

Etude de différentes méthodes de mesure de distance stellaire

Quentin Buet, Antoine Roueff

23 juin 2026

Abstract

Contexte. La mission du satellite Gaia a permis d'enrichir grandement notre carte du ciel, et de compléter les méthodes de mesure de distance stellaire (distance ladder en anglais). Ainsi, différentes méthodes de mesure de distance stellaire sont peaufinées, enrichissant notre carte du ciel.

But. Nous tentons de reconstituer cette échelle de distance stellaire afin d'en comprendre les mécanismes et difficultés. Nous nous concentrons sur 2 méthodes principales : la parallaxe géométrique et les chandelles standard, plus précisément les céphéides.

Méthodes. Nous nous basons sur la seconde publication de la mission du satellite Gaia ([Lindegren, L. et al., 2018](#)), les papiers correspondants, ainsi que certaines recherches explicitant les différentes méthodes. L'essentiel provient du journal scientifique [Astronomy & Astrophysics \(A&A\)](#), tandis que les données proviennent de sources secondaires, par souci pratique.

Résultats. Nous appliquons les deux méthodes avec succès et les comparons pour découvrir que la méthode de la parallaxe géométrique est imparfaite et fortement perturbée par les erreurs de mesure.

Conclusions. Les principales difficultés de ce domaine sont l'impossibilité de vérifier les résultats et l'échelle desdits résultats qui provoque d'importantes marges d'erreur. Nous n'avons pu étudier l'essentiel de l'échelle de distance stellaire mais pouvons désormais saisir ses difficultés.

Table des matières

1	Introduction	3
2	Parallaxe	3
2.1	Principe	3
2.2	Application	4
2.3	Programme	4
3	Chandelles standard	5
3.1	Céphéides	6
3.1.1	Théorie	6
3.1.2	Calibration	6
3.2	Erreur	7
3.3	Programme	7
4	Conclusion	9

1 Introduction

Mesurer la distance qui nous sépare d'un objet à l'extérieur du système solaire peut être déstabilisant : il n'est pas possible, comme nous en avons l'habitude, de nous déplacer ou d'y envoyer un objet pour faire la mesure. En effet, cela mettrait des millénaires, ces distances sont colossales.

C'est pourquoi les chercheurs conçoivent de nouvelles méthodes de mesure, nommées (en anglais) **The Distance Ladder**. Pour construire cette échelle, nous avons besoin de plusieurs méthodes complémentaires :

La Parallaxe est fondée sur l'angle d'observation de l'objet stellaire (terme générique) pour en déduire sa distance par trigonométrie. Cette méthode ne nécessite pas de calibration, mais n'est efficace que pour de courtes distances : nous ne pouvons pas mesurer plus loin que la voie lactée. Sa version avancée permet généralement de calibrer d'autres méthodes.

Les chandelles standard sont des objets dont une propriété particulière permet de déterminer sa luminosité réelle (sa magnitude), et donc sa distance, la loi de propagation de la lumière étant connue. Ce champ de recherche est très dynamique mais nous nous concentrerons sur les céphéides.

L'effet Doppler (ou redshift) consiste à mesurer le décalage spectral d'un objet, qui est lié à la vitesse relative de l'objet par la loi de même nom. Cette méthode ne sera pas traitée ici.

2 Parallaxe

2.1 Principe

Le principe de la parallaxe est simple : nous tournons autour du Soleil en une période connue, à une distance connue. Selon un repère héliocentrique, et dans les périodes de mesure, l'objet est considéré fixe. Comme décrit Fig. 1, on mesure l'angle ϖ entre l'objet et la tangente à l'orbite, et connaissant le rayon de cette orbite, on en détermine par trigonométrie la distance qui nous sépare de l'objet. Bien entendu, des complications arrivent bien vite : il a été prouvé que cette méthode a une sensibilité critique aux erreurs de mesure.

