

Le soleil est-il une étoile ordinaire ?

Etude de l'environnement stellaire local

Festival d'astronomie de Fleurance

Août 2005

Résumé

Le soleil est-il une étoile ordinaire ? Nous allons tenter de répondre à cette question en comparant les propriétés du soleil à celles des étoiles de notre environnement local.

Par cette étude, nous aborderons à la fois quelques notions fondamentales en astronomie mais aussi les problèmes étroitement liés aux techniques observationnelles employées. En particulier, nous verrons l'impact sur les résultats obtenus de la complétude ou non du catalogue d'objets utilisé.

1 Comment comparer la brillance des étoiles ?

Notion de magnitude apparente

La quantité observationnelle la plus simple à mesurer est la luminosité d'une étoile. Elle est traditionnellement exprimée sous la forme d'une magnitude apparente m , dont quelques exemples sont indiqués dans le tableau 1, définie par

$$m = -2,5 \log(F/F_0) = -2,5 \log(F) + \text{cst} \quad (1)$$

où F est le flux de l'étoile étudiée et F_0 le flux d'une étoile de référence de magnitude nulle. Il faut noter que selon la définition de la magnitude, plus un objet paraît faible, plus sa magnitude est élevée.

	m
Lune	-12,7
Véga	0
Antarès	1
Etoile polaire	2
Limite à l'œil nu	6
Limite aux jumelles	10

Tab. 1: Quelques magnitudes apparentes.

Le père de la notion de magnitude est Hipparque (deuxième siècle avant J-C). Il avait classé les étoiles les plus brillantes dans la catégorie des étoiles de première grandeur, répartissant les autres sur 5 échelons successifs, jusqu'aux étoiles de sixième grandeur, les plus faibles visibles à l'œil nu. L'œil étant un récepteur logarithmique, il est naturel que l'échelle choisie pour traduire la luminosité relative des étoiles soit logarithmique. Le facteur 2,5 a également été choisi afin de respecter la définition historique.

La figure 1 illustre le concept de magnitude sur une photo de l'étoile double du Bouvier.

Notion de magnitude absolue

La magnitude apparente ne permet pas de comparer les luminosités intrinsèques des étoiles, puisqu'elle ne tient compte que de la luminosité *perçue* par l'observateur et non de la luminosité *effectivement* émise. Si néanmoins la distance de l'étoile est connue, il est alors possible de calculer sa magnitude absolue M , définie comme la magnitude qu'elle aurait si sa distance était ramenée à 10 parsecs (1 parsec = 3×10^{16} m). Cette notion est à présent directement liée à la luminosité *intrinsèque* de l'étoile. Le tableau 2 donne à titre indicatif les magnitudes apparentes et absolues de quelques étoiles.



Fig. 1: Etoile double du Bouvier. L'étoile centrale a une magnitude apparente de 4,5, la seconde étoile une magnitude de 7,2 et les étoiles du fond une magnitude comprise entre 15 et 18. Crédit : CDS (Centre de données astronomiques de Strasbourg)

	m	M
Sirius	-1.5	1.4
Véga	0.0	0.5
Antarès	1.0	-4.8

Tab. 2: Quelques magnitudes apparentes et absolues.

Notons qu'une étoile de magnitude absolue donnée (donc de luminosité donnée) apparaît dans le ciel à une magnitude apparente d'autant plus grande (= moins lumineuse) qu'elle est plus éloignée.

Mesure de la distance

La distance des objets proches, comme les étoiles de notre voisinage local, par exemple, est déterminée à partir de la mesure de leur parallaxe. C'est une mesure par triangulation. L'astre est observé depuis deux positions différentes de la terre sur son orbite autour du soleil, et connaissant la base du triangle (distance entre les 2 positions), la différence entre les angles sous lequel est vue l'astre par rapport au zénith, donne une indication de sa distance d . La figure 2 illustre le principe de la mesure. La base $2R_T$ est un diamètre de l'orbite terrestre ($R_T = 150$ millions de kilomètres). La parallaxe $\theta = |\beta - \alpha|/2$ est définie comme la moitié de la différence des angles orientés sous laquelle est vue l'orbite terrestre depuis l'astre.

