

THÈME : LES DISTANCES

ARTICLE DE FOND

L'unité astronomique (UA) ou comment mesurer l'Univers ?

Jean-Eudes Arlot,

astronome, ancien directeur de l' Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides

Le passage de Vénus du 6 juin 2012 nous rappelle la longue quête des astronomes pour mesurer les distances dans le système solaire et au-delà. C'est l'occasion de revenir sur une unité de mesure particulière, l'unité astronomique.

Qu'est-ce que l'UA?

La mesure de la distance de la Lune, des planètes du système solaire et aussi des étoiles et des objets les plus lointains est une quête de l'humanité depuis la plus haute antiquité. En observant le ciel, comment ne pas se poser la question : à quelle distance se trouvent les astres que j'aperçois dans le ciel ? Sont-ils tous aussi éloignés de nous, situés sur une sphère, dite "céleste" ? Et aussi : quelle est la taille de l'Univers ? Pour répondre à ces questions, il faut se fixer des unités. L'utilisation directe du mètre ou du kilomètre n'est pas la meilleure méthode : l'astronome mesure des angles sur le ciel, jamais directement des distances. En fait, aujourd'hui, on est capable de mesurer quelques distances directement : la distance Terre-Lune par laser et la distance entre la Terre et un corps proche tel un astéroïde géocroiseur¹ ou bien la planète Mars par radar mais c'est tout. Impossible de mesurer directement une autre distance.

Revenons à l'antiquité : comment faire de telles mesures ? On connaît, bien entendu, le principe de la triangulation (figure 1) qui permet de mesurer une distance "de loin", sans "y aller", mais la base du triangle doit être la plus grande possible. Pour les astres du ciel, on prendra donc le rayon terrestre comme base. Les astronomes nomment ce principe, la parallaxe puisque l'angle de visée d'un astre proche change avec la position de l'observateur.

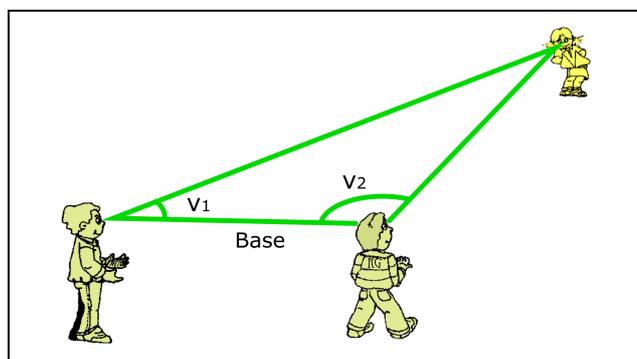


Fig.1. Principe de la triangulation, permettant de déterminer une distance en mesurant des angles. C'est une méthode couramment appliquée par les géomètres et connue depuis l'antiquité. Connaissant la longueur de la base et les deux angles v_1 et v_2 , la géométrie du triangle permet de calculer les deux autres distances

Ainsi, la distance à tel ou tel corps ne s'exprimera pas en kilomètres, mais en angle : la **parallaxe horizontale** qui est la valeur maximale du changement d'angle de visée du même astre selon le site d'observation terrestre (elle est dite horizontale car maximale lorsque l'astre est à l'horizon, cf. figure 2). Pour exprimer la distance Terre-Jupiter, on dira : la parallaxe horizontale de Jupiter est de tel angle, ce qui signifie que depuis Jupiter, le rayon terrestre est vu sous un tel angle. Cette parallaxe, qui indique la distance d'un astre à la Terre, est donc l'angle sous lequel on voit le rayon terrestre depuis cet astre. La distance est donnée sous forme d'angle et l'unité est le rayon terrestre. Ces parallaxes dépendant de la rotation de la Terre autour de son axe, on les appelle **parallaxes diurnes** (figure 2).

¹ Astéroïde dont l'orbite croise celle de la Terre ou s'en approche fortement. Les astéroïdes géocroiseurs orbitent autour du Soleil avec une excentricité plus forte que celle des planètes.

