

Séance du 13 février 2023

La mesure du temps et de l'espace II. Mesure des distances en astronomie

Jean-Pierre NOUGIER

Professeur honoraire à l'Université de Montpellier
Académie des Sciences et Lettres de Montpellier

MOTS CLÉS

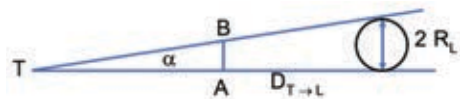
Céphéides, Supernova, Hubble-Lemaître, télémétrie, parallaxe, magnitude, Gaïa, fonds cosmologique, chandelles standard

RÉSUMÉ

On indique les principales méthodes de mesure des distances astronomiques : distances de la Terre à la lune et au Soleil mesurées dans la Grèce antique, mesures modernes par télémétrie radar, parallaxe, utilisation des Céphéides, Supernova Ia, loi de Hubble-Lemaître. Cette conférence montre, au-delà des différentes méthodes d'évaluation des distances cosmiques, que la science ne progresse pas de façon uniforme et continue, que l'astronomie est passée du stade de "science d'observation" au stade de "science expérimentale", que les notions de temps et d'espace sont indissociables, que l'astronomie risque de remettre en cause certains concepts physiques fondamentaux, qu'elle nous renseigne sur notre passé, mais aussi, ce faisant, sur l'avenir de notre Univers.

L'homme a toujours été fasciné par la ronde des étoiles dans le ciel, par les planètes du système solaire, il a donc cherché à connaître les structures de l'Univers, les distances entre les astres. Il a pour cela commencé par la Terre, puis a construit de proche en proche une « échelle des distances cosmiques », jusqu'à atteindre les limites de notre univers.

La technique générale de mesure des distances consiste en effet à mettre au point des outils ou instruments permettant de mesurer d'abord de petites distances, avec lesquels on étalonne ceux permettant de mesurer des distances plus grandes, et ainsi de suite de proche en proche.



1. Le système solaire

La Lune

Dès l'Antiquité, on tente de mesurer la distance $D_{T \rightarrow L}$ de la Terre à la Lune. Il faut pour cela mesurer (figure 1) l'angle α sous lequel la Lune est vue depuis la Terre T, et le rayon R_L de la Lune. La trigonométrie était alors inconnue, mais pas le théorème de Thalès : il suffisait alors de dessiner l'angle α , et le segment AB (figure 1) : de la mesure des longueurs TA et AB, et de la détermination de R_L on en déduisait : $TA/AB = D_{T \rightarrow L}/2R_L$.

Figure 1 : Distance Terre-Lune

En étudiant les éclipses de la Lune, Aristarque de Samos (310-230 av. J.-C.) avait remarqué que la Lune mettait un temps $T = 1$ heure pour disparaître dans le cône d'ombre de la Terre, et qu'une éclipse totale de Lune durait au maximum 2 heures. En supposant (figure 2) que les rayons du Soleil étaient parallèles, il en déduisit que le diamètre de la Lune était le tiers de celui de la Terre ; il a estimé $\alpha = 2^\circ$, et en a conclu que notre satellite se trouvait à 486 000 km de la Terre.

Deux cents ans plus tard, Hipparque de Nicée (180-125 av. J.-C.) remarque que le cône d'ombre n'est pas un cylindre, mais un cône dont l'angle au sommet est égal à l'angle sous lequel, de la Terre, on voit le Soleil, qui par ailleurs est égal à l'angle sous lequel de la Terre on voit la Lune (figure 3). Il en déduit que le diamètre de la Lune est égal au quart du diamètre de la Terre (en réalité $D_L = 0,27 D_T$), estime $\alpha = 0,5^\circ$ et tombe juste en estimant la distance Terre-Lune à 384 000 km.

Comme on le voit, la mesure de l'angle α est critique. La description de la mesure de l'angle sous lequel on voit le Soleil, faite par Archimède¹ montre qu'à cette époque le goniomètre était inconnu², il n'est donc pas surprenant de constater des erreurs d'un facteur 4 sur la détermination de α ³.

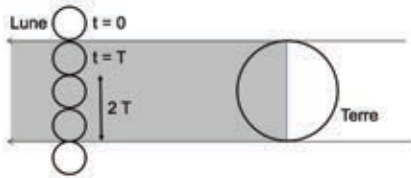


Figure 2 : Mesure du rayon de la Lune
(Aristarque de Samos)

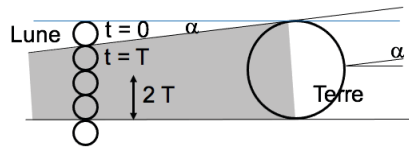


Figure 3 : Mesure du rayon de la Lune
(Hipparque de Nicée)

Nous avons expliqué dans une conférence précédente⁴ le principe de la triangulation, pour la mesure des distances terrestres. C'est en utilisant cette méthode que les astronomes Lalande (1732-1807) et La Caille (1713-1762) ont calculé en 1751 la distance exacte de la Terre à la Lune, en visant le centre du disque lunaire depuis Berlin et Le Cap.

La méthode la plus précise est la télémétrie laser, dont le principe lui aussi a été donné pour mesurer les distances terrestres⁵. À partir des missions Apollo en 1969, les astronautes ont posé des rétro-réflecteurs sur la surface de la Lune. Au total, cinq panneaux réflecteurs de ce type ont successivement été déposés à la surface lunaire. Les mesures actuelles utilisent toujours cet équipement et impliquent de multiples

¹ Archimède, *Arénaire*, imprimé par Amazon Italia Logistica S.r.l., Torrazza Piemonte (TO), Italie, ISBN 978-1977742810, p. 8 *sqq.*

² Le goniomètre vertical de Ptolémée, décrit dans *La Grande Syntaxe Mathématique de l'Astronomie* (Almageste) (voir par exemple : <https://kotsanas.com/fr/exh.php?exhibit=1301008>) ne semble pas être connu d'Archimède, contemporain d'Aristarque.

³ Pour obtenir la précision de 0,5 degré d'arc sur l'estimation de l'angle α sous lequel on voit la Lune à partir de la Terre, il est vraisemblable qu'Aristarque n'ait pas fait de mesure, mais ait utilisé l'estimation suivante : la Lune met 1 heure pour entrer dans le cône d'ombre de la Terre, ce qui signifie qu'en une heure, elle se déplace d'un diamètre de Lune. Or elle effectue une révolution complète autour de la Terre en un temps estimé alors à 29 jours soit 696 heures. Elle parcourt donc 360 degrés en 696 heures, donc un diamètre de Lune tournant en 1 heure représente une rotation de $1/696^e$ de 360 degrés, soit $360/696 = 0,5$ degré.

⁴ Nougier J.P., « Mesure du temps et des distances terrestres », *Bull. Acad. Sc. Lettr. Montp.* n. 52 (2021).

⁵ Nougier J.P., « Mesure du temps et des distances terrestres ».

installations laser autour du monde. Ainsi le « laser-lune » de l'observatoire de la côte d'Azur, installé sur le plateau de Calern près de Grasse, a pour but la détermination précise de la distance Terre-Lune et de ses variations⁶. Une impulsion lumineuse est émise depuis la Terre vers un réflecteur installé sur la Lune, la lumière réfléchie est détectée, on mesure le temps t séparant l'émission de la réception, d'où l'on déduit la distance Terre-Lune : $D = ct/2$, où c est la vitesse de la lumière. La précision obtenue sur la mesure de t est de l'ordre de 10^{-11} secondes (soit un centième de milliardième de seconde !) ce qui donne une précision de l'ordre de 4 mm sur une distance D qui vaut 384 400 km. Bien entendu, il faut corriger certains paramètres qui perturbent la mesure⁷. Ces mesures permettent d'étudier l'orbite et les mouvements de la Lune, de vérifier avec une précision de 10^{-13} la théorie de la relativité générale d'Einstein (effet de la gravité du Soleil sur la Terre), ou de voir que la Lune s'éloigne de la Terre de quelque 3,8 centimètres chaque année.

