

# Le satellite Hipparcos : applications de l'astrométrie globale de haute précision à l'astrophysique

*La mesure des distances est une des clefs essentielles de notre représentation du monde et de l'Univers et, indirectement, de notre compréhension des mécanismes physiques qui régissent l'évolution stellaire et galactique. Le satellite européen Hipparcos, qui a observé le ciel pendant quatre ans, de novembre 1989 à mars 1993, sous la responsabilité de l'Agence spatiale européenne, a permis d'obtenir les positions, les parallaxes trigonométriques (donc les distances) et les mouvements propres (mouvements tangents à la sphère céleste) de 118 000 étoiles de tous types et d'une cinquantaine d'objets du système solaire. Les résultats ont été publiés en juin 1997, et de très nombreuses applications sont présentées dans les principales revues d'astronomie et d'astrophysique. Celles-ci portent sur des sujets aussi variés que les systèmes de référence, la physique stellaire, la physique galactique ou la détermination des distances et des âges dans l'Univers. Dans cet article, après une description rapide de la mission, nous présenterons une sélection de ces premiers résultats.*

**N**otre vision de l'Univers s'appuie sur une donnée fondamentale, la distance entre la Terre ou le système solaire et les ob-

---

Laboratoires français participant à la mission Hipparcos :

– DASGAL, UMR 8633 CNRS, Observatoire de Paris, 92195 Meudon cedex.

– Observatoire de Strasbourg, UMR 7550 CNRS, 11, avenue de l'Observatoire, 67000 Strasbourg.

– Bureau des Longitudes, URA 707 CNRS, 77, avenue Denfert Rochereau, 75014 Paris.

– Observatoire de Marseille, UMR 6537 CNRS, 2, place Le Verrier, 13248 Marseille cedex 4.

– CERGA, UMR 6527 CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, avenue Copernic, 06130 Grasse.

– Observatoire de Bordeaux, UMR 5804 CNRS, 33270 Floirac.

– GRAAL, ESA 5024 CNRS, Université de Montpellier, 34095 Montpellier.

jets que nous observons. Les Anciens déjà essayaient de mesurer le diamètre de la Terre, la distance de la Terre à la Lune, la distance des planètes et des étoiles, et leurs résultats sur les corps du système solaire étaient incroyablement bons lorsque l'on considère les moyens dont ils disposaient. En revanche, les problèmes métaphysiques s'ajoutaient aux problèmes techniques lorsque que c'était la distance aux étoiles qui était en jeu. Dès le troisième siècle avant J.C., Aristarque de Samos avait proposé la théorie suivant laquelle c'était la Terre qui tournait autour du Soleil (et non l'inverse), et en avait justement déduit que cela impliquait que les étoiles étaient loin, car on ne voyait aucune étoile affectée d'un mouvement parallactique (mouvement réflexe de celui de la Terre autour du Soleil, projeté sur la sphère céleste, voir encadré 1). Mais il était difficile d'imaginer que même l'étoile la plus proche pouvait être si lointaine que son mouvement

parallactique était totalement imperceptible avec les moyens d'observation disponibles à cette époque.

La précision des mesures astrométriques a progressé lentement au cours des siècles, et il a fallu attendre Copernic, puis Kepler, pour comprendre et représenter mathématiquement les mouvements des planètes dans le système solaire. Pour la détermination correcte de distances d'étoiles, il a fallu attendre encore plus longtemps, comme le montre le tableau 1.

La détermination de la taille de notre Galaxie et de celle des galaxies extérieures a, elle aussi, entraîné de nombreuses difficultés. Malgré les premières mesures de distances d'étoiles individuelles dès le premier tiers du XIX<sup>e</sup> siècle, elles faisaient encore l'objet de vives controverses au début du XX<sup>e</sup> siècle. Pour Jacobus Cornelis Kapteyn, notre Galaxie était un système de taille modeste, environ 9 kpc de diamètre (1 pc = 3,26

## PARALLAXE TRIGONOMÉTRIQUE, DISTANCE, MAGNITUDES, MODULE DE DISTANCE

Les étoiles proches décrivent sur la sphère céleste une ellipse parallactique, mouvement réflexe du mouvement de la Terre autour du Soleil. La parallaxe trigonométrique est l'angle sous-lequel on voit, depuis l'étoile, le demi-grand axe de l'orbite terrestre. Plus l'étoile est loin, plus la parallaxe trigonométrique est petite.

Le parsec (pc) est la distance d'une étoile d'où l'on voit le demi-grand axe de l'orbite terrestre (une unité astronomique, u.a.) sous un angle de une seconde de degré (").

1 pc = 3,26 années-lumière = environ 31 000 milliards de km.

Il se trouve que le Soleil est dans une zone peu riche en étoiles de notre Galaxie, et que l'étoile la plus proche, Proxima Centauri, est déjà à environ 1,2 pc (4 al) du Soleil. Sa parallaxe trigonométrique est un angle très petit : 0,7".

La magnitude apparente,  $m$ , d'une étoile dépend de son éclat,  $E$ , par la loi de Pogson :