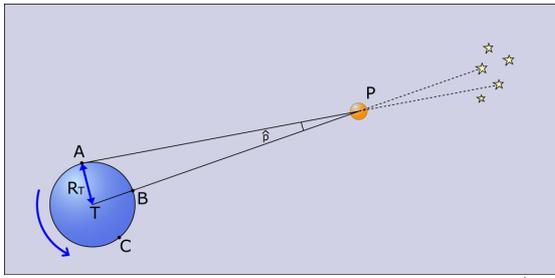


Fig.2. Parallaxe diurne d'une planète. C' est l'angle p sous lequel on verrait le rayon terrestre depuis la planète P . Pour la mesurer, on observe au même moment la position de la planète devant le fond d'étoiles depuis deux points éloignés, A et B par exemple.

On utilise le terme de parallaxe diurne car la rotation de la Terre ferait passer un observateur de B à A (les observations doivent pourtant être simultanées). Il ne faut pas la confondre avec la parallaxe annuelle des étoiles (figure 6).

Ératosthène a mesuré, le premier, le rayon terrestre et, jusqu'à aujourd'hui, on a amélioré régulièrement la détermination de ce rayon. À chaque fois que l'on modifiait cette valeur, on modifiait en même temps toutes les distances données par des parallaxes.

Bien que la distance Terre-Soleil soit la plus intéressante, ce n'est pas par là que l'on a commencé, la parallaxe du Soleil étant très difficile à mesurer.

Pourtant la distance au Soleil est fondamentale : elle va jouer le même rôle que le rayon terrestre pour la mesure des distances aux étoiles.

Ces distances sont incroyablement plus grandes que les distances dans le système solaire et le rayon terrestre bien trop petit pour servir de base à une triangulation. Il va falloir agrandir la base et on va utiliser le rayon de l'orbite terrestre : une observation faite à différentes positions de la Terre sur son orbite va permettre de calculer une parallaxe pour chaque étoile. La distance d'une étoile à la Terre sera donnée par sa parallaxe (ici appelée **parallaxe annuelle** puisqu'elle utilise le mouvement annuel de la Terre). Cette parallaxe est donc l'angle sous lequel on voit le rayon de l'orbite terrestre depuis l'étoile.

On comprend bien que dans ce cas, le rayon de l'orbite de la Terre devienne une unité fondamentale pour la mesure des distances aux étoiles et astres lointains. Ce sera l' "unité astronomique". Mais comment la mesurer ? D'autant plus que l'on a vu que la distance au Soleil n'est pas mesurable directement... Il faudra près de 20 siècles pour y arriver.

Comment mesurer l'UA?

Les tentatives

La distance Soleil-Terre est donc une unité de distance et connaître cette distance est une question

qui a motivé tous les astronomes depuis l'antiquité. Cet astre qui éclaire et entretient la vie, comment est-il fait (la réponse n'arrivera qu'au XX^e siècle), à quelle distance de la Terre se trouve-t-il ? Si la distance de la Lune est vite déterminée grâce aux éclipses, celle du Soleil est beaucoup plus difficile à évaluer. On l'a vu, la notion de triangulation ou de parallaxe est connue des astronomes-géomètres de l'antiquité mais délicate à l'époque à mettre en œuvre. Avant d'effectuer une mesure, il faut savoir ce que l'on va mesurer : il faut un modèle d'univers : forme des astres, positions relatives, mouvements relatifs... Les observations confirment ou non la théorie et l'on itère le processus avec plus de précision, avançant peu à peu vers un modèle décrivant mieux ce qu'on observe.

La mesure du rayon terrestre par Ératosthène (-276, -194) est très bien connue², mais qu'en est-il de la mesure de la distance au Soleil ? Anaxagore (-499, -427) avait estimé le rayon du Soleil à une cinquantaine de kilomètres. Effectivement, si on applique le raisonnement d'Ératosthène à une Terre plate, alors, on trouve que le Soleil se trouve à 6 300 kilomètres de la Terre (figure 3).

