LES EXOS D'ASTRO DE L'ESA/ESO

Une série d'exercices d'astronomie
à partir d'images du télescope
spatial Hubble (NASA/ESA)
et des télescopes terrestres de l'ESO

Outils

Récapitulatif de notions astronomiques et mathématiques
nécessaires pour la bonne compréhension des exercices

Table des matières

Outils

Outils astronomiques

Outils mathématiques

A l'attention du professeur

Outils astronomiques

Les magnitudes : un concept qui remonte à 120 ans avant notre ère

Dans un ciel nocturne et clair, certaines étoiles nous apparaissent lumineuses et d'autres semblent beaucoup plus faibles. Celles que nous percevons difficilement peuvent en réalité être très brillantes, mais très éloignées. De la même façon, celles qui brillent beaucoup ne sont peut-être que des étoiles peu lumineuses mais très proches de la Terre. En tant qu'observateurs terrestres, la lumière que nous recevons est trompeuse. Si nous voulons déterminer les *propriétés intrinsèques* de l'étoile, par exemple sa taille et l'énergie lumineuse qu'elle émet, nous devons prendre en compte sa *distance* à la Terre.

Historiquement, les étoiles visibles à l'œil nu furent classées en 6 groupes de luminosité, appelés magnitudes. Le classement, inventé par l'astronome grec Hipparque en 120 avant l'ère chrétienne, tient toujours, certes sous une forme révisée. Hipparque donna aux étoiles les plus brillantes la magnitude 1, aux étoiles les plus faibles la magnitude 6.

L'astronomie a beaucoup évolué depuis les travaux d'Hipparque : l'œil n'est plus le détecteur idéal. La lumière est maintenant collectée par de grands miroirs, que ce soit dans les télescopes terrestres du VLT dans le désert d'Atacama au Chili, ou au sein d'Hubble, le télescope spatial. La lumière est ensuite analysée par des instruments des milliards de fois plus sensibles que l'oeil humain.

Toutefois, les astronomes utilisent toujours la notion originale de magnitude sous le terme *magnitude apparente*. La définition moderne fut choisie de telle sorte que les anciennes tables de magnitudes restent valables.
Les astronomes utilisent maintenant deux types de magnitudes : les *magnitudes apparentes* et *les magnitudes absolues*.

La magnitude apparente

La magnitude apparente, notée m, revient à mesurer combien une étoile nous apparaît brillante vue de la Terre (ou du Soleil).
Au lieu de la définir à partir du nombre de photons nous parvenant, elle est calculée relativement à la magnitude et à l'éclat d'une étoile de référence. Les astronomes mesurent donc les magnitudes en comparant l'étoile observée avec des étoiles bien connues, dont on connaît les caractéristiques de façon absolue (par opposition à relative).

La magnitude apparente m est donnée par :

$$m = m_{réf} - 2{,}5 \cdot \log_{10}(I / I_{réf})$$

Figure 1 : Hipparque de Nicée (environ 190 à 120 avant notre ère)
L'astronome grec Hipparque inventa la première échelle mesurant l'éclat des étoiles.

où $m_{réf}$ et $I_{réf}$ sont la magnitude apparente et l'éclat apparent de l'étoile de référence. I est l'éclat mesuré de l'étoile. Le facteur 2,5 assure la correspondance entre la définition moderne de magnitude et l'approche originale d'Hipparque, plus subjective.

Il est intéressant de constater que l'échelle intuitive d'Hipparque anticipait la loi logarithmique, fidèle en cela à la réponse physiologique de l'œil.

Pour donner quelques ordres de grandeurs, la magnitude apparente de la pleine Lune est environ de −12,7 ; celle de Vénus est au plus de −4 et le Soleil a une magnitude de −26,5.

La magnitude absolue

Même avec une approche plus objective de la magnitude, les propriétés physiques de l'étoile restent à mesurer. Pour définir une magnitude absolue, nous devons choisir un point de repère nous permettant de comparer objectivement différentes étoiles.

La magnitude absolue, notée M, est alors définie comme la magnitude relative qu'une étoile aurait si elle était à 10 parsecs du Soleil (à propos du parsec, voir la partie Outils mathématiques).

