

La sphère céleste, le repérage dans le ciel

L'astrométrie

DU Explorer et comprendre l'univers

J.-E. Arlot – v5-2014

**Observatoire de Paris/Institut de mécanique céleste et de calcul
des éphémérides/CNRS**

La sphère céleste, le repérage dans le ciel

Introduction : comment se repérer dans le ciel ?

Lorsque l'on regarde le ciel depuis le sol terrestre, nous voyons une voûte céleste constellée de points brillants (les étoiles) dont certains en mouvement (les planètes), mais nous n'avons pas la sensation de nous mouvoir nous-mêmes dans l'espace. L'idée d'une Terre fixe au centre de l'univers s'impose tout naturellement, mais, à la réflexion, les choses ne sont pas si simples que cela.



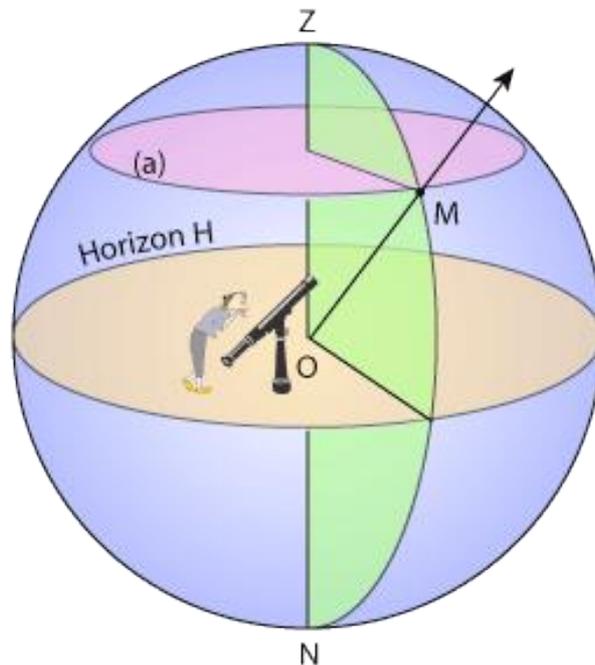
Tout d'abord nous devons constater que les étoiles et les planètes ne restent pas fixes sur la voûte céleste. Leurs mouvements proviennent soit du mouvement de la Terre autour de son axe (mouvement diurne), soit du mouvement de la Terre autour du Soleil (mouvement apparent annuel du Soleil et des planètes), soit du mouvement propre de ces astres (insignifiant pour les étoiles mais régulier et très détectable pour les planètes). L'astronomie de position (ou astrométrie) et la mécanique céleste vont nous aider à démêler tous ces mouvements qui se superposent.

La sphère locale

Enfin, notre perception du ciel est celle d'une sphère : étoiles et planètes sont toutes -apparemment- à la même distance de nous. Notre perception du relief, grâce à nos deux yeux, s'arrête en effet, à quelques dizaines de mètres de nous : au-delà, nous ne percevons plus de relief, donc plus de distances mais seulement des angles.

Nous sommes donc, chacun d'entre nous, le centre d'une sphère sur laquelle nous voyons les corps célestes : on l'appelle la sphère céleste locale et on va mesurer des angles sur cette sphère, puis à partir de ces angles et d'un modèle d'univers, on va en déduire la distance de ces points brillants que nous observons.

Mais comment s'y retrouver ? D'autant plus que cette sphère semble tourner : au-dessus d'un lieu donné, on ne voit pas toujours les mêmes étoiles...



La sphère céleste locale définie par le plan horizontal (H, l'horizon du lieu) et le zénith (Z), l'observateur est en O. Ce repère est appelé repère local ou repère horizontal.

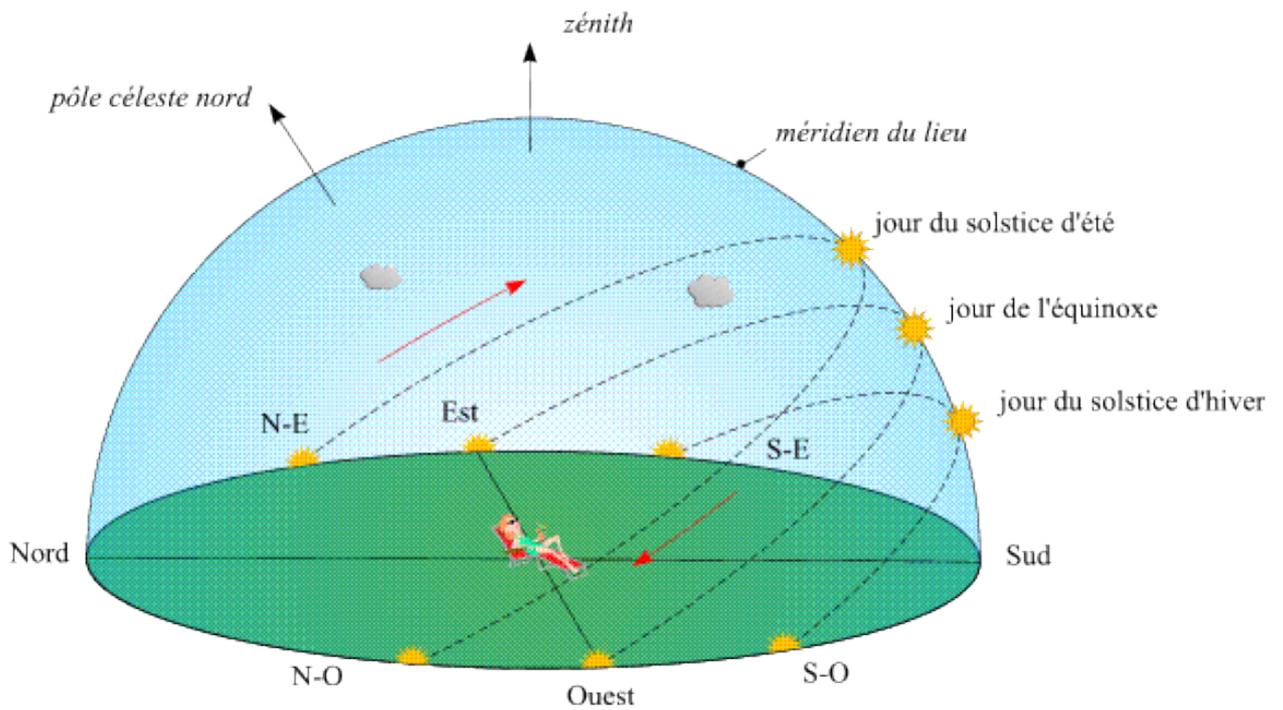
Le cercle des hauteurs (a) est aussi appelé Almicantarat.

On va procéder comme pour la cartographie de la surface de la Terre : on va tracer des méridiens et des parallèles, choisir un méridien origine et un équateur. Pour cela il y a plusieurs façons d'aborder le problème.

Le mouvement diurne

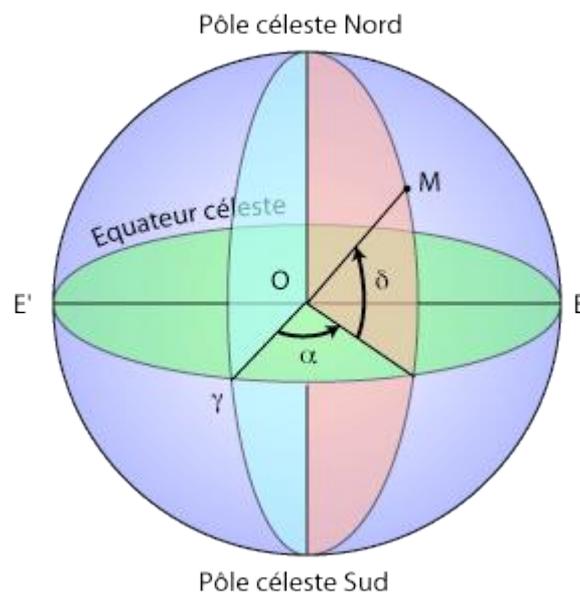
Pour déterminer un équateur et un pôle dans le ciel, c'est assez simple : on remarque tout d'abord que toutes les étoiles semblent tourner sur des petits cercles autour de l'étoile polaire fixe (c'est le mouvement diurne de la Terre). Ainsi, l'équateur terrestre se projette en un grand cercle sur la sphère céleste et dessine un équateur céleste aisé à trouver. Le mouvement de rotation de la Terre autour de son axe apparaît donc de cette façon.

Il faut donner ici quelques compléments sur le mouvement diurne. C'est le résultat de la rotation de la Terre autour de son axe. Cette rotation, repérée par rapport à une direction fixe (une étoile, par exemple), va durer 23h 56m 4s pour un tour complet (360°). Si on se repère par rapport à la direction du Soleil, il faudra alors 24h pour ramener celui-ci dans la même direction. En effet, durant sa rotation, la Terre s'est déplacée dans son mouvement de révolution autour du Soleil ce qui se traduit par un mouvement apparent du Soleil sur la sphère céleste.



