Se repérer sur la voûte céleste

D'après le site « Astronomie et mécanique céleste » de l'UFE de l'observatoire de Paris

Introduction

Comment se repérer dans le ciel ?

Lorsque nous regardons le ciel depuis la surface de la Terre, nous le voyons comme une voûte constellée de points brillants dont certains (les planètes) sont en mouvement par rapport aux autres (les étoiles), 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 naturellement, mais, à la réflexion, ça se complique...

Pour toute cette partie qui est, il faut l'avouer, un peu aride : il sera bien plus efficace, agréable, voire même amusant ! d'apprendre sur un logiciel d'astronomie. Je vous recommande d'installer le logiciel libre Stellarium (http://www.stellarium.org/fr/, en français) sur votre PC. C'est le logiciel utilisé dans la suite. L'interface est très intuitive, je ne la décris donc pas. A vous de jouer – au sens propre ! : faites disparaitre l'horizon ou l'atmosphère, accélérez le temps, partez aux pôles, voire sur Mars…



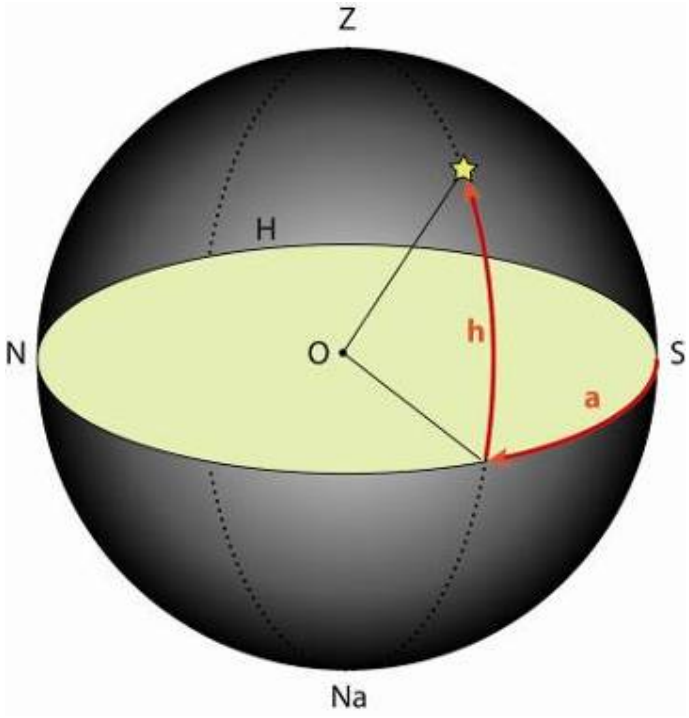
Crédit : *Astrophysique sur Mesure / Gilles Bessou*

Tout d'abord, nous constatons 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 facilement détectable pour les planètes). L'astronomie de position et la mécanique céleste vont nous aider à démêler tous ces mouvements qui se superposent.

La sphère locale

Nous percevons le ciel comme une sphère (dont l'horizon nous cacherait la moitié) : étoiles et planètes semblent être toutes 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.



*La sphère céleste locale définie par **l'horizon** du lieu (H), le **zénith** (Z) et le **nadir** (Na). L'observateur est en O. On mesure l'azimut (a) de l'astre à partir de la direction du Sud, et la hauteur (h) à partir de l'horizon.*

Dans la sphère céleste locale, on repère les astres en mesurant des angles selon deux directions. **L'azimut** est mesuré dans le plan de l'horizon, de 0 à 360 degrés à partir du Sud, positivement vers l'Ouest. Le point cardinal Ouest, par exemple, a un azimut de +90°. *Attention, les géomètres comptent l'azimut à partir du Nord, pas les astronomes !* **La hauteur** (ou altitude angulaire) est l'angle entre l'astre et l'horizon, mesuré dans un plan vertical, de 0° sur l'horizon jusqu'à +90° au **zénith** (le point à la verticale de l'observateur). Le point opposé au zénith est le **nadir**.

