorial (axe Nord-Sud et Est-Ouest le long de l'équateur) voit l'axe de rotation solaire suivant un angle, celui des deux plans  $P_N T S P'_N$  (en jaune) et  $P'_S T S P_S$  (en vert).

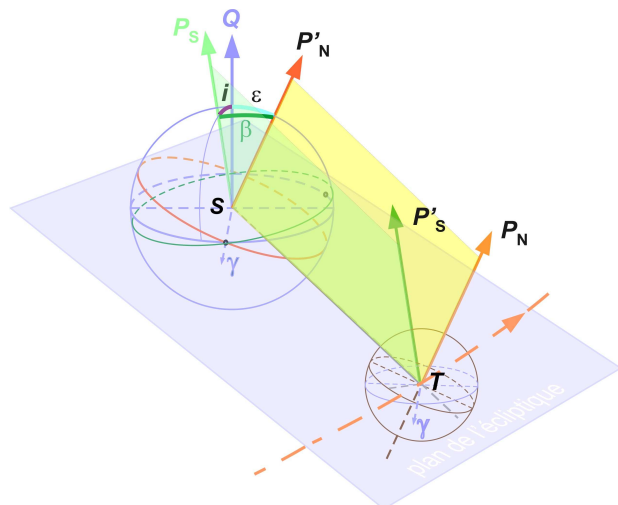


Fig.3. Géométrie du système. L'angle observé de l'inclinaison de l'axe de rotation du Soleil est l'angle entre les deux plans vert et orange.

En effet, la photo est faite dans un plan perpendiculaire à  $(TS)$ . Si le côté horizontal de la photo est bien parallèle au plan de l'équateur, son côté vertical est situé dans le plan jaune et l'angle dont on doit faire tourner le Soleil pour voir son axe vertical est l'angle entre les plans jaune et vert. Au cours de l'année, l'observateur voit le Soleil et son axe de rotation  $SP_S$  et son équateur osciller d'est en ouest et d'avant en arrière. L'utilisation d'une maquette permettra de voir les éléments, leur évolution, de saisir, de comprendre le processus et d'estimer les variations d'angle.

### Description brève de la maquette

La description complète et détaillée ainsi que sa fabrication se trouvent dans le document [1].

L'ensemble comporte trois parties (figure 2):

**1** - Les maquettes du Soleil (**A**) et de la Terre (**B**) sur leurs socles avec la bonne inclinaison de leur axe de rotation. Les centres des deux sphères sont à la même hauteur et concrétisent le plan de l'écliptique parallèle au plateau support (**C**).

**2** - Un plateau support (**C**) parallèle au plan de l'écliptique avec l'orbite de la Terre graduée en calendrier et en longitude héliocentrique pour positionner au cours de l'année la Terre par rapport au Soleil. Des repères permettent d'orienter correctement l'axe solaire.

**3** - Des constructions complémentaires qui permettent pour l'une de visualiser l'angle apparent des axes de rotation vu de la Terre (la table écliptique **D**) pour l'autre la vision de l'orientation du Soleil dans une visée équatoriale (le cadre de visée **E**).



Fig.4. Le plan équatorial

Pour faciliter la représentation du plan équatorial et son orientation par rapport à l'écliptique, une partie supplémentaire peut se construire (figure 4). Elle se clipse sur le socle de la Terre et visualise son plan équatorial. Elle ne peut pas être utilisée avec la table écliptique.

### Positionnement du Soleil et de la Terre

Le Soleil se positionne et s'oriente sans ambiguïté au centre du plateau support, la projection de son axe de rotation sur l'écliptique étant tracé.

Pour positionner la Terre à une date précise, le socle de celle-ci est constitué d'un cercle gradué avec un calendrier et se place tangentiellement à l'extérieur du cercle calendrier du plateau support. Il suffit de faire coïncider (fig. 5) les dates des deux calendriers pour que la Terre soit correctement orientée. Le pôle Nord est alors dirigé vers la longitude héliocentrique  $90^\circ$ .

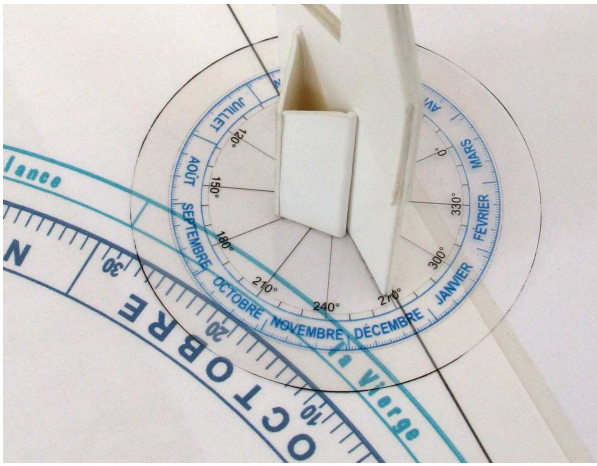


Fig. 5. Positionnement de la Terre le 20 octobre.