Le Soleil

Dans l'Antiquité, Aristarque de Samos, après avoir déterminé la distance Terre-Lune, a essayé de calculer la distance Terre-Soleil, en remarquant qu'entre le premier et le dernier quartier de la Lune, il s'écoule 14 jours, pour une période de révolution totale alors estimée à 29 jours. En conséquence, l'angle 2α (figure 4) vaut $14/29$ de la circonférence, soit 173,8 degrés ; l'angle α vaut donc 86,9 degrés. Par suite : (Terre-Soleil) = (Terre-Lune)/ $\cos \alpha$, soit 18,5 fois la distance Terre-Lune (comme il a déjà été expliqué, la trigonométrie étant alors ignorée, cette valeur a été déterminée par des considérations géométriques). En réalité la distance Terre-Soleil est égale à 400 fois la distance Terre-Lune : une telle erreur est due à la difficulté d'alors d'apprécier avec précision d'une part la période de rotation de la Lune, d'autre part et surtout la position précise du premier et du dernier quartier. Elle eut cependant, à l'époque, le mérite de montrer que le Soleil n'était pas à l'infini, mais tout de même qu'il était très loin.

Aristarque en tira par ailleurs une conclusion tout à fait surprenante rapportée dans la préface de l'ouvrage d'Archimède *Arénaire*⁸ : puisque la Lune et le Soleil sont vus sous le même angle, si le Soleil est 18,5 fois plus loin que la Lune, c'est que son rayon est 18,5 fois celui de la Lune, soit d'après les mesures d'Aristarque $18,5/3 = 6,2$ fois le rayon de la Terre ; le Soleil est donc bien plus gros que la Terre, or il n'est pas vraisemblable que ce soit le gros astre qui tourne autour du petit, c'est le petit qui doit tourner autour du gros : la Terre tourne autour du Soleil ! 1800 ans avant Copernic et Galilée !

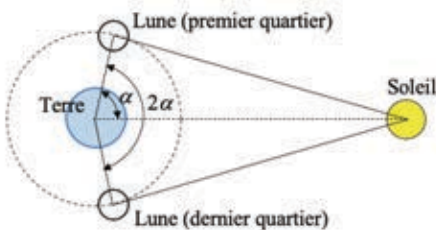


Figure 4 : Positions relatives du Soleil, de la Terre et de la Lune aux premier et dernier quartiers

⁶ <https://www.oca.eu/fr/>.

⁷ <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/laser-distance-terre-lune.xml>.

⁸ Voir n. 1.

La première détermination relativement précise a été réalisée par Jean-Dominique Cassini, Jean Picard et Jean Richer en 1672, qui ont mesuré la distance Terre-Mars par parallaxe de base Paris-Cayenne, ils en ont déduit que la distance Terre-Soleil valait 130 millions de km⁹. Une meilleure précision a été obtenue en utilisant la trajectoire de Vénus : 153 millions de km en 1769 et 149,9 millions de km en 1874 et 1882. On ne peut pas effectuer une visée sur le Soleil, car il est trop lumineux. Comment la mesure de la distance Terre-Vénus permet-elle d'obtenir la distance Terre-Soleil ? La troisième loi de Képler stipule que le rapport T^2/a^3 est le même pour toutes les planètes, où T est la période de révolution de la planète autour du Soleil, et a est le demi grand axe de l'ellipse de la trajectoire de la planète (c'est-à-dire le rayon de l'orbite de la planète, si celle-ci est pratiquement circulaire). Ainsi par exemple : $(T^2/a^3)_{\text{Terre}} = (T^2/a^3)_{\text{Vénus}}$. Or on connaît les périodes de révolution des planètes, en particulier Terre (365 jours) et Vénus (225 jours), on en déduit $a_{\text{Vénus}} = 0,724 a_{\text{Terre}}$. On mesure la distance D entre la Terre et Vénus lorsque ces deux planètes sont en conjonction (figure 5), on voit qu'alors : $D = a_{\text{Terre}} - a_{\text{Vénus}} = a_{\text{Terre}} - 0,724 a_{\text{Terre}} = 0,276 a_{\text{Terre}}$. Ainsi la mesure de D permet de connaître le rayon de l'orbite de la Terre.

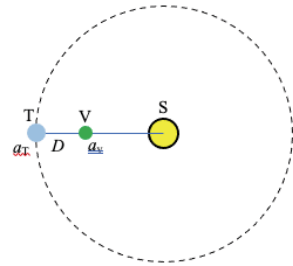


Figure 5 : Conjonction Soleil-Terre-Vénus

Actuellement la distance Terre-Soleil est déterminée avec une précision d'une dizaine de mètres en utilisant des sondes spatiales dont la position est déterminée par télémétrie radar. La télémétrie radar est identique à la télémétrie laser : au lieu d'utiliser des ondes électromagnétiques dans le domaine des fréquences visibles ou alentour (laser), le radar utilise des ondes électromagnétiques de fréquences microondes (de l'ordre du giga hertz), permettant de pénétrer par exemple des atmosphères opaques à la lumière visible, d'analyser certaines surfaces, etc. Elle est en pratique limitée aux distances du système solaire.

Au-delà du système solaire, les distances gigantesques nécessitent l'utilisation d'autres unités de mesure.

2. Unités de mesure astronomiques

Le kilomètre, et *a fortiori* le mètre, est une unité bien trop petite pour évaluer les distances astronomiques, les utiliser conduirait à des chiffres comportant un nombre de zéros astronomique, c'est le cas de le dire !

Trois unités sont en fait utilisées en astronomie :

- L'unité astronomique (UA) est le rayon de l'orbite terrestre (figure 6), elle vaut environ 150 millions de km : elle est utilisée essentiellement à l'intérieur du système solaire.
- L'Année lumière (al) est la plus utilisée pour le reste de l'Univers (distances entre les étoiles, entre les galaxies...). C'est la distance parcourue en une année par la lumière, elle vaut environ 10 000 milliards de km (en réalité 9 461 milliards de km).
- Le parsec (pc) est la distance (figure 6) d'où l'on voit l'unité astronomique sous un angle de 1 seconde d'arc. Le parsec est 3 fois plus grand que l'année lumière (en fait $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ al} = 30\,800 \text{ milliards de km}$).

⁹ http://clea-astro.eu/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_137_05.pdf.

La conversion¹⁰ se fait suivant les relations :

1 ua = 149 598 870 km = 8,317 minutes lumière = $3,1648 \times 10^{-5}$ al = $4,848 \times 10^{-6}$ pc.

1 al = $9,4605 \times 10^{12}$ km = 63 239,7 ua = 0,3066 pc.

1 pc = $30,8568 \times 10^{12}$ km = 3,2616 al = 206 264,8 ua.