L'unité de mesure de la parallaxe notée ϖ est la milliseconde d'arc (*mas*), soit un millièème d'une seconde d'arc, elle même $\frac{1}{3600}^\circ$, soit $1\text{ mas} = 3.6 \times 10^{-6}^\circ$. Cette unité, très petite, justifie à elle seule l'utilisation de l'approximation des angles petits, Éq. (1). On rappelle qu'un angle de un degré approximé ainsi est déjà négligeable.

$$\tan(\varpi) = \frac{r}{d} \approx \varpi \iff \boxed{d = \frac{r}{\varpi}} \quad (1)$$

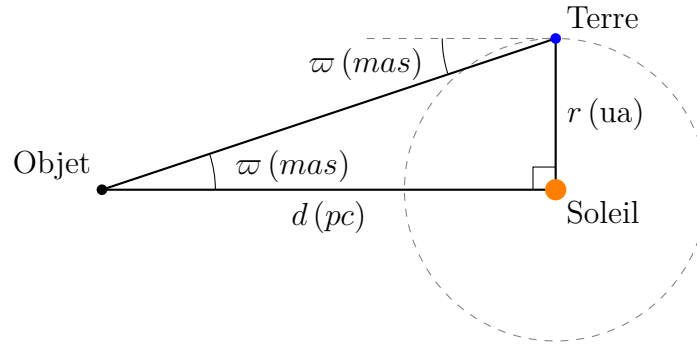


FIGURE 1 – Schéma de principe de la parallaxe (pas à l'échelle).

2.2 Application

Aujourd'hui, la meilleure source de données pour la parallaxe provient du satellite Gaia. Pour des raisons pratiques nous nous baserons sur la seconde publication de données (Lindgren, L. et al., 2018), et sur l'échantillon trouvable [sur le site kaggle](#).

Il est positionné sur le point de Lagrange L2 selon European Space Agency (2026), et parcourt donc une orbite de rayon $r = 1.01$ ua, une unité astronomique étant égale à la distance moyenne terre-soleil. Comme annoncé par Lindgren, L. et al. (2018, Section 3.1), les données sont prétraitées : la parallaxe est ramenée pour un calcul avec $r = 1$ ua. Par convention (Observatoire de Paris, 2026), le résultat est en parsec si ϖ est en arcsecondes.

Pour la gestion de l'erreur, estimons l'incertitude sur la distance σ_d . L'incertitude sur la mesure σ_ϖ nous est fournie, et le calcul est de type $d = \frac{cte}{\varpi}$. Ainsi,

$$\frac{\sigma_\varpi}{\varpi} = \left| \frac{\sigma_d}{d} \right| \Rightarrow \sigma_d = d \left| \frac{\sigma_\varpi}{\varpi} \right| \quad (2)$$

car

$$d \varpi = cte \Leftrightarrow d(d \varpi) = 0 \Leftrightarrow d d \varpi = -\varpi dd$$

2.3 Programme

On peut alors implémenter ce calcul à l'aide d'un code Python :

```

1 # Traitements preliminaires
2 input=open("filepath.csv",'r')
3 output=open("dirpath/parallax_results.txt",'w')
4
5 title=input.readline()
6 title=title.strip('\n')
7 titles=title.split(',')
8
```

```

9  output.write("source_id\tparallax_
    (mas)\tparallax_error(mas)\tdistance(pc)\tdistance_error_
    (pc)\n")
10
11  # Automatisation
12  i=0 # compte les echecs
13  n=100 # nombre de lignes a lire, arbitraire
14
15  for _ in range(n):
16      l=input.readline()
17      id,par,perr,*_=l.split(',')
18
19      par=float(par)+0.029 # erreur zero-point (-biais,
    biais=-0.029)
20      f=abs(float(perr)/par) # calcul de la qualite
21      dist=1/(par*1e-3)
22
23      if f<0.2 and dist>0:
24          derr=dist*f # propagation de l'erreur
25
26      output.write(f"{id}\t{par}\t{perr}\t{dist}\t{derr}\n")
27      else:
28          i+=1
29
30  output.close()
31  input.close()
32  print(f"Done. {i} errors over {n}: Success rate
    {1-i/n:.2f}")

```

Luri, X. et al. (2018, Section 3.2) confirme Éq. (1) si la parallaxe est positive, donc a un sens physique, et si l'erreur relative $f = \frac{\sigma_{\varpi}}{\varpi}$ est inférieure à 20% (Astraatmadja and Bailer-Jones, 2016). Ces limites physiques nous limitent donc à des distances de l'ordre grandeur de la voie lactée.