Les coordonnées du repère équatorial : la déclinaison

Ayant défini un pôle et un équateur céleste, on peut maintenant compter des angles sur la sphère céleste comme les latitudes sur la Terre. On appelle cet angle une "déclinaison" que l'on compte de -90° à $+90^\circ$ du pôle Sud au pôle Nord. Le pôle Nord est matérialisé par une étoile qui semble fixe : l'étoile polaire.



Les coordonnées équatoriales : ascension droite (alpha) et déclinaison (delta).

Les coordonnées du repère équatorial : l'ascension droite

Sur la sphère céleste ainsi définie, les longitudes seront appelées "ascension droite" : il faut donc définir un méridien origine. Comme la sphère céleste semble tourner, cela ne facilite pas

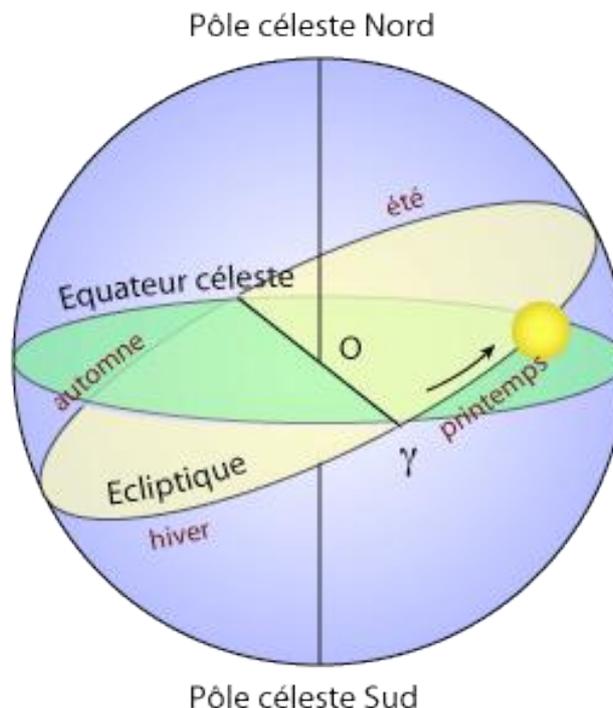
le choix d'un méridien origine qui tourne avec la sphère céleste. Mais on peut l'imaginer s'arrêter un instant. Que choisir comme origine ?

L'idée la plus simple serait de prendre une étoile quelconque et de dire que le méridien qui passe par cette étoile est le méridien origine. C'est peut-être parce que l'homme ne vit pas la nuit que ce choix a rarement été fait dans le passé. Notre étoile la plus visible et la plus utile est en fait le Soleil, et c'est lui que nous allons utiliser. Le choix d'un repère sur la sphère céleste ne s'est pas fait seulement pour le plaisir de repérer les étoiles dans le ciel, mais plutôt pour être capable de construire un calendrier en observant les mouvements des astres dans le ciel comme on le verra ultérieurement. C'est le mouvement de rotation de la Terre autour de son axe qui nous désigne l'équateur céleste (mouvement lié à la durée du jour). Ce sera le mouvement apparent du Soleil autour de la Terre qui va nous désigner le méridien origine (mouvement lié à la durée de l'année)

L'écliptique

Sur la sphère céleste que nous avons arrêtée, les étoiles sont fixes mais certains astres s'y déplacent : les planètes (autrefois appelés "astres errants"), la Lune et surtout le Soleil, même si ce dernier cache les étoiles près desquelles il passe. Le Soleil décrit un grand cercle sur la sphère céleste en un an : c'est un mouvement apparent dû à la révolution annuelle de la Terre autour du Soleil. On parle ainsi souvent de l'orbite du Soleil car, au point de vue cinématique, c'est-à-dire lorsque l'on ne considère pas les forces en jeu (la dynamique), on peut considérer que c'est le Soleil qui tourne autour de la Terre !

Comme la Terre ne tourne pas autour du Soleil dans le plan de l'équateur (l'axe de la Terre est incliné), le grand cercle décrit par le Soleil sur la sphère céleste coupe l'équateur céleste en deux points opposés. Vu de la Terre, le Soleil parcourt ce grand cercle en un an. A l'un des points d'intersection il passe au-dessus de l'équateur et à l'autre il passe dessous. Le premier est appelé noeud ascendant et le deuxième est appelé noeud descendant. Le grand cercle décrit par le Soleil définit le plan orbital de la Terre : c'est l'écliptique.

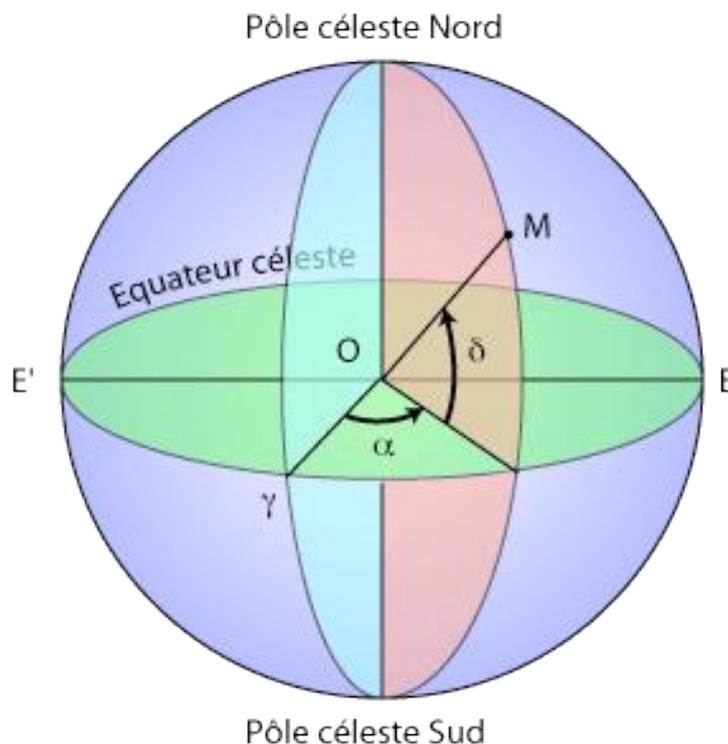


Le point intersection « gamma » est appelé le noeud ascendant car c'est en ce point que le Soleil passe au dessus de l'équateur céleste.

L'équinoxe

Le noeud ascendant est aussi appelé point vernal, point γ ou équinoxe de printemps (le noeud descendant correspond à l'équinoxe d'automne). Le Soleil y passe au 21 mars. C'est le méridien passant par le point vernal qui sera désigné comme méridien origine de la sphère céleste pour le repère équatorial. Les longitudes d'un astre dans un tel système sont appelées "ascensions droites". Elles sont comptées positivement vers l'est de 0 à 24 heures (et non de 0 à 360° bien que ce soient des angles).

Nous avons donc défini un système qui permet de repérer un astre par ses coordonnées (ascension droite et déclinaison) dans le ciel, mais un problème subsiste : pour un observateur en un lieu donné (dont le zénith est Z), ce repère n'est pas fixe par rapport à lui : comment trouver le méridien origine pour calculer une position ?



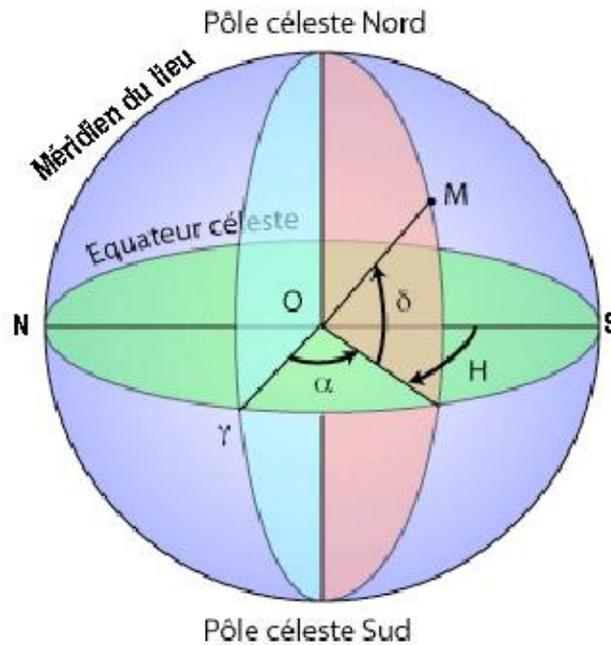
Les coordonnées équatoriales : ascension droite alpha et déclinaison delta

Les coordonnées du repère local : l'angle horaire

Revenons à notre sphère céleste initiale locale définie par l'horizon et le zénith. Nous sommes à la surface de la Terre et nous regardons le ciel. Comment relier ce repère très simple sur cette sphère céleste (mais uniquement local) au repère équatorial visible de tous les lieux? L'équateur céleste est facilement identifiable, le pôle aussi (l'étoile polaire fixe) mais où est le méridien origine ?