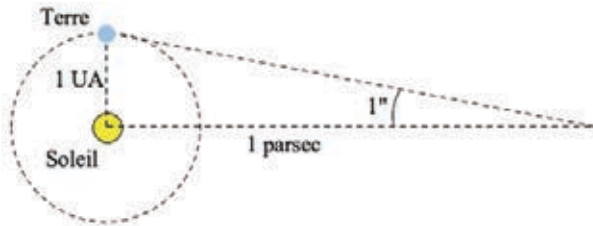


Figure 6 : définitions de l'unité astronomique et du parsec

Il est important de prendre conscience du fait que, lorsqu'on observe un objet à 10 millions d'années lumières par exemple, cela ne signifie pas nécessairement qu'il se trouve à une *distance* de 10 millions de fois $9,4 \times 10^{12}$ km : cela signifie que la lumière que nous observons aujourd'hui a été émise par cet objet il y a 10 millions d'années, donc que nous observons cet objet tel qu'il était il y a 10 millions d'années : « voir plus loin » signifie « voir plus tôt ». Mais depuis que cet objet a émis la lumière qui nous parvient aujourd'hui, il s'est déplacé dans l'espace (notamment à cause de l'expansion de l'univers, voir paragraphe 7 ci-dessous). Si sa vitesse de déplacement est négligeable par rapport à la vitesse de la lumière (par exemple 300 km/s comparé à 300 000 km/s), on pourra dire que cet objet est à une *distance* de 10 millions d'années-lumière, avec une bonne approximation (dans cet exemple une approximation de 1/1000). Mais si l'objet se déplace à une vitesse non négligeable devant celle de la lumière (voir paragraphe 7 ci-dessous), alors sa distance à nous pourra être significativement différente de 10 millions de fois $9,4 \times 10^{12}$ km. Par exemple, l'âge de l'univers étant de 13,8 milliards d'années, on pourrait croire que le rayon observable de l'univers est de 13,8 milliards d'années-lumière : il n'en est rien, son rayon est estimé actuellement à 46,5 milliards d'années-lumière, soit 440 000 milliards de milliards de km.

La figure 7 indique les principales méthodes utilisées pour mesurer les distances astronomiques, en fonction de leur grandeur. Il faut bien prendre conscience que l'échelle logarithmique adoptée en ordonnées de ce graphique « aplati » considérablement les grandes distances : en passant d'une graduation à la suivante au-dessus, on **multiplie** la distance par 10 !

Afin de se faire une idée de ce que représente l'échelle des distances de la figure 7, on se rappellera que notre système solaire a un diamètre de l'ordre de 1 al. Il fait partie de la Voie lactée, qui est une galaxie spirale barrée, comportant plus de 200 milliards

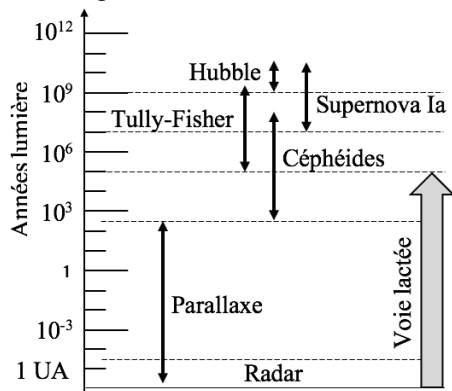


Figure 7 : principales méthodes d'étude des distances astronomiques

¹⁰ Le site suivant permet d'effectuer très facilement des conversions pour un très grand nombre d'unités, en particulier (mais pas seulement) astronomiques :

<http://www.astro.ulg.ac.be/~demoulin/units.htm>.

d'étoiles et 100 milliards de planètes ; son diamètre est de 100 à 120 000 al (comme représenté figure 7), son épaisseur est en moyenne de 1 000 al, c'est donc un disque dont le diamètre est plus de 100 fois l'épaisseur. La planète la plus lointaine du Soleil est Neptune, à une distance moyenne du Soleil de l'ordre de 30 UA. L'orbite de Neptune par rapport à la voie Lactée peut être représentée par une pièce de 1 cm de diamètre par rapport à la superficie de la France. L'effet gravitationnel du Soleil s'étend bien au-delà de l'orbite de Neptune, théoriquement jusqu'à l'infini, en pratique jusqu'à environ une à deux années-lumière.

La galaxie spirale la plus proche de nous est la galaxie d'Andromède, à 2,54 millions d'années-lumière ; elle se rapproche de nous à une vitesse d'environ 120 km/s : ces deux galaxies entreront en collision dans environ 4,6 milliards d'années, bien après le Grand Nuage de Magellan qui nous percute dans environ un milliard d'années¹¹.

3. Étoiles proches : parallaxe

Pour mesurer des distances sur Terre, nous avons vu qu'on peut utiliser la parallaxe. Les distances des étoiles proches sont mesurées aussi par parallaxe, mais en utilisant une base « astronomique », en pratique les positions de la Terre à six mois d'intervalle : le rayon de l'orbite terrestre étant de 150 millions de km, la base est alors longue de 300 millions de km, et l'on mesure les angles α et β que fait la visée de l'étoile proche étudiée avec une étoile lointaine (figure 8). On obtient ainsi de bons résultats pour des étoiles « proches » jusqu'à des distances de quelques centaines d'années-lumière. Au-delà, les angles mesurés sont trop petits pour que la précision soit suffisante. Sur les 200 milliards d'étoiles que compte notre galaxie, seul un millier est accessible par mesure de parallaxe depuis la Terre.

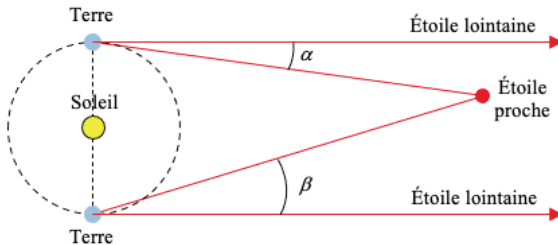
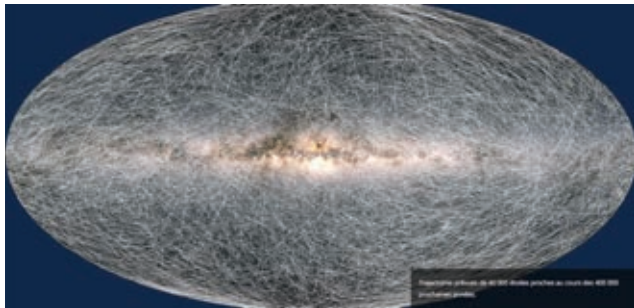


Figure 8 :
Mesure de la distance d'une
étoile proche par parallaxe

¹¹ La collision de deux galaxies ne donne pas lieu à un feu d'artifice de collisions d'étoiles. En fait, les étoiles d'une galaxie sont si éloignées les unes des autres, par rapport à leurs dimensions propres, que très peu d'étoiles entrent en collision. À titre d'exemple, l'étoile la plus proche de nous, Proxima du Centaure, est située à 4,24 al du Soleil dont le diamètre est de 1,39 millions de km ; si le Soleil était ramené à la grosseur d'une balle de tennis (6,5 cm de diamètre), Proxima du Centaure serait à 1875 km de distance : ainsi on peut se représenter le « nuage » d'étoiles constituant une galaxie comme un « nuage » de balles de tennis distantes de 2000 km les unes des autres, chacune ayant un « champ gravitationnel » de l'ordre de 800 à 1500 km ! En général, les forces gravitationnelles font que le résultat de la collision de deux galaxies spirales donne une galaxie elliptique unique, mélange et recombinaison des deux anciennes galaxies, et dont les étoiles ont des mouvements désordonnés les unes par rapport aux autres, alors que dans les galaxies spirales elles sont pratiquement toutes entraînées dans un même mouvement de rotation autour du centre de la galaxie. On peut estimer grossièrement le temps que durera la collision entre la Voie Lactée et la galaxie d'Andromède : c'est le temps d'interpénétration des deux galaxies, c'est-à-dire environ le temps qu'il faudra aux premières étoiles de la galaxie d'Andromède pour traverser la Voie lactée, donc le temps qu'il faudra à une étoile filant à 120 km/s pour parcourir 120 000 al, soit environ 300 millions d'années.

