

À la recherche des reines de la nuit

Jean-Noël Terry

Résumé : *En 1998, j'ai lu dans Sky&Telescope, un article de Jocelyn Tomkin présentant des courbes qui donnaient l'éclat apparent, passé et futur, de quelques étoiles connues. J'avais voulu comprendre et simuler. Par paresse j'avais utilisé les moyens de calcul disponibles, en particulier le Fortran. Mais je pense que cette étude peut être reprise pour des lycéens... et au-delà. En plus de l'aspect scientifique, elle montre qu'il faut se méfier des apparences, et confirme que notre ciel nocturne n'a rien d'immuable. Par contre il faut accepter d'utiliser le tableur qui est disponible dans tout ordinateur. C'est donc un voyage sur quelques centaines de milliers d'années qui vous est proposé. Vous trouverez ci-dessous les nouvelles instructions pour les auteurs.*

Présupposés

Peu de choses sont demandées en mathématiques (relations dans le triangle, un peu de trigonométrie, la fonction log...); pour le reste les notions de magnitude et de parallaxe sont à connaître; l'usage du tableur, ou d'un logiciel permettant le tracé des courbes est indispensable.

Pour ne pas alourdir le texte pour ceux qui les connaissent, les notions utiles de magnitude et de parallaxe sont présentées sur le site : <http://www.ac-nice.fr/clea/lunap/> rubriques : Les fondements scientifiques (Éclat apparent : approfondissement) et L'univers observé (Les étoiles : les distances).

Le problème posé

Actuellement les 5 étoiles les plus brillantes du ciel nocturne sont Sirius, Canopus, Alpha Centauri, Arcturus et Vega. Mais en sera-t-il de même dans le futur, en était-il de même dans le passé ? Qui prendra la tête du classement ?

Précisons qu'il s'agit d'un voyage sur quelques centaines de milliers d'années, tout au plus quelques millions d'années, autrement dit rien par rapport à la durée de vie d'une étoile. Les variations d'éclat, sur ces durées, ne seront donc

dues qu'aux variations de distance et non à l'évolution stellaire. De même, sur cet intervalle de temps nous considérerons qu'il n'y a pas d'interaction gravitationnelle entre deux étoiles non doubles.

Que connaissons-nous, aujourd'hui, pour les étoiles qui nous intéressent ? La magnitude visuelle apparente de l'étoile, sa distance donnée par sa parallaxe, son mouvement apparent sur le fond du ciel (données du satellite Hipparcos) et sa vitesse radiale obtenue par l'étude de son spectre.

Avec un peu de réflexion, nous pouvons obtenir quelques éléments intéressants à partir de ces données. La *Figure 1* indique les notations choisies. Nous sommes en O , et observons aujourd'hui l'étoile en A . Elle sera « demain » en B , elle était hier en B' . La vitesse \vec{V} de l'étoile observée de la Terre O est supposée constante pendant la durée qui nous intéresse. Elle est décomposée en vitesse tangentielle (projetée sur la direction perpendiculaire à la ligne de visée) : \vec{V}_t et vitesse radiale (projetée sur la direction de la ligne de visée) : \vec{V}_r . \vec{V}_t est obtenue par le catalogue Hipparcos et \vec{V}_r est donnée par mesure spectrale.