Puisque très peu d'étoiles sont à 10 parsecs du Soleil, nous avons recours à une équation nous permettant de calculer la magnitude absolue d'une étoile quelconque : c'est l'équation des distances.
Nous pouvons bien entendu l'utiliser réciproquement, pour en déduire notre distance à l'étoile, la magnitude absolue étant connue.

À couleurs différentes, magnitudes différentes

A la fin du XIX^{ème} siècle, quand les astronomes utilisaient la photographie pour mesurer les magnitudes apparentes, un nouveau problème se posa. Des étoiles semblaient à l'œil nu avoir le même éclat, mais se révélaient différentes sur le film, et vice-versa. Par rapport à l'œil, les émulsions photographiques sont plus sensibles au bleu et moins au rouge.
On construit alors deux échelles distinctes : la *magnitude visuelle* m_{vis} décrivant comment une étoile est perçue à l'œil nu et la *magnitude photographique* m_{phot} se référant aux films photo. Elle sont respectivement notées m_v et m_p.
En outre, tout comme les yeux, deux émulsions différentes n'ont pas la même sensibilité. Il fallait donc calibrer plus précisément les mesures de magnitudes.

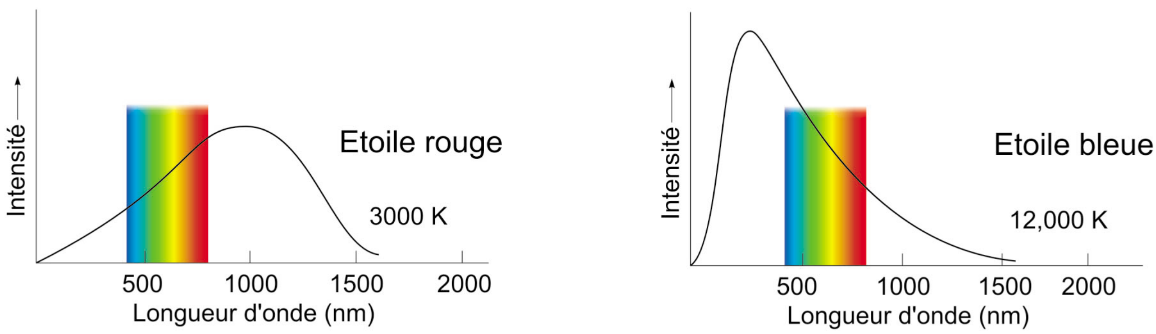

Figure 2 : Température et couleur des étoiles
Le diagramme montre la relation entre la couleur d'une étoile et sa température de surface. On a tracé l'intensité en fonction de la longueur d'onde pour deux étoiles hypothétiques. La partie visible du spectre est superposée. La couleur de l'étoile est en gros déterminée par le maximum, dans le domaine visible, de la courbe d'intensité.