La maquette à ce stade permet de retrouver toutes les configurations Terre Soleil pour l'explication des mouvements et des saisons : variation de la hauteur du Soleil, éclaircissement des pôles, durées des jours et des nuits, etc.

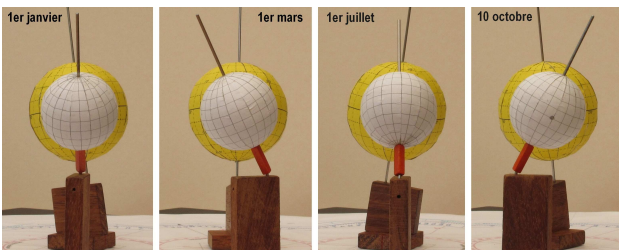


Fig. 6. Changement de la vision de l'angle des deux axes de rotation en fonction de la date.

En regardant à différentes dates de l'année les deux axes de rotation par alignement comme sur la figure 6, on voit avec la succession des mois, les variations de l'ouverture de l'angle vu par l'observateur terrestre entre l'axe solaire et l'axe équatorial terrestre.

### La vision du Soleil

L'axe solaire est incliné de  $7,25^\circ$  sur la perpendiculaire à l'écliptique et de  $26,15^\circ$  par rapport à l'axe polaire terrestre (fig. 1).

L'observateur terrestre est supposé en position géocentrique car avec la maquette, la vision se fait par alignement des deux globes avec son œil (figures 6 et 8). Au cours d'une révolution annuelle terrestre, il va tourner autour du Soleil et voir varier par rapport à son repère équatorial l'inclinaison apparente de l'axe solaire. Il en résulte que l'angle observé entre la direction polaire terrestre et la direction de l'axe solaire (angle entre les deux plans vert et jaune de la fig. 3 oscille entre deux valeurs extrêmes :  $\pm 26,15^\circ$ .

Les variations de cet angle peuvent être visualisées avec la maquette de deux manières :

1. en se servant de la table écliptique (fig. 7) et de ses deux plans transparents qui passent par l'axe Terre-Soleil, et contenant pour l'un l'axe de rotation du Soleil, pour l'autre l'axe de rotation de la Terre.

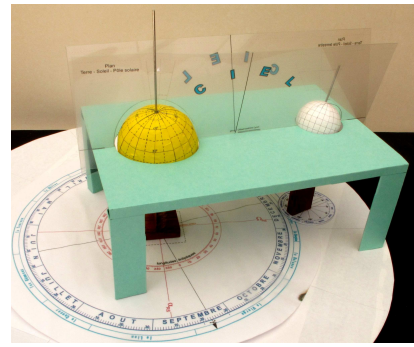


Fig. 7. Le plan écliptique et les deux plans transparents passant par les axes de rotation.

En faisant déplacer la Terre sur son orbite, on voit l'angle du dièdre s'ouvrir et se fermer. Sur le calendrier on pourra trouver approximativement les dates qui correspondent aux maxima de l'angle du dièdre, et aussi les dates où cet angle est nul.

2. en utilisant, comme dans la figure 6, la perspective de vision. Mais pour mieux simuler l'observation faite par l'observateur, on adjoint un cadre gradué qui sert de fenêtre de vision. Par rotation sur lui-même, le cadre gradué peut tourner de façon que, quelle que soit l'époque de l'année, le carré du cadre soit toujours orienté Nord-Sud (fig. 8).

En alignant par visée et rotation du cadre, l'axe de la Terre sur la direction NS, on peut lire la valeur de l'angle vu entre les deux axes de rotation. Comme avec la table écliptique, on trouvera, en déplaçant la Terre tout au long de l'année, les dates des maxima de cet angle et celles où il s'annule. De plus l'observation attentive du Soleil fait apparaître le mouvement apparent du pôle du Soleil d'avant en arrière. Pendant six mois, le pôle Nord est apparent, le pôle Sud invisible, les six autres mois c'est l'inverse.

On constate ainsi qu'aux dates de superposition apparente des axes correspondent approximativement les minima d'inclinaison de l'équateur solaire dans le sens de la visée, les pôles du Soleil sont dans le plan de l'image et qu'au moment de l'écartement maximum, l'inclinaison d'avant en arrière est maximale.

En complément aux observations faites à ces dates avec la maquette, on peut retrouver toutes les valeurs des observations par le calcul [2].

Pour préciser ces deux variations d'angle, les astronomes définissent l'angle  $P$  et l'angle  $B_0$  (fig. 9). L'angle  $P$  correspond à l'angle apparent de rotation du pôle nord solaire d'est en ouest,  $P$  étant positif si le pôle nord solaire est à l'ouest et négatif à l'est.

L'angle  $B_0$  se réfère à l'inclinaison de l'équateur solaire par rapport au point central de l'image observé sur le méridien central (fig. 9).

L'observation avec la maquette du Soleil tout au long de l'année, permet de mettre en évidence les deux mouvements de l'image solaire.