*Vérifiez que vous êtes au point, en géographie, sur les notions suivantes : **pôles, équateur, hémisphères, méridiens et parallèles, longitude et latitude**. Connaître l'existence du **méridien de Greenwich**, et **les fuseaux horaires**.*

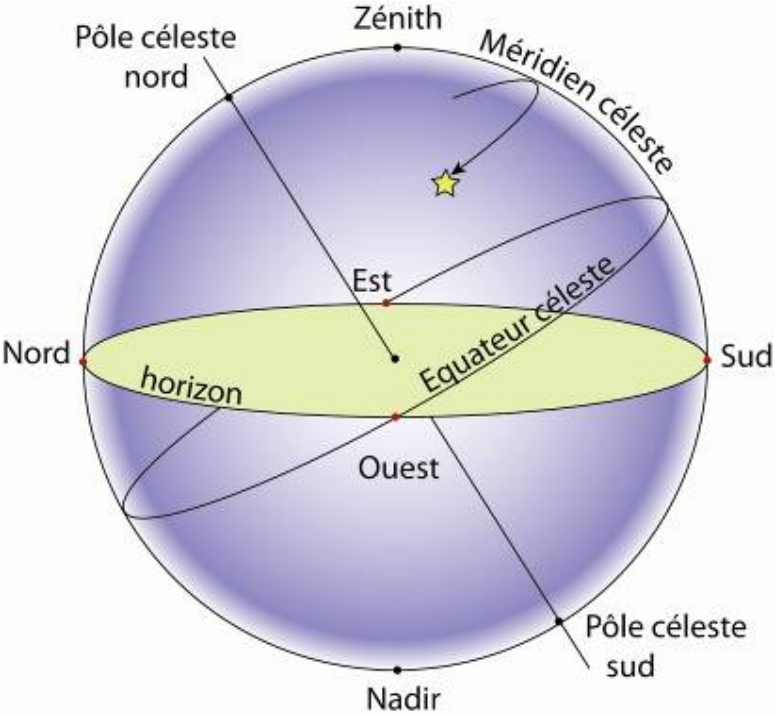
Ce repère est propre à l'observateur et varie d'un point à l'autre sur Terre. En outre, au-dessus d'un lieu donné, on ne voit pas toujours les mêmes étoiles... Comment s'y retrouver ? Il faut trouver des directions fixes communes à tous les observateurs pour construire un autre repère. On va procéder comme sur la surface de la Terre : on va tracer des méridiens et des parallèles, et choisir un méridien origine et un équateur (pour pouvoir mesurer des angles comparables à la longitude et à la latitude). Pour cela il y a plusieurs façons d'aborder le problème.

Le mouvement diurne et le repère équatorial

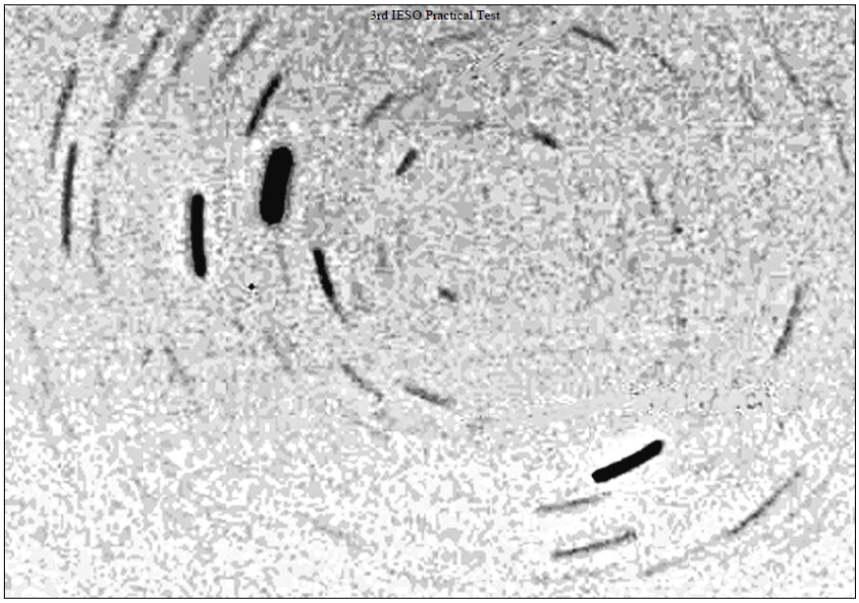
Commençons donc par trouver des **pôles** et un **équateur** dans le ciel. C'est assez simple : on remarque tout d'abord que l'ensemble du ciel semble tourner au cours de la nuit, tout comme le Soleil tourne dans le ciel au cours de la journée. Attention au sens de rotation du ciel, bien retenir que les étoiles se lèvent à l'horizon Est ! Pour un observateur de l'hémisphère nord, toutes les étoiles semblent tourner lentement sur des « petits cercles » autour d'un point proche d'une étoile de la constellation de la Petite Ourse (Ursa Minor). Cette étoile, nommée **étoile polaire,** ou Polaris, marque donc approximativement l'emplacement du **pôle céleste nord**. C'est le **mouvement diurne** de la Terre (diurne signifiant ici « sur la durée d'un jour », et non « en journée »).

