

(Cent ans après...)

Hipparcos, une troisième dimension pour la Carte du Ciel

Frédéric Arenou, Catherine Turon
Observatoire de Paris

Summary : At the beginning of the Carte du Ciel project, only a few stellar parallaxes were known. At the end of the project, Hipparcos/Tycho takes the lead of the study of the dimension of the nearby universe. Hipparcos, like Gaia, are a revenge of astrometry as an irreplaceable tool for astrophysics ; they are also, with Tycho-2, a one hundred years bridge with the Carte du Ciel. After describing the context in astrometry, we comment in detail the content, use, and success of all projects.

Résumé : Quand débutent les travaux de la Carte du Ciel, quelques parallaxes annuelles d'étoiles seulement sont connues. À la fin de ce projet, Hipparcos/Tycho prend le relais dans l'étude de la dimension de l'univers visible proche. Hipparcos, tout comme Gaia, représente non seulement la revanche de l'astrométrie comme outil essentiel à l'astrophysique, mais de plus, avec Tycho-2, il construit un pont de près d'un siècle avec la Carte du Ciel. Après avoir décrit le contexte astrométrique, nous détaillons le contenu, l'utilisation et le succès des différents projets.

Introduction

Un grand projet visant à établir un Catalogue, un projet international, astrométrique, conjuguant deux expériences en parallèle, suscité par un progrès technologique, un projet initié par un Français et dans lequel la communauté astronomique française s'est fortement investie : tout ceci semble caractériser la Carte du Ciel.

C'est vrai, mais ce n'est pas le seul cas: Hipparcos et son expérience associée Tycho bénéficiant de l'ère spatiale ressemblent fort au Catalogue et à la Carte du Ciel tirant parti de la révolution apportée par la photographie astronomique, et répond également aux autres critères¹. Dix ans après l'achèvement du Catalogue Hipparcos, il est tentant de le considérer lui aussi comme entré dans l'Histoire en successeur du grand projet qu'a représenté la Carte du Ciel².

Après avoir rappelé le contexte astrométrique concernant les estimations de distance et de masse stellaires, nous abordons le parallèle entre les deux grands projets.

Le contexte astrométrique

Ordres de grandeur

Le Soleil est dans une zone de la Galaxie très peu peuplée en étoiles, et l'étoile la plus proche du Soleil est déjà très lointaine : elle est à 1,3 pc, soit environ 40 000 milliards de km. Sa parallaxe (inverse de la distance) est de 0,8 seconde de degré. Un instrument comme Hipparcos a mesuré cet angle avec une précision d'environ un millième de seconde de degré, et Gaia le mesurera avec une précision plus de 100 fois meilleure. Il est difficile de réaliser ce que représentent de telles quantités. Nous sommes habitués au diamètre apparent de la Lune : 30 minutes de degré. Un millième de seconde de degré (par la suite noté mas, pour milliarcsecond)

¹ Le Catalogue Hipparcos a également eu sa carte associée, le « Millennium Star Atlas », une carte d'un million d'étoiles et de 10 000 objets non stellaires jusqu'à la onzième magnitude.

² Dans ce qui suit, nous désignerons en général par « Carte du Ciel » le projet dans son ensemble, sans distinguer la « Carte photographique du ciel » du « Catalogue photographique du ciel », habituellement dénommé « Astrogaphic Catalogue ». Tandis que la première, plus profonde que la magnitude 14, ne fut qu'à moitié réalisée, c'est essentiellement ce dernier, complet jusqu'à la magnitude 11, qui fut publié et utilisé.

est l'angle sous lequel nous verrions, si nos yeux étaient assez performants pour cela, un personnage sur la Lune. Une microseconde de degré (par la suite noté μ as, pour microarcsecond) est l'angle sous lequel nous verrions, si nos yeux étaient assez performants pour cela, une fleur sur la planète Mars.

L'astrométrie a les épaules larges

Une bonne (ou mauvaise !) connaissance des distances des étoiles se répercute sur notre représentation de la Galaxie, sur nos estimations de l'échelle des distances dans l'Univers, sur notre compréhension de la physique qui régit les intérieurs stellaires, etc. En effet, à partir de la distance et de la luminosité apparente (la « magnitude apparente ») d'une étoile, on peut calculer sa luminosité intrinsèque (sa « magnitude absolue »). De plus, ceci suppose que l'on soit capable de faire une estimation de la quantité de matière absorbante qui peut éventuellement se trouver entre l'étoile et l'observateur, mais, dans le voisinage du Soleil, on peut négliger cette absorption.

Les luminosités absolues ainsi obtenues peuvent ensuite être utilisées pour calibrer des relations entre les propriétés physiques d'étoiles d'un type donné et leurs magnitudes absolues. Deux exemples : pour un type d'étoiles donné, la magnitude absolue est bien corrélée avec la couleur (qui traduit la température de l'atmosphère de l'étoile) ; pour certaines étoiles variables, les Céphéides par exemple, la période de variation (reflet de la période de pulsation de l'étoile) est directement reliée à la luminosité intrinsèque. On voit donc comment la détermination précise des distances d'un certain nombre d'étoiles de notre proche voisinage permet ensuite d'estimer les distances d'objets dans toute notre galaxie, et ensuite dans les galaxies extérieures en faisant l'hypothèse que les étoiles observées dans ces galaxies ont la même nature physique que celles qui sont observées non loin du Soleil.

Une grande partie de l'astrophysique, de la physique stellaire à la cosmologie, en passant par l'étude de notre Galaxie, repose sur l'astrométrie, du moins si celle-ci apporte des mesures de distance et de mouvements sur le ciel suffisamment précises.

La mesure des distances

*« La détermination de l'échelle des distances de l'Univers lointain est, par essence, une tâche impossible... Il serait plus sage de se concentrer sur l'échelle de distance dans notre Galaxie. »*³

À la fin du 18^{ème} siècle, aucune distance d'étoile n'est connue, et la forme de notre Galaxie dessinée par William Herschel (1785) à partir de dénombrements d'étoiles est loin d'être réaliste. On sait que les étoiles sont à des distances différentes, mais que les parallaxes doivent être inférieures à la seconde d'arc, donc délicates à obtenir. La mesure des distances dans l'univers visible ne devient réellement pertinente qu'au long du 19^{ème} siècle, celui du triomphe de la mécanique céleste et de l'astrométrie. De la compétition entre Bessel, Henderson et Struve, c'est le premier qui gagne, en observant 61 Cygni avec son héliomètre, et en étant à la fois le premier, mais également le plus précis⁴.

³ « *The determination of the extragalactic distance scale, like so many problems that occupy astronomer's attention, is essentially an impossible task. The methods, the data, and the understanding are all too fragmentary at this time to allow a reliable result to be obtained. It would probably be a wise thing to stop trying for the time being and to concentrate on better establishing such things as the distance scale in our Galaxy...* » P.W. Hodge, « The extragalactic distance scale », *Annual review of astronomy and astrophysics*, vol. 19., Palo Alto, CA, Annual Reviews Inc., 1981, p. 357

⁴ 7.5% d'erreur, à comparer aux 102% d'erreur sur Vega pour Struve, et 35% pour Henderson pour α Cen, H. A. McAlister, « Revealing the Other Two Dimensions of Velocity Space »

Mais, quand débute la Carte du Ciel en 1887, le nombre de distances d'étoiles connues reste très réduit, et la Carte n'a donc pas de troisième dimension. L'évolution du nombre de parallaxes connues est indiquée dans la table suivante ⁵ :

année	1839	1850	1862	1888	1901	1906	1924	1949	1962
parallaxes	3	6	10	25	38	263	1670	5751	6607

L'influence des méthodes photographiques apparaît clairement, qui multiplie par près d'un ordre de grandeur le nombre de parallaxes mesurées au début du vingtième siècle, malgré la première guerre. La technique atteint cependant ses limites : en 1984, seules 50 parallaxes supplémentaires étaient obtenues par an à l'Observatoire de Flagstaff ⁶. À ce rythme, il aurait fallu attendre plus de 2000 ans pour obtenir l'équivalent d'Hipparcos...

Une des principales applications des parallaxes est l'obtention de magnitudes absolues d'étoiles. La précision sur cette magnitude est proportionnelle à la précision relative sur cette parallaxe. En conséquence, gagner un facteur 2 sur la précision absolue des parallaxes revient au même que gagner un facteur 2 en distance en conservant l'ancienne précision relative. Ce gain d'un facteur 2 en distance correspond ainsi à un facteur $2^3 = 8$ en volume accessible. En clair, doubler la précision permet un gain de près d'un ordre de grandeur en nombre d'étoiles.

La mesure des parallaxes trigonométriques est la principale méthode directe de détermination des distances (c'est-à-dire sans hypothèse physique sur l'objet observé). Cependant, l'imagination des astronomes pour développer des méthodes indirectes est sans limites, et ce sujet mériterait un article entier à lui seul. Nous verrons par exemple ci-dessous comment, une année avant Bessel, Struve détermina la « parallaxe hypothétique » de 61 Cygni.

Les étoiles binaires

« Nous connaissons sa distance, la durée exacte de sa révolution, et, ce qui eût plongé les philosophes de l'antiquité dans une admiration indicible, nous connaissons aussi son poids. » ⁷

Dans son discours inaugural lors du congrès de 1889, Mouchez définit son œuvre en deux parties : 1) la Carte « destinée à faire ressortir avec le cours des siècles les variations lentes, les révolutions à longues périodes qui se produisent dans l'univers » ⁸ et 2) le Catalogue, production plus rapide que la Carte, pour les étoiles trop brillantes. Ce que l'on peut imaginer, avec le recul, derrière les propos de Mouchez, ce sont bien évidemment les mouvements propres, mais également les mesures orbitales des étoiles binaires, pour ce qui reste, aujourd'hui encore, la principale méthode directe permettant d'estimer des masses stellaires sans aucune hypothèse reposant sur des calibrations souvent incertaines. L'importance des étoiles doubles pour la Carte du Ciel comme pour Hipparcos mérite d'ailleurs que l'on s'y attarde ⁹.

Si Ptolémée est le premier à utiliser le terme d'« étoile double » ¹⁰, on sait que distinguer le cheval Mizar de son très proche cavalier Alcor représentait depuis plus longtemps un bon test

⁵ « How Far the Stars », réunion de la Northern California Historical Astronomy Luncheon and Discussion Association, 6 octobre 2001, http://www.nchalada.org/archive/NCHALADA_LVIII.html.

⁶ *Ibidem*.

⁷ C. Flammarion, *Les étoiles et les curiosités du ciel*, supplément à l'Astronomie Populaire, 1882,

⁸ Rapport de la Commission 23, Assemblée générale de l'U.A.I. tenue à Stockholm en 1938, *Transactions of the International Astronomical Union*, Vol. VI, 1939, ed. J.H. Oort, Cambridge University Press, p. 177. Nous remercions Jean Guibert pour la communication des références bibliographiques concernant l'U.A.I.

