

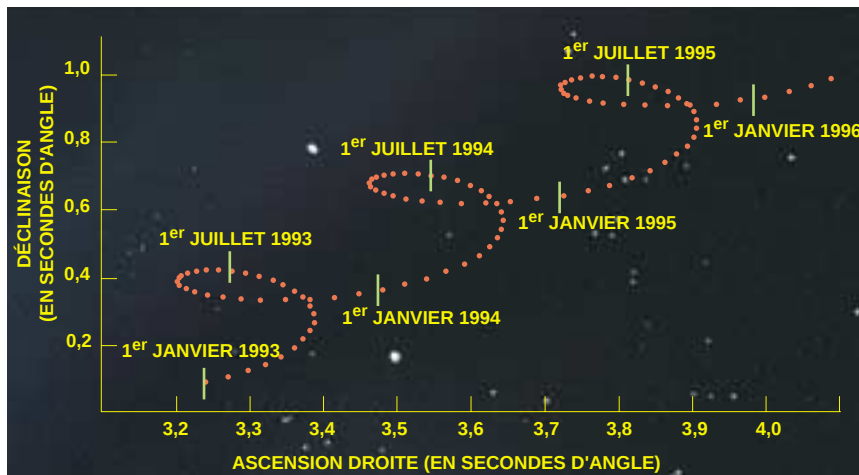
fondamentaux, plus précis, répertorient les positions absolues des étoiles, mesurées par rapport à un seul système d'axes. Leur réalisation est beaucoup plus longue et difficile : au moment où Argelander achève son œuvre monumentale, il publie aussi un catalogue fondamental de seulement 160 étoiles, dont la réalisation lui a coûté autant de peine.

L'ensemble des coordonnées des étoiles d'un catalogue fondamental constituent un système de référence, défini par les trois directions d'un

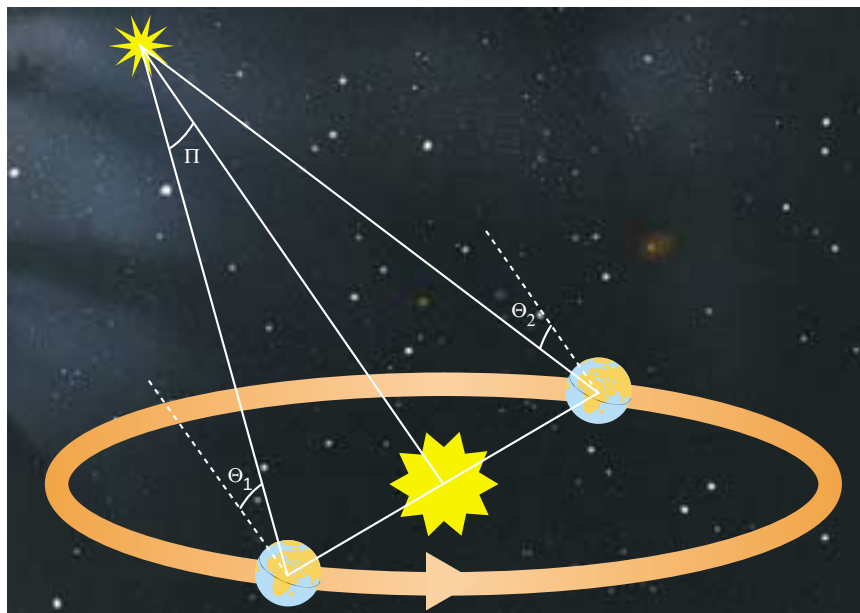
repère cartésien. Par exemple, on peut souhaiter que l'un des axes soit perpendiculaire à l'écliptique, plan moyen de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Malheureusement il n'y a pas sur le ciel une marque colorée avec l'inscription "ici est la normale à l'orbite de la Terre". Pour connaître la coordonnée d'une étoile sur cet axe, il faut mesurer précisément sa position par rapport au Soleil. Ce dernier étant visible de jour et les étoiles plus aisément la nuit, on saisit la difficulté de ces observa-

tions astronomiques. Un deuxième axe est déterminé par l'intersection du plan de l'Équateur terrestre et de l'écliptique. Le troisième est orthogonal aux deux premiers. Une fois déterminées les coordonnées absolues d'un petit nombre d'étoiles très brillantes, on construit les grands catalogues en mesurant la position des étoiles faibles par rapport aux quelques étoiles fondamentales présentes dans leur voisinage. Ces dernières mesures sont donc relatives et, surtout, leur précision n'est pas la même sur tout le ciel.

Le premier catalogue fondamental est publié en 1818 par l'astronome allemand Friedrich Bessel, qui rattache directement au Soleil 14 étoiles observées au siècle précédent par James Bradley, à Greenwich. Ce nombre est ensuite porté à 36, et il augmente progressivement jusqu'en 1986, où il atteint 1 536 avec une précision de 0,05 seconde d'angle. HIPPARCOS augmente cette précision d'un facteur 50, sur 80 fois plus d'étoiles.