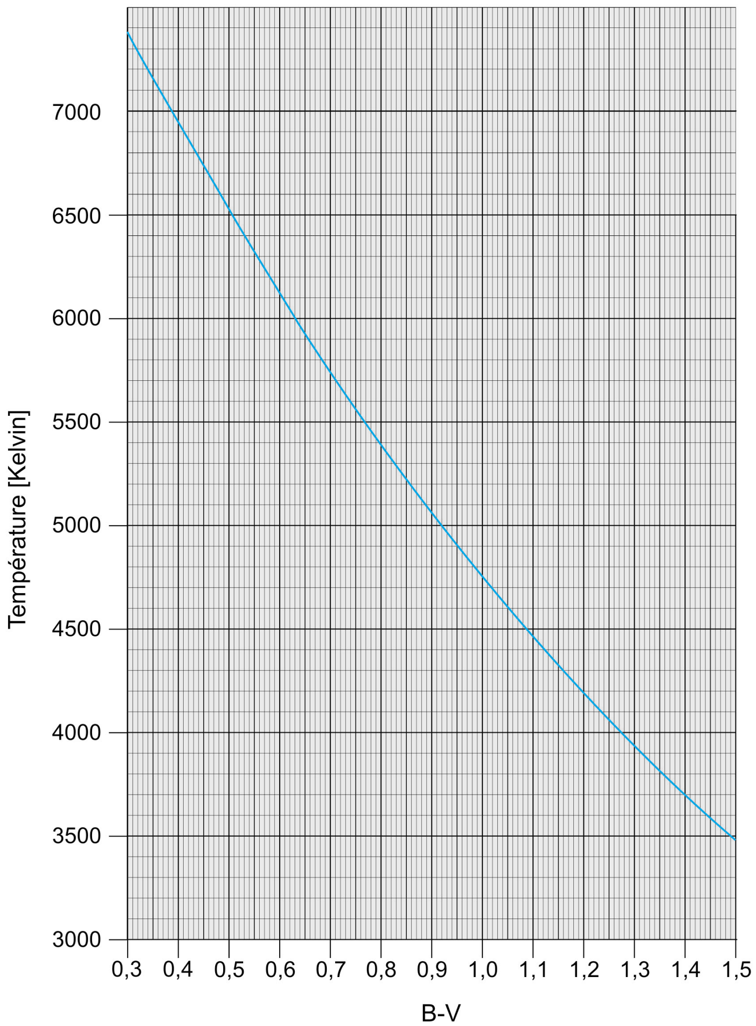

Figure 3 : Température de surface et indice de couleur (B–V)
Le diagramme montre la relation entre la température de surface T de l'étoile et son indice de couleur (B–V). Connaissant l'une des variables, on peut donc en déduire facilement la deuxième.

Les mesures modernes prennent comme référence des mesures faites par un photomètre standard à travers des filtres eux-aussi standardisés. Plusieurs systèmes photométriques existent : le plus familier est appelé UBV d'après les trois filtres les plus utilisés. Le filtre U laisse passer le proche ultraviolet, B la lumière bleue et V correspond en gros à la magnitude visuelle, au niveau du jaune-vert, maximum de sensibilité de l'œil. Dans ce système, les magnitudes correspondantes sont notées m_U, m_B et m_V.

De l'indice de couleur (B–V) à la température

Le terme *indice de couleur (B–V)*, ou *B–V*, est défini comme la différence entre deux magnitudes du système UBV : $m_B - m_V$.
Une étoile d'un blanc pur a un indice de couleur B–V de 0,2 environ ; notre Soleil de 0,63 ; l'étoile rouge-orangée Bételgeuse de 1,85 et l'étoile la plus bleue devrait avoir un *B–V* de –0,4. Une façon de penser l'indice de couleur est de comprendre que plus une étoile est bleue, plus sa magnitude B et la différence ($m_B - m_V$) sont négatives.

Il existe une relation étroite entre la surface de température T d'une étoile et son indice de couleur B-V (cf. Reed, C., 1998, Journal of the Royal Society of Canada, 92, 36-37) permettant de trouver T à partir du graphe $T = f(m_B - m_V)$. (cf. Fig. 3)

$\log_{10}(T) = (14{,}551 - (m_B - m_V)) / 3{,}684$

Equation de la distance

L'équation de la distance s'écrit :

$m - M = 5 \log (D/10 \text{ pc}) = 5 \log D - 5.$

Elle établit le lien entre la magnitude apparente m, la magnitude absolue M et la distance D mesurée en parsecs. La différence m-M est connue sous le nom *module de distance*.

Un peu d'algèbre nous permet de transformer cette équation sous une forme parfois plus adaptée :

$D = 10^{(m-M+5)/5}$

Pour déterminer la distance d'un objet, on commence par mesurer sa magnitude apparente m. Si l'on connaît aussi sa luminosité intrinsèque (sa magnitude absolue M), on peut en déduire la distance D. La partie délicate consiste à mesurer la magnitude absolue de certains types d'objets astronomiques. Le satellite HIPPARCOS de l'ESA a par exemple été créé dans ce but. HIPPARCOS est un satellite qui, entre autres, a mesuré très précisement les distances et magnitudes absolues d'un grand nombre d'étoiles proches.

Applications numériques

Les calculs suivants devraient vous familiariser avec les notions introduites.

Objectif OA1

L'étoile α d'Orion (Bételgeuse) a une magnitude apparente $m = 0{,}45$ et une magnitude absolue $M = -5{,}14$.