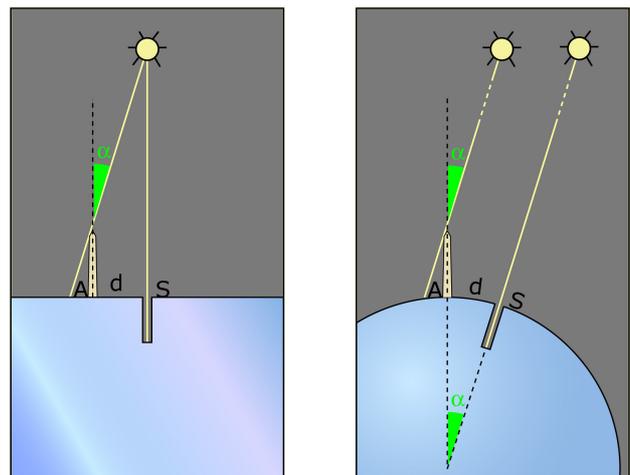


Fig.3. Une même observation peut fournir deux données très différentes : le Soleil à 6 300 km de la Terre si celle-ci est supposée plate et un rayon terrestre de 6 300 km si la Terre est supposée sphérique et le Soleil très loin.

Étant donné que son diamètre apparent est d'un demi-degré, on calcule aisément que son rayon est de 55 kilomètres ! Ainsi, une même observation peut conduire à des résultats complètement différents selon le modèle d'univers utilisé...

En fait c'est Aristarque de Samos (-310, -230) qui, après avoir mesuré la distance Terre-Lune grâce aux éclipses, tente une mesure de la distance Terre-

² Voir par exemple sur le site du CLEA <http://acces.ens-lyon.fr/clea/lunap> dans l'Univers observé / mesure du rayon de la Terre.

Soleil en observant la Lune à son quartier : dans cette configuration, le triangle Terre Lune Soleil est un triangle rectangle à la Lune dont il suffit de mesurer l'angle entre le Soleil et la Lune depuis la Terre (figure 4). Hélas, une telle mesure est très difficile à cette époque et Aristarque trouve 7 millions de kilomètres du fait d'une mesure d'angle erronée. Une erreur d'un facteur 20 !

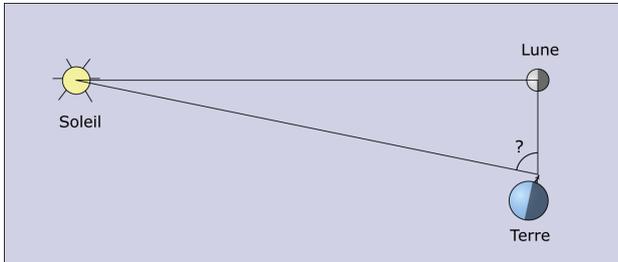


Fig.4. Principe de la mesure de la distance du Soleil par Aristarque. Au premier quartier, l'angle Terre Lune Soleil est droit. Si on connaît la distance de la Lune et si on mesure l'angle Lune Terre Soleil, on peut calculer la distance du Soleil. L'angle vaut $89,85^\circ$ très proche d'un angle droit, alors qu'Aristarque avait trouvé 87° .

Une fois encore, il faudra attendre que l'on trouve un modèle d'univers adéquat pour pouvoir mesurer correctement la distance du Soleil. Cela arrivera 19 siècles plus tard, avec Kepler et ses fameuses lois. Des lois qui n'en sont pas, ce sont seulement des constatations ne reposant sur aucune démonstration. Pourquoi avoir attendu si longtemps pour trouver, somme toute, quelque chose de simple reliant le mouvement des planètes du système solaire ? C'est tout d'abord parce que le système de Ptolémée, qui ne permet pas de déterminer facilement la distance Terre-Soleil, permet de prédire assez bien le mouvement des planètes : ainsi, pourquoi chercher autre chose ? C'est aussi parce qu'il n'y a pas d'observateurs sérieux du mouvement des astres. Depuis Hipparque (-190, -120) dont les observations vont servir à Ptolémée (90-168), personne n'a vraiment observé les planètes, jusqu'à Tycho-Brahé (1546-1601) qui réalise des séries continues d'observations très précises pour l'époque. Kepler (1571-1630) va utiliser ces observations pour tenter de comprendre quelles règles régissent le mouvement des planètes et ainsi publier ses « lois ». L'une d'elles va donner la solution pour la mesure de la distance Terre-Soleil : le cube du demi-grand axe de l'orbite d'une planète (en général très proche de la distance au Soleil) divisé par le carré de sa période de révolution autour du Soleil est une constante pour toutes les planètes du système solaire. **Il suffit donc de mesurer une seule distance** dans le système solaire pour les calculer toutes si on connaît les périodes de révolution, elles-mêmes faciles à mesurer. Ainsi,

