



**cité**

**sciences  
et industrie**

# Les constellations



Département Éducation et Formation  
[educ-formation@universcience.fr](mailto:educ-formation@universcience.fr)

2023

# Sommaire

## Les constellations

1	Introduction	3
2	Aspect historique	4
3	Les constellations au XXI <sup>e</sup> siècle	6
4	Les constellations du zodiaque	7
5	Voit-on les mêmes constellations au fil des saisons ?	8
6	Les constellations, rien que des apparences	10
Annexe 1	Ascension droite et déclinaison : les systèmes de coordonnées	18
Annexe 2	Angles et diamètres apparents en astronomie	22

En couverture, *La nuit étoilée* de Vincent Van Gogh (1889), tableau conservé au Museum of Modern Art (MoMA) de New-York.

# 1 Introduction

*Savoir* ses constellations comme on *sait* ses tables de multiplication. Connaître leur nombre, leur nom, leur histoire, leur localisation, leurs frontières, les étoiles et les objets remarquables qu'elles contiennent... En dehors du petit cercle des astronomes amateurs et des médiateurs exerçant dans les planétariums, qui peut prétendre aujourd'hui posséder une connaissance approfondie des constellations ?

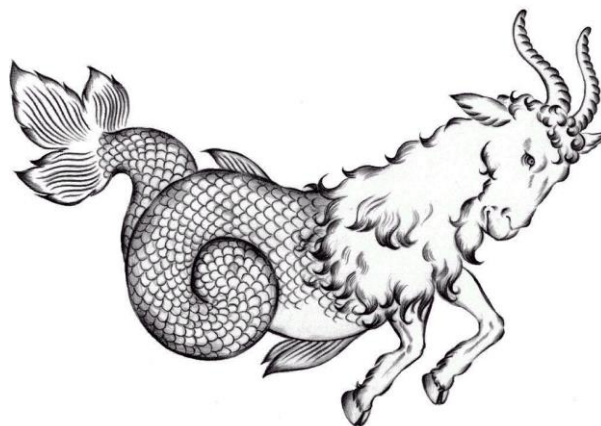
De nos jours, un astronome peut parfaitement mener une brillante carrière académique et fournir des apports conséquents à sa discipline tout en étant incapable de désigner la Grande Ourse. Il peut dédier sa vie à l'étude des étoiles, en être un spécialiste mondialement reconnu mais, sans repère et désorienté, être totalement désarmé face à la majesté d'un ciel nocturne.

Fait toujours surprenant pour le profane, mais loin d'être rare.

Toutefois, ce n'est pas grave puisqu'il faut bien l'avouer : en astronomie, les constellations ne servent quasiment... à rien. Issues de conventions purement humaines, elles ne traduisent que des apparences. Elles sont les vestiges d'un passé et de cultures souvent millénaires, vagues souvenirs d'école tombés dans les oubliettes de notre mémoire.

Et c'est précisément ici que réside leur intérêt : les constellations nous racontent des histoires. Notre Histoire. Elles orientent au sens littéral du terme, en nous aidant à déterminer notre position par rapport aux points cardinaux. Elles orientent au sens figuré, elles cadrent, elles forment la trame indéfectible sur laquelle s'est bâtie un pan essentiel de notre culture. Savoir que l'on contemple sensiblement le même ciel que les Babyloniens, les anciens Grecs, les Arabes médiévaux et les astronomes du siècle des Lumières nous lie à une tradition poétique, astronomique et philosophique très profonde.

Sortir sous un ciel étoilé et reconnaître les constellations, c'est retrouver de vieux amis. Elles apportent la conviction intime que nous pouvons aller plus loin et bâtir de nouvelles connaissances sur un terrain solide. C'est aussi sentir filtrer à travers soi la façon dont les anciens appréhendaient le cosmos. Les enseigner, c'est perpétuer la tradition millénaire de la transmission du savoir.



## 2 Aspect historique

L'usage commun fait des constellations des groupes d'étoiles voisines sur la sphère céleste, formant des figures conventionnelles et auxquels on a donné des noms d'animaux, de héros, de créatures mythologiques ou d'objets inanimés. Il s'agit de regroupements arbitraires qui, sous nos latitudes boréales, ont été imaginés dans leur grande majorité par les anciennes civilisations babylonienne et grecque.

Environ la moitié des quatre-vingt-huit constellations officialisées par l'Union astronomique internationale en 1930 sont issues de la tradition grecque. Toutefois, les origines de celles-ci étaient babyloniennes. Ainsi, une vingtaine de constellations du Proche-Orient ancien furent directement adoptées par les Grecs. Une dizaine d'autres constellations se firent attribuer des noms différents de leur appellation d'origine. Aratos de Soles, un poète du III<sup>e</sup> siècle avant notre ère, fixa ces noms dans un poème obscur de 1 154 vers, les *Phénomènes*. D'après l'unique ouvrage qui nous soit parvenu de l'astronome Hipparque de Nicée (v. 190-v. 120 av. J.-C.), *Commentaire sur les Phénomènes d'Eudoxe et d'Aratos*, les *Phénomènes* seraient une versification d'un texte rédigé un siècle plus tôt par Eudoxe de Cnide, le savant qui aurait introduit le corpus babylonien dans le monde hellénistique. Quatre siècles après Aratos, Ptolémée (v. 100-v. 168) dressa un remarquable catalogue de 1022 étoiles (identité de l'étoile, coordonnées écliptiques et éclat apparent) dans son *Almageste* et inclut la plupart d'entre elles dans les constellations d'Aratos, dont voici la liste modernisée :

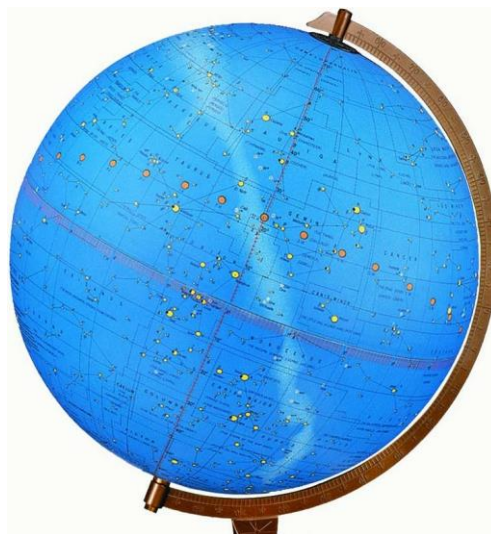
- au-dessus du zodiaque : la Petite Ourse, la Grande Ourse, le Dragon, Céphée, le Bouvier, la Couronne boréale, Hercule, la Lyre, le Cygne, Cassiopée, Persée, le Cocher, Ophiucus (aussi appelé le *Serpentaire*), le Serpent (désormais séparé en deux parties par Ophiucus : la Tête et la Queue), la Flèche, l'Aigle, le Dauphin, le Petit Cheval, Pégase, Andromède et le Triangle pour un total de 360 étoiles ;
- dans le zodiaque (voir chapitre 4) : le Bélier, le Taureau, les Gémeaux, le Cancer, le Lion, la Vierge, la Balance, le Scorpion, le Sagittaire, le Capricorne, le Verseau et les Poissons pour un total de 346 étoiles ;
- sous le zodiaque : la Baleine, Orion, l'Éridan, le Lièvre, le Grand Chien, le Petit Chien, le Navire Argo (séparé en trois par Nicolas Louis de Lacaille vers 1750 pour former les Voiles, la Poupe et la Carène), l'Hydre, la Coupe, le Corbeau, le Centaure, le Loup, l'Autel, la Couronne australe et le Poisson austral pour un total de 316 étoiles.