On remarque que le pôle du repère équatorial que nous avons défini précédemment se trouve sur le méridien du repère local (direction Nord-Sud du repère horizontal). On peut donc définir un repère local ayant comme équateur l'équateur céleste et comme méridien origine la direction du Sud (méridien du lieu). Dans ce repère équatorial local, la déclinaison d'une étoile est la même que dans le repère équatorial absolu, c'est à dire indépendant du mouvement de rotation diurne de la Terre. Par contre, la longitude d'un astre sera comptée à partir du méridien du lieu (direction du Sud). On l'appellera l'"angle horaire" (compté en heures dans le sens rétrograde -vers l'ouest-). Dans ce repère, l'angle horaire varie au cours du

temps même pour un astre fixe puisque la Terre tourne. Il nous faut aussi trouver le lien entre l'angle horaire et l'ascension droite.



Les coordonnées équatoriales : ascension droite alpha et déclinaison delta et l'angle horaire H compté à partir du méridien du lieu NS

Le temps sidéral

Prenons le problème inverse : comment trouver, en un lieu donné, une étoile dont on connaît l'ascension droite et la déclinaison ? Pour cela il nous faut connaître à chaque instant la position de l'origine des ascensions droites c'est-à-dire du point vernal (équinoxe).

L'angle horaire du point vernal (l'angle séparant le point vernal du méridien du lieu) est une quantité calculable pour un lieu donné : elle est appelée "temps sidéral local". Il faut bien noter que le temps sidéral est un angle, pas un temps (appelé temps du fait que l'unité de mesure est l'heure, la minute et la seconde de 0 à 24 heures).

Ainsi pour un lieu donné, on a :

angle horaire H d'une étoile = angle horaire du point γ - ascension droite α de l'étoile

Soit $H = T - \alpha$

Cette formule est fondamentale pour se repérer dans le ciel et trouver un astre connaissant ses coordonnées équatoriales.

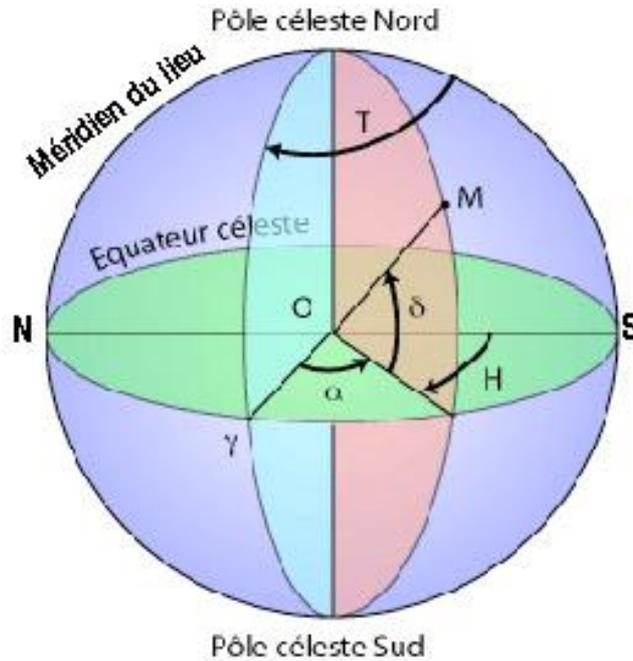
Attention, le temps sidéral est un angle variant avec le temps : il va augmenter de 360° ou 24h quand la Terre aura fait une révolution autour de son axe, donc en 23h 56m 4s. Le temps sidéral à 1h UTC est donc égal au temps sidéral à 0h , plus l'angle dont aura tourné la Terre en une heure, c'est-à-dire (24h / 23h 56m 4s).

Ainsi, pour n heures de temps universel (ou UTC) écoulé, le temps sidéral aura augmenté de $n \times (23h\ 56m\ 4s/24h)$; de même, n heures de temps sidéral se dérouleront en $n \times (24h / 23h\ 56m\ 4s)$ heures de temps universel (ou UTC).

Ces formules peuvent s'écrire également :

angle de temps sidéral = durée de temps moyen $\times 1,0027379$

durée de temps moyen = angle de temps sidéral $\times 0,9972696$



*Les coordonnées équatoriales : ascension droite alpha et déclinaison delta.
H figure l'angle horaire et T le temps sidéral local.*

Le temps sidéral : application

Comment calculer l'angle horaire d'un astre de coordonnées α et δ à une date t pour un lieu dont les coordonnées géographiques sont L et φ .

On utilise la formule fondamentale $H = \text{TSL} - \alpha$ où TSL est le temps sidéral local, c'est à dire l'angle horaire du point γ .

Comment connaître la valeur de ce temps sidéral local ? En effet, les tables ne fournissent que les valeurs du temps sidéral à Greenwich à 0 h chaque jour. On a donc :

$\text{TSL} = \text{TS Greenwich} - \text{longitude } L \text{ du lieu}$

(si la longitude est comptée positivement vers l'ouest)

mais $\text{TSL} = \text{TS} + L$ (si L compté positivement vers l'est)

Par ailleurs le temps sidéral à une heure donnée N se déduit du temps sidéral à 0 h par la formule suivante :

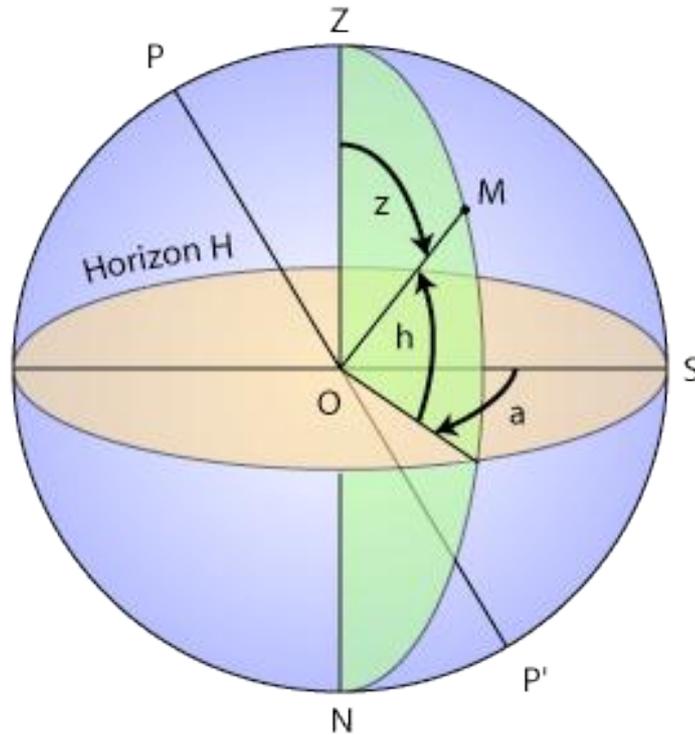
$\text{TSL}(N) = \text{TSL}(0h) + N \times 1,0027379$

car le temps sidéral est un angle qui augmente de 360° ou 24h en 23h 56m 4s de temps.

Connaissant TSL, on en déduit l'angle horaire recherché.

Les coordonnées horizontales

Un astre dans le ciel est donc repérable par ses coordonnées ascension droite α et déclinaison δ . Si on revient à la sphère céleste locale définie par le plan horizontal (H), le zénith du lieu Z et la direction du Sud (m), les coordonnées de l'astre seront l'azimut a et la hauteur h , variables en fonction du temps à cause du mouvement diurne de la sphère céleste. On passera de α, δ à a, h par une résolution de triangle sphérique.



Les coordonnées locales : azimut a et hauteur h : PZS est le méridien du lieu, S étant la direction du Sud

En savoir plus : résoudre un triangle sphérique

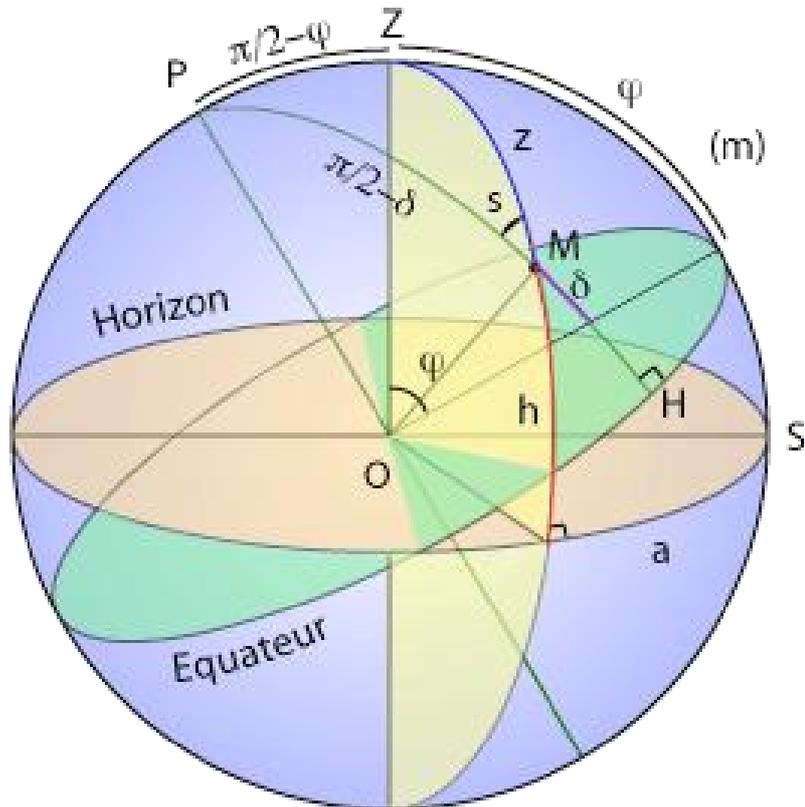
On a vu comment passer du repère équatorial rapporté à l'équinoxe au repère équatorial rapporté au méridien d'un lieu : par l'intermédiaire du temps sidéral qui relie le méridien du lieu à l'équinoxe. Mais comment passer du repère équatorial au repère de coordonnées locales ou horizontales (c'est à dire repérées par rapport à l'horizon du lieu) ?