On a aussi appliqué la correction de -0.029 mas à la parallaxe (zero-point) due au fonctionnement de Gaia (Luri, X. et al., 2018, Fig. 1).

3 Chandelles standard

Si nous souhaitons explorer plus loin, vers d'autres galaxies, nous devons construire une nouvelle marche à notre échelle.

Certains objets ont des propriétés physiques directement liées à leur luminosité absolue $M(mag)$, que l'on peut ensuite comparer avec la luminosité apparente $m(mag)$ pour obtenir directement la distance $d(pc)$ qui nous sépare de l'objet à l'aide de l'équation du

module de distance noté μ Éq. (4).

Il en existe de différents types mais nous étudierons seulement les céphéides.

3.1 Céphéides

Henrietta Leavitt a découvert que certaines étoiles qui pulsent appelées céphéides possèdent une relation de proportionnalité entre leur période P de pulsation en jours et leur luminosité absolue M (Leavitt, 1908). Ainsi, si l'on parvient à déterminer les coefficients de cette relation, nous pouvons déterminer la distance qui nous sépare de toute céphéide à l'aide de ce que l'on appelle la Loi de Leavitt :

$$M \propto \log_{10}(P) \quad (3)$$

3.1.1 Théorie

La magnitude est une unité définie visuellement avant de l'être formellement. C'est pourquoi sa définition peut sembler particulière, bien que ce soit l'unité de référence en astronomie, sans dimension (Thierry, 2025, Chapitre 4.1). On en distingue 2 :

La magnitude absolue M se mesure à une distance de $10 pc$ de l'astre, de luminosité L (W), et de constante de calibration k :

$$M = -2.5 \log_{10}\left(\frac{L}{4\pi(10 pc)^2 L_{Soleil}}\right) + k$$

On note que plus un astre est lumineux, plus M est négatif.

La magnitude apparente m représente la magnitude mesurée à une distance donnée, liée à la magnitude absolue par le module de distance μ :

$$\mu = m - M = 5 \log_{10}(d) - 5 \iff d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} \quad (4)$$

Le plus grand biais de cette méthode est l'extinction interstellaire : l'espace est rempli de poussières qui absorbent la lumière et la filtrent, comme le ferait une atmosphère. Pour pallier ce problème, on utilise l'indice de Wesenheit (Madore, 1982).

3.1.2 Calibration

Pour cette étape nous nous basons sur Breuval, Louise et al. (2020) pour la théorie, qui calibre spécifiquement pour Gaia. En effet, de nombreux problèmes se posent :

Premièrement, les étoiles suffisamment proches pour utiliser la parallaxe, et pour lesquelles la mesure est suffisamment fiable sont peu nombreuses.

Ensuite, la nature variable de la luminosité des céphéides tant utile pour cette méthode et leur luminosité moyenne très élevée corrompent la mesure de la parallaxe : des étoiles proches de ces céphéides doivent être utilisées comme mesure intermédiaire.

Enfin, nous l'avons vu, le calcul direct de la parallaxe $d \propto \frac{1}{\varpi}$ devient biaisé lorsque l'erreur relative est supérieure à 20%. Breuval, Louise et al. (2020) utilisent l'Astrometric