Si de nos jours, une constellation n'est plus qu'une zone de la sphère céleste dont les frontières sont parfaitement délimitées, de sorte qu'une étoile ne peut qu'appartenir à une constellation, du temps de Ptolémée, c'était la projection d'une représentation mythologique regroupant quelques étoiles mais en laissant d'autres orphelines de toute constellation. Il est intéressant de remarquer que peu d'étoiles s'étaient vu attribuer un nom. Seules les plus brillantes comme Arcturus, Capella, Régulus, Spica, Antarès, Sirius, Procyon et Canopus avaient mérité un tel honneur. La désignation de beaucoup d'entre elles sera effectuée plus tard par les Arabes.

Lorsque les Européens explorèrent les mers de l'hémisphère sud, ils découvrirent des étoiles non encore répertoriées. Les navigateurs hollandais Pieter Dirkszoon Keyser et Frederick de Houtman rapportèrent leurs observations à l'astronome allemand Johann Bayer (1572-1625) qui publia en 1603 le premier atlas complet couvrant l'intégralité de la sphère céleste. De nouvelles constellations aux noms passablement exotiques figuraient dans son *Uranometria*, dans l'ordre alphabétique : le Caméléon, la Colombe, la Dorade, la Grue, l'Hydre mâle, l'Indien, la Mouche (alors dénommée *l'Abeille*), l'Oiseau de paradis, le Paon, le Phénix, le Poisson volant, le Toucan et le Triangle austral. La Chevelure de Bérénice fut portée au ciel par l'astronome danois Tycho Brahe (1546-1601) et c'est avec L'Écu de Sobieski la seule constellation ayant trait à un personnage historique, la reine Bérénice II d'Égypte, femme du roi Ptolémée III Évergète. Toujours au XVII<sup>e</sup> siècle, le mathématicien allemand Jakob Bartsch, gendre de Kepler, promut la Licorne, la Girafe et la Croix du sud probablement inventées par le théologien, cartographe et astronome néerlandais Petrus Plancius. En 1690 parut à titre posthume le *Firmamentum Sobiescianum sive Uranographia* du grand astronome Johannes Hevelius (1611-1687), pour lequel ce dernier créa les Chiens de chasse, l'Écu de Sobieski, le Léopard, le Lynx, le Petit Lion, le Petit Renard et le Sextant. Enfin, l'abbé Louis-Nicolas de Lacaille (1713-1762) compléta le tableau en 1763 avec son *Coelum australe stelliferum*. Il imagina quatorze constellations dont les noms étaient en parfaite adéquation avec son époque, le siècle des Lumières : la Machine pneumatique, le Burin, le Compas, le Fourneau, l'Horloge, la Table (hommage rendu à la montagne de la Table qui surplombe la ville du Cap en Afrique du Sud, où Lacaille réalisa ses observations), le Microscope, la Règle, l'Octant, le Peintre, la Boussole, le Réticule, le Sculpteur et le Télescope.



Chaque civilisation a créé ses propres représentations du ciel, y projetant sa mythologie, ses centres d'intérêt, ses peurs, ses figures admirables et ses fantômes. Ainsi, le ciel traditionnel des Chinois, très hiérarchisé à l'image de son ancien Empire, est-il bien différent du nôtre avec ses deux-cent-quatre-vingt-trois regroupements plus ou moins remarquables d'étoiles appelés *astérismes*, dont certains ne se réduisent qu'à une seule étoile. Rien qu'en Occident, de nombreuses constellations furent inventées à toute époque puis tombèrent dans les oubliettes de l'histoire. Ayons ainsi une pensée pour l'astronome français Jérôme Lalande qui, en 1799, porta son animal favori au firmament en créant le Chat. L'astronome allemand Johann Bode le fit figurer dans son atlas *Uranographia sive Astrorum Descriptio* de 1801 avant que le félin ne disparaisse de la circulation. Cependant, l'astronomie conserve parfois le souvenir de ces constellations disparues. Ainsi, les Quadrantides, une belle pluie d'étoiles filantes du début du mois de janvier, tirent-t-elles leur nom du *Quadrant Mural*, une constellation aujourd'hui obsolète conçue par Lalande.

### 3 Les constellations au XXI<sup>e</sup> siècle

Pour l'astronome, les constellations ne sont que des régions de la sphère céleste avec des limites précises, conçues pour que tout point du ciel appartienne à une constellation... et à une seule. La division choisie fut soutenue par Eugène Delporte, de l'Observatoire de Uccle (Belgique) dans son ouvrage *Délimitation Scientifique des Constellations* et adoptée par l'Union Astronomique internationale en 1930. Le découpage de la sphère céleste suit le système de coordonnées équatoriales et la morcelle en lignes d'ascension droite et de déclinaison. Les astronomes, qu'ils soient amateurs et encore plus professionnels, n'ont désormais plus besoin de connaître quoi que ce soit aux constellations : les coordonnées de l'objet recherché leur suffit pour orienter précisément leur instrument vers lui. Voyez l'annexe *Ascension droite et déclinaison : les systèmes de coordonnées* pour en savoir plus.

Comme nous l'avons déjà indiqué, il existe aujourd'hui officiellement 88 constellations. Certaines sont très célèbres et tout le monde a, au mois, déjà entendu parler de la Grande Ourse, de Cassiopée et d'Orion. D'autres le sont beaucoup moins... Qu'ils lèvent la main, ceux qui peuvent situer la Machine pneumatique, la Girafe ou le Petit Cheval !

La liste complète des constellations accompagnée de leur schéma téléchargeable à haute résolution est accessible, en français, sur le site de l'Union astronomique internationale ici : <https://www.iau.org/public/themes/constellations/french/>



## 4 Les constellations du zodiaque

Nous avons appris à l'école que la Terre est animée de plusieurs mouvements, les deux principaux étant sa rotation sur elle-même en 24 h et sa révolution autour du Soleil en un an. Étant attachés à sa surface et emportés par ses mouvements, nous ne pouvons nous rendre compte de leur existence que de manière indirecte.

La rotation de la Terre sur elle-même d'ouest en est a pour conséquence le *mouvement diurne*, un mouvement d'ensemble de la sphère céleste d'est en ouest qui fait, par exemple, se lever, culminer et se coucher le Soleil. Les astres décrivent ainsi dans notre ciel des cercles parallèles à l'équateur céleste (la projection de l'équateur sur la sphère céleste) autour d'un axe passant approximativement par l'observateur et l'étoile Polaire.

La révolution de la Terre autour du Soleil a pour conséquence un léger glissement quotidien du Soleil vers l'est, à raison de 1° par jour. C'est le *mouvement annuel*. En un an, la trajectoire du Soleil définit un cercle sur la sphère céleste que les astronomes appellent l'*écliptique*. L'écliptique et l'équateur céleste sont inclinés de 23° 26' l'un par rapport à l'autre. C'est l'angle dont la Terre est inclinée dans sa course autour du Soleil.

Les constellations traversées par l'écliptique sont appelées constellations du zodiaque. Elles reçoivent donc périodiquement la visite du Soleil et sont au nombre de... 13. En voici la liste : le Bélier, le Taureau, les Gémeaux, le Cancer, le Lion, la Vierge, la Balance, le Scorpion, Ophiucus, le Sagittaire, le Capricorne, le Verseau et les Poissons.

Le tableau suivant vous donne la période durant laquelle le centre du disque solaire se trouve dans chaque constellation du zodiaque entre avril 2023 et avril 2024.

