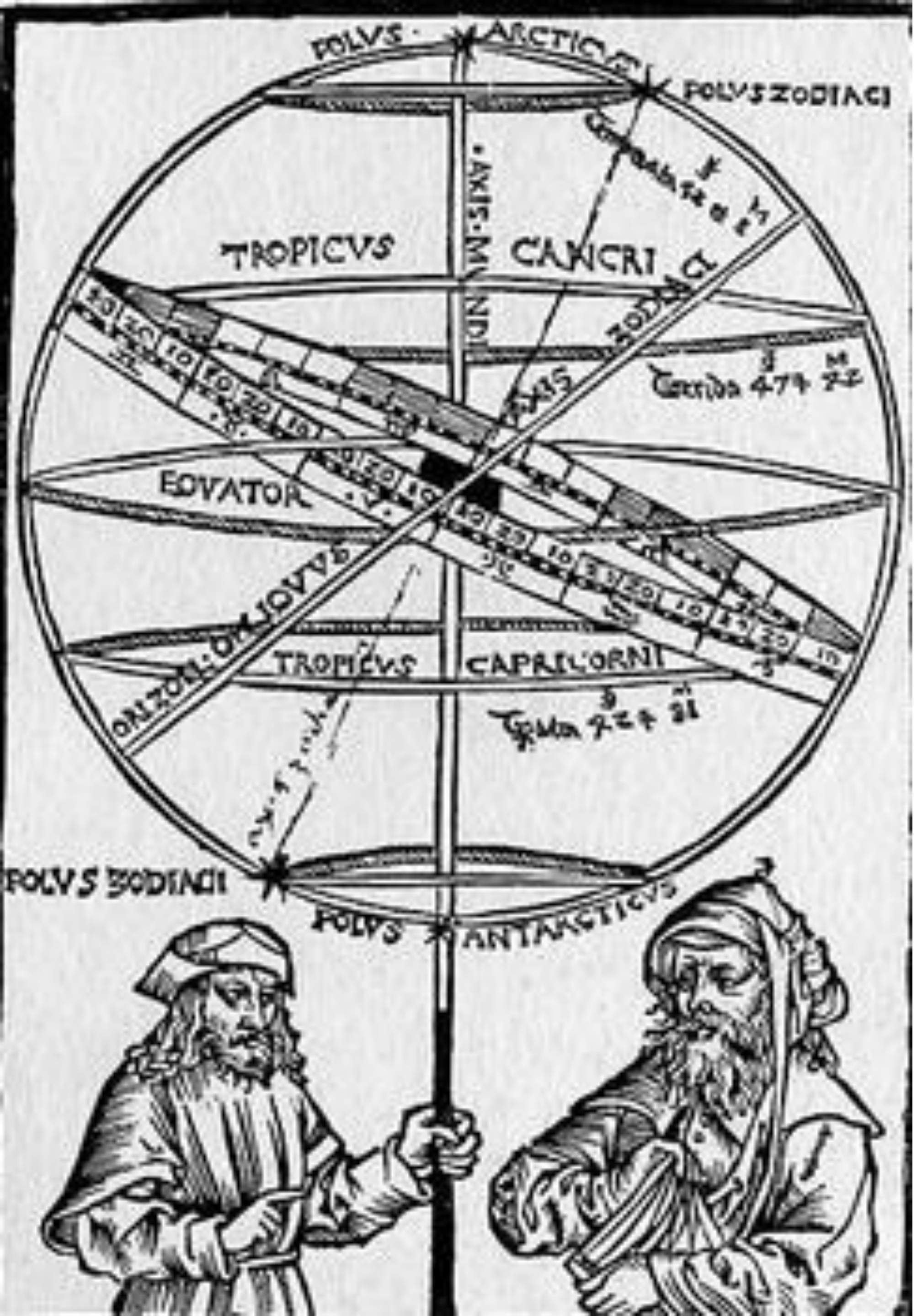
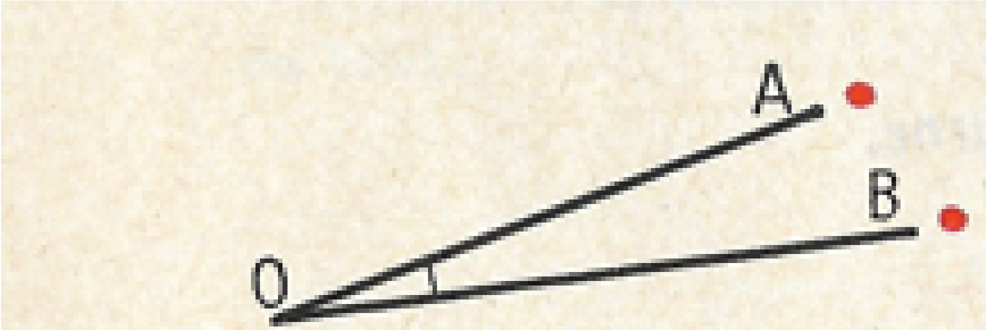


Coordonnées locales. Lever et Coucher des étoiles.

Les étoiles forment dans le ciel des figurent appelées constellations. Ces figurent ne varient pas d'une nuit à l'autre; les observateurs les plus anciens qui en ont dressé les croquis, les ont vues sensiblement comme nous les voyons; elles portent encore les noms qu'ils leurs ont donnés. On a l'impression de figures indéformables, solides. Cette impression est confirmée par une observation de longue durée, au court de la nuit. Les étoiles semblent se déplacer par rapport à des repères pris sur la Terre; mais ce déplacement a lieu en bloc, la forme des constellations n'étant pas changées; les étoiles qui sont alignées à un moment le restent non seulement au cours de la nuit, mais au cours des nuits successives. Précisons notre propos par une mesure. L'angle AOB formé par deux directions allant de l'œil O de l'observateur à deux étoiles A et B déterminées s'appelle la **distance angulaire** de ces étoiles. On peut mesurer cet angle; on constate qu'il ne varie pas au cours des nuits successives.



Quand un observateur se déplace sur la Terre, la même constellation ne change pas d’aspect; la distance angulaire de deux mêmes étoiles reste invariable. A Paris ou à Pékin; la ‘’ Grande Ourse ‘’ a la même forme, celle d’une casserole, qui est le nom donné par les Chinois.
Nous en concluons que les dimensions terrestres sont négligeables par rapport à la distance des étoiles. D’ailleurs, les étoiles, qui apparaissent à l’œil nu sous forme de points lumineux, conservent cet aspect de points quand on les examine à la lunette, ce qui prouve que leur éloignement est considérable.
Tout se passe comme si les étoiles étaient accrochées à la surface intérieure d’une sphère solide appelée **sphère céleste**, dont la Terre, réduite à un point, occuperait le centre.

La sphère céleste locale

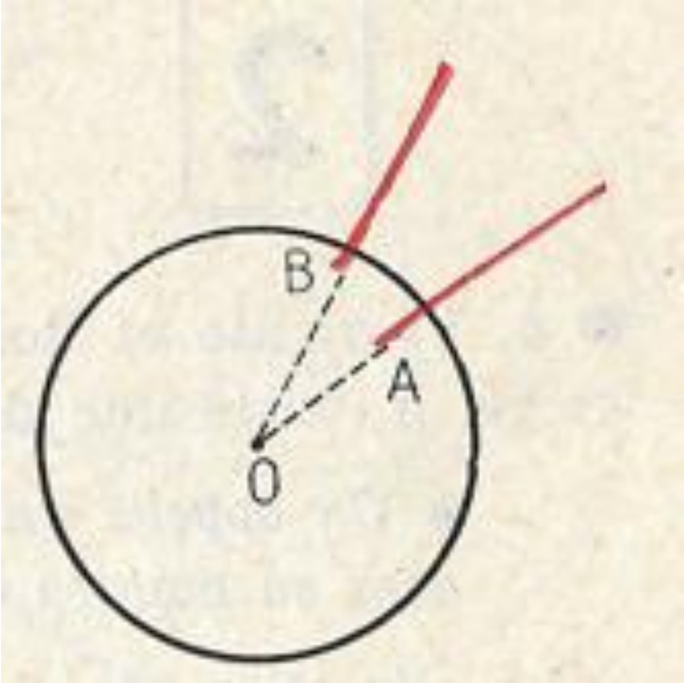
Là encore, précisons notre pensée. On peut imaginer une sphère matérielle d'un rayon quelconque dont l'observateur occupe le centre. La droite qui va de l'observateur à l'étoile (ou le rayon lumineux qui va de l'étoile à l'observateur) perce la sphère en point A, qui sera l'image de l'étoile sur la sphère. La distance angulaire de deux étoiles est l'angle AOB.

Pour repérer la position d'une étoile sur cette sphère **fixe**, liée à l'observateur, il faut déterminer un système de coordonnées, lié lui-même à l'observateur, c'est-à-dire à des directions prises sur la Terre, au lieu d'observation.

On appelle sphère céleste locale une sphère fixe dont le rayon sera pris pour unité, son centre est l'œil de l'observateur. Une direction, déterminée par le centre et un point de cette sphère sera rapportée à des axes fixes, liés à la sphère céleste locale.

