

HIPPARCOS, satellite chasseur d'étoiles

FRANÇOIS MIGNARD • CHRISTIAN MARTIN

La position, le mouvement et l'éclat de 118 000 étoiles ont été mesurés avec une grande précision. Ces informations améliorent la mesure de l'Univers et permettent de tester les modèles de formation des étoiles.

Le 13 mai 1997, la mission *HIPPARCOS* s'achève officiellement. Après 20 années de réflexion, de mises au point, d'observations et de calculs, ce dernier-né des catalogues stellaires supplante ses prédécesseurs dans tous les domaines : il augmente à la fois le nombre d'étoiles dont la position est connue de façon absolue, par rapport à un système de coordonnées uniques, et la précision de cette position. Le catalogue *HIPPARCOS* contient les positions, les mouvements, les distances et les éclats de 118 000 étoiles.

Ces données seront utilisées dans toutes les branches de l'astronomie. Un premier point est d'importance : alors que les astronomes sont habituellement réduits à voir le spectacle des cieux sur une surface sphérique sans profondeur, *HIPPARCOS* donne une image du ciel en trois dimensions. La distance à laquelle se trouve chaque étoile du catalogue a été mesurée géométriquement : avec ces valeurs absolues, on étalonne les méthodes de mesure à plus grande distance, à partir d'hypothèses sur la physique des étoiles. Leur application progressive à des astres de plus en plus éloignés permet, en particulier, d'évaluer la taille de l'Univers.

Avec 13 millions d'observations, soit une moyenne de 110 mesures par étoile, *HIPPARCOS* dresse le tableau le plus complet jamais obtenu de la population d'étoiles dans un rayon de 500 années-lumière autour du Soleil. La mesure simultanée de l'éclat et de la distance donne accès à la luminosité intrinsèque des étoiles ; les variations de luminosité de plusieurs milliers d'étoiles ont été détectées et caracté-

risées ; plus de 10 000 systèmes d'étoiles doubles ont aussi été identifiés et mesurés. Ces informations nouvelles seront utiles pour l'étude de la formation et de l'évolution des étoiles. Les utilisations préliminaires du catalogue *HIPPARCOS*, l'étude des planètes extrasolaires, la compréhension des explosions d'étoiles ou le calcul des trajectoires d'engins spatiaux, illustrent déjà la diversité de ses usages.

En outre, à côté du catalogue *HIPPARCOS*, le catalogue *TYCHO*, réalisé avec un détecteur auxiliaire du satellite, contient plus d'un million d'étoiles, repérées avec une précision moindre. Presque toutes les étoiles qui étaient accessibles au télescope embarqué à bord d'*HIPPARCOS* sont ainsi répertoriées, et les astronomes pourront conduire des études statistiques sur toutes les étoiles plus brillantes que la magnitude 11,5 (la magnitude des étoiles mesure leur luminosité).

La mesure du ciel

Le recensement des étoiles et de leurs positions dans le ciel a longtemps été l'une des activités principales des astronomes. Indispensables à la navigation, ces positions l'étaient aussi, dans une moindre mesure, aux prédictions astrologiques. Au II^e siècle avant notre ère, le grec Hipparque recense les positions d'environ un millier d'étoiles et évalue leur éclat : il réalise ainsi le premier catalogue digne de ce nom. Les positions relevées par Hipparque avaient une précision de 0,3 à 0,4 degré, un peu plus que la largeur d'un quartier de Lune. Près de 1 500 ans plus tard, Ulugh

Begh, petit-fils de Tamerlan, réalise à Samarkand, au moyen d'un sextant de 48 mètres creusé dans le sol, un catalogue de 1 018 étoiles dont la précision moyenne est de l'ordre de cinq minutes d'angle (un degré contient 60 minutes d'angle, qui contiennent chacune 60 secondes d'angle).

Dans la deuxième moitié du XVI^e siècle, l'astronome danois Tycho Brahé mesure la position des étoiles à l'œil nu, à l'aide de longs quadrants muraux en bois ou en bronze. Son catalogue, édité par Johannes Kepler en 1627, renferme la position de 1 005 étoiles, avec une précision moyenne de deux à trois minutes d'angle, mais qui atteint 30 secondes d'angle pour certaines. Johannes Hévélius, astronome allemand brasseur à Dantzig, est deux fois plus précis dans son catalogue de 1 553 étoiles publié en 1690.

