

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.

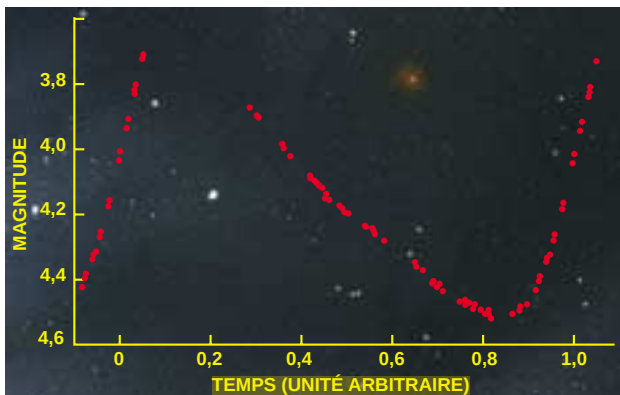
Il faut remarquer que, pour les étoiles observées à un instant donné, nous ne disposons que d'une information de position à l'intérieur d'un des 3 000 barreaux de la grille, sans savoir lequel. Cette situation est comparable à celle d'une excellente montre à quartz qui serait fournie sans aiguille des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

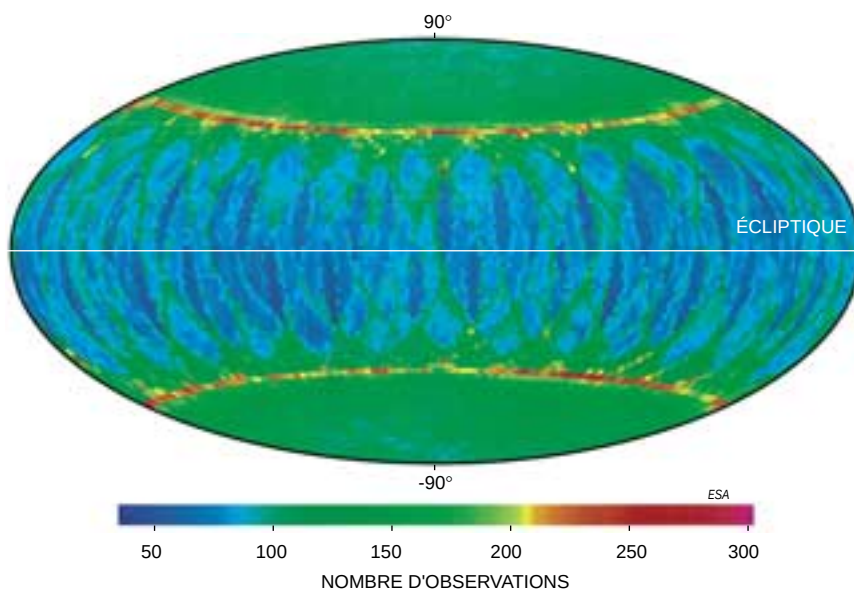
La plupart des étoiles passent par une phase d'instabilité au cours de leur vie, qui se traduit par des pulsations et des variations périodiques ou irrégulières de la température de surface, donc de la luminosité. Les observations de chaque étoile, distribuées sur trois ans, indiquent si la luminosité 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.