

# LES DISTANCES DANS L'UNIVERS

James Lequeux, Observatoire de Paris

*L'article décrit les différentes méthodes historiques utilisées depuis le XVI<sup>e</sup> siècle pour déterminer la distance des astres de notre Galaxie puis celles qui se trouvent bien au-delà. Il rappelle la controverse qui eut lieu en 1920 entre Shapley et Curtis sur la possibilité des « univers-îles » situés bien au-delà de notre Galaxie.*

Jusqu'au XVI<sup>e</sup> siècle, on ne savait à peu près rien sur la distance des objets astronomiques, même ceux du Système solaire à l'exception de la Lune. Tycho Brahe est un des premiers, sinon le premier, à avoir pensé que si un astre, par exemple la comète qu'il était en train d'étudier, occupe la même position par rapport aux étoiles voisines lorsqu'on l'observe au même moment depuis deux lieux distants l'un de l'autre, il doit être lointain : il a ainsi montré que cette comète, de même que la supernova qu'il avait découvert en 1572, étaient des objets beaucoup plus éloignés que la Lune. Le même raisonnement a été utilisé en 1672 par Cassini et Richer en France pour obtenir la distance de Mars lorsqu'elle était au plus près de la Terre<sup>1</sup>. Les deux premiers ont vu que sa position était légèrement décalée par rapport aux étoiles voisines selon qu'on l'observait depuis Paris ou depuis Cayenne en Guyane : c'est l'effet de parallaxe. Ils en ont déduit sa distance, puis en appliquant les lois de Kepler la distance de la Terre au Soleil, certes peu précise mais 20 fois plus grande que ce qu'on imaginait à l'époque.

## Les distances dans notre Galaxie, la Voie lactée

Les étoiles étant énormément plus lointaines que le Soleil, il est évidemment difficile d'obtenir leur distance. Pour ceci, il a fallu sélectionner des étoiles très brillantes ayant un mouvement propre important, c'est-à-dire se déplaçant rapidement sur le ciel. Elles sont donc certainement relativement assez proches, et observer leur position par rapport aux étoiles voisines beaucoup plus faibles, que l'on pouvait donc à bon droit supposer bien plus lointaines. Cette fois, l'observation à partir de deux lieux sur la surface de la Terre n'avait aucune chance de donner un résultat, et il fallait faire l'observation à partir de positions éloignées de la Terre sur son orbite, donc à des moments différents de l'année. Les premiers résultats positifs sont arrivés en 1838, grâce au perfectionnement des instruments d'observation qui permettaient une meilleure précision dans la mesure des positions des étoiles. Entre 1837 et 1838, Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) a ainsi pu mesurer la distance de l'étoile 61

Cygni, tandis qu'Otto Wilhelm von Struve (1819-1905) obtenait celle de Véga et Thomas Maclear (1794-1879) celle de  $\alpha$  Centauri, qui s'est plus tard révélée une des deux étoiles les plus proches de nous.

On exprime généralement la distance des étoiles par leur parallaxe, c'est à dire l'angle sous lequel on verrait le rayon de l'orbite terrestre depuis l'étoile<sup>2</sup>. On peut aussi l'exprimer en parsec, qui comme son nom l'indique est la distance d'un objet depuis lequel on verrait ce rayon sous un angle de 1 seconde de degré. Par exemple, la parallaxe de  $\alpha$  Centauri est de 0,751", correspondant à une distance de  $1/0,751 = 1,33$  parsec. Le parsec est l'unité de distance utilisée par les astronomes professionnels, tandis que les astronomes amateurs tendent à utiliser l'année-lumière, la distance parcourue par la lumière pendant 1 an, qui parle peut-être mieux à l'imagination. 1 parsec = 3,26 années-lumière.

Les progrès dans la mesure de la parallaxe des étoiles ont été assez lents, car c'est une mesure difficile. Cependant, en 1924, le *General Catalogue* de Schlesinger en recensait 1870. Puis vinrent les satellites astrométriques Hipparcos, et plus récemment Gaia, qui mesuraient plusieurs fois dans l'année la position des étoiles dans un système de référence basé sur la position des quasars, lesquels sont des objets extrêmement éloignés et donc fixes à la précision des mesures. Hipparcos ne couvrait pas la totalité de la Galaxie, ce qui n'est pas le cas de Gaia qui a mesuré la parallaxe de près de 2 milliards d'étoiles, dont certaines sont en dehors de notre Galaxie et appartiennent aux Nuages de Magellan, deux galaxies satellites de la nôtre situées à une cinquantaine de kiloparsecs (kpc) de nous.