L'invention des lunettes et l'adaptation de systèmes de visée vers 1660 amènent progressivement la précision à quelques secondes d'angle à la fin du XVIII^e siècle et permettent d'observer des étoiles de luminosité apparente de plus en plus faible. Au XIX^e siècle, l'observation et le traitement des données deviennent plus systématiques. Ainsi, le *Bonner Sternverzeichnis*, publié en 1835 par l'allemand Friedrich Argelander, contient les positions de 458 000 étoiles. C'est le siècle des grands inventaires, où sont dressés les premiers catalogues photographiques de plusieurs centaines de milliers d'étoiles.

Les positions des étoiles contenues dans tous ces catalogues sont déterminées les unes par rapport aux autres. À l'opposé, les catalogues astrométriques



Component Solutions

Component	Date	Type	RA	Dec	Parallax	Proper Motion	Distance
COMP-001	1989-01-01	A	15 23 00.000	+36 32 46.000	0.000	0.000	1000
COMP-002	1989-01-01	A	15 23 00.000	+36 32 46.000	0.000	0.000	1000
COMP-003	1989-01-01	A	15 23 00.000	+36 32 46.000	0.000	0.000	1000
COMP-004	1989-01-01	A	15 23 00.000	+36 32 46.000	0.000	0.000	1000
COMP-005	1989-01-01	A	15 23 00.000	+36 32 46.000	0.000	0.000	1000
COMP-006	1989-01-01	A	15 23 00.000	+36 32 46.000	0.000	0.000	1000
COMP-007	1989-01-01	A	15 23 00.000	+36 32 46.000	0.000	0.000	1000
COMP-008	1989-01-01	A	15 23 00.000	+36 32 46.000	0.000	0.000	1000
COMP-009	1989-01-01	A	15 23 00.000	+36 32 46.000	0.000	0.000	1000
COMP-010	1989-01-01	A	15 23 00.000	+36 32 46.000	0.000	0.000	1000

ESA

J.-L. Charmet

D.R.

J.-L. Charmet

Roger Viohat

1. DE L'ASTRONOME GREC HIPPARQUE (II^e siècle avant notre ère) à la mission HIPPARCOS, le précision des catalogues stellaires a été multipliée par un million, de 0,4 degré à 0,0008 seconde d'angle. Ulugh Begh, au XV^e siècle, et Tycho Brahé, au XVI^e siècle, mesuraient la position des étoiles à l'œil nu. À partir du XVII^e siècle, l'invention de la lunette astronomique a augmenté la précision de ces relevés.

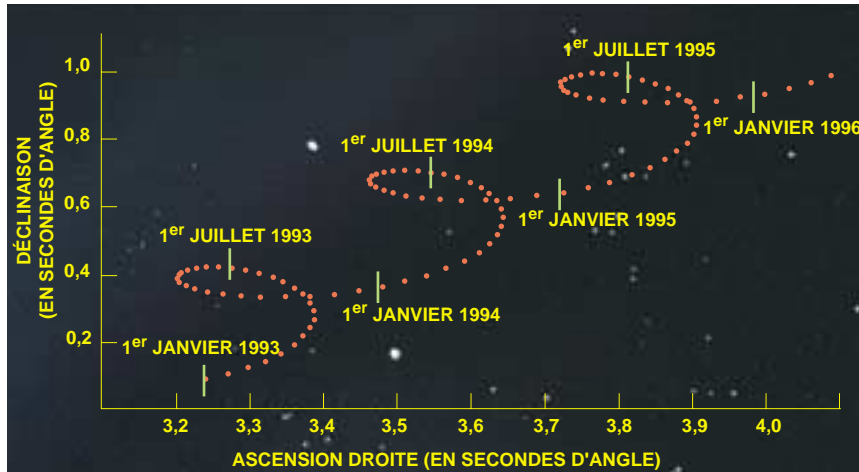
fondamentaux, plus précis, répertorient les positions absolues des étoiles, mesurées par rapport à un seul système d'axes. Leur réalisation est beaucoup plus longue et difficile : au moment où Argelander achève son œuvre monumentale, il publie aussi un catalogue fondamental de seulement 160 étoiles,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

