

AVEC NOS ELEVES

Théodolite et repérage des astres

Claude Piquet, Philippe Merlin, Observatoire de Lyon,
avec l'aimable participation d'Oriane et de Baptiste

Résumé : *Nous vous proposons de construire un théodolite, qui va nous permettre d'effectuer des mesures d'écart angulaire dans un but astronomique ou tout simplement pour la détermination de distances par triangulation ou parallaxe.*

Un théodolite est un instrument de visée permettant de repérer une direction dans l'espace. Il est constitué d'une alidade mobile autour de deux axes orthogonaux et de cercles gradués pour repérer, dans un système de coordonnées donné, la ligne de visée de l'alidade.

Le théodolite que nous nous proposons de construire comporte un ensemble de cercles gradués correspondant aux trois systèmes de coordonnées utilisés en astronomie :

- coordonnées horizontales (azimut et hauteur)
- coordonnées horaires (angle horaire et déclinaison)
- coordonnées équatoriales (ascension droite et déclinaison)

Liste du matériel (voir Fig. 1)

Bois (contreplaqué ou latté)

- épaisseur 12 mm :
 - socle 18×18 cm
 - potence 4×18 cm
 - alidade 2×24 cm
 - côtés support équatorial 15×15 cm (à couper suivant une diagonale)
- épaisseur 20 mm :
 - pied potence 4×6,5 cm (calle en bois)
 - support équatorial cale-socle 4×16 cm
 - support équatorial traverse-arrière 4×16 cm

Carton bristol¹

- coordonnées horizontales, à imprimer sur un bristol vert

- coordonnées horaires, à imprimer sur un bristol jaune
- cercle ascension droite, à imprimer sur 1/2 bristol bleu

Transparent

- repère azimut (avec vernier)
- réticules à imprimer sur 1/2 transparent

Divers

- tige filetée 4×180 mm
- écrou \varnothing 4 mm
- boulon tête fraisée 4×30 mm
- 2 rondelles
- 2 écrous papillon \varnothing 4 mm
- 10 vis à bois 3.5×35 mm
- pointes tête homme (longueur 20 mm)

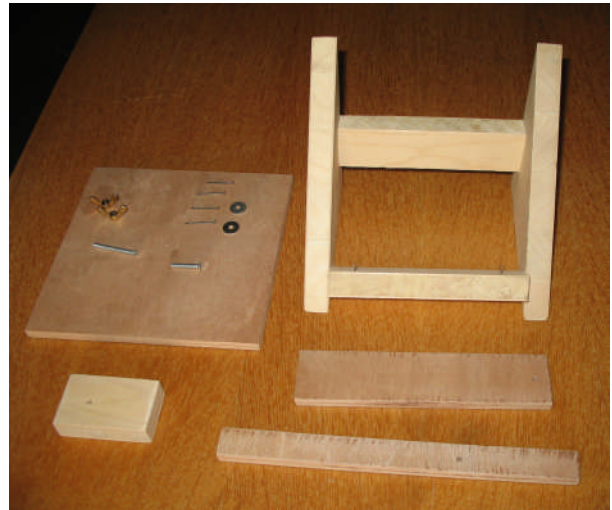


Figure 1: Matériel requis (sur la photo le support équatorial est déjà monté)

¹ Vous trouverez les patrons des cercles gradués (ainsi que de nombreux détails) aux adresses web suivantes :

http://www-obs.univ-lyon1.fr/sdc/passage_venus/documents/theodolite/repere_reticule.pdf
http://www-obs.univ-lyon1.fr/sdc/passage_venus/documents/theodolite/coord_horiz.pdf
http://www-obs.univ-lyon1.fr/sdc/passage_venus/documents/theodolite/coord_horaires.pdf
http://www-obs.univ-lyon1.fr/sdc/passage_venus/documents/theodolite/asc_droites.pdf

Construction de l'instrument

Nous allons étudier pas à pas l'élaboration du théodolite, en commençant par le socle, puis la potence et en finissant par l'alidade. Vous aurez auparavant pris soin de découper les pièces en bois prescrites, de vous munir de la visserie recommandée et d'avoir imprimé les cercles gradués sur du bristol coloré.