Based Luminosity (ABL), outil qui joint l'équation de la parallaxe Éq. (1) au module de distance Éq. (4) :

$$ABL = 10^{0.2M} = \varpi 10^{0.2m-2} \quad (5)$$

Cependant, le satellite Gaia n'est pas conçu pour les distances les plus lointaines, il faudrait, en théorie, paier ces données avec d'autres télescopes possédant les filtres proposés par Breuval, Louise et al. (2020, Tableau 7). Comme nous avons seulement pu récupérer des données venant de Gaia (Ripepi et al., 2019), nous choisissons d'utiliser la calibration de Ripepi, V. et al. (2019, Équation 2). Ainsi, la fonction de Wesenheit devient, avec G, G_{BP}, G_{RP} les magnitudes de la bande de Gaia :

$$W(G, G_{BP}, G_{RP}) = m = G - 1.90(G_{BP} - G_{RP}) \quad (6)$$

On lit ensuite les constantes a et b dans Ripepi, V. et al. (2019, Tableau 3) : section *Selected* avec la méthode PW_A correspondant à l'ABL, et pour les céphéides pures (DCEP_F). On lit par ailleurs un $\sigma_{ABL} = 0.011$ le plus bas du tableau, ce qui conforte ce choix comme fiable, l'erreur étant faible. Ainsi,

$$\begin{cases} a = -2.837 \pm 0.081 \\ b = -3.183 \pm 0.097 \end{cases} \quad (7)$$

coefficients que l'on pourra injecter dans Éq. (3), comme confirmé par Ripepi, V. et al. (2019, Équation 7). Finalement,

$$W_A = M = -2.837 - 3.183 \log_{10}(P) \quad (8)$$

Nous pouvons donc obtenir la distance de toute céphéide à partir de sa période en injectant Éq. (8) et Éq. (6) dans Éq. (4).

$$\log_{10}(d) = \frac{G - 1.90(G_{BP} - G_{RP}) + 2.837 + 3.183 \log_{10}(P) + 5}{5} \quad (9)$$

3.2 Erreur

On rappelle que si $f(x) = a^{u(x)}$, $f'(x) = u'(x)a^{u(x)} \ln(a)$. On identifie pour Éq. (4) :

$$\frac{dd}{dM} = -0.2 \cdot 10^{0.2(m-M+5)} \cdot \ln(10) = -0.2d \ln(10) \iff \boxed{\sigma_d = 0.2 \ln(10) d \sigma_M} \quad (10)$$

Nous pouvons donc intégrer cela dans notre code (*rappel : une incertitude est positive*).

3.3 Programme

```

1 from numpy import log10, log
2
3 n=2000
4 count=0
5
6 input=open("/filepath/cepheid_source.tsv",'r')
7 output=open("/filepath/results.txt",'w')
8
9 for _ in range(52): # la 53e est les premieres donnees
10     input.readline()
11
12 output.write("source_id\tdistance_parallax(pc)\t"
13             f"distance_error_parallax_(pc)\tdistance_cepheid"
14             f"\tdistance_error_cepheid\n")
15
16 for _ in range(n):
17     line=input.readline().replace('_', '').strip().split(';')
18     if line[16]=='DCEP_F':
19         count+=1 # ouverture
20         id=line[0]
21         period,G,Gbp,Grp,parallax,errparallax=line[6:12]
22
23         # Paralaxe
24         parallax=float(parallax)+0.046 # celle adaptee
25         selon ripepi p.4
26         f=abs(float(errparallax)/parallax)
27         pardist=1/(parallax*1e-3)
28         if f<0.2 and pardist>0:
29             parderr=str(pardist*f)
30             pardist=str(pardist)
31         else:
32             pardist='NULL'
33             parderr='NULL'
34
35         # Cepheide
36
37         M=-2.837-3.183*log10(float(period))
38         m=float(G)-1.9*(float(Gbp)-float(Grp))
39
40         cepdist=10**((m-M+5)/5)
41         ceperr=0.2*log(10)*cepdist*0.011
42
43     output.write(f"{id}\t{pardist}\t{parderr}\t")

```

```

43         "{cepdist}\t{ceperr}\n")
44
45 input.close()
46 output.close()
47 print(count)