La figure ci-après montre les deux repères imbriqués : le repère de coordonnées locales horizontales (avec son pôle Z, le zénith du lieu et son équateur, le plan horizontal) dans lequel on mesure l'azimut a (entre la direction du Sud définie par le méridien du lieu (m)-, et la direction de l'astre), la hauteur h de l'astre au dessus de l'horizon (complémentaire de la distance zénithale z) et la latitude du lieu (hauteur du pôle sur l'horizon) ; et le repère équatorial (avec son pôle P, le pôle Nord céleste et son équateur, plan parallèle à l'équateur terrestre) dans lequel on mesure la déclinaison δ et l'angle horaire H (ou l'ascension droite α et le temps sidéral local T).

Dans le repère local on connaît l'azimut a et la hauteur h de l'astre M; z , la distance zénithale est le complémentaire de h ($z = \pi/2 - h$). φ est la latitude du lieu.

On considère le triangle sphérique PZM dont on connaît les arcs $PZ = \pi/2 - \varphi$; $ZM = z = \pi/2 - h$ et les angles $PZM = \pi - a$. On cherche la valeur de l'arc PM pour avoir la déclinaison δ car $PM = \pi/2 - \delta$. On cherche aussi l'angle ZPM qui est H, l'angle horaire. On aura ensuite $\alpha = T - H$ où T est le temps sidéral local au moment de l'observation de a et de h (T, angle horaire du point vernal -point γ ou équinoxe-, varie du fait du mouvement diurne).

De même, connaissant α et δ , on pourra calculer inversement l'azimut a et la hauteur h d'un astre à un instant donné (auquel le temps sidéral sera T) et pour un lieu donné (de latitude φ). On trouvera ainsi la position de l'astre dans le ciel sur la sphère locale.



La connaissance de la latitude φ permet de passer des coordonnées locales aux coordonnées équatoriales horaires d'un astre donné, et inversement. En effet, les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \sin \varphi \cdot \cos z - \cos \varphi \cdot \sin z \cdot \cos a, \\ \cos \delta \cdot \sin H &= \sin z \cdot \sin a, \\ \cos \delta \cdot \cos H &= \cos \varphi \cdot \cos z + \sin \varphi \cdot \sin z \cdot \cos a, \end{aligned}$$

permettent de déduire δ et H de z et a , et inversement :

$$\begin{aligned} \cos z &= \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos H, \\ \sin z \cdot \sin a &= \cos \delta \cdot \sin H, \\ \sin z \cdot \cos a &= -\cos \varphi \cdot \sin \delta + \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos H, \end{aligned}$$

définissent le passage des coordonnées horaires aux coordonnées horizontales.

Il est par ailleurs utile de savoir calculer l'angle S , dit *angle à l'astre*, que font entre eux le méridien passant par l'astre et le vertical passant par l'astre.

Pour cela, on appliquera les formules suivantes :

$$\begin{aligned} \sin z \cdot \sin S &= \cos \varphi \cdot \sin H, \\ \sin z \cdot \cos S &= \sin \varphi \cdot \cos \delta - \cos \varphi \cdot \sin \delta \cdot \cos H. \end{aligned}$$

Dans cette formule, S est compté positivement pour des directions situées à l'ouest du méridien.

L'observation et la mesure de la position d'un astre dans le ciel

Nous venons de définir un système de coordonnées sur notre sphère céleste qui nous permet, à partir de la donnée de la position d'un astre par son ascension droite et sa déclinaison, de le trouver dans un ciel en mouvement perpétuel.

Mais quand il observe un objet inconnu dans le ciel, comment l'astronome va-t-il pouvoir mesurer pratiquement ses coordonnées ascension droite et déclinaison ?

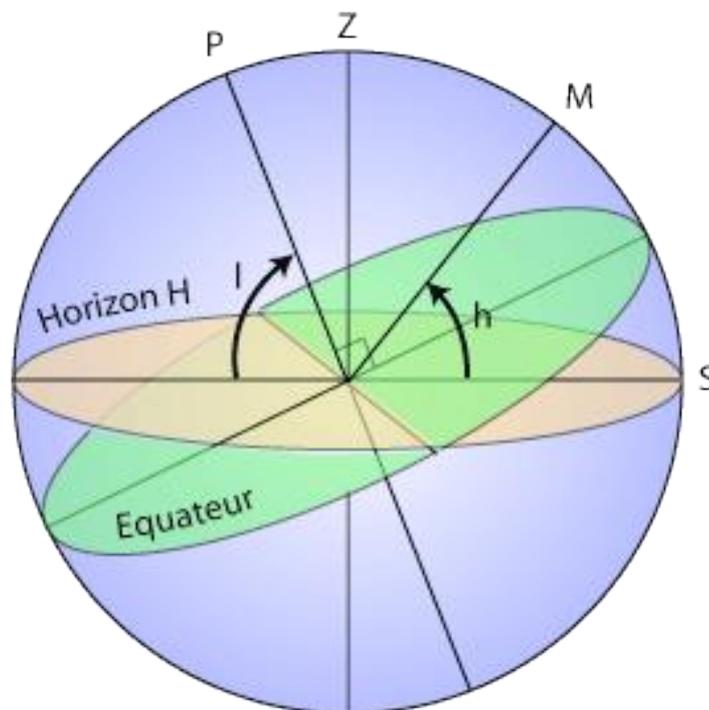
Le passage d'un astre au méridien

La méthode la plus ancienne consiste à attendre que l'astre dont on désire mesurer la position passe au méridien du lieu. A ce moment, on mesure sa hauteur h au-dessus de l'horizon (c'est-à-dire à son point culminant dans le ciel) et on comprend, en regardant les sphères célestes locales et équatoriales que la hauteur mesurée donne directement la déclinaison si on connaît la latitude du lieu d'observation.

On a : $\text{déclinaison} = h - 90^\circ + \text{latitude du lieu}$

Le problème peut être inversé : si on connaît la déclinaison de l'astre, on peut en déduire la latitude du lieu : c'est le principe du point en mer.

Pour l'ascension droite, il suffit de noter l'heure du passage au méridien. A ce moment l'angle horaire est nul, et connaissant le temps sidéral local (calculable directement ou à partir du temps sidéral à Greenwich et de la longitude du lieu), on en déduit l'ascension droite de l'astre. Cette méthode a l'inconvénient de nous faire attendre que l'astre passe au méridien et de ne permettre qu'une seule mesure par jour. Pour résoudre ce problème, on a fabriqué des instruments permettant de mesurer une déclinaison pour un azimut quelconque, ce sont les télescopes à monture équatoriale.

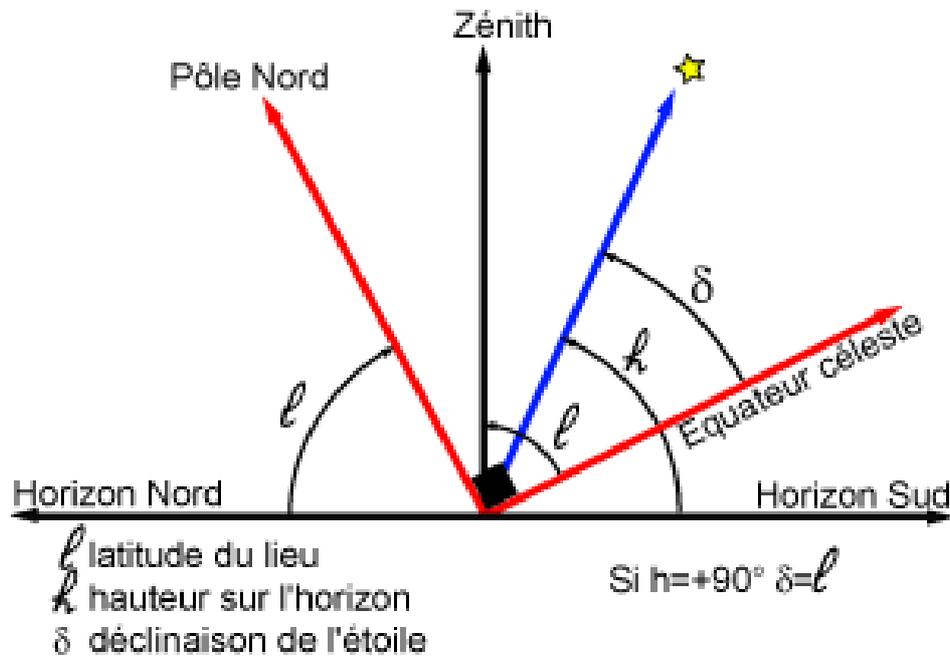


La déclinaison mesurée grâce à la hauteur h d'un astre lors de son passage au méridien d'un lieu

Exercice 'mesure de la déclinaison d'un astre'

La direction du pôle Nord et l'équateur céleste nous fournissent des directions fixes pour toutes les sphères célestes liées aux observateurs individuels. Dans ce système de repérage, chaque étoile aura sa propre déclinaison. Si, à un instant donné on voit une étoile au zénith d'un lieu particulier, quelle sera la déclinaison de cette étoile ?