Préparation du socle :

- Visser à l'une des extrémités de la tige filetée deux écrous que l'on bloque en les serrant fortement l'un contre l'autre.
- Percer au centre de la pièce de bois un trou de diamètre 4 mm que l'on agrandit ensuite, du côté de la face inférieure, à un diamètre de $7,5\text{ mm}$ sur une profondeur de 6 mm . Enfiler alors la tige filetée dans ce trou, par dessous ; les deux écrous doivent s'encaster en forçant légèrement ce qui permettra de bloquer l'ensemble (tige filetée + écrous). Il est bon alors de vérifier que la tige est bien perpendiculaire au socle.

Préparation et pose des graduations (Fig.2g) :

- Découper, dans le bristol vert, le carré contenant le cercle des azimuts du système de coordonnées horizontales.
- Découper, dans le bristol jaune, le disque gradué du système des coordonnées horaires que l'on collera ensuite sur la feuille précédente, en centrant correctement les deux cercles et en veillant à ce que les directions des points cardinaux correspondent entre elles. Avec un emporte-pièce percer un trou de diamètre 4 mm bien centré pour le passage de l'axe de rotation vertical. Encoller la face inférieure de l'ensemble que l'on enfiler ensuite sur la tige filetée et que l'on applique sur le socle.
- Découper, dans le bristol bleu, le disque des ascensions droites. Avec l'emporte-pièce, percer un trou central de diamètre 4 mm , puis enfiler ce disque



sur la tige filetée, sans le coller : il doit être libre de tourner par rapport aux autres graduations.

Préparation de la potence (Fig. 2d et 3g) :

Il faut apporter beaucoup de soin à l'assemblage de la potence et de son pied car, une fois en place, celle-ci doit être parfaitement perpendiculaire au socle.

- En haut, pour le passage de l'axe horizontal, percer un trou central de diamètre 4 mm à $2 \times 1\text{ cm}$ d'un coin (largeur \times hauteur). En bas de la potence, repérer l'emplacement des deux pointes à $1 \times 1\text{ cm}$ de chacun des coins.
- Percer dans le pied de la potence un trou de diamètre 4 mm pour le passage de l'axe vertical à $2 \times 2\text{ cm}$ d'un coin.
- Découper dans le bristol vert le repère de hauteur et le coller sur la partie inférieure de la potence. Ensuite découper, dans le bristol jaune, le repère de déclinaison et le coller environ 3 cm au dessus de la base du repère précédent en prenant soin d'aligner les deux lignes médianes.
- Accoler la potence le long du grand côté de son pied et assembler les deux pièces avec un peu de colle et deux pointes, en vérifiant leur position avec une équerre.
- Découper dans la feuille de transparent le repère (azimut, angle horaire, ascension droite). Percer à l'emporte-pièce un trou de diamètre 4 mm à l'emplacement prévu sur le dessin. Le pied rectangulaire de la potence doit recouvrir une partie de ce repère pour le faire plaquer sur le socle : il faut donc encoller cette partie de la face supérieure du transparent puis l'appliquer sous le pied de la potence. Pour bien aligner les trous des deux pièces, on enfiler dans le trou du pied de la potence un boulon de diamètre 4 mm qui servira de guide.



Figure 2 Découpe du cercle des azimuts à l'emporte-pièce (gauche), et fixation de la potence sur son pied (droite)



Figure 3 : Fixation du repère ascension droite - angle horaire - azimut sous le pied de la potence (gauche) et des deux réticules aux extrémités de l'alidade (droite). Vous noterez que le repère est constitué d'un vernier pour améliorer la précision de la mesure (voir l'article sur le vernier, juste après le présent article)

Montage de la potence et réglage de la longueur de l'axe vertical :

- Enfiler le pied de la potence sur la tige filetée. Prendre une rondelle et un des écrous papillons, les engager successivement en haut de la tige et les faire descendre jusqu'à la base pour serrer le pied de potence sur le socle.
- Vérifier que la tige filetée est bien parallèle à la ligne médiane de la potence. Scier la tige filetée à la hauteur du trou supérieur de la potence et la limer pour rendre l'extrémité légèrement conique.