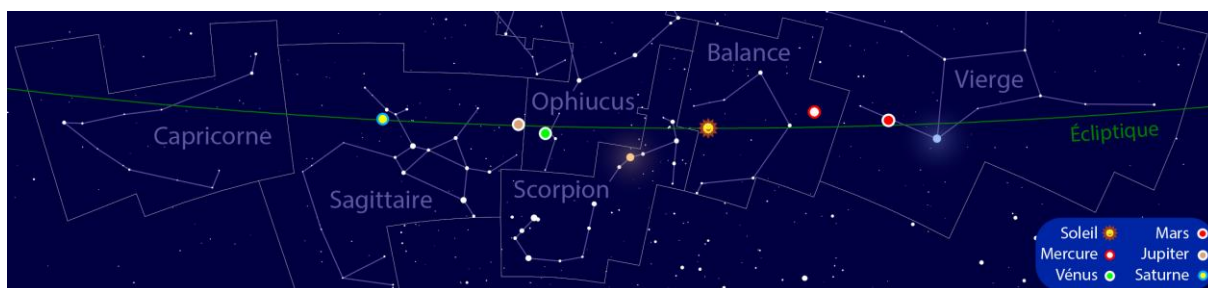
Bélier	Taureau	Gémeaux	Cancer	Lion	Vierge
19/04 – 14/05	14/05 – 22/06	22/06 – 21/07	21/07 – 11/08	11/08 – 17/09	17/09 – 31/10

Balance	Scorpion	Ophiucus	Sagittaire	Capricorne	Verseau
31/10 – 23/11	23/11 – 30/11	30/11 – 18/12	18/12 – 20/01	20/01 – 17/02	17/02 – 12/03

Poissons
12/03 – 19/04

On remarque que les dates sont loin d'être réparties de manière homogène dans l'année car les constellations ont des largeurs très différentes. Certaines constellations du zodiaque sont spectaculaires car composées d'étoiles brillantes, comme le Taureau, les Gémeaux, le Lion, le Scorpion et le Sagittaire. D'autres sont ternes, comme le Cancer, le Capricorne ou encore les Poissons.

Les plans dans lesquels les planètes tournent autour du Soleil et la Lune autour de la Terre sont faiblement inclinés par rapport au plan de l'écliptique, qui est le plan dans lequel la Terre tourne autour du Soleil. Aussi retrouve-t-on la Lune et les planètes dans les constellations du zodiaque. Toutefois, dans certaines conditions, il arrive que les planètes puissent franchir marginalement les frontières de huit constellations supplémentaires : la Baleine, le Corbeau, la Coupe, l'Hydre, Orion, Pégase, l'Écu de Sobieski et le Sextant. Enfin, la Lune, et elle seule, peut séjourner dans la constellation boréale du Cocher.



Position du Soleil et des cinq planètes visibles à l'œil nu dans le zodiaque le 20 novembre 2019.

## 5 Voit-on les mêmes constellations au fil des saisons ?

Bien évidemment, on ne peut voir la constellation du zodiaque dans laquelle le Soleil se trouve à un moment donné, ni les quelques constellations qui lui sont adjacentes. Six mois plus tard, en raison du mouvement annuel, le Soleil se trouvera dans la direction opposée à ces constellations. Elles se lèveront au moment où le Soleil se couche et demeureront visibles toute la nuit, dans des conditions idéales d'observation.

Plaçons-nous au début de l'été. Le Soleil, qui monte très haut dans le ciel, se trouve alors aux confins du Taureau et des Gémeaux. Ces deux constellations sont donc inobservables, noyées dans l'éclat de notre étoile. Six mois plus tard, elles seront visibles toute la nuit : Taureau et Gémeaux font partie du ciel d'hiver et culmineront à très bonne hauteur. Inversement, plaçons-nous au début de l'hiver. Le Soleil occupe le Sagittaire... qui sera observable toute la nuit au début de l'été, à faible hauteur dans notre ciel.

La figure en page suivante donne, d'un point de vue géocentrique, la direction du Soleil en fonction des jours de l'année. Elle consiste donc en un portage graphique et parlant du tableau de la page précédente. On y a fait figurer la direction du Soleil lors de son passage aux solstices et aux équinoxes.

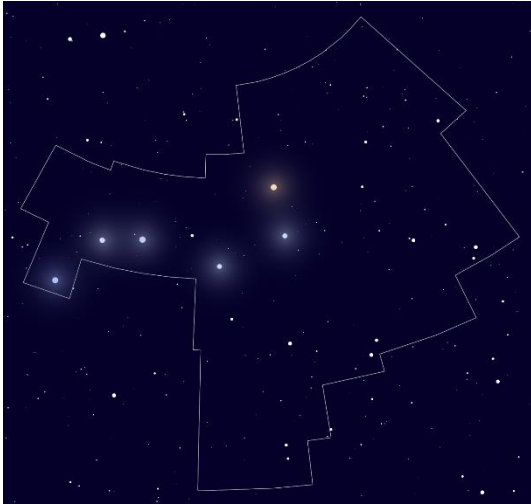




Bien évidemment, ce n'est pas parce que les Gémeaux ou le Taureau sont des constellations typiques des nuits d'hiver qu'on ne pourra pas les observer à d'autres saisons ! Au cours de l'été, le cumul des légers glissements quotidiens du Soleil vers l'est va d'abord rendre décelables leurs étoiles les plus brillantes au petit matin, vers le levant. C'est ensuite en fin de nuit, puis de plus en plus tôt que ces constellations apparaîtront dans leur intégralité... jusqu'à être observable toute la nuit en hiver. Au printemps, on ne les verra plus qu'en soirée vers le couchant, jusqu'à ce qu'elles soient rattrapées par le Soleil. Et un nouveau cycle débutera...

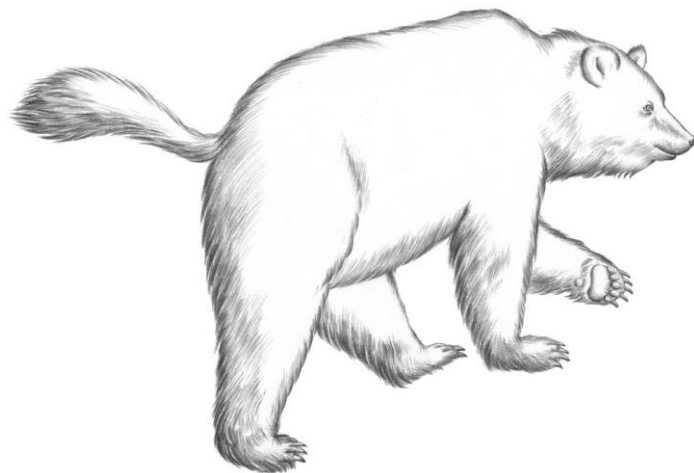
## 6 Les constellations, rien que des apparences

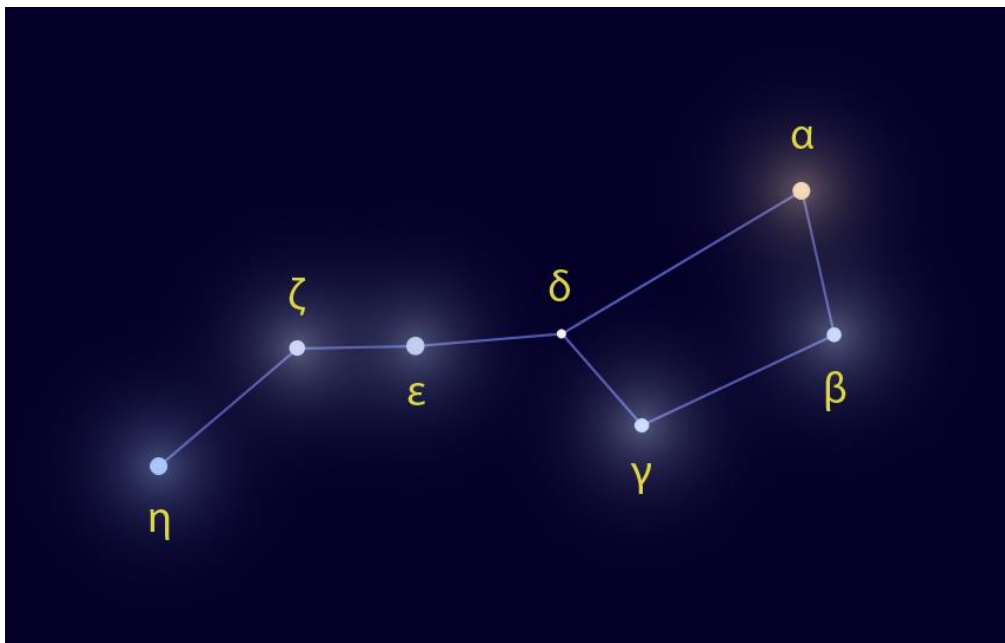
Pour illustrer ce chapitre, focalisons-nous sur la Grande Ourse, une constellation immense, qui occupe la 3<sup>e</sup> place en superficie derrière l'Hydre et la Vierge.