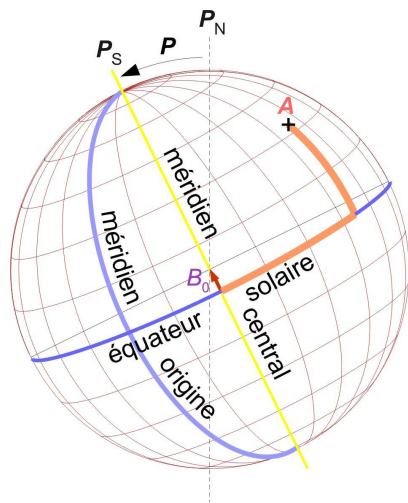


Fig.9. Projection des coordonnées du Soleil : équateur, méridien central, méridien origine, angles  $P$  et  $B_0$ .

### Observation du Soleil (simulation)

La vision du Soleil à travers le cadre correspond à celle d'un observateur terrestre. Il est en position d'observation équatoriale comme avec la majorité des instruments équatoriaux : lunettes ou télescopes. Cette vision simule l'image du Soleil prise avec un appareil placé sur un instrument équatorial du moment que les côtés de l'image ont été orientés est-ouest et nord-sud.

### Redressement de l'image

Pour comparer correctement différentes images du Soleil, il faut qu'elles correspondent à une même orientation. Par convention, on ramène l'image du Soleil de façon que son axe de rotation soit dans le plan de l'image et son pôle Nord en haut. Les images quotidiennes du Soleil données sur les sites de Soho et SDO sont toutes redressées. Pour nos images, il faut donc connaître les deux angles  $P$  et  $B_0$ . Les éphémérides de l'IMCCE ou certains sites donnent ces valeurs : (<http://bass2000.obspm.fr/ephem.php>). Sur la maquette, l'angle  $P$  est facilement mesurable comme on l'a vu. L'angle  $B_0$ , d'amplitude plus petite est plus difficilement estimable. Pour une date donnée, la Terre, le cadre et le Soleil alignés et réglés, si l'on enlève la Terre, l'angle  $B_0$  se mesure sur le méridien central (méridien solaire passant par la ligne de visée Terre-Soleil), à partir de l'équateur solaire.

Passer de l'image équatoriale terrestre à l'image équatoriale solaire demande un peu de mathématique. Tout point de l'image va subir deux rota-

tions : tourner autour de la direction de visée, l'angle  $-P$  pour ramener l'axe de rotation du Soleil vertical dans l'image puis une rotation de  $-B_0$  suivant l'axe est-ouest pour amener le pôle du Soleil dans le plan de l'image.

### Repère en longitudes

La maquette est de peu de secours pour repérer la longitude d'une tache par exemple sauf si l'on construit un Soleil avec son réseau de coordonnées héliographiques. En effet, le méridien origine qui sert de référence résulte d'un choix arbitraire.

Il n'y a pas sur la surface du Soleil de structure permanente de référence visible. De plus la rotation différentielle de l'équateur aux pôles ne permet que de fixer une référence sur l'équateur. On définit le *méridien central* du Soleil à tout instant comme le méridien du Soleil passant par la ligne de visée Terre Soleil (fig. 9). Il change donc en permanence. À une date déterminée prise comme référence origine, le *méridien origine* ou *méridien de référence* était confondu avec le méridien central. Le méridien origine sert de référence aux longitudes *héliographiques* à la surface du Soleil. À cause de la rotation dans le sens direct du Soleil, la longitude du méridien central ( $L_0$ ) décroît constamment

Depuis la date origine, en connaissant la vitesse de rotation équatoriale du Soleil, la longitude héliographique du méridien central peut toujours être calculée par rapport au méridien de référence. Il suffit de connaître l'intervalle de temps entre la date origine arbitraire choisie et la date d'observation et calculer le nombre de tours fait par le Soleil pour placer le méridien origine.

Comme cet espace de temps croît sans cesse et devient grand, les éphémérides donnent les dates des passages du méridien origine devant le méridien central (comptage des tours), ou sa position à des dates déterminées, la position à un moment d'observation se faisant par interpolation.

### Conclusions

Tout ceci est assez complexe, et seule une représentation concrète avec un peu de pratique sur une maquette permet d'en faciliter la compréhension.

Pour celles et ceux qui désireraient se lancer dans la construction de la maquette complète, demander renseignements aide et conseils à PhM ([merlin@obs.univ-lyon1.fr](mailto:merlin@obs.univ-lyon1.fr)).

Références et documents internet des fichiers téléchargeables à la page :

- [1] - [www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/maquette\\_tournesol\\_texte.pdf](http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/maquette_tournesol_texte.pdf)
- [2] - [www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/maquette\\_tournesol\\_maths.pdf](http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/maquette_tournesol_maths.pdf)
- [3] - [www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/reperage\\_solaire\\_comprese.ppt](http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/astromanu/Tournesol/reperage_solaire_comprese.ppt)

Documents imprimables pour construire la maquette

- [www-obs.univ-lyon1.fr/astromanu/Tournesol/maquette\\_tournesol.html](http://www-obs.univ-lyon1.fr/astromanu/Tournesol/maquette_tournesol.html)