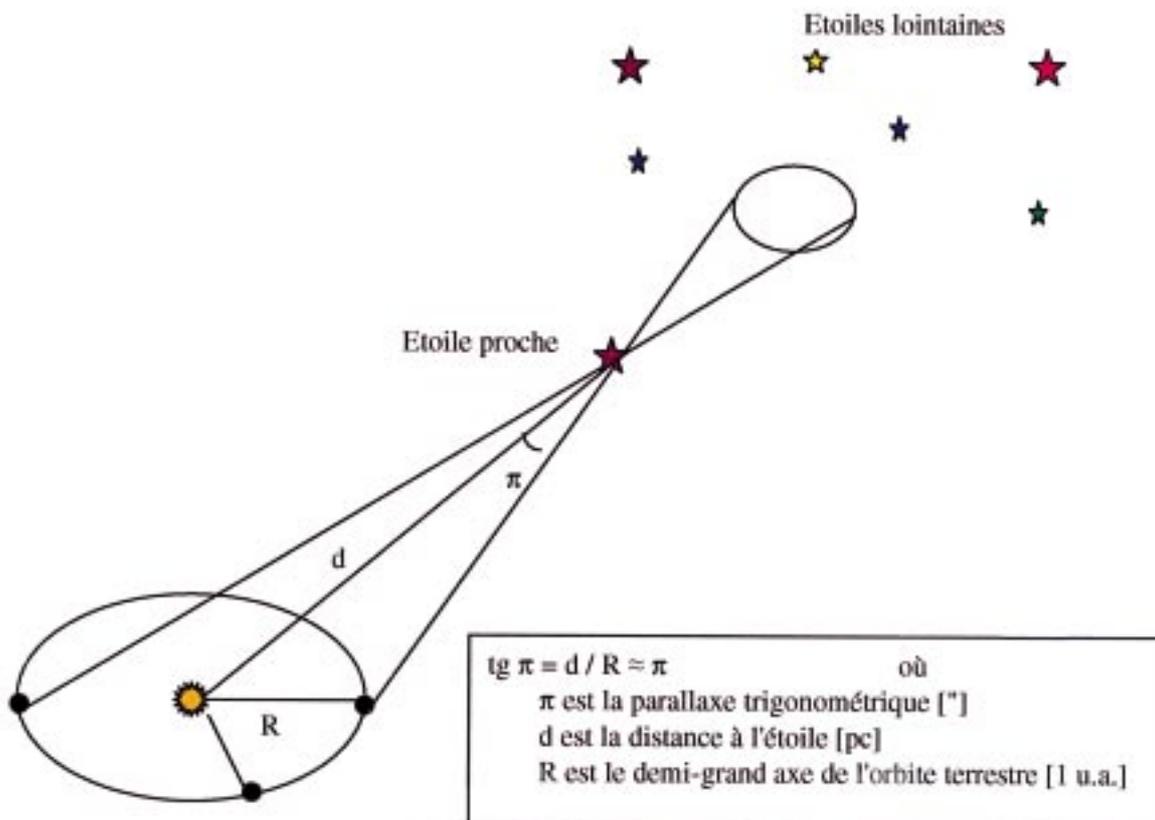
$$m = -2,5 \log E \text{ (+ une constante qui dépend des unités).}$$

Elle est reliée à la magnitude absolue de l'étoile  $M$  (magnitude qu'aurait l'étoile si elle était située à 10 pc du Soleil) et à sa distance  $d$  (ou sa parallaxe trigonométrique  $\pi$ ) :

$$M = m + 5 - 5 \log d = m + 5 + 5 \log \pi$$

si l'on peut négliger les effets de l'absorption par le gaz et la poussière situés entre l'étoile observée et le Soleil. La magnitude absolue  $M$  est une mesure de la luminosité intrinsèque de l'étoile.

On appelle module de distance la différence  $M - m = 5 - 5 \log d = 5 + 5 \log \pi$



**Tableau 1**  
Quelle est la distance des étoiles ?

Auteur	Étoile	Date	Distance 10 <sup>9</sup> km	Hipparcos 10 <sup>9</sup> km
Aristarque		≈ 280 av. J.C.	« immense » !	
Ptolémée		150	0,13	
Copernic		1 500	« immense » !	
Tycho Brahe		1 580	0,09	
Kepler		1 600	220	
Newton	Sirius	1 685	150 000 <sup>(1)</sup>	81 380 ± 30
Bessel	61 Cygni	1 838	33 000 <sup>(2)</sup>	41 584 ± 20
Henderson	α Centauri	1 838	120 000 <sup>(2)</sup>	239 400 ± 1 000
Struve	α Lyrae	1 838	105 500 <sup>(2)</sup>	107 480 ± 560

<sup>(1)</sup> Distance par comparaison des luminosités du Soleil et de Sirius

<sup>(2)</sup> Distance à partir de parallaxes trigonométriques

années-lumière = environ 31 000 milliards de km), avec le soleil situé presque au centre ; pour Harlow Shapley, c'était un système de 90 kpc de diamètre, le soleil étant à 15 kpc du centre. Pour Shapley, les galaxies extérieures étaient petites et proches ; pour Heber D. Curtis, elles étaient de taille similaire à la nôtre et lointaines. C'était en 1920 ! Ce qui manquait, comme pendant presque deux millénaires pour les étoiles proches, c'était une détermination correcte des distances.

### **HIPPARCOS A RÉVOLUTIONNÉ NOTRE CONNAISSANCE DES DISTANCES ET DES LUMINOSITÉS DES ÉTOILES DU VOISINAGE SOLAIRE**

Hipparcos, acronyme pour **H**igh **P**recision **P**arallax **C**ollecting **S**atellite, construit sous la responsabilité de l'Agence spatiale européenne et lancé par Ariane le 8 Août 1989, a été le premier satellite à effectuer des mesures astrométriques dans l'espace (voir encadré 2). Les déplacements angulaires des 118 000 étoiles du programme d'observation ont été suivis pendant 4 ans, et la précision des mesures a permis un saut qualitatif et quantitatif sur les paramètres observés : la distance de plus de

20 000 étoiles est maintenant connue à mieux que 10 % près contre moins d'un millier d'étoiles auparavant (leur luminosité intrinsèque est par suite connue à mieux que 0,2 magnitude près). De plus, la variété des types spectraux et classes de luminosité des étoiles observées est beaucoup plus grande (très grand nombre de naines et de géantes, quelques dizaines de sous-naines et de sous-géantes, quelques naines blanches et supergéantes).

