

l'étoile : elles résultent du mouvement de la Terre autour du Soleil. Pour une étoile proche, ces boucles sont bien visibles et mesurables avec précision ; pour des étoiles de plus en plus éloignées, ces boucles deviennent de plus en plus petites ; à plusieurs centaines d'années-lumière, ces mouvements sont inférieurs à la précision des mesures. De l'observation de ces boucles, on déduit la parallaxe de l'étoile, angle sous lequel on verrait, depuis l'étoile, un segment de même longueur que le demi-grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil et perpendiculaire à la ligne de visée : on connaît alors la distance à laquelle se trouve l'étoile. En pratique, on mesure la parallaxe d'une étoile en repérant sa position par rapport à une direction fixe dans le ciel, et l'on répète l'opération six mois plus tard. La parallaxe est la demi-somme des deux angles mesurés (voir la figure 3).

Le phénomène, purement géométrique, peut être vérifié par chacun à l'aide d'une expérience simple : tout en restant immobile, on observe la position de son pouce au bout du bras tendu horizontalement, tantôt de l'œil gauche, tantôt de l'œil droit, par rapport à une scène lointaine (un mur à quelques mètres suffit). Les yeux gauche et droit symbolisent la position de la Terre sur son orbite à six mois d'intervalle et le pouce représente l'étoile dont on veut mesurer la parallaxe. Lorsque l'on approche le pouce du visage, l'effet s'amplifie.

Le grand éloignement des étoiles a longtemps empêché des mesures précises de parallaxe. En 1838, Bessel publie la première mesure correcte de la parallaxe d'une étoile, celle de l'étoile 61 de la constellation du Cygne, qu'il trouve égale à 0,35 seconde d'arc, soit une distance de 10,3 années-lumière. Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, plusieurs milliers de mesures ont été réalisées à partir de clichés photographiques, mais une faible fraction a une précision meilleure que dix pour cent.

Le catalogue *HIPPARCOS* améliore d'un coup la précision de tous les paramètres du mouvement des étoiles. La position de la majorité des 118 000 étoiles de la mission principale est connue à mieux que 0,001 seconde d'angle (elle est un peu moins bonne pour les étoiles les moins brillantes), et les distances de 20 000 étoiles sont maintenant connues avec une précision meilleure que dix pour cent. La mission secondaire *TYCHO*,

menée avec les mêmes instruments, a mesuré les positions de près de 1 060 000 étoiles avec une précision moyenne de 0,01 seconde d'angle.

Cette performance est, bien sûr, la conséquence de traitements perfectionnés et informatisés des données, mais surtout de l'utilisation d'un télescope spatial. L'atmosphère qui entoure la Terre, couche gazeuse turbulente de quelques centaines de kilomètres d'épaisseur, déforme les images et limite la qualité des mesures de position. En outre, soumis à leur poids et à des variations de température, les télescopes se déforment. Ces limitations n'existent pas dans l'espace, et les observations peuvent y être beaucoup plus précises.

## Un petit télescope spatial

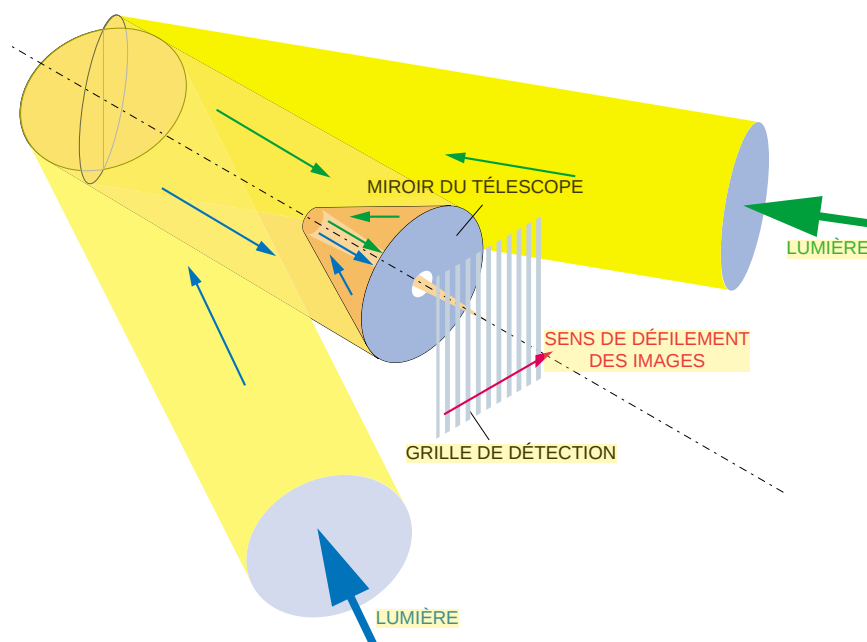
Dès 1966, Pierre Lacroute, de l'Observatoire de Strasbourg, soumet un projet de satellite astrométrique au Centre national de la recherche scientifique. La première étude de faisabilité est entreprise en 1977 par l'Agence spatiale européenne, et le projet est adopté sous le nom d'*HIPPARCOS* en mars 1980.