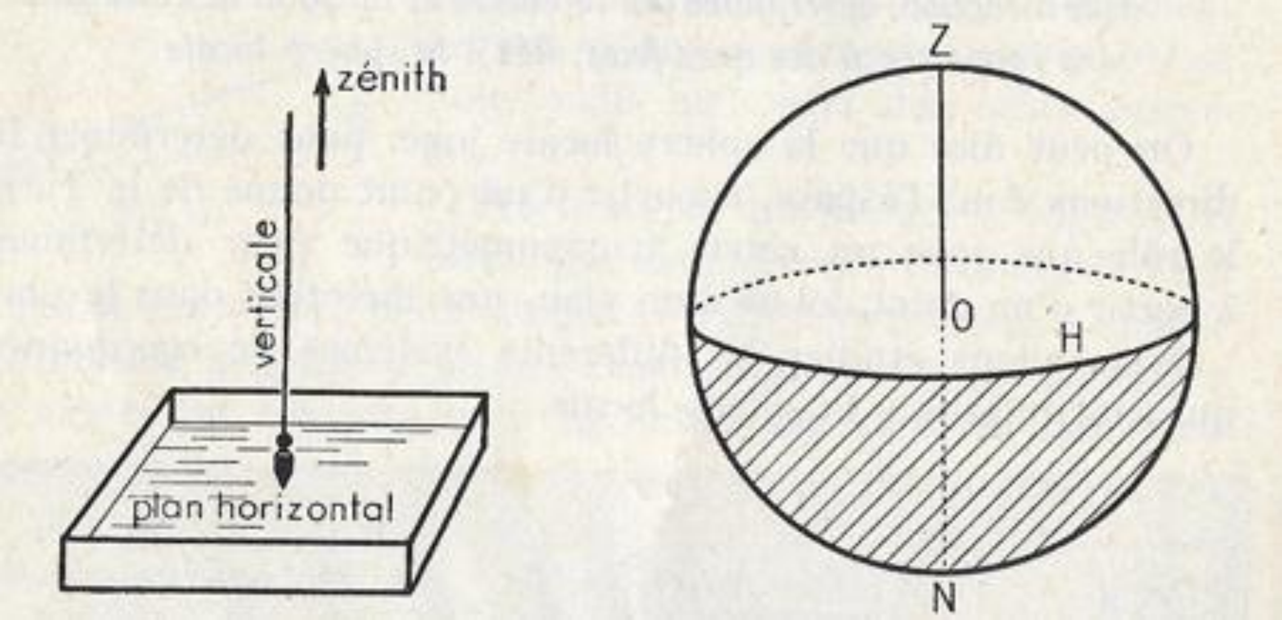
On peut dire que la sphère céleste locale joue, pour déterminer les directions dans l'espace à partir d'un point donné de la Terre, le rôle que joue un repère cartésien pour déterminer à partir d'un point donné d'un plan, une direction dans le plan.

Nous allons étudier les différents systèmes de coordonnées qui sont relatifs à la sphère céleste locale.



La sphère céleste locale

Pour un observateur sur Terre, il existe une direction facile à déterminer, la verticale.
On appelle verticale la direction prise par un fil à plomb dans sa position d'équilibre.
La direction de la verticale ascendante, c'est-à-dire s'éloignant de la surface de la Terre, perce la sphère céleste en un point Z appelé le **zénith** du lieu de l'observation. Le point diamétralement opposé N sur la sphère céleste s'appelle le **Nadir.**
Le plan de l'horizon est le plan perpendiculaire en O à la verticale.
Il coupe la sphère céleste suivant un grand cercle (H) appelé **horizon du lieu.**
Nous ne pouvons observer que la partie de la sphère céleste située du côté du zénith par rapport à l'horizon.



Coordonnées horizontales

Soit OA la direction d'une étoile à un moment donné. Le demi grand cercle ZAN passant par l'étoile et la verticale OZ est dit le vertical de l'étoile. Soit (H) le plan de l'horizon, Z le zénith.

On appelle hauteur (h) l'angle formé par la direction OA et le plan de l'horizon.

$$h = \widehat{aOA}$$

Cet angle est mesuré à partir de l'horizon (0°) vers l'étoile. Il est positif ou négatif suivant que l'astre est au-dessus ou au-dessous de l'horizon.

Pour Z, h=90° ; pour N, h = -90° . A la hauteur h, on associe la distance zénithale (z) qui est l'angle :

$$z = \widehat{ZOA}$$

Compté de 0 à 180° à partir de Z.

La distance zénithale est le complément algébrique de la hauteur :

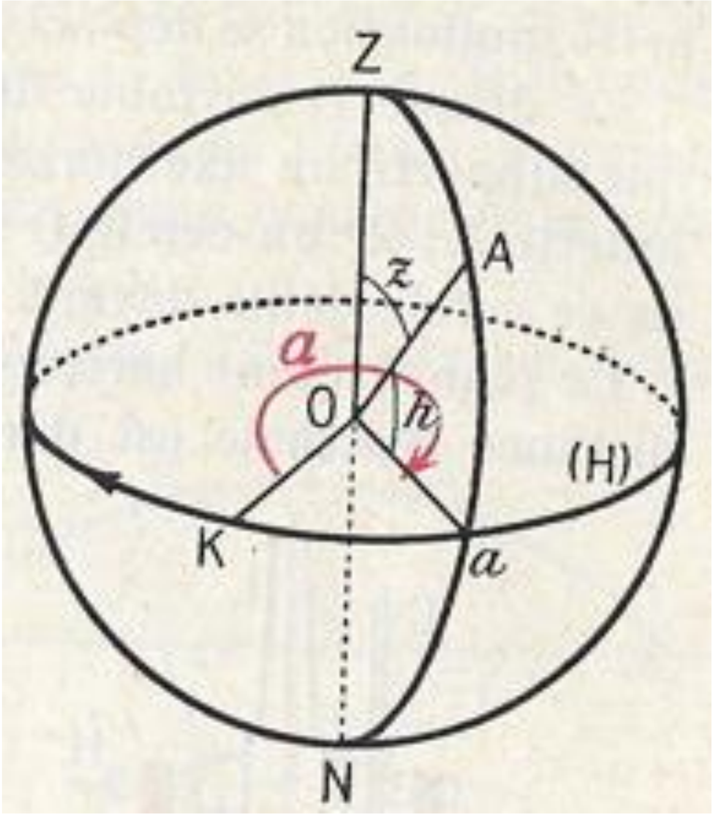
$$h + z = 90°$$

On appelle azimut (a) l'angle formé par le vertical de l'étoile et par le vertical d'un repère terrestre K

$$K = \widehat{KOa}$$

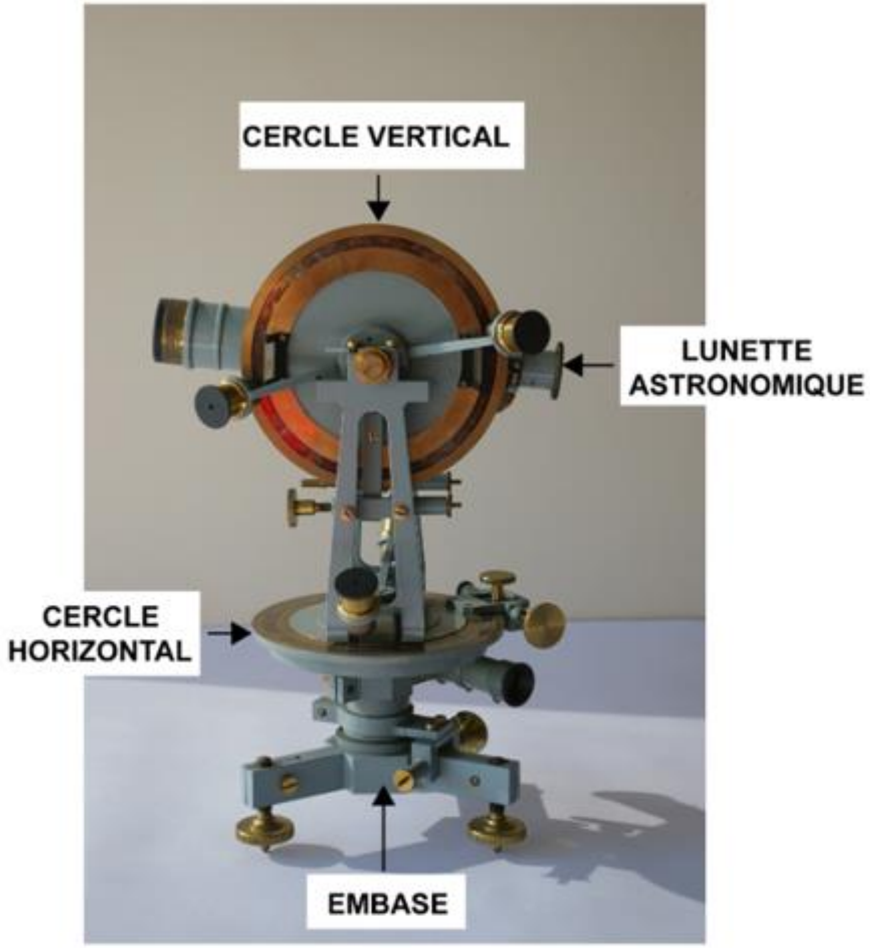
Il se compte de 0 à 360°, à partir de l'origine K, de la gauche vers la droite de l'observateur, c'est-à-dire dans le sens rétrograde.

La hauteur et l'azimut sont les coordonnées horizontales. Elles définissent la position d'un point sur la sphère locale. Pour un astre, elles sont variables l'une et l'autre et sont fonction du temps, mais sont directement mesurables.



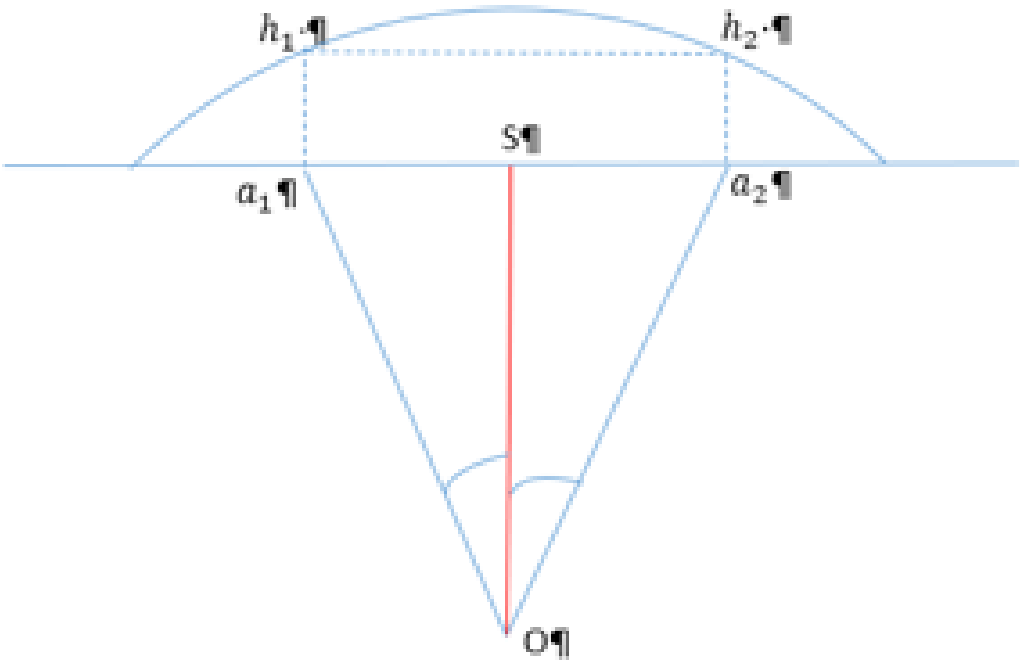
Observation du mouvement diurne

Observons le Ciel pendant plusieurs nuits consécutives. Nous supposerons que les observations sont faites dans l'hémisphère nord de la Terre.
En regardant vers le Sud, indiqué par une boussole, nous observerons une étoile qui se trouve près de l'horizon vers notre gauche au début de l'observation. Nous allons mesurer à des intervalles réguliers, toutes les heures par exemple, son azimut et sa hauteur grâce à un théodolite.
Nous la verrons se déplacer de notre gauche vers la droite; sa hauteur croît d'abord, atteint un maximum, puis décroît. L'étoile approche de l'horizon puis disparaît.
Nous l'avons suivie ainsi depuis son Lever (h =0) jusqu' à son Coucher (h = 0) en passant par le point de sa plus grande hauteur où culmination.