⁹ Pour un aperçu et un historique plus détaillés des différents types de binaires, voir par ex. les liens indiqués à l'URL http://www.ihp.obspm.fr/~arenou/Wiki/Double_visuelle.html.

¹⁰ À propos de $\nu 1$ et $\nu 2$ Sagittarii : « Quæ in oculo est nebulosa et bina » cf. C.H.F Peters & E.B. Knobel, *Ptolemy's catalogue of stars, a revision of the Almagest*, The Carnegie Institution of Washington, 1915, p.40, traduction de grec en latin du Trapezuntius Almagest 1528.

d'acuité visuelle. Il faut attendre bien longtemps (1617) pour qu'un progrès technologique permette de résoudre Mizar elle-même comme double peu après l'invention de la lunette astronomique. L'instrumentation décuple le nombre de découvertes jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle qui voit la réalisation des premiers Catalogues d'étoiles doubles ¹¹.

Mais à ce moment-là, cependant, rien n'indique que les étoiles doubles observées représentent bien plus qu'un simple alignement fortuit le long de la ligne de visée, ce qu'on dénomme « couple optique ». Certes, John Michell utilise en 1767 un argument statistique démontrant l'absence de hasard dans ces associations ¹², mais William Herschel mettra plus de 20 ans à se convaincre qu'il pouvait s'agir également de ce qu'il appellera le premier, en 1802, des « systèmes binaires ». Parti en 1776 pour mesurer des parallaxes annuelles différentielles ¹³, sa mise en évidence d'orbites d'étoiles binaires ¹⁴ aboutira à un résultat tout aussi intéressant : montrer que la loi de la gravitation de Newton était réellement universelle.

Après les binaires visuelles, c'est indirectement que furent ensuite être détectées les binaires astrométriques, par la perturbation de cette « variation lente » que représentent les mouvements propres. Bessel gagnait à nouveau et concluait en 1844 que le mouvement de Sirius et Procyon était dû à leur perturbation par un compagnon obscur, « *la lumière n'étant pas une propriété réelle de la masse* » ¹⁵.

Une des premières photographies d'étoiles doubles (Mizar et son compagnon, ainsi qu'Alcor), dans le but affiché de mesure photographique des positions des compagnons, fut obtenue le 27 avril 1857 sur une plaque au collodion, par Bond, directeur de l'Observatoire de Cambridge (U.S.A.). ¹⁶ La comparaison très favorable avec les mesures visuelles contemporaines de Struve démontra la faisabilité de la méthode.

En 1878, 27 orbites avaient été calculées ¹⁷, leur période étant de plusieurs décennies (voire siècles). Certes, on suspectait bien que les périodes des binaires pouvaient être courtes, et le « démon » Algol avait été suspecté dès 1782 par John Goodricke d'être une binaire à éclipse, mais les binaires spectroscopiques n'avaient pas encore été découvertes ¹⁸, et ce sont les « *révolutions à longues périodes* » qui sont alors connues.

Il n'est pas clair que ceci ait pu avoir une profonde incidence sur la Carte du Ciel mais, quand le projet commence, on a donc à la fois des milliers de couples (potentiellement binaires)

¹¹ Le premier (60 couples), compilé par Christian Mayer en 1777, est publié par Johann Bode, «*Verzeichniss aller bisher entdeckten Doppeltsterne* », *Berliner Astronomisches Jahrbuch für 1784*, 1781, p. 183.

¹² J. Michell, «*An Inquiry into the Probable Parallax, and Magnitude of the Fixed Stars, from the Quantity of Light Which They Afford us, and the Particular Circumstances of Their Situation* », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 57, 1767, p. 246.

¹³ En suivant la suggestion de Galilée (*Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde*, troisième Journée, 1632). Si un couple est optique et si toutes les étoiles sont semblables au soleil, la plus brillante l'est parce qu'elle est plus proche, et l'on peut tenter de mettre en évidence son mouvement par rapport à la plus faible (plus lointaine, donc avec un effet parallactique moindre).

¹⁴ William Herschel, «*Account of the Changes That Have Happened, during the Last Twenty-Five Years, in the Relative Situation of Double-Stars; With an Investigation of the Cause to Which They Are Owing* », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 93, 1803, p. 339. Une fois obtenues les mesures de position, la détermination des paramètres orbitaux n'était pas si évidente. Pour cela, il faudra attendre les calculs du jeune polytechnicien français Félix Savary en 1827, à la requête d'Arago.

¹⁵ F.W. Bessel, «*On the Variations of the Proper Motions of Procyon and Sirius* », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 6, 1844, p.136. Il s'agissait des premières naines blanches (indirectement) détectées, le compagnon de Sirius fut aperçu pour la première fois en 1862 et celui de Procyon en 1896.

¹⁶ G. Bond, «*Photographical Experiments on the Positions of Stars* », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 17, 1857, p. 230

¹⁷ W. Doberck, «*Binary stars* », *The Observatory*, Vol. 2, 1878, p. 169

¹⁸ H. C. Vogel ne découvre qu'Algol est une binaire spectroscopique à l'Observatoire de Potsdam qu'en novembre 1889 (au même moment où Pickering/Miss Maury font de même avec Mizar à Harvard).

connus, la certitude d'en obtenir bien plus, un moyen fiable de mesurer des positions, et donc l'espoir de découvrir, et peut-être « peser », de nombreuses binaires. Ceci explique l'enthousiasme de Flammarion indiqué en exergue.

L'intérêt des binaires visuelles rejoint cependant la discussion sur la détermination des distances dans l'univers proche. En effet, si l'on suppose connue la masse des composantes¹⁹, alors le rapport entre le demi-grand axe mesuré (en seconde d'arc) et celui déduit de la troisième loi de Képler²⁰, indique alors une « parallaxe hypothétique »²¹. C'est Wilhelm Struve qui fut probablement le premier à en émettre l'idée²², avant même la première détermination d'une parallaxe trigonométrique ou d'une masse stellaire²³ !

La Carte du Ciel

« Depuis plus de deux siècles qu'il existe, l'Observatoire de Paris, avec tous ses observateurs et tous ses calculateurs, n'a pas encore publié un seul catalogue d'étoiles ! »²⁴.

Même s'il a lu Flammarion, quand le directeur de l'Observatoire Mouchez prend l'initiative d'écrire en juin 1885 à Pickering, Huggins, Cruls et Struve, c'est pour n'envisager que la réalisation d'une carte, et c'est le précurseur David Gill qui proposera d'y adjoindre un catalogue²⁵. La prospective scientifique de Mouchez est d'ailleurs plutôt réduite : « La carte photographique du ciel est donc devenue facilement exécutable... et nous lèguerions aux astronomes de l'avenir un état exact de notre ciel à la fin du 19^{ème} siècle où figureraient 20 ou 25 millions d'étoiles. Il est facile d'imaginer l'extrême importance d'un tel travail et les découvertes d'un si haut intérêt qui pourraient en résulter. On peut citer, entre autres exemples, la découverte des astéroïdes... ». Loin de mentionner des objectifs stellaires, il semble d'ailleurs que la magnitude limite 14^m pour la Carte ait été choisie pour la détection des astéroïdes²⁶.

Pour retrouver d'autres motivations, il faut se ramener à la présentation de Mouchez devant l'Académie début 1886 : outre les astéroïdes, il s'agit essentiellement de cartographier, de découvrir des étoiles faibles et de mesurer des étoiles doubles. Il ajoute : « J'ai déjà dit comment ce vaste travail, réparti sur tout le globe entre 8 ou 10 observatoires bien situés, pourrait se faire sans grand frais, en quelques années. »²⁷. Avec le recul, on apprécie les difficultés de la gestion de ce projet... toujours inachevé en 1970.

¹⁹ par exemple en utilisant une relation masse-luminosité à partir du type spectral de l'étoile.

²⁰ la relation entre le demi-grand axe a , la période de l'orbite P et la masse des deux compagnons est $a^3/P^2 = M_1 + M_2$, en unités usuelles (respectivement unités astronomiques, années, masse solaire).

²¹ ainsi que les dénomma Maedler dans *Der Fixsternhimmel*, Leipzig, 1858. Elles sont mieux connues sous le nom de « parallaxes dynamiques » depuis Russell, Adams, & Joy, « A Comparison of Spectroscopic and Dynamical Parallaxes », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 35, 206, 1923, p.189 (solaire) et parfois dénommées également « parallaxes orbitales ».

²² F.G.W. Struve, « De Parallaxi Stellarum Fixarum », *Stellarum duplicium et multiplicium Mensuræ Micrometricæ per magnum Fraunhoferi*, 1837.

²³ Car, bien sûr, la méthode ci-dessus joue dans les deux sens : il y a besoin de connaître la parallaxe pour déterminer la masse d'une binaire visuelle (sauf si elle est également binaire spectroscopique). La masse du système Alpha du Centaure ne put être estimée qu'une fois sa parallaxe obtenue (avec 20% d'erreur) par Henderson (MNRAS, Vol IV, No 19, p .168) en 1839. Une manière de connaître cette parallaxe est de disposer de la vitesse radiale relative des composantes, ainsi que le calcula C. Niven dès 1874 : « On a method of finding the parallax of double stars and on the displacement of the lines in the spectrum of a planet », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 34, p.339-347 sur une idée de Talbot.

²⁴ C. Flammarion, 1882, *Les étoiles et les curiosités du ciel*, chap. XIV, p. 390.

²⁵ I. Chinnici, *La Carte du Ciel, correspondance inédite conservée dans les archives de l'Observatoire de Paris*, ed. Observatoire de Paris et Osservatorio Astronomico di Palermo G. S. Vaiana, 1999, p. 5.

²⁶ J. Baillaud, « 1^{ère} partie, III. Dispositions à prendre pour continuer l'œuvre du Comité permanent », Rapport de la commission 23, *Transactions of the International Astronomical Union*, Vol VI, Sixth general assembly held at Stockholm Aug 3 to Aug 10, 1938, Cambridge Univ. press, 1939, p. 181

²⁷ « Photographies astronomiques de MM. Paul Henry et Proper Henry », présentées par M. Mouchez, Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, séance du lundi 18 janvier 1886, p. 148

Le premier congrès, du 16 au 27 avril 1887, se penche essentiellement sur les aspects pratiques et ne détaille pas plus avant les buts scientifiques poursuivis²⁸ : «a) De dresser une carte photographique du Ciel pour l'époque actuelle, et d'obtenir des données qui permettront de déterminer les positions et les grandeurs de toutes les étoiles jusqu'à un ordre déterminé, avec la plus grande précision possible, b) de pourvoir aux meilleurs moyens d'utiliser, tant à l'époque actuelle que dans l'avenir, les données fournies par les procédés photographiques ». Certes, c'est un rôle fondamental pour l'astrométrie que de réaliser des catalogues, mais la seule motivation pour la réalisation de l'entreprise tient dans « les progrès réalisés dans la photographie astronomique » et la science que l'on pourra en tirer n'est pas discutée plus avant pendant le congrès fondateur. Un siècle après, on imagine le peu de succès qu'aurait rencontré le financement du projet Hipparcos auprès des autorités de tutelle s'il avait affiché pour seule motivation d'utiliser les nouvelles techniques spatiales et pour seul but de cartographier le voisinage solaire...