La mesure de parallaxes trigonométriques au sol est extrêmement délicate, d'une part à cause des perturbations dues à la présence de l'atmosphère terrestre, d'autre part à cause de la gravité terrestre qui, entraînant la flexion des télescopes, fausse les mesures précises, de positions d'étoiles. De plus, les instruments astrométriques au sol sont des télescopes à petit champ ne permettant que la mesure de petits angles. Cela entraîne que les étoiles de référence sont en très petit nombre et que les mesures de parallaxes sont relatives (le résultat de la mesure est la différence entre la parallaxe de l'étoile cible et la parallaxe moyenne des étoiles de référence). La dernière édition du catalogue général des

parallaxes trigonométriques (General Catalogue of Trigonometric Parallaxes, publié par l'Université de Yale aux USA en 1991) contient environ 10 000 étoiles, et les précisions sont très inégales. Le catalogue d'étoiles plus proches que 25 pc (CNS3 = Catalogue of Nearby Stars, version 3, 1991) rassemble la meilleure compilation de distances obtenues antérieurement au sol pour les étoiles très proches du soleil.

Les données d'Hipparcos ont permis de montrer que les distances d'étoiles proches étaient statistiquement sous-évaluées de 10 à 15 % : près de 40 % des étoiles du CNS3 ont été trouvées par Hipparcos à des distances supérieures à 25 pc. La figure 1 montre deux diagrammes Hertzsprung-Russell (voir encadré 3) tracés l'un avec les meilleures données d'Hipparcos (à gauche), l'autre avec les meilleures données du CNS3. Dans le cas d'Hipparcos, la séquence principale pour les étoiles plus brillantes que la magnitude absolue 10 environ et les séquences des géantes et des sous-géantes sont beaucoup plus peuplées que dans le cas des mesures effectuées depuis le sol. En revanche, le bas de la séquence principale et la séquence des naines blanches sont plus peuplées dans les données obtenues au sol, car Hipparcos ne pouvait observer que très peu d'étoiles de faible magnitude apparente, et aucune étoile plus faible que la magnitude apparente visuelle  $V = 12,5$ .

### **ÂGES ET MASSES DES ÉTOILES**

Les paramètres fondamentaux dont dépendent les réactions nucléaires à l'intérieur des étoiles, et par suite l'évolution de celles-ci, sont la masse et la composition chimique, essentiellement l'abondance en éléments lourds. Celle-ci est caractérisée par le rapport de l'abondance en fer à l'abondance en hydrogène pour l'étoile comparé au même rapport pour le Soleil, et symbolisée par  $[Fe/H]$ . Des modèles différents d'évolution stellaire sont alors

## CARACTÉRISTIQUES DU SATELLITE ET DU CATALOGUE HIPPARCOS

*Le satellite Hipparcos a balayé le ciel régulièrement pendant 4 ans, de novembre 1989 à mars 1993, effectuant un tour sur lui-même en deux heures environ. L'axe de rotation étant continuellement modifié, la sphère céleste était balayée dans sa totalité en environ 4 mois.*

*Le télescope embarqué, de type Schmidt entièrement réfléchissant (diamètre du miroir primaire : 29 cm), permettait, à l'aide d'un « mélangeur de faisceaux », de rassembler dans le plan focal les étoiles observées dans deux champs du ciel situés à 58 degrés l'un de l'autre. Une grille placée dans le plan focal, formée de près de 3 000 fentes parallèles, et perpendiculaires à la direction de balayage, modulait le signal reçu de chaque étoile du programme. Le déphasage entre les signaux permettait de déterminer très précisément l'angle entre les étoiles présentes dans les deux champs, modulo 58°.*

*Ces mesures d'angle associées à la connaissance de l'attitude du satellite (directions de visée de chacune des ouvertures du télescope) permettaient d'obtenir les mesures astrométriques élémentaires pour chaque étoile : l'abscisse de l'étoile sur le grand cercle de la sphère céleste balayé par le satellite au voisinage de celle-ci à chaque époque où elle était observée. De plus, les comptages de photons donnaient aussi la magnitude de l'étoile à chaque époque d'observation.*

*Dans le cas d'étoiles doubles ou multiples, le signal est plus complexe, et a dû être comparé à un modèle dépendant des éclats relatifs des différentes composantes et de leur séparation angulaire sur le ciel.*

*Le satellite Hipparcos a pu mesurer les paramètres de 118 000 étoiles plus brillantes que la magnitude apparente*

*$V = 12,4$ , présélectionnées sur critères scientifiques, mais aussi pour utiliser au mieux le temps d'observation disponible, c'est-à-dire réparties relativement régulièrement sur la sphère céleste.*

*Pour chaque étoile, cinq paramètres astrométriques ont été obtenus :*

- les deux composantes de la position, à l'époque moyenne 1991,25 ;*
- la parallaxe trigonométrique (voir encadré 1) ;*
- les deux composantes pour le mouvement propre annuel (mouvement tangent à la sphère céleste) rattaché au système de référence ICRS (International Celestial Reference System, défini par les positions d'objets extragalactiques compacts).*

*La précision est meilleure que le millième de seconde de degré pour les étoiles plus brillantes que la magnitude 9.*

*Hipparcos a également fourni la magnitude apparente  $H_p$  pour environ 110 époques d'observation, conduisant à une précision de 0,0015 magnitude sur les magnitudes moyennes des étoiles non variables. Il a aussi démontré la présence d'étoiles multiples et la variabilité éventuelle des étoiles observées et contribué à la découverte de près de 3 000 nouvelles étoiles doubles ou multiples et de plus de 8 000 nouvelles étoiles variables (dont près de 1 000 périodiques).*

*Une seconde expérience, Tycho, a donné des paramètres astrométriques environ 10 fois moins précis, et des magnitudes dans deux couleurs ( $B_T$  et  $V_T$ ) pour environ un million d'étoiles.*

calculés pour différentes masses et différentes compositions chimiques.

