# Quelles étoiles avec quelle précision ? Calibration des luminosités Application à l'échelle des distances

Catherine TURON

Observatoire de Paris-Meudon
DASGAL / UMR 8633 CNRS

92190 MEUDON

**Abstract**

Des précisions de l'ordre de quelques micro-secondes de degré sur les distances et mouvements propres de plus d'un milliard d'étoiles, des magnitudes dans 6 à 8 bandes passantes, des vitesses radiales: GAIA apportera des mesures précises des six dimensions de l'espace des phases, alliées à des mesures photométriques et spectroscopiques permettant de caractériser les différents types d'étoiles. Ce recensement systématique d'une partie conséquente de notre Galaxie va permettre une calibration détaillée de toutes les parties du diagramme de Hertszprung-Russell, aussi bien pour les étoiles les plus faibles, que pour les plus rares, que pour celles qui sont dans des phases évolutives très rapides. La détermination des distances dans notre Galaxie et dans les galaxies extérieures est l'un des domaines où cet énorme flux de distances, donc de magnitudes absolues extrêmement précises, va enfin permettre de trancher quelques controverses comme la distance des Nuages de Magellan, la valeur de la constante de Hubble ou l'âge des amas globulaires.

## 1 Introduction

GAIA va, pour la première fois, permettre un inventaire systématique de *tous* les objets présents dans une sphère d'environ 100 pc autour du Soleil: naines rouges, brunes ou blanches, étoiles non encore sur la séquence principale, naines du halo, ainsi que de leurs compagnons éventuels (étoiles, naines brunes ou exoplanètes). Les distances de tous ces objets seront déterminées à mieux que 10 %, même pour les plus faibles d'entre eux, beaucoup mieux pour les autres. Actuellement, la connaissance des compagnons (de toutes sortes) des étoiles même très proches du Soleil est encore très partielle: 13 nouveaux compagnons ont encore été trouvés autour de naines M à moins de 10 pc du Soleil (Delfosse et al. 1999).

Avec des précisions de 4 $\mu$arcsec à la magnitude $V = 12$, 10 $\mu$arcsec à $V = 15$, et 0.2 mas à $V = 20$ pour plus d'un milliard d'étoiles, accompagnées d'un survey photométrique et spectroscopique, le projet GAIA (Lindegren & Perryman 1997, Lindegren & Perryman 1996, Perryman et al. 1997) va révolutionner de nombreux domaines de l'astronomie, aussi bien dans notre connaissance des étoiles, que de notre Galaxie, que des galaxies extérieures.

La comparaison avec ce qui est obtenu du sol, même avec les meilleurs instruments, ou même avec ce qui a été obtenu avec Hipparcos est spectaculaire: voir Table 1. Pour des étoiles de magnitude $G = 20$ ($G$ est la magnitude en bande large GAIA), GAIA aura la précision qu'a permis d'atteindre Hipparcos jusqu'à la magnitude $V = 12.4$ dans un rayon de 25 pc

- jusqu'à 170 pc pour $V - I = 0$
- jusqu'à 220 pc pour $V - I = 1$
- jusqu'à 330 pc pour $V - I = 2$
- jusqu'à 500 pc pour $V - I = 3$

Table 1: Parallaxes trigonométriques sol, Hipparcos et GAIA.

| | Sol | Hipparcos | GAIA |
|---|---|---|---|
| $V_{max}$ | 20 | 12.4 | 23 ([a]) |
| $\sigma_\pi/\pi \leq$ **1 %** | | | |
| nombre d'étoiles | très peu | 188 | $\sim 20 \times 10^6$ ([b]) |
| $d_{max}$ | 25 pc | 25 pc | 2700 pc |
| $Mv_{min}$ | | -0.1 ([c]) | -9 |
| $Mv_{max}$ | | 15.2 ([d]) | 20 |
| $\sigma_\pi/\pi \leq$ **10 %** | | | |
| nombre d'étoiles | 1000 ? | 22 396 | $\sim 150 \times 10^6$ ([b]) |
| $d_{max}$ | 200 pc | 200 pc | 25 000 pc |
| $Mv_{min}$ | -2 | -5.5 ([e]) | -9 |
| $Mv_{max}$ | 19 | 15 ([d]) | 20 |

