

DEUX « SPHÈRES » EN FUSION

F. Arenou

DASGAL, URA 335 du CNRS
Observatoire de Paris-Meudon-Nançay
Place J. Janssen, 92195 Meudon Cedex, France

RÉSUMÉ

La dernière étape de la réduction des données d'Hipparcos consiste à fusionner les paramètres obtenus par les deux Consortiums de Réduction FAST et NDAC. L'obtention des paramètres astrométriques des étoiles simples est décrite, ainsi que le processus de validation des données obtenues, notamment en ce qui concerne l'exactitude et la précision¹ des parallaxes.

1. INTRODUCTION

La fin de la réduction des données d'Hipparcos approche. En ce qui concerne les paramètres astrométriques, les Consortiums de Réduction des données d'Hipparcos (DRC) ont obtenu des résultats quasi-définitifs, la comparaison entre ces résultats pouvant être trouvée dans Froeschlé (1995). Les principes de la réduction des données étant décrits dans Perryman *et al.* (1989), indiquons simplement que la réduction se fait en trois temps, le dernier consistant à combiner des abscisses absolues (unidimensionnelles) obtenues sur des grands cercles de référence (RGC) de façon à obtenir des paramètres astrométriques (réduction sur la sphère céleste²).

Pour fusionner les résultats obtenus sur la sphère par les deux DRC, la première idée consisterait à en effectuer la moyenne, éventuellement pondérée. Ce serait oublier que les résultats sont fortement corrélés : faute de connaître précisément la valeur de cette

¹L'exactitude (accuracy) concerne le point-zéro – l'erreur systématique – des grandeurs mesurées, alors que la précision s'intéresse à la dispersion de leurs erreurs aléatoires.

²d'où le titre de cet article...

corrélation (qui varie d'une étoile à l'autre), il devient impossible d'estimer la précision des résultats obtenus. Et il est impensable que les paramètres astrométriques soient publiés sans leurs erreurs formelles, ainsi que les corrélations entre eux.

La solution consiste donc à suivre la démarche suggérée par Murray (1993) : utiliser les abscisses obtenues par chaque DRC, puis calibrer empiriquement les corrélations entre ces abscisses, et enfin déterminer les paramètres astrométriques en utilisant les abscisses et leurs variances-covariances.

2. FUSION DES DONNÉES

Les données fournies par chaque DRC sont, pour chaque étoile, les paramètres astrométriques obtenus, et d'autre part, pour chaque orbite, les dérivées partielles des abscisses, et les résidus O-C des abscisses par rapport aux paramètres astrométriques. Les données correspondantes sont résumées dans le tableau 1 suivant :

Table 1: Données initiales des DRC

	FAST	NDAC
étoiles	100 723	109 627
observations	3 087 733	3 495 515
orbites	2 364	2 326

La procédure qui a été suivie ensuite peut être décrite séquentiellement de manière plus détaillée, des tests étant effectués à chaque étape importante :

1. Une rotation des paramètres astrométriques de chaque DRC a été effectuée vers H30 (catalogue intermédiaire Hipparcos après 30 mois de mission, approximativement sur le système FK5).
2. Les moyennes (FAST+NDAC)/2 de ces paramètres astrométriques ont servis de nouveaux paramètres de référence.
3. Les résidus des abscisses par rapport à ces paramètres ont été calculés.
4. Pour quelques (22) étoiles, les résidus FAST ont été modifiés pour prendre en compte l'accélération séculaire.
5. Les coefficients de corrélations empiriques entre résidus ont été calculés, la variation de ceux-ci étant étudiés en fonction de différents paramètres (cf §2.1.).

6. Ces coefficients de corrélation ont été calibrés en fonction de la magnitude.
7. Pour chaque étoile, les résidus, et les variances-covariances entre eux, ont été délivrés à un programme de moindres-carrés (cf §2.2.).
8. Les corrections aux paramètres astrométriques de référence obtenus ont fournis des nouveaux paramètres, accompagnés des variances-covariances entre eux (cf §2.3.).

Certains de ces points sont développés ci-dessous, où l'on notera $\mathbf{p} = (p_i)$ le vecteur des corrections recherchées aux paramètres astrométriques, a_F et a_N les abscisses de FAST et NDAC, σ_F et σ_N leurs précisions formelles respectives, et ρ la corrélation entre eux, et enfin $r_{F/M}$ et $r_{N/M}$ les résidus des abscisses par rapport à la solution astrométrique de référence.

Il se trouve que ce n'est pas *une*, mais 4 solutions astrométriques qui ont été obtenues : une solution 5 paramètres normale, une autre en conservant les abscisses discordantes (rejetées par les DRC) et en utilisant une procédure robuste de moindres carrés³ ; une solution normale et une solution robuste en cherchant à déterminer 7 paramètres (positions, parallaxe, mouvements propres, accélérations). Ces solutions seront notées respectivement 5, 5R, 7, 7R. On notera « merge » la solution générale qui a utilisé ces quatre solutions pour en extraire les données les meilleures ; nous ne nous intéresserons qu'à cette solution dans ce qui suit.