Dans une belle envolée lyrique, l'astrophotographie est quasiment considérée par Mouchez comme « une nouvelle branche de la Science »²⁹. Et si, au même moment, certains commencent à suggérer l'utilisation de la photographie pour la détermination des parallaxes³⁰, il reste effectivement une certaine résistance de la part d'éminents astrométristes. Ainsi, on prête à A. Auwers des propos terriblement négatifs : il aurait affirmé que l'application des méthodes photographiques à la recherche astronomique serait « contre-nature »³¹. Il n'empêche, le gain en précision apparaît clairement : jusqu'alors, l'astrométrie avec les cercles méridiens permettait une précision d'environ 0.5" et ceci seulement jusqu'à la 9^{ème} magnitude. En comparaison, la photographie pouvait permettre 0.3" jusqu'à 13^m ou 14^m³².

Après le lancement du programme Carte du Ciel, l'une des actions scientifiques marquantes du Comité sera axée sur l'astéroïde Éros et la détermination de la parallaxe solaire, mais il s'agit là d'une utilisation indirecte du projet. Il faut attendre en fait deux décennies pour que deux utilisations statistiques voient enfin le jour dans le domaine stellaire et la structure galactique. Tout d'abord, l'étude des mouvements propres des objets de différentes positions et magnitudes dans notre « système stellaire » peut en effet tirer profit dès le début du vingtième siècle de la significative base de temps (quinze ans) entre les premières cartes et celles qui ont été refaites pour une raison ou une autre³³.

De plus, à partir du milieu des années 20, une série d'articles scientifiques exploitant les différentes zones se penche sur les étoiles doubles, que ce soit pour lister leur découverte ou bien pour étudier leur distribution³⁴. En rétrospective, s'il note que 20000 couples ont été découverts, Worley se plaint néanmoins³⁵ que ces études aient été à la fois incomplètes (en termes de zones) et non cohérentes (en termes de limites de séparations et magnitudes).

²⁸ Congrès astrophotographique international tenu à l'Observatoire de Paris pour le levé de la carte du ciel, ed. Institut de France, séance de l'Académie du 16 avril 1887.

²⁹ « il se produira bien quelque regret, ... mais ils s'évanouiront bien vite devant l'éclatante lumière du succès, tout comme ont disparu il y a un demi-siècle nos antiques diligences devant le triomphe de la locomotive », Mouchez, Discours d'introduction, *ibidem*

³⁰ C. Pritchard, « Note on the application of photography to the determination of stellar parallax », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 47, 1887, p.87-89

³¹ d'après Eichhorn, *Astronomy of star positions*, 1974, sect 5.5.1 Frederic Ungar Publishing, p. 279.

³² *ibidem*

³³ cf. par ex. H.H. Turner, « Note on the number of the faint stars with large proper motions », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 69, 1908, p.57

³⁴ À titre d'exemple, H. Groot, « Some statistical results from counts of double stars in the Greenwich Astrographic Catalogue », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 88, 1927, p. 51

³⁵ C. E. Worley, « Double Stars in the Astrographic Catalogue », in Debarbat (ed.), *Mapping the Sky: Past Heritage and Future Directions*, IAU Symp. 133, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1988, p. 491

À cette époque, il devient également clair que la Carte du Ciel ne va pas assez profond en magnitude : en 1925, Hubble contribue au Grand Débat avec des céphéïdes de magnitude 19,05 dans NGC 6822 !

Donc, cinquante années après le lancement de la Carte, on constate que l'intérêt scientifique se concentre essentiellement sur les mouvements propres³⁶, et cet intérêt croît avec le temps, car, comme le bon vin, de bonnes mesures de positions gagnent à vieillir.

Pour les estimations de luminosité intrinsèque, faute de parallaxes, il faut toujours recourir à des expédients. Par exemple, si l'on dispose de mouvements propres, le « mouvement propre réduit » permet d'éliminer la distance dans la loi de Pogson via la vitesse tangentielle, $H = m + 5 \log |\mu| + 5 \sim M + 5 \log |V_T| - 3.4$, une méthode probablement inventée par Hertzsprung³⁷. En indiquant en abscisse la couleur d'une étoile et le mouvement propre réduit en ordonnée, cet ersatz d'un diagramme H.-R. en est voisin si les étoiles ont toutes la même vitesse, et sinon permet de visualiser des populations différentes. Mais il s'agit là d'un pis aller. Plus précises, les méthodes comme « le point convergent » ne s'appliquent qu'aux amas d'étoiles, la « relation période-luminosité » qu'à certains types d'étoiles variables. Bref, pour les applications astrophysiques, la troisième dimension pour toutes les étoiles de la Carte manque cruellement et motivera le projet Hipparcos.

Hipparcos et Tycho

Dans les années 1970, la France est à nouveau à l'origine d'un grand projet d'astrométrie internationale, la mission Hipparcos. L'idée d'utiliser un satellite dans l'espace pour mesurer, avec plus de précision qu'au sol, les déplacements angulaires des étoiles, discutée par les Professeurs Pierre Lacroute et Pierre Bacchus alors à l'Observatoire de Strasbourg, a été proposée au CNES en 1966 par P. Lacroute^{38 39 40}. Ce premier projet a fait l'objet d'une étude de faisabilité au CNES, le Centre National d'Etudes Spatiales, en 1969-1970⁴¹. Le concept étudié comprenait déjà trois des principes de base retenus par la suite : un miroir complexe permettant l'observation simultanée d'étoiles dans deux champs du ciel situés à 90° l'un de l'autre, un satellite balayant le ciel, et la présence, dans le plan focal, d'une grille composée de bandes alternativement opaques et transparentes qui modulait la lumière reçue des étoiles observées. Deux améliorations importantes ont été suggérées par E. Høg en 1975⁴² : l'utilisation d'un dissecteur d'images plutôt que d'un simple photomultiplicateur (permettant de sélectionner les étoiles à observer et d'améliorer sensiblement le rendement de la détection), et la simplification de la grille modulatrice (à une dimension et non plus en chevron).

Le contexte scientifique.

À la fin des années 60, comme on l'a vu, les mesures de parallaxes trigonométriques obtenues au sol montraient leur limite. Des mesures étaient disponibles pour environ 7000 étoiles, mais pour seulement 5% d'entre elles, les plus proches du Soleil (moins de 10 pc), la distance était connue à mieux que 10% près. Pour moins de 300 objets, la magnitude absolue

³⁶ J. Baillaud, « II^{ème} partie, Travaux exécutés dans les Observatoires », *ibidem.*, p. 195

³⁷ La première utilisation semble apparaître dans E. Hertzsprung, « Über die raumliche Verteilung der Sterne », *Astronomische Nachrichten*, vol. 185, 1910, p. 89

³⁸ P. Bacchus et P. Lacroute, « Prospects of Space Astrometry », in Gliese, Murray & Tucker (eds), *New Problems in Astrometry*, IAU Symp. 61, Dordrecht, Reidel Publishing Company, 1974, p 277

³⁹ P. Lacroute, « Space Astrometry Projects », in Nguyen & Battrick (eds), *Space Astrometry*, ESRO SP-108, Neuilly, ESRO, 1975, p. 5

⁴⁰ P. Bacchus, « Space Astrometry Project – Optical Concept », *ibidem.*, p. 31

⁴¹ J.C. Husson, « Faisabilité d'un Satellite Astrométrique – Résultat d'une étude CNES, *ibidem.*, p. 43

⁴² E. Høg, « A new start for Astrometry », in C. Barbieri et P.L. Bernacca (ed.), *European Satellite Astrometry*, Padoue, Italie, Université de Padoue, 1979, p 7

pouvait être calculée avec une précision suffisante pour être utilisée par la suite pour calibrer les relations type spectral - luminosité et couleur – luminosité ⁴³. De plus, la majorité des étoiles pour lesquelles des données précises de distance étaient disponibles étaient des étoiles brillantes (magnitude apparente entre 5 et 10) et des étoiles de types spectraux communs au voisinage solaire (étoiles de la séquence principale de type G et K) ⁴⁴. La situation pour les mesures de mouvements propres était un peu meilleure, mais les mêmes biais se retrouvaient : les mouvements propres précis étaient peu nombreux et seulement disponibles pour les étoiles de type commun. De plus, il y avait une sur-représentation majeure d'étoiles à grande vitesse. Tout cela limitait l'utilisation de ces mesures dans les études de cinématique et de dynamique galactique, et de nombreuses méthodes indirectes, plus ou moins fiables, devaient être utilisées pour estimer les distances.

Pourquoi observer depuis l'espace.

Observer depuis l'espace permet d'échapper à un certain nombre de problèmes inévitables pour un instrument situé au sol : la turbulence et la réfraction atmosphériques, la flexion des instruments due à la pesanteur, les irrégularités du mouvement de la Terre. De plus, il est évidemment impossible au sol d'observer toutes les parties du ciel avec le même instrument, et les différences systématiques constatées entre les mesures de parallaxes trigonométriques obtenues dans différents observatoires restaient inexpliquées. Aux comportements différents des divers instruments au sol au cours des observations de parallaxes (dans des positions où les instruments sont spécialement sensibles aux problèmes de flexion), s'ajoute un problème intrinsèque aux mesures au sol : les instruments astrométriques sont des instruments à petit champ, et le mouvement de l'étoile-cible est mesuré par rapport à très peu d'étoiles de fond, situées à très petite distance angulaire. Au contraire, observer depuis l'espace avec le principe adopté pour Hipparcos et pour Gaia permet d'observer des étoiles partout dans le ciel et de faire de l'« astrométrie globale » : les positions des étoiles observées dans un champ sont rattachées non seulement aux étoiles observées dans le même champ, mais aussi dans le champ « conjugué » (situé à 58° pour Hipparcos, à 106° pour Gaia). On mesure donc directement de grands angles, et l'erreur relative sur la mesure est plus petite. De plus, toutes les observations sont raccordées entre elles par le principe même du mode opératoire de l'instrument, et l'ensemble du ciel est observé par un instrument unique.

En conclusion, l'espace permettait d'envisager un saut qualitatif et quantitatif majeur : précision meilleure d'au moins un ordre de grandeur, et nombre d'objets, pour lesquels cette précision devenait accessible, multiplié par 50 à 100.

La prospective scientifique.