Lancé en décembre 2013, le satellite GAIA¹² est placé le 8 janvier 2014 en orbite stationnaire à 1,5 millions de km de la Terre, il effectue un tour sur lui-même en 6 heures : tel un phare, il explore la voûte céleste et effectue chaque jour 500 millions de mesures, dépouillées, traitées et analysées sur Terre, par 450 ingénieurs et astronomes de 25 pays (dont une centaine rien qu'en France). GAIA est un instrument exceptionnel : sa précision peut atteindre 1 % sur la mesure des distances, et 0,5 km/s sur la mesure des vitesses tangentielles. En effet, sa résolution peut atteindre 7 μ as (microsecondes d'arc), c'est-à-dire la dimension d'une pièce de 1 € sur la Lune vue de la Terre ! À cette précision, il faut tenir compte de l'effet de lentille gravitationnelle du Soleil, des planètes et même de satellites. GAIA embarque aussi un photomètre et un spectromètre, de sorte que sont mesurées non seulement les positions et vitesses des étoiles, mais aussi leur luminosité, température, composition chimique. Le troisième catalogue de GAIA, mis à jour pour sa première partie le 7 septembre 2020¹³ et pour sa seconde partie le 30 juin 2022¹⁴, recense plus de 1,8 milliards d'étoiles (soit un centième du nombre d'étoiles de notre galaxie, mais aussi des étoiles de galaxies voisines), ainsi que 160 000 astéroïdes, plusieurs millions de quasars et de galaxies. Par exemple, GAIA a prévu les trajectoires de 40 000 étoiles proches au cours des 400 000 prochaines années : la figure 9 montre les trajectoires de quelques-unes de ces 40 000 étoiles. On trouvera toutes les données souhaitables sur la mission GAIA dans la référence¹⁵.

Figure 9 : Trajectoires prévues par GAIA de 40 000 étoiles proches au cours des 400 000 prochaines années¹⁶



Grâce à la précision extraordinaire des appareils modernes, on peut mesurer par parallaxe des distances jusqu'à quelques centaines d'années-lumière.

4. « Chandelles standard » : principe

Un certain nombre de méthodes utilisent des « chandelles standard », c'est-à-dire des objets (étoiles, galaxies...) de luminosité connue ou supposée connue : leur

¹² GAIA est l'acronyme de Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, car on pensait à l'origine devoir utiliser une méthode interférométrique pour mesurer les distances. On s'est aperçu par la suite qu'il était possible d'obtenir la même précision avec une configuration utilisant des miroirs classiques. La méthode interférométrique a été abandonnée, mais le nom GAIA a subsisté.

¹³ <https://gaia.obspm.fr/la-mission/les-resultats/article/gaia-edr3-3-decembre-2020>.

¹⁴ Voir par exemple le journal du CNRS du 30 juin 2022 : <https://lejournel.cnrs.fr/articles/gaia-le-catalogue-galactique-nouveau-est-arrive>.

¹⁵ <https://gaia.obspm.fr>.

¹⁶ Voir *supra* n. 13.

comparaison avec la luminosité d'objets semblables permet alors de déterminer la distance de ces derniers objets.

Magnitude des étoiles : définition

On définit pour cela la magnitude, qui est une quantité utilisée exclusivement en astrophysique pour mesurer la luminosité. Celle-ci peut se mesurer par photométrie, à l'aide d'une cellule photoélectrique, ou d'une caméra CCD semblable aux capteurs de lumière de nos appareils photographiques. Soit L la luminosité d'un objet (étoile, galaxie, etc.) mesurée depuis la Terre (ou, ce qui revient au même, depuis un satellite en orbite autour de la Terre, pour s'affranchir des perturbations apportées par l'atmosphère terrestre). On définit la magnitude apparente m par :

$$m = -2,5 \log(L/L_0) \quad (1)$$

où $\log$ désigne la fonction logarithme décimal, et où L_0 est une luminosité de référence, qui par convention a été prise comme étant celle de l'étoile visible la plus brillante, Véga (appelée aussi Sirius). Il s'agit bien d'une magnitude *apparente* : en effet, plus une source lumineuse est éloignée, moins elle nous semble intense, donc sa luminosité vue de la Terre diminue ; vue d'une position plus proche, le même objet nous paraîtra plus lumineux. On remarquera le signe moins dans la formule précédente, d'où il résulte que plus la luminosité augmente, plus la magnitude diminue ! Ceci pour rester conforme à l'usage ancien, selon lequel les étoiles de première grandeur (magnitude 1) étaient les plus brillantes, celles de 6^e grandeur (magnitude 6) les moins brillantes, à peine visibles à l'œil nu. Ainsi, d'après la formule (1), la magnitude apparente de Véga vaut $-2,5 \log(L_0/L_0) = 0$. La plus petite luminosité observable à l'œil nu vaut $m = 6$ soit, d'après la formule (1), 4 millièmes de la luminosité de Véga.

La *magnitude absolue* M est, par convention, définie comme la magnitude apparente qu'aurait l'objet lumineux si on l'observait à une distance de 10 parsecs. On peut montrer qu'un objet de magnitude relative m situé à la distance d (à condition de mesurer d en parsecs) possède une magnitude absolue M donnée par :

$$M = m - 5 \log(d) + 5 \quad (d \text{ en parsecs}) \quad (2)$$

Cette relation est importante, car si on connaît deux des trois grandeurs m , M et d , on peut déterminer la troisième.

Comment mesurer la magnitude absolue d'une étoile ? Étant donnée une étoile proche E (figure 10), on mesure à partir de la Terre (ou d'un satellite) sa magnitude apparente m à l'aide d'un photomètre, et sa distance d par exemple par une méthode de parallaxe : la relation (2) permet, en exprimant d en parsecs, de calculer sa magnitude absolue M .

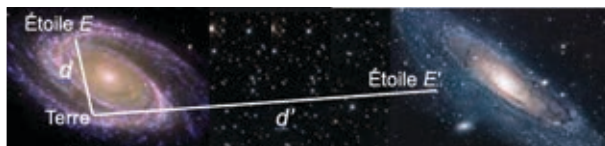


Figure 10 : détermination de la distance d' de l'étoile E' de même type que l'étoile E à la distance connue d .

Quelles étoiles peut-on voir ?

Donnons quelques exemples d'application de ce la relation (2) :

- L'étoile Véga se trouve à $d = 25,3 \text{ al} = 7,86 \text{ pc}$, sa magnitude relative est $m = 0$: la relation (2) donne $M = 0,58$.
- La magnitude relative du Soleil est $m = -26,73$, il se trouve à une distance $d = 1 \text{ ua} = 4,84 \times 10^{-6} \text{ pc}$: d'où $M = 4,83$. Le soleil est beaucoup moins lumineux que Véga :

d'après la relation (1), valable aussi pour les magnitudes absolues, $L_s/L_0 = 0,012$: le Soleil est presque 100 fois moins brillant que Véga.

– Jusqu'à quelle distance pouvons-nous voir à l'œil nu une étoile comme le Soleil ? C'est une distance d telle qu'une étoile de magnitude absolue égale à celle du Soleil, soit $M = 4,83$, devienne à peine visible à l'œil nu, c'est-à-dire possède une magnitude apparente $m = 6$: ces valeurs portées dans l'équation (2) donnent : $4,83 = 6 - 5\log(d)+5$, d'où $d = 17,14$ pc = 55,9 al. Le diamètre de notre galaxie étant de 120 000 al, cela montre que seule une infime partie des étoiles « standard » de notre galaxie semblables au Soleil peuvent être vues à l'œil nu. Mais cette infime minorité des 200 milliards d'étoiles de notre galaxie représente tout de même environ 12 à 13 000 étoiles !

– Cela ne veut pas dire qu'il nous soit impossible de voir des objets au-delà de notre Voie lactée. Par exemple, une supernova de magnitude $M = -19$ peut être perçue à l'œil nu à 326 millions d'années-lumière !

– Le satellite GAIA peut détecter des étoiles jusqu'à la magnitude $m = 20$, il peut donc voir des Soleils jusqu'à 10 900 pc, soit 35 500 al, il peut donc voir le tiers des étoiles standard de notre galaxie.