Ainsi, l'axe de rotation de la Terre se prolonge et « perce » la voûte céleste aux **pôles célestes nord et sud**, de même que l'équateur terrestre se projette sur la sphère céleste et dessine un **équateur céleste** aisé à trouver. Une fois l'équateur et les pôles définis, on peut

aussi tracer des méridiens, comme sur la Terre. Le **méridien** ou cercle horaire d'un astre est un « grand cercle » qui passe par les pôles célestes et par cet astre. Le **méridien céleste**, ou méridien du lieu, est le grand cercle qui passe par les pôles célestes ainsi que par les points cardinaux nord et sud. En abaissant le pôle céleste nord (identifié avec l'étoile polaire) sur l'horizon, on trouve donc la direction du Nord.

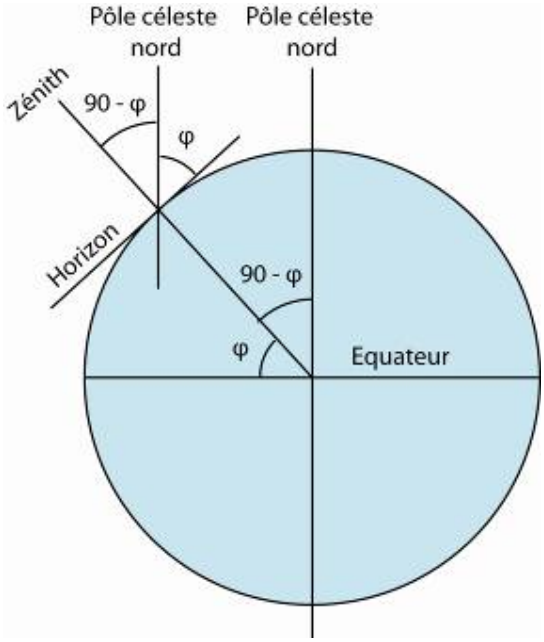


1. ***Exercice d'application : test pratique 2009***. *Sur la photographie de la région de l'étoile polaire ci-dessous, prise avec un long temps de pose le 10 mars 1980, déterminer la position du pôle nord céleste, au moyen d'un compas et d'une règle. L'étoile polaire correspond à la trace la plus intense. (souvenez vous de la façon de tracer la médiatrice d'un segment, ici la corde d'un arc de cercle)*

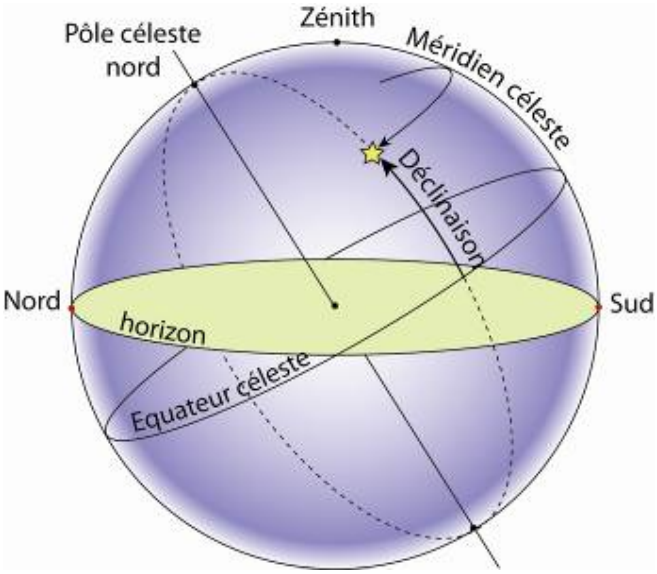


Il faut donner ici quelques compléments sur le mouvement diurne. C'est le résultat de la rotation de la Terre autour de son axe. Cette rotation, repérée par rapport à une direction fixe (deux passages successifs d'une même étoile au méridien céleste, par exemple), va durer **23h 56mn 4s** pour un tour complet (360°). C'est le **jour sidéral.** Si on se repère par rapport à la direction du Soleil, il faudra un peu plus longtemps, **24h** en moyenne, soit un **jour solaire**, pour revenir dans la même direction par rapport au Soleil. En effet, durant sa rotation sur elle même, la Terre, animée d'un mouvement de révolution autour du Soleil, s'est déplacée sur son orbite (voir la fiche « Jour et nuit » pour de plus amples explications). Les étoiles, en revanche, sont si lointaines que ce déplacement ne change rien.