[a] pour les étoiles les plus rouges
[b] Lindegren (1999)
[c] la plupart des étoiles sont plus faibles que la magnitude absolue 1
[d] la plupart des étoiles sont plus brillantes que la magnitude absolue 12
[e] la plupart des étoiles sont plus faibles que la magnitude absolue -3.

## 2 Calibration des luminosités

Hipparcos (ESA 1997) a permis d'élargir considérablement la base observationnelle sur laquelle reposaient les calibrations de luminosité (Turon 1999) et a permis de montrer que les classes de luminosités MK étaient à redéfinir complètement: dispersion très grande dans chaque classe, recouvrement entre classes, mélange d'étoiles situées dans différentes régions du diagramme HR (Gómez et al. 1997, Jaschek & Gómez 1998, Paunzen 1999). Par ailleurs, les facteurs affectant la magnitude absolue (abondances différentes, rotation de l'étoile sur elle-même, etc.) sont très mal calibrés (Lebreton 1999 pour des étoiles très proches; Domingo & Figueras 1999 pour des étoiles A3-A9; van Leeuwen 1999, Robichon et al. 1999 pour des amas ouverts), mais que les échantillons ayant des magnitudes absolues très précises sont encore souvent, même après Hipparcos, insuffisamment nombreux.

Hipparcos a aussi permis de montrer que les données sol avaient entraîné une sous-estimation importante et systématique des distances photométriques et spectroscopiques, même pour des étoiles très proches du soleil (à moins de 25 pc: Turon & Perryman, 1999; à moins de 80 pc: Binney et al. 1997).

GAIA apportera des magnitudes absolues très précises pour *toutes* les populations stellaires, dans *tous* les états d'évolution, même les phases les plus rapides, même pour les objets les plus rares, dans toute la partie visible de la Galaxie. Voir Tables 2 et 3. Ceci permettra une lecture quasi-directe de la distribution des âges des différentes populations d'étoiles dans les différentes parties de notre Galaxie. Ces données permettront de calibrer très précisément les magnitudes absolues de tous les types spectraux, en tenant compte de tous les effets influant sur la luminosité, et ainsi de donner une nouvelle base aux déterminations de distances d'étoiles observées individuellement dans des galaxies extérieures. Les observations systématiques de GAIA permettront aussi certainement de découvrir de nombreux objets 'bizarres' à étudier plus en détail au sol.

Il est important dans ce cadre d'optimiser les systèmes photométriques et spectroscopiques de GAIA pour obtenir une détermination précise de l'extinction, une bonne détermination de la température effective, et le plus d'informations possibles sur les abondances, pour la plus grande proportion possible des objets observés.

Table 2: Erreur sur la magnitude absolue due à l'erreur sur la parallaxe trigonométrique pour des étoiles de magnitude $V = 10$, pour des zones sans absorption

| | Hipparcos | GAIA |
|---|---|---|
| à 10 pc | 0.03 mag | $10^{-4}$ mag |
| à 100 pc | 0.3 mag | $10^{-3}$ mag |
| à 10 kpc | – | $10^{-1}$ mag |

Table 3: Etoiles observées avec GAIA avec une précision sur la parallaxe trigonométrique meilleure que 10 % dans des zones sans absorption. Distances et magnitudes limites obtenues à partir de l'étude de précision astrométrique effectuée dans le cadre de la préparation de la mission (Lindegren 1999, 'Livre rouge' Juillet 1999). La limitation vient soit de la précision sur la parallaxe trigonométrique, donc de la distance (d en colonne 'limite'), soit de la détection, donc de la magnitude G (G en colonne 'limite').

