

# UNE MESURE LUMINEUSE

La magnitude et le module de distance

*La parallaxe spectroscopique*



Claude Ptolémée invente la sphère des étoiles fixes et classe ces dernières dans 6 catégories appelées grandeurs. Celles qui apparaissent les premières sont de première grandeur et celles qui apparaissent en dernier de sixième grandeur

**Le système des grandeurs de Ptolémée à perduré durant 16 siècles mais au 17<sup>em</sup> les progrès de la physique mettait en évidence de nombreuses lacunes et imprécisions du système :**

**Des étoiles de luminosité assez différentes étaient classées dans la même grandeur.**

**Le rapport de luminosité entre deux grandeurs ne respectait pas la linéarité intuitive qui lui était attribué : Une étoile de deuxième grandeur n'est pas deux fois moins lumineuse qu'une autre de première grandeur de même pour le rapport entre chacune des autres grandeurs.**

**Le Soleil que l'on avait compris bien plus tard n'être qu'une étoile était inclassable de par sa forte luminosité apparente, laquelle ne le devait qu'à sa grande proximité.**

**La science avait surtout compris que les étoiles ne sont pas toutes à la même distance et que leur luminosité apparente ne dépend donc pas de leur seule grandeur, mais aussi de la distance depuis laquelle elles sont observées et de leur température de surface.**

**Certaines étoiles brillent beaucoup et d'autres presque pas, certaines sont très grosses mais rares, alors que la plupart sont « petites », et elles ont aussi des couleurs différentes**



***En raison du système de Ptolémée, plus grand est le nombre caractérisant la magnitude, moins l'étoile apparaît brillante***



**Pour information, la magnitude de la pleine Lune n'est que -12,6**

**Celle de Jupiter est au mieux à -2,6 à**

**l'opposition (au moment où elle est le plus proche de la Terre, pratiquement. En fait, lorsque la planète, la Terre et le Soleil sont alignés),**

**Celle de Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel est -1,59**

***et la plupart des quelques 3000 étoiles que nous pouvons voir à l'œil nu dans des sites d'observation non (ou seulement moins) pollués par la lumière des villes, ont des magnitudes positives***

# Vers une nouvelle façon d'apprécier la lumière des étoiles

Comment résoudre cette liste de différences ?

Cette nouvelle façon d'apprécier la luminosité apparente d'une étoile prend sa source dans la luminosité réelle qui ne dépend que de la température et de la surface d'émission, c'est-à-dire la surface réelle de l'enveloppe de l'étoile.