Préparation et montage de l'alidade (Fig. 3d) :

- Percer le trou central pour le passage de l'axe horizontal avec une mèche de diamètre 4 mm . Fraiser ce trou sur la face avant de l'alidade.
- Découper, dans le bristol vert, le demi-disque des coordonnées horizontales puis, dans le bristol jaune, le demi-disque des coordonnées horaires que l'on collera sur le précédent en centrant bien les deux demi-cercles. Percer alors un trou de diamètre 4 mm au milieu de la ligne $90^\circ/-90^\circ$.
- Coller ces demi-disques, côté graduations, sur la partie arrière de l'alidade; celle-ci cache alors la zone du cercle gradué voisine de 90° , mais essayer de viser dans cette direction avec un tel instrument n'est guère réaliste !
- Mettre en place l'alidade en haut de la potence, les demi-disques en bristol contre la face avant de celle-ci. Pour cela enfiler le boulon à tête fraisée d'abord dans l'alidade puis dans la potence. Sur son extrémité qui ressort à l'arrière de l'alidade, on enfle une rondelle, puis un écrou papillon. On pourra ainsi serrer plus ou moins l'écrou pour régler la rotation de l'alidade sans gêner la visée.

- Choisir sur la feuille de transparent les deux réticules qui vous paraissent les mieux appropriés à mettre à chaque extrémité de l'alidade ; celui de plus petit diamètre convenant bien pour le rôle d'ocillon que l'on placera à l'extrémité de l'alidade opposée au repère (azimut, angle horaire, ascension droite). Coller ces réticules aux extrémités de l'alidade en prenant bien soin de les aligner avec l'extrémité de la tige filetée.

Montage du support équatorial :

- Découper les deux côtés du support de façon que leurs hypoténuses fassent avec les côtés horizontaux un angle égal au complément de la latitude du lieu d'utilisation. Les superposer et percer aux emplacements des croix des trous de diamètre $3,5\text{ mm}$ pour la mise en place de vis à bois. Relier ces deux côtés d'abord avec la traverse arrière dont on a, au préalable, enduit les deux tranches latérales d'un peu de colle et laisser de chaque côté une vis qui pénétrera dans la traverse. Vérifier que ces deux côtés sont bien parallèles et enfoncer alors un clou pour fixer solidement le tout.
- Enfoncer deux petits clous bien verticalement sur la cale-socle à environ 1 cm d'un bord ; ces clous serviront de butoir pour le socle du théodolite. Introduire cette cale-socle entre les deux côtés du support. Régler sa position pour qu'elle fasse un angle droit avec l'hypoténuse de chaque côté et de manière à laisser entre la ligne des clous et ces hypoténuses un espace égal à l'épaisseur du socle du théodolite. Fixer cette cale-socle avec deux vis à bois placées de chaque côté du support.

Mise en place du théodolite sur son support :

- Placer sur la tranche côté Sud du socle du théodolite deux clous que l'on recourbera vers l'extérieur.
- Planter un clou au milieu du dos de la traverse-arrière et le recourber vers le bas.
- Tendre un élastique entre ces trois clous pour maintenir le théodolite sur son support.

Utilisation de l'instrument

Repérage par rapport au sol :

Parmi les éléments de référence utilisés en astronomie, on trouve :

- le **plan horizontal** du lieu.
- les **pôles Nord et Sud** astronomiques situés sur l'axe de rotation de la Terre.
- et le **méridien** astronomique local, plan vertical contenant le pôle Nord.

Pour repérer une direction de l'espace, on a l'habitude d'utiliser une sphère de rayon quelconque ayant pour centre le point d'observation appelée **sphère céleste**. A toute direction (D) est associé le point M d'intersection de la sphère céleste et de la demi-droite dont l'origine est le centre O de la sphère et dont la direction et le sens sont ceux de (D).