Comme déjà souligné plus haut, une prospective scientifique approfondie a été démarrée dès avant la proposition d'Hipparcos à l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en 1977 par l'étude des potentialités des diverses solutions techniques proposées dans les différents domaines d'applications (systèmes de référence ^{45 46}, système solaire ⁴⁷, astronomie stellaire et galactique ^{48 49}). Par la suite, plusieurs colloques ont été dédiés, en partie ou en totalité, à une

⁴³ W. Gliese, « Trigonometric Parallaxes – Basic data for Various Problems », in Nguyen & Battrick (eds), *Space Astrometry*, ESRO SP-108, Neuilly, ESRO, 1975, p. 109

⁴⁴ C. Turon, « Some Astrophysical Consequences of an improvement in Parallaxes », *ibidem*, p. 115

⁴⁵ J. Kovalevsky, « Contributions possibles de l'astrométrie spatiale à la définition d'un système de référence absolu », *ibidem*, p. 67

⁴⁶ H.G. Walter, « Extension of a stellar reference system by means of spacecraft-observed faint stars », *ibidem*, p. 73

⁴⁷ C. Meyer et M. Fréschlé, « Conséquences de l'amélioration des catalogues sur l'étude du système Terre-Lune », *ibidem*, p. 95

⁴⁸ W. Gliese, « Trigonometric Parallaxes – Basic data for Various Problems », *ibidem*, p. 109

⁴⁹ C. Turon, « Some Astrophysical Consequences of an improvement in Parallaxes », *ibidem*, p. 115

prospective approfondie qui a permis de mieux définir les performances espérées de la mission envisagée^{50 51 52} et de les comparer à celles qui étaient attendues du télescope spatial Hubble⁵³.

La mission Hipparcos.

Le CNES avait conclu, à la suite de son étude préliminaire, que la proposition d'observer depuis l'espace pour effectuer des mesures astrométriques était très intéressante mais pas à la portée d'un seul pays. Le projet, tirant bénéfice à la fois des nombreux arguments scientifiques développés et des études techniques réalisées, fut alors présenté par J. Kovalevsky à l'ESRO (maintenant ESA) en 1974⁵⁴.

Il faut replacer cette proposition ambitieuse dans le contexte de l'époque : l'astrométrie n'était absolument pas considérée comme une science spatiale, contrairement à l'observation dans les domaines de longueur d'onde X ou infrarouge, inaccessibles depuis le sol, ou à l'exploration du système solaire. De plus, si beaucoup d'astrophysiciens avaient été convaincus par les promoteurs de la mission de l'originalité du projet et de son impact potentiel sur l'astrophysique, de nombreux autres continuaient de considérer l'astrométrie comme une science désuète tout à fait incapable de contribuer à notre compréhension du Monde. Pour exemple, on peut reprendre une citation rapportée par E. Høg en 1975⁵⁵ : « *Un astrophysicien éminent, s'exprimant au nom de nombreux de ses collègues, dit : « Arrêtons l'astrométrie pour cent ans et attendons que tous les astrométristes soient morts. À ce moment-là, il sera possible de prendre un nouveau départ » »*.

L'ESA a néanmoins l'audace de sélectionner le projet en 1980, alors même qu'une sonde vers la comète de Halley était en compétition (elle sera sélectionnée un peu plus tard : ce sera la mission Giotto), et bien que de nombreux scientifiques prétendent qu'Hipparcos ne marcherait jamais, en particulier que le miroir complexe qui rassemblait les deux champs du ciel dans le plan focal était infaisable.

Hipparcos a cependant été réalisé avec succès par l'ESA, avec Matra Marconi Space⁵⁶ et Alenia Spazio⁵⁷, selon les spécifications d'origine, et lancé par Ariane 4 le 8 Août 1989 depuis Kourou. Malgré la défaillance du moteur d'apogée qui a contraint le satellite à rester sur une orbite très elliptique plutôt que d'atteindre l'orbite géostationnaire prévue, des données scientifiques ont été obtenues pendant 37 mois, de Novembre 1989 à Mars 1993, et les précisions sur les positions, parallaxes trigonométriques et mouvements propres ont atteint mieux que 1 mas. Elles sont deux fois meilleures que les valeurs des spécifications données comme référence aux industriels, alors que le temps total d'observation n'a été que d'environ 65 % du temps total prévu sur l'orbite géostationnaire (il était impossible d'observer pendant les traversées des ceintures de radiation de van Allen). Le catalogue final a été publié en juin 1997. Les positions, parallaxes trigonométriques, mouvements propres et magnitudes des 118 219

⁵⁰ C. Barbieri et P.L. Bernacca (ed.), *European Satellite Astrometry*, Padoue, Italie, Université de Padoue, 1979

⁵¹ F. V. Prochazka et R. H. Tucker (ed.), *Modern astrometry*, IAU Colloquium 48, Vienne, Autriche, University Observatory, 1979

⁵² J. Kovalevsky, « Global astrometry by space techniques », *Symposium on Star Catalogues, Positional Astronomy and Celestial Mechanics, Celestial Mechanics*, vol. 22, 1980, p 153

⁵³ C. Turon, « Hipparcos and the Space Telescope: Astrophysical implications of two complementary astrometric projects », in F. Macchetto, F. Pacini & M. Tarenghi (ed.), *ESA/ESO Workshop on Astronomical Uses of the Space Telescope*, 1980, p.403

⁵⁴ J. Kovalevsky, « Prospects for space stellar astrometry », *Space Science Reviews*, vol. 39, 1984, p. 1

⁵⁵ « A prominent astrophysicist spoke for many of his colleagues when he said: "Stop astrometry for one hundred years and let astrometrists die out. Then people with fresh mind could start a new shop », E. Høg, « A new start for Astrometry », in C. Barbieri et P.L. Bernacca (ed.), *European Satellite Astrometry*, Padoue, Italie, Université de Padoue, 1979, p 7 :

⁵⁶ Satellite Prime Contractor and Payload Development

⁵⁷ Co-Prime Contractor : Spacecraft Procurement and Satellite Assembly, Integration & Test

étoiles observées par Hipparcos y sont rassemblés, ainsi que de très nombreuses informations sur la duplicité et la variabilité de ces étoiles.

Des distances connues à mieux que 10% y sont disponibles pour 21 000 étoiles. Il y en avait 500 à 1000 avant 1995 (incertitude due aux erreurs systématiques non maîtrisées). Grâce à la mission Hipparcos, l'astrométrie est maintenant considérée comme un outil fondamental pour l'astrophysique.

L'expérience Tycho⁵⁸, à bord du même satellite, utilisait les repéreurs d'étoiles de l'instrument, et observait systématiquement toutes les étoiles traversant ces champs dans deux couleurs proches des classiques B et V. Tycho a donc observé beaucoup plus d'étoiles qu'Hipparcos, mais pendant des temps plus courts, donnant donc une moins bonne précision. Le Catalogue Tycho-2 a été obtenu par la suite, en re-réduisant plus efficacement les mêmes observations, en déterminant les positions par rapport au système de référence Hipparcos, et en utilisant l'Astrographic Catalogue et 143 autres catalogues de positions pour obtenir des mouvements propres plus précis⁵⁹.

Le tableau suivant compare les performances des catalogues Hipparcos^{60 61}, Tycho^{62 63} et Tycho-2⁶⁴ :

	Hipparcos	Tycho	Tycho-2
Précision moyenne sur les positions	1 mas	25 mas	60 mas
Précision moyenne sur les parallaxes	1 mas	31 mas	-
Précision sur les mouvements propres	1 mas/an	30 mas/an	2,5 mas/an
Nombre d'objets	118 000	1 050 000	2 500 000
Mode d'observation	étoiles sélectionnées	observation systématique	observation systématique
Magnitude limite V	12.4	11.5	12.5
Complétude	7.3 - 9.0	11.0	11.5
Photométrie large bande	H_p	V_T, B_T	V_T, B_T

Comparaison Carte du Ciel - Hipparcos

Une autre comparaison intéressante concerne la précision obtenue sur les positions par les deux entreprises ; dans un régime dominé par le bruit de photons, l'erreur astrométrique est proportionnelle⁶⁵ à $(\lambda/D)/\sqrt{\phi\tau}$ où la longueur d'onde λ et le diamètre D sont voisins pour la Carte du Ciel et pour le satellite (D=33cm contre 29cm pour Hipparcos). Avec 2,5 millions

⁵⁸ L'expérience Tycho a été proposée par E. Høg et al. après l'acceptation d'Hipparcos par l'ESA. Voir E. Høg, C. Jaschek & L. Lindegren, « Tycho: A planned astrometric and photometric survey from space », in Perryman & Guyenne (eds), *The Scientific Aspects of the Hipparcos Space Astrometry Mission*, ESA SP-177, Paris, ESA, 1982, p 21

⁵⁹ voir plus loin, dans le § sur la deuxième vie de la Carte du Ciel

⁶⁰ M.A.C. Perryman et al., « The HIPPARCOS Catalogue », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 323, 1997, L49

⁶¹ The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200, Paris, ESA, 1997

⁶² E. Høg et al., « The TYCHO Catalogue », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 323, , 1997, L57

⁶³ The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200, Paris, ESA, 1997

⁶⁴ E. Høg et al., « The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 355, 2000, L27

⁶⁵ cf. par ex.L. Lindegren, « The Astrometric Instrument of Gaia: Principles », in Turon, O'Flaherty & Perryman (ed.), in *The Three-Dimensional Universe with Gaia*, ESA SP-576, Paris, ESA, 2005, p. 29.

d'étoiles dans Tycho-2, et une mission ayant duré 37 mois avec seulement 65% du temps d'observation utile, chaque étoile a bénéficié en moyenne de $\tau=25s$ en temps d'exposition. En comparaison, les plaques de l'Astrographic Catalogue (plus de 4,6 millions d'étoiles dans l'AC-2000) étaient exposées plus de 4 mn. Le nombre de photons collectés par unité de temps ϕ dépend de la surface collectrice, et du rendement, sans doute nettement moins bon que 1%⁶⁶ pour les plaques, de l'ordre de 0.8% pour Hipparcos⁶⁷. Mais avec moins de photons collectés au final (ceci étant illustré par le nombre d'objets détectés), Tycho-2 ($\sigma = 60$ mas en moyenne) n'aurait pas dû pas gagner devant l'AC-2000 ($\sigma > 150$ mas), si l'on se basait sur ce seul critère. La différence se joue sur l'amélioration des conditions et techniques d'observations et le contrôle des erreurs systématiques qui en résultent.

La préparation d'Hipparcos et de Tycho

Les scientifiques étaient responsables de trois aspects de la préparation de la mission : la préparation du programme d'observation d'Hipparcos (Catalogue d'Entrée), la réduction des données d'Hipparcos et la réduction des données de Tycho. Quatre Consortia ont été chargés par l'ESA de ces aspects (deux Consortia ont été chargés en parallèle de la réduction des données d'Hipparcos). L'implication française a été très forte dans trois de ces Consortia : la construction du Catalogue d'Entrée (responsable C. Turon)⁶⁸, la réduction des données d'Hipparcos (J. Kovalevsky était le responsable de l'un des deux Consortia)⁶⁹, et la construction du Catalogue d'Entrée de Tycho (D. Egret)⁷⁰.