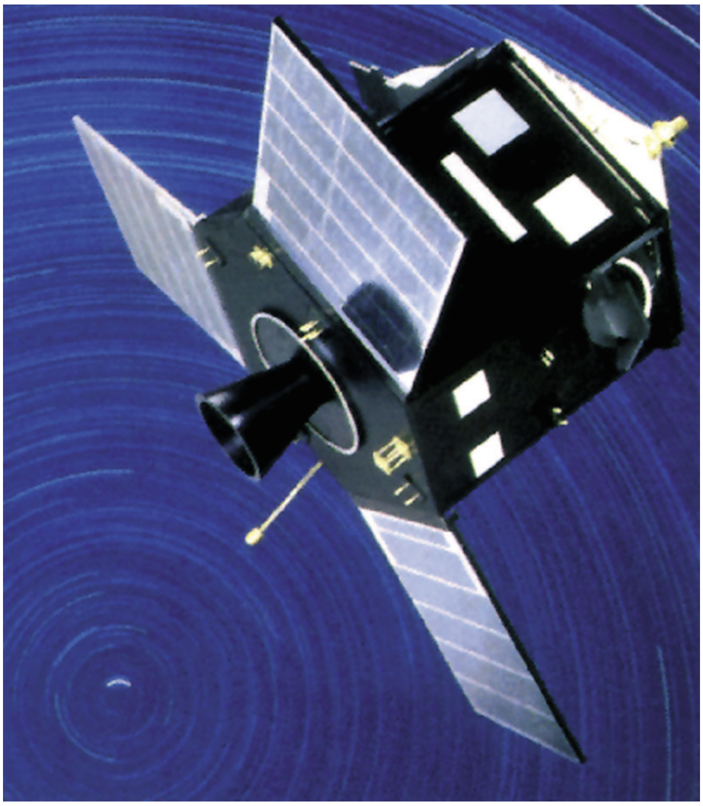

Figure 4 : Le satellite de l'ESA HIPPARCOS
Mis en orbite dans la nuit du 8 août 1989 par Ariane 4, son principal objectif était la production d'un catalogue de données avec une précision jamais atteinte : positions et distances de 120 000 étoiles (descendant jusqu'à une magnitude m_B de 13). La mission d'HIPPARCOS se termina en 1993 et le catalogue fut publié en 1997.

? Calculez la distance qui nous sépare de Bételgeuse.

Bételgeuse est l'étoile rouge de l'épaule gauche d'Orion. Il s'agit d'une supergéante rouge (rouge-orangée à l'œil nu).

Objectif OA2

α de la Lyre (Véga) est à une distance de 7,76 parsecs. Elle a une magnitude absolue de 0,58.

? Calculez la magnitude apparente de Véga.

Véga est l'étoile la plus brillante de la constellation de la Lyre et l'une des étoiles du Triangle d'été (en haut à droite photo 3), tout comme Deneb (en haut à gauche).

Objectif OA3

α du Cygne (Deneb) a une magnitude apparente de 1,25. Elle se trouve à une distance de 993 parsecs.

? Calculez sa magnitude absolue.
Que peut-on en déduire sur la nature de Deneb ?

Objectif OA4

L'étoile α du Grand Chien (Sirius) est la plus brillante du ciel. A une distance de 2,64 parsecs, sa magnitude apparente est –1,44.

? Calculez la magnitude absolue de Sirius.
En comparant avec les magnitudes absolues des trois autres étoiles, que peut-on en déduire sur l'éclat intrinsèque de Sirius ?

Objectif OA5

? Si les étoiles Véga, Sirius, Bételgeuse et Deneb étaient à 10 parsecs de la Terre et dans la même région du ciel, que verrions-nous ?

Photo 1 : Bételgeuse (dans la constellation Orion, le Chasseur)

Photo 2: Véga (La Lyre)

Photo 3: Le Triangle d'été. A partir de l'étoile supérieure gauche et dans le sens des aiguilles d'une montre : Deneb (le Cygne), Véga (la Lyre), Altaïr (l'Aigle)

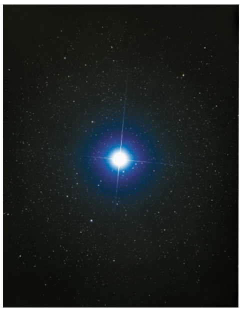

Photo 4: Sirius (constellation du Grand Chien)

Outils astronomiques

Objectif OA6

La magnitude absolue M est définie comme la magnitude apparente qu'aurait une étoile si elle se trouvait à 10 parsecs du Soleil.