Il existe d'autres méthodes pour obtenir des distances dans notre Galaxie, dont l'intérêt est qu'elles permettent d'accéder à d'autres objets que les étoiles. Comme le disque galactique tourne sur lui-même en se déformant, il y a une relation entre la distance et la vitesse d'éloignement ou de rapprochement (la vitesse radiale) des objets dans une direction donnée : on peut la mettre à profit pour avoir la distance des objets dont la vitesse radiale est connue

<sup>1</sup> Voir l'article sur le sujet dans le n° 137 des Cahiers Clairaut (2012) accessible en ligne.

<sup>2</sup> Voir schéma page 11.

(figure 1). C'est le cas, par exemple des nébuleuses gazeuses comme la fameuse nébuleuse d'Orion, dont on peut obtenir la vitesse radiale en mesurant le déplacement de leurs raies d'émission par effet Doppler-Fizeau ; ceci peut se faire aussi bien en optique qu'en radio car le gaz

ionisé émet aussi des raies de recombinaison radio de l'hydrogène, de l'hélium et du carbone, ce qui permet d'atteindre des objets qui sont invisibles optiquement en raison de l'absorption de la lumière par les poussières interstellaires.

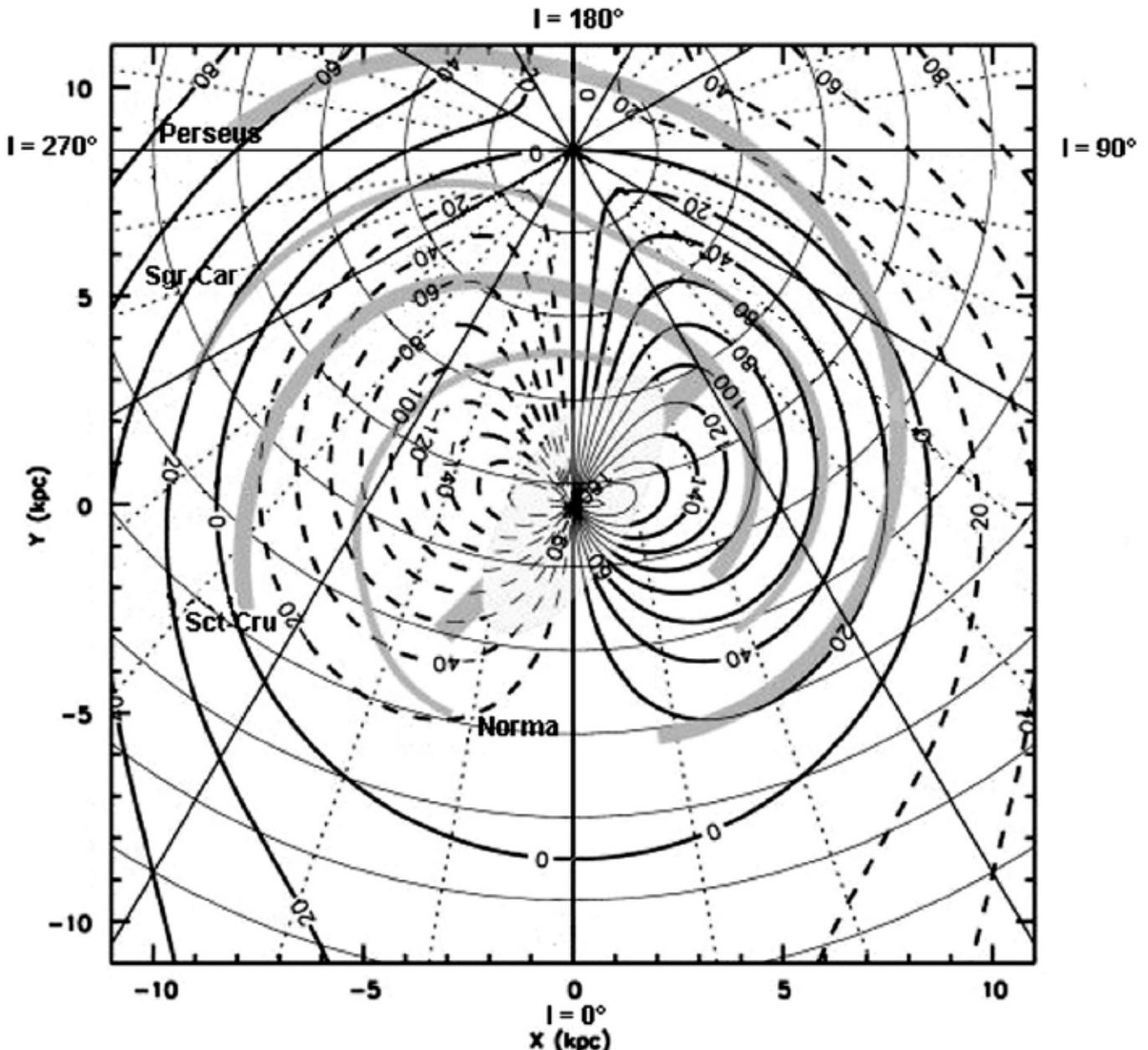


Fig.1. Le champ de vitesses radiales du disque galactique. Nous sommes à la position  $x = 0, y = 8,5$  kpc, et les vitesses sont exprimées par rapport à nous. Le Centre galactique est à la position (0, 0). Les lignes d'égale vitesse positives (éloignement) sont en traits pleins, celles de vitesses négatives (rapprochement) en traits interrompus. Les vitesses radiales sont indiquées en km/s. On voit que les lignes de visées dans la région intérieure au Soleil coupent deux fois les iso-vitesses, ce qui peut conduire à une ambiguïté lorsqu'on utilise la vitesse radiale d'un objet pour en déduire sa distance. Les principaux bras spiraux sont indiqués en grisé, avec leur nom.