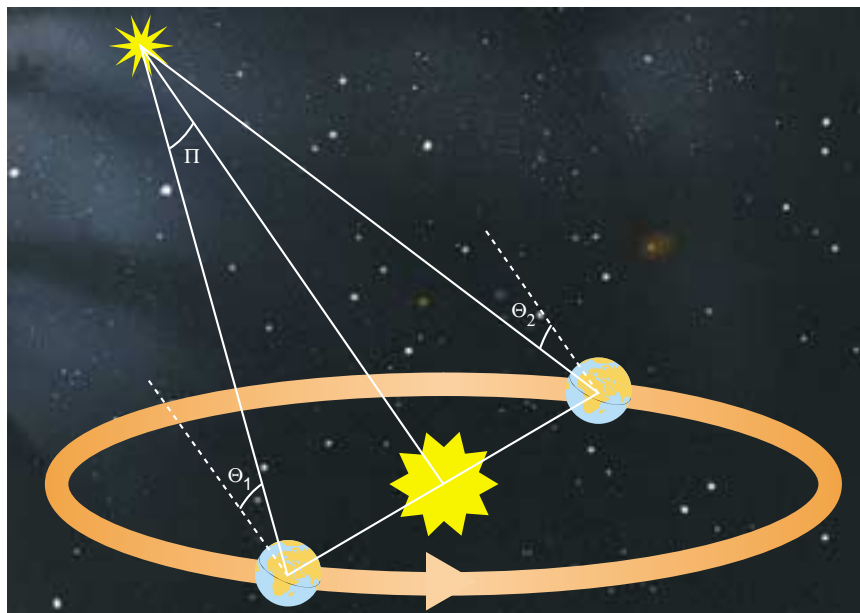
repère cartésien. Par exemple, on peut souhaiter que l'un des axes soit perpendiculaire à l'écliptique, plan moyen de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Malheureusement il n'y a pas sur le ciel une marque colorée avec l'inscription "ici est la normale à l'orbite de la Terre". Pour connaître la coordonnée 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

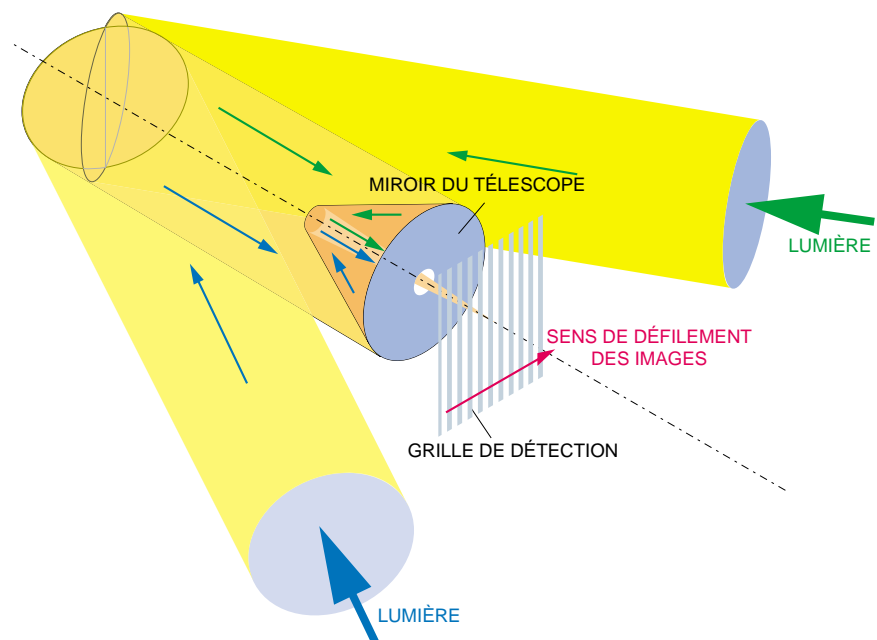
Dès 1966, Pierre Lacroute, de l'Observatoire de Strasbourg, soumet un projet de satellite astrométrique au Centre national de la recherche scientifique. La première étude de faisabilité est entreprise en 1977 par l'Agence spatiale européenne, et le projet est adopté sous le nom d'*HIPPARCOS* en mars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

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.