Dans l'approximation des petits angles (puisque la distance aux astres est bien

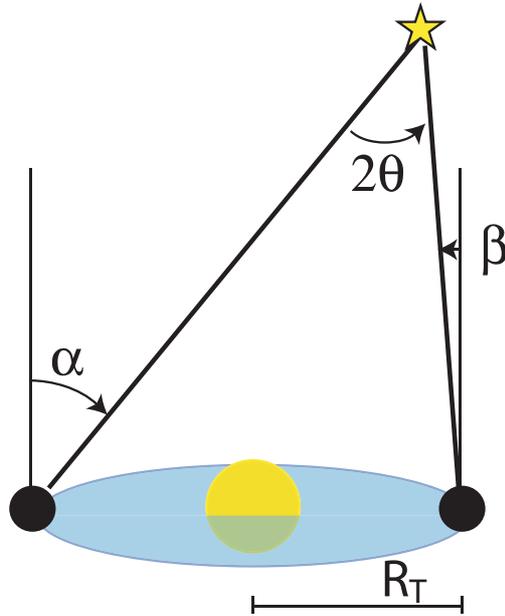


Fig. 2: Principe de la mesure par parallaxe annuelle.

supérieure au diamètre de l'orbite terrestre), on a

$$\tan(\theta) \sim \theta \sim \frac{R_T}{d} , \quad (2)$$

où θ est exprimé en radians. Si $|\beta - \alpha|$ vaut une seconde de degré ($1'' = \frac{1}{3600} \text{ deg} = \frac{1 \times \pi}{3600 \times 180} \text{ rad}$), la distance à l'astre est définie comme étant égale à 1 parsec. La conversion entre le parsec et le mètre s'obtient alors simplement :

$$1 \text{ pc} = \frac{R_T}{1''} = R_T \times \frac{3600 \times 180}{\pi} = 3 \times 10^{16} \text{ m} . \quad (3)$$

On a donc la relation suivante entre la parallaxe d'un astre et sa distance :

$$d = \frac{1 \text{ pc}}{\theta \text{ (arcsec)}} . \quad (4)$$

2 Le diagramme HR

A partir de la notion de magnitude absolue, il devient possible de classer les étoiles selon leur luminosité intrinsèque (soit selon l'énergie qu'elles émettent). Quelques regards au ciel nocturne permettent toutefois de se rendre compte que les étoiles présentent des couleurs différentes, et cette information supplémentaire permet d'affiner de façon significative notre classification.

Les étoiles ont un maximum d'intensité lumineuse qui varie avec la température de leur couche externe. Afin de quantifier la couleur d'une étoile, sa magnitude est

mesurée dans plusieurs domaines de longueurs d'onde, allant de l'UV à l'infrarouge. Les magnitudes monochromatiques correspondantes sont notées U (UV), B (Bleu), V (Visible – Vert), R (Rouge) et I (Infrarouge). L'indice de couleur X-Y est la différence des magnitudes monochromatiques X et Y. L'indice de couleur le plus fréquemment utilisé est $B - V$, différence des magnitudes de l'étoile en bleu et en visible. Les étoiles chaudes sont bleues et ont un indice de couleur négatif, alors que les étoiles plus froides sont rouges et ont un indice positif élevé.

A partir de la température (mesurée par la couleur) et de la luminosité intrinsèque (mesurée par la magnitude absolue) des étoiles, le diagramme Hertzsprung-Russell (en abrégé diagramme HR) montre comment s'organise la physique stellaire. La figure 3 illustre le diagramme HR des étoiles mesurées par le satellite Hipparcos.