2. LE DÉPLACEMENT D'UNE ÉTOILE sur le ciel, dans un référentiel qui ne suit pas la rotation journalière de la Terre, ressemble à celui de l'étoile Véga, une des plus brillantes du ciel. Les points donnent la position de Véga à intervalles réguliers d'une vingtaine de jours entre 1993 et 1996. À un mouvement d'ensemble uniforme, d'environ 0,25 seconde d'angle par an en ascension droite (la longitude des astronomes) et de 0,3 seconde d'angle par an en déclinaison (la latitude), sont superposées des boucles annuelles identiques, qui résultent du mouvement de la Terre autour du Soleil. Leur dimension (0,18 seconde d'arc) permet de calculer la parallaxe de l'étoile, donc la distance à laquelle elle se trouve (22 années-lumière).



3. LA PARALLAXE D'UNE ÉTOILE est l'angle sous lequel on verrait, de l'étoile, un diamètre de l'orbite de la Terre autour du Soleil. De sa mesure, on déduit la distance à laquelle se trouve l'étoile. En pratique, on mesure à six mois d'intervalle l'angle entre une direction fixe et la direction de l'étoile : la parallaxe est la demi-somme des deux angles.

Le mouvement des étoiles

Pour construire un tel catalogue, la réalisation d'une seule mesure, même très précise, est insuffisante : par rapport à un système de référence fixe (qui ne tourne pas avec la rotation terrestre), les étoiles, vues de la Terre, se déplacent sur le ciel. Edmund Halley le découvre en 1718, en remarquant que les latitudes d'Aldébaran, de Sirius et d'Arcturus obtenues quelques années plus tôt par John Flamsteed diffèrent de celles mesurées par les astronomes d'Alexandrie au début de notre ère : en 1 500 ans, Sirius s'est déplacée d'une distance angulaire égale au diamètre de la Lune. Cette conclusion audacieuse est confirmée par Tobie Mayer en 1760 pour 80 étoiles. À partir de 1866, la description est complétée par les mesures de déplacement le long de la ligne de visée, fondées sur l'effet Doppler-Fizeau (les longueurs d'onde de la lumière que nous recevons d'une étoile varient légèrement en fonction de sa vitesse le long de la ligne de visée, comme la sirène d'une ambulance change de tonalité lorsqu'elle s'approche puis s'éloigne de nous).

Le déplacement apparent d'une étoile sur le ciel (voir la figure 2) est composé de ce mouvement propre, uniforme en longitude et en latitude, et de boucles, de périodicité annuelle, dont la dimension dépend de la distance de

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^e 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

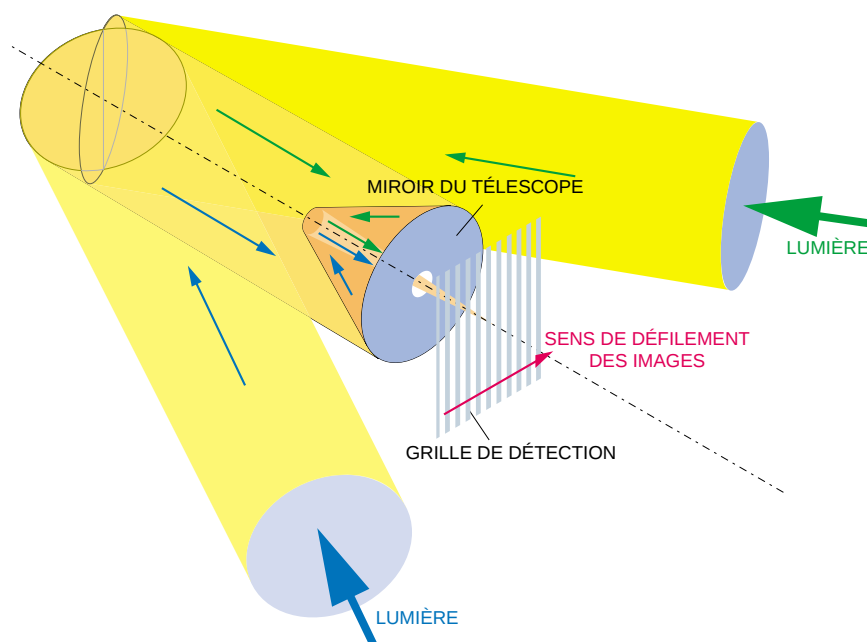
Dès 1966, Pierre Lacroute, de l'Observatoire de Strasbourg, soumet un projet de satellite astrométrique au Centre national de la recherche scientifique. La première étude de faisabilité est entreprise en 1977 par l'Agence spatiale européenne, et le projet est adopté sous le nom d'*HIPPARCOS* en mars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