même si le Soleil est loin et difficile à observer, on va pouvoir tenter de mesurer la distance à Mars ou Vénus qui sont, elles, plus proches de la Terre. Là encore, on voit que l'UA est aussi une unité importante. Si sa valeur est fautive alors toutes les distances dans le système solaire seront fausses puisque se calculant désormais à partir d'une seule.

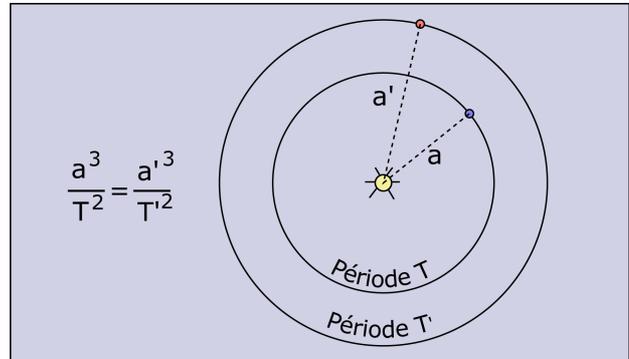


Fig.5. La troisième loi de Kepler relie la période de révolution T d'une planète au demi-grand axe a de son orbite (soit approximativement sa distance au Soleil).

Kepler ne dispose d'aucun modèle fiable de mouvement des planètes. Même s'il privilégie le principe copernicien par rapport à celui de Ptolémée (le principe géocentrique de Ptolémée et les trajectoires circulaires de Copernic ne permettent pas de faire de bonnes éphémérides), il ne dispose que des observations de Tycho Brahé qui lui prouvent que ces modèles ne sont pas bons. Kepler énonce sa "troisième loi" en 1618 après 20 ans de recherches et de tâtonnement : il donnera de bonnes valeurs relatives des distances des planètes au Soleil, mais ne pourra déterminer correctement la distance Terre-Soleil (il l'évaluera à un peu plus de 20 millions de kilomètres à partir d'hypothèses fausses).

Les astronomes vont tout d'abord vérifier ces fameuses lois. Ainsi, si Kepler a raison, les planètes Mercure et Vénus doivent passer entre la Terre et le Soleil, et même, de temps en temps, passer devant le disque du Soleil avec une périodicité que l'on peut prévoir. En utilisant le modèle de Kepler, les planètes Mercure et Vénus doivent passer devant le Soleil en 1631. Gassendi (1592-1655) observera le passage de Mercure mais pas celui de Vénus qui aura lieu durant la nuit ! Pas de Soleil, pas de passage de Vénus ! Un autre passage de Vénus est prévu pour 1639 et c'est un anglais, Horrocks (1618-1641) qui, n'ayant pas confiance dans les calculs des autres astronomes, recalculera (il a alors 20 ans et mourra à 22 ans) le moment du passage de Vénus et qui l'observera. Ses travaux ne nous sont pas parvenus, mais il a cependant évalué la distance Terre-Soleil à environ 94 millions de kilomètres. Il

n'utilisera pas le principe de la parallaxe, mais le fait que le diamètre apparent des planètes vues du Soleil doit être le même pour toutes les planètes ! Encore une hypothèse fautive...

Afin de déterminer cette distance Terre-Soleil, Jean-Dominique Cassini (1625-1712) va mesurer la parallaxe de la planète Mars. Pour cela, des observations sont réalisées à Paris et à Cayenne en 1671³. Bien que Cassini soit un très bon astrométriste, la mesure est difficile parce que la position de Mars doit être repérée par rapport à des étoiles de référence et que les catalogues d'étoiles sont plutôt pauvres à cette époque. Cassini évaluera cependant la distance Terre-Soleil à 135 millions de kilomètres environ. C'est tout de même une bonne performance.