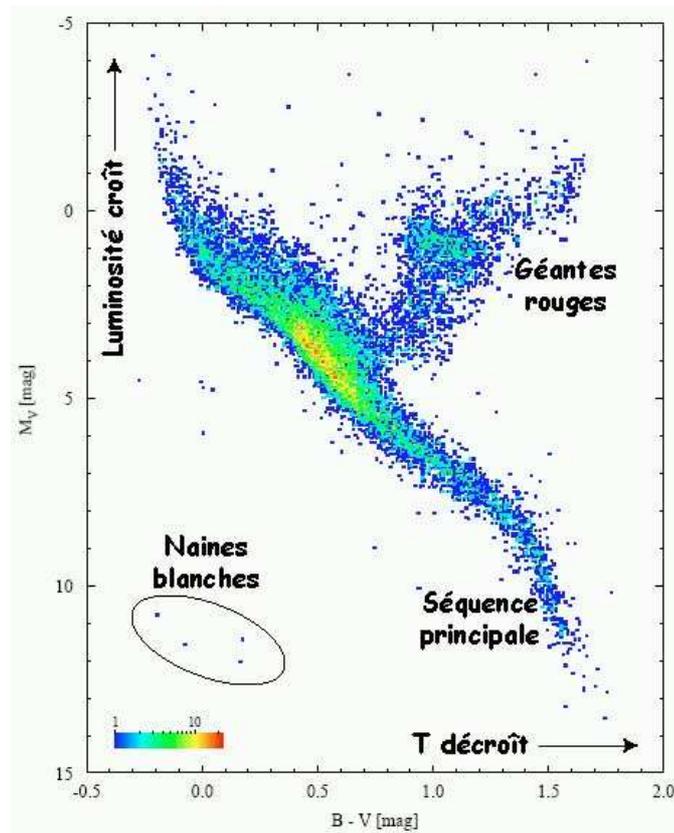


Fig. 3 : Étoiles observées par le satellite européen Hipparcos, reportées dans un diagramme HR. Crédit : ESA.

Noter, sur l'axe des ordonnées, que pour avoir les étoiles plus lumineuses dans la partie supérieure du diagramme HR, la magnitude est ordonnée par valeurs décroissantes.

Les étoiles se trouvent dans des régions bien déterminées de ce diagramme. La plupart sont regroupées dans une bande appelée séquence principale, correspondant aux étoiles jeunes et lumineuses en train de brûler leur hydrogène en hélium. Plus

l'étoile est massive, plus elle est chaude et lumineuse (en haut à gauche du diagramme), et plus elle est petite, plus elle se trouve au contraire dans la partie basse, sur la droite du diagramme. Après avoir brûlé son hydrogène, l'étoile finit par quitter la séquence principale en direction des géantes ou des supergéantes, son enveloppe se dilatant et refroidissant. En fin de vie, ayant consommé la plupart de leur combustible, les étoiles de faible masse évoluent vers des naines blanches, vieilles et froides, tandis que les plus grosses explosent (ce sont les supernovae dites de type II), dispersant leurs éléments dans l'espace interstellaire.

3 Procédure expérimentale

L'étude du voisinage stellaire local est menée à partir du catalogue « Third Catalogue of Nearby Stars » (CNS3 [1]), que l'on peut trouver sur le site des données astronomiques de Strasbourg (<http://cdsarc.u-strasbg.fr/cats/V/70A>). Le catalogue original contient 3803 étoiles. Un échantillon aléatoire de 50 étoiles sélectionnées parmi les 1000 plus proches est utilisé ici. Le tableau 4 indique pour chacune de ces étoiles les données disponibles, à savoir un numéro, son nom, sa magnitude apparente, sa couleur $B - V$ et sa parallaxe θ .

Détermination de la magnitude absolue

Compte tenu des équations et des définitions présentées ci-dessus, exprimer la magnitude absolue M_v en fonction de la distance d d'une étoile et de sa magnitude apparente m_v , puis en fonction de sa parallaxe θ et de sa magnitude apparente m_v . Pour chacune des étoiles de la table, calculer sa magnitude absolue (et éventuellement sa distance en parsec).