La Carte du Ciel dans la préparation d'Hipparcos.

La Carte du Ciel n'a pas du tout été utilisée dans le cadre de la préparation de la mission Hipparcos. Cela a été envisagé dans le cadre de la construction du Catalogue d'Entrée d'Hipparcos. Contrairement au Catalogue d'Entrée de Tycho qui n'a été préparé « que » pour servir de première étape à la réduction des données de Tycho, le Catalogue d'Entrée d'Hipparcos a été construit pour être le programme d'observation du satellite. Les étoiles de ce Catalogue ont été sélectionnées d'abord sur critères scientifiques, mais aussi pour assurer un fonctionnement optimal du satellite. Le satellite balayant le ciel continûment, le temps d'observation par degré carré de ciel était limité. Par suite, le nombre moyen d'étoiles observables par degré carré de ciel était limité à trois, et la distribution de leurs magnitudes devait être adaptée au temps d'observation total disponible dans chaque champ. La construction du Catalogue d'Entrée d'Hipparcos a donc été une entreprise complexe, effectuée de façon itérative, et qui a exigé de rassembler a priori des données assez précises sur les étoiles finalement sélectionnées⁷¹. En effet, pour pouvoir pointer le satellite efficacement vers une étoile du programme, sa position à l'époque d'observation (1989 à 1993) devait être connue avec une précision suffisante, et, pour lui allouer un temps d'observation permettant d'espérer une bonne précision sur les paramètres astrométriques, il fallait que sa magnitude soit elle aussi connue assez précisément.

En 1981, les positions et magnitudes des étoiles proposées à l'observation avec Hipparcos n'étaient pas, loin de là, connues avec la précision requise. L'une des tâches du Consortium « Catalogue d'Entrée » a été de rassembler les données indispensables, soit dans la

⁶⁶ <http://history.nasa.gov/SP-436/ch2.htm>

⁶⁷ F. Mignard, Considerations about the astrometric accuracy of GAIA, in Munari (ed.), *GAIA Spectroscopy: Science and Technology*, ASP Conference Proceedings, Vol. 298, 2003, p. 25

⁶⁸ C. Turon et al., « Properties of the HIPPARCOS Input Catalogue », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 304, 1995, p 82

⁶⁹ M. A. C. Perryman, L. Lindegren, J. Kovalevsky, et al., « The HIPPARCOS Catalogue », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 323, 1997, 49

⁷⁰ D. Egret et al., « The TYCHO Input Catalogue - Cross-matching the Guide Star Catalog with the HIPPARCOS INCA Data Base », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 258, 1992, p 217

⁷¹ C. Turon et al., « The HIPPARCOS Input Catalogue. I - Star selection », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 258, 1992, p 74

littérature existante, soit en organisant des campagnes d'observation au sol ⁷². La Carte du Ciel n'a pas pu être utilisée dans ce contexte. En effet, la précision requise sur les positions à l'époque 1989 (date de lancement du satellite) était de une seconde de degré alors que le Catalogue Astrographique offre une précision d'environ 0.35 seconde de degré à l'époque moyenne 1907, et pas de mouvement propre. Ce sont les instruments méridiens automatiques Carlsberg (coopération Danemark, Royaume-Uni et Espagne) et de l'Observatoire de Bordeaux qui ont été utilisés, ainsi que les surveys du ciel sur plaques photographiques prises sur des télescopes de Schmidt par les observatoires de Palomar aux USA pour l'hémisphère Nord, et par l'European Southern Observatory (ESO) pour l'hémisphère Sud. En effet, leurs époques moyennes d'observation étaient suffisamment récentes pour que la précision d'une seconde de degré en 1989 soit respectée ⁷³.

Le Centre de Données de Strasbourg dans la préparation d'Hipparcos.

Si la Carte du Ciel n'a pas été utilisée dans le cadre de la préparation d'Hipparcos et Tycho, une autre grande entreprise française a par contre été très fortement mise à contribution : le Centre de Données de Strasbourg (CDS) ⁷⁴. Dès 1969, J. Delhaye, R. Cayrel, et A. Blaauw ⁷⁵ avaient reconnu l'importance, en particulier pour les études de la Galaxie, de rassembler les données disponibles sur les étoiles, ainsi que la source et la qualité de ces données. Cette rencontre de pionniers a mené J. Delhaye, alors directeur de l'INAG (maintenant INSU), à créer le CDS en 1972. La base de données SIMBAD en a été la première réalisation, rassemblant les différentes appellations et les données observées de chaque étoile considérée. Cette base de données a été un atout crucial dans la construction du Catalogue d'Entrée d'Hipparcos et la compilation du Catalogue d'Entrée de Tycho, et utilisée abondamment pour faire le point sur les données déjà disponibles avant de définir les programmes d'observations au sol à effectuer avant le lancement du satellite. En quelque sorte successeur de la Carte du Ciel, le CDS met à disposition des astronomes, et conserve pour les générations futures, les données observées depuis 1972 pour des millions d'objets (étoiles, galaxies, objets nébuleux).

Toujours à Strasbourg, le lien entre la Carte du Ciel et Hipparcos est également présent en la personne de Pierre Lacroute, celui qui informatise et réduit les données de l'Astrographic Catalogue des zones d'Oxford, Paris, Bordeaux, Toulouse et Alger ⁷⁶, et qui, dans le même temps, est le pionnier de l'astrométrie spatiale.

Il est remarquable que la forte implication française dans les grands projets d'astrométrie se perpétue de génération en génération. F. Mignard, un des artisans du traitement des données d'Hipparcos, est maintenant le président du Consortium DPAC (Data Processing and Analysis Consortium) mis en place pour analyser les données de Gaia, et la contribution française au Consortium est de loin la plus importante, tant en nombre de scientifiques que de contributions aux différents aspects de l'analyse des données de Gaia (qui ne sont pas seulement astrométriques).

⁷² C. Turon & Y. Réquière, « Preparation of the HIPPARCOS Input Catalogue - Astrometric Programs for HIPPARCOS - Preliminary Astrometric Observations », in H.K. Eichhorn & R.J. Leacock (eds), *Astrometric Techniques*, IAU Symp.109, Dordrecht, Reidel Publishing Company, 1986, p 605

⁷³ H. Jahreiss, Y. Réquière, A. N. Argue, et al., « The HIPPARCOS Input Catalogue. II - Astrometric data », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 258, 1992, p 82

⁷⁴ L'abréviation C.D.S. a d'abord signifié « Centre de Données Stellaires ». Lorsque des données non stellaires ont également été collectées par le Centre, celui-ci est devenu le Centre de Données de Strasbourg

⁷⁵ A. Heck, 2005, *The Multinational History of Strasbourg Astronomical Observatory*, Springer, Dordrecht

⁷⁶ Un lourd travail de saisie sur cartes perforées, essentiellement sur crédits CNRS, cf. P. Lacroute, « Réduction des Catalogues Photographiques – Zones +31° à -2° (R.C.P. 164) », *Bulletin d'Information du Centre de Données stellaires*, vol. 21, 1981, p. 2

Les domaines d'application

Les données d'Hipparcos ont apporté une description 3D du voisinage solaire sans précédent, et ont été utilisées dans de nombreux domaines de l'astronomie et de l'astrophysique. Ce n'est pas le lieu ici de détailler ces résultats. Seul un aperçu de ces applications est donné ci-dessous :

- **Systèmes de référence :**

- Réalisation optique de l'International Celestial Reference System ;

- **Physique galactique :**

- 40% des étoiles du Catalogue of Nearby Stars ⁷⁷ (supposé rassembler les étoiles plus proches du Soleil que 25pc) étaient en fait au-delà de 25pc (certaines beaucoup plus loin): la densité locale en étoiles était surestimée
- Les distances des amas globulaires étaient sous-évaluées, donc leurs âges surévalués (les âges sont maintenant évalués à 12-14 Gyr, contre 17-18 auparavant). Cette conclusion, associée à une sous-estimation générale des distances dans notre Galaxie, permettait enfin de lever la contradiction dérangeante avec l'âge de l'univers (l'âge d'expansion estimé pour l'Univers était plus petit que l'âge estimé pour les amas globulaires)
- Le potentiel galactique a été révisé, montrant qu'il n'y avait pas de place, localement, pour de la matière noire dans le disque galactique
- Mesure du gauchissement de notre Galaxie
- Des courants d'étoiles ont été identifiés dans le halo, apportant la preuve de la formation hiérarchique de notre Galaxie (un groupe d'étoiles est entré en collision avec notre Galaxie et s'est incrusté dans le halo) ;

- **Échelle de distance :**

- Étude détaillée de la structure 3D de l'amas des Hyades et détermination de sa distance moyenne
- Détermination de la distance moyenne de plusieurs amas ouverts proches
- Nouvelle calibration de la relation période-luminosité des Céphéides
- Nouvelles déterminations de la distance au Grand Nuage de Magellan (encore très mal connue)

- **Physique stellaire :**

- Âge et composition des Hyades
- Recalibration du diagramme H-R
- Meilleure caractérisation de la structure et de l'évolution des étoiles
- Des milliers de nouvelles étoiles variables
- Des milliers de nouvelles étoiles doubles
- Première observation photométrique d'une planète extra-solaire (transit devant HD 209458)... sans le savoir
- Détermination précise des distances des étoiles autour desquelles orbitent des planètes
- Creusement du « désert » des naines brunes

- **Système solaire :**

- Gain d'un facteur 10 en précision sur les positions de 48 petites planètes, meilleure détermination de leurs orbites
- Amélioration de la prédiction de l'impact de la comète Shoemaker-Levy sur Jupiter

- **Physique fondamentale :**

⁷⁷ W. Gliese & H. Jahreiß, « Catalogue of Nearby Stars », version 3, in L.E. Brodzmann & S.E. Gesser (eds.), *The Astronomical Data Center CD-ROM: Selected Astronomical Catalogs*, vol. 1, 1991

- Confirmation de la valeur 1 du paramètre γ de la relativité générale à 10^{-3} près

Hipparcos, le projet

Les complexités techniques s'effacent parfois devant les problèmes sociologiques. Hipparcos, le projet, devait rassembler une communauté n'ayant jamais travaillé sur un projet spatial : analyser et dimensionner les tâches et les réaliser en respectant un calendrier ne fait pas toujours partie de la culture de la recherche. De plus, les communautés devant travailler ensemble étaient très diverses, à cause de l'aspect transversal de l'astrométrie⁷⁸. Enfin, il fallait maintenir la motivation pendant 15 ans en acceptant que les avancées de la science en parallèle soient exploitées par d'autres.