| Mv [mag] | Type d'étoile | $< V - I >$ [mag] | $V_{\rm lim}$ [mag] | $G_{\rm lim}$ [mag] | $d_{\rm lim}$ [pc] | limite |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | O V | -0.3 | 12.2 | 12.2 | | |
| -5 | B0-G0 Ib | to | | | 27 000 | d |
| | Ia et Ia0 | 4.7 | 12.2 | 8.5 | | |
| 0 | A0 V | 0.01 | 15.0 | 15.0 | 10 000 | d |
| | K3 III | 1.19 | 15.2 | 14.7 | 11 000 | d |
| 5 | G5 V | 0.8 | 17.6 | 17.3 | 3300 | d |
| 10 | M2 V | 2.0 | 20.3 | 19.2 | 1150 | d |
| | DB | 0.0 | 19.7 | 19.7 | 870 | d |
| 15 | M7 V | 3.0 | 22.5 | 20.6 | 320 | d |
| | DG | 0.8 | 21.3 | 21.0 | 180 | G |
| 17 | M8 V | 3.2 | 23.1 | 21.0 | 170 | G |
| 20 | naines brunes | 4.5 | 24.5 | 21.0 | 80 | G |

## 3 Echelle des distances

Les observations de différents objets dans les galaxies extérieures sont le plus souvent calées sur des objets de même nature dans le Grand Nuage de Magellan (LMC). La distance de ces galaxies est par suite déterminée par rapport au LMC. Cependant, la distance du LMC est encore très incertaine: à partir des résultats d'Hipparcos, complétés par des données sol pour différents types d'objets, on obtient des modules de distance pour le Grand Nuage de Magellan qui s'étalent de 18.1 à 18.7 magnitudes (Turon & Perryman, 1999). Dans une revue de toutes les méthodes, Walker (1999) donne $18.55 \pm 0.10$ mag. Les difficultés intrinsèques sont diverses: la profondeur du Nuage lui-même ($\simeq 2.5$ kpc, Graff 1998) et sa structure (les Céphéïdes sont plutôt dans la barre, les RR Lyrae des amas globulaires ou SN1987a en dehors); le rougissement, qui est très variable d'un point à l'autre, avec des valeurs de E(B-V) variant de 0.0 à 0.15, avec pour valeur médiane $\sim 0.10$, et un maximum de 0.29 autour de l'étoile 30 Doradus; une métallicité elle aussi assez variable: de [Fe/H] = -0.15 à -0.34 dex.

GAIA permettra la calibration, dans notre Galaxie, des outils de base permettant de déterminer des distances pour des objets de même type dans les galaxies extérieures: position des séquences d'amas ouverts et globulaires; points zéro des relations période-luminosité des variables pulsantes; magnitudes absolues des super-géantes, des étoiles centrales des nébuleuses planétaires, de novae, etc. De plus, GAIA permettra la détermination directe de parallaxes trigonométriques individuelles pour les toutes les étoiles les plus brillantes des galaxies les plus proches du Groupe Local, et par suite des distances moyennes de diverses zones de celles-ci.

La Table 4 donne quelques informations chiffrées sur les principaux objets utilisés comme étalons de distance.

Parallèlement aux observations astrométriques de GAIA, il conviendra que des progrès similaires soient effectués, de préférence directement à partir des données photométriques et spectroscopiques de GAIA, pour déterminer l'extinction interstellaire et le rougissement, ainsi que la métallicité des objets observés (la métallicité est le principal facteur affectant la luminosité des étalons de distances). De même, l'amélioration des transformations couleur-température effective et magnitude absolue-magnitude bolométrique sera nécessaire pour une bonne comparaison aux modèles théoriques d'évolution stellaire et pour obtenir une bonne détermination non seulement des distances, mais aussi luminosités absolues et des âges des objets considérés.