```

Voici un extrait des résultats (les identifiants ont été coupés par manque de place, unités en parsec) :¹

distance_parallax	distance_error_parallax	distance_cepheid	distance_error_cepheid
NULL	NULL	18554.082960091277	93.98918064377824
NULL	NULL	96055.50508287118	486.58714302843254
184.100418410042	595.227674585529	4390.383125588219	22.240307622526483
NULL	NULL	12006.970380521305	60.82355622246069
NULL	NULL	21795.289802873747	110.40812067468092
NULL	NULL	12771.880331860457	64.69835077562063
NULL	NULL	15106.000881610327	76.52227537845188
6410.25641025641	1109.4674556213017	19490.889364984214	98.73474886221945
NULL	NULL	67362.68047790062	341.23826856357704
NULL	NULL	92739.6792324371	469.7902064452502
NULL	NULL	68812.25283361568	348.5813486980457
NULL	NULL	19387.3103237186	98.21004983821685
NULL	NULL	8432.666957387784	42.717253106582056
3663.0036630036625	362.2750875498128	4851.386681322993	24.5756074360812
581.3953488372093	30.083829096809087	642.2456263507611	3.2534154516069504
NULL	NULL	15822.96681968548	80.15420055708383
NULL	NULL	10766.319485708187	54.53880685924659
NULL	NULL	93392.53633125017	473.0973762971313
5882.352941176471	899.6539792387545	15869.261676120377	80.38871581896427
1251.5644555694619	151.9421178851537	15241.151626167277	77.20690677584442

On remarque une grande différence entre la méthode de la parallaxe et celle des céphéides. Comme mentionné plus tôt, inverser une mesure bruitée est très dangereux. C'est pourquoi les astrophysiciens utilisent aujourd'hui l'ABL pour calibrer d'autres méthodes. Aussi, on remarque l'avantage des Céphéides : bien que toute étoile n'est pas mesurable ainsi, cela permet de mesurer bien plus loin, et plus fiablement (peu de céphéides purent avoir un calcul de parallaxe).

D'autant plus que, on le rappelle, la mesure de la parallaxe n'est pas fiable pour un objet à la luminosité variable.

4 Conclusion

Nous avons pu appliquer 2 des méthodes fondamentales de mesure de distance stellaire et remarqué que, dans ce domaine, peu de concessions peuvent être faites. Une des

1. Les résultats ainsi que l'ensemble des supports de recherche sont trouvables <https://github.com/Alpha13e/PPR>.

principales difficultés est l'impossibilité de réelement vérifier nos résultats. De plus, la nature astronomique des données provoque quasi-systématiquement des marges d'erreur toutes aussi grandes. La méthode des céphéides permet donc de les réduire.

Ce domaine est vaste et nous n'avons pas pu étudier les autres éléments de l'échelle de distance stellaire comme les autres céphéides, ou encore l'effet Doppler. Nous avons pu cependant étudier les difficultés qui lui sont propres et appliquer deux méthodes fondamentales, l'une ancienne et limitée en portée et l'autre récente et plus complexe.

Remerciements

This work has made use of data from the European Space Agency (ESA) mission *Gaia* (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), processed by the *Gaia* Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Funding for the DPAC has been provided by national institutions, in particular the institutions participating in the *Gaia* Multilateral Agreement.

This research has made use of the VizieR catalogue access tool, CDS, Strasbourg, France (DOI : 10.26093/cds/vizier). The original description of the VizieR service was published in 2000, A&AS 143, 23

Bien que nous n'ayons pas utilisé son contenu, [Freedman and Madore \(2010\)](#) fut très utile pour appréhender les différentes méthodes vues ici.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement mon tuteur Antoine Roueff pour son aide précieuse.