Connaissant la distance R_T entre la terre et le soleil, calculer également la distance du soleil en parsec et sa magnitude absolue.

Obtention du diagramme HR

Placer les étoiles dans un diagramme HR (opposé de la magnitude absolue M_v en fonction de la couleur $B - V$). Quelles sont les populations stellaires que l'on peut identifier ? Peut-on comprendre la prédominance de certaines populations sur d'autres (par comparaison avec le diagramme HR obtenu par Hipparcos, par exemple). Sachant que les étoiles sont d'autant plus lumineuses qu'elles sont massives, comment peut-on expliquer la surabondance des étoiles faibles de la séquence principale par rapport aux étoiles brillantes ? Où se positionne le soleil dans ce diagramme ?

Fonction de luminosité des étoiles de la séquence principale

Trouver un critère de sélection (limites en magnitude en fonction de la couleur) des étoiles de la séquence principale, et construire l'histogramme de fréquence des magnitudes absolues, c'est-à-dire l'histogramme du nombre d'étoiles de la séquence principale par unité de magnitude absolue. Quelle est la magnitude typique (valeur médiane) d'une étoile de la séquence principale ?

La luminosité L et la masse M des étoiles de la la séquence principale sont liées par la relation approximative

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^4, \quad (5)$$

où le symbole \odot représente les valeurs pour le soleil, ce qui implique la relation suivante entre la magnitude absolue M_v et la masse M :

$$M_v - M_{v,\odot} = -2,5 \times \log \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^4. \quad (6)$$

En déduire la masse typique d'une étoile de la séquence principale.

Comment se compare donc le soleil aux étoiles typiques de notre voisinage local (en luminosité et en masse) ?

Complétude du catalogue

L'étude est effectuée sur un échantillon volontairement limité en volume, c'est-à-dire limité aux étoiles les plus proches. Par contraste, le catalogue d'étoiles utilisé par Hipparcos est un catalogue limité en brillance : toutes les étoiles auxquelles l'instrument est sensible apparaissent dans le catalogue, donc la distance maximale de sensibilité varie en fonction de la luminosité des objets considérés. On s'attend par conséquent à des populations différentes dans les deux catalogues, comme on l'a vu par les diagrammes HR obtenus dans chaque cas.

La préoccupation de toute étude sur une population donnée est la complétude du catalogue utilisé, et les biais sur les résultats obtenus qui peuvent résulter d'une incomplétude. Dans le cas présent, il est logique de se demander si la luminosité type des étoiles de la séquence principale obtenue précédemment n'est pas sur-estimée. Cet effet surviendrait en effet naturellement si les étoiles les plus faibles avaient échappé à la détection par manque de sensibilité des instruments. Cet effet porte le nom de « biais de Malmquist » et constitue l'une des difficultés les plus fréquemment rencontrées en astronomie.

Un moyen simple de juger de la complétude du catalogue est de comparer les fonctions de luminosité à l'intérieur et à l'extérieur d'un rayon donné autour du soleil. Pour avoir une statistique suffisante, nous nous baserons cette fois sur le catalogue constitué par les 1000 étoiles les plus proches de notre soleil, que nous répartissons, selon leur distance, en deux lots de même volume : celles situées à moins de 12,8 pc du soleil (notées « proches »), et celles situées à des distances

entre 12,8 et 16,12 pc du soleil (notées « lointaines »). Les fonctions de luminosité (c'est-à-dire les comptages en fonction de la plage de magnitude) de chacun des lots sont indiquées dans le tableau 3.

Magnitude absolue	Nb d'étoiles « proches »	Nb d'étoiles « lointaines »
0 – 2	5	4
2 – 4	18	23
4 – 6	55	57
6 – 8	50	60
8 – 10	80	94
10 – 12	144	130
12 – 14	113	64
14 – 16	63	26
16 – 18	9	3
18 – 20	2	0

Tab. 3: Fonctions de luminosité des étoiles du voisinage solaire.