En 1677, Halley (1656-1742) observe un passage de Mercure devant le Soleil et constate que, finalement, ces observations sont plus faciles à faire que des mesures de positions sur un fond d'étoiles. Un passage observé depuis différents lieux sur Terre est vu différemment : sa durée totale varie d'un lieu à l'autre par l'effet de la parallaxe. La détermination de la distance Soleil-Terre peut se faire plus facilement de cette manière en utilisant les passages de la planète Vénus, plus proche de la Terre et plus grosse que Mercure. Malheureusement pour Halley, ces passages sont rares et les prochains auront lieu en 1761 et 1769.

Il se sera alors écoulé près de 150 ans depuis Kepler : la mécanique céleste a progressé, Newton (1643-1727) a énoncé son principe de la gravitation qui démontre les lois de Kepler. La communauté scientifique va s'enthousiasmer pour cette mesure de la distance Terre-Soleil grâce aux passages de Vénus devant le Soleil et ce sera la mobilisation générale. La population s'intéresse aussi à cette observation, car on va mesurer l'Univers ! Ces passages ne seront bien observables que loin de l'Europe et entraîneront des voyages épiques des astronomes. Si le passage de 1761 est un peu décevant (on n'a pas l'expérience de cette observation), celui de 1769 sera plus réussi et la distance Terre-Soleil sera évaluée à 151 millions de kilomètres (voir *le tableau* des différentes estimations de la distance Terre-Soleil).

On a alors une estimation assez bonne de l'unité astronomique, mais il faut encore l'améliorer. Les prochains passages de Vénus vont avoir lieu en 1874 et 1882. La technique s'est considérablement améliorée, on connaît le télégraphe et le bateau à

vapeur, et les États vont financer encore des expéditions pour des observations. Cependant, des astronomes ne sont pas persuadés que cette technique soit encore valable. Les observations sont limitées en précisions du fait de la nature du bord du Soleil et de son diamètre imprécis. Et surtout le XIX^e siècle est le siècle de la découverte des astéroïdes dont certains passent plus près de la Terre que Mars ou Vénus. Leur parallaxe est donc beaucoup plus facile à mesurer et les lois de Kepler permettront toujours de calculer la distance Terre-Soleil à partir de la distance de n'importe quel astéroïde tournant autour du Soleil. Les astéroïdes Flora et Éros seront observés lors de leur passage près de la Terre. La progression de la qualité des catalogues d'étoiles de référence permettra de mesurer précisément leur parallaxe ainsi que celle de Mars. Les résultats des campagnes d'observation des passages de Vénus donneront cependant de bons résultats du fait du cumul de nombreuses observations. Mais l'avenir ne sera plus dans cette technique.

Au XX^e siècle, l'astéroïde Éros servira à la détermination de l'unité astronomique jusqu'à l'apparition des radars qui donneront directement, en 1970, la distance Terre-Mars avec une haute précision. L'utilisation des sondes posées sur Mars sera même encore plus précise, il suffit de mesurer le temps de communication avec elles. En 2004, le passage de Vénus servira à une opération pédagogique internationale. Des observations seront faites en grand nombre dans les lycées, collèges et dans les associations d'amateurs. Surprise : les résultats seront meilleurs que prévus grâce à la qualité des instruments, à l'usage du GPS et de caméras vidéo pour enregistrer le phénomène.

L'unité astronomique aujourd'hui

On a bien vu l'intérêt de mesurer la distance Terre-Soleil, aussi bien comme unité de mesure du système solaire, que comme base pour déterminer la distance des étoiles et objets lointains. La distance Terre-Soleil se mesure aujourd'hui grâce à la planète Mars ou plutôt grâce aux sondes posées sur la planète Mars dont il est facile de mesurer la distance à la Terre puisque ces sondes peuvent nous "répondre". Les lois de la mécanique céleste permettent de faire les calculs. Avec les mesures et les calculs précis que permettent les techniques d'aujourd'hui, de nombreux problèmes ont été soulevés. Tout d'abord, ce ne sont plus tout à fait les lois de Kepler que l'on applique, même si le principe qui dit que "si on connaît une distance dans le système solaire, on les connaît toutes" reste toujours vrai. Pour bien définir l'unité astrono-

³ NDLR : Voir l'article sur cette mesure à la page 18

mique, il y a maintenant de nombreux problèmes à prendre en compte et à résoudre.