# 4 Distances moyennes des galaxies du Groupe Local

Les résultats attendus sur les distances moyennes de trois des galaxies du Groupe Local sont les suivants:

- LMC
  - distance moyenne de diverses zones du LMC à mieux que 5 % (si l'on considère des *zones* de 3000 étoiles avec $M_V = 0$, $V - I = 0.4$)
  - la profondeur, $\simeq 2.5$ kpc, est visible
  - 74 Céphéïdes bien connues (Tanvir 1999) $\Rightarrow$ distance moyenne de la barre à mieux que 3%
  - $\simeq 1500$ Céphéïdes découvertes par les survey de microlensing (Beaulieu et al. 1995, Bersier et al. 1998) + combien de nouvelles (??) $\Rightarrow$ distance moyenne à mieux que 1%
  - RR Lyrae: $\simeq 8000$ découvertes par les survey de microlensing + sûrement de très nombreuses nouvelles $\Rightarrow$ distance moyenne à mieux que 5%
- SMC
  - distance moyenne de diverses zones du LMC à mieux que 8% (*zones* de 3000 étoiles avec $M_V = 0$, $V - I = 0.4$)
  - Céphéïdes: $\simeq 400$ (Sasselov et al. 1997) + combien de nouvelles (??) $\Rightarrow$ distance moyenne à mieux que 2%
- Sagittarius
  - distance moyenne de diverses zones de Sagittarius à mieux que 1% (*zones* de 3000 étoiles avec $M_V = 0$, $V - I = 0.4$)

Table 4: Observations d'étalons de distance avec GAIA.

| Objet | Observations GAIA |
|---|---|
| Amas ouverts | recensement de tous les membres de chaque amas<br>observations 3-D jusqu'à $\sim$ 1000 pc<br>toutes distances moyennes à mieux que 1 %<br>découverte de nouveaux amas |
| Amas globulaires | recensement de tous les membres,<br>sauf dans les parties centrales de certains amas<br>100 à 100 000 étoiles observables par amas (*)<br>plus de 5000 étoiles observables dans la moitié des amas (*)<br>plus de 1000 étoiles observables dans 100 amas sur 140 (*)<br>83 des 140 amas sont plus proches que $\sim$ 10 kpc (*)<br>108 des 140 amas sont plus proches que $\sim$ 15 kpc (*)<br>$V$ des branches horizontales: minimum 12.5, la majorité entre 15 et 17<br>$V$ des branches horizontales dans le LMC: 19<br>$V$ des 'turn off': minimum 16, la majorité entre 18 et 20<br>$\sigma_\pi/\pi$ sur les distances moyennes $<$ 1% pour 110 amas sur 140<br>$\sigma_\pi/\pi$ sur les distances moyennes $<$ 5% pour tous les amas de la Galaxie<br>dans le LMC, il faudrait 2000 étoiles pour obtenir $\sigma_\pi/\pi$ <10% |
| Céphéïdes | $\sigma_\pi/\pi <$ 1 % jusqu'à 3000 pc<br>$\sigma_\pi/\pi <$ 4 % pour toutes les Céphéïdes galactiques<br>appartenance aux amas ouverts dans toute la Galaxie<br>$\sigma_\pi/\pi <$ 8 % pour les Céphéïdes de Sagittarius<br>$\sigma_\pi/\pi \sim$ 15-20 % dans le LMC, selon la période<br>première vérification de l'universalité de la relation P-L |
| RR Lyrae | $\sigma_\pi/\pi <$ 1 % jusqu'à 3000 pc<br>$\sigma_\pi/\pi <$ 10 % pour $\sim$ toutes les RR Lyrae galactiques |
| Miras | $\sigma_\pi/\pi <$ 1 % jusqu'à 3000 pc<br>$\sigma_\pi/\pi <$ 6 % pour toutes les Miras galactiques |
| Toutes variables | recensement de toutes les variables observables<br>très bon échantillonnage versus période, population, couleur, métallicité<br>détermination de la dispersion intrinsèque des relations période-luminosité |

(*) Robichon 1999

## 5 Conclusion

GAIA va permettre l'observation systématique des luminosités absolues d'étoiles de tous âges, de toutes phases d'évolution, de toutes populations, partout dans notre Galaxie et, pour les étoiles les plus brillantes intrinsèquement, dans les galaxies les plus proches du Groupe Local. Tous les paramètres agissant sur la luminosité pourront ainsi être étalonés avec des échantillons conséquents et des comparaisons pourront être effectuées, pour la première fois, entre plusieurs galaxies.