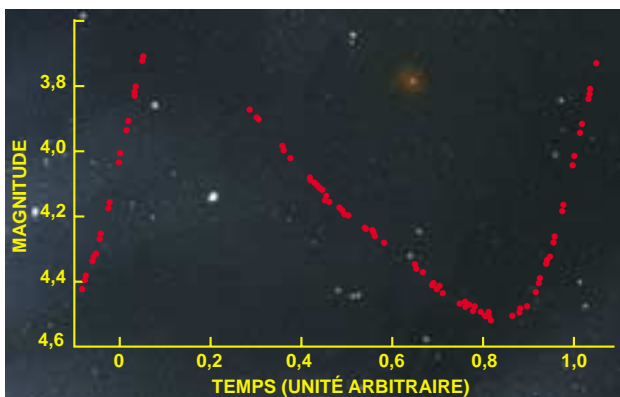
Il faut remarquer que, pour les étoiles observées à un instant donné, nous ne disposions que d'une information de position à l'intérieur d'un des 3 000 barreaux de la grille, sans savoir lequel. Cette situation est comparable à celle d'une excellente montre à quartz qui serait fournie sans aiguille des 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.

des galaxies proches. En combinant les mesures de distance et de luminosité des céphéides observées par *HIPPARCOS*, Michael Feast et Robin Catchpole, de l'Observatoire de Cambridge, ont récemment amélioré la relation entre période et luminosité intrinsèque, avec une précision de cinq pour cent. Selon leurs calculs, l'échelle des distances de l'Univers devrait être augmentée de dix pour cent par rapport aux valeurs admises jusqu'à présent.

Ce résultat a été confirmé par une autre utilisation des mesures de parallaxe d'*HIPPARCOS*. Neill Reid, de l'Institut de technologie de Californie, en tire une conséquence rassurante : les amas globulaires, regroupements très anciens de plusieurs centaines de milliers d'étoiles, ne sont pas plus âgés que l'Univers lui-même. Les étoiles des amas globulaires sont surtout constituées d'hydrogène et d'hélium, les deux éléments primordiaux : elles se seraient formées avant que les éléments chimiques plus lourds ne soient synthétisés dans d'autres étoiles. Des étoiles de notre Galaxie, de composition semblable, seraient issues de tels amas. Les parallaxes mesurées par *HIPPARCOS* pour une trentaine d'entre elles indiquent que leur distance est plus grande de 10 à 15 pour cent que ce que l'on croyait. Ces étoiles, et toutes celles des amas globulaires, sont donc aussi plus lumineuses. Par conséquent, elles sont plus jeunes que ne le pensaient les astronomes : elles auraient moins de 13 milliards d'années.

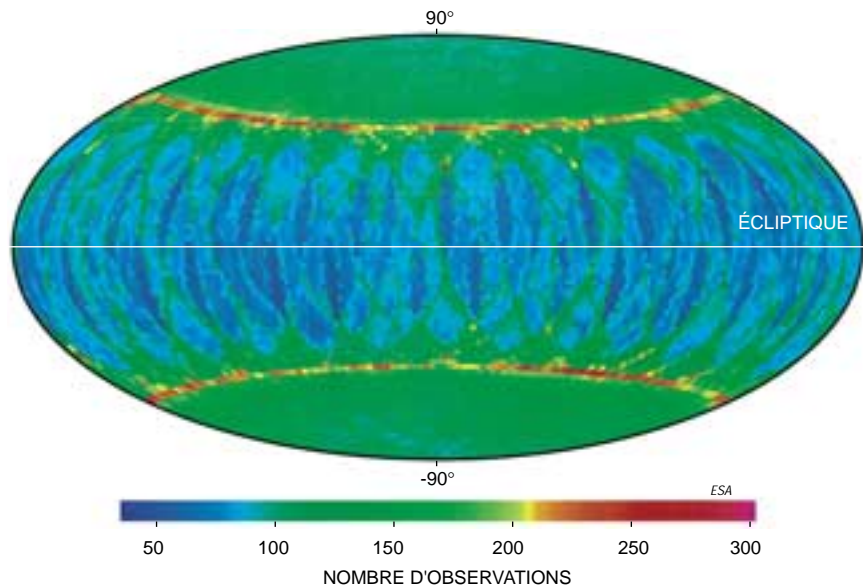
La plupart des étoiles passent par une phase d'instabilité au cours de leur vie, qui se traduit par des pulsations et des variations périodiques ou irrégulières de la température de surface, donc de la luminosité. Les observations de chaque étoile, distribuées sur trois ans, indiquent si la luminosité de l'étoile est variable ou constante, tout au moins dans les limites de la sensibilité du détecteur. Parmi les 11 600 étoiles reconnues variables ou probablement variables par *HIPPARCOS*, 8 300 étaient tenues jusqu'alors pour constantes. L'étude des étoiles dont la luminosité présente une variabilité à longue période a aussi confirmé un phénomène que l'on avait entrevu lors de mesures au sol : des sauts de luminosité sur des intervalles de temps de quelques heures, signes d'événements violents dans l'atmosphère de ces étoiles.