Réponse dans la figure ci-après valable pour un lieu de l'hémisphère Nord.



On verra plus loin l'instrument utilisé pour ce type de mesure : la lunette méridienne qui présente l'inconvénient de n'observer que lors du passage au méridien des astres. Pour observer beaucoup plus d'astres simultanément, on va enregistrer une image d'un morceau de ciel (par photographie) et déterminer ensuite la position de certains de ces astres connaissant la position d'étoiles de référence. Ces étoiles de référence, dont la position est donnée par des catalogues, auront été mesurées au préalable, en particulier grâce aux instruments méridiens.

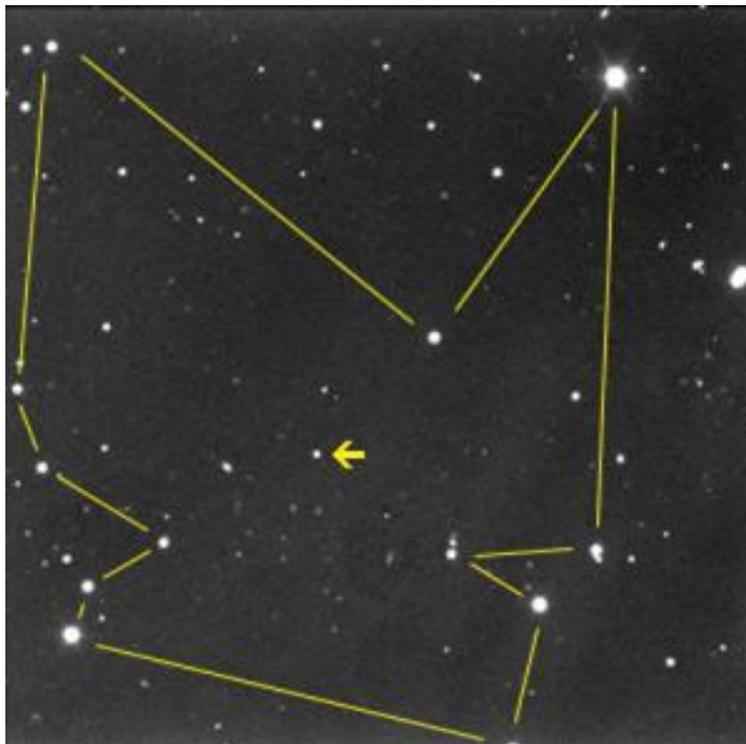
L'image d'un champ astronomique, d'un morceau de ciel

La technique photographique ou d'imagerie électronique se pratique avec un télescope fournissant l'image d'une partie du ciel, un "champ" dont la dimension est mesurée en angle sur le ciel. Sur l'image obtenue par le télescope, on mesure des distances en millimètres qu'il va falloir transformer en angle sur le ciel. Un millimètre correspondra à un angle d'autant plus petit que la distance focale du télescope utilisé est grande. Le nombre d'étoiles visibles sera d'autant plus grand que le diamètre de l'optique du télescope est grand ou que le récepteur est sensible. Pour étalonner notre champ et trouver la position d'un astre inconnu, nous allons le rattacher aux étoiles du champ dont nous connaissons la position grâce à des catalogues d'étoiles. Ce processus, appelé "réduction astrométrique du champ", va permettre de calculer l'échelle de l'image qui transformera des millimètres en unités d'angle et de déterminer l'orientation qui indiquera les directions Nord et Est par rapport à l'équateur céleste. Cela nous conduira aux positions en ascension droite et déclinaison cherchées.



Photo d'une portion de la sphère céleste couvrant 10 minutes de degrés de côté.

La réduction astrométrique : le rattachement aux étoiles voisines



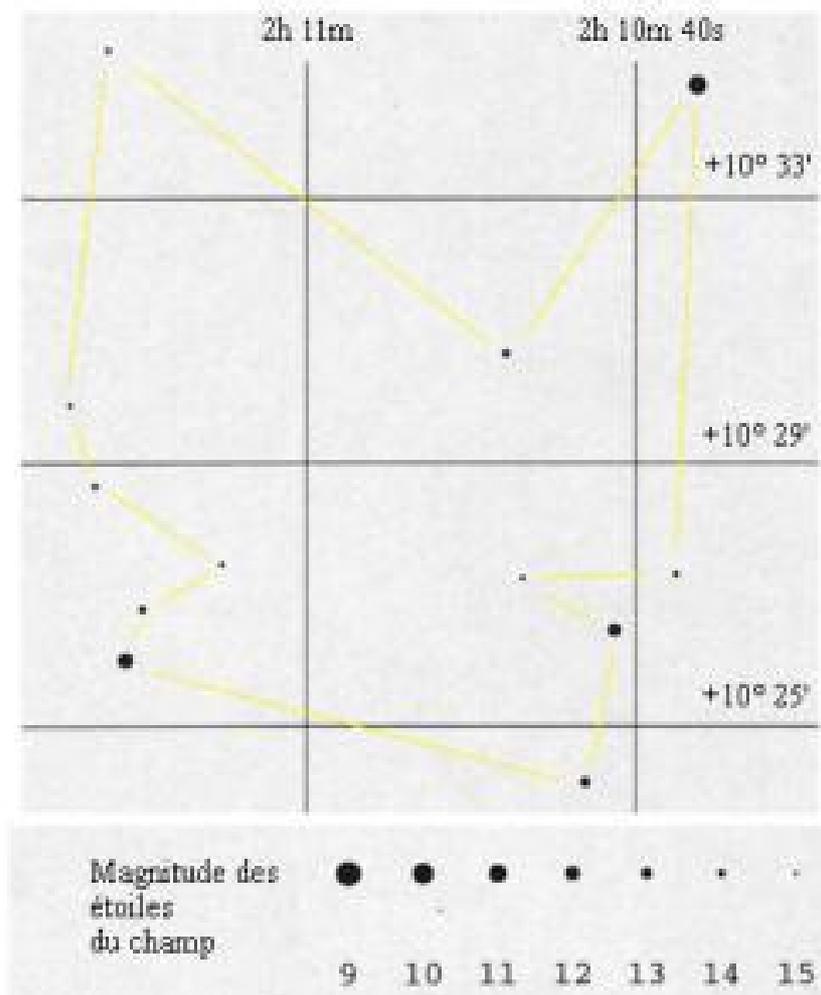
L'astre dont on veut mesurer la position est indiqué par la flèche. Les étoiles du catalogue sont reliées par un trait jaune. On va faire d'abord les mesures en millimètres sur l'image.

Le processus de réduction astrométrique repose sur les principes précédents mais se complique pour plusieurs raisons :

- l'image réalisée est plane alors que l'image d'un morceau de sphère céleste au foyer d'un télescope est sphérique ;
- l'optique du télescope n'est pas parfaite et engendre des déformations du champ ;
- la réfraction atmosphérique rapproche les astres du zénith et les déplace, faussant ainsi leur position.