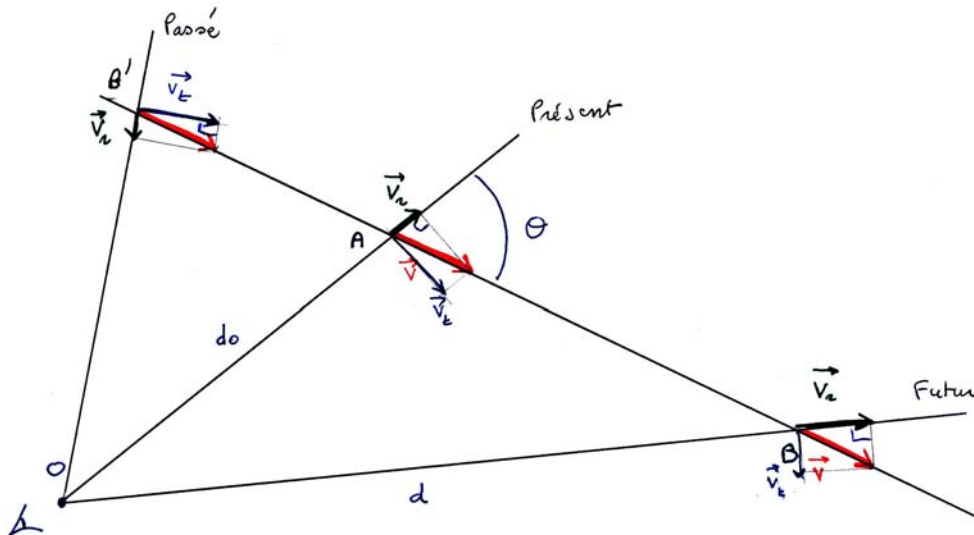


Figure 1 : Vitesse relative des étoiles par rapport à un observateur

Si nous notons m la magnitude visuelle apparente à la date qui nous intéresse et m_0 cette magnitude aujourd'hui ($t = 0$), alors nous avons :

$$m - m_0 = -2,5 \log \left(\frac{d_0}{d} \right)^2$$

Soit $m = m_0 + 2,5 \log \left(\frac{d}{d_0} \right)^2$

Il « ne reste plus » qu'à calculer $\left(\frac{d}{d_0} \right)^2$!

Une solution

Considérons le triangle OAB, nous avons :

$$d^2 = d_0^2 + AB^2 + 2d_0 AB \cos \theta$$

où $\theta = (\vec{OA}, \vec{AB})$

De plus $AB = V \cdot t$ où t est la durée séparant les observations O et B .

$$V^2 = V_t^2 + V_r^2$$

$$\tan \theta = \frac{V_t}{V_r} \quad \cos \theta = \frac{V_r}{V} \quad \sin \theta = \frac{V_t}{V}$$

et enfin $V_t = d_0 \tan \mu$ avec μ mouvement propre de l'étoile donné dans le catalogue Hipparcos en milliseconde d'arc par an.

Et dans le passé ?

t devient alors négatif, mais l'angle (\vec{OA}, \vec{AB}) est alors le supplémentaire de θ , la formule devient donc :

$$d^2 = d_0^2 + (V \cdot t)^2 + 2 \cdot d_0 \cdot (-V \cdot t) \cdot (-\cos \theta)$$

où $\theta = (\vec{OA}, \vec{AB})$

Ainsi, dans tous les cas nous pourrions écrire:

$$d^2 = d_0^2 + (V \cdot t)^2 + 2 \cdot d_0 \cdot (V \cdot t) \cdot (\cos \theta),$$

et enfin,

$$m = m_0 + 2,5 \log \left[1 + \left(\frac{V \cdot t}{d_0} \right)^2 + 2 \cos \theta \left(\frac{V \cdot t}{d_0} \right) \right]$$

Le problème des unités

Les calculs vont mêler petits et grands nombres et unités diverses !

Pour le temps nous choisissons l'année, ce qui permet d'écrire en notation scientifique les centaines de milliers d'années. Pour les angles en degré (mes premiers programmes en Fortran ajoutaient l'exigence du radian !). Les distances seront exprimées en kilomètres.

Ce qui conduit à établir des formules de conversion par rapport aux données des catalogues. Rien de difficile à établir, il faut juste éviter les étourderies. Ceci donne :

Pour d_0 , le catalogue Hipparcos donne la parallaxe π de l'étoile en milliseconde d'arc. On sait que la distance en parsec est l'inverse de la parallaxe exprimée en seconde d'arc, que :

$$1 \text{ parsec} = 3,08568 \cdot 10^5 \text{ km, d'où :}$$

$$d_0 = \frac{3,08568 \cdot 10^{16}}{\pi} \text{ km}$$

$$\mu \text{ (en } ^\circ \text{ par an)} = \frac{\mu_c}{3,6 \cdot 10^6}$$

où μ_c est lu dans le catalogue.

$V_r = 3,156 \cdot 10^7 v_r$, quand la vitesse radiale est donnée en km.s^{-1}

$$\cos \theta = \frac{V_r}{V} \text{ et (rappel) } V_r = d_0 \tan \mu$$

Nous sommes prêts à jouer avec le temps !

