

Huygens détermine ainsi que la distance qui sépare Sirius de la Terre est plus de 28 000 fois supérieure à celle de la Terre au Soleil. Aujourd'hui, on sait que cette distance est proche de 600 000 fois la distance Terre-Soleil, car la brillance de Sirius est notablement supérieure à celle du Soleil.

La méthode de la parallaxe évite de telles erreurs. Cependant, la parallaxe est d'autant plus réduite que l'objet observé est éloigné (elle est inversement proportionnelle à l'éloignement). Huygens calcule que les étoiles sont au moins 10 000 fois plus éloignées de la Terre que les planètes du Système solaire, ce qui signifie que la précision des mesures doit être 10 000 fois meilleure que celle permise à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, ce qui semble alors irréalisable.

L'ingénieur Tycho Brahe a l'idée, à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, d'observer le même corps céleste, toujours du même endroit, mais à des saisons différentes. Il utilise alors comme longueur de référence, non plus le diamètre de la Terre, mais celui de son orbite autour du Soleil, 20 000 fois plus grande (cette longueur de référence passe de 13 000 kilomètres à 300 millions de kilomètres). Pourtant, malgré la précision (extrême pour l'époque) de ses mesures, Tycho Brahe

ne peut évaluer aucun déplacement de parallaxe des étoiles, ce qui le conduit à réfuter la représentation de Copernic de la Terre tournant autour du Soleil. Il aurait dû conclure de cet échec que les étoiles sont situées à des milliers de fois la distance Terre-Soleil, et que l'Univers est «immensément» grand.

Au XVII<sup>e</sup> siècle et au XVIII<sup>e</sup>, de nombreux astronomes tentent de mesurer la parallaxe d'étoiles fixes, parfois sans succès, bien que la précision des lunettes d'observation ne cesse d'être améliorée. Pour que les parallaxes soient importantes, ils choisissent les étoiles les plus brillantes ou celles dont la position par rapport aux autres étoiles avait changé en 100 ans : l'une et l'autre de ces propriétés indiquaient qu'il s'agissait d'étoiles proches. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, plusieurs astronomes prétendent avoir réussi à mesurer des parallaxes, affirmations rapidement démenties.

En 1838, l'astronome et mathématicien allemand Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) soutient que la seule conclusion que l'on puisse tirer des tentatives de mesure de la parallaxe des étoiles fixes, c'est que ces valeurs sont infimes, inatteignables par les méthodes d'observation à disposition. En d'autres termes, toutes les étoiles observées

jusqu'alors avaient vraisemblablement des parallaxes bien inférieures à une seconde d'arc, et se trouvaient sans doute à une distance plus de 200 000 fois supérieure à celle de la Terre au Soleil. On en déduisit que la mesure de la parallaxe de Sirius faite par Huygens (sept secondes d'arc) était fausse.

## LA PATIENCE DE BESSEL

Bessel semble près de renoncer, frustré par plus de 20 années d'efforts infructueux, quand, enfin, il rapporte la première mesure réussie de la parallaxe d'une étoile fixe. Pour ce faire, il avait choisi l'étoile double 61 de la constellation du Cygne, dont la position au firmament change de cinq secondes d'arc par an, ce qui semblait faire de cette étoile l'une des plus proches du Soleil.

Durant 98 nuits claires, en 1837 et 1838, Bessel détermine les différences angulaires entre l'étoile double 61 et deux étoiles proches peu brillantes (certainement beaucoup plus éloignées du Soleil), avec la précision inégalée jusqu'alors de 0,13 seconde d'arc. Si le professeur de Königsberg passa de nombreuses nuits inconfortables, l'œil rivé à son télescope, sa patience fut récompensée : au mouvement, déjà connu, de l'étoile dans le firmament se superposait une petite variation, exactement celle que l'on attendait d'un effet de parallaxe. Bessel en déduisit une parallaxe de 0,314 seconde d'arc, ce qui correspondait à une distance de 10,4 années-lumière. Toute la communauté des astronomes applaudit ce progrès considérable.

Au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, la méthode laborieuse de mesure de la parallaxe est un peu améliorée avec la lunette astronomique, mais la précision reste médiocre. Ce n'est qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle que la photographie fait réellement progresser la méthode. Le repérage des petites étoiles sur une plaque photographique est notablement plus simple et plus rapide que l'observation à l'œil nu avec une lunette. En 1935, on disposait déjà de 4 000 mesures de parallaxe déterminées par des photographies. En 1991, la récolte était de 8 000, avec une précision toujours meilleure.