Observation du mouvement diurne

Prenons l'azimut $a_1$correspondant à la hauteur h, dans le mouvement ascendant; bloquons alors la lunette du théodolite dans le plan vertical et attendons le moment où l'étoile dans son mouvement descendant reprendra la même hauteur, elle aura alors un azimut a_2
Si nous traçons sur le sol l'angle $\widehat{a_1 O a_2}$ défini par ces deux directions, nous constaterons que la bissectrice OS de cet angle est fixe quelle que soit la première valeur a et quelle que soit l'étoile considérée.
La direction OS définit donc avec la verticale de O un plan vertical fixe qui est un plan de symétrie de la figure. Les culminations des étoiles ont lieu dans ce plan, que l'on appelle le plan méridien du point O.
La direction OS étant établie, on note l'heure de passage d'une étoile dans le plan méridien. Le lendemain et les nuits suivantes, nous noterons encore l'heure de passage de la même étoile que nous aurons soigneusement repérée. Nous constaterons qu'entre deux passages successifs au plan méridien, il s'écoule un intervalle constant de 23h56mn de nos horloges.

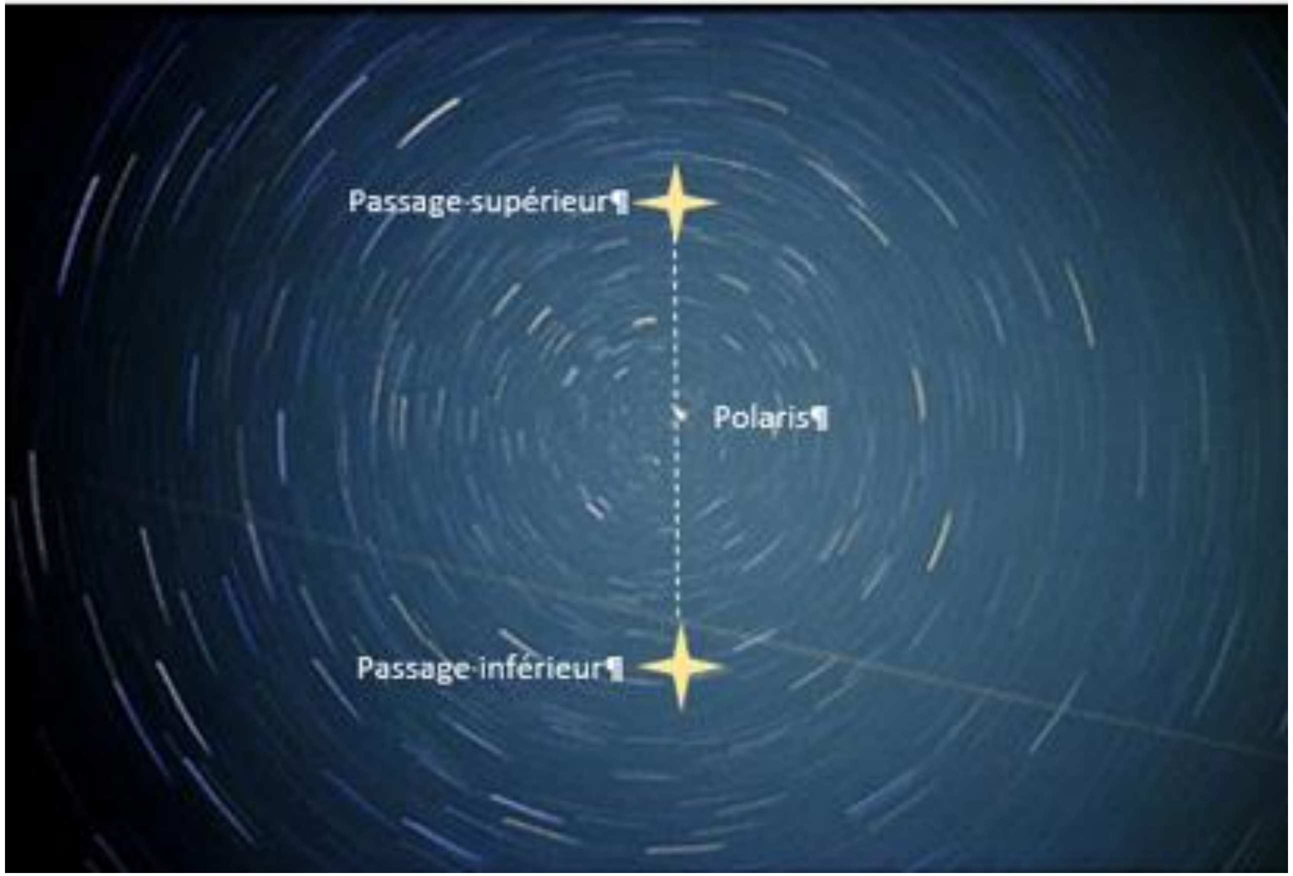


Observation du mouvement diurne

Observons maintenant dans la direction opposée à S. Nous verrons alors le déplacement des étoiles s'effectuer dans le *sens direct,* ce qui résulte de notre retournement. Quelques-unes n'ont ni Lever, ni Coucher; elles sont toujours au-dessus de l'horizon , et passent deux fois dans l'intervalle de 23h56mn dans le plan du méridien, à leur culmination ou passage supérieur correspondant à la plus grande hauteur (h_M) et à leur passage inférieur, correspondant à la plus petite hauteur (h_m). Nous pouvons faire cette observation, en particulier, pendant les longues nuits d'hiver, sur les étoiles de la Grande Ourse, et nous trouverons quelle que soit l'étoile choisie que :

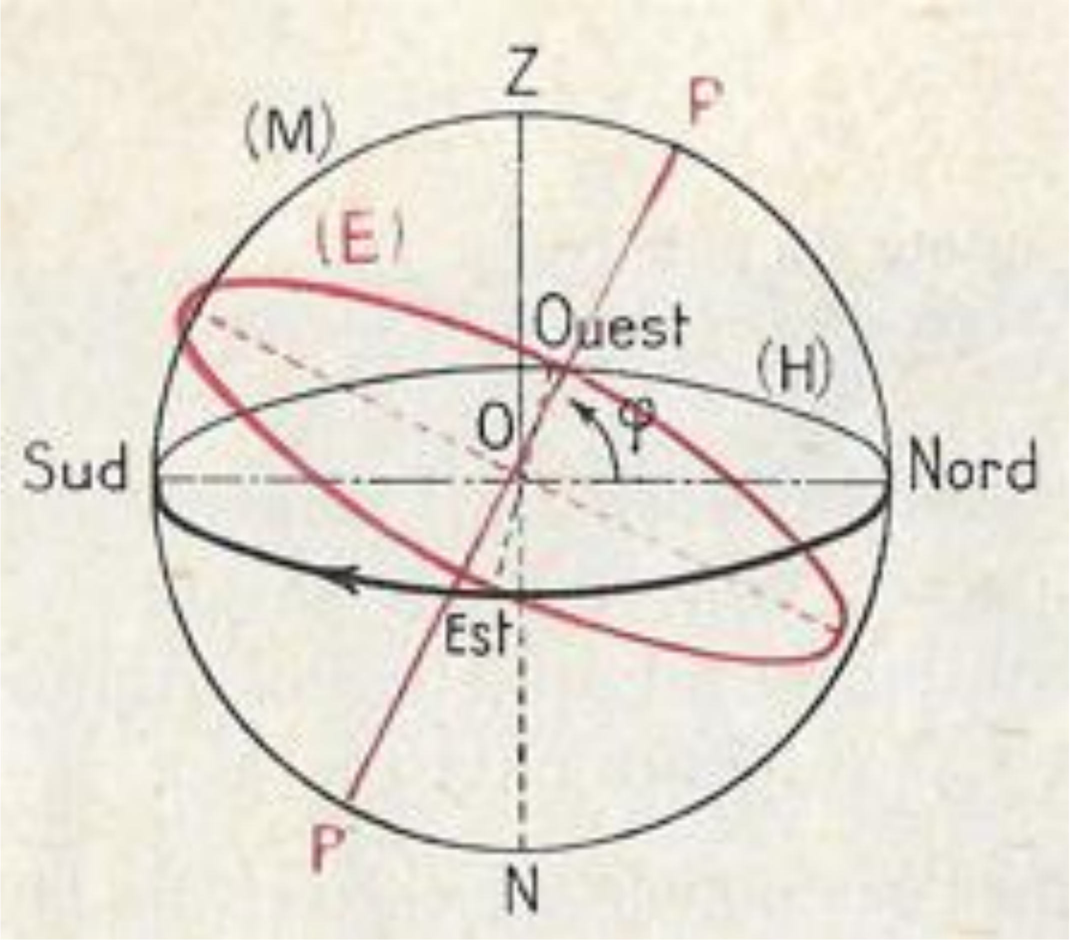
$$\frac{h_M + h_m}{2} = \varphi$$

φ est un nombre constant, pour une position donnée de l'observateur. Nous expliciterons cette grandeur un peu plus loin.