Le projet bénéficiait cependant d'atouts indéniables formant autant de facteurs de réussite, et qui explique la sélection de cette mission. Tout d'abord, l'idée de l'astrométrie spatiale est originale ; non seulement l'amélioration de la qualité des données était considérable, mais elle concernait un éventail très large d'objets. Corollaire : les applications devenaient très variées et s'attaquaient à des problèmes de fond comme la nature et l'évolution des étoiles, la structure et l'évolution de la Galaxie, et la place de celle-ci dans l'Univers. Le projet avait également prévu une préparation approfondie⁷⁹ : des campagnes d'observations au sol préliminaires furent réalisées, accompagnées par l'utilisation de données complémentaires (par exemple plaques de Schmidt) ou bien par des simulations détaillées et suivies par des tests et calibrations nombreux.

Les atouts ne servent à rien si l'on ne se donne pas les moyens organisationnels de la réussite. Ceux-ci étaient au moins au nombre de quatre : confier chaque tâche essentielle à un institut spécialiste ; organiser des échanges réguliers entre scientifiques, mais aussi avec les industriels ; avoir la possibilité de se consacrer au projet à plein temps, pendant le nombre d'années nécessaire ; respecter le rôle essentiel du « Scientifique du projet »⁸⁰ faisant l'interface scientifiques / industriels pour optimiser les caractéristiques des instruments à bord, et l'interface entre scientifiques.

L'autre atout de la communauté française qui a travaillé sur Hipparcos a été le soutien sans faille de ses autorités de tutelle et des collaborateurs :

- soutien financier du CNES (en particulier, missions) dès avant la création des Consortia scientifiques ;
- appui aux deux Français dirigeant deux des quatre Consortia scientifiques ;
- soutien « stratégique » du CNES pour les simulations numériques : simulation de l'observation avec le satellite, production de données simulées, simulation de la réduction des données, puis traitement de données (ingénieurs + temps de calcul CNES),
- soutien en personnel techniques: redéploiements, mais aussi recrutements CNRS
- recrutement de jeunes chercheurs quand les données ont été disponibles, pour rentabiliser cet investissement lourd sur 15 ans
- soutien à long terme du Centre de Données de Strasbourg (aide à l'utilisation intensive de SIMBAD, aide à la construction d'une « sous-base » de SIMBAD, la base de données INCA – pour Input Catalogue, inclusion du Catalogue d'Entrée puis du Catalogue de sortie Hipparcos dans SIMBAD).

Enfin, un autre élément essentiel du succès a été la volonté des promoteurs du projet de motiver la communauté française, et européenne, pour l'utilisation des données futures du satellite et de

⁷⁸ Réunissant (du plus proche au plus lointain) des spécialistes de la rotation terrestre, des petites planètes, de la physique stellaire, galactique, extragalactique (quasars), et de la physique fondamentale (relativité).

⁷⁹ Via la réalisation du « Catalogue d'Entrée », la liste des cibles à observer par le satellite, ainsi que pour la préparation au traitement des données (pour produire le Catalogue « de sortie »).

⁸⁰ On peut féliciter l'Agence Spatiale Européenne pour avoir nommé M.A.C. Perryman à ce poste

la faire réfléchir dès avant la sélection du projet par l'ESA à toutes les applications possibles de l'utilisation d'une telle quantité de données astrométriques d'une précision sans précédent.

Après 20 ans de travail pour environ 200 scientifiques, plusieurs centaines d'ingénieurs, techniciens, administratifs, et 1800 ingénieurs Matra-Alenia et de l'ESA, le résultat est là ! Le coût « industriel » (fabrication, lancement, opérations) a représenté un total équivalent à 687 M€ (2006)⁸¹. En comparaison, la partie « scientifique » correspond à 60 hommes-ans/an sur 16 ans pour les 4 Consortia, soit 960 hommes-ans (dont ~450 hommes-ans pour le Catalogue d'Entrée⁸²) ; ceci représenterait un coût consolidé (charges salariales, infrastructures, missions) plus incertain, mais d'environ 112 M€⁸³, soit une faible fraction du coût industriel. Pour Gaia, le coût approuvé est de 557 M€ (pour l'ESA, hors budget de la réduction des données, à charge des pays).

En comparaison, réussir à identifier le coût de la Carte du Ciel est sans doute une gageure, compte tenu du nombre d'Observatoires impliqués et de la durée de l'opération. Mais T. Weimer indique que les bureaux de mesure (une chef et 4 calculatrices) mesuraient annuellement 30000 étoiles environ⁸⁴. Sur cette base, on arriverait donc par un calcul rapide à 1400 femmes-ans rien que pour la mesure des 8.6 millions de positions d'étoiles de l'Astrophysical Catalogue... Quant à la saisie informatique, l'Institut Sternberg y consacra 50 hommes-ans⁸⁵.

La deuxième vie de la Carte du Ciel

L'arrivée d'Hipparcos

On l'a dit, le projet Carte du Ciel ne fut pas utilisé pour la « fabrication » du Catalogue d'Entrée d'Hipparcos et du Catalogue Tycho. Mais, en revanche, Tycho fut un peu ce qui rentabilisa le legs « *aux astronomes de l'avenir [de l']état exact de notre ciel à la fin du 19^{ème} siècle* ».

Si la majorité des plaques de la Carte du Ciel (7 500 plaques de 2°x2°, complétude jusqu'à $m_B=14.5$, époque moyenne 1912)⁸⁶ n'ont jamais été mesurées, celles de l'Astrophysical Catalogue (22 652 plaques de 2°x2°, 60''/mm, époque médiane 1904) ont été mesurées manuellement, et assurent une complétude jusqu'à $m_B=11.0$ à l'époque moyenne 1907 avec une précision allant de 200 à 400 mas.⁸⁷ Au moment de l'arrêt du projet, les données de l'Astrophysical Catalogue étaient cependant difficilement utilisables, car non informatisées, et Herget allait jusqu'à suggérer de délocaliser leur saisie dans une nation « *sous-développée* »⁸⁸. C'est la première raison à la faible utilisation astrométrique de la Carte du Ciel, la seconde tenant à l'absence d'un système de référence suffisamment dense qui permette de convertir les positions x,y sur les plaques en « bonnes » coordonnées équatoriales. Entre 1987 et 1990, l'Institut moscovite Sternberg saisit et met sur bande magnétique les 270+ volumes imprimés de

⁸¹ 580 MAU en 1995, cf. ESA, 1997, *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200, Vol. 3, Appendix E, p. 379 converti en francs par le facteur 6.545 puis en € (2006) via <http://www.insee.fr/fr/indicateur/achatfranc.htm>

⁸² C. Turon, « The Input Catalogue Consortium », *Proceedings of the ESA Symposium 'Hipparcos - Venice '97'*, 13-16 May, ESA SP-402, 1997, p. xxxviii.

⁸³ 80 MAU (1990), facteur MAU/F=6.926, ESA, *ibidem*.

⁸⁴ Théo Weimer, « Brève histoire de la Carte du Ciel en France », Observatoire de Paris, 1987, p. 19

⁸⁵ V. Nesterov et al., « Completion of the Sternberg Astronomical Institute Astrophysical Catalogue Project », in McLean et al. (eds.), *New Horizons from Multi-Wavelength Sky Surveys*, IAU Symp. 179, Kluwer Academic Publishers, 1998, p. 409

⁸⁶ cf. S.E. Urban, http://www.to.astro.it/astrometry/AC_CdC/reports/ac_cdc_wg.ppt, rapport du Groupe de Travail Carte du Ciel à l'Assemblée Générale de l'UAI, Sydney, 2003

⁸⁷ *Ibidem*

⁸⁸ « *Did you consider the underdeveloped nations ? I mean this very seriously. This is nothing but a key punching job* », Herget pendant la discussion suivant l'intervention de H. Wood, in Luyten (ed.), *Proper Motions*, I.A.U. Colloquium n°7, 1970, p. 72

l'A.C.⁸⁹, l'US Naval Observatory en fait de même pour une partie, et on se souvient que le CNRS avait également participé à ce travail dans le passé. Ceci règle le premier point, et, en 1997, les Catalogues Hipparcos/Tycho voient le jour, donnant ainsi le système de référence.

Le catalogue AC 2000⁹⁰, plus de 4,6 millions d'étoiles, est alors obtenu après la réduction de ces coordonnées rectilignes (x,y) en coordonnées célestes (α, δ), et alignement sur le système de référence Hipparcos. Puis l'Astrographic Catalogue est combiné avec Tycho pour obtenir les catalogues ACT⁹¹ et TRC⁹² d'environ un million d'étoiles chacun avec des mouvements propres très précis (une base de temps d'environ 90 ans). Enfin, en 2000, Tycho-2⁹³ marque l'aboutissement du processus. D'une part, le traitement des données de Tycho est refait, en superposant les observations obtenues aux différents transits du satellite. D'autre part, les données sont combinées avec l'Astrographic Catalogue et 143 autres catalogues intermédiaires. Plus de 2,5 millions d'étoiles avec une précision d'environ 2,5 mas/an sur le mouvement propre sont ainsi mises à la disposition de la communauté.

Les applications sont très diverses : tout ce qui concerne l'utilisation de la cinématique en structure galactique (amas, ou autres traceurs), mais la Carte du Ciel continue également à contribuer à l'étude des étoiles binaires par la possibilité de découpler le mouvement propre à long terme de ce qui est mesuré à court terme : la contamination entre mouvement propre et mouvement orbital peut ainsi être détectée^{94 95}. À titre d'exemples individuels, l'utilisation de Tycho-2 permet de préciser la masse du compagnon de HD 127506 et de confirmer son statut de naine brune⁹⁶. Autre exemple plus exotique, R Canis Majoris est une binaire à éclipses, mais Hipparcos s'aperçoit également d'une accélération de son mouvement astrométrique. À l'aide de la courbe de lumière, on peut mettre en évidence la présence d'un troisième corps orbitant en 93 ans : suivant que la binaire à éclipse se rapproche ou s'éloigne, le temps que met sa lumière à nous parvenir est en avance ou bien en retard ; c'est grâce à l'ensemble des mesures astrométriques effectuées depuis un siècle, dont 2 mesures de l'Astrographic Catalogue, que l'on peut mieux contraindre l'orbite⁹⁷.

Outre l'Astrographic Catalogue dont la complétude permet des études statistiques sur tout le ciel, certaines des plaques de la Carte du Ciel disponibles sont maintenant également exploitées, donnant des mouvements propres pour un grand nombre d'étoiles⁹⁸. Certains utilisent même un scanner du commerce pour mesurer ces plaques⁹⁹!

