

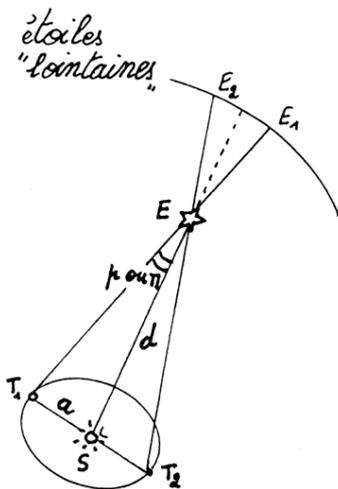
La détermination des distances en astronomie

De tous temps, les hommes ont tenté d'évaluer la distance des étoiles : positionnées par les Grecs sur une même sphère centrée sur la Terre, elles sont aujourd'hui dispersées dans un espace dont les dimensions auraient émerveillé les Anciens.

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer les distances entre le Soleil et ses homologues étoilés. Les méthodes dites primaires reposent sur des propriétés géométriques et permettent d'obtenir des informations sur notre proche banlieue. Elles sont très importantes, car elles permettent d'étalonner des méthodes plus indirectes, dites secondaires, qui ouvrent de plus larges horizons aux arpenteurs célestes. Voici quelques une de ces méthodes.

1. Méthodes primaires

a. Parallaxe trigonométrique



$a = 1UA$; $E_1 =$ position observée de l'étoile E quand la Terre est en T_1 ; $E_2 =$ la même chose, six mois plus tard.

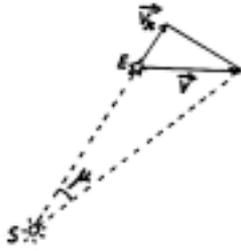
En observant les étoiles tout au long d'une année terrestre, on constate que certaines d'entre elles paraissent se déplacer par rapport à la plupart de leurs compagnes. Ce phénomène de *parallaxe* est dû au mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil et traduit le fait que certaines étoiles sont beaucoup plus proches de nous que les autres. Sur le dessin ci-contre, on voit que l'angle de parallaxe, p ou π , sous lequel le rayon de l'orbite terrestre a serait vu de l'étoile, est relié à la distance d de cette étoile par la formule $p = a / d$, où p est exprimé en radians. On peut simplifier cette relation en remplaçant les radians par les secondes d'arc ($1'' = 1/60' = 1/3600^\circ = 1/206\,265$ rad). Cette formule se réduit alors à $p = 1 / d$, où d est exprimée en parsecs (pc) ; un parsec est donc la distance d'une étoile dont la parallaxe est de $1''$ d'arc : un parsec équivaut à 206 265 unités astronomiques (UA), ou encore à 3,23

années-lumière (al).

La parallaxe est toujours un angle très petit et donc difficile à déterminer ; l'étoile la plus proche, *Proxima du Centaure*, a ainsi une parallaxe de $0,76''$, ce qui correspond à une distance de 4,3 al. Jusqu'il y a peu, les astronomes déterminaient les parallaxes à quelques centièmes de seconde d'arc près, et il en résultait une erreur relative voisine de 20% sur la distance des étoiles plus proches que vingt parsecs. Aujourd'hui, grâce au satellite européen *Hipparcos* (*HIGH PRECISION PARALLAX COLLECTING SATELLITE*), on possède un catalogue de 180 000 étoiles « proches » dont la parallaxe est connue avec une précision de $0,002''$.

L'astronome grec Hipparque, le créateur du premier catalogue stellaire, serait stupéfait d'une telle performance !

b. Méthode du point de convergence



Cette méthode s'applique aux amas ouverts stables comme les Pléiades. Si on fait l'hypothèse raisonnable que l'amas n'est ni en expansion, ni en rotation et que toutes ses étoiles sont situées à une même distance de la Terre, celles-ci se déplacent alors parallèlement les unes aux autres : cette vitesse commune n'est autre que celle que possédait le nuage interstellaire qui leur a donné naissance. Par le même effet de perspective qui nous fait voir se rapprocher dans le lointain des rails de chemin de fer pourtant parallèles, les trajectoires des étoiles de l'amas semblent converger vers un même point du ciel (*point de convergence*). On détermine d'abord la composante radiale V_r de la vitesse \vec{V} des étoiles de l'amas en utilisant l'effet Doppler (une étoile « rougit » ou « bleuit » selon qu'elle s'éloigne ou se rapproche de nous), et on mesure l'angle μ de leur mouvement propre annuel.