– Le satellite James-Webb, qui a été lancé le 25 décembre 2021, avec $m = 34$, devrait voir des soleils jusqu'à 6,92 Mpc = 22,36 Mal (22,36 millions d'années-lumière), il peut donc détecter toutes les étoiles standard de notre galaxie, de la galaxie d'Andromède et même 10 fois plus loin ! Une galaxie, qui comprend typiquement 100 à 200 milliards d'étoiles, est évidemment bien plus lumineuse qu'une étoile unique, on peut donc voir avec ce satellite des galaxies aux confins de l'univers !

Mesure des distances en utilisant des « chandelles standard »

Il se trouve que, parmi toutes les étoiles E observées, certaines possèdent des propriétés similaires, qui font qu'elles possèdent la même magnitude absolue M . De telles étoiles constituent des « chandelles standard ». Il en est ainsi en particulier des Céphéides et des supernovæ Ia qui feront l'objet des paragraphes 5 et 6 ci-dessous. Ces chandelles standard constituent un moyen puissant pour la détermination des distances cosmiques.

En effet, supposons que l'étoile E de la figure 10 soit une chandelle standard, dont on a déterminé la magnitude absolue M comme indiqué plus haut. Imaginons qu'on repère dans une autre galaxie une étoile E' de même type que E (figure 10) : on connaît donc sa magnitude M qui est la même que celle de E ; on mesure par photométrie sa magnitude relative m , et en utilisant la relation (2) on en déduit sa distance d' , c'est-à-dire la distance de la galaxie à laquelle elle appartient, car les distances intergalactiques sont très grandes par rapport à la taille des galaxies (par exemple, la galaxie la plus proche de la Voie lactée est la galaxie d'Andromède, à 2,54 Mal [millions d'années-lumière] de nous, alors que la taille de notre galaxie est de l'ordre de 100 à 120 000 al).

Les principales méthodes de mesure des distances utilisent les « chandelles standard », essentiellement les céphéides et les supernovæ Ia. Nous ne parlerons donc pas ici de la méthode de Tully-Fisher.

5. Les Céphéides

Au début du XX^e siècle, l'astronome Henrietta Leavitt (1868-1921), calculatrice au département photométrie de l'Observatoire de l'Université de Harvard (Cambridge, Massachusetts), étudie les plaques photographiques des Nuages de Magellan provenant de l'observatoire d'Arequipa (Pérou), elle identifie plus de 1 700 étoiles, et s'aperçoit en 1912 que la luminosité de certaines d'entre elles varie de façon périodique avec le temps (figure 11), la période P étant en général de l'ordre de quelques jours (typiquement entre

2 et 40 jours). Les étoiles dont la périodicité est la plus lente sont les plus lumineuses. La première étoile étudiée possédant cette caractéristique étant δ -Céphée de la constellation de Céphée dans notre galaxie, ces étoiles ont été appelées les Céphéides¹⁷. La Céphéide la plus proche de nous est l'étoile Polaire. Plus précisément, Henrietta Leavitt a établi qu'il existait, entre la magnitude absolue M et la période P , une relation de la forme :

$$M = a \log P + b \quad (3)$$

où a et b sont des constantes, dont les valeurs (en particulier celle de b) ont été affinées depuis les premières estimations d'Henrietta Leavitt, à partir de l'étude des Céphéides les plus proches, dont la distance a pu être mesurée par parallaxe¹⁸, en particulier dans le Grand Nuage de Magellan et dans la Voie Lactée (figure 12)¹⁹

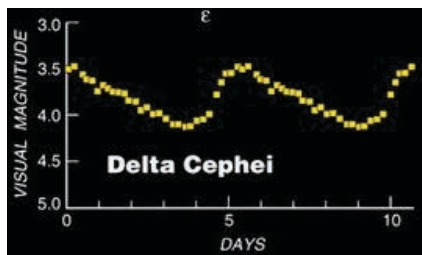
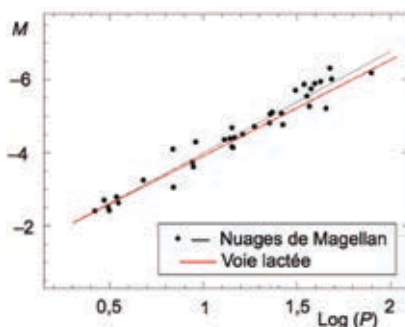


Figure 11 : Variation de la magnitude apparente de l'étoile delta de la constellation Céphée en fonction du temps
(Crédit : G.B. Lima Neto, cours Université de São Paulo, Brésil)

Figure 12 : Relation entre la magnitude absolue M dans le domaine visible ($\lambda = 550 \pm 89$ nm) et la période de la pulsation lumineuse P de Céphéides : points (•) : mesure dans le Grand Nuage de Magellan ; ligne noire continue (—) : droite de régression des mesures ; tirets rouges (---) : droite de régression de mesures dans la Voie lactée.



¹⁷ Le fonctionnement d'une étoile est régi par l'équilibre entre les forces gravitationnelles qui tendent à la faire se contracter, et les réactions nucléaires du cœur (explosions nucléaires) qui tendent à la dilater. La plupart des étoiles n'oscillent pas : lorsque l'étoile se contracte, sa température augmente, ce qui produit une dilatation, et inversement ; en général on aboutit à un équilibre. Dans les Céphéides, lorsque l'étoile se contracte, la température varie peu, l'hélium s'ionise, les molécules de l'atmosphère se resserrent, donc l'atmosphère s'opacifie, l'énergie dégagée par le cœur est piégée par l'atmosphère (comme dans une serre), ce qui provoque une dilatation. Cette dilatation provoque le phénomène inverse : les noyaux atomiques se recombinent avec les électrons, l'atmosphère redevient transparente, les rayonnements peuvent s'échapper, ce qui entraîne un refroidissement, donc une contraction de l'étoile (voir : https://astronomie.fr/3eme_partie/variables/varPeriodiques.php).

¹⁸ Actuellement, la relation entre magnitude absolue M et période P est donnée par : $M = -3,10 \log P + 1,70(m_b - m_v) - 2,37$ où m_b et m_v sont les magnitudes apparentes respectivement dans la partie bleue et dans la partie jaune du spectre visible (voir <https://gaia.obspm.fr>, paragraphe 4.3).

¹⁹ Storm J., Gieren W., Fouqué P., Barnes T.G., Soszyński I., Pietrzyński G., Nardetto N., Queloz D., « Calibrating the Cepheid period-luminosity relation from the infrared surface brightness technique », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 534, article A95, octobre 2011 <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117154>

En conséquence, la détermination de la période P des Céphéides lointaines permet de connaître leur magnitude absolue M . La mesure de leur magnitude apparente m permet alors d'en déduire la distance d à laquelle elles se trouvent, à partir de la relation (2).

Les Céphéides sont des chandelles standard utilisées en astronomie extragalactique et permettent de déterminer des distances jusqu'à 15 Mal (millions d'années-lumière) à partir de la Terre et 60 à 70 Mal par satellite.

6. Supernova Ia

Une supernova résulte de l'implosion d'une étoile en fin de vie, et se manifeste notamment par une gigantesque explosion qui s'accompagne d'une augmentation brève mais fantastiquement grande de sa luminosité : une supernova peut briller pendant quelques semaines autant qu'une galaxie entière. La figure 13 montre la supernova SN 2011fe. Vues depuis la Terre, les supernovas apparaissent donc souvent comme des étoiles nouvelles (c'est la raison pour laquelle on les appelait autrefois des *stellae novae*), alors qu'elles correspondent en réalité à des disparitions d'étoiles. Il est possible de retrouver dans les archives chinoises les traces des supernovas (ou supernovæ) des années 185, 369, 1006, 1054 et 1181 après Jésus-Christ. La supernova de l'an 1006 fut extrêmement brillante, il est possible de la retrouver aussi dans les archives arabopersanes ainsi qu'en Europe. Les supernovas jouent un rôle essentiel dans l'histoire de l'univers : au cours de son explosion, une supernova d'une part libère les éléments chimiques qu'elle a synthétisés au cours de son existence, d'autre part synthétise d'autres éléments plus lourds, enfin favorise la formation de nouvelles étoiles en contribuant à la contraction du milieu interstellaire grâce à l'onde de choc produite par l'explosion.