Les étoiles les plus brillantes aujourd'hui :

Le seront-elles demain, l'ont-elles toujours été ? Voici les données les concernant (HIP est le numéro de l'étoile dans le catalogue Hipparcos), j'ai pris les vitesses radiales dans le Sky Catalogue 2000 (volume 1 : Stars to Magnitude 8.0, 2^{nde} Edition):

| Nom | HIP | m_0 | π | μ_c | v_r |
|---------------------|-------|-------|--------|---------|-------|
| Sirius | 32349 | -1,44 | 379,21 | 1339,42 | -8 |
| Canopus | 30438 | -0,62 | 10,43 | 30,98 | 21 |
| α_1 Centauri | 71683 | -0,01 | 742,12 | 3709,62 | -24 |
| Arcturus | 69673 | -0,05 | 88,85 | 2278,87 | -5 |
| Vega | 91262 | 0,03 | 128,93 | 350,77 | -14 |
| Capella | 24608 | 0,08 | 77,29 | 433,75 | 30 |
| Rigel | 24436 | 0,12 | 4,22 | 1,95 | 21 |
| Procyon | 37279 | 0,4 | 285,93 | 1258,50 | -3 |
| Bételgeuse | 27989 | 0,50 | 7,63 | 29,41 | 21 |

Tableau 1 : magnitude apparente, parallaxe, ?? et vitesse radiale des étoiles les plus brillantes aujourd'hui

Le plus agréable est de faire tracer la courbe par un logiciel mathématique. Mais j'ai joué le jeu en me contentant d'un simple tableur, afin que ce soit utilisable par tous. Certes, la formule de la 1^{ère} cellule n'est pas très conviviale, du style, pour Sirius :

$$= -(-1.44 + 2.5 * \text{LOG10}(1 + 5.185 * 10^{(-11)} * (A1)^2 + 2 * 7.2 * 10^{(-6)} * (-0.4311) * (A1)))$$

Heureusement, on peut copier le contenu d'une cellule par simple glissement de curseur... à condition de ne pas relâcher la souris !

Sur la Figure 2 sont tracées les courbes pour les 5 étoiles actuellement les plus brillantes, pour un intervalle de -500000 ans à +500000 ans (pour le tracé un pas de 1000 ans est suffisant, mais on peut prendre moins, ce n'est qu'une question de taille de fichier). Noter qu'en ordonnée j'ai porté l'opposé des magnitudes : le maximum correspond donc bien à l'éclat apparent maximum.

Il est temps de récolter le fruit de notre travail. Ainsi :

- Sirius restera dominante en éclat apparent, avec un maximum vers 58000 ans jusque vers 230000, où Canopus prendra le relais.
- Arcturus est proche du maximum, et son éclat varie relativement rapidement (!)

L'éclat maximum

Le calcul de la dérivée en fonction du temps ne pose pas trop de problème. On trouve :

$$t = -\cos \theta \frac{d_0}{V}$$

Soit pour le tableau suivant, les dates, par rapport à « aujourd'hui », où l'éclat apparent est maximum :

| Sirius | Canopus | Alpha Centauri | Arcturus | Vega |
|--------|----------|----------------|----------|--------|
| 59870 | -3079718 | 27816 | 3708 | 293040 |

Tableau 2 : dates d'éclat apparent maximal des étoiles les plus brillantes de notre ciel

Et pour les étoiles les plus proches ?

Les cinq plus proches sont les suivantes (la sixième est Sirius) :

| Nom | HIP | m_0 | π | μ_c | v_r |
|-------------------|-------|-------|--------|---------|-------|
| Proxima Centauri | 70890 | 11,01 | 772,33 | 3852,99 | -16 |
| Alpha2 Centauri | 71681 | 1,35 | 742,12 | 3724,12 | -21 |
| Alpha1 Centauri | 71683 | -0,01 | 742,12 | 3709,62 | -24 |
| Etoile de Barnard | 87937 | 9,54 | 549,01 | 10357,7 | -108 |
| Lalande 21185 | 54035 | 7,49 | 392,40 | 4802,27 | -85 |

Tableau 3 : magnitude apparente, parallaxe, ? et vitesse radiale des étoiles actuellement les plus proches de nous