Au cours de son mouvement diurne apparent dans le ciel, un astre va s'élever au dessus de l'horizon, puis redescendre vers lui. C'est lorsqu'il franchit le méridien céleste que sa hauteur est maximale : on dit qu'il **culmine** (les étoiles circumpolaires franchissent deux fois le méridien, voir plus loin). Bien entendu, en un lieu donné, la hauteur des pôles célestes ne change pas au cours du temps. Notez au passage – c'est important ! - que **la hauteur du pôle céleste est égale à la latitude φ du lieu** (regardez le schéma ci-dessous représentant la situation d'un observateur à la latitude de Paris pour vous en convaincre !).

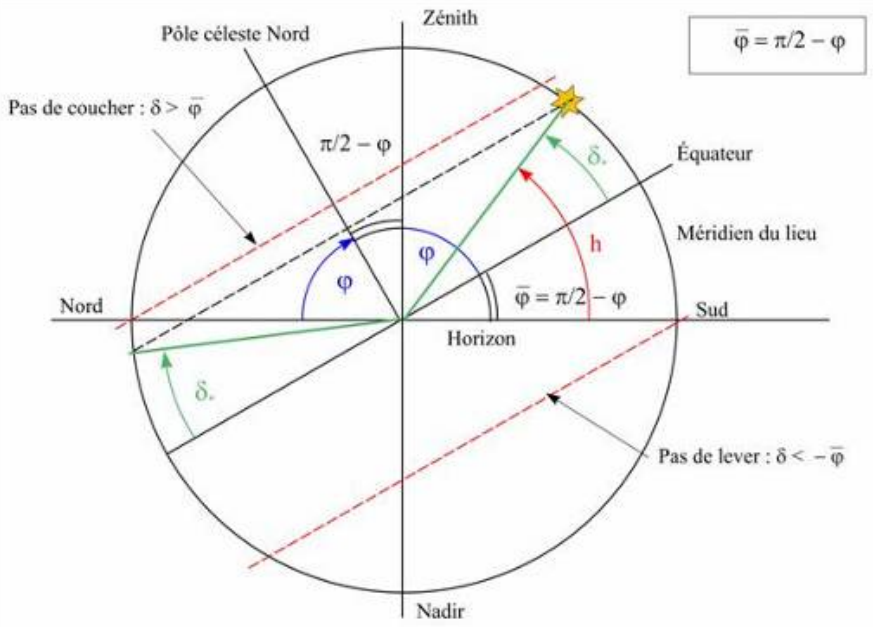


Les coordonnées équatoriales : la déclinaison



A présent que nous disposons d'un pôle et d'un équateur céleste, nous pouvons mesurer des angles sur la sphère céleste équivalant aux latitudes sur la Terre. On nomme un tel angle une **déclinaison** (ci-contre). Noté δ, on le mesure le long d'un méridien, à partir de l'équateur céleste (où $\delta = 0$). La déclinaison du pôle céleste Nord est donc de +90°, celle du pôle céleste Sud de -90°, tandis que celle du zénith du lieu est égale à la latitude φ du lieu.

Le pôle céleste et l'équateur céleste nous fournissent donc des directions fixes pour toutes les sphères célestes liées aux observateurs individuels. Dans ce système de repérage, chaque étoile a sa propre déclinaison, qui ne varie apparemment pas au cours de la nuit, et varie très peu au cours de l'année. Si l'on prend la hauteur h d'une étoile au moment où elle franchit le méridien céleste, on trouve l'égalité $\boldsymbol{\delta = h + \varphi - 90}$ (avec δ la déclinaison, φ la latitude et h la hauteur au passage du méridien céleste, en degrés), **à savoir !** (mais on peut aussi la retrouver facilement, en se plaçant sur le méridien céleste : voir le schéma ci-dessous). Il est à présent plus facile de comprendre pourquoi, à certaines latitudes, certaines étoiles sont toujours visibles, et d'autres ne le sont jamais. Pour une déclinaison $\delta < \varphi - 90$, la hauteur h est toujours négative, donc l'étoile ne se lève jamais. En revanche, pour une déclinaison $\delta > 90 - \varphi$, la hauteur h est toujours positive, et donc l'étoile ne se couche jamais : elle est dite **circumpolaire** !