Références

- Astraatmadja, T. L. and Bailer-Jones, C. A. L. (2016). Estimating Distances from Parallaxes. II. Performance of Bayesian Distance Estimators on a Gaia-like Catalogue. *The Astrophysical Journal*, 832(2) :137.
- Breuval, Louise, Kervella, Pierre, Anderson, Richard I., Riess, Adam G., Arenou, Frédéric, Trahin, Boris, Mérand, Antoine, Gallenne, Alexandre, Gieren, Wolfgang, Storm, Jesper, Bono, Giuseppe, Pietrzyński, Grzegorz, Nardetto, Nicolas, Javanmardi, Behnam, and Hocdé, Vincent (2020). The milky way cepheid leavitt law based on gaia dr2 parallaxes of companion stars and host open cluster populations. *A&A*, 643 :A115.
- European Space Agency (2026). Scanning law. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/scanning-law>. Consulté le 4 juin 2026.
- Freedman, W. and Madore, B. (2010). The hubble constant. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 48.
- Leavitt, H. S. (1908). 1777 variables in the Magellanic Clouds. *Annals of Harvard College Observatory*, 60 :87–108.3.

- Lindgren, L., Hernández, J., Bombrun, A., Klioner, S., Bastian, U., Ramos-Lerate, M., de Torres, A., Steidelmüller, H., Stephenson, C., Hobbs, D., Lammers, U., Biermann, M., Geyer, R., Hilger, T., Michalik, D., Stampa, U., McMillan, P.J., Castañeda, J., Clotet, M., Comoretto, G., Davidson, M., Fabricius, C., Gracia, G., Hambly, N.C., Hutton, A., Mora, A., Portell, J., van Leeuwen, F., Abbas, U., Abreu, A., Altmann, M., Andrei, A., Anglada, E., Balaguer-Núñez, L., Barache, C., Becciani, U., Bertone, S., Bianchi, L., Bouquillon, S., Bourda, G., Brüsemeister, T., Bucciarelli, B., Busonero, D., Buzzì, R., Cancelliere, R., Carlucci, T., Charlot, P., Cheek, N., Crosta, M., Crowley, C., de Bruijne, J., de Felice, F., Drimmel, R., Esquej, P., Fienga, A., Fraile, E., Gai, M., Garralda, N., González-Vidal, J.J., Guerra, R., Hauser, M., Hofmann, W., Holl, B., Jordan, S., Lattanzi, M.G., Lenhardt, H., Liao, S., Licata, E., Lister, T., Löffler, W., Marchant, J., Martin-Fleitas, J.-M., Messineo, R., Mignard, F., Morbidelli, R., Poggio, E., Riva, A., Rowell, N., Salguero, E., Sarasso, M., Sciacca, E., Siddiqui, H., Smart, R.L., Spagna, A., Steele, I., Taris, F., Torra, J., van Elteren, A., van Reeven, W., and Vecchiato, A. (2018). Gaia data release 2 - the astrometric solution. *A&A*, 616 :A2.
- Luri, X., Brown, A. G. A., Sarro, L. M., Arenou, F., Bailer-Jones, C. A. L., Castro-Ginard, A., de Bruijne, J., Prusti, T., Babusiaux, C., and Delgado, H. E. (2018). Gaia data release 2 - using gaia parallaxes. *A&A*, 616 :A9.
- Madore, B. F. (1982). The period-luminosity relation. IV. Intrinsic relations and reddening for the Large Magellanic Cloud Cepheids. *Astrophysical Journal*, 253 :575–579.
- Observatoire de Paris (2026). The new definition of the astronomical unit : exactly 149 597 870 700 m. <https://observatoiredeparis.psl.eu/the-new-definition-of-the-astronomical-unit.html#nb3>. Consulté le 7 juin 2026.
- Ripepi, V., Molinaro, R., Musella, I., Marconi, M., Leccia, S., and Eyer, L. (2019). Reclassification of cepheids in the gaia dr2. Centre de Données astronomiques de Strasbourg (CDS). <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/cat/J/A+A/625/A14>.
- Ripepi, V., Molinaro, R., Musella, I., Marconi, M., Leccia, S., and Eyer, L. (2019). Reclassification of cepheids in the gaia data release 2 - period-luminosity and period-wesenheit relations in the gaia passbands. *A&A*, 625 :A14.
- Thierry, A. (2025). *Physique et astrophysique*. Leçons de physique. Editions Cépaduès.