À gauche : la constellation de la Grande Ourse et ses limites, définies par l'Union astronomique internationale en 1930. À droite, une façon possible de relier certaines de ses étoiles, popularisée par l'illustrateur H. A. Rey en 1952. C'est loin d'être la seule...

Sept étoiles parmi les plus brillantes de la Grande Ourse forment une figure remarquable que, dans nos contrées, on appelle la « grande casserole ». Ce type de figure, nommé *astérisme*, n'est pas unique et vous avez déjà certainement entendu parler du « W » de Cassiopée, du Carré de Pégase, du Triangle de l'été, de la Ceinture d'Orion, etc. La figure de la page suivante s'intéresse uniquement aux sept étoiles de la grande casserole. Rappelons encore que la grande casserole, contrairement à la Grande Ourse, n'a aucune existence officielle ; il s'agit simplement d'une dénomination bien pratique que chacun comprend et utilise.





Les sept étoiles formant la grande casserole.

Une lettre grecque minuscule est assignée à chacune des sept étoiles. Une telle désignation fut introduite par l'astronome allemand Johann Bayer (1572 – 1625) dans son *Uranometria* (1603) et ses successeurs l'ont conservée. Habituellement, l'étoile la plus lumineuse d'une constellation se voit attribuer la lettre  $\alpha$  ; la deuxième,  $\beta$ , la troisième  $\gamma$  et ainsi de suite. Il y a toutefois presque autant d'exceptions qu'il existe de constellations. Ainsi, **dans la Grande Ourse**,  $\epsilon$  est l'étoile la plus brillante. Suivent alors  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .  $\delta$ , elle, n'arrive qu'en 11<sup>e</sup> position.

Pour être tout à fait complet, la désignation de Bayer d'une étoile comporte en fait deux parties :

- une lettre, généralement une lettre grecque minuscule mais parfois une lettre latine minuscule ou majuscule ;
- le génitif du nom latin de la constellation hébergeant l'étoile.

Dans le cas qui nous intéresse, la Grande Ourse se dit Ursa Major, son génitif étant Ursae Majoris. Par conséquent, son étoile la plus brillante s'appelle  $\epsilon$  Ursae Majoris. Il est également possible d'utiliser l'abréviation à trois lettres de la constellation ; la désignation  $\epsilon$  UMa est donc parfois employée dans la littérature.

La désignation de Bayer n'est sans doute pas ce qu'on peut trouver de plus... romantique, dirons-nous. Sur les quelques milliers d'étoiles visibles à l'œil nu sous un bon ciel, quelques centaines possèdent un nom traditionnel ; étant relativement brillantes, les sept étoiles de la Grande Casserole en sont dotées. Le tableau suivant en propose la correspondance.

<b>Désignation de Bayer</b>	$\eta$ UMa	$\zeta$ UMa	$\epsilon$ UMa	$\delta$ UMa	$\gamma$ UMa	$\beta$ UMa	$\alpha$ UMa
<b>Nom traditionnel</b>	Alkaid	Mizar	Alioth	Megrez	Phecda	Merak	Dubhe

Plus brillant, moins brillant... tout cela est finalement subjectif et imprécis. Comment peut-on quantifier l'éclat d'une étoile ?

Pour quantifier l'éclat apparent d'un astre, on utilise l'échelle des **magnitudes**. Elle s'inspire des travaux d'Hipparque, un grand astronome grec du II<sup>e</sup> siècle avant notre ère. Celui-ci classait les étoiles en « grandeur ». Les étoiles les plus brillantes étaient de 1<sup>re</sup> grandeur. Celles qui l'étaient un peu moins étaient qualifiées de 2<sup>e</sup> grandeur etc. Les étoiles de 6<sup>e</sup> grandeur étaient à la limite de visibilité. Les astronomes modernes ont repris le système de classement d'Hipparque en y intégrant la transcription mathématique de la perception de l'œil. Le système des magnitudes est beaucoup plus étendu que celui d'Hipparque : des objets très brillants auront une magnitude négative et les magnitudes supérieures à 6 caractériseront les objets nécessitant un instrument d'optique pour être détectés. **Gardez à l'esprit que plus la magnitude d'un astre est élevée, moins il est brillant.** Le tableau de la page suivante recense les magnitudes de quelques astres d'intérêt.

<b>Astre</b>	<b>Magnitude</b>
Le Soleil, vu depuis la Terre	-26,7
Pleine lune	-12,7
Vénus	-4,9 à -3,9
Jupiter	-2,9 à -1,6
Mars	-2,9 à +1,8
Sirius (étoile la plus brillante du ciel nocturne)	-1,5
Canopus (2 <sup>e</sup> étoile la plus brillante du ciel nocturne)	-0,7
Saturne	-0,5 à 1,3
Véga (étoile principale de la constellation de la Lyre)	0,0
Étoile polaire	2,0
Étoiles les plus faibles visibles à Paris	≈ 3
Uranus	5,3 à 5,9
<b>Limite de l'œil, sous un ciel bien sombre</b>	<b>≈ 6,5</b>
Neptune	7,8 à 7,9
Avec une paire de jumelles de 50 mm de diamètre	≈ 9 – 10
Avec un télescope de 200 mm de diamètre	≈ 13 – 14
Pluton (planète naine)	13,6 à 16,0
Avec un télescope de 600 mm de diamètre et 30 minutes de pose	≈ 22
Avec le télescope spatial <i>Hubble</i> (miroir de 2,4 m de diamètre) et 23 jours de pose	31,5
Avec le télescope spatial <i>James Webb</i> (miroir de 6,5 m de diamètre, opérationnel depuis 2022)	≈ 34

Les magnitudes des sept étoiles de la Grande Casserole sont données ici :

Étoile	Alkaid	Mizar	Alioth	Megrez	Phecda	Merak	Dubhe
<b>Magnitude apparente</b>	1,86	2,04	1,77	3,31	2,44	2,37	1,79

Il est, bien sûr, tout à fait impossible ne serait-ce que d'estimer la distance absolue et relative de ces sept étoiles par un examen visuel, aussi attentif soit-il. En l'absence de perspective, elles nous semblent toutes à la même distance, fixées sur une sphère céleste de rayon... sans doute très grand. Alioth est-elle la plus brillante du groupe parce qu'elle est la plus proche ? Megrez est-elle la plus lointaine ? Leur distance se compte-t-elle en milliers, en millions, en milliards de kilomètres ? Ou dans une unité beaucoup plus grande ? Comment mesure-t-on la distance qui nous sépare des étoiles ?

Pour estimer la distance des étoiles **proches**, on exploite leur *parallaxe*.

La parallaxe est l'angle dont semble avoir bougé un corps céleste par rapport au fond du ciel, en raison du changement de position de l'observateur. Pour vous familiariser avec cette notion, fermez l'œil gauche et, le bras tendu, cachez un petit élément du décor à l'aide de votre pouce. Fermez maintenant l'œil droit et observez la même scène de l'œil gauche, sans bouger : le petit élément du décor réapparaît ! L'angle dont votre pouce semble avoir bougé est la parallaxe. On peut relier la distance qui sépare votre pouce de vos yeux à cet angle et à l'écartement entre vos deux yeux. Ceci est à la base de la technique de triangulation.