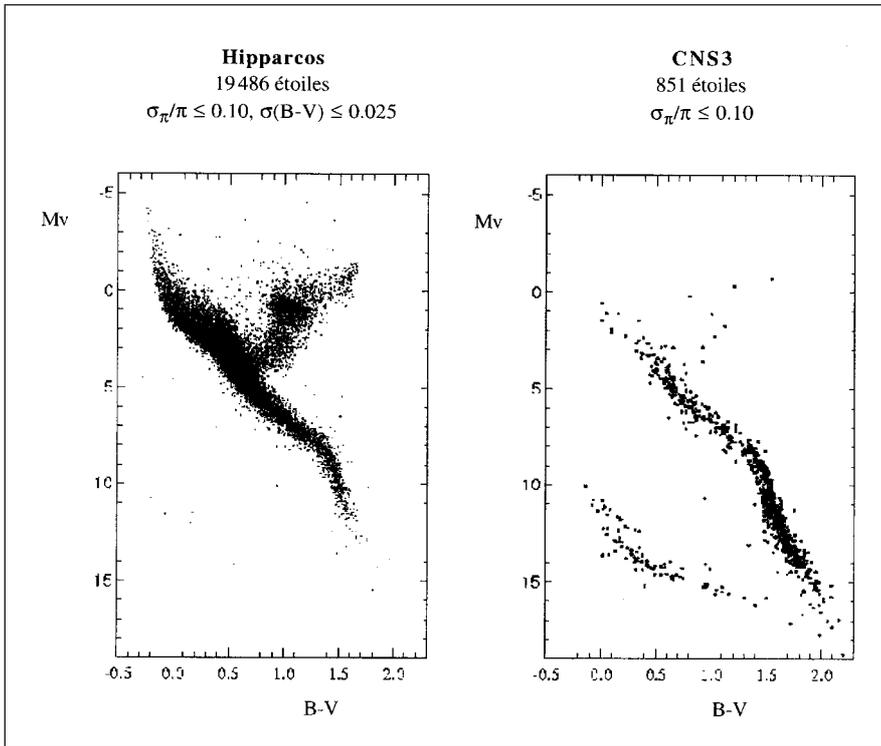
La luminosité intrinsèque et la température d'une étoile varient au cours de sa « vie », et la position de celle-ci dans le diagramme HR va se déplacer le long d'un *trajet évolutif* qui sera différent d'étoile à étoile selon la masse pour une même composition chimique initiale (encadré 3). Plus une étoile est massive, plus vite elle évolue. L'âge d'une étoile est déterminé par la comparaison de sa position dans le diagramme HR avec des lignes d'âge égal, appelées *isochrones*, calculées d'après des modè-

les d'évolution stellaire. Deux exemples de comparaison modèles-observations peuvent être donnés.

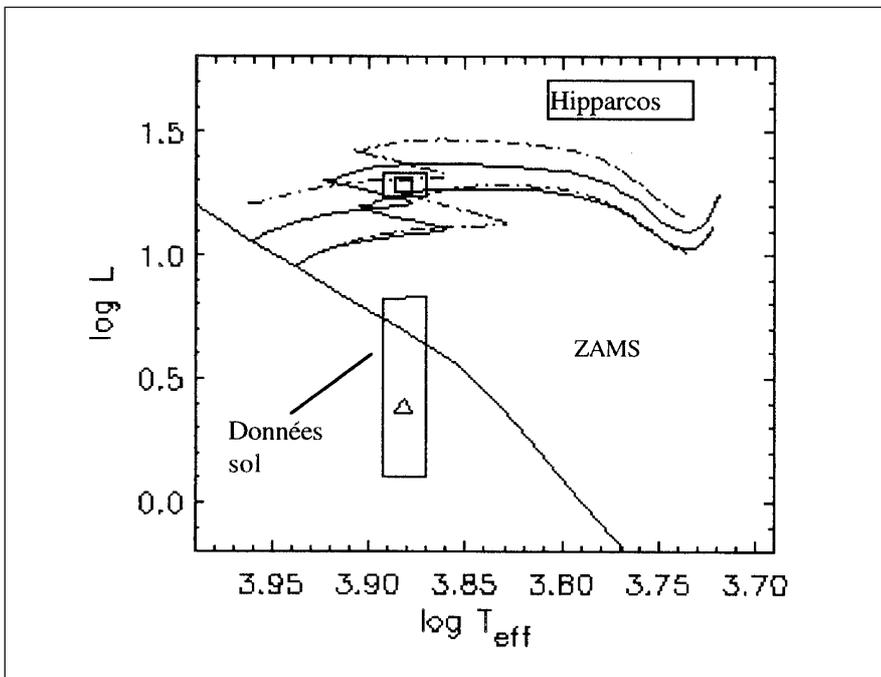
Tout d'abord certaines étoiles sont variables, et les modèles ne prévoient pas que les étoiles variables suivent des trajets évolutifs différents des autres étoiles. Au contraire, l'état « étoile variable » ne serait qu'une phase de l'évolution normale de toute étoile, lors de son passage par ce qui est appelé la « bande d'instabilité ». Or les mesures de parallaxes trigonométriques au sol plaçaient deux étoiles variables, de type  $\delta$  Scuti, SX Phœnicis et AI Velorum, à une

position du diagramme HR incompatible avec tout trajet évolutif, quelle que soit la masse attribuée à ces étoiles. Les distances obtenues avec Hipparcos les ont au contraire ramenées à une position en excellent accord avec les théories standard, d'évolution stellaire. La figure 2 montre le cas de AI Vel.