*Réglez **Stellarium** sur votre localité. Accélérez le temps pour voir les petits cercles décrits par les étoiles autour du pole céleste. Repérez bien le sens de rotation.*

Faites apparaître la grille équatoriale pour voir les méridiens et les pôles célestes, la grille azimutale, pour voir le zénith. Dans les réglages, faites apparaître le méridien céleste, et l'équateur céleste.

Constatez qu'une partie du ciel austral n'est pas visible à la latitude de la France ; en utilisant la fenêtre de positionnement, partez par exemple à Yogyakarta (IESO 2010), sur l'équateur, pour découvrir l'ensemble du ciel. Vérifiez que les deux pôles célestes sont au niveau de l'horizon : leur hauteur et donc nulle, comme la latitude ! Vous pouvez aussi vous rendre au pôle nord, pour vérifier que seul un hémisphère céleste est désormais visible. Quel est alors le mouvement apparent des étoiles ?

2. ***Exercice d'application (facile !) : test écrit 2007.*** *On donne la déclinaison de l'étoile Canopus de la constellation de la Carène : δ = -52,7° (valeur au premier janvier de l'an 2000). Quelle est la latitude de l'observateur si il/elle voit Canopus à une hauteur maximale h de 3° au dessus de l'horizon (culmination) lors de son passage du méridien céleste ? Montrez vos calculs. (réponse à la fin du document)*

3. ***Exercice d'application (difficile !) : test écrit 2008.*** *Un conducteur à Manille est ébloui par le reflet du Soleil dans le pare-brise de la voiture devant lui, qui fait un angle de 52° 18' avec le sol : déterminer la hauteur du Soleil ; puis, connaissant la latitude de Manille (14° 36' N), déterminer la déclinaison du Soleil à cette date ; enfin, estimer la date. (réponse à la fin du document, la dernière partie de la question fait intervenir des notions vues plus loin)*

Les coordonnées équatoriales : l'ascension droite

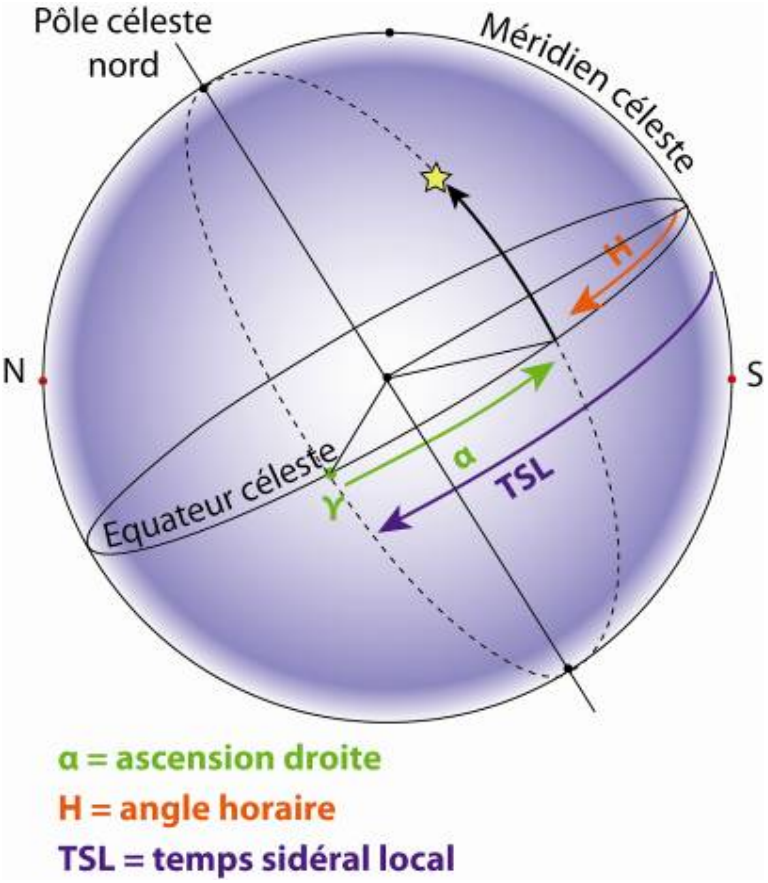
A présent que nous avons l'équivalent de la latitude, il nous faut définir l'équivalent de la longitude sur la sphère céleste, c'est-à-dire dire un angle entre un méridien origine et le méridien passant par l'astre considéré, angle mesuré le long de l'équateur céleste. Mais comment définir un méridien origine ?