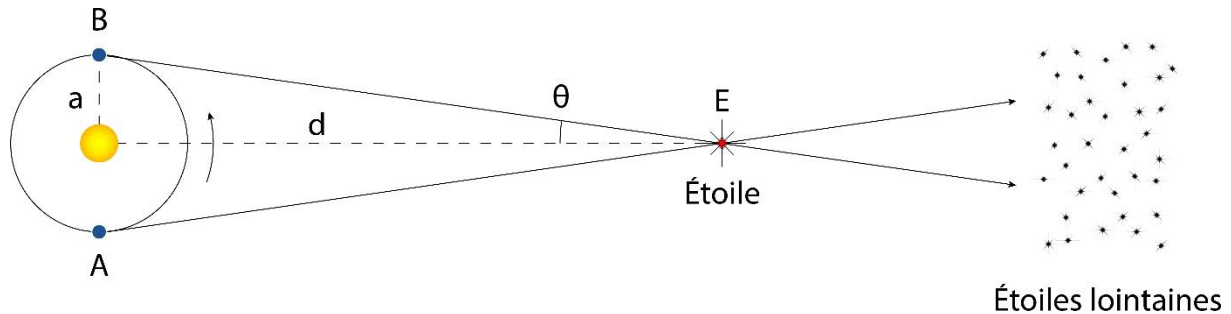
Nos yeux fournissent une base de triangulation bien trop petite pour mesurer la distance des étoiles. Peut-on atteindre la précision suffisante en prenant deux lieux séparés par plusieurs milliers de kilomètres sur Terre ?

La méthode fut employée avec succès en 1672 par les astronomes Jean-Dominique Cassini (1625 – 1712) et Jean Richer (1630 – 1696), non pas pour calculer la distance aux étoiles mais, plus humblement, pour mesurer la distance de la Terre à Mars et, de là, en déduire les dimensions du système solaire. Resté à Paris, Cassini envoya son collaborateur à Cayenne, en Guyane. Les deux observèrent la planète Rouge au même moment. En ces deux lieux, sa position était très légèrement différente par rapport aux étoiles lointaines, puisque le point de vue n'était pas le même. Connaissant la distance entre les deux villes, ils en déduisirent celle qui nous séparait alors de Mars.

Cassini et Richer montrèrent que l'angle dont semblait avoir bougé Mars était d'environ 17". Il s'agit d'une valeur faible, en tout cas inférieure aux capacités physiologiques de l'œil humain lorsqu'il n'est pas soutenu par un instrument d'optique.



La base fournie par le rayon terrestre s'avère trop petite pour permettre l'accès aux distances stellaires, la *parallaxe diurne* correspondante étant hors de portée des instruments passés ou actuels. Une fois de plus, voyons plus grand et choisissons l'orbite de la Terre dans sa révolution autour du Soleil comme base de triangulation !



Principe de la parallaxe annuelle. L'étoile dont on veut mesurer la distance est observée à six mois d'intervalle, alors que la Terre, dans son parcours autour du Soleil, se trouve en A puis en B.  $a$  est le rayon de l'orbite terrestre,  $d$  la distance à l'étoile et  $\theta$  la parallaxe.

D'après ce schéma, on a la relation trigonométrique suivante :

$$\tan(\theta) = \theta = \frac{a}{d}$$

Ce schéma n'est toutefois pas à l'échelle, tant s'en faut. Dans la réalité, la *parallaxe annuelle*  $\theta$  est minuscule, **toujours inférieure à 1''**. On peut donc assimiler l'angle  $\theta$  (exprimé en radian) à sa tangente et l'on obtient la relation :

$$d = \frac{a}{\theta}$$

où  $a$  est le rayon de l'orbite terrestre (environ 150 millions de kilomètres) – et plus exactement, une unité astronomique, soit 149 597 870,7 km – et  $d$  la distance que l'on cherche.

À la toute fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, on découvrit que l'étoile double 61 du Cygne présentait un mouvement propre très important : elle se déplace de manière significative (un peu plus de 5''/an, soit près de 10' en un siècle) par rapport au fond des étoiles. Il s'agit en fait de l'étoile la plus rapide visible à l'œil nu. Faisant le pari que cette vitesse ne faisait que traduire sa proximité au Soleil comparée aux autres étoiles et qu'elle constituait donc une cible idéale, l'astronome Friedrich Bessel (1784 – 1846) l'étudia avec la plus extrême minutie et détermina sa parallaxe en 1838.



Le mouvement apparent de l'étoile double 61 du Cygne entre le 20 novembre 2012 (images du haut) et le 24 novembre 2019 (images du bas). Crédit : [IndividusObservantis](http://IndividusObservantis).

À partir de ses observations, Bessel estima la parallaxe du centre de masse de l'étoile double à  $0,3136 \pm 0,0136''$ . Le résultat obtenu est très bon si l'on se réfère aux dernières données disponibles, celles fournies par la mission spatiale astrométrique *Gaia* (lancée en décembre 2013). Ce satellite européen a permis de contraindre la parallaxe des deux composantes de 61 du Cygne à  $(285,9459 \pm 0,1008) \cdot 10^{-3}''$  et  $(286,1457 \pm 0,0590) \cdot 10^{-3}''$ .

La parallaxe du premier membre, que l'on nomme 16 Cyg A, appartient donc à l'intervalle  $[0,2858451'' ; 0,2860467'']$  ; celle de 16 Cyg B, à l'intervalle  $[0,2860867'' ; 0,2862047'']$ . Le gain en précision est phénoménal !

Comment passer d'une parallaxe annuelle à une distance ? Reprenons la formule que nous venons d'établir et appliquons-la à la parallaxe obtenue par Bessel :

$$d = \frac{a}{\theta}$$

Comme nous l'avons signalé, il faut convertir  $\theta$  en radian. Cela se fait en deux étapes. D'abord, on convertit  $\theta$  en degré en divisant sa valeur par 3600 puisqu'il y a  $60 \times 60 = 3600$  secondes d'arc dans un degré. Le passage au radian nécessite une division supplémentaire par  $180/\pi$  car un cercle complet ( $360^\circ$ ) équivaut à  $2\pi$  radians.

Le calcul mène à une parallaxe de  $1,520 \cdot 10^{-6}$  rad. L'inverse de cette valeur s'élève à un peu plus de 650 000. Autrement dit, la distance qui nous sépare de 61 du Cygne est plus de 650 000 fois supérieure à la distance qui sépare la Terre du Soleil ! Près de cent mille milliards de kilomètres... L'exprimer dans cette unité n'a plus vraiment de sens. Les astronomes ont donc progressivement introduit un nouvel étalon de longueur, l'**année-lumière** (a.-l.).

On la définit aujourd'hui comme la distance parcourue par la lumière dans le vide en une année julienne de 365,25 jours. Sachant que la vitesse de la lumière dans le vide est une constante fixée en 1983 à 299 792 458 m/s, une année-lumière est exactement égale à :  $299\,792,458 \times 86\,400 \times 365,25 = 9\,460\,730\,472\,580,8$  km, soit près de 9461 milliards de kilomètres.

La distance de 61 du Cygne, calculée par Bessel, est alors de 10,40 années-lumière. Dans son article original, l'astronome allemand la plaçait à 10,28 années-lumière car la vitesse de la lumière n'était pas encore déterminée très précisément. L'utilisation des données envoyées par *Gaia* (et c'est un bon exercice !) permet de calculer les distances des deux membres avec leur barre d'erreur.