Mouvement diurne _ hypothèses

Des observations qui précèdent, nous sommes amenés aux hypothèses suivantes : l'ensemble de la sphère céleste tourne d'un mouvement uniforme, et qu'elle accomplit sa rotation autour d'un axe fixe en 23h56mn.
On appelle axe du monde l'axe autour duquel se fait la rotation de la sphère céleste.
Si un observateur est placé sur cet axe de façon que le mouvement lui apparaisse rétrograde, l'axe est alors orienté dans le sens des pieds vers la tête de l'observateur. L'axe perce la sphère céleste en deux points : le pôle boréal (voisin de l'étoile polaire), le pôle austral, qui son opposé.
L'équateur de la sphère céleste est le grand cercle perpendiculaire à l'axe du monde.
Le méridien astronomique d'un lieu est le plan déterminé par l'axe du monde et la verticale du lieu.
C'est dans ce plan que les étoiles culminent.
Le méridien d'un lieu coupe la sphère céleste suivant un grand cercle constitué par deux verticaux. Un de ces verticaux contient le pôle boréal; il coupe l'horizon du lieu en un point appelé Nord.
Le point diamétralement opposé de l'horizon est le Sud.
Le Nord et le Sud partagent l'horizon en deux demi-cercles. On partage chaque demi-cercle en quadrants par les points appelés Est et Ouest. Si nous regardons le Nord, nous avons l'Est à notre droite, l'Ouest à notre gauche, le Sud derrière nous.



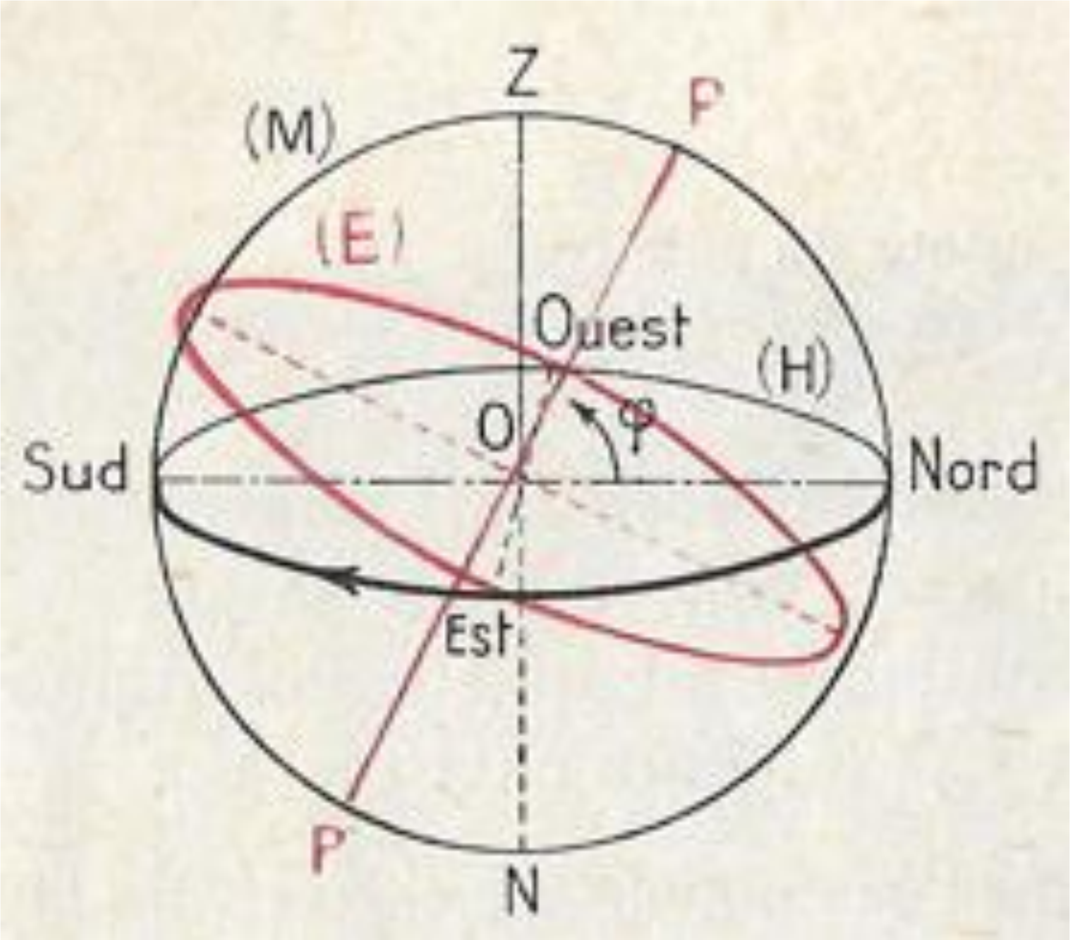
Mouvement diurne _ hypothèses

Le Sud est choisi par les astronomes comme origine des azimuts. Dans ces conditions, les azimuts des 4 directions que nous venons de définir sont :

- Sud : 0°
- Ouest : 90°
- Nord : 180°
- Est : 270°

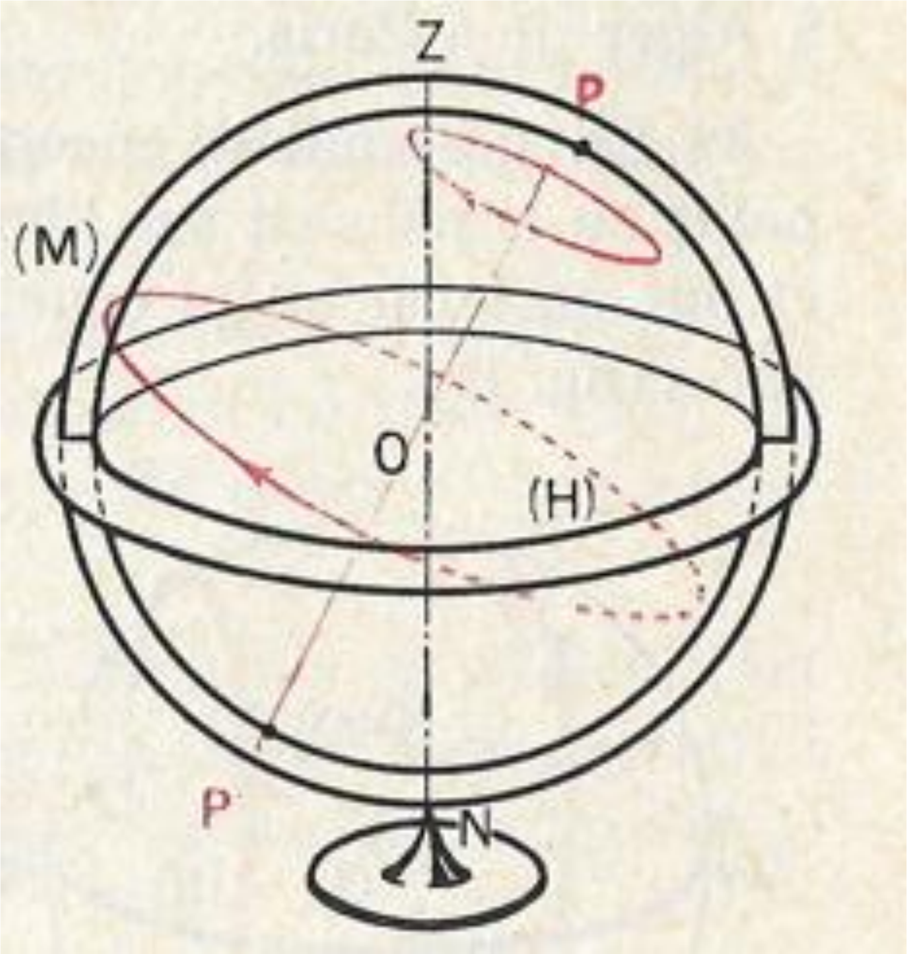
Ces 4 directions sont les points cardinaux du lieu.
La hauteur du pôle au-dessus de l'horizon est la demi-somme des hauteurs d'une étoile circumpolaire à ses passages supérieur et inférieur au méridien, comme nous l'avons vu à la planche 9.
Cette hauteur est variable suivant le lieu d'observation, on trouve 47° à La Baule, 43° à Marseille, 51° à Dunkerque pour la hauteur du pôle boréal. On la représente par la lettre φ où h selon les auteurs.
Nous pouvons alors énoncer les quatre lois du mouvement diurne :

- Le mouvement diurne est un mouvement de rotation des étoiles autour de l'axe du monde.
- Ce mouvement est rétrograde pour un observateur placé le long de l'axe du monde et regardant vers le Sud.
- Chaque étoile, dans ce mouvement, décrit un parallèle de la sphère locale.
- Le mouvement est uniforme et s'accomplit en 23h56mn environ. Cette durée se nomme le jour sidéral. L'heure sidérale est la 24ème partie du jour sidéral.



La sphère des fixes

Représentons la sphère locale par deux cercles métalliques égaux dans deux plans perpendiculaires : l'un M est le méridien, l'autre H est l'horizon.
Une autre sphère sur laquelle sont dessinées les étoiles est mobile à l'intérieur de la première : c'est la sphère des fixes.
Nous la placerons de façon que l'axe PP' fasse avec la ligne ZP l'angle 90°-φ (distance zénithale de la ligne des pôles). En faisant tourner cette sphère à l'intérieur de la première autour de PP' dans le sens convenable, un observateur placé en O voit le mouvement apparent des étoiles, tout ce qui est au-dessous du plan H étant supposé invisible.



Les lois du mouvement diurnes sont également compatibles avec les deux hypothèses suivantes :

- L'Univers stellaire tout entier est un mouvement de rotation rétrograde autour de la Terre, supposée elle-même en état de repos. Le mouvement s'accomplit autour d'un axe passant par le centre de la Terre et dont la direction est parallèle à l'axe du monde.
- L'Univers est en état de repos mais la Terre tourne sur elle-même dans le sens direct en un jour sidéral autour de son axe de rotation passant par son centre et parallèle à l'axe du Monde de la sphère des fixes. La direction de l'axe de rotation de la Terre reste invariable par rapport aux étoiles.