Une idée évidente est de prendre comme origine le méridien céleste, orienté nord-sud, du lieu de l'observateur. La longitude d'un astre mesurée vers l'Ouest à partir du méridien céleste est nommée **angle horaire (noté H)**. On l'exprime en heures, un tour complet faisant 24 « heures » angulaires. Attention, ceci correspond à un jour sidéral de 23h 56mn 4s : le temps mis pour décrire un angle horaire d'une heure vaut donc moins d'une heure en temps universel.

Le seul problème de ce repère… est que la sphère céleste tourne par rapport au méridien céleste du lieu ! L'angle horaire d'un astre fixe comme une étoile varie tout au long de la nuit, à mesure que le ciel tourne et que l'étoile s'approche ou s'éloigne du méridien céleste ! Il nous faut donc trouver un méridien origine qui tourne avec la sphère céleste.

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. 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).

En un an, le Soleil décrit sur la sphère céleste un grand cercle nommé **écliptique** : c'est un mouvement apparent dû à la révolution annuelle de la Terre autour du Soleil (voir la fiche « Soleil, écliptique, année »). L'écliptique coupe l'équateur céleste en deux points, dont l'un, nommé **point vernal (noté γ)**, est occupé par le Soleil le 21 mars, jour de l'équinoxe de Printemps. C'est le méridien passant par le point vernal qui a été désigné comme méridien origine de la sphère céleste pour le repère équatorial. Les longitudes d'un astre dans ce système sont nommées **ascensions droites (notées α)**. Elles sont comptées positivement vers l'Est de 0 à 24 heures (là aussi, ces heures sont des angles !).



Le temps sidéral local

Nous avons donc défini un système qui permet de repérer un astre dans le ciel par ses coordonnées équatoriales (**ascension droite** et **déclinaison**), mais un problème subsiste : pour un observateur en un lieu donné, ce repère n'est pas fixe par rapport à lui.

Pour trouver, en un lieu donné, une étoile dont on connaît l'ascension droite et la déclinaison, il nous faut connaître à chaque instant la position de l'origine des ascensions droites, c'est-à-dire du point vernal. L'angle horaire du point vernal (l'angle séparant le point vernal du méridien céleste) est une quantité calculable pour un lieu donné : il est nommé **temps sidéral local (TSL)**. Ainsi pour un lieu donné :

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

Soit H = TSL - α

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

Attention, le temps sidéral n'est pas un temps mais un angle variant avec le temps (la confusion nait du fait qu'il s'exprime en heures, minutes, secondes) : il va augmenter de 24h quand la Terre aura fait une révolution autour de son axe, donc en 23h 56m 4s. Le temps sidéral à 1h temps universel (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 UTC écoulé, le temps sidéral augmentera de n (24h / 23h 56m 4s) ; de même, n heures de temps sidéral durent n (23h 56m 4s / 24h) heures de temps UTC. Ces formules peuvent s'écrire également :

angle de temps sidéral = durée de temps UTC x 1,0027390

durée de temps UTC = angle de temps sidéral x 0,9972685

Sur **Stellarium**, cliquez sur une étoile : on vous donne son ascension droite et sa déclinaison (prendre celles du jour). Vérifiez la valeur de la déclinaison en faisant passer l'étoile au méridien céleste, après avoir affiché l'équateur céleste. Pour vérifier la valeur de l'ascension droite, il vous faut afficher l'écliptique (voir plus loin) et repérer ses intersections avec l'équateur céleste : l'une des deux est le point vernal (le repérer avec le méridien « 0 h »). Ou tout simplement utiliser les graduations des méridiens en « heures ».

Supposons à présent que vous connaissiez l'ascension droite d'une étoile, et que vous cherchiez son angle horaire pour la repérer dans le ciel. Vous allez utiliser la formule $H = TSL - \alpha$, mais il vous faut connaitre le temps sidéral du lieu. Or les tables ne donnent que les valeurs du temps sidéral à Greenwich à 0 h chaque jour. On passe au temps sidéral local à 0h par : **TSL = TS Greenwich - longitude L du lieu** (la longitude étant comptée positivement vers l'ouest)

Par ailleurs le temps sidéral à une heure donnée N se déduit du temps sidéral à 0 h par la formule suivante : **TSL (N) = TSL (0h) + 1,0027390 N**. Connaissant TSL, on en déduit l'angle horaire recherché.