Le satellite était équipé d'un télescope de moins de 30 centimètres de diamètre, plus petit que ceux de nombreux astronomes amateurs, mais suffisant pour observer des astres jusqu'à la magnitude 12,5, éclat 400 fois inférieur à celui des étoiles les plus faibles visibles

à l'œil nu. Les étoiles étaient observées simultanément dans deux directions, à 58 degrés l'une de l'autre. Ce dispositif évitait la propagation d'éventuelles erreurs locales de position, qui se seraient amplifiées avec la distance. *HIPPARCOS* a mesuré une multitude d'arcs d'environ 58 degrés entre des couples d'étoiles : en traçant ces arcs à la surface d'une sphère, nous y situons toutes ces étoiles sans ambiguïté, à une rotation de l'ensemble près.

Les images des étoiles observées dans chaque direction étaient ramenées au plan focal de l'instrument grâce à un dispositif optique spécialisé. Le satellite tournant très régulièrement autour de son axe, à la vitesse d'un tour toutes les 128 minutes, l'image traversait une grille composée de zones alternativement transparentes et opaques (voir la figure 4). La seule mesure directe d'*HIPPARCOS* était faite sur cette grille : un détecteur placé derrière analysait les variations de la lumière et localisait la position de l'étoile entre deux barreaux. La lecture automatique de la graduation était faite toutes les deux secondes, avec une précision de 0,1 micromètre.

Afin d'observer l'ensemble du ciel tous les six mois, le satellite tournait sur lui-même autour d'un axe de direction variable dans le temps en suivant une loi prédéterminée, résultat d'un compromis entre la nécessité de balayer aussi régulièrement que pos-



**4. LE SATELLITE HIPPARCOS** observait simultanément dans deux directions, à 58 degrés d'écart, afin de rattacher directement entre elles des zones éloignées sur le ciel. Les images provenant des deux directions étaient combinées sur le miroir du télescope, de 30 centimètres de diamètre, puis projetées sur une grille, derrière laquelle était placé le détecteur. La rotation du satellite sur lui-même faisait défiler les images entre les barreaux de la grille.

sible les différentes régions du ciel tout en observant chaque point selon de multiples directions, cela en prenant bien soin de ne jamais pointer le télescope en direction du Soleil. La distribution des observations sur le ciel présente ainsi un maximum dans les régions situées à plus ou moins 47 degrés de latitude autour de l'écliptique (voir la figure 6). Les zones proches de cette dernière ont été les moins observées. Chaque étoile a été en moyenne mesurée 110 fois, à environ 30 époques réparties sur les trois années d'observation. Les étoiles observées avaient été sélectionnées, parmi 500 000 proposées avant la mission, par un consortium d'une vingtaine d'instituts européens dirigé par Catherine Turon, de l'Observatoire de Paris.

Le satellite a été lancé le 8 août 1989. L'échec de la mise à feu du moteur d'apogée l'a laissé sur une orbite très elliptique, entre 500 et 36 000 kilomètres d'altitude, au lieu de l'orbite géostationnaire prévue, à 36 000 kilomètres d'altitude. Ce handicap a été entièrement compensé par une nouvelle programmation du satellite, réalisée (dans l'angoisse) en quelques semaines, et les observations, faites entre le 26 novembre 1989 et le 10 mars 1993, n'en ont pas été perturbées. Toutefois, les panneaux solaires ont été usés prématurément et les composants électroniques ont été endommagés par les passages du satellite, à chaque révolution, dans les ceintures de Van Allen, anneaux de particules chargées, capturées et accélérées par le champ magnétique ter-

restre, qui émettent un intense rayonnement électromagnétique entre 2 000 et 20 000 kilomètres d'altitude.

Deux groupes de laboratoires européens, dirigés par Lennart Lindegren de l'Observatoire de Lund en Suède, et par Jean Kovalevsky, du CERGA à Grasse, ont traité les données jusqu'au milieu de l'année 1996. Un an a été encore nécessaire pour rassembler les résultats et pour écrire la documentation. L'ensemble représente 16 volumes et un atlas céleste qui donne les indications de position et d'éclat, et permet de déterminer au premier coup d'œil si l'étoile est simple, ou associée à un ou plusieurs compagnons. Un logiciel pour micro-ordinateur, distribué sur CD-ROM avec le catalogue, permet de rechercher de façon sélective tous les résultats et de les visualiser, sous forme numérique ou sur des cartes célestes. Le suivi du traitement, la production du catalogue, la distribution des données et tous les aspects scientifiques étaient pilotés par le Comité scientifique HIPPARCOS, animé par Michael Perryman, de l'Agence spatiale européenne.