2.1. Corrélation entre abscisses

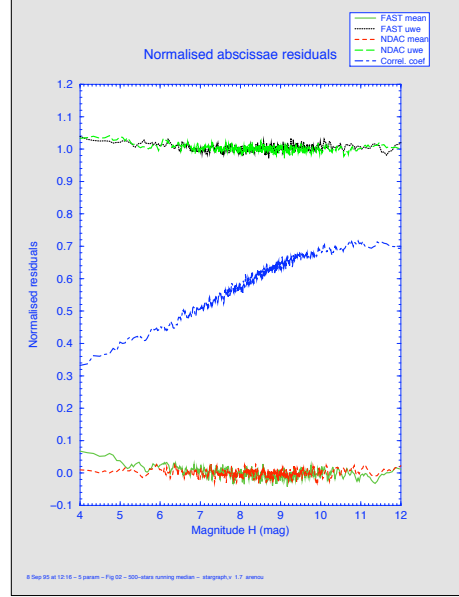
La corrélation entre abscisses est essentiellement une fonction croissante de la magnitude, comme on peut le voir figure 1. Sur cette figure sont tracées les médianes des résidus normalisés (i-e divisés par leur erreur formelle), leur écart-type⁴ et la corrélation entre eux. Mais si l'on se souvient que les résidus $O - C$ proviennent d'une solution précédente, ils ont donc perdu 5 degrés de liberté, et l'on a corrigé leur écart-type en conséquence ; par contre, la corrélation n'a pas été modifiée et il faut lui ajouter environ 0.1 pour obtenir une valeur non biaisée de la corrélation entre abscisses.

Le coefficient de corrélation varie également en fonction de la latitude et de l'orbite (maximum en milieu de mission), mais cela ne sera pris en compte que dans la prochaine version du processus de fusion. Pour l'instant, ce coefficient a donc été calibré comme une fonction polynomiale de la magnitude. Cette calibration a été vérifiée *a posteriori* en calculant, pour chaque étoile, l'écart-type de $(r_{F/M} - r_{N/M}) / \sqrt{\sigma_F^2 + \sigma_N^2 - 2\rho\sigma_F\sigma_N}$ qui doit être voisin de 1, si la calibration est correcte.

³utilisant une métrique donnant moins de poids aux queues de distribution.

⁴l'écart-type de telles données normalisées sera appelé erreur unitaire (unit-weight error), et doit valoir 1 si les erreurs formelles sont correctement estimées.

Figure 1: Variation des résidus normalisés des abscisses de chaque DRC en fonction de la magnitude H : médianes, écarts-types et corrélation.



2.2. Corrections aux paramètres astrométriques

Bien que la solution ait été obtenue par l'intermédiaire d'un programme de moindre carré gérant l'ensemble des détails pratiques, il est facile de décrire formellement le problème. Le système d'équations normales à résoudre pour chaque paire d'observations (d'indice j , omis) est le suivant :

$$\mathbf{A} \begin{pmatrix} \dots & \frac{\partial a_F}{\partial p_{i,F}} & \dots \\ \dots & \frac{\partial a_N}{\partial p_{i,N}} & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot \\ p_i \\ \cdot \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} a_F \\ a_N \end{pmatrix} \quad (1)$$

La matrice de poids totale est donc formée de 0, sauf sur sa diagonale, formée des matrices \mathbf{A}_j , éventuellement réduites à un seul terme si l'une des observations (FAST ou NDAC) est manquante, ces matrices valant :

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_F} & 0 \\ \frac{-\rho}{\sigma_F \sqrt{1-\rho^2}} & \frac{1}{\sigma_N \sqrt{1-\rho^2}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

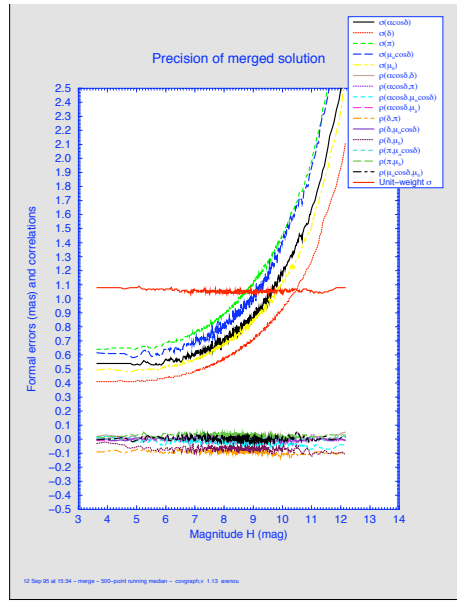
2.3. Précision des paramètres obtenus

Une fois les solutions astrométriques obtenues, on vérifie qu'elles sont bien alignées sur H30, ce qui est le cas, les éléments de la matrice de rotation étant inférieurs à 0.1 mas en

position, et inférieurs à 0.02 mas/an en mouvement propre.