4. ***Exercice d'application (difficile !) : test écrit 2009.*** *Les coordonnées équatoriales de Véga sont : ascension droite α = 18h 36m 56,2s et déclinaison δ = +38° 47' 1". Etant donné que le Soleil franchit le méridien céleste à midi, heure solaire (12:00:00), indiquez à quelle date Véga franchira le méridien céleste à minuit (00:00:00). Les dates des équinoxes de printemps et d'automne en 2009 sont le 20 mars et le 23 septembre, respectivement. Montrez vos calculs. (réponse à la fin du document)*

Si vous avez eu recours à la réponse proposée, pour vérifier que vous avez bien compris, faites également l'exercice suivant sans tricher !

5. ***Exercice d'application (difficile !) : test écrit 2007.*** *On donne l'ascension droite de l'étoile Canopus de la constellation de la Carène : α = 06h 24m. Sachant que l'équinoxe de printemps a lieu le 21 mars en 2007 et que le Soleil franchit le méridien à 12:00:00 heure solaire, à quelle date Canopus franchit-elle le méridien céleste (culmination) à 21:00:00 heure solaire ? Montrez vos calculs. (réponse à la fin du document)*

On vient de voir que, dans le repère équatorial, les coordonnées des étoiles ne changent pas au cours de la nuit (et changent lentement au rythme de la précession des équinoxes). Les télescopes à monture équatoriale permettent de garder une étoile dans le champ sans déplacer sans cesse l'instrument ! L'axe du télescope pointe vers le pôle céleste, et un entrainement fait tourner lentement la partie optique autour de cet axe, pour suivre le mouvement diurne. Vous pouvez simuler la monture équatoriale dans **Stellarium** : accélérez le temps pour apprécier la différence !

Pour se repérer dans le ciel : les constellations

On a regroupé depuis très longtemps les étoiles visibles sur la voûte céleste en **constellations**. Initialement, on se contentait de regrouper les étoiles les plus brillantes par des segments tirés entre elles. On définit aujourd'hui 88 constellations ; elles sont désormais associées à des frontières qui découpent l'ensemble du ciel : chaque objet céleste tombe donc dans les limites d'une constellation. Les constellations sont désignées par l'abréviation à trois lettres de leur nom latin (Grande Ourse = Ursa Major = UMa)

Certaines étoiles, les plus brillantes, ont un nom, souvent arabe ou grec, qui a été conservé. Mais on nomme aussi les étoiles d'une constellation selon les lettres de l'alphabet grec, souvent - mais pas toujours - par ordre de magnitude apparente (**désignation de Bayer**). Par exemple, l'étoile la plus brillante de la grande Ourse, Dubhe, est notée α UMa.



La Grande Ourse permet de trouver l'étoile polaire (constellation de la Petite Ourse) proche du pôle céleste Nord : on y arrive en prolongeant 5 fois vers le haut l'avant de la « casserole ». Evidemment, les constellations ne sont pas toutes à savoir ! Apprenez en juste quelques unes pour vous orienter. Les étoiles Deneb du Cygne, Vega de la Lyre et Altaïr de l'Aigle sont les plus brillantes de leurs constellations respectives et forment une figure facilement reconnaissable dans le ciel d'été, le grand triangle d'été (qui n'est pas une constellation). Toujours dans l'hémisphère céleste nord, on a le « W » de Cassiopée, le carré de Pégase, le quadrilatère d'Orion avec son « baudrier » formé de trois étoiles alignées, à cheval sur l'équateur… Dans l'hémisphère céleste Sud (qui est visible en totalité pour pas mal de monde aux IESO : tous ceux qui habitent l'hémisphère sud !), notez la Croix du Sud. Enfin, certaines constellations sont sur l'écliptique (voir la fiche « Soleil, écliptique, année ») : ce sont les **constellations du zodiaque**, vous les connaissez ! (attention, ces constellations sont au nombre de 13, contre 12 « signes du zodiaque » seulement : le Serpentaire n'y figure pas).

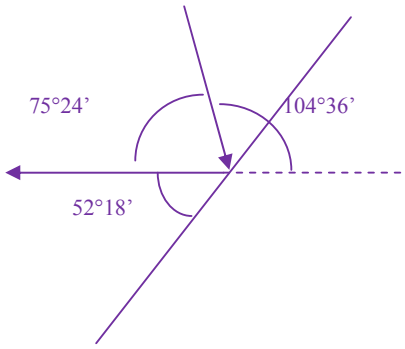
Il est très important de comprendre que les constellations ne sont que des conventions : elles regroupent des étoiles qui semblent proches sur la voute céleste mais peuvent être très éloignées les unes des autres.