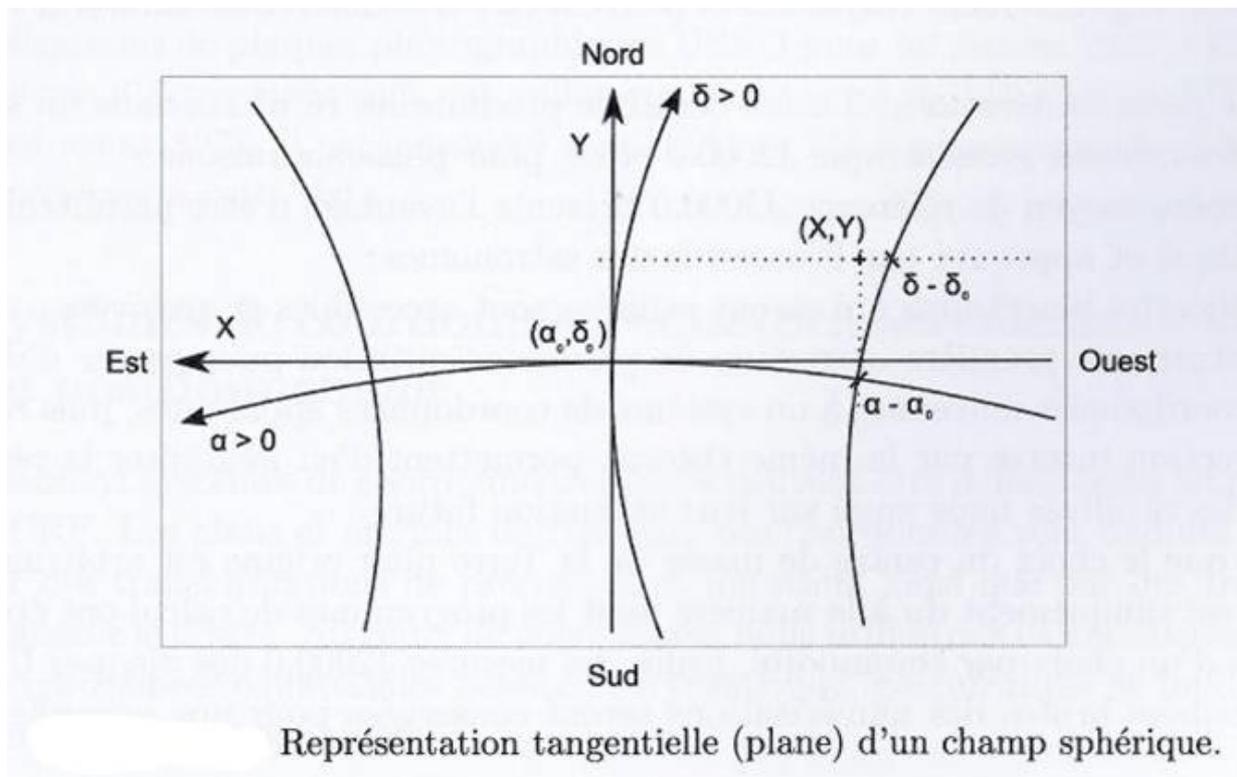
Ces effets sont pris en compte en introduisant des inconnues supplémentaires (en plus de l'échelle et de l'orientation) dans le processus de réduction. Un plus grand nombre d'étoiles de catalogues est alors nécessaire pour étalonner le champ observé. La haute précision astrométrique est à ce prix.

Les catalogues d'étoiles ont beaucoup progressé au cours des dernières années et on dispose actuellement d'un "bornage" ou "arpentage" dense du ciel par les étoiles de catalogue.



C'est à partir de cette carte de champ correspondant à l'image précédente (ici extraite du "Guide Star catalogue", un catalogue d'étoiles construit pour permettre le pointage du Télescope Spatial, que l'on identifie les étoiles à utiliser. On a ici les positions en angles sur le ciel.

Afin de corriger le passage de la sphère au plan, on effectuera une projection sphère sur plan (appelée projection gnomonique) comme suit :



On passe alors des coordonnées tangentielles X et Y aux coordonnées sphériques α et δ par la formule :

$$X = \frac{\cos \delta \cdot \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

$$Y = \frac{\sin \delta \cdot \cos \delta_0 - \cos \delta \cdot \sin \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

On corrigera ensuite les distorsions du champ en passant des coordonnées mesurées x et y aux coordonnées tangentielles X et Y par la formule :

$$X = ax + by + c + dx^2 + ey^2 + fxy + \zeta_{(x,y)}$$

$$Y = a'x + b'y + c' + d'x^2 + e'y^2 + f'xy + \zeta'_{(x,y)}$$

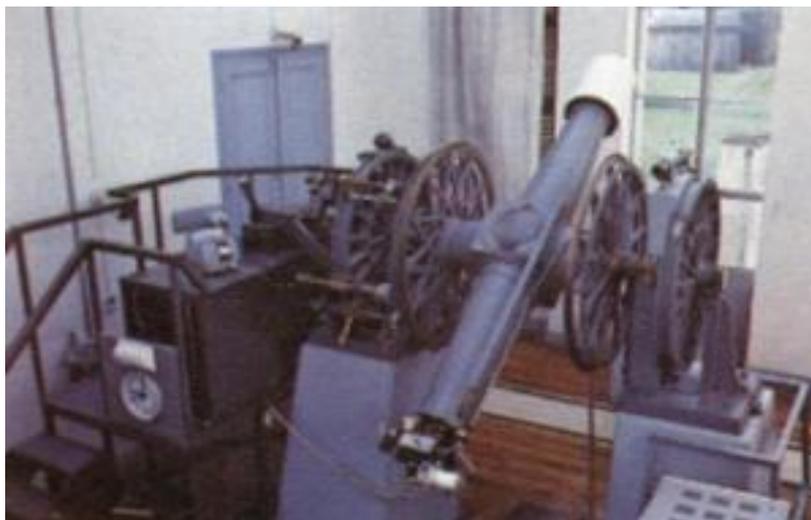
Où a, b, c, \dots sont les « constantes du champ » que l'on déterminera en écrivant ces équations avec les X, Y et x, y des étoiles de catalogue présentes sur l'image. On limitera le degré de ces équations en fonction du nombre d'étoiles de référence disponibles. Connaissant alors les constantes du champ, il sera aisé de passer des x et y mesurés des corps inconnus aux X et Y tangentiels correspondants puis à α et δ .

Cette méthode dite « de rattachement » dépend bien entendu énormément de la précision astrométrique des étoiles du catalogue de référence utilisé. Le tableau ci-dessous donne la liste des principaux catalogues utilisables avec leur précision et le nombre d'étoiles disponibles. Un grand nombre d'étoiles permet un étalonnage plus fin du champ en augmentant le degré des équations ci-dessus à condition que la précision soit acceptable.

Date	Nom	Nb d'étoiles	Magnitude limite	Précision mas	Précision mvts propres	Origine
1997	<u>Hipparcos</u>	120 000	12.4	< 0.78	< 0.88 mas/an	obs. spatiales
2000	<u>Tycho 2</u>	2 500 000	16	< 60	< 2.5 mas/an	de <u>Tycho</u> et 143 sources
1998	USNO A2	526 280 881				
2001	GSC II	19 000 000		360		Plaques Schmidt
2003	USNO B1	1 billion	21	200		Plaques Schmidt
2004	UCAC 2	48 000 000	7.5 → 16	20 → 70	1 → 7 mas/an	scans
2004	Bright stars	430 000	< 7.5			<u>Hipparcos</u> + <u>Tycho2</u>
2005	Nomad	1 billion				compilation des meilleures données
2003	2MASS	470 000 000	16	60 → 100		Infrarouge K
2015	GAIA	1 billion	20	< 0.01 mas		obs. spatiales

L'instrumentation : l'instrument méridien

L'instrumentation pour les mesures astrométriques a énormément évolué au cours du temps. Les instruments anciens ne faisaient que du pointage de visée à l'oeil nu. Sont apparus ensuite les instruments optiques à observation visuelle à l'aide d'un micromètre (il fallait placer l'astre à la croisée d'un réticule de visée et lire des cercles gradués).

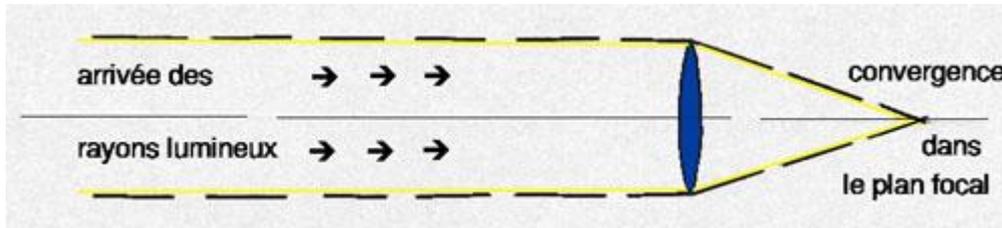


La lunette méridienne de l'observatoire de Bordeaux : ce type d'instrument ne mesure que la hauteur sur l'horizon et l'instant du passage d'un astre au méridien (à son point culminant dans la direction du Sud).

