

Etude de différentes méthodes de mesure de distance stellaire

Quentin Buet, SI Antoine Roueff

Université de Toulon

IM2NP

23 juin 2026



Plan

- 1 Parallaxe
 - Principe
 - Application
 - Programme
- 2 Chandelles standard
 - Principe
 - Théorie
 - Calibration
 - Programme
- 3 Conclusion



Introduction

Les distances stellaires étant sans commune mesure avec celles terrestres, nous devons inventer de nouvelles méthodes de mesure :

La Parallaxe calcule la distance d'un objet par trigonométrie en mesurant son angle d'observation.

Les chandelles standard sont des objets dont une propriété particulière permet de déterminer sa luminosité réelle, et donc sa distance.

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

La Parallaxe

Principe

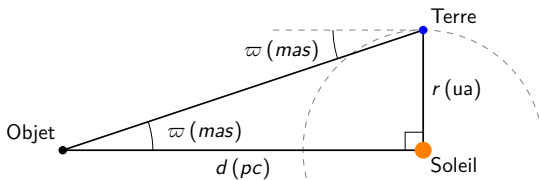


Figure – Schéma de principe de la parallaxe (pas à l'échelle).

$$1 \text{ mas} = \frac{10^{-3}^{\circ}}{3600} = 3.6 \cdot 10^{-6}^{\circ}$$

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

La Parallaxe

Application

Source :



Le satellite est positionné sur le point L2, mais les calculs sont ramenés pour $r = 1 \text{ ua}$.

La définition du parsec étant fonction de l'arcseconde, $[d] = pc$.

Erreur :

On a un calcul de type $d = \frac{cte}{\varpi}$ avec σ_d l'incertitude sur la distance et celle sur la mesure σ_{ϖ} fournie :

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

$$\frac{\sigma_{\varpi}}{\varpi} = \left| \frac{\sigma_d}{d} \right| \Rightarrow \sigma_d = d \left| \frac{\sigma_{\varpi}}{\varpi} \right|$$

Cependant, selon Luri, X. et al. (2018, Section 3.2), deux conditions supplémentaires s'imposent :

$$f = \frac{\sigma_{\varpi}}{\varpi} < 20\%$$

$$\varpi > 0$$

Note : On applique aussi la correction de -0.029 mas due aux mesures de Gaia.

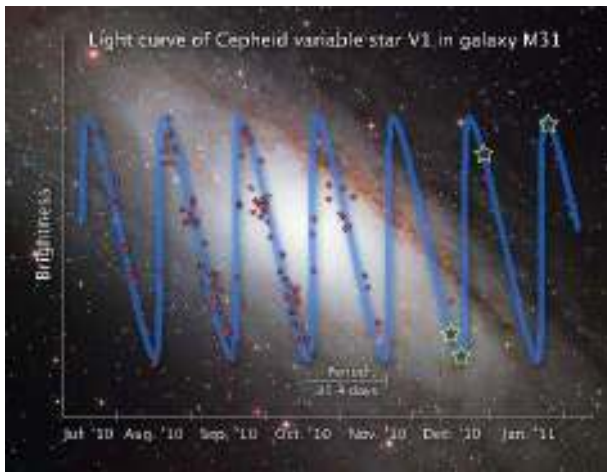
La Parallaxe

Programme

```
1 # Importation des fichiers (coupee)
2 output.write("source_id\tparallax_
    (mas)\tparallax_error(mas)\tdistance(pc)\tdistance_error_
    (pc)\n")
3 # Automatisation
4 i=0 # compte les echecs
5 n=100 # nombre de lignes a lire, arbitraire
6
7 for _ in range(n):
8     l=input.readline()
9     id,par,perr,*_=l.split(',')
10
11     par=float(par)+0.029 # erreur zero-point (-biais, biais=-0.029)
12     f=abs(float(perr)/par) # calcul de la qualite
13     dist=1/(par*1e-3)
14
15     if f<0.2 and dist>0:
16         derr=dist*f # propagation de l'erreur
17         output.write(f"{id}\t{par}\t{perr}\t{dist}\t{derr}\n")
18     else:
19         i+=1
20
21 output.close()
22 input.close()
23 print(f"Done. {i} errors over {n}: Success rate {1-i/n:.2f}")
```

Chandelles standard : les Céphéides

Principe



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

Loi de Leavitt

Chandelles standard : les Céphéides

Théorie

La magnitude, unité de luminosité sans dimension :

La magnitude absolue

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

La magnitude apparente

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

Magnitude mesurée à une distance d , liée à M par le **module de distance**.