La luminosité  $L$  s'exprime en Watts

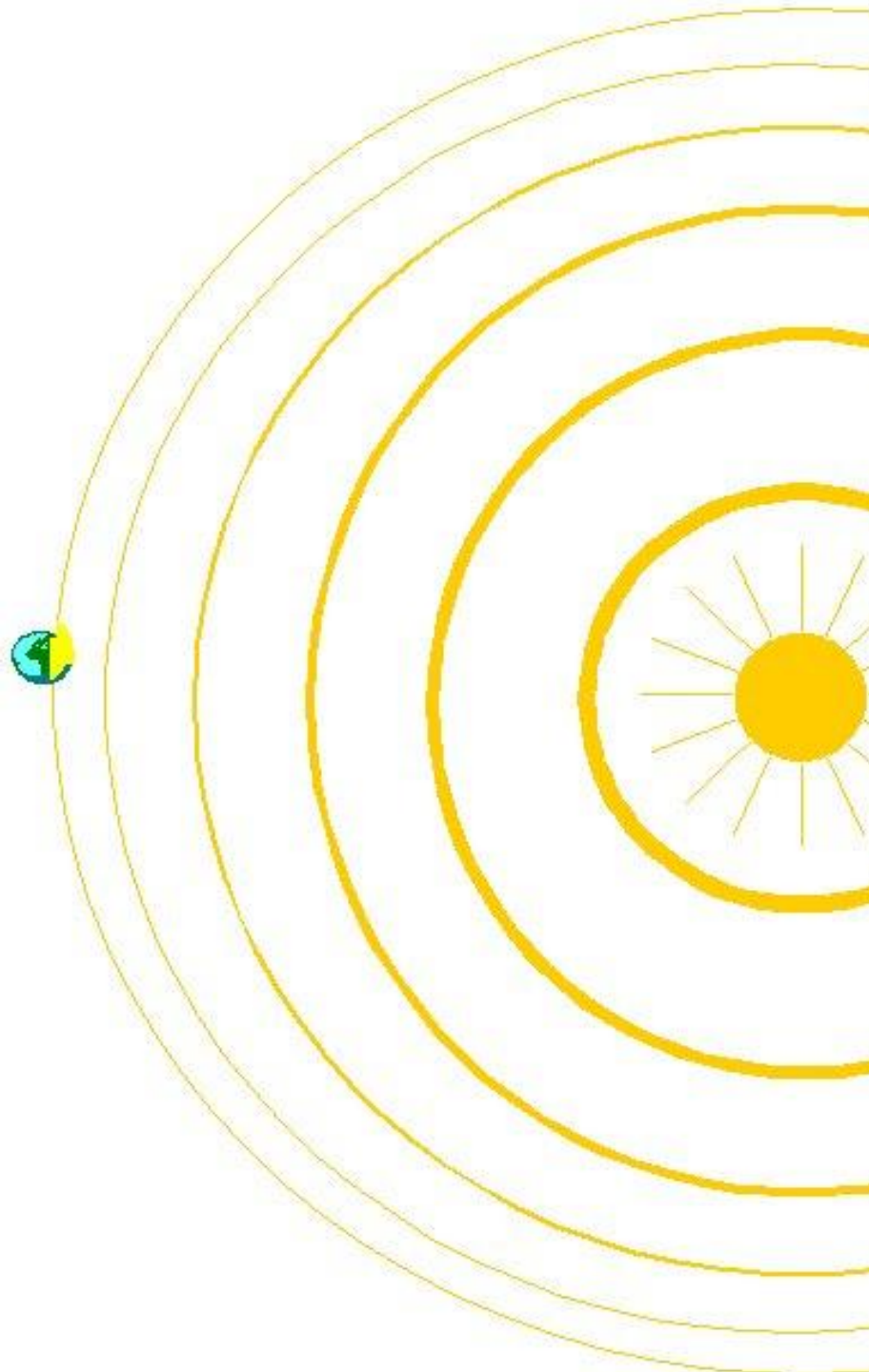
$$L = \sigma S T^4$$

$\sigma$  est la constante de Stephan :  $5,67... \times 10^{-8}$

$S$  est la surface de l'étoile et  $r$  son rayon :  $S = 4.\pi.r^2$

$r$  est exprimé en mètres

$T^4$  est la quatrième puissance de la température exprimée en kelvin.