Le gaz interstellaire du disque galactique, qui est principalement composé d'hydrogène atomique concentré dans les bras de spirale et qui produit la raie radio à 21 cm de longueur d'onde, peut aussi être utilisé pour obtenir la distance d'objets comme les nébuleuses gazeuses, les restes de supernovæ ou les pulsars, qui émettent des ondes radio dans le continuum : ces ondes sont absorbées par l'hydrogène atomique à 21 cm, ce qui permet de savoir derrière quels nuages interstellaires se trouve la source. La figure 2 en donne un exemple. Les distances obtenues

par vitesse radiale sont forcément peu précises en raison des mouvement aléatoires des sources et des nuages de gaz absorbants, mais c'est mieux que rien quand on n'a pas d'autre critère de distance, et elles se sont révélées très utiles pour produire les cartes du disque galactique et de ses différents constituants.

Une méthode bien plus précise, mise en service en 1981, est réservée à une catégorie d'objets bien particulière, les étoiles massives en formation. Celles-ci expulsent de

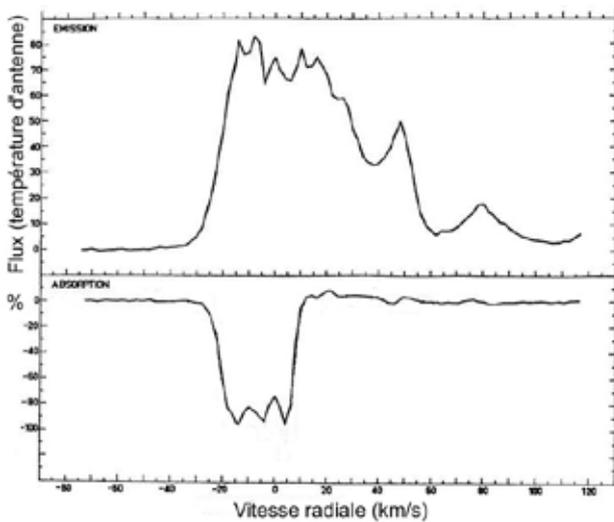


Fig.2. Profil de la raie 21 cm en absorption (en bas) devant la radiosource RCW 49, qui est une nébuleuse gazeuse invisible optiquement (longitude galactique  $284,3^\circ$ ), et en émission au voisinage immédiat (en haut). Il n'y a pas d'absorption aux vitesses radiales supérieures à 5 km/s, ce qui permet d'avoir sa distance approximative, soit 5 kpc. Adapté de Goss et al. (1972).

temps en temps des petits globules de gaz contenant de la vapeur d'eau, lesquels produisent une émission maser à 1,35 cm de longueur d'onde. Les observations de cette émission par interférométrie à très longue base (VLBI pour *Very Long Baseline Interferometry*) permettent de suivre le déplacement angulaire de ces petits globules et de mesurer en même temps leur vitesse radiale. On s'aperçoit qu'ils proviennent d'une source bien localisée, et la combinaison de leur déplacement angulaire et de leur vitesse radiale permet d'obtenir la distance de cette source. Un exemple est montré figure 3.