Dédoubler les étoiles

HIPPARCOS a aussi détecté des étoiles doubles, couples d'étoiles associées par les forces de gravitation. Le catalogue contient la position relative des deux étoiles et une mesure de chacune des luminosités pour plus de 12 000 couples d'étoiles doubles, dont près de 3 000 étaient jusqu'à présent considérés comme des étoiles isolées, sans compagnon. Le caractère double de 8 000 autres systèmes stellaires est aussi suspecté, mais les mesures sont encore insuffisantes pour conclure. Plusieurs

équipes européennes et américaines s'apprentent à démarrer des campagnes d'observation spécifiques de ces astres afin de trancher.

Nous avons caractérisé ces couples d'étoiles grâce à des algorithmes mis au point avec Michel Froeschlé et Jean-Louis Falin, du CERGA, et des équipes de Turin et de Frascati. *HIPPARCOS* n'examine pas des images du ciel, mais reçoit un signal variable en fonction du temps lorsque l'objet observé avance sur la grille placée au foyer du télescope. Pour une étoile isolée, sans compagnon, la représentation mathématique de ce signal est



6. L'INTÉGRALITÉ DU CIEL a été observée par le satellite *HIPPARCOS*. Toutefois, les observations ne sont pas réparties de manière homogène : les plus grandes densités sont concentrées à 47 degrés de l'écliptique, plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Cette répartition résulte d'un compromis entre le balayage régulier et systématique du ciel et la nécessité de ne pas braquer le télescope en direction du Soleil.

	<i>HIPPARCOS</i>	<i>TYCHO</i>
Nombre d'étoiles	118 218	1 058 332
Magnitude limite	12,5	11,5
Densité moyenne (en étoiles par degré carré)	3	25
Précision médiane des étoiles plus brillantes que la magnitude 9 (en secondes d'angle)	0,0008	0,007
Nombre moyen de mesures de la luminosité	110	130
Précision moyenne de la luminosité des étoiles plus brillantes que la magnitude 9 (en magnitude)	0,0015	0,013
Nombre d'étoiles doubles résolues	12 195	

7. LE CATALOGUE *HIPPARCOS* et le catalogue *TYCHO*, réalisé avec un détecteur auxiliaire du satellite, sont les plus complets et les plus précis des catalogues stellaires.

assez simple. En revanche, lorsque deux étoiles proches l'une de l'autre passent devant la grille, le détecteur additionne les deux signaux. Si la distance angulaire séparant les deux étoiles est supérieure à 0,15 seconde d'angle, nous savons séparer les deux composantes qui ont produit le signal complexe observé. En combinant les observations de l'astre dans diverses orientations par rapport aux barreaux de la grille, on retrouve sans ambiguïté la luminosité de chacune des deux étoiles, leur position relative sur le ciel et, finalement, leur parallaxe. En outre, pour certains systèmes doubles à très courte période (quelques années), nous avons détecté un petit mouvement du centre de la distribution lumineuse correspondant à sa rotation autour du centre de masse du système : les deux étoiles sont, par exemple, de même masse, mais leurs luminosités sont différentes. Dans ces cas favorables, nous avons estimé le rapport des masses des deux étoiles, et nous avons donc calculé directement ces masses.