**La luminosité  $L$  est ensuite diffusée dans l'espace sur  $360^\circ$  sphériques.**

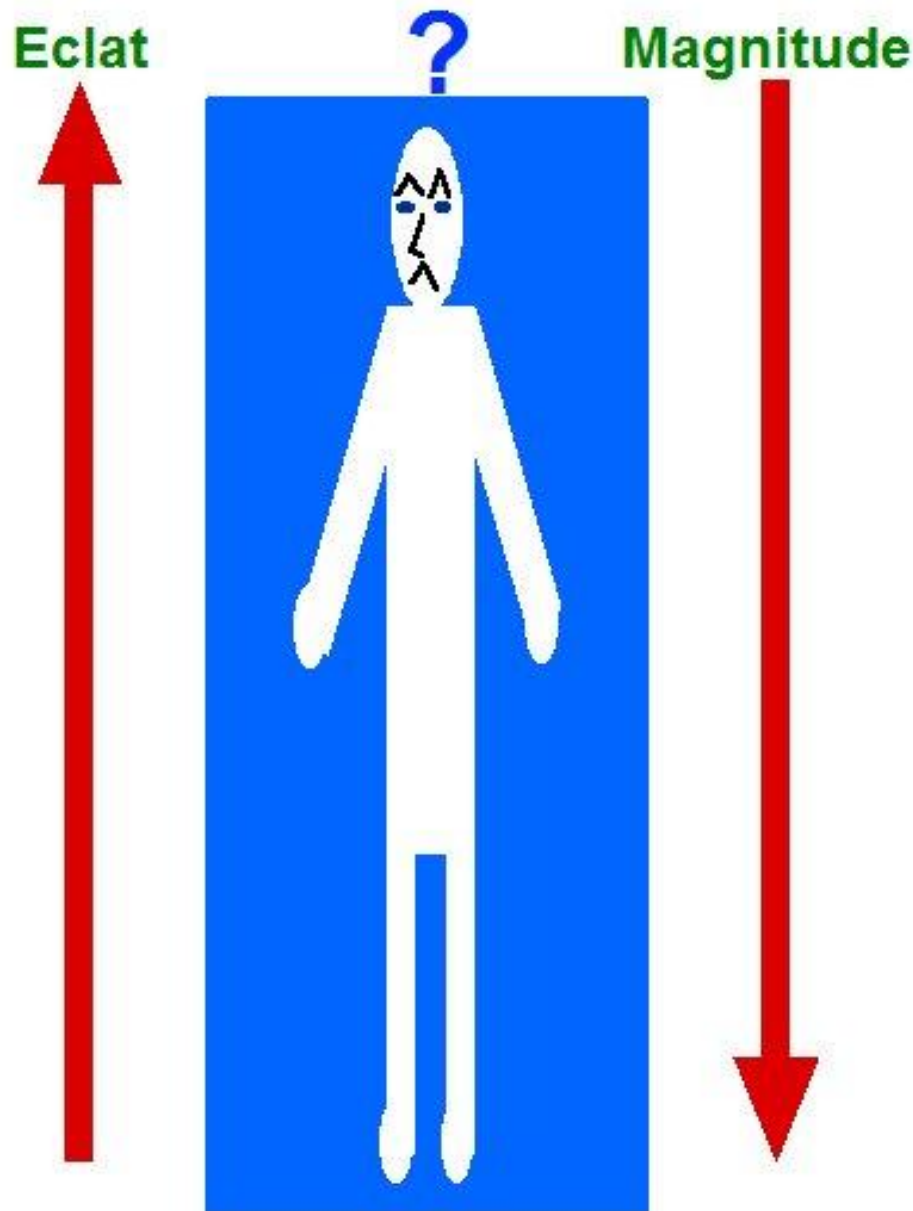
**L'énergie lumineuse se divise donc rapidement en fonction de la surface croissante de la sphère de propagation et l'éclat arrivant à l'observateur est fortement atténué.**

**Ainsi l'éclat  $E$  observé est-il fonction de la luminosité  $L$  mais également de la distance  $d$  d'observation selon la relation**

$$E = L\alpha/4\pi d^2$$

***$\alpha$  est un coefficient de diffusion et absorption qui dépend de la transparence du milieu de propagation, mais nous n'en tiendrons pas compte dans la suite de l'exposé.***





D'un coté le système des grandeurs  $G$ , inventé par les anciens grecs, et de l'autre le système basé sur l'éclat  $E$  de l'astronomie moderne.

L'échelle  $E$  est croissante (plus l'éclat apparent est élevé, plus le nombre qui le caractérise est grand) alors que l'échelle  $G$  est décroissante (plus l'indice attribué à la grandeur est élevé, moins l'étoile apparaît brillante).

**Le signe moins (-) sera la solution**





**les anciens Grecs mettaient  
dans la même catégorie des  
étoiles ayant des éclats  
assez différents.**



**Les astronomes ont donc  
calculé une moyenne  
d'éclat sur un grand  
nombre d'étoiles classées  
dans chacune des 6  
grandeurs pour en tirer un  
éclat moyen  $E$  représentatif  
de chacune des 6  
grandeurs  $G$**



2,512

X

2,512

X

2,512

X

2,512

X

2,512

=

100,0...

En étudiant le rapport entre chacun des éclats moyens E pour les 6 grandeurs G, on s'est aperçu que le rapport entre la moyenne d'éclat d'une grandeur G par rapport à la moyenne d'éclat de la grandeur voisine G+1 ou G-1, était un rapport pratiquement constant, égal à la racine cinquième de 100. Ce qui signifie qu'il y a un rapport d'éclat de 100 E entre 5 grandeurs G.