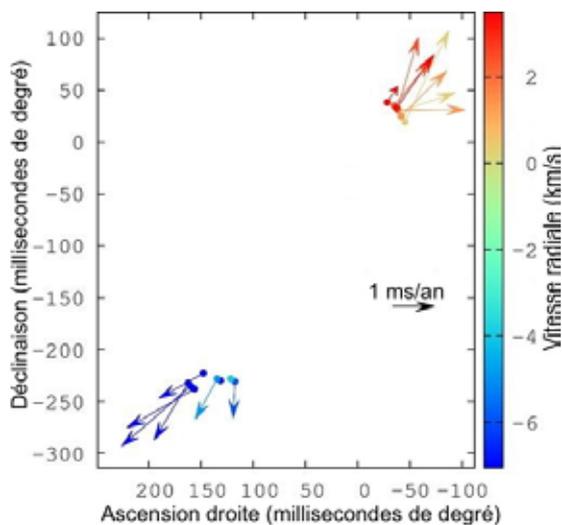


Fig.3. Mouvement des globules de l'étoile massive en formation AFGL 5142 émettant la raie maser de  $H_2O$  à 1,35 cm de longueur d'onde. La source, visible seulement dans l'infrarouge et donc non représentée, est au centre et a émis il y a environ 3 ans des globules dont le mouvement latéral est représenté par des flèches, colorées selon leur vitesse radiale. Comme la vitesse angulaire et la vitesse radiale sont toutes les deux connues et que tous les globules viennent sensiblement du même point, on en déduit la distance de la source,  $2\,140 \pm 50$  parsecs. D'après Burns et al., 2017.

## Premières mesures de la distance des galaxies, et controverses sur cette distance

Bien évidemment, les méthodes de mesure de distance que nous venons de décrire n'étaient pas toutes disponibles au début du  $xx^e$  siècle. On ignorait totalement à cette époque la distance des « nébuleuses », dont certaines avaient la forme de spirales, que l'on observait loin du plan de la Voie lactée. On savait cependant qu'elles pouvaient contenir des étoiles et des objets gazeux. Certaines de ces étoiles, observées dans les Nuages de Magellan qui étaient visiblement les plus proches de ces nébuleuses, ont un éclat qui varie périodiquement, ce qui les identifie à une classe d'étoiles variables de la Voie lactée, étoiles appelées céphéides d'après le nom de leur prototype,  $\delta$  Cephei. L'astronome américaine Henrietta Leavitt (1868-1921), étudiant les céphéides du Petit Nuage de Magellan, qui étaient toutes à peu près à la même distance, découvrit en 1912 une relation entre leur luminosité et la période de leur variation d'éclat : elles sont d'autant plus lumineuses qu'elles sont plus lentes. Or on connaissait dans la Voie lactée la distance de céphéides dont la période de variation et la luminosité étaient connues. En les comparant à celles du Petit Nuage de Magellan, Ejnar Hertzsprung (1873-1967) put donc déterminer la distance de ce dernier, 11 kiloparsecs (kpc). En fait, cette distance était fortement sous-estimée en raison de différentes erreurs qu'il serait trop long d'exposer ici : en 1918, Harlow Shapley (1885-1972) la portait à 29 kpc. La vraie distance est 61 kpc.

On peut aussi utiliser pour mesurer les distances les étoiles géantes rouges les plus lumineuses, dont la magnitude absolue est la même partout.

Mais que dire de la distance des autres nébuleuses, comme celle d'Andromède ? En 1920, une controverse eut lieu entre Shapley et Heber Curtis (1872-1942). Shapley pensait que ces objets appartenaient à notre Galaxie, dont on avait d'ailleurs beaucoup surestimé les dimensions, tandis que Curtis imaginait que c'étaient des « univers-îles » plus ou moins semblables à la Voie lactée mais situés à grande distance. Curtis critiquait à tort l'estimation de la distance du Petit Nuage de Magellan, qu'il trouvait exagérée, mais remarquait qu'avec les instruments de l'époque on ne distinguait pas d'étoiles dans ses univers-îles, ce qui montrait qu'ils devaient être très lointains. De son côté, Shapley pensait que ces objets, dont les spectres (médiocres à l'époque) ne montraient guère les raies caractéristiques des étoiles, et où on ne distinguait effectivement pas d'étoiles individuelles sauf dans les Nuages de Magellan, devaient être d'une autre nature et appartenir à notre Galaxie.