Figure 13 : SN 2011fe est une supernova de type Ia, découverte le 24 août 2011. Située à 22,8 millions d'al, elle fait partie de la galaxie M101 dans la constellation de la Grande Ourse (https://en.wikipedia.org/wiki/SN_2011fe), elle atteint une magnitude absolue de -19, soit 2,5 millions de Soleils.

Il existe plusieurs types de supernovas, seules celles de type Ia nous intéressent ici. Elles appartiennent à un système binaire d'étoiles nées ensemble, pas trop massives, mais de masses différentes. La plus massive (de masse inférieure à 1,4 fois la masse du Soleil) a une durée de vie plus courte que sa voisine. Lorsqu'elle a épuisé, par réactions thermonucléaires, tout d'abord son hydrogène fusionné en hélium, puis son hélium fusionné en carbone et oxygène, elle s'effondre par gravitation sur elle-même pour devenir une naine blanche, c'est-à-dire une étoile dont la masse est de l'ordre de celle du Soleil et le rayon de l'ordre de celui de la Terre : c'est donc une étoile très dense (masse volumique de l'ordre de 1 tonne par centimètre cube !), très peu lumineuse, dont la gravité à la surface est considérable (de l'ordre de 250 000 fois plus forte qu'à la surface de la Terre, c'est comme si une masse de 1 kg pesait 250 tonnes !). Il en résulte que la naine blanche attire la matière de sa compagne géante rouge, un transfert de matière s'établit au profit de la naine blanche dont la masse augmente (figure 14). Lorsqu'elle atteint 1,44 fois la masse du Soleil, elle implose par gravité, provoquant une réaction thermonucléaire (fusion du carbone) qui la fait exploser. La matière est expulsée à une vitesse considérable (plusieurs milliers de km par seconde) et s'étend dans l'espace,

formant un type de nébuleuse appelé « rémanent de supernova » (figure 15). La nébuleuse du Crabe par exemple est un rémanent de supernova.

Figure 14 : Vue d'artiste d'une naine blanche « avalant » la matière d'une géante rouge. La matière arrachée à la géante rouge forme un disque d'accrétion qui peu à peu s'agglomère à la naine blanche (© P. Marenfeld, NOAO, AURA, NSF²⁰)

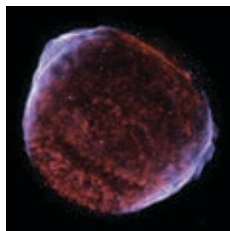


Figure 15 : Image en fausses couleurs, prise par le satellite de spectroscopie en rayons X Chandra lancé en 1999²¹, du rémanent de la supernova SN 1006, située à 7 000 al. En bleu les rayons X produits par des particules de haute énergie, en vert et rouge les gaz éjectés à plusieurs millions de degrés. Photo prise en avril 2003 pendant une durée de 61 heures.

Crédit NASA/CXC/Rutgers/J.Hughes et al.

Étant donné que le processus concerne des étoiles de même structure et démarre toujours à la même masse de 1,44 masses solaires, toutes les supernovas Ia ont la même magnitude maximale, de l'ordre de $M = -19,5$ en bande B (bleu ou proche ultra-violet) : ce sont des chandelles standard. Il suffit donc de mesurer la magnitude apparente maximale m pour en déduire la distance à l'aide de la relation (2).

Encore faut-il s'assurer que la supernova soit bien de type Ia : ceci est possible car elle est caractérisée en majorité par la désintégration radioactive de Nickel 56 en Cobalt 56, puis en Fer 56. On reconnaît une supernova Ia par la courbe de décroissance de luminosité : celle-ci est d'abord rapide (déclin du nickel), puis plus lente (déclin du cobalt). D'autre part, le spectre montre des bandes d'absorption intenses, dues au silicium ionisé une fois, également caractéristiques des supernovas Ia.

Les difficultés rencontrées dans la mesure des distances sont essentiellement les suivantes :

- Une supernova est un événement rare : bien qu'il s'en produise probablement une toutes les 2 ou 3 secondes dans l'univers²², on en détecte peu (quelques-unes par siècle).
- Le laps de temps entre la détection et le maximum de luminosité est très court (quelques jours).
- La méthode est, comme les autres, affectée par l'absorption interstellaire (la relation (2) montre qu'une erreur absolue de 0,5 sur la détermination de la magnitude se traduit en une erreur de 25 % sur la détermination de la distance).

Toutes les mesures faites par les Céphéïdes dans les galaxies de distances connues, grâce aux observations du télescope Hubble, ont confirmé la constance de la magnitude absolue des supernovas Ia.

C'est cette méthode de mesure qui a permis aux physiciens, en 1998, de démontrer que l'expansion de l'Univers s'accélérait.

²⁰ <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/astronomie-disque-accretion-3819/>.

²¹ <https://chandra.harvard.edu/photo/2005/sn1006/>.

²² David Castelvecchi, « Gigantic Japanese detector prepares to catch neutrinos from supernovae », *Nature*, 27 février 2019, DOI:[10.1038/d41586-019-00598-9](https://doi.org/10.1038/d41586-019-00598-9), Corpus ID: 256769695

7. Loi de Hubble-Lemaître

7.1. Mesure de la vitesse des étoiles et des galaxies

On peut mesurer la vitesse des objets lumineux en utilisant un phénomène bien connu des amateurs de courses automobiles : l'effet Doppler-Fizeau. Lorsqu'une voiture de course s'approche à grande vitesse, le son de son moteur, perçu par un spectateur immobile, est plus aigu que si la voiture était à l'arrêt ; si la voiture s'éloigne, le son perçu est plus grave. Ce phénomène se constate aussi avec des sources lumineuses : lorsqu'une source lumineuse se rapproche d'un observateur, celui-ci perçoit une couleur de fréquence plus élevée que celle de la couleur émise (décalage vers le bleu) ; si la source s'éloigne, l'observateur perçoit une couleur de fréquence plus basse (décalage vers le rouge) : si la source lumineuse, émettant une lumière de longueur d'onde λ_{source} , se déplace à la vitesse V par rapport à l'observateur, celui-ci perçoit une lumière de longueur d'onde λ_{obs} telle que :

$$V = c (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{source}}) / \lambda_{\text{source}} \quad (4)$$

où c désigne la vitesse de la lumière. Ainsi le spectre de raies de l'hydrogène d'une galaxie (l'hydrogène est l'élément de loin le plus présent dans l'espace) se décale en fonction de la vitesse de la galaxie, vers le rouge si la galaxie s'éloigne de nous, vers le bleu si elle se rapproche. Les galaxies lointaines s'éloignent de nous, leur spectre lumineux est donc décalé vers le rouge.

7.2. À partir des chandelles standard : la loi empirique de Hubble

L'astronome Edwin Hubble a mesuré la distance d d'étoiles Céphéides situées dans différentes galaxies, et la vitesse V d'éloignement de ces galaxies par le décalage vers le rouge de leur spectre [relation (4)]. Il a ainsi découvert la relation empirique (5), qu'il a publiée en 1929²³ : les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse V approximativement proportionnelle à leur distance d :

$$V = H_0 d \quad (5)$$

H_0 est la constante de Hubble, et la relation (5) a été appelée « loi de Hubble ».

Ainsi, plus une galaxie est loin de nous, plus elle s'éloigne vite²⁴. Comme on le voit, H_0 est le rapport entre une vitesse V et une distance d , c'est donc l'inverse d'un temps, donc doit s'exprimer en sec^{-1} (ou encore : $1/H_0$ doit s'exprimer en secondes). En fait, V est souvent de l'ordre de quelques dizaines de km/s, et d est une distance astronomique, qu'on évalue en parsecs. On a donc pris l'habitude d'exprimer H_0 en km/s/Mpc (kilomètres par seconde par mégaparsec). Par exemple, une valeur de H_0 de 70 km/s/Mpc signifie qu'une galaxie située à une distance de 1 Mpc (soit 1 million de parsecs, soit 3,26 millions d'années-lumière) s'éloigne de nous à la vitesse de 70 km/s.