La précision des paramètres obtenus varie essentiellement avec la magnitude (Fig. 2), et dans une moindre mesure avec la latitude éclipique; les corrélations sont en moyenne voisines de 0, mais peuvent varier fortement (-0.3 à $+0.3$) en fonction de la longitude. Ce sont des faits, par ailleurs peu surprenant, dont il faudra tenir compte lors de l'exploitation des résultats de la mission.

Figure 2: Variation des précisions formelles des paramètres astrométriques (mas), corrélations entre eux et erreur unitaire en fonction de la magnitude H.



3. VALIDATION DES DONNÉES

Pour chaque solution obtenue, une procédure de validation a été effectuée. La parallaxe – un des paramètres les plus intéressants, mais aussi celui ayant souvent la moins bonne précision – a été particulièrement étudié; il y a plusieurs raisons à cela: d'abord, il n'y a pas *a priori* de raison que les autres paramètres souffrent d'effets dont resterait indemne la parallaxe, ensuite parce que ces autres paramètres manquent de données externes nombreuses et précises qui permettraient de les comparer. En revanche, la queue de distribution des parallaxes permet d'obtenir une estimation de la précision des parallaxes individuelles.

Les comparaisons « internes » consistent à étudier la « largeur » (dispersion robuste

basée sur des quantiles) de la distribution des parallaxes, ainsi que le nombre de parallaxes négatives – deux statistiques révélatrices de la précision des parallaxes observées –. Les solutions obtenues peuvent être comparées dans le tableau 2.

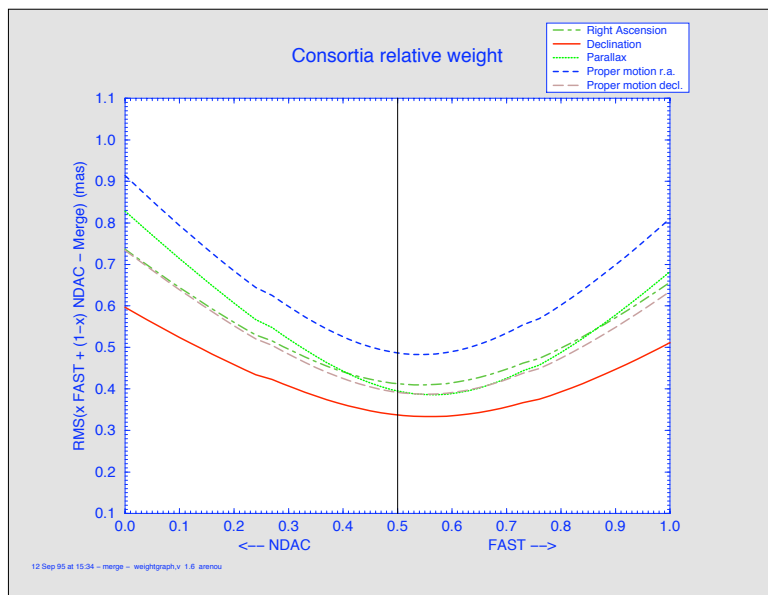
Table 2: Indicateurs internes de la précision des parallaxes

	FAST	NDAC	5	5R	7	7R	merge
Largeur distribution (mas)	4.620	4.680	4.605	4.615	4.625	4.625	4.605
Nombre parallaxes négatives	3 258	3 882	3 017	3 107	3 219	3 317	3 007

Ce tableau montre d’abord le gain qui est apporté par cette fusion (comparer la solution 5 paramètres aux solutions FAST ou NDAC) ; ensuite, il est clair qu’il est préférable d’éliminer les observations dont on sait qu’elles sont aberrantes, plutôt qu’utiliser un moindre carré robuste (comparer 5 à 5R ou 7 à 7R) ; enfin, déterminer trop de paramètres (7 au lieu de 5) de façon non sélective dégrade la qualité de la solution.

On voit également que la solution FAST est plus précise que la solution NDAC, ce que l’on retrouve si l’on cherche le poids de chaque DRC dans la solution fusionnée (Fig. 3) : en moyenne, respectivement 55% contre 45% environ.

Figure 3: Poids respectifs des DRC dans la solution fusionnée.