Avant que les résultats finaux ne soient disponibles, des utilisations restreintes des résultats provisoires ont été accordées par le Comité scientifique *HIPPARCOS*. Si une étoile est accompagnée d'une planète, le centre des masses du système, autour duquel tournent l'étoile et la planète, ne coïncide pas avec le centre de l'étoile : celle-ci décrit alors une orbite autour du centre de masse. En décembre 1995, des astronomes ont révélé qu'une planète gravite autour de l'étoile 51 Pégase. Peu après, plusieurs autres planètes ont été annoncées, autour de 47 de la Grande Ourse et de 70 de la Vierge notamment. Ces résultats étaient obtenus par des mesures du mouvement de l'étoile le long de la ligne de visée, par effet Doppler (à chaque orbite, l'étoile s'éloigne, puis se rapproche de nous). La mesure par *HIPPARCOS*, avec une précision de un pour cent, des distances des étoiles a fixé une limite supérieure aux masses des planètes : 22 fois la masse de Jupiter pour 47 de la Grande Ourse et 65 fois la masse de Jupiter pour 70 de la Vierge. Pour des masses plus grandes, nous aurions, avec l'ensemble des mesures de position, détecté le mouvement de l'étoile autour du centre de masse du

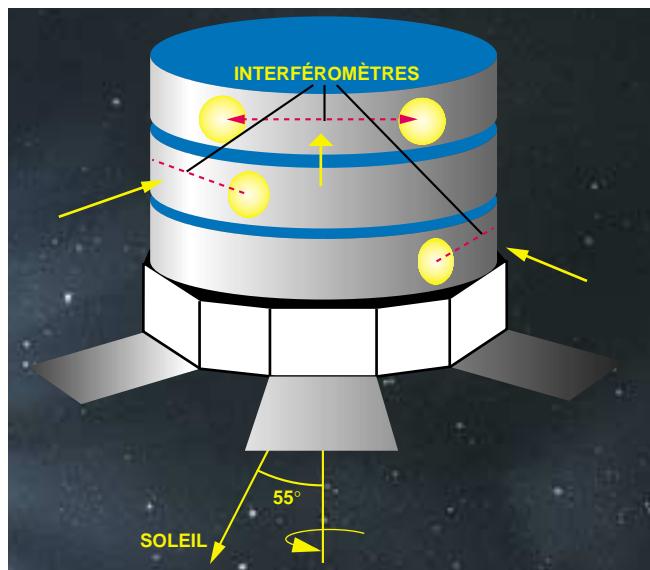
système. Ces masses sont inférieures à la limite au-delà de laquelle l'objet est une naine brune, étoile qui ne s'est pas allumée : c'est un élément supplémentaire en faveur de la nature planétaire de ces objets. Nous n'avons pas pu donner de limite pour la masse de la planète de 51 Pégase : le déplacement de l'étoile sur le ciel est trop faible.

Positionner la supernova

En février 1987, l'explosion d'une étoile dans les nuages de Magellan, à 150 000 années-lumière, a donné aux astronomes l'occasion exceptionnelle d'étudier une supernova. Les centres des images radio et optiques étaient écartés de près de 0,5 seconde d'angle : cette différence provenait-elle d'une différence d'origine des signaux, ou des systèmes de coordonnées utilisés par les radio-astronomes et par les observateurs dans le visible? En comparant, de proche en proche, la position des étoiles du

guidage des sondes spatiales et à la préparation des rendez-vous avec les planètes ou avec les satellites. Ainsi, le groupe de pilotage de la sonde américaine *Galileo* a utilisé les mesures *HIPPARCOS* pour préparer la rencontre avec l'astéroïde *Ida* le 28 août 1993. Plus récemment, des astronomes de l'Observatoire européen austral ont calculé avec ces données un calendrier très exact de la collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter en juillet 1994, permettant d'optimiser la préparation des observations.