*La perception de l'œil humain n'est pas linéaire.*  
**Ce constat conduira à introduire la fonction logarithmique dans la relation d'équivalence entre les échelles E et G**

# L'heure des compromis

L'utilisation depuis 20 siècles du système des grandeurs  $G$  ne pouvant pas s'effacer d'un trait de plume, en 1850, l'astronome Pogson introduit un compromis ménageant les vieilles habitudes et la précision apportée par les mesures physiques en inventant la magnitude  $m$  comme succédané aux grandeurs  $G$

*Mais ce n'est pas si simple, il ne suffit pas de remplacer le mot grandeur par magnitude :*

## Questions :

La grandeur  $G$  est subjective mais  $m$  résulte de mesures physiques réelles de  $E$

$G$  gradue de 1 à 6 alors que  $m$  va de moins l'infini à plus l'infini

$m$  est croissante à l'inverse de  $G$ , et réciproquement.

La différence entre deux grandeurs  $G$  est logarithmique

alors que la différence d'éclat  $E$  est linéaire

## Réponses de Pogson :

L'introduction d'une valeur « d'offset » (une constante  $K$  fixant  $m = 1$  pour  $G = 1$ ).

Introduction d'un opérateur  $-\beta$  induisant deux avantages : il inverse le sens de l'échelle et joue le rôle de coefficient définissant la relation.

Représentation de l'éclat  $E$  par son logarithme

La relation s'exprime par  $m = -\beta \log E + K = G$

**La constante k permet de faire glisser les deux échelles m et G afin de faire correspondre  $m = G$ .**

**Mais quelle valeur attribuer à k ?**

**Pour éviter de devoir répondre à cette question il suffit de ne pas lier ces deux échelles mais simplement faire correspondre la différence entre deux magnitudes m de l'échelle G à celle qui existe entre deux éclats E**

$$m_1 - m_2 = -\beta \log (E_1/E_2) = G_1 - G_2$$

$$m_1 - m_2 = -\beta \log (E_1/E_2) = G_1 - G_2$$

Maintenant que nous sommes débarrassés de  $k$  il devient facile de déterminer la valeur de  $-\beta$

Puisque nous savons que pour un rapport d'éclat de 100 il y a une différence de 5 magnitudes alors pour  $m_1 - m_2$  égal à 5 nous avons

$$5 = -\beta \log (1/100) \text{ ou encore } -\beta \log (0,01) = -\beta (-2)$$

Choisissons d'utiliser le logarithme décimal étant donné que le rapport 100 pour l'éclat nous donne un multiplicateur entier de 2, car :  
 $\log (100) = 2$  et  $\log (1/100) = \log (1) - \log (100) = 0 - 2 = -2$

En divisant par  $\log (1/100)$ , c'est-à-dire par  $-2$ , nous isolons la valeur de  $-\beta$

$$5 / -2 = -\beta = -2,5$$

$$\text{Alors, } m_1 - m_2 = -2,5 \log (E_1/E_2)$$

**Ainsi, la relation liant la différence entre deux magnitudes  $m_1$  et  $m_2$  d'une part, et deux éclats  $E_1$  et  $E_2$  d'autre part et respectivement en provenance des mêmes sources, s'écrit :**

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log (E_1/E_2)$$

**Mais la magnitude a bien d'autres vertus que de comparer entre elles, la luminosité apparente des étoiles depuis la Terre**