Le deuxième exemple concerne les objets les plus vieux de notre Galaxie, les étoiles appelées sous-naines et les amas globulaires. Les amas globulaires sont des rassemblements de plusieurs centaines de milliers d'étoiles de masses différentes mais

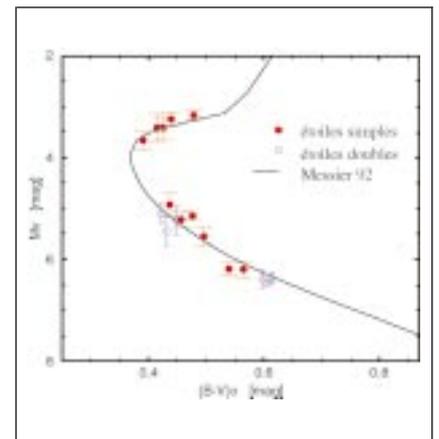


**Figure 1** - Comparaison des diagrammes HR (magnitude absolue visuelle,  $M_v$ , en fonction de la couleur, B-V) obtenus avec les données du satellite Hipparcos (19 486 étoiles, à gauche) et d'après le catalogue CNS3 d'étoiles plus proches que 25 pc observées depuis le sol (851 étoiles, à droite). Dans les deux cas : distances déterminées à mieux que 10 %.



**Figure 2** - Comparaison de la position observée de AI Vel dans le diagramme HR (luminosité absolue  $L$  en unités de luminosité solaire en fonction de la température effective de surface  $T_{eff}$ ) selon que la parallaxe Hipparcos ( $\square$ ) ou la meilleure parallaxe obtenue depuis le sol ( $\Delta$ ) est utilisée. Les boîtes d'erreurs correspondent respectivement aux erreurs des catalogues utilisés pour les distances (et par suite les magnitudes absolues) et à  $\pm 200$  K sur la température effective ( $T_{eff}$ ). Les courbes en plein donnent la séquence principale d'âge zéro (ZAMS, Zero Age Main Sequence) et les trajets évolutifs calculés pour les masses 1,6 et 1,7  $M_{\odot}$  (masse solaire) (courbe basse et haute respectivement). Les courbes en pointillés donnent les trajets évolutifs calculés pour une abondance en métaux différente. La parallaxe Hipparcos place AI Vel à une position en excellent accord avec une évolution standard et permet de lui attribuer une masse de 1,63  $M_{\odot}$  [tiré de Høg et Petersen, 1997, *Astron. & Astrophys.*, **323**, 827].

d'âge similaire. Le nom de sous-saines vient de leur position dans le diagramme HR : elles sont situées sous la séquence principale. Leur caractéristique essentielle est d'avoir une abondance en métaux déficiente par rapport à celle du Soleil, correspondant aux étoiles formées au début de la vie de notre Galaxie. Des parallaxes trigonométriques précises ont été obtenues par Hipparcos pour quelques dizaines d'entre elles, apportant la surprise que beaucoup avaient en fait déjà quitté leur place sous la séquence principale pour aller se placer au-dessus et à droite de celle-ci, montrant que ces étoiles étaient déjà évoluées. La position dans le diagramme HR des sous-saines de très faible métallicité observées par Hipparcos est montrée dans la figure 3. L'âge de ces sous-saines est déterminé par la comparaison de la séquence formée par ces étoiles avec des isochrones théoriques calculées pour la même abondance en métaux : 12 à 14 milliards d'années selon les modèles théoriques utilisés.



**Figure 3** - Séquence de l'amas globulaire Messier 92, de métallicité  $[Fe/H] = -2,2$  (c'est-à-dire avec une abondance en fer  $10^{-2,2} = 150$  fois plus faible que celle du Soleil), ajustée aux sous-saines d'abondance en métaux similaire, observées avec Hipparcos. La comparaison entre la séquence de Messier 92 et les positions des sous-saines dans le diagramme HR permet d'obtenir une distance de  $8\,400 \pm 300$  pc et un âge de 12 à 14 milliards d'années pour cet amas, l'un des plus vieux amas globulaires de notre Galaxie [adapté de Pont et al., 1998, *Astron. & Astrophys.*, **329**, 87].

## DIAGRAMME DE HERTZSPRUNG-RUSSELL. ÉVOLUTION STELLAIRE

*En 1911 et 1913, deux astronomes, Ejnar Hertzsprung et Henry Russel, ont eu l'idée de comparer les luminosités et les types spectraux d'étoiles appartenant à un amas, c'est-à-dire situées à peu près à la même distance du Soleil. Ces étoiles ne se distribuaient pas n'importe où dans le diagramme, mais suivant des séquences assez bien définies. Ils avaient montré, par l'observation, qu'il existe une relation entre la luminosité des étoiles et la température de leurs atmosphères. En effet, en utilisant la luminosité apparente d'étoiles situées à la même distance, ils avaient accès, à une constante près, à leur luminosité intrinsèque, et les types spectraux des étoiles sont directement reliés à la température de leurs couches extérieures.*

*La distribution des étoiles dans le diagramme de Hertzsprung-Russel (en abrégé, diagramme HR) dépend de leur évolution et du temps qu'elles passent dans chaque phase d'évolution. Les étoiles du disque de notre Galaxie (étoiles jeunes ou relativement jeunes, dites de Population I) se distribuent essentiellement selon une « séquence principale » qui trace approximativement une diagonale dans le diagramme. Cette séquence principale regroupe les étoiles dont l'hydrogène du noyau est en cours de combustion et de transformation progressive en hélium. Cette phase étant très longue, c'est là que l'on trouve le plus d'étoiles. L'autre séquence bien marquée est la séquence des géantes, période de combustion de l'hélium du noyau. D'autres étoiles sont dans des phases*

*d'évolution intermédiaires (sous-géantes) ou ultérieures (supergéantes, naines blanches).*

*Selon leur masse, les étoiles se situent à différents niveaux de la séquence principale : les plus grosses et plus chaudes (10 à 20 000 degrés) se situent en haut à gauche, les plus petites et plus froides (moins de 4 000 degrés) sont en bas à droite. La durée de vie d'une étoile sur la séquence principale et sa vitesse d'évolution dépendent essentiellement de sa masse. Les binaires non détectées et les différences de composition chimique et de vitesse de rotation contribuent à l'épaisseur de la séquence principale.*