Comment, à partir de la mesure des positions des étoiles sur la grille du télescope, déterminer leurs positions absolues? Pour caractériser la position d'une étoile sur la sphère céleste à tout instant il suffit de connaître cinq quantités : les deux coordonnées angulaires à une date de référence quelconque, les deux composantes du mouvement propre et la parallaxe. Préalablement aux observations du satellite, les positions de

toutes les étoiles du catalogue avaient été, par des observations au sol, déterminées avec une précision d'une seconde d'arc. À l'aide des 120 millions de mesures de position sur la grille, obtenues pendant les trois années d'activité du satellite, nous avons déterminé les paramètres de position de chaque étoile en les faisant varier autour d'une position moyenne pour ajuster au plus près le modèle du mouvement de l'étoile aux observations réelles.

Lors de la dernière étape de calcul, nous avons résolu 4 000 000 d'équations à 600 000 inconnues, tout en estimant la qualité statistique des résultats.

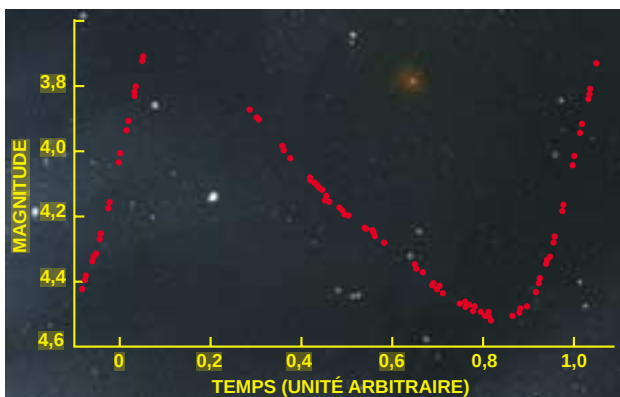
Il faut remarquer que, pour les étoiles observées à un instant donné, nous ne disposions que d'une information de position à l'intérieur d'un des 3 000 barreaux de la grille, sans savoir lequel. Cette situation est comparable à celle d'une excellente montre à quartz qui serait fournie sans aiguille des heures : on ne mesurerait que des durées courtes, et l'on ne connaîtrait que les minutes et les secondes de la date d'un événement, sans le situer dans la journée. Cette indétermination a été levée grâce à la connaissance de la position approximative des étoiles et de l'orientation du satellite au moment de la mesure : pour chaque observation, on calculait le numéro du barreau le plus probable où devait se trouver l'étoile. En cas d'incertitude entre deux barreaux, les positions étaient calculées pour les deux solutions possibles, et on retenait celle où l'écart entre la position calculée et l'ensemble des observations était le plus faible.

## La luminosité intrinsèque

HIPPARCOS a mesuré l'éclat de toutes les étoiles observées. La méthode de traitement a conduit à la détermination d'une luminosité apparente bien étalonnée tout au long des trois années d'observation, malgré des variations, qui ont atteint 40 pour cent, dans la sensibilité de la chaîne de détection.

La mesure simultanée de la parallaxe, c'est-à-dire de la distance, et de l'éclat de chaque étoile permet de calculer la luminosité intrinsèque de l'étoile. On connaît donc la luminosité intrinsèque d'étoiles de types divers, dans un rayon de 500 années-lumière. En supposant que les étoiles d'un type donné ont toutes la même luminosité intrinsèque, on évalue alors la distance d'étoiles plus éloignées, dans la Galaxie et dans les galaxies les plus proches.

Cette méthode est particulièrement précise dans le cas d'une classe d'étoiles de luminosité variable, les céphéides : leur luminosité intrinsèque est liée à la période de variation de la luminosité. Connaissant cette relation, on mesure la distance des céphéides en mesurant seulement leur éclat moyen et leur période. Ces étoiles, très lumineuses, servent d'étalon pour la mesure des distances



**5. LA LUMINOSITÉ DES ÉTOILES** de la classe des céphéides varie périodiquement au cours du temps. On obtient leur courbe de lumière en regroupant sur une seule période toutes les mesures réalisées par HIPPARCOS, comme on l'a fait ici pour Delta Cephei, dont la période est de 5,36 jours. La période des céphéides est liée à leur luminosité absolue : sa mesure donne accès aux distances des galaxies qui les hébergent. En combinant de telles mesures réalisées sur 26 céphéides, des astronomes ont calculé que l'échelle des distances de l'Univers doit être augmentée de 10 à 15 pour cent par rapport aux valeurs admises jusqu'à présent.