16 Cyg A :  $11,40623 \pm 0,0040$  a.-l.

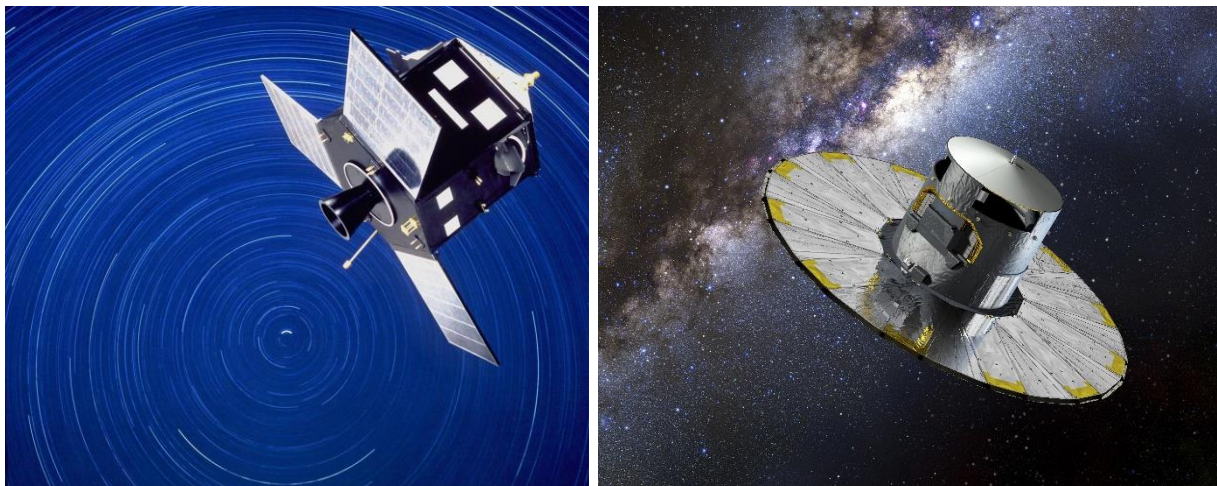
16 Cyg B :  $11,39826 \pm 0,0024$  a.-l.

Notons enfin que les astronomes emploient couramment une autre unité de longueur que l'année-lumière, le **parsec** (contraction de « parallaxe-seconde »). Historiquement, le parsec (pc) est défini comme la distance à laquelle une unité astronomique sous-tend un angle d'une seconde d'arc. L'aspect pratique du parsec est qu'il suffit d'inverser la valeur de la parallaxe exprimée en seconde d'arc pour obtenir directement une distance en parsec : avec une parallaxe de  $0,5''$ , une étoile se trouve à 2 parsecs ; une parallaxe de  $0,1''$  la place à 10 parsecs, etc. En 2015, l'Union astronomique internationale a défini le parsec comme valant exactement ( $648\,000 / \pi$ ) unités astronomiques. Cela correspond à 3,2616 années-lumière environ. En astronomie extragalactique et en cosmologie, on utilise souvent le mégaparsec (un million de parsecs, symbole « Mpc ») voire le gigaparsec (un milliard de parsecs, symbole « Gpc »).

Ce détour par les techniques de mesure des distances des étoiles proches nous ramène vers la Grande Casserole. Le tableau suivant présente les distances des sept étoiles qui la constituent, calculées à partir des parallaxes mesurées par le prédécesseur de *Gaia*, le satellite européen *Hipparcos* (1989 – 1993). Pourquoi se satisfaire de mesures moins précises et plus anciennes ? Simplement parce que de plus récentes n’existent pas... en effet, *Gaia* ne travaille, pour l’instant, que sur des étoiles de magnitude supérieure à 3 environ.

Étoile	Alkaid	Mizar	Alioth	Megrez	Phecda	Merak	Dubhe
<b>Parallaxe</b> (en $10^{-3}$ ")	$31,38 \pm 0,24$	$39,36 \pm 0,30$	$39,51 \pm 0,20$	$40,51 \pm 0,15$	$39,21 \pm 0,40$	$40,90 \pm 0,16$	$26,54 \pm 0,48$
<b>Distance</b> (en a.-l.)	$103,9 \pm 0,8$	$82,9 \pm 0,6$	$82,6 \pm 0,4$	$80,5 \pm 0,3$	$83,2 \pm 0,8$	$79,7 \pm 0,3$	$122,9 \pm 2,2$

Les étoiles Mizar, Alioth, Megrez, Phecda et Merak sont situées dans la même région du ciel et à une distance comparable de la Terre. On a, de plus, montré qu’elles possédaient un mouvement propre commun : elles se déplacent de concert dans l’espace. Il s’agit en fait de ce qu’on appelle un *courant stellaire*. Ces étoiles, avec quelques autres dans la Grande Ourse et dans d’autres constellations, partagent des caractéristiques communes comme l’âge (environ 300 millions d’années), la cinématique et la composition chimique. Elles ont très certainement une origine commune. Ce fait d’autant plus remarquable que les étoiles d’une constellation ne sont généralement pas liées par la gravité ni par une gestation commune. Alkaid et Dubhe ne font pas partie du courant d’étoiles de la Grande Ourse.



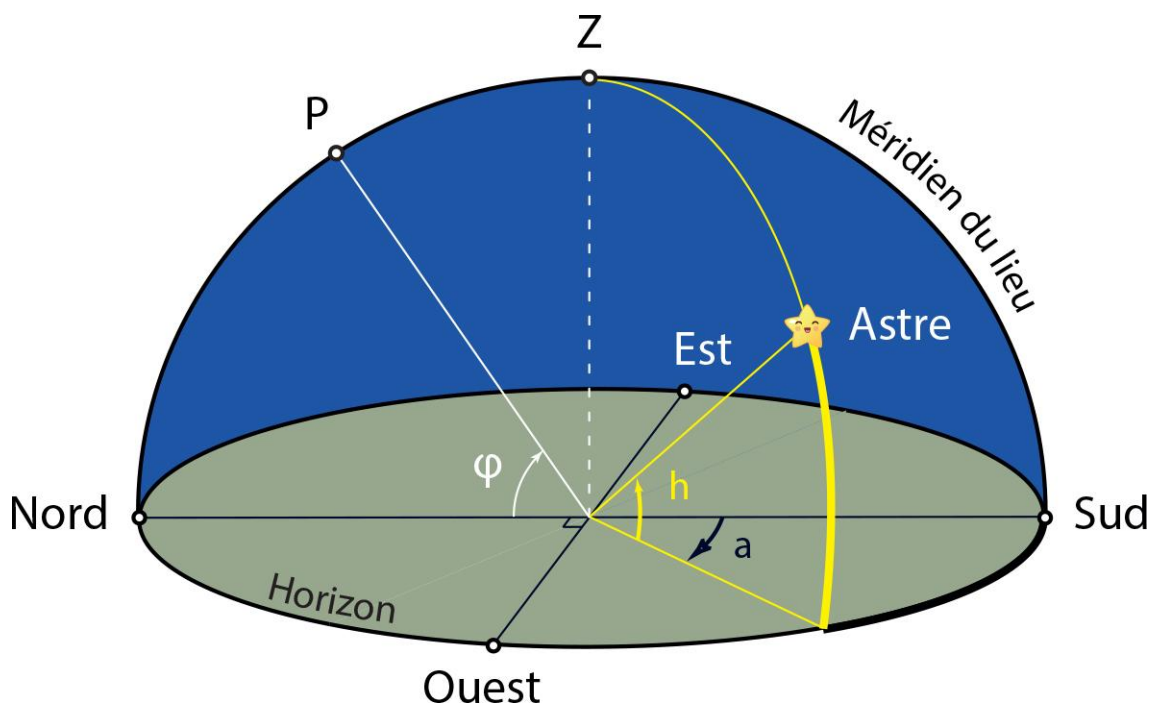
Vue d’artiste des missions *Hipparcos* (pour **H**igh **P**recision **P**ARallax **C**ollecting **S**atellite) à gauche et *Gaia* à droite. Crédit : Agence spatiale européenne (ESA).

## Annexe 1 Ascension droite et déclinaison : les systèmes de coordonnées

Comment repérer un astre dans le ciel ? Comment pointer vers lui un instrument sur une voûte céleste toujours en mouvement ? Comme sur Terre, où chaque point est caractérisé par sa latitude et sa longitude, nous allons définir des systèmes de coordonnées célestes.