Considérons alors une galaxie lointaine dont on cherche à déterminer la distance. On détermine sa vitesse d'éloignement V en mesurant le décalage de son spectre vers le rouge – relation (4) –, est si on connaît la valeur de H_0 on en déduit sa distance d à l'aide de la relation (5).

²³ Hubble E., « A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 15, 1029, p. 168-173.

²⁴ Il s'agit là d'un mouvement d'ensemble des galaxies. À ce mouvement se superposent des variations locales dues aux interactions gravitationnelles entre galaxies voisines. Par exemple, comme mentionné plus haut, la galaxie d'Andromède se rapproche de nous, de même nous nous rapprochons du super amas de la Vierge.

En réalité, ce n'est pas si simple. En effet, à quelle vitesse s'éloigne une galaxie lointaine située à 1 milliard de parsecs (soit 1000 Mpc, ou 3,2 milliards al) ? Avec $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$, cela signifie que sa vitesse est 70 km/s si elle est éloignée de 1 Mpc : si elle est éloignée de 1000 Mpc, sa vitesse est donc de 70 000 km/s, ce qui n'est plus négligeable par rapport à la vitesse de la lumière : les galaxies très lointaines s'éloignent à des vitesses relativistes. Il faut utiliser non pas la relation (4) de l'effet Doppler classique, mais l'effet Doppler relativiste. Encore faut-il que s'appliquent les lois de la relativité restreinte. Or nous ne sommes pas ici dans le cas de galaxies qui s'éloignent dans un univers fixe (telles des voitures de course s'éloignant sur une piste) : nous sommes dans le cas de galaxies fixes par rapport à un univers qui se dilate !

En utilisant les mesures de distances décrites ci-dessus, communément appelées « échelle des distances cosmiques » ou « chandelles standard », Riess et al.²⁵ ont déterminé la valeur de H_0 avec une précision de 1 % : $H_0 = 74,03 \pm 1,42 \text{ km/s/Mpc}$.

7.3. À partir du modèle cosmologique standard : la loi théorique de Lemaître

a) La loi de Lemaître

Deux ans avant Hubble, en 1927, Georges Lemaître avait découvert la relation (5) à partir des lois de la relativité générale d'Einstein. Ce résultat, qu'il avait publié en français dans un journal Belge²⁶, était passé complètement inaperçu. En 2018, les membres de l'Union Astronomique Internationale ont recommandé de désigner la relation (5) décrivant l'expansion de l'univers sous le nom de « loi de Hubble-Lemaître ». Dans cette formulation, la constante de Hubble revêt une signification physique : $1/H_0$ représente l'âge de notre Univers. Ainsi, si l'on exprime $H_0 = 74,03 \pm 1,42 \text{ km/s/Mpc}$ en sec^{-1} , on trouve $1/H_0 = 13,5$ milliards d'années.

Comment est-il possible d'obtenir un tel résultat de façon théorique ? Afin de s'en faire une idée de façon simple, on représente souvent l'expansion de l'Univers par un ballon de baudruche que l'on gonfle. Des tâches de peinture sur le ballon représentent des amas galactiques. Au fur et à mesure que le ballon se dilate, les tâches, bien qu'étant fixes par rapport au ballon, s'éloignent les unes des autres. Ainsi (figure 16) à partir du point originel O (la position initiale de l'Univers au moment du big-bang), les galaxies A et B s'éloignent de O , dans les directions Ox et Oy faisant entre elles un angle α , à la vitesse u qui est la vitesse d'expansion de l'Univers. À l'instant t compté à partir du big-bang, les galaxies A et B ont parcouru à partir de l'origine O une distance $R = u t$, et la distance d qui les sépare est la longueur de l'arc de cercle AB qui vaut $d = R\alpha$, c'est à dire : $d = u t \alpha$, ce qui montre que la distance entre les galaxies A et B augmente à la vitesse $V = u \alpha = d/t$, ce qui est la formule de Hubble-Lemaître, avec $H_0 = 1/t$: l'inverse t de la constante H_0 de Hubble-Lemaître est l'âge de l'Univers. Évidemment ceci est un schéma simpliste, les calculs à partir de la formulation d'Einstein son bien plus compliqués.

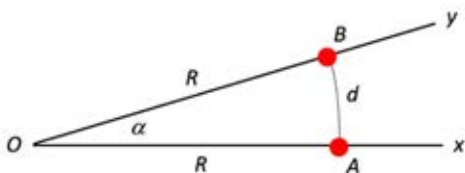


Figure 16 : schéma d'expansion de l'Univers

²⁵ Riess A.G., Casertano S., Yuan W., Macri L.M., Scolnic D., « Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics Beyond Lambda CDM », [arXiv:1903.07603v2](https://arxiv.org/abs/1903.07603v2) [astro-ph.CO].

²⁶ Georges Lemaître, « Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques », *Annales de la société scientifique de Bruxelles* A47, 1927, p. 49-59.

Il est donc possible de déterminer la constante de Hubble-Lemaître à partir d'expériences découlant du modèle cosmologique standard.

b) Mesure de H_0 utilisant le fonds diffus cosmique (CMB pour Cosmic Microwave Background) :

Révéle expérimentalement par Penzias et Wilson en 1964, le CMB (figure 17) est considéré comme l'une des preuves expérimentales les plus solides de la validité du modèle standard et de la création de l'univers à partir du big-bang. Il s'agit des minuscules fluctuations de la température du rayonnement, témoin des fluctuations de densité de plasma de l'univers primordial, mesurées de façon incroyablement précise par le satellite Planck en 2015. Le CMB fournit une carte de l'univers au moment où (à l'âge de 380 000 ans), selon le modèle standard, la température a suffisamment diminué (environ 3000 K) pour que les électrons et les protons du magma initial forment des atomes d'hydrogène. Depuis, l'univers s'est dilaté et refroidi, sa température actuelle est celle d'un corps noir à $2,7260 \pm 0,0013$ K. C'est à partir de ces mesures qu'a été obtenue la valeur la plus précise de H_0 déduite du modèle standard : $H_0 = 67,4 \pm 0,5$ km/s/Mpc.

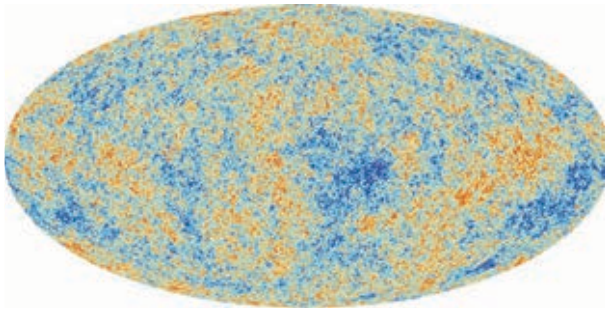


Figure 17 : Carte du fonds diffus cosmique (CMB), selon une projection de Mollweide qui conserve les surfaces, ce qui permet de comparer les zones chaudes (en rouge) et les zones froides (en bleu) du ciel. La température moyenne est de 2,726K (soit - 270,424°C), la différence maximale de température entre zones chaudes et froides est de 0,000 1 degré Celsius. Image réalisée à partir des données recueillies de 2009 à 2013 par le télescope Planck de l'Agence Spatiale Européenne. Ces données ont permis de déterminer l'âge de l'univers (environ 13,8 milliards d'années), sa géométrie (essentiellement plate) et sa composition (95 % de matière noire et d'énergie sombre).

c) Mesure de H_0 utilisant les oscillations acoustiques baryoniques

Les ondes acoustiques qui à partir du big-bang se sont propagées dans l'univers primitif, avant l'apparition de la lumière, ont provoqué une répartition périodique, dans l'espace, des agrégats à partir desquels se sont constituées nos galaxies. L'univers porte ainsi l'empreinte de ces « oscillations acoustiques baryoniques »²⁷ qui se traduisent aujourd'hui par des corrélations entre les positions des amas galactiques. La meilleure valeur obtenue pour H_0 par cette méthode, dite de l'échelle des distances inversée, est $H_0 = 67,77 \pm 1,30$ km/s/Mpc. Mais cette méthode dépend de l'univers primordial, donc du modèle cosmologique utilisé.