Pourtant, ce n'était pas encore satisfaisant, car la valeur de la plupart des mesures de parallaxe étaient à peine supérieures à l'erreur de mesure (environ un centième de seconde d'arc) : on ne peut déduire l'éloignement d'une étoile à partir de la parallaxe – à un facteur deux près – que lorsque l'erreur moyenne de la mesure est inférieure à 20 pour cent de la valeur absolue. En 1991, ce critère d'exactitude n'était satisfait que par 1 800 des 8 000 étoiles dont la parallaxe avait



Friedrich Wilhelm Bessel fut le premier, en 1838, à déterminer la parallaxe d'une étoile et, par conséquent, sa distance à la Terre ; il s'agissait de l'étoile double 61 de la constellation du Cygne. Sa distance a été déterminée à nouveau par le satellite HIPPARCOS : elle est égale à 11,4 années-lumière, et cette étoile double se déplace de 1,5 degré au firmament, en l'espace d'un millénaire (flèches sur la carte stellaire ci-dessus), valeur qui correspond à trois fois le diamètre de la Lune.

été évaluée, soit moins du quart. Et ces 1 800 étoiles sont «à notre porte cosmique», à moins de 12 années-lumière. Ainsi, l'arpentage de l'Univers lointain restait l'apanage des méthodes indirectes, même si les mesures directes de parallaxe étaient des jalons précieux.

Les photographies sur plaques, enregistrées sous forme numérique, se sont révélées d'une importance primordiale pour les mesures de parallaxe, mais aussi pour les mesures d'éloignement fondées sur la photométrie. Pour la première fois, on pouvait mesurer précisément la luminosité des étoiles. Au moyen des mesures d'éloignement cosmique, les astro-

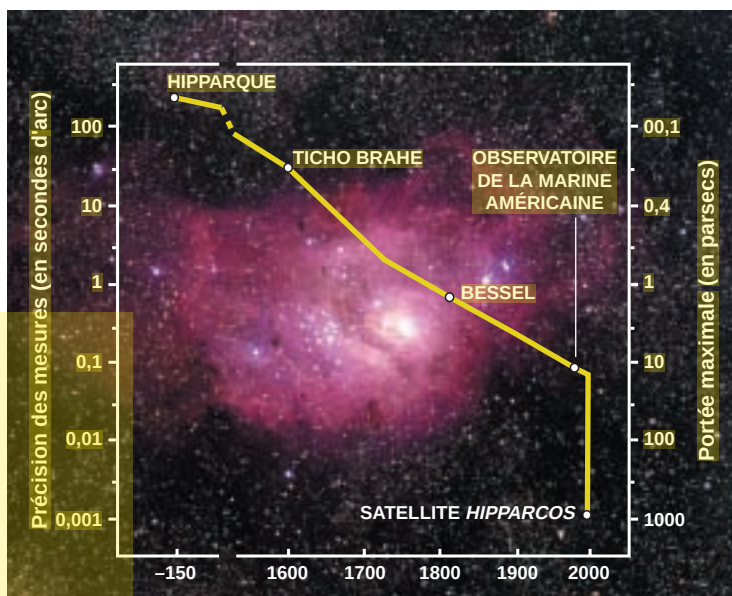
nomes purent enfin sonder l'immensité de l'Univers sur des milliards d'années-lumière, tandis que les mesures de distance à l'aide du déplacement de parallaxe ne permettaient pas de dépasser 300 années-lumière. Pour déterminer des distances supérieures, les astronomes recoururent à des méthodes indirectes, fondées sur des critères de distance établis et calibrés avec des astres dont l'éloignement est connu.

Les étoiles les plus lointaines qui restent accessibles à une mesure de parallaxe sont environ 10 millions de fois plus éloignées de la Terre que ne l'est le Soleil, mais l'Univers observable grâce aux télescopes actuels est aujourd'hui 100 millions de fois plus étendu.

## LE SATELLITE HIPPARCOS

Pour découvrir cette immensité, il fallait encore ajouter plusieurs échelons à notre échelle des distances cosmiques. Et pour chacun de ces échelons, il fallait faire des hypothèses sur les propriétés des corps célestes observés, avec le risque qu'une échelle de mesure des distances initialement correcte ne devienne de plus en plus imprécise à mesure que l'éloignement augmente. Ainsi, bien que la parallaxe de plusieurs étoiles proches du Soleil soit connue avec une grande précision, la taille de l'Univers lointain restait mal connue. Pour remédier à ces deux problèmes, il fallait mesurer des parallaxes plus nombreuses et plus précises.