Cependant, des poussières absorbent les rayonnements, c'est **l'extinction interstellaire**. Pour pallier ce problème on utilise l'indice de Wesenheit.

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

Chandelles standard : les Céphéides

Calibration

J'ai dû déléguer la calibration, utiliser celle de chercheurs car :

- Peu de céphéides sont suffisamment proches pour utiliser la parallaxe et fiables.
- Elles sont brillantes et de luminosité variable : on doit trouver un proxy.
- Les problèmes de la parallaxe s'appliquent toujours : on doit utiliser l'Astrometric Based Luminosity (ABL) :

$$ABL = 10^{0.2M} = \varpi 10^{0.2m-2}$$

On a utilisé la théorie de Breuval, Louise et al. (2020), mais la calibration est liée à nos données Ripepi, V. et al. (2019), obtenues via la plateforme VizieR (*Université de Strasbourg*).

Chandelles standard : les Céphéides

Calibration

La fonction de Wesenheit adaptée aux capteurs de Gaia devient :

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

On lit le tableau 3 : Nous employons la méthode de l'ABL (PW_A) appliquée aux céphéides classiques (DCEP_F) Alors, $\sigma_{ABL} = 0.011$. On obtient la loi de Leavitt :

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

On mêle les 3 équations :

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

Chandelles standard : les Céphéides I

Programme

```
1 from numpy import log10, log
2
3 n=2000
4 count=0
5 for _ in range(52): # la 53e est les premieres donnees
6     input.readline()
7
8 output.write("source_id\tdistance_parallax(pc)\t"
9             f"distance_error_parallax_(pc)\tdistance_cepheid"
10            f"\tdistance_error_cepheid\n")
11
12 for _ in range(n):
13     line=input.readline().replace('_', '').strip().split(';')
14     if line[16]=='DCEP_F':
15         count+=1 # ouverture
16         id=line[0]
17         period,G,Gbp,Grp,parallax,errparallax=line[6:12]
18
19         # Paralaxe
20         parallax=float(parallax)+0.046 # celle adaptee selon ripepi
21         p.4
22         f=abs(float(errparallax)/parallax)
23         pardist=1/(parallax*1e-3)
24         if f<0.2 and pardist>0:
25             parderr=str(pardist*f)
```

Chandelles standard : les Céphéides II

Programme

```
25         pardist=str(pardist)
26     else:
27         pardist='NULL'
28         parderr='NULL'
29
30     # Cepheide
31
32     M=-2.837-3.183*log10(float(period))
33     m=float(G)-1.9*(float(Gbp)-float(Grp))
34
35     cepdist=10**((m-M+5)/5)
36     ceperr=0.2*log(10)*cepdist*0.011
37
38     output.write(f"{id}\t{pardist}\t{parderr}\t"
39                 f"{cepdist}\t{ceperr}\n")
40
41 input.close()
42 output.close()
43 print(count)
```

Chandelles standard : les Céphéides

Résultat

d parallaxe	σ_d parallaxe	d cépheide	σ_d cépheide
NULL	NULL	18554	93
NULL	NULL	96055	486
184	595	4390	22
NULL	NULL	12006	60
NULL	NULL	15106	76
6410	1109	19490	98
NULL	NULL	67362	341
NULL	NULL	8432	42
3663	362	4851	24
581	30	642	3
NULL	NULL	15822	80
NULL	NULL	10766	54
NULL	NULL	93392	473
5882	899	15869	80
1251	151	15241	77

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

Conclusion



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.

Bibliographie I

- 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.

Bibliographie II

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., Buzzi, 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 Reeve, W., and Vecchiato, A. (2018). Gaia data release 2 - the astrometric solution. *A&A*, 616 :A2.

Bibliographie III

- 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 reddenings for the Large Magellanic Cloud Cepheids. *Astrophysical Journal*, 253 :575–579.
- Ngeow, C.-C. (2012). On the application of wesenheit function in deriving distance to galactic cepheids. *The Astrophysical Journal*, 747(1) :50.
- 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>.

Bibliographie IV

- Ripepi, V., Molinaro, R., Musella, I., Marconi, M., Leccia, S., and Eyser, 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.