Les autres missions astrométriques visant des précisions du même ordre que GAIA (SIM ou FAME) sont prévues pour un nombre limité d'étoiles, et donc des sélections devront être effectuées a priori, entraînant nécessairement un biais vers des problèmes connus. Avec GAIA, tous les objets existants seront observés systématiquement, ce qui permettra d'éviter tout effet de biais observationnel.

Pour la détermination des distances, GAIA apportera une calibration exaustive et homogène de tous les étalons de distances, ainsi qu'une détermination parallèle du rougissement et de la métallicité pour un éventail complet de types spectraux et de populations d'étoiles. Ces observations permettront enfin de trancher quelques controverses comme la distance des Nuages de Magellan, la valeur de la constante de Hubble ou l'âge des amas globulaires.

## RÉFÉRENCES

## References

[1] Beaulieu, J.P., Grison, P., Tobin, W., et al., 1995, A&A, 303, 137

[2] Bersier, D., Alcock, C., Allsmann, R.A., et al., 1998, A Half Century of Stellar Pulsation Interpretation, ASP Conf. Series 135, p 24

[3] Binney J.J., Dehnen W., Houk N., Murray C.A., & Penston M.J., 1997, in Hipparcos Venice '97, 473

[4] Delfosse, X., Forveille, T., Beuzit, J.-L., et al., 1999, A&A, 344, 897

[5] Domingo, A.& Figueras, F., 1999, A&A, 343, 446

[6] ESA 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP–1200

[7] Gómez, A.E., Luri, X., Mennessier, M.O. et al. 1997, in Hipparcos Venice '97, 207

[8] Graff D., EROS 2 collaboration, 1998, IAU Symp. 190, New views of the Magellanic Clouds

[9] Jaschek C., & Gómez A.E., 1998, A&A, 330, 619

[10] Lebreton, Y., 1999, in Unsolved Problems in Stellar Evolution, ed. M. Livio, Cambridge University Press, p 107

[11] van Leeuwen F., 1999, A&A, 341, L71

[12] Lindegren, L., 1999, GAIA Science Advisory Group reports

[13] Lindegren, L., & Perryman M.A.C., 1996, A&AS, 116, 579

[14] Lindegren, L., & Perryman M.A.C., 1997, in Hipparcos Venice '97, 799

[15] Paunzen,E., 1999, A&A, 341, 784

[16] Perryman, M.A.C., Lindegren, L., & Turon, C., 1997, in Hipparcos Venice '97, 743

[17] Robichon, N., 1999, ce volume

[18] Robichon, N., Lebreton Y., Turon C., & Mermilliod J.C., 1999, ASP Conf. Series, sous presse

[19] Sasselov D.D., Beaulieu J.P., Renault C., et al., 1997, A&A, 324, 471

[20] Turon, C., 1999, in Post-Hipparcos Cosmic Candles, Heck A. & Caputo F., Dordrecht: Kluwer, p 1

[21] Turon C., Perryman M.A.C., 1999, Global Space Astrometry: Impact on cosmic distance scale, in Harmonizing Cosmic Distance Scales in a Post-Hipparcos Era, ASP Conf. Series, D. Egret and A. Heck (eds), p 1.

[22] Walker, A.R., 1999, in Post-Hipparcos Cosmic Candles, Ch. 1, Heck A. & Caputo F., Dordrecht: Kluwer, p 125