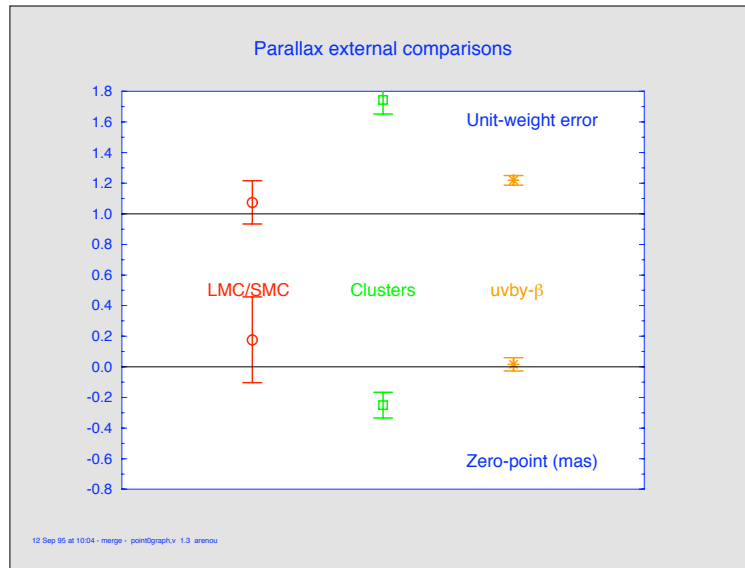
Les comparaisons « externes » cherchent à obtenir une estimation du point-zéro global

des parallaxes, ainsi que de leurs erreurs formelles :

- On a sélectionné les étoiles des nuages de Magellan, qui ont donc une parallaxe quasiment nulle ; la distribution des parallaxes Hipparcos permet directement la lecture de leur erreur de mesure. Cet échantillon est malheureusement trop réduit pour en tirer des enseignements utiles.
- En utilisant des étoiles d'amas, amas dont la distance est supposée connue, on peut calculer la différence entre la parallaxe Hipparcos et la parallaxe provenant de la distance de l'amas. Le nombre d'étoiles est maintenant plus grand, mais beaucoup de ces étoiles ne sont pas *réellement* membres de l'amas considéré, rendant les résultats non exploitables et suggérant une recalibration des distances d'amas.
- La dernière méthode est beaucoup plus prometteuse. Utilisant le fait que les parallaxes photométriques ($uvby\beta$) ont une erreur qui devient très petite pour les étoiles lointaines, et adoptant un modèle élaboré qui tient compte des biais de sélection (Arenou, 1995a, 1995b), une grande précision est obtenue sur le point-zéro et l'erreur unitaire des parallaxes obtenues.

L'ensemble des résultats obtenus est synthétisé sur la figure 4. Le point-zéro des parallaxes provenant de la fusion des données des DRC apparaît négligeable, mais les erreurs formelles sont encore légèrement sous-estimées dans cette version de la fusion.

Figure 4: Point-zéro et erreur unitaire des parallaxes par comparaisons externes.



4. CONCLUSION

La procédure de fusion des données des DRC, telle qu'elle est décrite ci-dessus doit permettre d'obtenir les paramètres astrométriques d'Hipparcos les plus précis, ainsi que leur matrice de variance-covariance. Cependant, les résultats obtenus ne sont pas encore optimaux et diverses pistes sont explorées pour permettre de les améliorer.

En particulier, environ 1% des observations n'ont pas été utilisées suite à des problèmes de numéros d'orbite; leur inclusion améliorera la précision des parallaxes de 0.2 mas environ. De plus, la calibration du coefficient de corrélation sera faite en fonction des erreurs formelles des abscisses et non plus en fonction de la magnitude, les premières prenant en compte, outre l'effet de magnitude, celui de l'orbite à laquelle appartient l'abscisse.

Plusieurs solutions doivent être obtenues, à 5, 7, voire 9 paramètres, à la suite de quoi une solution les combinant sera effectuée. Il ne restera plus que le raccordement au repère extragalactique pour obtenir les paramètres définitifs des étoiles simples de la mission Hipparcos.

REMERCIEMENTS

Il va de soi que ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide des membres des DRC – en particulier de Michel Frøeschlé –, et les conseils de C.A. Murray. Les équipements de calcul ont été obtenus grâce à l'aide de l'INSU.

5. RÉFÉRENCES

Arenou, F., *et al.*, 1995a, Zero-point and external errors of Hipparcos parallaxes, *Astronomy and Astrophysics*, sous presse.

Arenou, F., 1995b, Une méthode de calibration des magnitudes absolues et d'autres paramètres fondamentaux, ce volume.

Frøeschlé, M., 1995, Comparaison des données FAST et NDAC, ce volume.

Murray, C.A., 1994, The combination of results from NDAC & FAST (II), *Technical note to the Hipparcos Science Team*.

Perryman, M.A.C, *et al.*, 1989, *The Hipparcos Mission*, ESA SP-1111, Vol III.