Le plus facile à concevoir est le *système de coordonnées horizontales*. Que faites-vous naturellement lorsqu'un bruit attire votre attention ? Vous tournez la tête dans sa direction. Ce mouvement peut être décomposé en un mouvement dans le plan horizontal jusqu'à la verticale du bruit, suivi d'un mouvement dans le plan vertical. Les deux coordonnées correspondantes sont l'azimut  $a$  (mouvement dans le plan horizontal) et la hauteur  $h$  (mouvement dans le plan vertical). Ils sont les deux composantes du système de coordonnées horizontales, dont le plan de référence est le plan horizontal. L'observateur est positionné au centre de la sphère céleste.

Un peu de vocabulaire : à la verticale de l'observateur, il y a le zénith ( $Z$ ) et sous ses pieds, le nadir, non représenté ici. L'axe de rotation de la Terre intercepte la sphère céleste en deux points appelés pôles célestes. L'étoile Polaire donne la position approximative du pôle céleste Nord ( $P$ ). Il n'est pas difficile de démontrer que la hauteur du pôle céleste Nord est égale à la latitude  $\varphi$  du lieu d'observation. Sous ce pôle, on trouve le point cardinal nord. La direction des trois autres points cardinaux s'en déduit immédiatement. Le plan passant par le nord, le pôle céleste Nord, le zénith et le sud s'appelle le plan méridien.



Le système de coordonnées horizontales, dont les deux composantes sont l'azimut  $a$  et la hauteur  $h$ .

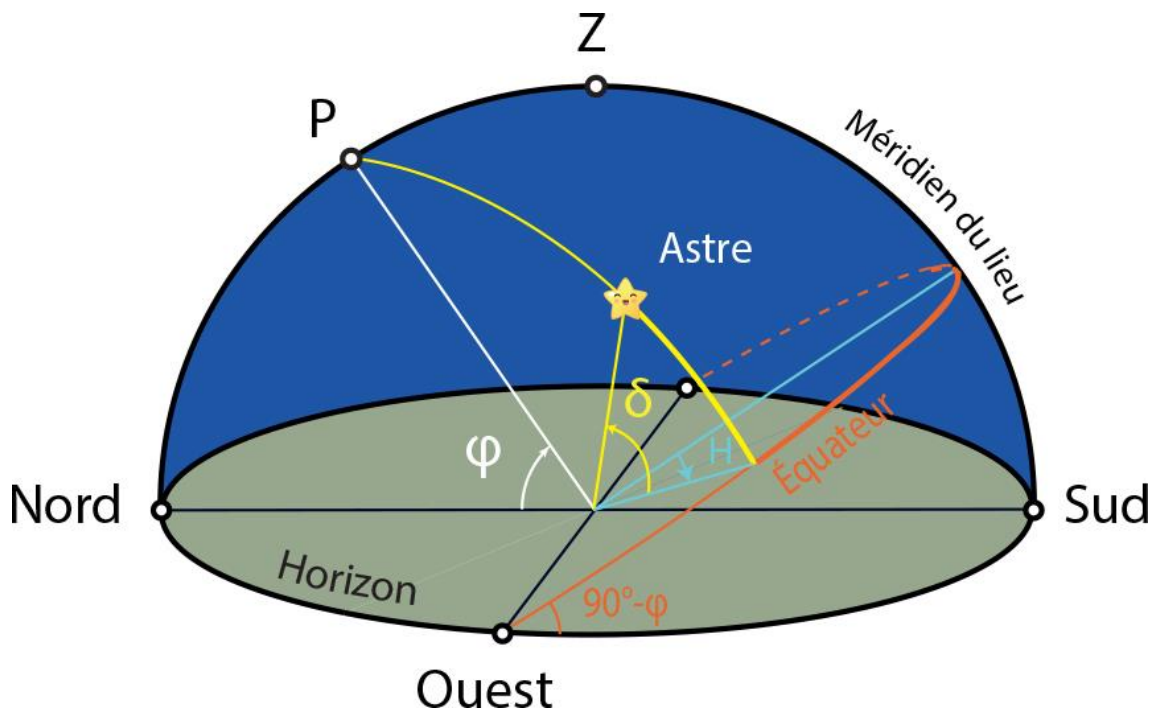


L'azimut d'un astre est sa distance angulaire, compté dans le plan horizontal, au point cardinal sud. On le compte positivement du sud vers l'ouest, de  $0^\circ$  à  $+180^\circ$  et négativement du sud vers l'est, de  $0^\circ$  à  $-180^\circ$ . La hauteur d'un astre est sa distance angulaire à l'horizon. Elle vaut  $90^\circ$  si l'astre est au zénith.

Le système de coordonnées horizontales est facile à établir mais, en raison du mouvement diurne, la hauteur et l'azimut d'un objet changent en permanence. À mi-chemin entre le système de coordonnées horizontales que nous venons de présenter et le système de coordonnées équatoriales, utilisé pour définir les frontières de constellations, il existe le *système de coordonnées horaires*. Son plan de référence est l'équateur céleste, c'est-à-dire la projection de l'équateur terrestre sur la sphère céleste, qu'il sépare en deux hémisphères. L'intérêt de ce système procède de l'observation attentive du mouvement diurne, ce mouvement de rotation d'ensemble de la sphère céleste d'est en ouest, effectué en près de 24 h autour d'un axe passant par les deux pôles célestes. Deux faits deviennent ainsi évidents :

- la distance angulaire d'une étoile donnée à l'équateur céleste est constante ;
- La distance angulaire entre, d'une part, le plan méridien et, d'autre part, le plan passant par l'étoile et l'axe des pôles croît uniformément avec le temps.

On définit donc deux coordonnées, qui portent le nom de déclinaison et d'angle horaire. La déclinaison  $\delta$  est la distance angulaire d'un astre à l'équateur céleste. Elle est comptée positivement dans l'hémisphère Nord (de  $0^\circ$  à  $+90^\circ$ ) et négativement dans l'hémisphère Sud (de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$ ). L'angle horaire  $H$  est la distance angulaire, comptée sur l'équateur céleste, entre le plan méridien et le plan passant par l'astre et l'axe des pôles. Il est positif vers l'ouest (de  $0^\circ$  à  $+180^\circ$ ) et négatif vers l'est (de  $0^\circ$  à  $-180^\circ$ ).



Le système de coordonnées horaires, dont les deux composantes sont l'angle horaire  $H$  et la déclinaison  $\delta$ .