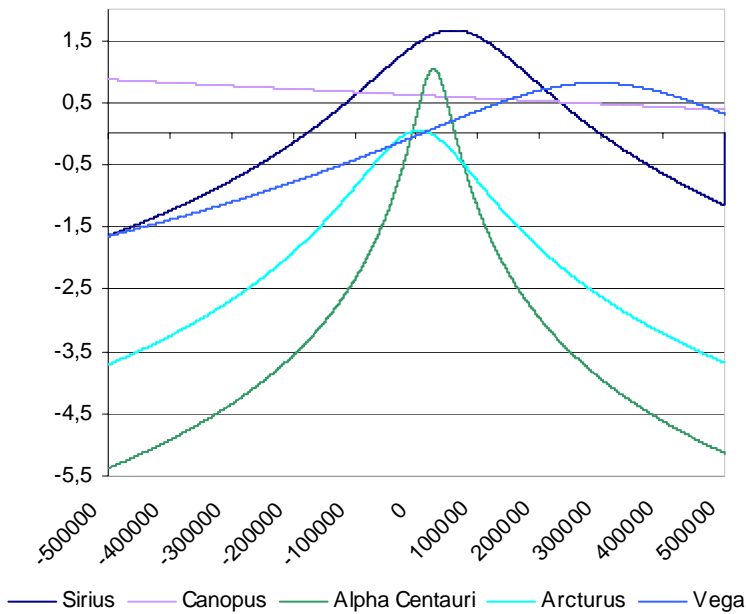
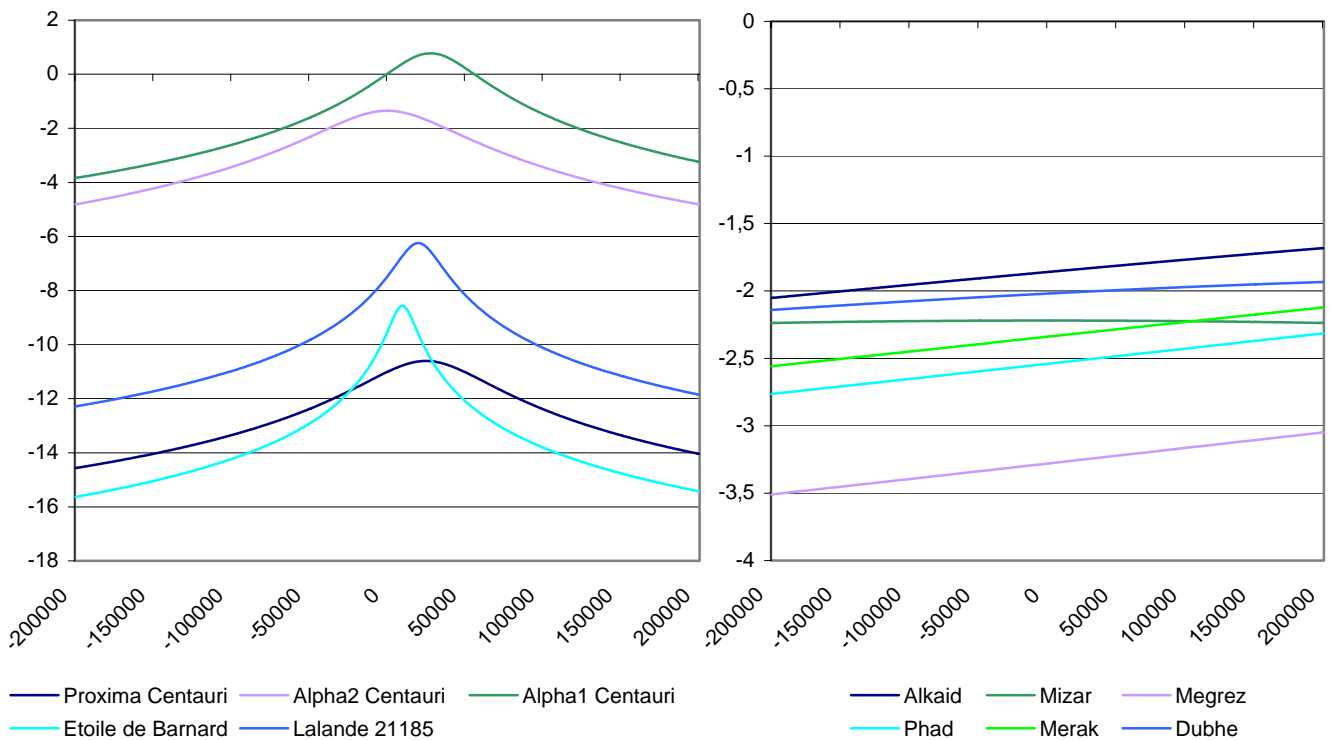


Figure 2 (ci-contre): opposé de la magnitude apparente des 5 étoiles actuellement les plus brillantes, sur un intervalle de -500000 ans à $+500000$ ans

Figure 3 (en bas à gauche): Évolution de l'opposé de la magnitude des étoiles les plus proches.

Figure 4 (ci-dessous): Évolution de l'opposé de la magnitude des étoiles de la constellation de la Grande Ourse.



(Les vitesses radiales de Proxima et Barnard viennent de l'ouvrage « Les étoiles » de Dominique Proust et Jacques Breysacher). La hiérarchie est inchangée sur 400000 ans pour les étoiles les plus proches, sauf pour l'étoile de Barnard qui est celle de plus grand mouvement propre. Vous pouvez chercher une justification (voir Figure 3).