HIPPARCOS n'a observé notre galaxie, qui s'étend sur près de 100 000 années-lumière, que dans un rayon d'environ 500 années-lumière autour du Soleil. Toutefois, en combinant les mouvements propres précis et homogènes qu'il a mesurés à des mesures de vitesses le long de la ligne de visée, acquises par des mesures au sol, nous calculerons le déplacement en trois dimensions d'un grand nombre d'étoiles. Nous améliorerons ainsi les modèles de l'histoire de la Galaxie, et nous préciserons sa rotation et la répartition des masses. Grâce aux parallaxes, la fonction de luminosité, nombre d'étoiles par unité de volume et par intervalle de luminosité intrinsèque, sera calculée de manière directe pour la première fois sur un échantillon complet : nous connaîtrons mieux la population stellaire dans le voisinage solaire et, surtout, nous pourrions tester les mécanismes de formation des étoiles pour des situations très diverses.



8. LE PROJET *GAIA*, actuellement étudié par l'Agence spatiale européenne, succédera peut-être à *HIPPARCOS* après 2010. Le satellite transporterait trois interféromètres empilés. L'interférométrie, déjà utilisée avec des télescopes terrestres, mais jamais encore dans l'espace, produit des images plus précises que l'observation directe.

voisinage fournie par *HIPPARCOS*, J. E. Reynolds, L. Staveley-Smith et leurs collaborateurs, du Télescope national australien d'Epping, ont identifié un défaut local dans le système de référence optique. L'émission radio et l'émission optique ont donc la même origine et sont imputables au même phénomène, l'explosion d'une étoile en supernova.

Les données d'*HIPPARCOS* ont aussi été utilisées, par un curieux retour aux sources, pour la navigation : un système de référence précis est indispensable au

D'autres paramètres, tels que la température de surface ou le rayon des étoiles seront déduits des parallaxes *HIPPARCOS* associées à des observations spectroscopiques provenant du satellite infrarouge *ISO*, en particulier pour les étoiles naines rouges et froides.

Le satellite *HIPPARCOS* a fonctionné jusqu'au 15 août 1993. Les responsables de la mission au centre de contrôle de l'Agence spatiale européenne, à Darmstadt, ont alors décidé l'arrêt des opérations : diverses avaries du système de guidage et surtout des pannes à répétition de l'ordinateur de bord rendaient impossible l'acquisition des données. Quel-

ques mois après, et alors que le traitement des données n'était pas terminé, des projets ambitieux étaient déjà proposés pour sa succession. En Europe, le projet *GAIA* (acronyme anglais pour interféromètre astrométrique global pour l'astrophysique) est à l'étude depuis la fin de 1993. *GAIA* réaliserait des mesures d'une précision de 5 à 20 microsecondes d'angle, supérieure à celle d'*HIPPARCOS*, par la technique d'interférométrie optique : cette technique consiste à former une figure d'interférence avec deux images issues de deux télescopes assez distants. La résolution de l'image augmente la distance séparant les deux télescopes. Cette technique, utilisée au sol (huit interféromètres sont en service dans le monde), ne l'a jamais été dans l'espace.

GAIA serait constitué d'un empilement de trois interféromètres identiques dont les axes de visée feraient un angle constant entre eux. En outre, grâce à une sensibilité 40 fois supérieure à celle d'*HIPPARCOS*, il observerait 50 millions d'étoiles, dans six bandes de couleur. Avec un tel instrument, on mesurerait géométriquement pour la première fois des distances en dehors de la Voie lactée. Il serait lancé peu après 2010 et fonctionnerait cinq ans. Les astronomes américains ne sont pas en reste : le projet *SIM* (pour mission d'interférométrie spatiale), à l'étude pour un lancement vers 2004, vise une précision de quelques microsecondes d'angle (cinq fois supérieure à celle de *GAIA*), mais pour seulement quelques dizaines de milliers d'étoiles dont certaines seraient cent fois moins lumineuses, avec un objectif majeur : la détection et la caractérisation de planètes extra-solaires.

François MIGNARD est directeur de recherche au CNRS et dirige le CERGA à Grasse. Christian MARTIN a soutenu récemment une thèse sur le traitement des données *HIPPARCOS*.

The HIPPARCOS Mission, ESA SP-1111, 3 volumes, 1989.

HIPPARCOS : une nouvelle donne pour l'astronomie, sous la direction de D. Benest et C. Froeschlé, Société française des spécialistes d'astronomie, 1992.

Astronomy and Astrophysics, volume 304, 1995.

Roger ANGEL et Neville WOOLF, *À la recherche de la vie*, in *Pour la Science*, juin 1996.