*La figure montre un diagramme HR pour des étoiles du disque galactique, construit essentiellement à l'aide des données d'Hipparcos (distances, magnitudes apparentes, couleurs). Le « Catalogue of Nearby Stars, version 3 » a été utilisé pour le bas de la séquence principale et pour les naines blanches (étoiles faibles inobservables avec Hipparcos).*

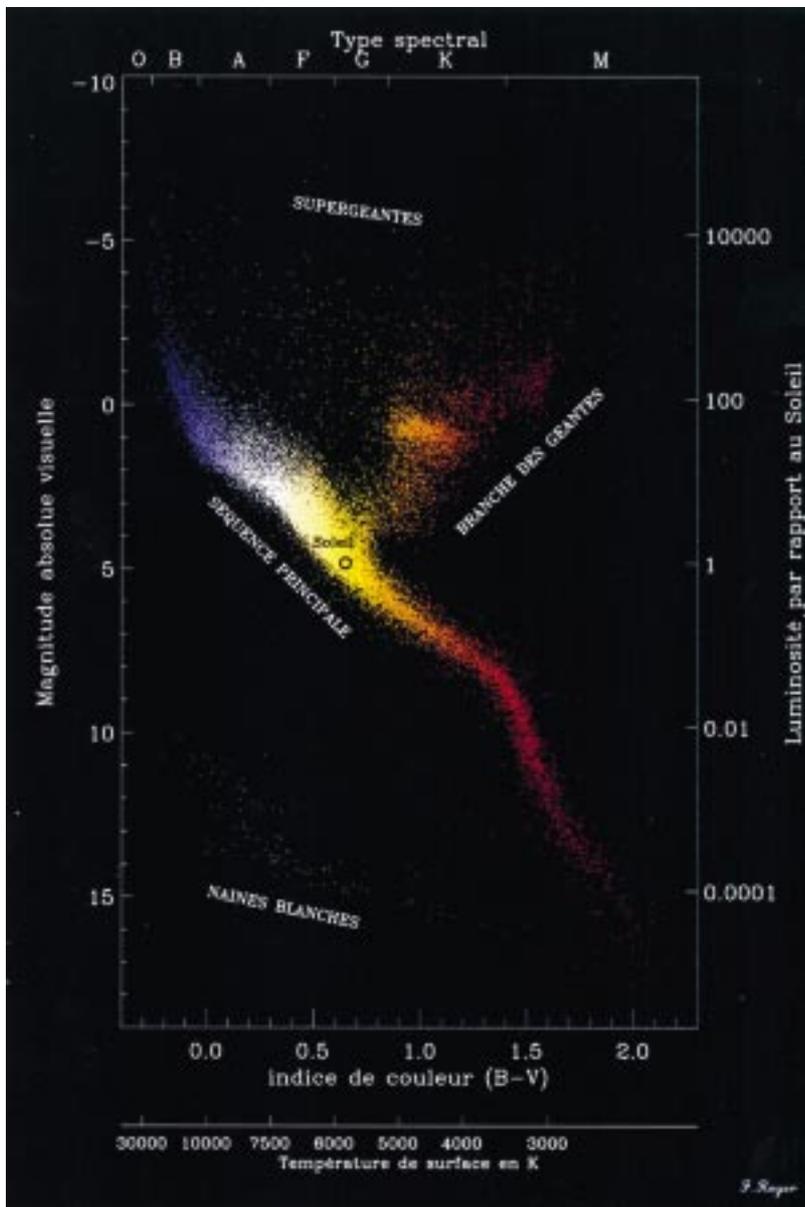
*Les axes de coordonnées sont doubles : données observationnelles d'une part (magnitude absolue visuelle,  $M_v$ , obtenue à partir de la magnitude apparente visuelle,  $V$ , et de la distance ; indice de couleur  $B-V$ ), données théoriques correspondantes d'autre part (luminosité, exprimée en multiples de la luminosité solaire ; température de surface, exprimée en degrés Kelvin).*

Les étoiles des amas globulaires, qui appartiennent à la même population d'étoiles que les sous-naines, n'étaient pas observables avec Hipparcos à cause de leur trop grande densité dans les amas. Les plus proches d'entre elles étaient de toute façon trop loin pour que des parallaxes trigonométriques significatives aient pu être obtenues avec Hipparcos. En revanche, la comparaison de la sé-

quence  $V - (B-V)$  d'un amas (voir figure 3, la séquence de Messier 92) à la séquence  $M_v - (B-V)$  formée par des sous-naines de même métallicité permet la détermination directe du module de distance,  $V - M_v$ , et de l'âge de l'amas globulaire.

Un autre paramètre fondamental dans le cadre des théories de structure et d'évolution des étoiles est la

masse. Les parallaxes Hipparcos ont permis d'améliorer la détermination des masses d'un certain nombre de systèmes binaires. De plus, l'analyse des perturbations des mouvements propres (écarts à un mouvement linéaire) a permis de détecter de nombreuses « binaires astrométriques » et de déterminer les masses de petits compagnons, jusqu'à 0,03 masses solaires. Par ailleurs, il est possible de



Avec l'aimable autorisation de Frédéric Royer.

déterminer la masse de certaines étoiles simples, par exemple les naines blanches, en utilisant les parallaxes Hipparcos et des déterminations spectroscopiques de la gravité de surface de ces étoiles très denses.