²⁷ Les baryons sont des particules composites, c'est-à-dire non élémentaires, composées de trois quarks, les plus connus sont les protons et les neutrons.

d) Autre méthodes

On a donc deux valeurs mesurées de la constante de Hubble H_0 , l'une autour de 74 km/s/Mpc en utilisant la méthode des distances cosmiques mesurées par le « chandelles standard », l'autre autour de 67 km/s/Mpc en utilisant le modèle cosmologique standard. Bien que proches l'une de l'autre, ces deux valeurs sont incompatibles compte tenu des faibles marges d'incertitudes qui leurs sont associées. En effet, l'écart entre les valeurs mesurées par les deux types de méthodes est de 4,4 écarts types²⁸, ce qui signifie que la probabilité pour que cette différence soit due au hasard n'est que de 0,001 %. Si cette différence n'est pas due à un biais expérimental, elle est susceptible de remettre au moins partiellement en cause, soit le modèle standard, soit la validité des lois de la physique dans l'univers primitif, soit le caractère régulier de l'expansion de l'univers. La connaissance précise du taux d'expansion de l'univers est importante pour déterminer l'âge, la taille, et le destin du cosmos. Des efforts importants sont donc accomplis pour trouver d'autres voies afin de lever cette indétermination.

Ces autres méthodes utilisent soit :

- des lentilles gravitationnelles : la lumière émise par un quasar est déviée par la masse d'une galaxie²⁹,
- des ondes gravitationnelles, créées par la collision d'étoiles neutrons ou de trous noirs³⁰,
- des kilonovas, résultant de la fusion d'une étoile neutron avec une autre étoile neutron ou avec un trou noir³¹.

Un récent article de 134 pages contenant 1024 références³² passe en revue tous les résultats obtenus dans ce domaine. Ainsi la communauté des astrophysiciens est divisée de plusieurs manières : il y a ceux qui tiennent pour une valeur de H_0 autour de 74 km/s/Mpc, et ceux qui penchent pour une valeur autour de 67 km/s/Mpc. Il y a ceux qui pensent que les deux valeurs de H_0 sont inconciliables et que cela nécessite de revisiter certaines lois de la physique, et ceux qui sont d'avis que certaines mesures sont entachées d'erreurs non prises en compte aujourd'hui qui, une fois détectées et corrigées, rendront ces deux valeurs compatibles. Parmi ces derniers, Wendy Freedman étudie un nouveau type de « chandelles standard », les géantes rouges, dont la luminosité serait au moins aussi fiable que celle des Céphéides³³.

8. Conclusion

Nous voici, avec la constante de Hubble, parvenus à la fois aux confins de l'univers et à l'origine du temps. Il nous faut donc conclure. Par-delà les différentes méthodes

²⁸ <https://www.ca-se-passe-la-haut.fr/2019/04/nouvelle-mesure-de-la-constante-de.html>.

²⁹ HOLiCOW (H_0 Lenses in COSMOGRAIL's Wellspring), et S. Birrer et al., « HOLiCOW - IX. Cosmographic analysis of the doubly imaged quasar SDSS 1206+4332 and a new measurement of the Hubble constant », arXiv 1809.01274, 24/02/2020.

³⁰ Ligo and Virgo Collaboration, Abbott R.P. et al., « A gravitational-wave measurement of the Hubble constant following the second observing run of Advanced LIGO and Virgo », 13 novembre 2020, [arXiv:1908.06060](https://arxiv.org/abs/1908.06060) [astro-ph.CO] (article cosigné par 1189 auteurs).

³¹ Christensen N., « La constante de Hubble mesurée grâce aux kilonovas », *Nature*, 18 août 2020, <https://www.nature.com/articles/s41467-020-17998-5>.

³² E. Di Valentino *et al.*, « In the Realm of the Hubble tension – a Review of Solutions », arXiv:2103.01183v3 [astro-ph.CO], 5 juin 2021, 134 pages, consultable sur le site : <https://arxiv.org/pdf/2103.01183.pdf>.

³³ Wendy L. Freedman, « Measurements of the Hubble constant : tensions in perspective », *The Astrophysical Journal* 919.1, 2021, p. 16.

d'évaluation des distances cosmiques, cette conférence nous permet de dégager un certain nombre d'enseignements :

– Parmi les quelque 200 milliards d'étoiles de notre galaxie, seules 12 000 à 13 000 sont visibles à l'œil nu.

– Les progrès de la science n'évoluent pas de façon continue : ainsi l'hypothèse de l'héliocentrisme avait été émise par Aristarque vers l'an 250 av. J.-C. et reprise par Archimède, avant d'être rejetée pour des raisons idéologiques puis rétablie 1700 ou 1800 ans plus tard par Copernic et Galilée.

– Les scientifiques sont capables d'imaginer et mettre en œuvre des instruments d'une sophistication et d'une précision extraordinaires : mesure de températures de rayonnement au dix-millième de degré près, pouvoir séparateur d'un instrument d'optique de 7 microsecondes d'arc, mesure de la distance Terre-Lune avec une précision de 4 mm...

– Grâce à ces instruments sophistiqués, nous sommes désormais capables d'observer des objets situés aux confins de notre univers et créés à l'origine de notre temps.

– L'astronomie est passée du stade de « science d'observation » au stade de « science expérimentale » :

- par le lancement de satellites, de sondes et de robots, et le développement d'appareillages d'une qualité et d'une sensibilité extraordinaire déjà évoqués,

- par la prise d'échantillons des planètes et des comètes et leur analyse *in situ* à leur retour sur Terre (ont été ramenés sur Terre plus de 2 tonnes de roches ou de régolites lunaires, des particules de vent solaire, des grains de sol d'astéroïdes³⁴).

– Les notions de temps et d'espace sont indissociables : plus on voit loin, plus on voit tôt. Nous nous déplaçons dans un espace à quatre dimensions : il ne nous est pas possible d'explorer le temps sans nous déplacer dans l'espace, il ne nous est pas possible de nous déplacer dans l'espace sans que « cela nous prenne du temps », nos déplacements dans l'espace ne peuvent pas être instantanés (ils ne peuvent pas se faire plus vite que la vitesse de la lumière).

– L'astronomie et l'astrophysique sont des sciences vivantes, évolutives, sources de discussions et de controverses : ainsi les différentes valeurs de la constante de Hubble-Lemaître (autour de 67 et 74 km/s/Mpc) risquent même de remettre en cause certains concepts fondamentaux.

– Le peu que nous connaissons de la physique porte seulement sur 5 % de notre univers, nous ne connaissons à peu près rien des 95 % restants (masse noire et énergie noire) : la seule chose que nous connaissons est leur existence !

– Enfin, par-delà la satisfaction de notre curiosité naturelle, l'astronomie non seulement nous renseigne sur notre passé, mais aussi, ce faisant, sur l'avenir de l'univers, et nous permettra, peut-être, qui sait ? d'échapper un jour à notre destinée terrestre en permettant à l'humanité de survivre en s'exilant sur une autre planète. Ainsi en mesurant le temps et l'espace, nous explorons le passé et nous préparons l'avenir.

³⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Mission_de_retour_d%27%C3%A9chantillons.