Connaissant l'angle λ entre les directions du point de convergence et de l'amas dans le ciel, on montre facilement que la distance d de l'amas est donnée en parsecs par :

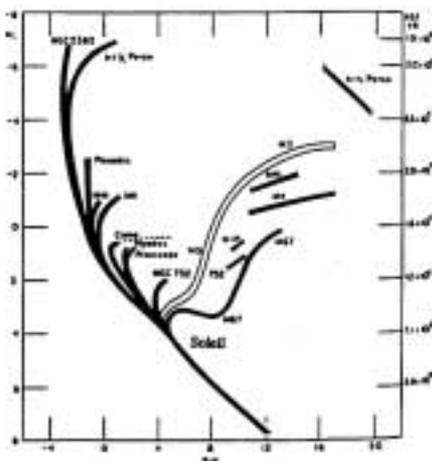
$$d = V_r \cdot \operatorname{tg} \lambda / (4,74 \cdot \mu)$$

où μ est exprimé en secondes d'arc par an et V_r en km/s.

On parvient à l'aide de cette méthode à déterminer des distances relativement précises jusqu'à environ 300 al.

2. Méthodes secondaires

a. Parallaxe spectroscopique



Cette méthode repose sur la connaissance de la distance et de la magnitude absolue d'étoiles d'amas ouvert proches, comme celui des Hyades. Dans ce dernier cas, cette distance, déterminée auparavant par la méthode du point de convergence avec une précision de 10%, est à présent connue grâce aux mesures de parallaxe d'Hipparcos avec une erreur d'un demi pour-cent : la valeur actuellement retenue est de $46,34 \pm 0,27$ pc. La connaissance de la distance des étoiles de l'amas et la mesure de leur magnitude apparente m permet de

déterminer leur magnitude absolue M , puis de les localiser de façon précise dans un diagramme de Hertzsprung-Russel (pour vous rafraîchir les idées concernant ce diagramme, replongez-vous dans votre Galaxie n°3). L'avantage des amas ouverts est qu'ils contiennent en général – pour autant qu'ils ne soient pas trop jeunes – des étoiles représentatives de chaque type spectral.

Ce travail préliminaire permet ensuite de calculer avec une bonne précision la distance d'une étoile quelconque ayant les mêmes caractéristiques spectroscopiques que les étoiles de référence, en comparant la magnitude apparente de cette étoile à sa magnitude absolue déduite de sa position dans le diagramme HR, et en utilisant la formule de Pogson $M - m = 5 - 5 \log d$. On peut utiliser cette méthode jusqu'à environ 300 000 al.

b. Parallaxe photométrique

On peut déterminer la magnitude absolue de certaines étoiles de façon plus simple. Les étoiles variables de la classe des céphéides sont des étoiles massives, arrivées à la fin de leur évolution, qui passent par une phase d'instabilité caractérisée par une pulsation de leurs couches extérieures. En répertoriant les céphéides de distance connue, on s'est aperçu que l'éclat de ces étoiles varie avec une période liée à leur luminosité intrinsèque (et donc aussi à leur magnitude absolue M). Cette relation étant connue, la formule de Pogson permet de calculer la distance d'une céphéide à partir de sa magnitude apparente m . Cette technique permet de mesurer des distances atteignant plusieurs millions d'années-lumière, et donc d'évaluer enfin les distances d'autres galaxies !

Ici encore, *Hipparcos* a mis son grain de sel en permettant d'agrandir la sphère des étoiles de distance connue à 20% près : son rayon est passé de 20 à 100 pc, qui est justement la distance moyenne des céphéides les plus proches. D'autre part les nouvelles mesures, très précises, ont permis de mieux calibrer la relation masse-luminosité des céphéides proches.

On peut appliquer une méthode analogue aux novæ et supernovæ, intrinsèquement beaucoup plus brillantes que les céphéides, et ainsi accéder à des distances encore supérieures.

c. Parallaxe dynamique

Cette méthode s'applique aux systèmes doubles dont les paramètres orbitaux sont connus. A partir de la période de révolution P du couple et du demi grand axe apparent A – corrigé des effets de perspective dans le cas où le plan de l'orbite n'est pas perpendiculaire à la ligne de visée –, on peut utiliser la troisième loi de Kepler pour calculer la distance d du couple, exprimée en parsecs, à l'aide de la formule suivante :

$$d = (M_1 + M_2)^{1/3} P^{2/3} / A,$$

à condition d'exprimer A en secondes d'arc, M_1 et M_2 en masses solaires et P en années terrestres.

Cependant, comme seuls P et A sont mesurables directement, il faut supposer que ces étoiles obéissent à une relation supplémentaire du type relation masse-luminosité ou masse-type spectral pour évaluer leurs masses. On utilise cette méthode jusqu'à 200 pc, mais bientôt, on l'utilisera à l'envers : grâce à *Hipparcos* (toujours lui !), ce sont les masses stellaires qui seront déduites de la distance connue alors avec précision, et non l'inverse.

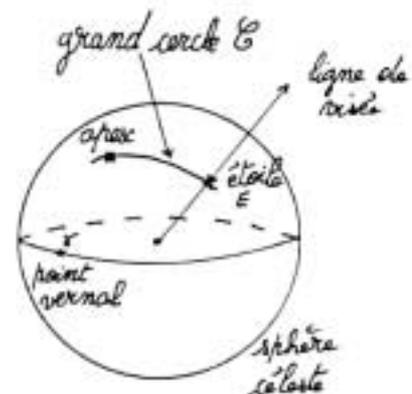
d. Parallaxe séculaire

Dans cette méthode, on tire profit du mouvement propre du Soleil par rapport à l'ensemble des étoiles proches : on sait depuis Herschell (1783) que le Soleil semble se diriger vers un point de la sphère céleste nommé *apex*, situé dans la constellation d'Hercule, avec une vitesse d'environ 20 km/s.