Les choses en restèrent là jusqu'à ce qu'Edwin Hubble (1889-1953), profitant du grand télescope de 2,5 mètres de diamètre qui venait d'être mis en service au Mont Wilson, en Californie, parvienne à résoudre en étoiles la grande « Nébuleuse » d'Andromède et sa voisine Messier 33. Grâce à de très nombreuses photographies, il découvrit même dans la première en 1923 des céphéides semblables à celles de notre Galaxie et des Nuages de Magellan, ce qui lui permit d'en obtenir la distance, comme on l'avait fait précédemment pour ces derniers : 285 kpc, encore une fois très sous-estimée (le chiffre actuel est environ 800 kpc). Mais peu importe : le dilemme était résolu, ces galaxies, comme on les appelle aujourd'hui, étaient bien extérieures à la Voie lactée.

## Les distances extragalactiques

Le problème maintenant était d'obtenir la distance de galaxies plus lointaines. Il fallait donc y trouver des objets très lumineux que l'on pourrait comparer aux mêmes objets proches de distance connue. Les céphéides et les étoiles géantes rouges étaient bien faibles, mais Hubble utilisa les étoiles bleues les plus lumineuses de ses galaxies, et aussi les novæ, qui sont des étoiles subissant une explosion nucléaire superficielle qui les rend très brillantes pendant quelques semaines. Il se servit aussi de la luminosité des grands complexes étoiles jeunes/nébuleuse gazeuse ionisée qui lui semblaient être plus ou moins semblables les uns aux autres. Il obtint ainsi des distances, à vrai dire assez approximatives, pour 24 galaxies (dont les deux Nuages de Magellan). Il considéra également leur vitesse radiale mesurée par spectroscopie, en particulier par Vesto Slipher (1872-1934), pour constater qu'elle augmentait en moyenne avec la distance : c'est la fameuse loi de Hubble de 1929, qui montre que l'Univers est en expansion. Notons en passant que l'astronome belge Georges Lemaître (1894-1966) avait devancé Hubble pour trouver cette relation

dès 1927, ce qui n'a été officiellement reconnu que récemment. Il serait fastidieux de retracer ici l'histoire agitée des révisions de la constante de Hubble-Lemaître qui relie distance et décalage spectral : Hubble donnait 500 km/s par million de parsecs (Mpc), les valeurs actuelles obtenues par plusieurs méthodes sont voisines de 70 km/s par Mpc.

À partir des années 1930, on a utilisé à l'envers la relation distance-décalage spectral pour obtenir la distance des galaxies, mais c'était une solution de facilité. Il fallait la vérifier en obtenant directement la distance des galaxies lointaines. La solution est venue des supernovæ, qui sont l'explosion finale de différentes classes d'étoiles. Cependant ces explosions sont rares (à peu près tous les 50 ans en moyenne dans une grande galaxie comme la nôtre), et il faut attendre que l'une d'elles survienne pour en déduire la distance de la galaxie où elle s'est produite : d'où l'intérêt de l'exploration systématique répétée de tout le ciel, que l'on réalise actuellement avec des télescopes spécialisés comme le Vera Rubin télescope américain.

Il existe différents types de supernovæ, que l'on peut distinguer par la manière dont leur luminosité varie avec le temps. Celles qui sont utiles pour la cosmologie sont les supernovæ de type SN1a, qui résultent de l'explosion d'une étoile naine blanche appartenant à un système double, qui a capturé trop de matière provenant de sa compagne. Elles peuvent être aussi brillantes qu'une galaxie tout entière (figure 4). Les supernovæ de ce type ont toutes la même luminosité à leur maximum, ce qui en fait d'excellentes « chandelles standard ». Ce sont ces supernovæ qui ont permis de découvrir l'accélération de l'expansion de l'Univers. On a pu en observer jusqu'à un décalage spectral de 2,9 grâce au télescope spatial Hubble, et son successeur le télescope spatial James Webb permettra sans doute d'aller encore plus loin. ■



Fig.4. La supernova 1999be dans une galaxie lointaine, observée avec le Télescope spatial Hubble. On l'observe à droite une semaine après son maximum, avec une magnitude de 15,8, aussi lumineuse que la galaxie tout entière. Le décalage spectral des deux objets est de 5 650 km/s.