? Ne serait-il pas plus correct de mesurer cette distance par rapport à la Terre ? Pourquoi cela ne fait-il aucune différence ?

Luminosité et intensité

Jusqu'à présent, nous avons évoqué les magnitudes stellaires sans mentionner comment l'énergie lumineuse était émise par l'étoile. L'énergie totale émise sous forme de lumière chaque seconde est appelée luminosité, L, et elle est mesurée en watts (W). Elle est équivalente à la puissance rayonnée.

Luminosité et magnitudes sont étroitement reliées. En effet, une étoile éloignée avec une luminosité importante peut avoir la même apparence qu'une étoile proche faiblement lumineuse. Connaissant la magnitude apparente et la distance d'une étoile, nous pouvons donc calculer sa luminosité.

L'étoile rayonne de la lumière dans toutes les directions : l'émission est à géométrie sphérique. Pour trouver l'éclat apparent de l'étoile observée depuis la Terre, il faut diviser sa luminosité par la surface d'une sphère ayant pour centre l'étoile et pour rayon la distance D (cf. Fig. 5) :

$$I = L / (4\pi D^2)$$

La luminosité d'une étoile peut aussi se mesurer en multiples de la luminosité solaire : $L_{Soleil} = 3{,}85 \times 10^{26}$ W. Comme le Soleil est 'notre' étoile — en tout cas la plus accessible — elle est souvent utilisée comme référence.

Après quelques manipulations, on trouve la formule de la luminosité L en fonction de la luminosité solaire :

$$L/L_{Soleil} = (D/D_{Soleil})^2 \cdot I/I_{Soleil}$$

Le rapport I/I_{Soleil} peut être évalué à l'aide de la formule donnée plus haut à propos des magnitudes apparentes ($m_{Soleil} = -26{,}5$).

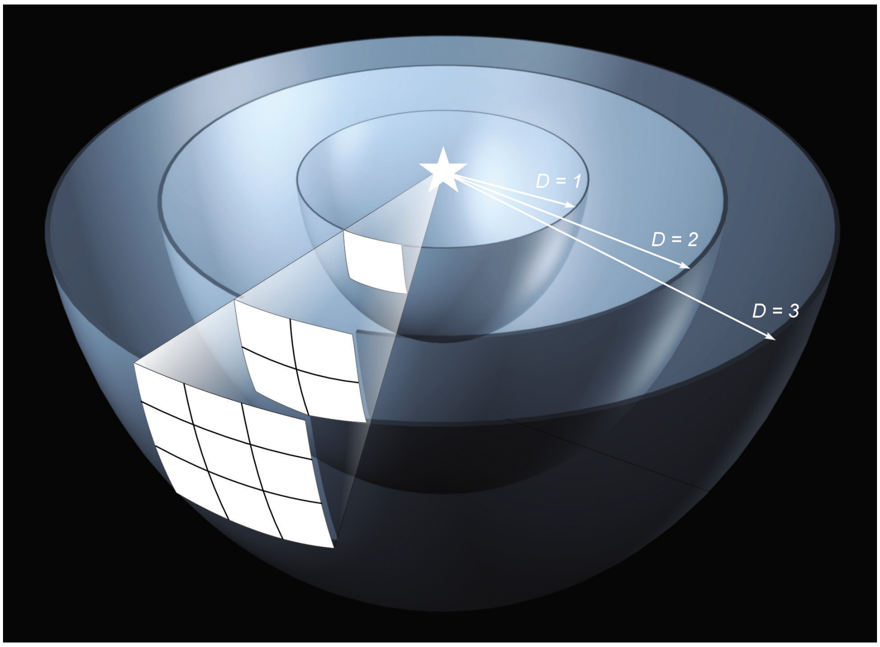

Figure 5 : Intensité lumineuse
Ce schéma montre comment la même quantité de radiation illumine une surface de plus en plus importante au fur et à mesure que la distance augmente. La surface augmentant comme le carré de la distance à la source, l'intensité décroît donc comme le carré de la distance D.