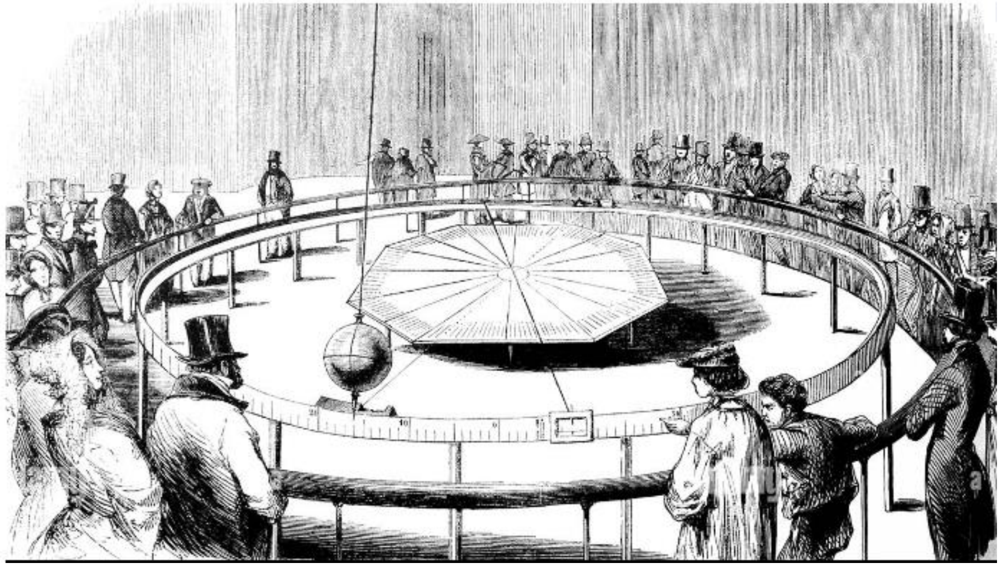
Dans la première hypothèse, il faut admettre que les étoiles décrivent en 23h56mn des cercles ayant leur centre situé sur l'axe du Monde, ce qui revient à leur attribuer, dans ce mouvement, une vitesse considérable, proportionnelle à leur distance à cet axe.

La seconde hypothèse ne fut pas clairement exposée avant la publication du célèbre ouvrage de Copernic en 1543 Revolutionibus Orbium Coelestium , où, pour la première fois , elle est appuyée d'arguments décisifs.

En effet, le mouvement annuel de la Terre autour du Soleil, admis par Copernic, se montrant sans effet sensible sur la direction des étoiles et leurs positions relatives, il fallait en conclure qu'elles étaient beaucoup plus éloignées que les planètes : la rotation diurne de l'Univers stellaire perdait alors toute vraisemblance.

La rotation de la Terre a été prouvée au milieu du XIXème siècle par les expériences de Foucault.

La rotation de la Terre



P'

La hauteur du pôle

Considérons la Terre, croquis ci-contre, nous prendrons deux hypothèses résultant de l'observation :

- La Terre tourne sur elle-même autour d'un axe fixe en 24 heures sidérales.
- Elle est sensiblement sphérique.

En un point (A) de la Terre, nous savons déterminer :

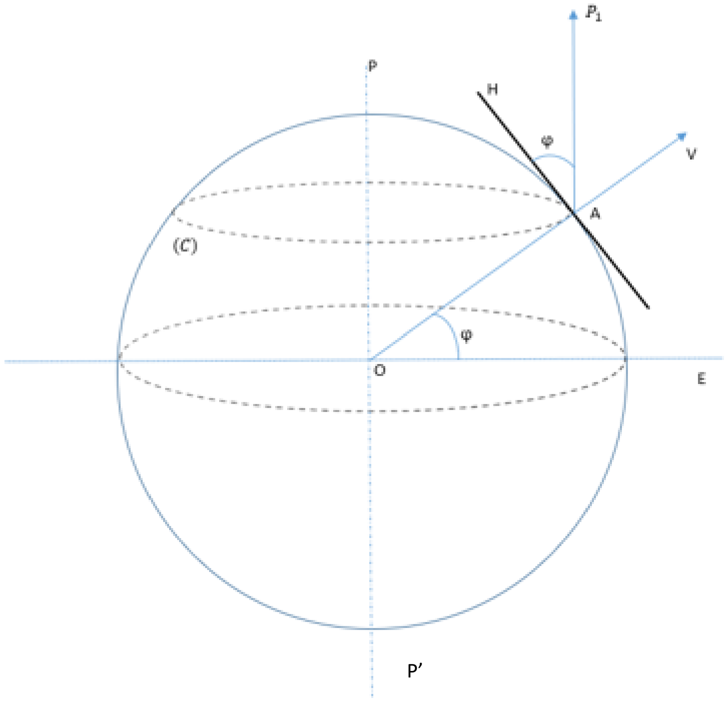
- La direction de la verticale V grâce à un fil à plomb.
- Le plan de l'horizon H qui lui est perpendiculaire.
- La direction de l'axe du monde PP' qui passe par le pôle visible du Ciel.

Si la Terre est sphérique, nous pouvons dire que la verticale ascendante AV est le prolongement du rayon OA et d'autre part que le plan de l'horizon en A est le plan tangent à la sphère en ce point. Le point (P) situé, par rapport à la Terre, du même côté que le pôle céleste boréal est le pôle Nord de la Terre, le point (P') est le pôle Sud. Dans sa rotation autour de l'axe PP', le point (A) décrit un cercle perpendiculaire à PP'. Ce cercle est un parallèle.

Par définition, la latitude d'un lieu est l'angle formé par la verticale de ce lieu et le plan de l'équateur. Menons de (A) la parallèle AP_1 à OP; l'angle $\widehat{HAP_1}$ est égal à φ car ses côtés sont perpendiculaires à l'angle $\widehat{AOE}$.

Or, l'angle $\widehat{HAP_1}$ est la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon, cet angle est théoriquement mesurable, d'où le théorème :

La latitude d'un lieu est la hauteur du pôle en ce lieu.



Coordonnées horaires

Le système de coordonnées horizontal que nous venons d'étudier est un système local rapporté au zénith et au plan horizontal. Nous allons définir un autre système de coordonnées locales rapportées au pôle et à l'équateur céleste et que nous appellerons le système de coordonnées horaires.

Traçons le demi-grand cercle PQQ'P' qui passe par les pôles célestes et par le point Q. C'est le cercle horaire de ce point. L'angle horaire de ce point Q est, par définition, l'angle de son cercle horaire et du demi-méridien PZMP'dirigé vers le Sud. Il est mesuré par l'arc équatorial MQ', compté positivement dans le sens rétrograde c'est-à-dire dans le sens du mouvement diurne. Grâce à cette convention, l'angle horaire croît sans cesse, Il augmente d'une circonférence en un jour sidéral. On le représente par la lettre H. On exprime les angles horaires, non en degré, mais en heures et en fractions d'heures.

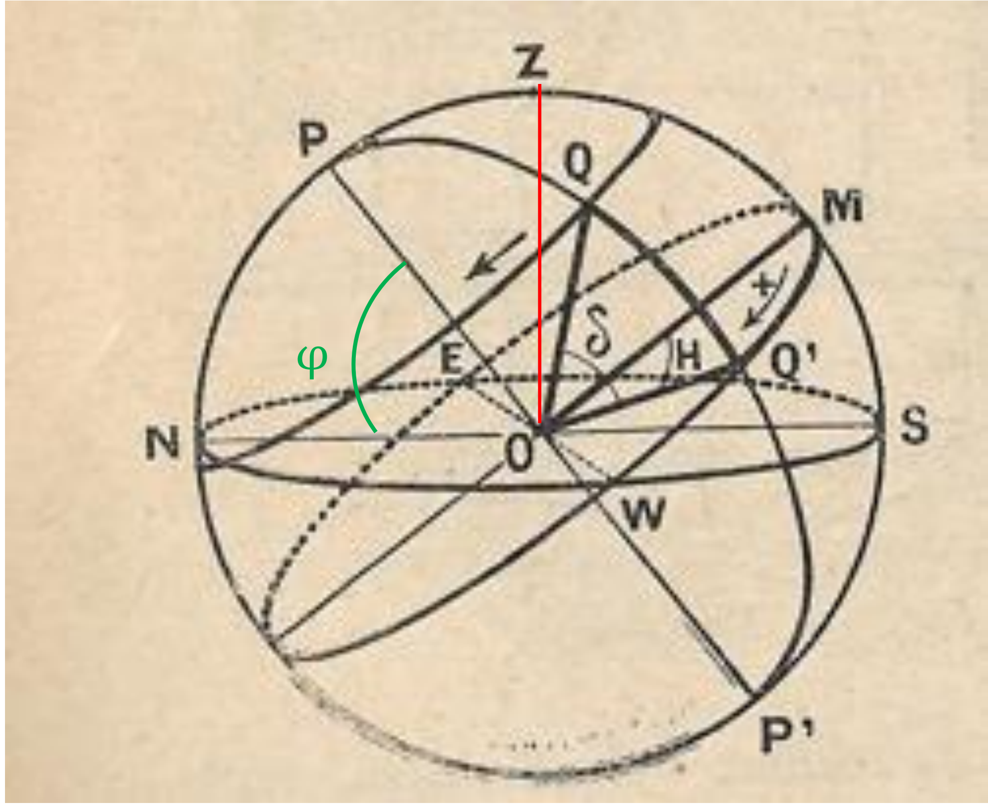
La distance angulaire du point Q à l'équateur céleste mesurée par l'arc QQ' est sa déclinaison. On la représente par la lettre δ. Elle se compte positivement vers le pôle céleste boréal et négativement vers le pôle céleste austral et elle s'exprime en degrés, de – 90° pour le pôle Sud à +90° pour le pôle Nord.

L'angle H et la déclinaison δ déterminent complètement la position du point Q. Ce sont ces coordonnées horaires.

On s'assurera sans peine que les coordonnées horaires du zénith sont :

$$H = 0\,;\delta = \varphi$$

φ étant la latitude du lieu.