- (H), plan horizon
- P , pôle Nord et P' , pôle Sud
- (m), méridien
- Z , zénith et N , le nadir
- a , azimut de (D)
- h , hauteur de (D).

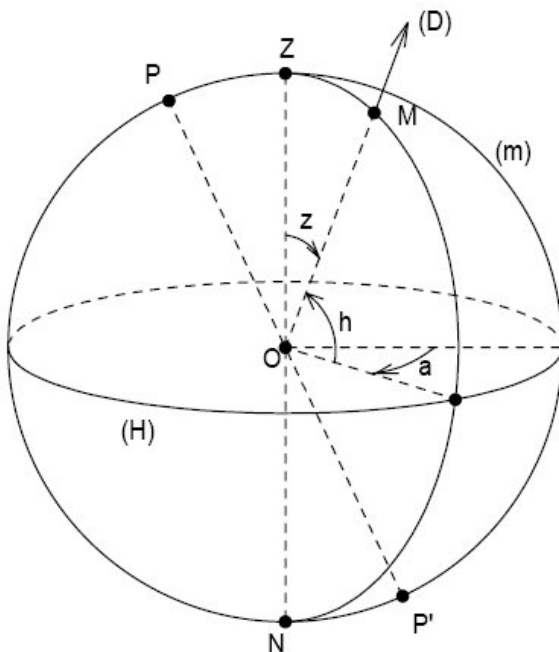


Figure 4 : Sphère céleste découpée en coordonnées horizontales

L'**azimut** et la **hauteur** de la direction d'un astre sont appelés ses **coordonnées horizontales** (voir Fig. 4). L'azimut a est compté en degrés dans le sens rétrograde, de 0° à 360° à partir du demi-méridien Sud, pour les astronomes (dans la Marine, on mesure les azimuts à partir du demi-méridien Nord). La hauteur h est comptée en degrés de -90° à $+90^\circ$ à partir du plan horizon.

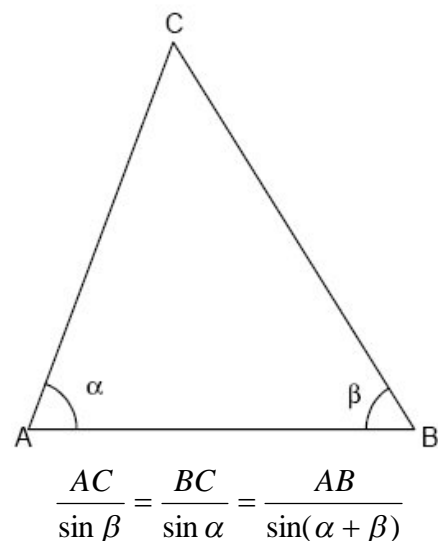
Pour mettre en station correctement le théodolite, il faut connaître l'orientation du méridien. Pour cela il existe différentes méthodes, la plus immédiate consiste à utiliser une boussole qui indique le Nord magnétique à partir duquel on peut trouver le Nord géographique².

Pour mesurer l'azimut et la hauteur d'un astre, le socle du théodolite doit être placé horizontalement et orienté par rapport au méridien. On vise ensuite l'astre avec l'alidade. L'intersection des deux axes horizontal et vertical, située à l'extrémité de la tige filetée, représente le centre de la sphère céleste. La lecture de l'azimut se fait sur la graduation verte horizontale et celle de la hauteur sur le demi-cercle gradué vert vertical.

Si l'astre est le Soleil, il ne faut jamais le viser avec les yeux, mais utiliser un petit écran blanc que l'on placera à l'arrière de l'alidade et où apparaîtra une petite tache lumineuse lorsque les deux réticules seront correctement alignés avec le Soleil.

Détermination d'une distance par la méthode des parallaxes :

On mesure les directions α et β d'un objet C , visé successivement à partir de deux lieux A et B dont on connaît la distance (voir Fig. 5). La résolution du triangle ABC permet de calculer les distances AC et BC par les égalités suivantes (formules des sinus) :



² pour calculer la déclinaison magnétique à votre position : http://www.geolab.nrcan.gc.ca/geomag/apps/mdcal_f.php



Figure 5 : Mesure de notre distance au château d'eau de l'Observatoire de Lyon

Repérage par rapport au plan équatorial céleste et au plan du méridien local :

Les deux coordonnées horizontales d'un astre varient avec le mouvement diurne dû à la rotation de la Terre sur elle-même : tous les astres, au cours de la journée, décrivent sur la sphère céleste des petits cercles parallèles à l'équateur.