⁸⁹ V. Nesterov et al., « Completion of the Sternberg Astronomical Institute Astrographic Catalogue Project », in McLean et al. (eds.), *New Horizons from Multi-Wavelength Sky Surveys*, IAU Symp. 179, Kluwer Academic Publishers, 1998, p. 409

⁹⁰ S.E. Urban et al., « The AC 2000: The Astrographic Catalogue on the System Defined by the HIPPARCOS Catalogue », *The Astronomical Journal*, vol. 115, Issue 3, 1998, pp. 1212-1223

⁹¹ S.E. Urban, T.E. Corbin, G.L. Wycoff, « The ACT Reference Catalog », *The Astronomical Journal*, 1998, vol. 115, 2161

⁹² A. Kuzmin et al., « Construction of the Tycho Reference Catalogue », *Astronomy and Astrophysics Supplement*, vol. 136, 1999, p.491-508

⁹³ E. Høg et al., « The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 355, 2000, p. L27-L30

⁹⁴ F. Arenou, « Hipparcos et les binaires serrées », in D. Egret et al. (ed.), *École de Goutelas #23*, CNRS, 22-26 May 2000, SF2A, 2001, p. 127

⁹⁵ A. Frankowski et al., « Proper-motion binaries in the Hipparcos catalogue. Comparison with radial velocity data » *Astronomy and Astrophysics*, vol. 464, 2007, p. 377-392

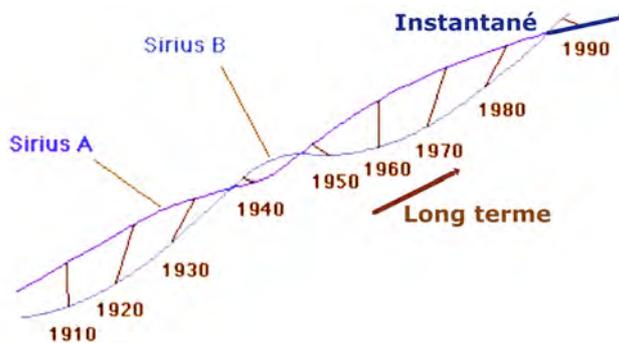
⁹⁶ F. Arenou et J. Palasi, « Planetary mass limits using Hipparcos astrometry », in A. Penny et al. (ed.), *Planetary Systems in the Universe: Observation, Formation and Evolution*,

⁹⁷ I. Ribas et al., « Astrometric and Light-Travel Time Orbits to Detect Low-Mass Companions: A Case Study of the Eclipsing System R Canis Majoris », *The Astronomical Journal*, vol. 123, 2002, p. 2033-2041.

⁹⁸ 2,6 millions d'étoiles dans la zone de Bordeaux, cf. C. Ducourant et al., « The PM2000 Bordeaux proper motion catalogue », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 448, 2006, p.1235-1245

⁹⁹ B. Vicente et C. Abad., « Carte du Ciel plates, San Fernando Zone, using a flatbed scanner », in Teixeira et al. (ed.), *Astronomy in Latin America*, ADeLA Publications Series, vol. 1, 2003, p.31-34.

Les mesures de la Carte du Ciel peuvent permettre de découpler le vrai mouvement propre du mouvement instantané (tel qu'on peut le mesurer avec des observations astrométriques de courte durée) absorbant une part du mouvement orbital.



Scientométrie...

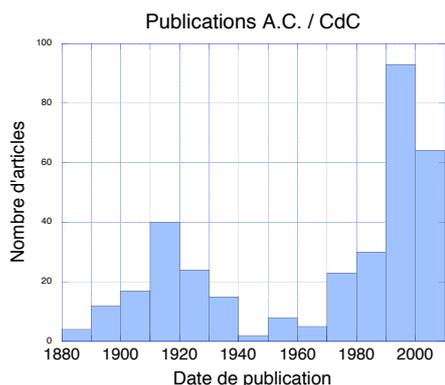
Il est extrêmement difficile de recenser exhaustivement toutes les publications ayant fait usage de la Carte du Ciel. A. Fresneau¹⁰⁰ cite 77 publications principales jusqu'à 1998 touchant à des domaines comme le milieu interstellaire, la structure galactique, les amas ouverts ou globulaires, le système de référence optique ou les aspects de réduction des données. Effectuer une recherche bibliographique automatisée est difficile car la Carte du Ciel n'est pas caractérisée par une ou des références bibliographiques auxquelles les auteurs aient pu se référer, et les listes de citations ne sont de toutes manières pas complètes. Ce qui est informatisé, par contre, ce sont les résumés des publications, mais il est clair que l'usage des Catalogues n'est pas systématiquement mentionné ; les chiffres qui suivent représentent donc une limite inférieure.

Sans préjuger du réel contenu scientifique, l'ADS¹⁰¹ recense ainsi entre 1888 et 2006 environ 140 articles mentionnant la Carte du Ciel dans leur résumé, et 225 mentionnant l'Astrographic Catalogue (337 au total). Ceci est à mettre en comparaison avec, sur la période 1978-2006, 3736 publications mentionnant Hipparcos et 670 concernant Tycho (dont 237 pour Tycho-2). Certes, l'inflation actuelle du nombre de publications désavantage les publications anciennes et ne représente pas un gage de qualité, mais c'est néanmoins plus d'un ordre de grandeur qui sépare le nombre de publications des deux projets. Il faut noter que les 337 articles mentionnés ci-dessus ont eux-mêmes été cités par 1377 articles, soit un taux d'impact total d'environ 4. En comparaison, le taux d'impact des articles mentionnant Hipparcos ou Tycho est supérieur à 9.

Évolution du nombre de publications dans l'ADS mentionnant la Carte du Ciel ou l'Astrographic Catalogue dans leur résumé.

¹⁰⁰ <http://astro.u-strasbg.fr/~fresneau/workgroup.html>

¹⁰¹ Cet article a fait un très large usage de l'« Astrophysics Data System » de la NASA, <http://cdsads.u-strasbg.fr>, qui est ici remercié.



Le futur

Gaia, histoire & évolution de la Galaxie

Dès le début des années 1990, les scientifiques ont commencé à réfléchir aux applications scientifiques de l'astrométrie à quelques μ as de précision¹⁰² et aux progrès techniques pouvant permettre l'amélioration des précisions atteintes avec Hipparcos, déjà simplement en remplaçant le détecteur photométrique d'Hipparcos par un CCD¹⁰³ (détecteur électronique beaucoup plus sensible qu'un photomètre). Le concept de la mission Gaia était présenté et retenu par l'ESA en 1995 dans le contexte du programme « Horizon 2000 Plus » (planification à long terme du Programme Scientifique de l'ESA)¹⁰⁴. Après quatre années d'études sur les applications scientifiques et de développements technologiques, Gaia est sélectionnée comme l'une des deux « Pierres Angulaires » du Programme Scientifique de l'ESA¹⁰⁵. Son lancement est prévu pour fin 2011.

Cette nouvelle mission construit sur l'expérience de la mission Hipparcos : même soin apporté à l'examen préalable des potentialités scientifiques du projet, même principe pour le satellite (à balayage) et le télescope (deux champs du ciel combinés dans le plan focal), afin d'obtenir de l'astrométrie globale et d'utiliser de manière optimum le temps d'observation disponible. Elle pare aussi, dès sa conception, aux problèmes rencontrés par Hipparcos : détection systématique à bord (pour une meilleure statistique de l'échantillonnage de la Galaxie), des performances accrues pour la photométrie (afin de déterminer, en parallèle aux paramètres astrométriques, les caractéristiques physiques des objets observés) ; et enfin, un instrument spectroscopique à bord pour obtenir directement les vitesses radiales par effet Doppler (troisième composante de la vitesse spatiale des étoiles).

Les progrès de la technologie (mode de détection, puissance de calcul disponible à bord, etc.) et des miroirs nettement plus grands que celui d'Hipparcos (miroirs rectangulaires de 1.45 m \times 0.50 m, à comparer au miroir de 29 cm de diamètre d'Hipparcos) entraînent un bond spectaculaire tant dans la précision attendue (20 millièmes de seconde de degré à la magnitude 15) que dans le nombre d'objets observables (un milliard d'objets). Ce relevé complet du ciel jusqu'à la magnitude 20 va permettre un échantillonnage sans précédent de notre Galaxie, depuis les objets les plus faibles présents dans le voisinage solaire jusqu'aux objets les plus

¹⁰² J. Kovalevsky & C. Turon, « Scientific requirements for very accurate astrometry », *Advances in Space Research*, vol. 11, 1991, p. 5

¹⁰³ E. Høg, L. Lindegren, « A CCD Modulation Detector for a Second HIPPARCOS Mission », in I.I. Mueller & B. Kolaczek (eds), *Developments in astrometry and their impact on astrophysics and geodynamics*, IAU Symp. 156, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1993, p.31

¹⁰⁴ L. Lindegren & M.A.C. Perryman, 1996, « GAIA: Global astrometric interferometer for astrophysics », *Astronomy and Astrophysics Supplement*, vol. 116, p.579

¹⁰⁵ M.A.C. Perryman et al., « GAIA: Composition, formation and evolution of the Galaxy », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 369, 2001, p 339

lointains de notre Galaxie, et même des galaxies voisines du Groupe Local, en passant par l'observation d'étoiles dans toutes les phases de l'évolution stellaire, même les plus rapides.

Les applications scientifiques de cette masse de données sont innombrables. L'objectif premier est de décrypter la Galaxie, ses différentes composantes, leur structure, leur cinématique, leur dynamique, l'histoire de leur formation et de leur évolution. Mais la mission apportera aussi une moisson de données sans précédent à plusieurs autres domaines :

- la physique stellaire : des magnitudes absolues, des paramètres atmosphériques (température et pression par exemple) et l'abondance des éléments qui composent l'atmosphère des étoiles observées. Cet ensemble de paramètres, très précisément déterminés, permettra de tester les modèles de structure interne et d'évolution des étoiles.
- Un inventaire complet des étoiles du voisinage solaire, jusqu'aux plus faibles, avec la détection de leurs compagnons éventuels et la détection systématique des planètes géantes en orbite autour de ces étoiles (on attend de l'ordre de 10 000 nouvelles détections)
- Le système solaire : détermination des orbites pour plus de 100 000 astéroïdes, détection d'astéroïdes géocroiseurs
- Enfin une distance précise des Nuages de Magellan (distance sur laquelle repose en grande partie l'échelle des distances dans l'Univers)
- le paramètre γ de la relativité générale à 10^{-7} près (connu actuellement à 10^{-5} près).

Les autres catalogues astrométriques / photométriques / spectroscopiques

Au sol, les progrès ont également été très importants, avec l'arrivée de télescopes automatisés, l'utilisation de CCDs très performants remplaçant les photomultiplicateurs et les plaques photographiques, et les performances accrues des ordinateurs. Les catalogues de positions et de mouvements propres actuels combinent des positions observées à l'époque actuelle avec les positions de nombreux catalogues plus anciens (y compris le Catalogue Astrographique dont les plaques ont été remesurées avec des machines automatisées). Par exemple l'UCAC3, attendu pour 2007, comprendra 60 millions d'étoiles avec une précision sur les mouvements propres de 1 à 7 mas/an¹⁰⁶. Autre exemple, l'USNO-B1, résultant de nouveaux scans des plaques de plusieurs surveys avec des télescopes de Schmidt, et qui donne positions, couleurs et mouvements propres pour plus d'un milliard d'objets jusqu'à la magnitude 21¹⁰⁷. Parallèlement, des observations systématiques de grandes zones du ciel sont réalisées dans d'autres longueurs d'onde : catalogues dans l'infrarouge proche (2MASS, 2 Micron All Sky Survey¹⁰⁸, 471 millions d'étoiles et un million de galaxies, et DENIS, DEep Near Infrared Southern Sky Survey, 100 millions d'étoiles et de 250 000 galaxies) ; catalogue avec photométrie et spectres à basse résolution (SDSS, Sloan Digital Sky Survey¹⁰⁹, 215 millions d'objets), observations systématiques de vitesses radiales (RAVE, the RAdial Velocity Experiment¹¹⁰, un million d'étoiles de l'hémisphère Sud).