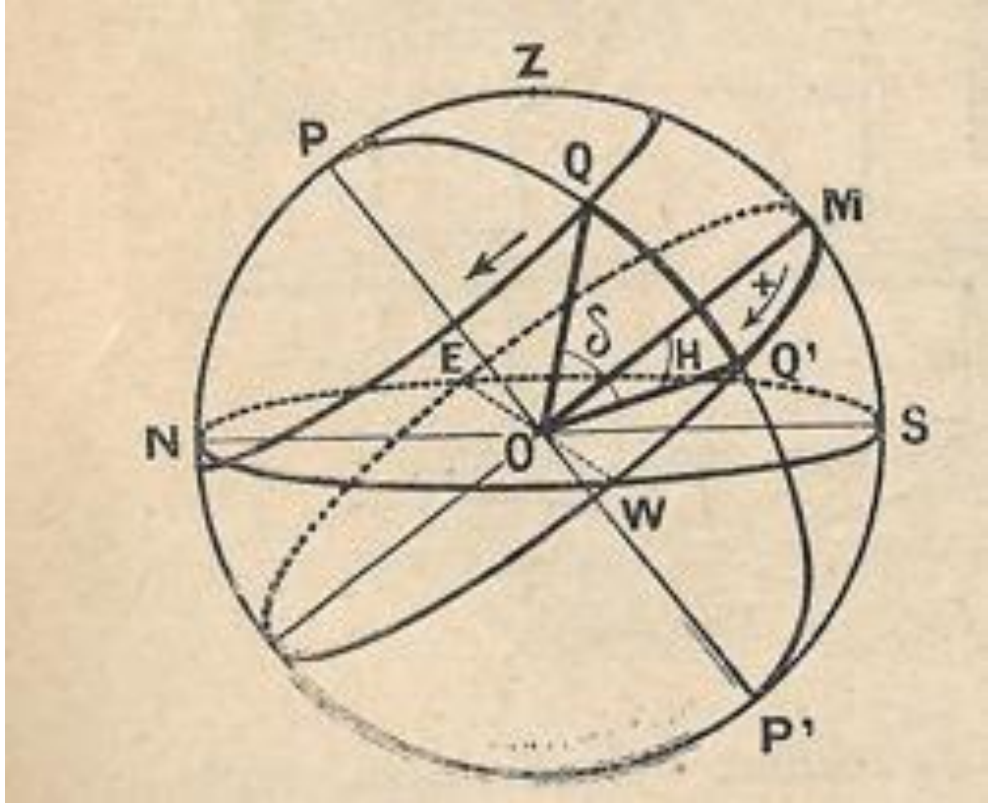


Angle horaire, déclinaison

La déclinaison est invariable le long d'un parallèle céleste, d'où une conséquence importante :
La déclinaison d'une étoile reste constante alors que son angle horaire croît uniformément avec le temps.
Grâce à cette propriété, les coordonnées horaires sont mieux adaptées que tout autre système à la représentation du mouvement diurne dont elles fournissent l'expression la plus simple. En revanche, elles ne se prêtent pas à des mesures directes et précises, sauf dans le cas particulier important du passage au méridien, parce que le méridien est un cercle horaire et aussi un plan vertical.

$$\widehat{ZQ} + \widehat{QM} + \widehat{MS} = 1D$$

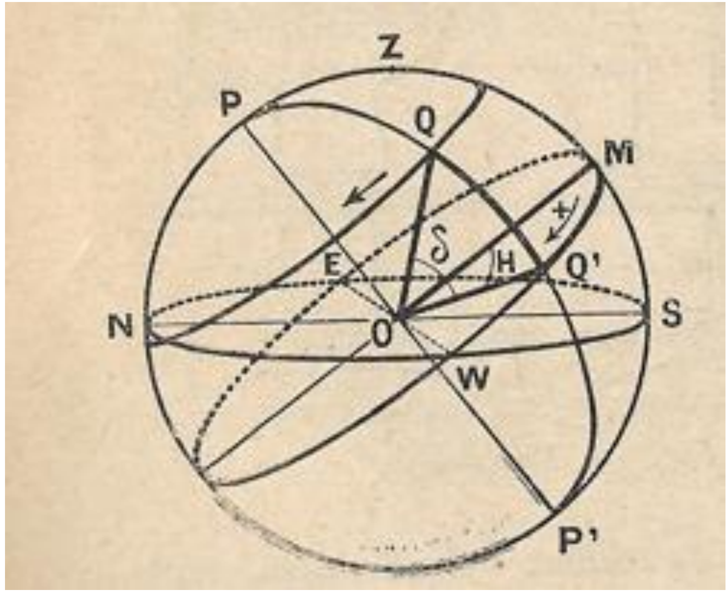
$$\widehat{QM} + \widehat{MS} = 1D - \widehat{ZQ}$$



La culmination

Projetons les différents éléments de la sphère des fixes sur le plan du méridien astronomique. Nous obtenons le croquis en bas à droite de la planche. La hauteur h, qui correspond à la culmination de l'astre, est déduite de la formule simple :

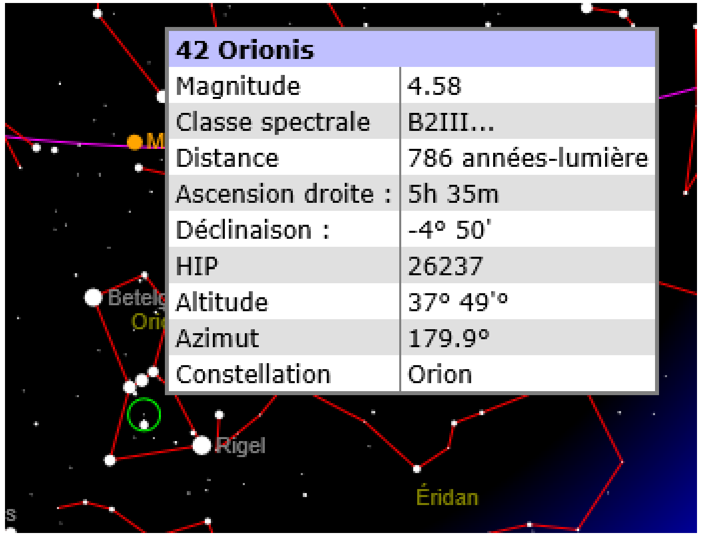
$$h = \delta + (90 - \varphi)$$

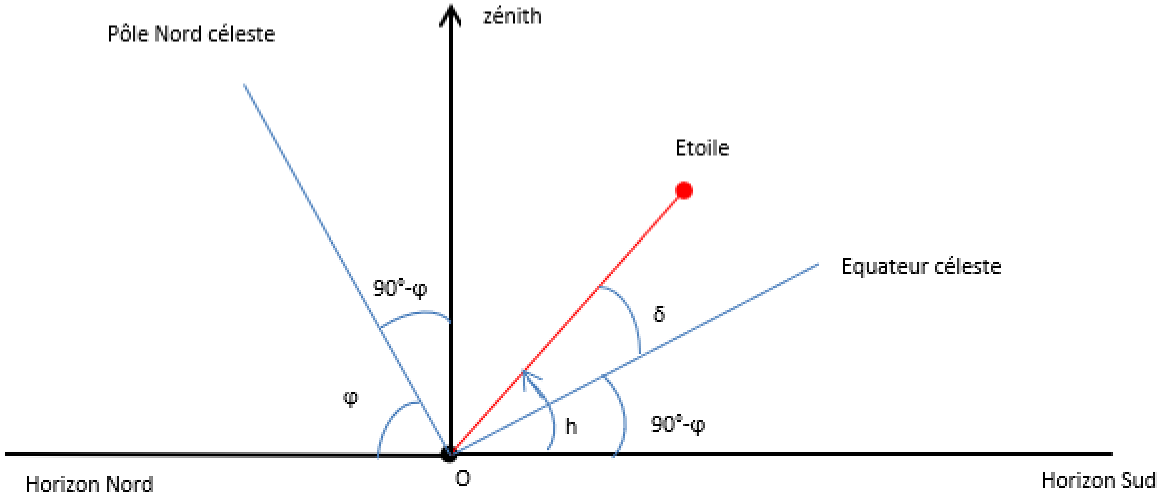


Calculons par exemple la culmination de M42 à La Baule. Les éphémérides nous indiquent que la déclinaison de M42 est δ = -4,8°, la latitude à La Baule est φ = 47,3°. La hauteur de M42 au méridien est de :

$$h = -4{,}8 + (90 - 47{,}3) \approx 37{,}9°$$

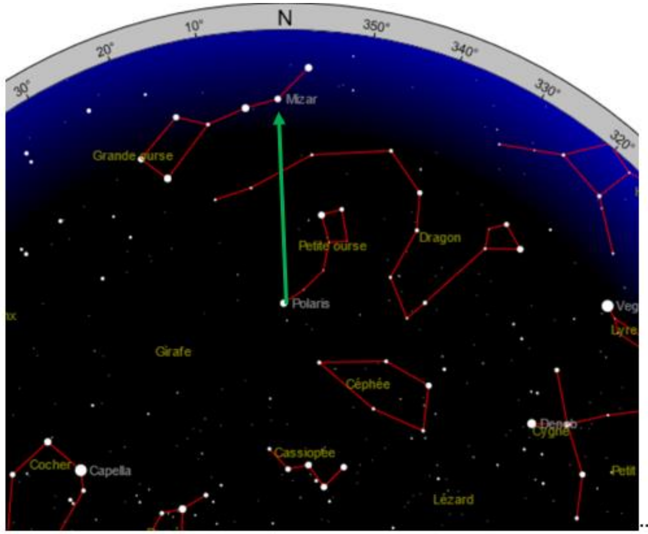
Valeur assez proche de ce que nous trouvons sur Heavens Above (≈ 37,8°)