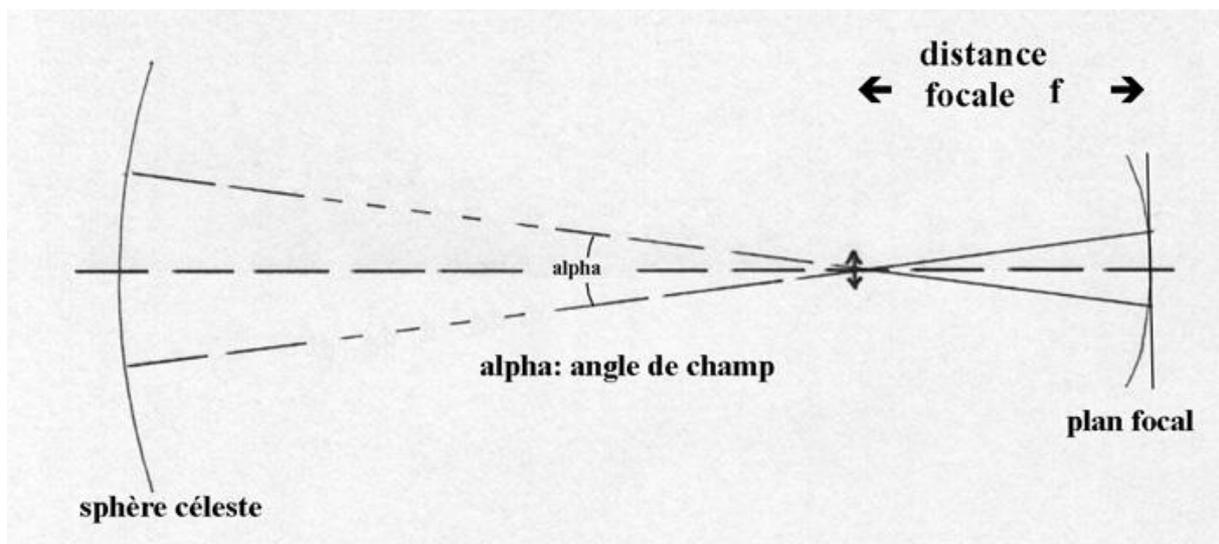
L'instrumentation : lunettes et télescopes

Lunettes et télescopes sont avant tout des collecteurs de lumière qui vont reconstruire l'image d'une portion du ciel dans leur plan focal. Revoyons quelques principes simples d'optique.

Lunettes et télescopes sont des systèmes optiques qui forment dans le plan focal, une image stigmatique d'un objet situé à l'infini, donc d'une fraction du ciel.



Lunettes et télescopes donnent une image de la sphère céleste qui a la courbure d'une sphère dans le plan focal. A un angle donné sur le ciel va correspondre une distance en millimètres sur l'image du plan focal, ce qui amène à définir un paramètre fondamental de la lunette et du télescope : l'échelle de l'image. La portion de sphère céleste dont l'instrument donne l'image au foyer aura pour rayon la focale de cet instrument. Ainsi un angle d'un radian aura pour image un arc de cercle dont la longueur sera la focale de la lunette ou du télescope.



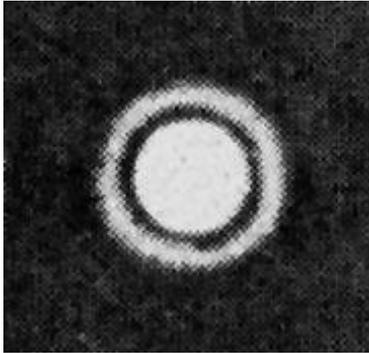
Le deuxième paramètre fondamental d'un instrument est son ouverture, c'est-à-dire le diamètre du miroir du télescope (de l'objectif pour une lunette). On lui associe l'ouverture du faisceau qui est égal au rapport f/D de la focale sur le diamètre. Plus ce rapport est petit, plus la lumière par unité de surface au foyer est grande et donc moins les temps de pose seront longs.

Un autre paramètre important caractérisant un instrument est le champ disponible en pleine lumière. Ce champ est caractérisé en angle sur le ciel et en millimètres dans le plan focal. Les instruments à grand champ ont été construits spécialement pour cela.

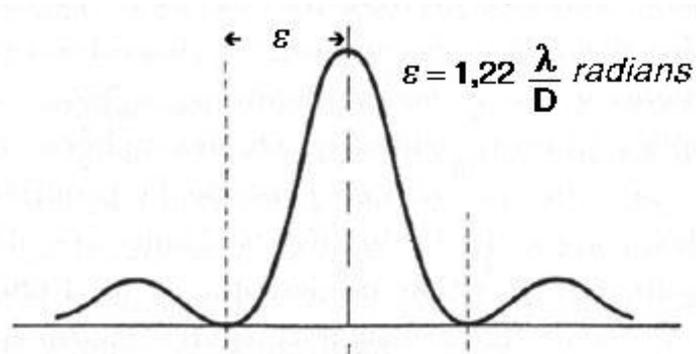
Le dernier paramètre fondamental d'un instrument est son pouvoir de résolution (ou résolution angulaire), c'est-à-dire la taille angulaire du plus petit objet mesurable. Par exemple, si deux points distants d'une seconde de degré sont les points les plus proches vus par la lunette ou le

télescope comme deux points distincts dans le plan focal, alors le pouvoir de séparation de l'instrument est d'une seconde de degré.

Qu'est-ce qui limite ce pouvoir ? Pour l'expliquer il faut faire appel au phénomène de diffraction : l'ouverture de l'instrument (taille de l'objectif ou du miroir) fait écran au faisceau infiniment large et fait office de pupille d'entrée. Elle va diffracter le faisceau et on va obtenir dans le plan focal une image différente de l'objet dont elle provient. Pour un objet ponctuel situé à l'infini et une pupille d'entrée circulaire, l'image aura la forme suivante (tache d'Airy ou tache de diffraction) :



Tache d'Airy, image d'une source ponctuelle, apparaissant au foyer d'un télescope

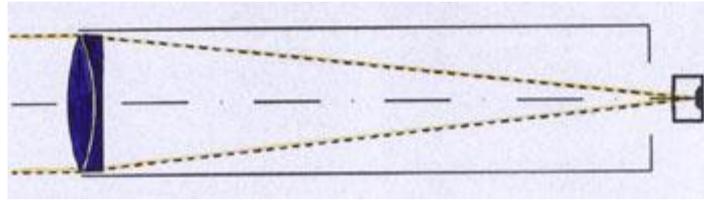


Coupe de la tache d'Airy dans le plan focal

On constate que pour augmenter le pouvoir de résolution d'un instrument il suffit d'augmenter son diamètre. Un instrument de 30cm d'ouverture a un pouvoir de résolution (grandeur ϵ de la figure ci-dessus) de 0,46 seconde de degré, un instrument de 1 mètre : 0,14 seconde de degré et un instrument de 8 mètres : 0,017 seconde de degré, pour une longueur d'onde de 0,55 micromètre (visible). Cette résolution est cependant théorique car l'atmosphère la limite. Son agitation étale la tache d'Airy. On caractérise cette agitation par le "seeing" (turbulence) du ciel au moment de l'observation. Les meilleurs sites d'observation situés en haute montagne n'atteignent que 0,5 seconde de degré au mieux. Deux solutions sont possibles pour augmenter malgré cela la résolution angulaire : l'optique adaptative qui compense l'agitation atmosphérique ou l'utilisation d'un télescope spatial observant en dehors de l'atmosphère terrestre.

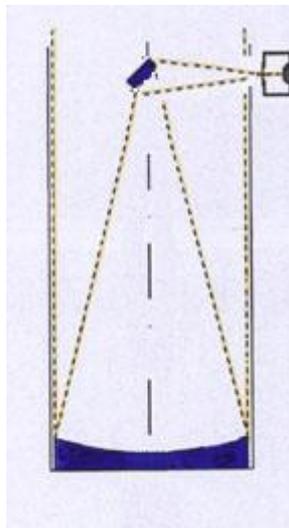
La lunette (ou réfracteur)

La lunette est l'instrument astronomique le plus ancien : il comporte un objectif formant l'image dans le plan focal. Cet objectif est formé de deux lentilles collées : une lentille convergente et une lentille divergente de façon à optimiser, pour une longueur d'onde définie, la concentration de lumière dans le plan focal (une lentille unique forme des images pour chaque longueur d'onde dans des plans focaux différents puisqu'on fait appel à la réfraction des rayons lumineux dans le verre). Les lunettes n'ont pas pu dépasser un diamètre d'un mètre pour des raisons techniques. La position du plan focal par rapport à l'objectif dépend de la longueur d'onde de la radiation considérée seulement dans le cas d'un réfracteur.



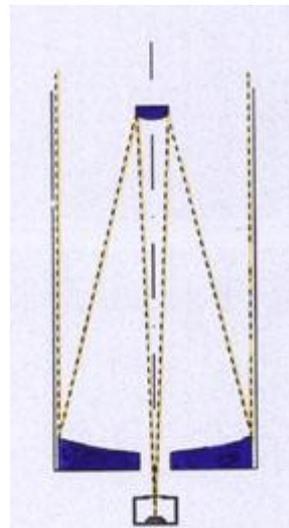
Le télescope (ou réflecteur)

Le télescope est composé de miroirs et fonctionne par réflexions : il n'a donc pas l'inconvénient des lunettes et les images se forment toutes dans le même plan. On dit qu'il est achromatique. Un miroir nécessite seulement le travail d'une seule surface de verre alors qu'un objectif de lunette nécessite le travail de quatre surfaces. Il existe principalement deux types de montages optiques différents pour les télescopes pour le miroir secondaire qui renvoie l'image et modifie la focale de l'instrument.



Télescope à montage Newton :

le miroir primaire parabolique concave focalise les rayons lumineux au foyer de l'instrument, renvoyé en dehors du tube du télescope, sur le côté, grâce à un miroir plan.