Petits angles et grandes distances

Observez la Fig. 6 :
Si b est petit devant c, on peut supposer que les deux côtés les plus longs du triangle ont la même longueur que la ligne centrale.
D'après la définition du sinus, on trouve :

$\sin(\beta/2) = (b/2)/c$

On peut utiliser l'approximation des petits angles $\sin x = x$, si x est très faible et s'il est exprimé en radians.

Objectif OM1

? Testez cette approximation en calculant sin(1°), sin(1′), sin(1″). Vous devez tout d'abord convertir les angles en radians.

Finalement, on dispose d'une relation simple entre b, c et β sans fonction trigonométrique :

$\beta/2 = (b/2)/c$

soit $c = b/\beta$

Corrigé des applications numériques :

Objectif OA1 : D = 131 parsecs

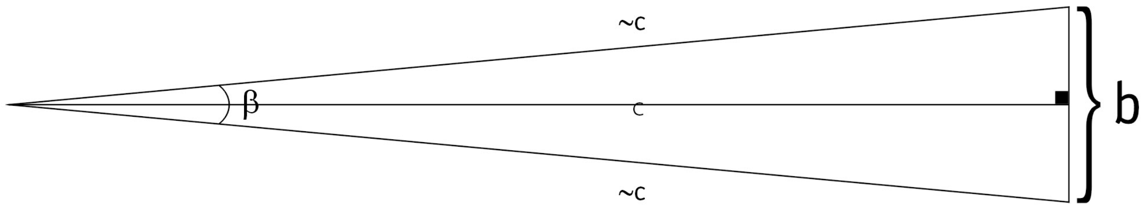

Figure 6 : Approximation des petits angles
Si b << c, cela implique que b est un angle très petit. On a alors une relation simple, sans fonction trigonométrique, entre b, c et β.

Unités fondamentales

1 minute d'arc = 1′ = 1/60 de degré = $2{,}9089 \times 10^{-4}$ radians
1 seconde d'arc = 1″ = 1/3600 de degré = $4{,}8481 \times 10^{-6}$ radians
1 milliseconde d'arc (mas) = 1/1000 seconde d'arc
Vitesse de la lumière (c) = $2{,}997 \times 10^{8}$ m/s
1 parsec (pc) = $3{,}086 \times 10^{13}$ km = 3,26 années-lumière
1 kiloparsec (kpc) = 1000 parsec
1 mégaparsec (Mpc) = 10^{6} parsec
1 nanomètre (nm) = 10^{-9} m

Objectif OA2 : **m = 0,03**

Objectif OA3 : **M = – 8,73**

Deneb est donc une étoile exceptionnellement brillante.

Objectif OA4 : **M = 1,45**

Comparée à Deneb (M = – 8,73), Bételgeuse (M = – 5,14) et Véga (M = 0,58), Sirius semble bien faible ! Ceci démontre que nos sens sont parfois trompeurs pour évaluer la réalité physique de notre monde.

Objectif OA5 :

A une distance de 10 pc, Véga et Sirius sembleraient moins lumineuses, mais feraient encore partie des étoiles les plus brillantes du ciel nocturne. Les étoiles Deneb et Bételgeuse seraient alors beaucoup plus brillantes que n'importe quelle étoile visible de la Terre.

Objectif OA6 :

Il n'y a pas de raison de distinguer des mesures de distances effectuées depuis la Terre ou le Soleil puisque la distance Terre-Soleil est négligeable devant 10 parsecs.
En calculant la différence correspondante en magnitude apparente, on trouve une valeur de 10^{-6} mag.

Objectif OM1 :

sin(1°) = sin (0,017453293 rad) = **0,017452406**
sin(1′) = sin ($2{,}90888 \cdot 10^{-4}$ rad) = **$2{,}90888 \times 10^{-4}$**
sin(1″) = sin ($4{,}84814 \cdot 10^{-6}$ rad) = **$4{,}84814 \times 10^{-6}$**

www.astroex.org