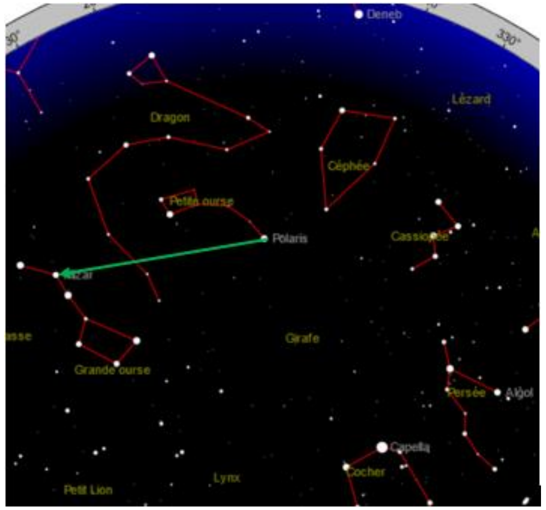


Les étoiles circumpolaires

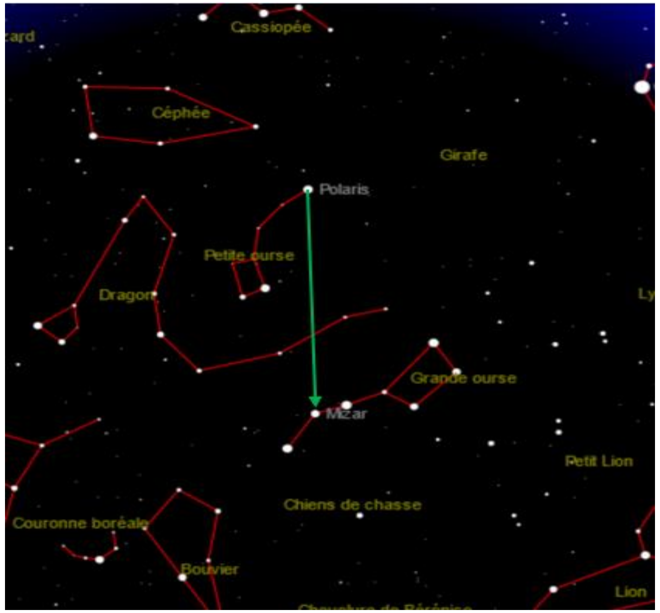
Au cours d'une nuit, la rotation de la sphère céleste fait en sorte que certaines étoiles se lèvent et se couchent. Toutefois, il existe des étoiles qui sont toujours visibles depuis un lieu donné quelle que soit l'heure de la nuit ou la saison de l'année.
Ces étoiles se trouvent dans une région plus ou moins étendue qui encercle le pôle céleste d'où leur nom d'étoiles circumpolaires.



1er novembre _ 00h00_ La Baule



1er novembre _ 06h00 _ La Baule



1er novembre _ 12h00 _ La Baule

1er novembre _ 18h00 _ La Baule

Les étoiles circumpolaires

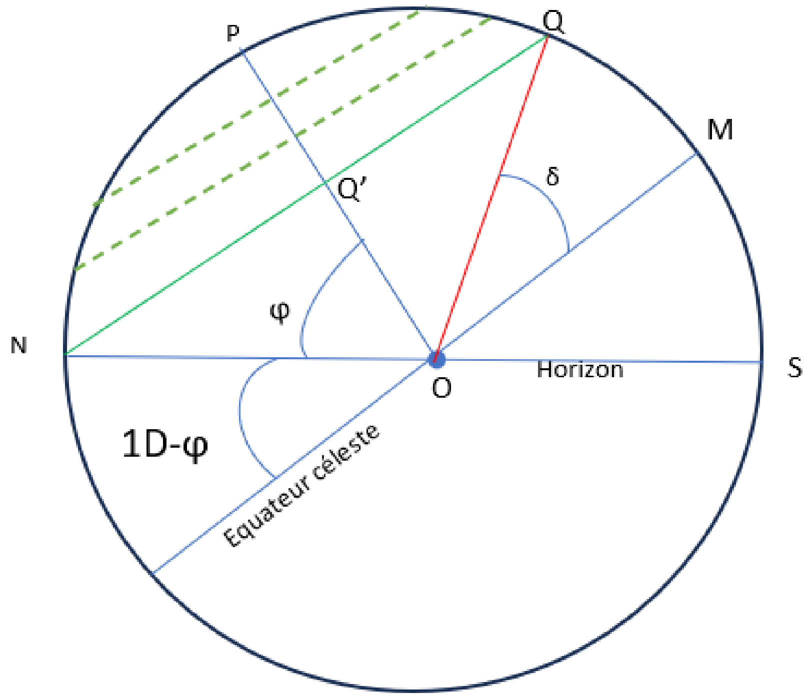
Voyons maintenant comment déterminer si une étoile est circumpolaire.
Considérons le croquis ci-contre, il représente l'apparence de la sphère céleste vue en coupe pour un lieu à une latitude φ donnée de l'hémisphère Nord.
Comme nous l'avons vu dans les planches précédentes, la hauteur de l'étoile polaire est tout simplement égale à φ. Cet angle sur le croquis correspond à l'arc intercepté PN. Le pôle Nord céleste (point p) ayant une déclinaison de 90°, le point N sur l'horizon aura une déclinaison de :

$$1D - \varphi = \delta_N$$

Remarque : en géométrie en utilise l'angle droit, que l'on note D, comme unité de mesure des angles, un angle plat vaut deux droits soit 2D.

Toutes les étoiles ayant une déclinaison entre celle du point Q et celle du pôle Nord seront toujours visibles. Les étoiles circumpolaires ont donc une déclinaison δ comprise entre 1D-φ et 1D ce qui s'écrit :

$$1D - \varphi \leq \delta \leq 1D$$



Exemple : la déclinaison de l'étoile Alkaïd de la Grande Ourse a pour valeur δ = 49,3°, la latitude de La Baule est de 47,3 ° , il vient :

90°- 47,3° = 42,7° < 49,3°

A La Baule, l'étoile Alkaïd est circumpolaire.

$$\frac{h_M + h_m}{2} = \varphi$$

Passage supérieur : $h_M = 49{,}3 + (90 - 47{,}3)$ = 92° soit 88° en direction du Nord.

Passage inférieur = (2*47- 88) = 6°

Lever et Coucher des étoiles

Puisqu'il y a 1D entre le pôle et l'équateur, l'arc intercepté PM vaut 1D. Si l'on considère le demi-cercle de 2D qui va de N à S en passant par P, nous pouvons écrire l'égalité suivante :

$$2\text{D} = \widehat{SM} + \widehat{MP} + \widehat{PN} \quad (1)$$

L'expression (1) se réécrit de la façon suivante :

$$2D = \widehat{SOM} + 1D + \varphi$$

$$1D - \varphi = \widehat{SOM}$$

$$\widehat{MOS} = -(1D - \varphi)$$

Toutes les étoiles ayant une déclinaison comprise entre celle du point S et celle du pôle Sud céleste seront toujours invisibles. Elles auront une déclinaison comprise entre :

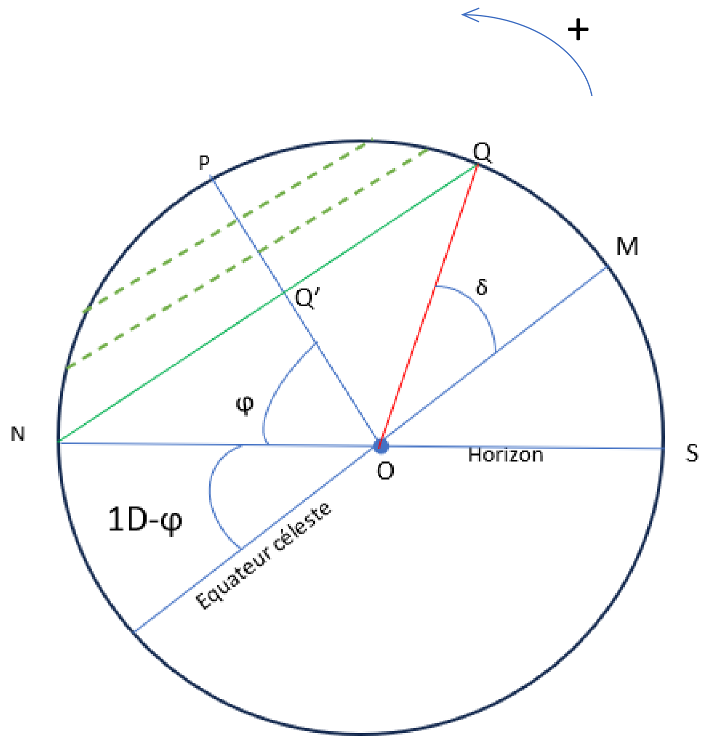
$$\delta \leq -(1D - \varphi) = \varphi - 1D$$

Pour La Baule, les étoiles dont la déclinaison $\delta \leq 47{,}3 - 90 = -42{,}7°$ sont invisibles.

Les étoiles dont la déclinaison est comprise entre :

$$-(1D - \varphi) \leq \delta \leq 1D - \varphi <=> \varphi - 1D \leq \delta \leq 1D - \varphi$$

ont un Lever et un Coucher



1er exemple

Voyons comment utiliser ces formules et cherchons à titre d’exemple à partir de quelle latitude l’étoile Alkaïd de la Grande Ourse se lève et se couche. On ne cherche pas ici la précision mais plutôt des ordres de grandeurs. Nous utiliserons la formule

$$1D - \varphi \geq \delta$$

ou encore :