Une remarque s'impose pour Alpha Centauri qui apparaît deux fois. Il s'agit en fait de 3 étoiles :

- Alpha1 (ou A) de classe G2 (HIP71683)
- Alpha2 (ou B) de classe K1 (HIP71681)
- Proxima Centauri (ou C) naine rouge (HIP70890)

Alpha 1 et 2 forment un système double, séparées de 11,2 à 35,6 UA, Proxima est plus éloignée de ce système, mais les trois semblent se déplacer ensemble.

La grande Ourse

On connaît l'apparence de la constellation la plus connue, il y a 100000 ans et dans 100000 ans (voir Figure 5) mais qu'en sera-t-il des éclats ? Voici le tableau de base :

| Nom | HIP | m_0 | π | μ_c | v_r |
|--------|-------|-------|-------|---------|-------|
| Alkaid | 67301 | 1,86 | 32,39 | 122,22 | -13 |
| Mizar | 65378 | 2,22 | 41,73 | 123,21 | -6 |
| Megrez | 59774 | 3,28 | 40,05 | 103,85 | -13 |
| Phad | 58001 | 2,54 | 38,99 | 103,34 | -13 |
| Merak | 53910 | 2,34 | 41,07 | 88,36 | -12 |
| Dubhe | 54061 | 2,02 | 26,38 | 140,94 | -9 |

Tableau 4 : magnitude apparente, parallaxe, ?? et vitesse radiale des étoiles de la Grande Ourse

Ce qui peut s'illustrer sur la Figure 4 de la façon suivante avec les magnitudes apparentes calculées :

| t | Alkaid | Mizar | Megrez | Phad | Merek | Dubhe |
|---------|--------|-------|--------|------|-------|-------|
| -100000 | 1,96 | 2,22 | 3,40 | 2,65 | 2,45 | 2,08 |
| 0 | 1,86 | 2,22 | 3,28 | 2,54 | 2,34 | 2,02 |
| +100000 | 1,77 | 2,22 | 3,16 | 2,43 | 2,23 | 1,97 |

Tableau 5 : Magnitudes apparentes des étoiles de la Grande Ourse à différents temps

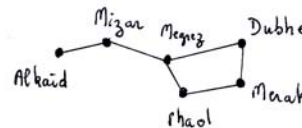
Rendez-vous dans 100000 ans pour vérifier... La Grande Ourse changera de forme, gagnera un peu en luminosité, seule Mizar restera de magnitude constante. Voici les distances actuelles de ces étoiles en année-lumière :

| Nom | Alkaid | Mizar | Megrez | Phad | Merak | Dubhe |
|----------------------|--------|-------|--------|------|-------|-------|
| Distance | 101 | 78 | 81 | 84 | 79 | 124 |
| Type | B3 | A2 | A2 | A0 | A0 | K0 |
| M_{absolue} | -0,6 | 0,3 | 1,3 | 0,4 | 0,4 | -1,1 |

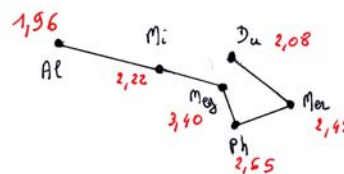
Les résultats obtenus se comprennent car ces étoiles sont loin, elles ont toutes une vitesse radiale négative (donc elles s'approchent de nous), plus faible pour Mizar et Dubhe. Remarquons qu'elles sont de classes spectrales voisines sauf Dubhe, super géante orange.

À vous de jouer...

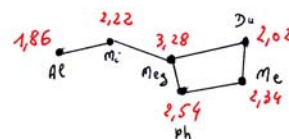
Il est possible de faire l'étude pour les étoiles de son choix, seules ou en groupes : étoiles ayant le plus grand mouvement propre, les plus brillantes en magnitude absolue, étoiles d'une même constellation... À vous de vous approprier le sujet au gré de votre curiosité... et de vos loisirs.



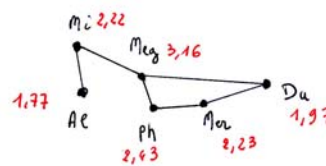
Aujourd'hui



Il y a 100 000 ans



Aujourd'hui



Dans 100 000 ans.

Figure 5 : évolution de l'aspect et des magnitudes des étoiles de la Grande Ourse. Les magnitudes apparentes sont notées en rouge.

Je remercie Marie-Agnès et Emmanuelle pour leur relecture et leurs questions pertinentes.