#### DÉTERMINATION DES DISTANCES DANS L'UNIVERS

La détermination des distances dans l'Univers est le fruit d'une sé-

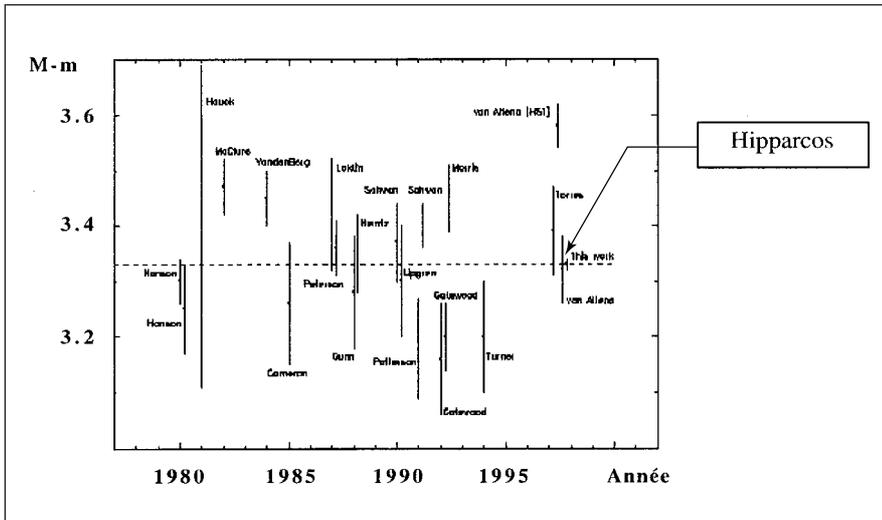
rie de calibrations successives, utilisant les luminosités intrinsèques d'objets de plus en plus brillants et de plus en plus lointains. Toutes ces calibrations reposent finalement sur la connaissance (plus ou moins) précise des distances des étoiles les plus proches du Soleil.

La première étape est la mesure de la distance des amas ouverts, amas d'étoiles assez jeunes, beaucoup

moins denses que les amas globulaires, et dont une vingtaine a pu être observée avec Hipparcos. Hipparcos a apporté pour la première fois une vision à trois dimensions du plus proche d'entre eux, les Hyades, montrant son aplatissement vers le centre galactique. 218 étoiles ont été sélectionnées comme membres de l'amas d'après les données du satellite (134 dans un rayon de 10 pc autour du centre de l'amas), dont 39 n'étaient pas connues auparavant comme membres de l'amas (13 à moins de 20 pc du centre). La distance du centre de masse de l'amas, mesurée par la parallaxe des membres de l'amas situés à moins de 10 pc du centre, est de  $46,34 \pm 0,27$  pc. Cette détermination est beaucoup plus précise que ce qui était obtenu avec les mesures au sol, comme le montre la figure 4. Cette distance a permis de positionner les étoiles de l'amas très précisément dans le diagramme HR et, par comparaison et ajustement avec des isochrones (lignes d'âge égal) calculées à partir de modèles théoriques d'évolution stellaire, de déterminer l'abondance en hélium,  $Y = 0,26 \pm 0,02$ , et l'âge des Hyades :  $625 \pm 50$  millions d'années. Il est remarquable que les Hyades, dont l'abondance en métaux est nettement supérieure à celle du Soleil, aient par contre une abondance en hélium quasi solaire.

Des distances moyennes précises ont été obtenues avec Hipparcos pour une dizaine d'autres amas ouverts, d'âges et de compositions chimiques différents, permettant pour la première fois une calibration de la position de la séquence principale dans le diagramme HR en fonction de l'abondance en métaux.

La deuxième étape est la détermination des distances des étoiles variables pulsantes. Certaines étoiles pulsantes ont la propriété remarquable de varier périodiquement de luminosité avec une période de variation directement reliée à leur luminosité intrinsèque. La calibration de cette relation, grâce aux mesures très pré-



**Figure 4** - Modules de distance de l'amas des Hyades, avec leurs incertitudes, obtenus depuis 1980 à partir de données sol, et détermination Hipparcos. Le module de distance est défini par  $m - M = -5 \log \pi - 5$ , où  $\pi$  est la parallaxe trigonométrique du centre de masse de l'amas,  $m$  et  $M$  les magnitudes apparentes et absolues moyennes des étoiles considérées [adapté de Perryman et al., 1998, *Astron. & Astrophys.*, **331**, 81].

cises des distances des étoiles pulsantes les plus proches, permet donc de déterminer ensuite la distance d'étoiles plus lointaines en observant seulement leurs variations lumineuses. Ces mesures de variations peuvent maintenant se faire, avec les gros télescopes au sol ou avec le télescope spatial Hubble, jusqu'à des distances de l'ordre de 25 à 30 Mpc (amas de galaxies de Virgo ou de Fornax). Parmi les étoiles variables pulsantes, ce sont les Céphéides, les plus brillantes intrinsèquement, qui sont les plus utilisées. Mais les RR-Lyrae et les Miras le sont aussi, pour déterminer par exemple la distance au Grand Nuage de Magellan, la galaxie extérieure la plus proche de nous et qui est la première étape de la détermination des distances hors de notre Galaxie.

Le tableau 2 rassemble les résultats obtenus pour le module de distance et la distance du Grand Nuage de Magellan en utilisant la calibration des relations période-luminosité des trois types d'étoiles variables mentionnées ci-dessus. Ces résultats ont été obtenus avec les distances Hipparcos des étoiles de chaque type (environ une dizaine sont assez proches pour avoir obtenu des parallaxes trigonométriques précises), mais

aussi avec des observations photométriques et spectroscopiques pour la détermination de la métallicité de ces étoiles (qui influe sur la relation période-luminosité) et de l'absorption interstellaire dans la direction du Grand Nuage de Magellan. Pour comparaison, la distance obtenue à l'aide des distances d'amas globulaires est aussi donnée.

La majorité des résultats convergent vers un module de distance de 18,6 (distance de 50 à 55 kpc), montrant que les distances en dehors de notre Galaxie étaient sous-estimées d'environ 10 %. En effet, les distances des galaxies extérieures étant généralement déterminées par rapport au Grand Nuage de Magellan, elles répercutent directement tout change-

ment dans la distance de celui-ci. La constante de Hubble, rapport entre les vitesses d'expansion des galaxies et leurs distances, va diminuer d'autant, et l'âge d'expansion de l'Univers, proportionnel à l'inverse de la constante de Hubble, va augmenter. Une retombée remarquable de ces résultats est de contribuer à la solution d'un problème embarrassant qui était que l'âge trouvé pour les objets les plus vieux de notre Galaxie (amas globulaires et sous-naines) était plus élevé que l'âge d'expansion de l'Univers.