Télescope à montage Cassegrain :

l'objectif est constitué d'un miroir primaire parabolique concave et d'un miroir secondaire hyperbolique convexe. Il focalise les rayons lumineux au foyer de l'instrument, situé derrière le miroir primaire percé d'un trou.

Les lunettes, depuis une cinquantaine d'années ont été supplantées par les télescopes. Les raisons de cette évolution sont multiples :

- d'abord l'achromaticité que nous avons abordée ci-dessus;
- ensuite, dans une lunette, la lumière traverse le verre de la lentille alors que dans un télescope, le verre, poli, ne sert que de support à une couche réfléchissante. Il faut donc que le verre d'une lentille soit très homogène, ce qui est très difficile à réaliser pour des lentilles d'un diamètre supérieur à un mètre;
- pour cette même raison que la lumière traverse le verre de la lentille, certaines longueurs d'onde du spectre sont arrêtées par le verre : une lunette est complètement aveugle dans l'infrarouge;

- enfin, on ne sait pas fabriquer des lentilles dont la focale soit du même ordre de grandeur que le diamètre. Les lunettes sont donc toujours des instruments de visée de grande longueur. Or une lunette astronomique doit pouvoir prendre, dans l'espace, des positions très diverses : ainsi, les contraintes mécaniques sur un instrument de grande longueur (flexions en particulier) interdisent un réglage précis et permanent de l'instrument, sans cesse à revoir. Au contraire, les télescopes, plus compacts, se déforment moins au cours d'une nuit d'observation. De plus, on sait aujourd'hui construire des télescopes dont les miroirs ont une focale voisine de leur diamètre. Ce sont des télescopes très ouverts, ce qui veut dire, rappelons-le, que le faisceau de lumière qui converge au foyer, a un angle important. Plus cet angle est important, plus la quantité de lumière reçue au foyer est élevée, donc plus faibles seront -à temps de pose équivalent- les objets observables. Et en astronomie, voir des objets faibles, signifie souvent voir loin...

La monture des télescopes et des lunettes

Les télescopes et les lunettes sont en général des instruments lourds qui doivent :

- pointer un objet céleste avec une précision de la minute de degré;
- avoir une stabilité telle que les déplacements incontrôlés du télescope ne doivent pas dépasser le dixième de seconde de degré;
- suivre les objets célestes dans leur mouvement diurne, c'est-à-dire compenser le mouvement apparent des corps célestes dû à la rotation de la Terre autour de son axe.

Pour pouvoir pointer un corps céleste, le télescope doit avoir deux degrés de liberté, l'un autour d'un axe parallèle à l'axe de rotation de la Terre et l'autre de part et d'autre du plan équatorial perpendiculaire à cet axe. Ainsi, le télescope pointera naturellement en angle horaire et en déclinaison. Le télescope sera alors dit « à monture équatoriale ».

La stabilité du télescope viendra d'une construction mécanique parfaite et d'un équilibrage parfait autour des axes de rotation quelle que soit la position du télescope.

Le suivi du mouvement apparent diurne des corps célestes sera assuré par un mouvement de rotation autour de l'axe nord-sud tel que le télescope effectuerait un tour complet en 23h 56m 4s (rotation sidérale de la Terre).

L'adoption de la monture équatoriale permet d'assurer simplement ce suivi. Par contre, pour les très grands télescopes modernes, la monture équatoriale ne peut assurer une stabilité suffisante eu égard au poids de l'instrument. On adopte alors la monture altazimutale (à l'instar des canons) qui donne comme degré de liberté du télescope une rotation autour de l'axe vertical et une rotation au dessus du plan horizontal. Le suivi du mouvement apparent diurne des corps célestes est assuré par un ordinateur qui effectue en permanence la conversion de l'angle horaire et de la déclinaison en azimut et en hauteur sur l'horizon (résolution d'un triangle sphérique).

L'instrumentation : le récepteur

L'observation visuelle est restée longtemps la seule méthode d'observation du ciel avec un inconvénient majeur : l'impossibilité de conserver l'observation. Avec la photographie, on pouvait conserver l'observation après coup, l'analyser et la mesurer tranquillement. Il y eut d'abord les réfracteurs (type "carte du ciel") bientôt supplantés par les télescopes de Schmidt à plus grand champ. Ces instruments servirent à cartographier systématiquement le ciel. Les plaques photographiques conservées de nos jours sont toujours utiles. Elles ont été numérisées et le ciel entier est accessible via Internet sur le site du « Digital Sky Survey » à l'adresse : <http://www.adsabs.harvard.edu/>.

Aujourd'hui, on utilise des récepteurs électroniques CCD (à transfert de charges) qui fournissent directement des images numériques aisément analysables et mesurables. Les détecteurs CCD sont beaucoup plus sensibles que la plaque photographique, permettant d'avoir accès à des astres très peu brillants avec les mêmes télescopes.



Télescope de Schmidt : ces télescopes, dont l'ouverture est de l'ordre de 1 mètre, construits aussi à de nombreux exemplaires, permettent d'obtenir un champ astronomique de plusieurs degrés et ont cartographié l'ensemble du ciel.

L'instrumentation : l'observation depuis l'espace

Le télescope spatial.

Examinons maintenant le cas très particulier du télescope spatial dont le nom exact est Hubble Space Telescope (HST) du nom du célèbre astronome américain qui le premier comprit que l'univers est en expansion. Un télescope en orbite hors de l'atmosphère est évidemment une bonne réponse à un certain nombre de contraintes inhérentes à l'observation astronomique au sol.

La plus importante est la capacité à s'affranchir totalement et définitivement de la présence de l'atmosphère. Rien n'est jamais aussi parfait que l'élimination de la cause d'un ennui. Ici, on tire bénéfice de cette situation à trois niveaux. Pas de turbulence, donc pouvoir de résolution égal au pouvoir théorique. Pas d'atmosphère, donc pas de rayonnement parasite en infrarouge. Et encore, pas d'atmosphère, donc pas d'extinction atmosphérique (absorption d'une partie de la lumière par les molécules des gaz composant l'atmosphère); la notion d'observation au méridien n'a plus de sens ici. Une observation peut durer aussi longtemps qu'il le faut.

Deuxième avantage, le fait que d'un même endroit, on ait accès à tout le ciel, à toute époque de l'année.

Le fait d'être en apesanteur permet également de s'affranchir de nombreux ennuis secondaires dont nous n'avons pas parlé, tels que les déformations des structures métalliques qui limitent, elles aussi, les performances des très grands instruments.

Enfin, le fait d'être dans un vide parfait a aussi de nombreux avantages vis-à-vis des problèmes d'oxydation des composants de toute nature. Les équipements ont une espérance de vie très grande.

Mais il y a aussi de graves reproches.

- , le coût d'un tel instrument. Nombreux sont ceux qui pensent que ce sera le seul et unique télescope de ce type. Or on ne fait pas d'astronomie avec un seul télescope.

- le manque de souplesse d'utilisation. Ce télescope fonctionne sur un programme précis établi à l'avance. Il est en effet indispensable de minimiser au maximum les dépointages de l'instrument. Dans l'espace, tout dépointage se fait au moyen de rétrofusées qui consomment du gaz dont on comprendra facilement que la quantité soit forcément limitée. Si l'on peut imaginer un dépointage non programmé pour observer un phénomène non prévu, ce mode de fonctionnement ne peut être qu'exceptionnel.

Pour les observations "à la limite" ou nécessitant des décisions "sur le tas", rien ne remplace la présence d'une personne. A de telles circonstances, le télescope spatial est mal adapté.

Enfin, ce ne sera jamais un télescope à tout faire. Combien de travaux importants et ne nécessitant pas de grands moyens d'observation seraient sacrifiés sans les télescopes au sol.

Donc quels que soient les avantages réels et irremplaçables de ce télescope, il ne peut être question d'abandonner l'effort de développement aussi bien de nouveaux équipements, que de nouvelles générations de collecteurs au sol. Les Américains, eux-mêmes, l'ont bien compris et ne cessent d'imaginer de nouveaux instruments pour les observatoires terrestres.

Les satellites astrométriques

Aujourd'hui, les observations les plus précises sont faites par des satellites artificiels hors de l'atmosphère terrestre. La meilleure cartographie du ciel a été obtenue par le satellite astrométrique Hipparcos qui a mesuré les positions et les mouvements propres de plus de 100 000 étoiles avec une précision de l'ordre de quelques millièmes de seconde de degré.

Le lancement d'un nouveau satellite astrométrique (GAIA) en 2014 va révolutionner l'astrométrie. Il va observer un milliard d'étoiles avec une précision de quelques millièmes de degré. Il sera ainsi possible de déterminer les parallaxes d'un très grand nombre d'étoiles et d'avoir une vision « en relief » de la galaxie. En outre, le catalogue d'étoiles de référence permettra une réduction astrométrique des observations des corps du système solaire avec une précision inégalée.



Le satellite astrométrique Gaia qui va observer un milliard d'étoiles durant plusieurs années.