Du fait de ce mouvement, l'allure d'un groupe d'étoiles situées à des distances comparables de la Terre semble se modifier avec le temps, et ce d'autant plus rapidement que ces étoiles sont proches du Soleil, et que la ligne de visée vers ce groupe fait un angle θ avec la vitesse du Soleil proche de 90 degrés. Bien entendu, les étoiles observées peuvent avoir un mouvement propre, et ce n'est qu'en moyennant leurs mouvements apparents que l'on peut obtenir une information sur leur distance. Cette dernière s'obtient en parsecs à l'aide de la formule :

$$d = \frac{4,16 \sin \theta}{\left\langle \frac{d\theta}{dt} \right\rangle},$$

où le mouvement propre moyen $\left\langle \frac{d\theta}{dt} \right\rangle$ est exprimé en secondes d'arc par an.



3. Distances extra-galactiques

Quant aux galaxies, plusieurs méthodes sont disponibles pour évaluer leurs distances.

Pour quelques galaxies proches, on peut utiliser la méthode de la parallaxe photométrique. Observées dans ces galaxies, céphéides, RR Lyrae (un autre type de variables moins brillantes que les céphéides) et novæ constituent autant de « chandelles standards » dont la magnitude absolue peut être obtenue plus ou moins facilement, et qui peuvent donc être utilisées pour obtenir leurs distances.

On utilise pour les galaxies plus lointaines des méthodes secondaires, basées par exemple sur le diamètre des plus grandes des régions H II (nuages d'hydrogène ionisé,

comme celui de la Grande Nébuleuse d'Orion), la luminosité des supernovae à leur maximum, les fluctuations statistiques de luminosité des bras des galaxies spirales, ou encore la relation de Tully-Fisher entre la luminosité absolue d'une galaxie et la largeur de la raie de 21 cm de l'hydrogène.

Mais surtout, en 1930, Hubble découvrait l'expansion de l'Univers : $v = H_0 d$... Les vitesses de fuite v des galaxies sont proportionnelles à leurs distances ; H_0 est la constante de Hubble, et v est déterminée grâce au décalage vers le rouge des spectres dû à l'effet Doppler. Néanmoins, on bute rapidement sur un problème fondamental : que vaut H_0 ? L'estimation de cette valeur a donné (et donne toujours) lieu à des batailles épiques entre astronomes. On s'est ainsi aperçu que la relation période-luminosité des céphéides – la plus utilisée des « chandelles standards » pour déterminer la distance des galaxies proches, et donc estimer la constante de Hubble – n'est pas unique, et qu'il faut de plus tenir compte de l'absorption de la lumière par les poussières de notre Galaxie et par celles de la galaxie observée. L'absorption dans cette dernière dépend de façon cruciale – mais très mal connue – de son orientation par rapport à notre ligne de visée. Le résultat de toutes ces incertitudes est que la constante de Hubble est entachée d'une erreur d'environ trente pour-cent...

De plus, on a observé des mouvements à grande échelle des galaxies du Groupe Local (ensemble des galaxies proches, à laquelle la nôtre appartient), qui se superposent au mouvement d'expansion et engendrent de nouveaux écarts. Comme une loi si simple devient finalement très compliquée !

On exploite depuis peu un autre effet pour estimer H_0 : l'effet Sunyaev-Zel'dovich. On a en effet remarqué que, dans un amas de galaxies, les électrons chauds du milieu inter-amas « chauffaient » les photons du fond cosmologique fossile du Big Bang à 2,7 K. Le spectre de ce rayonnement en est affecté : le nombre de photons de grande longueur d'onde ($\lambda > 2$ mm) diminue, et si on utilise cette partie du spectre pour obtenir une estimation de la température du fond cosmologique, on obtient une valeur plus faible que 2,7 K. En combinant cet écart de température et les caractéristiques émissives de l'amas, on peut déterminer sa distance ; la mesure de sa vitesse de fuite v permet finalement d'évaluer H_0 .

La détermination de H_0 est un défi permanent pour les cosmologistes ! Elle est très importante car elle permet de calculer l'âge de l'Univers, mais il arrive parfois que certaines étoiles semblent plus vieilles que l'Univers lui-même ! Cette conclusion, bien entendu inacceptable, fait actuellement l'objet de débats passionnés...

Yaël Nazé

Références

1. *Galaxies et cosmologie, Les étoiles et Méthodes physiques de l'observation* dans la collection Astrophysique de Savoirs Actuels/InterEditions/Editions du CNRS.
2. *Astronomie*, Philippe de la Cotardière, Larousse.