## CONCLUSION

Les résultats présentés ci-dessus ne sont qu'une toute petite sélection parmi tous ceux utilisant les données d'Hipparcos dans une grande variété de domaines : des éphémérides de planètes aux théories de l'évolution stellaire, en passant par les systèmes de référence, la cinématique et la dynamique galactique, ou l'échelle des distances et des âges. Près de 500 articles utilisant les données d'Hipparcos ont déjà été publiés.

L'avenir s'ouvre sur des projets comme GAIA (Galactic Census Project) (proposé comme l'un des grands projets du programme Horizon 2000+ de l'Agence spatiale européenne) permettant d'observer un milliard d'étoiles jusqu'à la magnitude 20 avec des précisions astrométriques de l'ordre de 10 microsecondes de degré, atteignant 4 microsecondes de degré pour les étoiles les plus brillantes. Le volume

**Tableau 2**  
Module de distance et distance du Grand Nuage de Magellan, déterminés à partir des données d'Hipparcos et d'observations spectroscopiques et photométriques sol

Objets	$(M - m)_0$ mag	Distance kpc
Céphéides	18,7 ± 0,1	55 ± 3
RR Lyrae	18,3 ± 0,1	46 ± 3
Mira	18,6 ± 0,2	52 ± 5
Amas globulaires	18,6 ± 0,1	52 ± 3

de Galaxie dans lequel des distances trigonométriques (et par suite des luminosités intrinsèques) et des mouvements précis seraient obtenus deviendrait alors comparable à la taille elle-même de la Galaxie et toutes les populations d'étoiles, même les plus rares au voisinage du Soleil, y seraient représentées en nombre. Des mesures photométriques multicolore et multi-époques et des mesures de vitesses radiales seraient effectuées simultanément.

Le projet GAIA est beaucoup plus ambitieux que ses deux concurrents américains, SIM (Space Interferometric Mission) et FAME (Full Sky Astrometric Mapping Explorer), parce qu'il allie la plus grande précision espérée sur des mesures de distances et de mouvements angulaires sur le ciel à l'exhaustivité de ses observations : observation systématique de tous les objets plus brillants que la magnitude 20, sans aucune sélection *a priori* ; observation simultanée des six paramètres de l'espace des phases (position, distance et vitesse spatiale), et de paramètres photométriques permettant la détermination des paramètres physiques des étoiles observées.

GAIA devrait permettre une lecture directe, *in situ*, de la formation et de l'évolution galactique, *via*

l'étude complète et détaillée de la structure, de la cinématique, de la dynamique, des caractéristiques physiques et de l'évolution des étoiles de toutes populations situées dans les différentes composantes de la Galaxie. La totalité des populations stellaires au voisinage du soleil, jusqu'aux naines brunes, seraient recensées et observées, les planètes de la masse de Jupiter éventuellement présentes autour de toutes les étoiles situées à moins de 200 pc du Soleil seraient détectées, ainsi que les planètes de plus petites masses gravitant autour d'étoiles plus proches. Par ailleurs, de telles observations permettraient une étude extrêmement détaillée du diagramme de Hertzsprung-Russell, apportant des contraintes très fortes aux modèles de structure interne et d'évolution des étoiles de toutes masses, même dans leurs phases d'évolution les plus courtes. Dans le domaine de l'échelle des distances, les données de GAIA permettraient la calibration fine de toutes les relations utilisées pour déterminer les distances des galaxies lointaines et la constante de Hubble (positions des différentes séquences d'amas ; relations période-luminosité en fonction des caractéristiques chimiques des objets considérés). Enfin, des retombées diverses sont attendues comme des tests de la relativité

générale, y compris la possibilité de détecter des ondes gravitationnelles.

#### POUR EN SAVOIR PLUS

Hipparcos Venice'97 : Presentation of the Hipparcos and Tycho Catalogues and first astrophysical results of the Hipparcos astrometry mission, *M.A.C. Perryman & P.L. Bernacca (éditeurs)*, ESA SP-402, 1997.

**Fröeschlé (M.)**, *La Recherche*, **299**, Juin 1997, 28, 1997.

**Kovalevsky (J.)**, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **36**, 99, 1998.

**Van Leeuwen (F.)**, *Space Science Review* **81**, 201, 1997.

**Mignard (F.) et Martin (C.)**, *Pour la Science* **235**, 70, Mai 1997.

**Turon (C.)**, *Sky and Telescope* **94**, 28, Juillet 1997.

Site web Hipparcos à l'ESTEC : <http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Hipparcos>

Site web Gaia à l'ESTEC : <http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/GAIA>

#### Les catalogues :

ESA, 1997, *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200.

ESA, 1998, *Celestia 2000, The Hipparcos and Tycho Catalogues*, avec logiciel d'interrogation et d'échantillonnage, ESA SP-1220.

**Turon (C.)**, **Crézé (M.)**, **Egret (D.)**, **Gómez (A.)** et al., *The Hipparcos Input Catalogue*, ESA SP-1136, 1992.

Article proposé par : Catherine Turon, tél. 01 45 07 78 37, Courriel : [catherine.turon@obspm.fr](mailto:catherine.turon@obspm.fr)

Ana Gómez, tél. 01 45 07 78 49, Courriel : [ana.gomez@obspm.fr](mailto:ana.gomez@obspm.fr)

Frédéric Arenou, tél. 01 45 07 78 43, Courriel : [frederic.arenou@obspm.fr](mailto:frederic.arenou@obspm.fr)