Sur **Stellarium**, affichez les lignes des constellations, et leur nom. Affichez les frontières des constellations afin de savoir dans quelle constellation se trouve une étoile donnée. Comparez les distances des étoiles d'une même constellation.

Réponses

2. Réponse : *on applique la formule $\delta = h + \varphi - 90$, et l'on trouve $\varphi = \delta - h + 90 = 34,3°$*

3. Réponse : *on sait qu'un rayon lumineux réfléchi fait avec la surface de réflexion le même angle que le rayon incident. Un peu de trigonométrie nous donne pour le Soleil une hauteur de 75°24' ; avec la relation $\delta = h + \varphi - 90$, on trouve $\delta = 0°$! Le Soleil est sur l'équateur céleste, donc nous sommes à l'équinoxe (voir la fiche « Soleil, écliptique, année »). On est soit à l'équinoxe de printemps, en mars, soit à l'équinoxe d'automne, en septembre.*



4. Réponse : *On n'a besoin que de l'ascension droite de Véga pour répondre. Par définition, quand un astre franchit le méridien céleste, son angle horaire H est nul et son ascension droite α, selon la formule $H = TSL - \alpha$ indiquée plus haut, est égale au temps sidéral local TSL. La question devient donc de* ***savoir à quelle date le TSL sera égal à 18h 36m 56,2s (ou 18,615611 h) à minuit (heure solaire)****.*

Le 20 mars 2009, jour de l'équinoxe de printemps, le Soleil est au point vernal et franchit le méridien céleste à 12h. Le TSL (angle horaire du point vernal) est alors égal à zéro. Le ciel fait un tour complet (angle horaire de 24h) en 23 heures 56 minutes 4 secondes (soit 23 + 56/60 + 4/3600 = 23,934444 heures solaires) donc :

- *en une heure solaire, le ciel tourne de 24/23,934444 =* ***1,002739 h (valeur qu'il vaut mieux retenir !)*** *et le TSL avance d'autant.*
- *en 12 heures solaires, le TSL a avancé de 12 (24/23,934444) = 12,032868 h*
- *en 24 heures solaires (un jour solaire), le ciel tourne de 24 (24/23,934444) = 24,065735 h. Donc chaque jour le TSL avance de 0,065735 h.*

Commençons déjà par avancer de 12 heures solaires pour arriver à minuit (00 heure) le 21 mars. Le problème devient alors : trouver le nombre n de jours tel que :

$$n\,(0,065735) + 12,032868 = 18,615611$$

Il vient :

$$n\,(0,065735) = 6,582743$$

On trouve n = 100, c'est donc 100 jours plus tard, soit au début du 29 juin 2009, que Véga franchit le méridien à minuit !

Vérifiez avec Stellarium que Véga franchit bien le méridien à cette date à minuit, en utilisant la fenêtre date et heure ! (attention, Stellarium utilise votre heure système, qui est en avance de 1 h sur l'heure UTC en hiver, de 2 heures en été)

5. Réponse : *A midi le 21 mars 2007, le point vernal est au méridien, son angle horaire est nul, donc le temps sidéral local (TSL) est nul. Lorsque Canopus franchit le méridien, son angle horaire est nul, donc le TSL est égal à son ascension droite. Le problème revient donc à*

calculer la date en 2007 à laquelle le TSL est égal à 6h 24m (soit 6 + 24/60 = 6,4 h) à 21 heures (heure solaire).

A 21 heures (heure solaire) le 21 mars, 9 heures après la culmination du point vernal à midi, le TSL a avancé de : 9 (1,002739) = 9,024651 h ; la date recherchée (où TSL = 6,4 h à 21 heures) est donc antérieure au 21 mars, et il faut calculer le nombre de jours tel que le TSL avance de 9,024651 - 6,4 = 2,624651 h. Comme chaque jour le TSL avance de 24 x 1,002739 – 24 = 0,065735, le problème s'écrit : n (0,065735) = 2,624651 et on trouve n = 40 jours ! La date recherchée est le 9 février 2007.

Vérifiez avec Stellarium cette culmination de Canopus à 21 heures (heure solaire) le 9 février 2007, en vous plaçant à une latitude suffisante pour que l'étoile passe au dessus de l'horizon (34° nord maximum). Ne pas oublier d'ajouter une heure en heure d'hiver.