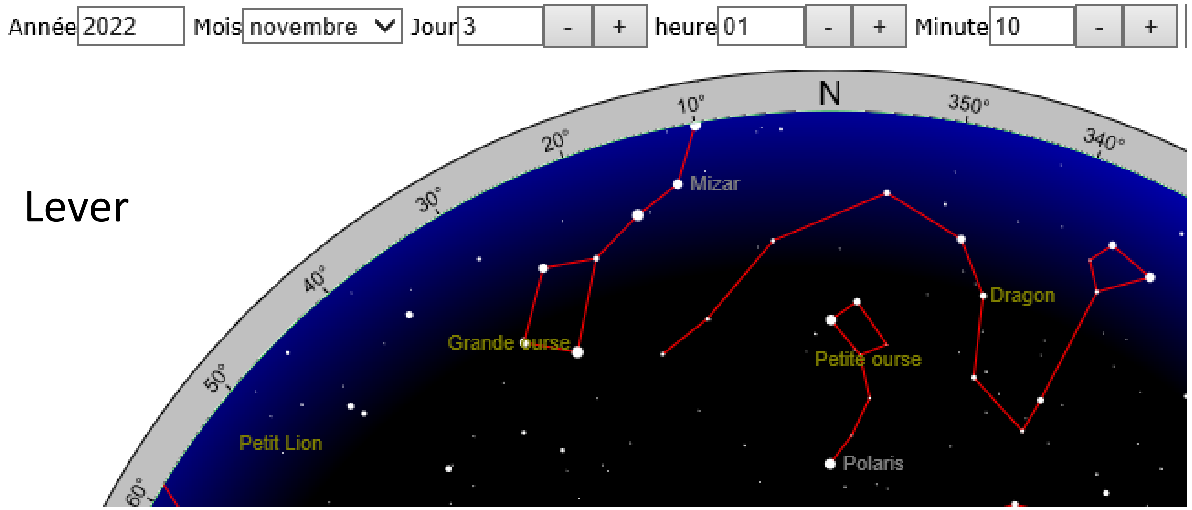
$$\varphi \leq 1D - \delta$$

La déclinaison d’Alkaïd a pour valeur δ = 49,3°, on en déduit que la latitude recherchée doit être inférieure à :

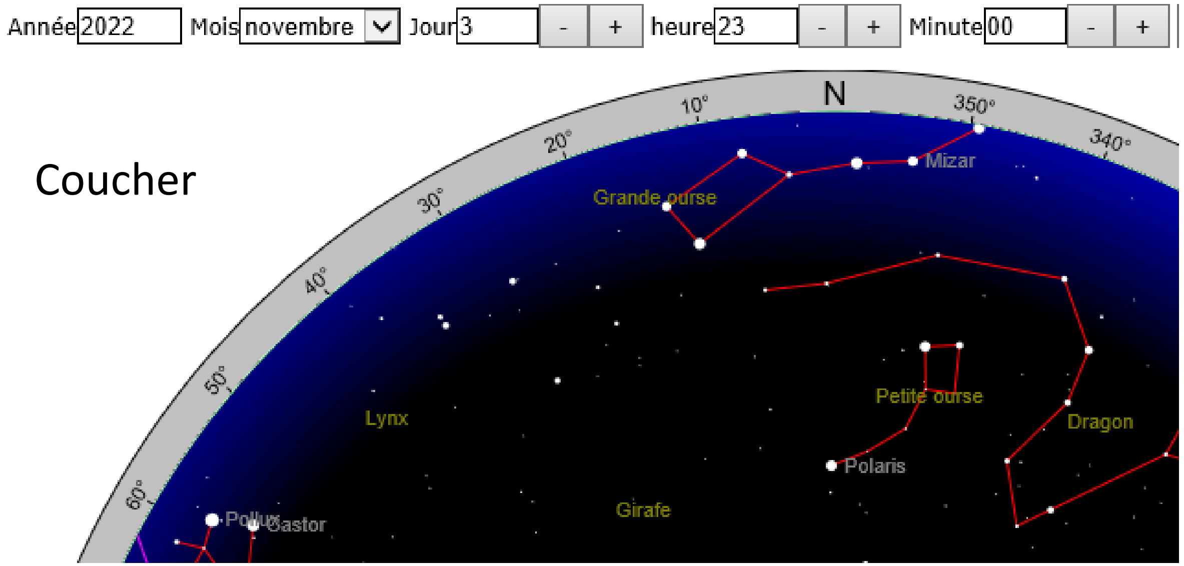
$$\varphi \leq 90 - 49{,}3 \Rightarrow \varphi \leq 40{,}7°$$

Sur les captures d’écran ci-contre, on constate que pour une latitude de 40°N, le 03/09/2022, Alkaïd se lève à 1h10mn (azimut de 10°) et se couche à 23h (azimut 350°), l’étoile est donc visible 23h environ.
On peut donc affirmer qu’en-deçà d’une latitude de 40°N, (Madrid) la Grande Ourse à un Lever et un Coucher.

Lever



Coucher



2ème exemple

Cherchons maintenant la latitude à partir de laquelle l'étoile Alkaïd devient invisible, nous utilisons la formule suivante :

$$\delta \geq -(1D - \varphi)$$

où

$$\delta + 1D \geq \varphi$$

soit,

$$49{,}3 + 90 = 139{,}3° \geq \varphi$$

Ici l'angle φ est supérieur à 90°, il suffit retirer 2D à la valeur numérique, pour trouver une latitude normalisée, ce qui nous donne :

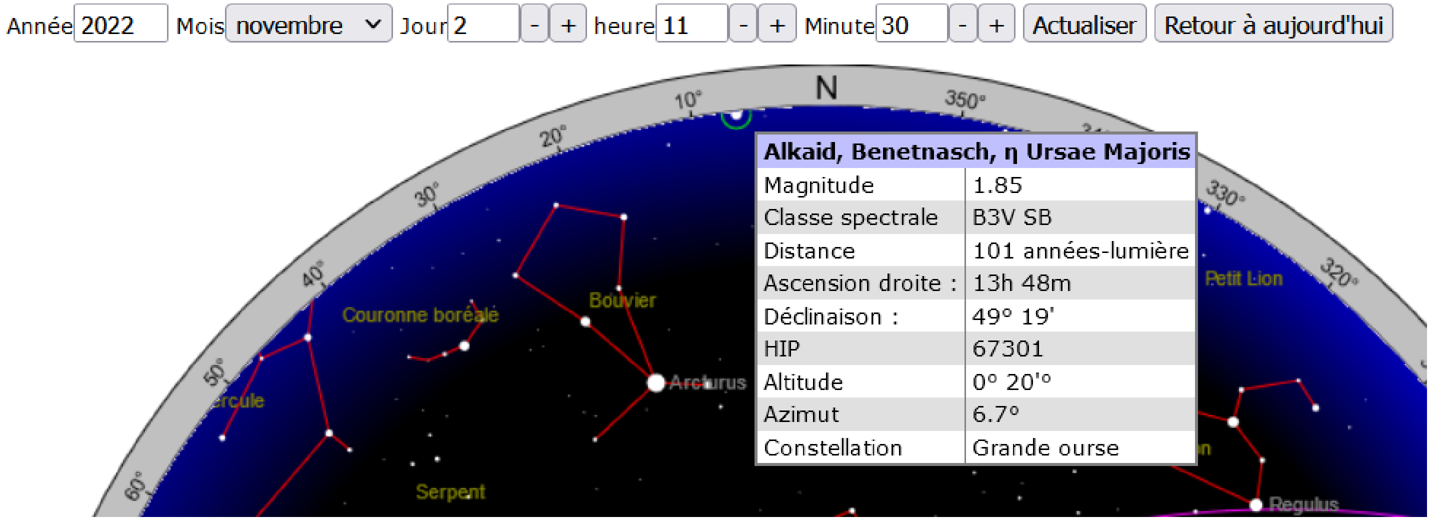
$$\delta \geq -(1D - \varphi') + 2D \Rightarrow \delta - 1D \geq \varphi'$$

soit,

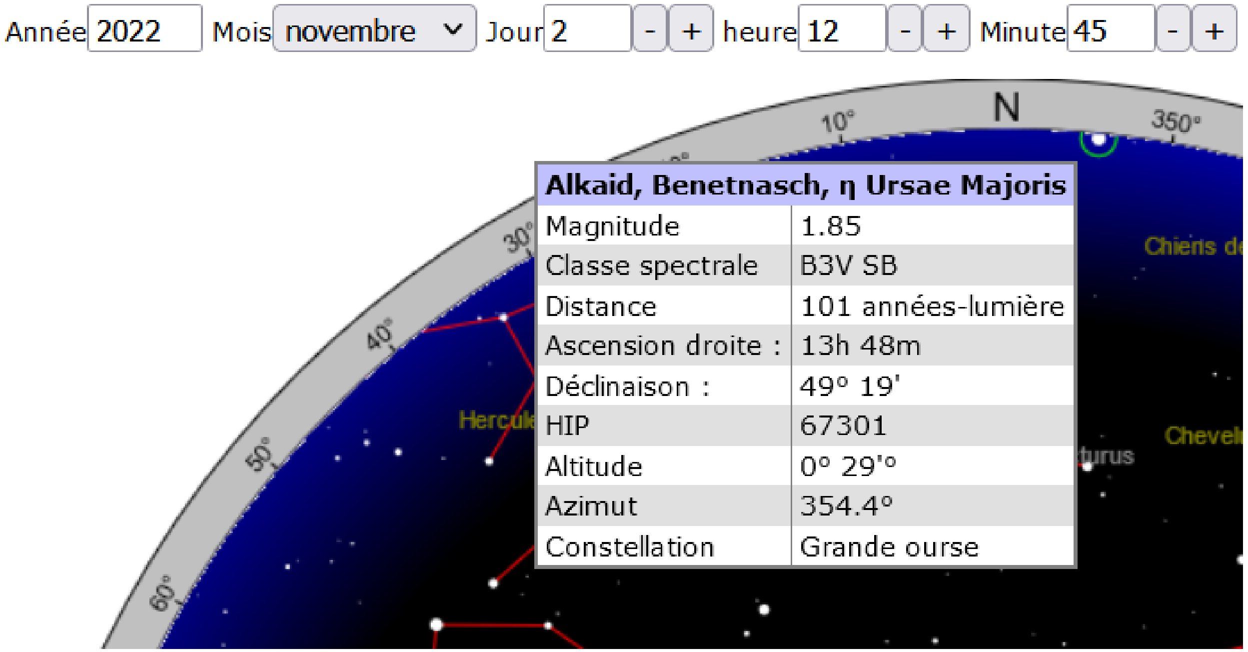
$$49{,}3 - 90 = -40{,}7°$$

On peut donc affirmer qu'en deçà d'une latitude de -40° ou 40°S
la constellation de le Grande Ourse est invisible (Wellington en Nouvelle-Zélande).

2ème exemple



Lever d'Alkaïd le 2/11/2022 latitude 40°S



Coucher d'Alkaïd le 2/11/2022 latitude 40°S


EN ROUTE POUR LES INDES !...
CHRISTOPHE ! CHRISTOPHE ! TON GPS !..