Comme précédemment, estimer la magnitude médiane de chacun des lots. Note-t-on déjà un léger biais ?

Calculer pour chaque gamme de magnitude le rapport entre les deux fonctions de luminosité. Quelle est la limite de complétude du catalogue que l'on peut en déduire, exprimée en magnitude absolue ?

Calculer les nombres p_1 et p_2 d'étoiles proches ayant une magnitude plus petite (donc plus lumineuses) et plus élevée (donc moins lumineuses) que la magnitude de complétude. Calculer de même les nombres l_1 et l_2 . En déduire une estimation du nombre d'étoiles faibles manquantes dans le lot des lointaines.

A Tableau des paramètres observationnels d'un jeu d'étoiles proches

Le tableau ci-dessous indique les paramètres nom, magnitude apparente, couleur et parallaxe pour un échantillon aléatoire de 50 étoiles parmi les 1000 étoiles les plus proches de notre soleil.

Numéro	Nom	Mag. apparente m_v	$B - V$	Parallaxe θ (arcsec)
0	Sun	-26.72	+0.65	
1	G1 447	11.12	+1.75	0.301
2	G1 251	10.01	+1.57	0.174
3	G1 784	7.97	+1.43	0.164
4	G1 555	11.31	+1.64	0.159
5	G1 223.2	14.45	+1.05	0.155
6	NN 3378	11.71	+1.60	0.132
7	G1 105	5.82	+0.98	0.129
8	G1 701	9.38	+1.52	0.126
9	G1 479	10.67	+1.54	0.121
10	GJ 2066	10.10	+1.53	0.114
11	G1 283	13.00	+0.24	0.112
12	NN 3306	13.77	+0.33	0.105
13	NN 3126	11.03	+1.54	0.100
14	G1 606	10.50	+1.51	0.098
15	G1 569	10.20	+1.48	0.096
16	NN 3801	11.97	+1.64	0.094
17	G1 624	4.91	+0.55	0.092
18	G1 545	12.9	+1.59	0.091
19	NN 3592	15.10	+0.68	0.090
20	G1 325	8.70	+1.39	0.088
21	G1 275.2	13.56	+1.71	0.086
22	G1 369	10.04	+1.48	0.085
23	G1 798	8.82	+1.31	0.082
24	G1 843	12.03	+1.59	0.080
25	G1 805	4.13	+0.43	0.077
26	G1 592	12.70	+1.58	0.076
27	G1 613	7.11	+0.85	0.075
28	G1 69	8.41	+1.22	0.075
29	G1 133	11.20	+1.56	0.074
30	G1 414	8.33	+1.34	0.073
31	G1 331	3.14	+0.19	0.071
32	G1 533	9.80	+1.40	0.071
33	G1 281	9.61	+1.44	0.070
34	G1 794	11.52	-0.07	0.069

35	NN 3997	10.36	+1.55	0.069
36	GJ 2128	11.49	+1.55	0.068
37	NN 3097	13.13	+1.68	0.067
38	NN 3965	14.82	+0.42	0.067
39	GJ 264.1	6.79	+0.80	0.066
40	GJ 907	12.07	+1.66	0.066
41	GJ 1204	13.80	+1.65	0.065
42	NN 3666	12.56	+1.60	0.064
43	GJ 123	9.09	+1.38	0.064
44	GJ 314	5.28	+0.73	0.063
45	NN 4262	12.14	+1.56	0.063
46	GJ 294	5.60	+0.57	0.063
47	GJ 1169	13.26	+1.65	0.063
48	NN 3366	14.54	+1.78	0.062
49	NN 3884	12.73	+1.49	0.062
50	NN 3223	16.12	+0.80	0.062

Tab. 4: Paramètres d'un échantillon aléatoire de 50 étoiles proches.

Références

- [1] W. Gliese et H. Jahreiss, 1991, Preliminary Version of the Third Catalog of Nearby Stars, Heidelberg : Astron. Rechen-Institut,