Si l'on remplace le plan de référence horizontal par le plan de l'équateur, l'angle que fait la direction d'un astre avec ce plan reste toujours le même : on l'appelle sa **déclinaison** δ . Ce nouveau plan de référence présente également l'avantage d'être indépendant du lieu d'observation. La déclinaison d'un astre est donc une **caractéristique universelle** de cet astre quel que soit le lieu d'observation sur Terre.

La deuxième coordonnée associée à la déclinaison est **l'angle horaire** H et l'ensemble est appelé **coordonnées horaires** de l'astre (voir Fig. 6).

- (A), plan équatorial
- (m), méridien
- (p), parallèle
- δ , déclinaison
- H , angle horaire.

La **déclinaison** δ est comptée en degrés, de -90° à $+90^\circ$ à partir de l'équateur, elle joue le rôle d'une sorte de latitude.

La déclinaison du Soleil varie au cours de l'année entre $-23^\circ 27'$ au solstice d'hiver et $+23^\circ 27'$ au solstice d'été. La Lune et les planètes ont des déclinaisons comprises également, à quelques degrés près, entre ces deux valeurs extrêmes.

L'angle horaire H est compté en heures (une heure valant 15°) et mesuré à partir du plan méridien, côté Sud et dans le sens rétrograde, de 0 h à 24 h.

L'angle horaire du Soleil est le temps solaire local vrai, d'où la dénomination de l'adjectif « horaire ».

On a toutefois coutume d'ajouter 12 h à cet angle pour indiquer l'Heure Solaire par raison de commodité qui fait débiter un nouveau jour plutôt à minuit qu'à midi.

Pour mesurer l'angle horaire et la déclinaison d'un astre, le socle du théodolite doit être placé sur le support équatorial et orienté convenablement par rapport au méridien. On vise ensuite l'astre avec l'alidade et on lit ses coordonnées sur les graduations jaunes en regard des repères.

Sur une carte du ciel mobile qui marque 12 h à l'horizon Sud, on peut trouver l'angle horaire d'une étoile à un instant donné après avoir mis en correspondance la date et l'heure choisies. Pour cela il suffira de joindre le centre de la carte à l'étoile : l'heure indiquée par cette ligne, à laquelle on retranchera 12 h, sera égale à l'angle horaire de l'étoile. On pourra ainsi trouver **l'angle horaire du point vernal**, position du Soleil à l'équinoxe de printemps.

Cet angle est très important pour les astronomes comme on le verra plus loin. Il est appelé **Temps sidéral** T .

Sur la carte où l'équateur est tracé, on peut également évaluer la déclinaison d'une étoile. Connaissant ainsi les deux coordonnées de l'astre, on peut visualiser avec le théodolite sa direction dans le ciel.