La distance Terre-Soleil varie pour de nombreuses raisons. L'orbite terrestre est excentrique (c'est une ellipse) mais la définition du demi-grand axe qui caractérise l'ellipse est claire et sans ambiguïté. L'orbite terrestre varie sous l'influence des autres planètes et donc l'ellipse ne reste pas constante : son demi-grand axe augmente régulièrement (de 15 mètres par siècle environ). De plus, ce n'est pas la Terre, mais le centre de gravité du système Terre-Lune qui décrit une ellipse autour du Soleil. Et encore, ce n'est pas autour du Soleil mais autour du centre de masse du système solaire ! On peut donc, à un instant donné, déterminer les caractéristiques dynamiques du système Terre-Lune-Soleil perturbé par les autres planètes, mais quelle constante choisir comme "unité" ?

Cette distance Terre-Soleil, comme celle des autres planètes, dépend de la fameuse constante pour tout le système solaire décrite par Kepler. La loi de la gravitation nous donne la valeur de cette constante : c'est la masse du corps central multiplié par la "constante de la gravitation". Cette constante est bien difficile à déterminer puisque toujours liée à une masse.

Ainsi, la *définition actuelle de l'unité astronomique* va être associée à un corps fictif sans masse qui tourne autour du Soleil de façon à ce que les changements dans le mouvement de la Terre, n'affectent pas l'unité astronomique. Cette définition a pour but d'avoir des distances relatives précises dans le système solaire là où des distances absolues sont plus difficiles à mesurer.

Définition de l'unité astronomique (UAI 1976)

C'est le demi-grand axe d'une orbite que décrirait autour du Soleil une planète de masse négligeable, non perturbée, dont le moyen mouvement est égal à k radians par jour, k étant la constante de Gauss, les unités de temps et de masse étant comme suit.

$k = 0,985\ 607\ 668\ 601\ 425$ degré/jour

unité de temps : le jour, égal à 86400 secondes du Système International.

unité de masse : la masse du Soleil $1,9889 \times 10^{30}$ kg (1992).

G constante de la gravitation universelle = $6,672\ 59 \times 10^{-11}$ m³ kg⁻¹ s²

En 1992, on a comme meilleure valeur :

$$1 \text{ UA} = 1,495\ 978\ 7061 \times 10^{11} \text{ m.}$$

Mesurer l'univers

Pour terminer, voyons comment l'unité astronomique (l'UA), qui est l'unité de mesure du système solaire, est bien aussi l'unité de mesure de l'univers. Comme nous l'avons vu, le principe de la parallaxe est le seul qui nous permette de mesurer la distance des objets lointains. La parallaxe annuelle, élargissant la base de triangulation à l'orbite terrestre (donc à l'unité astronomique), permet de mesurer la distance de quelques étoiles. On dira qu'une étoile se trouve à un parsec de la Terre si sa parallaxe est d'une seconde de degré, c'est-à-dire que le rayon de l'orbite terrestre (une UA) est vu sous un angle d'une seconde de degré depuis l'étoile (deux parsecs → angle d'une demi-seconde, etc). En fait, très peu d'étoiles sont accessibles avec cette méthode tellement les angles sont petits. Mille parsecs correspondent à un angle d'un millième de seconde de degré, à la limite de la mesure.

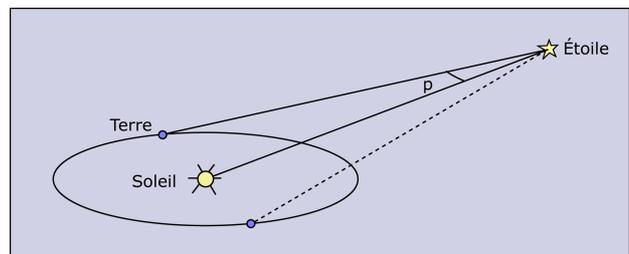


Fig.6. Parallaxe annuelle d'une étoile. C'est l'angle p sous lequel on verrait le rayon de l'orbite terrestre (donc 1 UA) depuis cette étoile. Si cette parallaxe vaut 1" (une seconde d'arc), l'étoile est située à 1 parsec.