La détermination d'un grand nombre de parallaxes permet aux astronomes de mieux comprendre la formation et la structure intérieure des étoiles, leur



La précision absolue (en jaune) des mesures de la position des étoiles a approximativement doublé tous les 60 ans au cours des 300 dernières années. Le satellite HIPPARCOS a fourni des mesures dont la précision est égale à celle que l'on aurait obtenue dans 300 ans au rythme des progrès passés.

histoire et leur évolution, ainsi que l'origine de leur énergie. La comparaison de nombreuses paires d'étoiles de même type, mais situées à des distances différentes, améliore la précision de l'échelle des distances.

Toutefois, dans le voisinage immédiat du Soleil, il n'y a pas de représentants de types intéressants d'étoiles : les objets très lumineux sont rares dans le cosmos. La parallaxe d'une étoile située à 30 années-lumière mesure environ 0,1 seconde d'arc, et celle d'une étoile distante de 300 années-lumière n'est plus que de 0,01 seconde d'arc. Si l'on veut déterminer ces deux distances avec une précision de l'ordre de 20 pour cent, il faut faire des mesures précises à 0,02 seconde d'arc dans le premier cas, et à 0,002 seconde d'arc dans le second. C'est donc la précision de l'instrument utilisé qui est le facteur limitant pour l'exploration de l'Univers.

Il est extrêmement difficile de mesurer des valeurs de parallaxe avec une précision de 0,002 seconde d'arc. De surcroît, les variations de température, la pesanteur, le vieillissement des matériaux, les modifications infimes des émulsions photographiques, sont autant de sources d'imprécision. À ces difficultés techniques s'ajoutent les perturbations dues à la réfraction variable de la lumière des étoiles par l'atmosphère terrestre, le scintillement des étoiles résultant de perturbations atmosphériques et les irrégularités de la rotation de la Terre.

La quasi-totalité des difficultés tient au fait que les instruments de mesure sont sur la Terre. En 1967, l'astronome français Pierre Lacroute a proposé la

construction d'un instrument de mesure placé dans l'espace. Avec un tel instrument, il espérait déterminer la parallaxe de quelque 700 étoiles avec une précision de l'ordre de 0,01 seconde d'arc. Il fallut attendre 13 ans, pour que l'Agence spatiale européenne (ESA) décide la construction d'un tel satellite. Entretemps, les progrès techniques réalisés allaient permettre de déterminer la position, le mouvement annuel et la parallaxe de quelque 100 000 étoiles avec une précision de 0,002 seconde d'arc.

Ce projet, dénommé HIPPARCOS, en hommage à l'astronome Hipparque de la Grèce antique, était aussi l'acronyme dérivé

des premières lettres de *High Precision Parallax Collecting Satellite* (satellite de haute précision pour la mesure de la parallaxe). Le satellite fut achevé en 1987 et placé en orbite en 1989. Les mesures furent effectuées entre la fin de 1989 et le milieu de 1993. Grâce à HIPPARCOS, les astronomes ont déterminé la parallaxe de près de 120 000 étoiles avec une précision moyenne de 0,001 seconde d'arc, soit presque deux fois meilleure que celle escomptée (on put ainsi évaluer des distances doubles des distances prévues avec la même précision relative). Le volume de l'Univers exploré avec précision est ainsi huit fois plus vaste.

HIPPARCOS a amélioré d'un facteur 100 la précision des coordonnées célestes et a augmenté notablement le nombre de parallaxes fiables : on connaît aujourd'hui avec précision la distance de 50 000 étoiles. Depuis le milieu de l'année 1997, la communauté des astronomes analyse et exploite cette immense mine de données. Outre la précision obtenue sur les mesures de parallaxe, les positions et les mouvements des étoiles, ce satellite permit la découverte de plus de 3 000 nouvelles étoiles doubles et de 8 000 nouvelles étoiles variables, fit dix millions de mesures de brillance extrêmement précises et confirma la théorie générale de la relativité d'Einstein par l'observation de la courbure de la lumière sous l'influence de la pesanteur au voisinage du Soleil.

Ulrich BASTIAN est astronome à l'Institut de calcul astronomique d'Heidelberg.