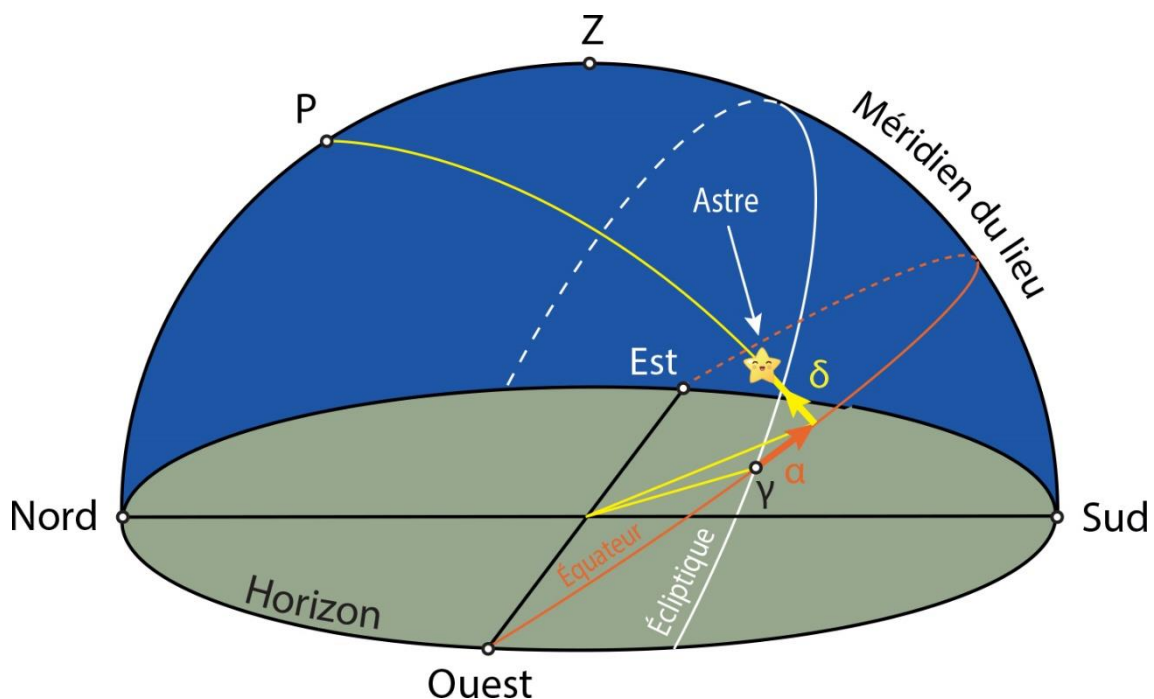
Nous voici enfin arrivés au *système de coordonnées équatoriales*, qui permet de définir les frontières des constellations. A la différence des coordonnées horizontales et horaires, les coordonnées équatoriales sont indépendantes du lieu d'observation et de l'heure. Le plan de référence est toujours l'équateur céleste.

Sur Terre, on repère un point par sa latitude (dont l'équivalent est, sur la sphère céleste, la déclinaison) et sa longitude. Il n'existe toutefois pas de méridien de Greenwich dans le ciel, qui pourrait servir d'origine à une « longitude » céleste. Aussi les astronomes ont-ils défini un point immatériel, le point  $\gamma$  ou *point vernal*, qui remplirait ce rôle. Il se trouve à l'intersection entre l'équateur céleste et l'écliptique et il est occupé par le centre du Soleil au début du printemps.

Compté sur l'équateur céleste, l'angle entre le point vernal et la projection de l'astre sur l'équateur céleste s'appelle l'*ascension droite*. Il s'agit de la seconde composante du système de coordonnées équatoriales, la première étant toujours la déclinaison. À partir du point vernal, l'ascension droite est comptée positivement vers l'est, de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  ou, pour des raisons pratiques que nous ne développerons pas, de 0 h à 24 h, avec des subdivisions en minutes et en secondes. Par convention,  $1 \text{ h} = 15^\circ$ .

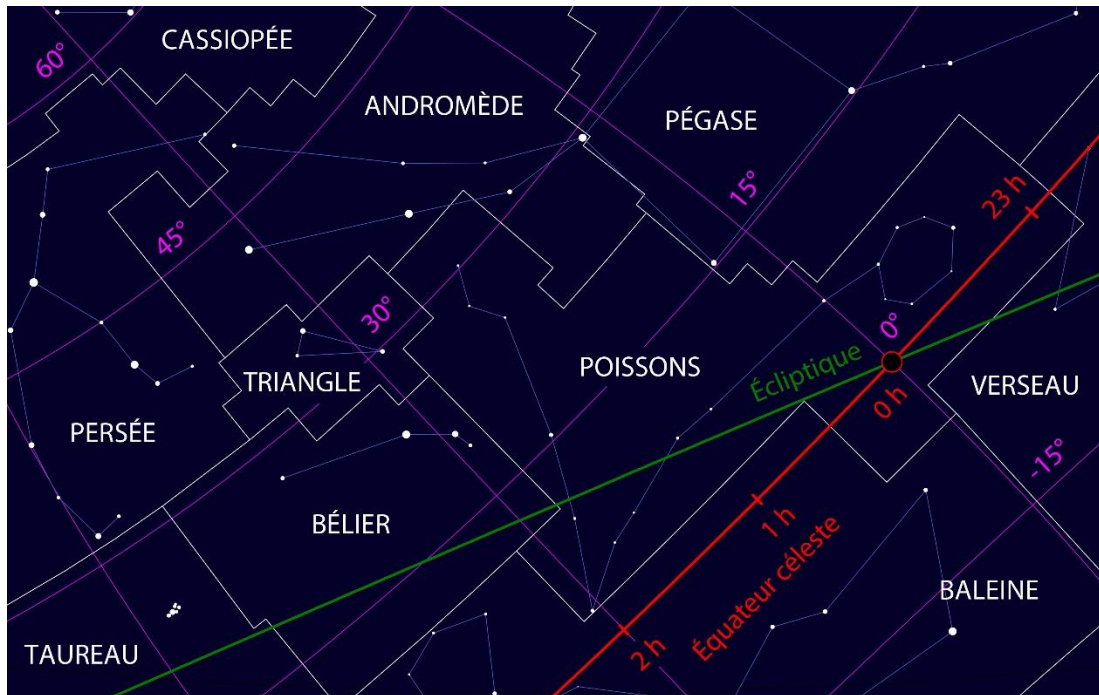
Grâce à la trigonométrie sphérique, il est possible d'établir des formules de conversion entre les systèmes de coordonnées horizontales, horaires et équatoriales. À titre d'exemple, les trois formules suivantes permettent de convertir des coordonnées horizontales (azimut  $a$  et hauteur  $h$ ) en coordonnées horaires (angle horaire  $H$  et déclinaison  $\delta$ ), lorsque l'observation se fait à une latitude  $\varphi$ .

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



Le système de coordonnées équatoriales. Ses deux composantes sont l'ascension droite  $\alpha$  et la déclinaison  $\delta$ .

Le schéma suivant montre quelques constellations, dont les frontières sont tracées en gris. L'équateur céleste est en rouge et l'écliptique en vert. Leur intersection dans la constellation des Poissons définit le point vernal, origine des ascensions droites. En violet se révèle un réseau équatorial (ascensions droites 23 h, 0 h, 1 h et 2 h ; déclinaisons  $-15^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $60^\circ$ ). On vérifie ainsi que les frontières des constellations sont des lignes d'ascension droite et de déclinaison.



## Annexe 2 Angles et diamètres apparents en astronomie

Dans un degré, il y a 60 minutes d'arc (60') et dans une minute d'arc, on compte 60 secondes d'arc (60"). Le pouvoir de résolution de l'œil humain est d'environ 1'. Cela signifie que deux points séparés par moins de 1' seront vus comme un seul et même point.

Objet observé	Taille apparente
Distance angulaire entre l'extrémité du petit doigt et celle du pouce (bras tendu, main ouverte et doigts écartés)	Environ 20°
Distance angulaire entre l'extrémité du pouce et celle du poing (bras tendu, main fermée et pouce tendu)	Environ 15°
Taille apparente du poing fermé (bras tendu)	Environ 10°
Largeur apparente de l'index (bras tendu)	Environ 1°, soit 60'
Lune	De 29,3' à 33,5'
Soleil	De 31,5' à 32,5'
Vénus (planète)	De 9,5" à 65", soit 1' 5"
<b>Pouvoir de séparation de l'œil humain</b>	<b>Environ 1', soit 60"</b>
Jupiter (planète)	De 30,5" à 50"
Mars (planète)	De 3,5" à 25,1"
Neptune (planète)	De 2,2" à 2,4"
Pluton (planète naine)	De 0,06" à 0,11"
<b>Pouvoir de séparation du télescope spatial <i>Hubble</i></b>	<b>0,05"</b>
Bételgeuse (étoile supergéante rouge)	0,05"
Sirius (étoile la plus brillante du ciel nocturne)	0,006"
<b>Pouvoir de séparation du SVLBI (interféromètre radio)</b>	<b>0,0001"</b>