L'avenir de la Carte du Ciel

« Je ne crois absolument pas que nous puissions dire quel point intéressera les observateurs des siècles futurs. »¹¹¹

¹⁰⁶ N. Zacharias, Assemblée Générale de l'Union Astronomique Internationale, *Joint Discussion* n°16, 2006

¹⁰⁷ D.G. Monet, et al., *Astronomical Journal*, vol. 125, 2003, p 984

¹⁰⁸ M.F. Skrutskie, *Astronomical Journal*, vol. 131, 2006, p 1163

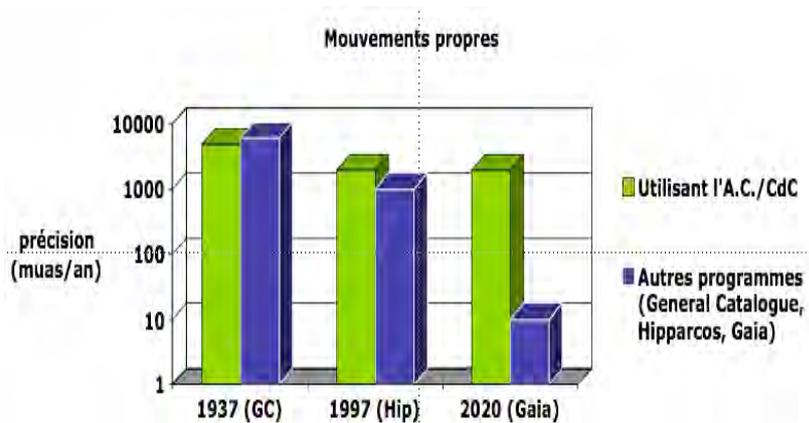
¹⁰⁹ Z. Ivezić, Assemblée Générale de l'Union Astronomique Internationale, *Joint Discussion* n°13, 2006

¹¹⁰ <http://www.rave-survey.aip.de/rave>

¹¹¹ R.A. Sampson (50 ans après le lancement de la Carte) en réponse à : « *Les progrès de la science maintiennent-ils l'intérêt de laisser aux astronomes des siècles à venir une image fidèle du ciel, englobant des astres plus faibles que ceux dont les positions et les grandeurs sont relevées dans le Catalogue Photographique* », J. Baillaud, « III Dispositions à prendre pour continuer l'œuvre du comité permanent », *ibidem.*, p. 181

Y aura-t-il une troisième vie pour la Carte du Ciel ? Rien n'est moins sûr. Par exemple, pour ce qui concerne les mouvements propres, le gain technologique est maintenant plus rapide que le gain (linéaire) sur la base de temps. Le graphique ci-dessous illustre une comparaison au fil du temps entre la précision de mouvements propres qui utiliseraient l'Astrophysical Catalogue (on suppose ~200 mas de précision sur les positions) et celle qui est obtenue avec d'autres Catalogues. Mais, certes, il ne s'agit là que des mouvements propres et on ne peut prédire les autres utilisations qui pourraient être faites du legs de la Carte du Ciel ¹¹².

Comparaison entre les précisions sur les mouvements propres qui seraient obtenus en utilisant la Carte du Ciel (un gain linéaire avec le temps) et ceux acquis par les programmes plus récents ou futurs (un gain quasiment exponentiel).



En comparant les succès respectifs des deux projets, plusieurs faits peuvent être notés. D'abord, Hipparcos, plus pragmatique, n'a pas eu l'ambition de créer une grande œuvre pour les générations futures, mais de contribuer immédiatement à l'avancée des sciences, quitte à anticiper le relais en promouvant Gaia dès la fin de la mission. Ensuite, il est frappant de constater que, si l'organisation de la Carte du Ciel est quasiment « industrielle », tout comme celle de l'ESA et du CNES, il semble manquer en amont la réelle préparation qu'on attendrait maintenant de tout projet scientifique : 1) la prospective scientifique n'est formulée que qualitativement, et avec peu de mise en relation avec des performances techniques ¹¹³, 2) faute d'analyse quantitative de ce qu'on espère obtenir, le projet peut être poursuivi indéfiniment, 3) les coûts et les délais sont loin d'être maîtrisés. Mais on se trouve enfermé ici dans un système où d'une part, l'importance de l'œuvre déjà entreprise sert de justification à sa continuation ; d'autre part l'évolution des performances techniques ou la possibilité d'obtenir des mouvements propres peut même servir de prétexte à recommencer le travail ¹¹⁴. Certes, il y a également eu des pressions sur le projet Hipparcos pour améliorer tel ou tel point, c'est-à-dire en retarder sa publication, mais, fort heureusement, la présence de bout en bout d'un responsable de projet et d'une équipe scientifique responsables a permis de tenir les délais et les coûts.

Sur ces aspects performances scientifiques / coûts qui sont maintenant omniprésents, les opinions sur le projet Carte du Ciel sont souvent tranchées. Virginia Trimble indique « *qu'avec le recul, on peut s'estimer heureux qu'aucun observatoire américain n'y ait été impliqué* », « la

¹¹² Après tout, c'est en regardant l'archive Hipparcos *a posteriori* que l'on a constaté qu'elle avait été la première à observer le transit d'une planète extrasolaire, cf. N. Robichon & F. Arenou, « Planetary transits from Hipparcos photometry », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 355, 2000, p. 295-298

¹¹³ Ce n'est par exemple que lors de sa réunion de mai 1896 que les résolutions du Comité décident de l'erreur maximale que doivent avoir les mesures des coordonnées rectilignes du Catalogue.

¹¹⁴ J. Baillaud, « III Dispositions à prendre pour continuer l'œuvre du comité permanent », *ibidem.*, p. 181

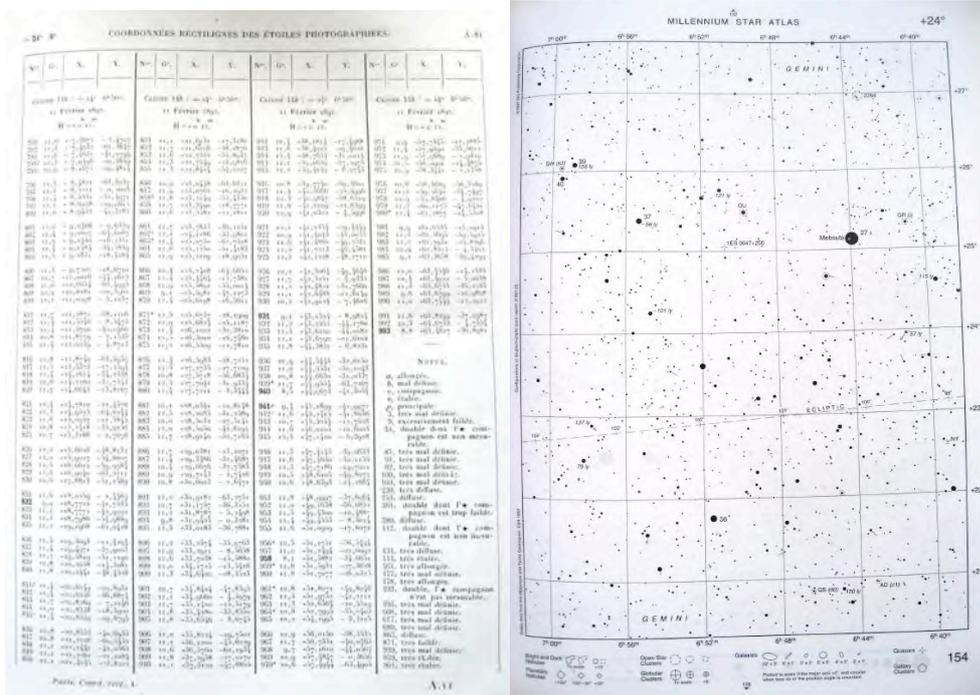
*Carte du Ciel étant une cible dans laquelle on jeta non seulement de l'argent mais également le temps irremplaçable de talentueux scientifiques.»*¹¹⁵. Mais, du même côté de l'Atlantique, on trouve aussi un hommage appuyé de la part des auteurs de l'AC 2000 à toutes celles et tous ceux qui ont contribué à la Carte du Ciel¹¹⁶ : « *Finally, une profonde reconnaissance est due aux centaines d'hommes et de femmes, dont la majorité a disparu depuis longtemps, qui ont exposé et mesuré les 22 660 plaques de l'Astrographic Catalogue* ». Il est vrai qu'il est difficile de ne pas s'émouvoir de l'énergie, du dévouement et du soin évident apporté au travail, y compris la documentation ; et que l'on réalise ce que représentent la mesure (de l'ordre du micron), la saisie manuscrite, l'impression, la saisie informatique, manuelles et parfois dupliquées, des 8 633 975 mesures de positions et magnitude.

Enfin, à côté des résultats scientifiques, certes limités compte tenu des investissements financiers et humains, mais néanmoins présents, la Carte du Ciel a à son actif un bilan qualitatif bien plus positif. D'abord elle a promu et « essuyé les plâtres » de l'astrophotographie, mais surtout elle a représenté un des premiers exemples de consortium scientifique international, anticipé l'organisation de l'astronomie en Union Astronomique Internationale (U.A.I.), marqué de son empreinte la communauté astronomique française, et probablement inspiré les projets astrométriques qui l'ont suivi.

¹¹⁵ Avec la note de bas de page : « *I think this was originally a description of a golf course: 18 small holes down which you throw money* », V. Trimble, « What, and Why, is the International Astronomical Union? », *The Universe at Large*, SLAC Beam Line, vol. 27, N4, 1997, p. 43

¹¹⁶ « *Finally, a special gratitude is extended to the hundreds of men and women, most of whom have long since passed away, who exposed and measured the 22,660 AC plates.* », S.E. Urban et al., « The AC 2000: The Astrographic Catalogue on the System Defined by the HIPPARCOS Catalogue », *The Astronomical Journal*, vol. 115, Issue 3, 1998, pp. 1212-1223

Une des pages du « Catalogue Photographique du Ciel », zone de Paris, Tome I, 1902, à gauche. La même zone du ciel, représentée à partir des observations d'Hipparcos/Tycho dans le Millennium Star Atlas en 1997, à droite.



Évolution de la mode vestimentaire. À gauche, mesures par des nonnes des plaques du Vatican dans les années 1910-1921. À droite, intégration du télescope Hipparcos en 1987.