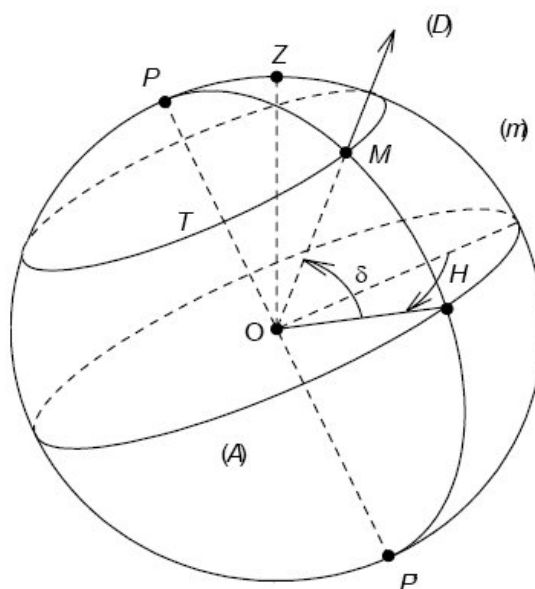


Figure 6 : Sphère céleste découpée en coordonnées horaires

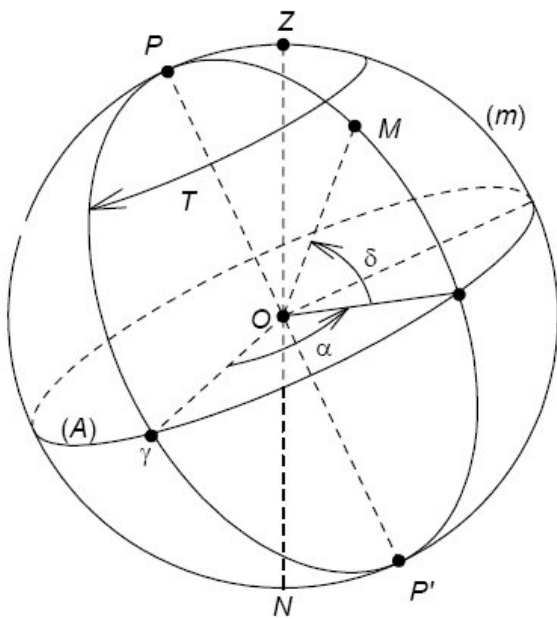


Figure 7 : Sphère céleste découpée en coordonnées équatoriales

Repérage par rapport au plan équatorial céleste et au cercle horaire du point vernal :

Les coordonnées horizontales et horaires sont des systèmes de coordonnées locales : elles dépendent du lieu d'observation. Pour dresser un catalogue d'étoiles, les astronomes ont besoin d'un système de coordonnées indépendant du lieu et insensible au mouvement diurne. Les coordonnées de ce système, appelées **coordonnées équatoriales**, sont la **déclinaison δ** et l'**ascension droite α** (voir Fig. 7).

- (A), plan équatorial
- (m), méridien
- T, temps sidéral
- δ , déclinaison
- α , ascension droite.

L'ascension droite α , exprimée en heures, est mesurée dans le sens direct à partir du cercle horaire du point vernal γ , de 0 h à 24 h. Elle est comparable à la longitude et est caractéristique de l'astre.

Si l'on connaît le temps sidéral, l'ascension droite et la déclinaison d'un astre, on peut trouver avec le théodolite la direction dans l'espace de cet astre. Pour cela, on oriente l'alidade de façon que le repère vertical soit en regard de la graduation jaune correspondant à la déclinaison. On amène ensuite le repère du pied de potence au-dessus de la graduation du cercle bleu correspondant à la valeur de l'ascension droite. Puis on fait tourner l'ensemble de manière que la graduation zéro (petit ergot) du disque bleu affiche, en face de la graduation jaune, l'angle horaire du point vernal, c'est-à-dire le temps sidéral. La ligne de visée de l'alidade indique alors la direction de l'astre dans le ciel.

Inversement, **si l'on connaît les coordonnées équatoriales** d'une étoile, on peut **mesurer le temps sidéral avec le théodolite**. Pour cela il suffit de viser l'étoile avec l'alidade, vérifier que la déclinaison affichée est bien celle du catalogue, tourner le disque bleu des ascensions droites de manière à amener, sous le repère, la graduation correspondant à la valeur du catalogue. Le temps sidéral est l'angle horaire, lu sur la graduation jaune, de la graduation zéro (petit ergot) du disque bleu des ascensions droites.

Enfin, **si l'on connaît le temps sidéral**, on peut **en visant une étoile avec le théodolite mesurer ses coordonnées équatoriales**. On affiche le temps sidéral en plaçant la graduation zéro du disque bleu des ascensions droites en face de la graduation jaune dont la valeur est égale à celle du temps sidéral ; on vise l'étoile tout en maintenant le disque bleu immobile et on lit les valeurs de l'ascension droite et de la déclinaison qui sont en regard des repères.