On peut convertir les parsecs en "années-lumière" plus couramment utilisées : mille parsecs correspondent à un peu plus de 3000 années-lumière, une distance bien faible par rapport à la taille de notre galaxie, la Voie Lactée (100 000 années-lumière) sans parler des galaxies lointaines situées à plusieurs milliards d'années-lumière. Le satellite d'observation "Gaia" qui va être lancé en 2013 doit pouvoir mesurer des parallaxes de l'ordre de quelques microsecondes de degré et donc mesurer des distances jusqu'à 10 000 parsecs soit 30 000 années-lumière. Comment mesurer alors les grandes distances ? On va utiliser les "chandelles cosmiques" ou "chandelles standard". Ce sont des objets dont on connaît parfaitement la luminosité intrinsèque, si bien que leur distance dépendra de leur luminosité.

Il suffit donc de connaître la distance à la Terre d'un de ces objets par sa parallaxe et le tour est joué, de proche en proche, on peut atteindre des distances très grandes. La classification des étoiles en a été le

premier pas. Il y a aussi les étoiles variables dites "Céphéides" que l'on peut même observer dans d'autres galaxies, ce qui nous a donné la distance des galaxies proches, puis les supernovae, ces étoiles en fin de vie qui voient leur éclat augmenter d'un facteur de plusieurs dizaines de millions... Enfin, pour les galaxies très éloignées, on va utiliser l'expansion de l'Univers qui « rougit » les objets en fonction de leur distance. Ce n'est pas vrai pour les objets et galaxies proches mais vérifié pour les galaxies lointaines.

En conclusion

Une unité simple, comme la distance Terre-Soleil, devient plus difficile à définir dès que l'on étudie avec plus de précision le mouvement de la Terre. L' "unité astronomique" est définie (voir encadré) comme une unité astronomique de base puisqu'il

n'était pas possible de mesurer des distances astronomiques absolues avec un mètre. Cela devient moins vrai depuis les mesures directes de la distance de Mars par radar ou par les sondes spatiales.

La constante primaire est la constante de la gravitation universelle G et l'unité astronomique en est dérivée. Le produit GM où M est la masse du Soleil est la quantité observable. Quand la technique et la précision évoluent, une telle unité indépendante n'est plus obligatoirement utile et on fixe alors cette unité par rapport à une autre, le mètre, unité de base du Système International. C'est ce qui risque d'arriver à l'unité astronomique en 2012 où l'Union Astronomique Internationale (UAI) projette de fixer définitivement l'UA à 149 597 870 700 mètres et d'abandonner la constante de Gauss k .

Époque	Unité astronomique en km	Différence à la valeur de référence	Méthode
vers - 450 ?	6300	149 591 871	Triangulation avant Ératosthène
vers - 300 ?	7 000 000	142 597 871	Avec la Lune : Aristarque de Samos
vers 1600 ?	2 000 000	147 597 871	Kepler
1639	94 000 000	55 597 871	Avec le passage de Vénus: Horrocks
1672	135 000 000	14 597 871	Cassini avec la parallaxe de Mars
1761	138 540 000	11 057 871	Pingré et Short avec un passage de Vénus
1761 & 1769	151 000 000	1 402 129	Lalande et Pingré avec deux passages de Vénus
1862	149 000 000	597 871	Parallaxe de Mars
1875	148 000 000	1 597 871	Parallaxe de Flora
1874 & 1882	149 670 000	72 129	Newcomb avec tous les passages de Vénus
1885	150 000 000	402 129	Parallaxe de Mars
1900	149 400 000	197 871	Parallaxe d'Éros
1930	149 700 000	102 129	Parallaxe Éros
1970	149 597 800	71	Tirs radar sur Mars
1992	149 597 870,61	< 1 km	Mars : sonde Viking + radar
2000	149 597 870,691	valeur de référence	Mars : sonde Viking + radar
2004	149 608 708	10 838	Passage de Vénus : "VT-2004"
après 2012 ?	149 597 870,700	< 1 km	Valeur arbitraire de définition

Tableau des mesures de l'unité astronomique.