**Le croiriez-vous, elle permet d'estimer la distance à laquelle se situe une étoile ?**



**La luminosité  
comme  
indicateur de  
distance**

Loin ce ne sont que 2 luminions



Près ils sont aveuglants

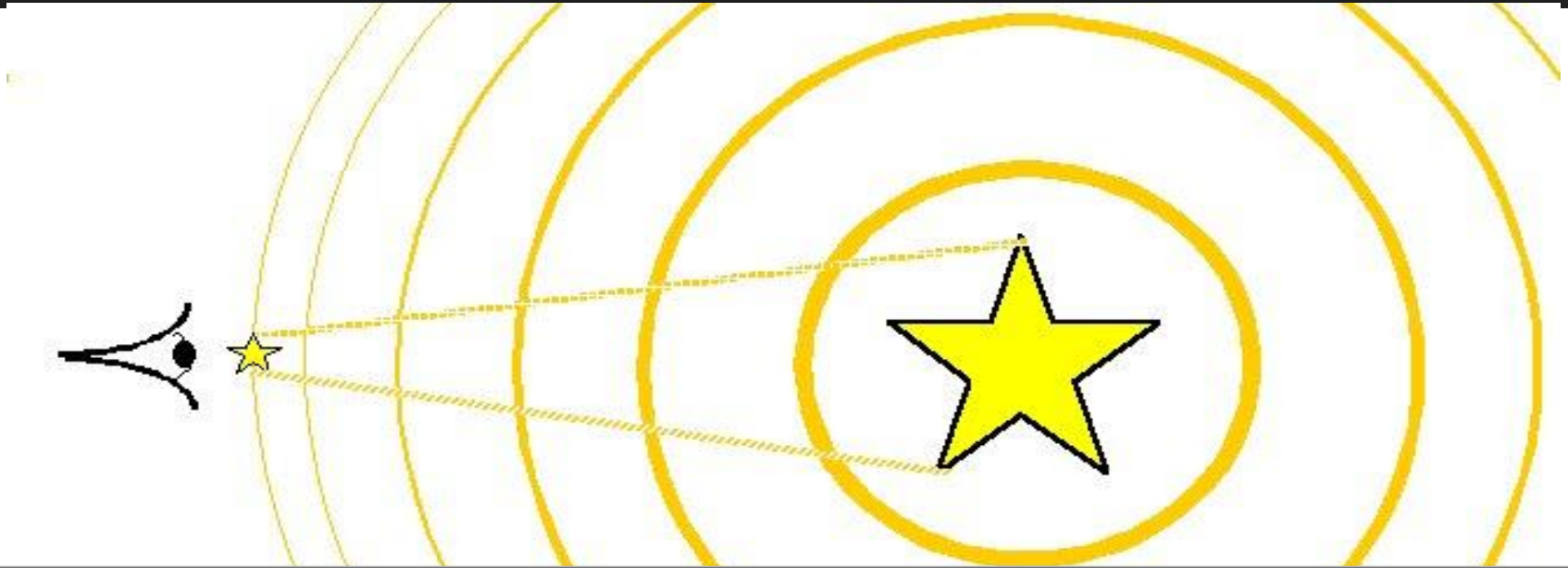
**Comment tirer profit de ce phénomène à propos de la distance à laquelle se situe une étoile ?**

**Suffit-il de constater qu'une étoile est peu lumineuse pour en déduire qu'elle est loin ?  
Bien sur que non, elle pourrait être simplement très petite ou de faible éclat !**

**Comme pour le phare, il faut savoir que c'est celui d'une puissante voiture et non celui d'un vélo dont la dynamo ne débite qu'un courant proportionné à la vigueur du coup de pédale.**

**Pour le phare, c'est facile, sur une voiture il y en a deux écartés l'un de l'autre alors qu'un vélo n'a qu'un phare. Mais comment faire pour une étoile ?**

**Comme il existe plusieurs véhicules différents (camion, auto, moto, vélo), il existe plusieurs types d'étoiles, mais pas une infinité, en gros une dizaine, et il suffit de savoir à quel type d'étoile on a affaire pour savoir sa luminosité intrinsèque.**



**En connaissant la luminosité que nous devrions observer pour ce type d'étoile la comparaison avec la luminosité réellement observée nous renseigne sur la distance à laquelle elle se trouve effectivement.**

**La luminosité intrinsèque à un type d'étoile est appelée Magnitude absolue  $M$  considérée comme vue à une distance de 10 parsecs, et sa luminosité observée est la magnitude apparente  $m$**

**Revenons sur la relation de Pogson :  $m_1 - m_2 = -2,5 \log (E_1/E_2)$**

**L'éclat  $E$  est égal à  $L/4\pi d^2$ , donc la relation de Pogson peut aussi s'écrire**  
 **$m_1 - m_2 = -2,5 \log ((L_1/4\pi d^2) / (L_2/4\pi d^2))$**

**Mais si l'on considère que  $m_1$  et  $m_2$  sont la magnitude d'une seule et même étoile vue à des distances différentes dont une ( $m_2$  par convention) est située à 10 parsecs,  $m_2$  devient  $M$  et dans le second membre toutes les caractéristiques sont celles d'une même étoile et s'annulent à l'exception de la distance .**

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \left( (L_1/4\pi d^2) / (L_2/4\pi d^2) \right)$$

devient donc :

$$m - M = -2,5 \log (10^2 / d^2) = -2,5 \log (100 / d^2)$$

Nous savons que  $\log (100 / d^2) = \log 100 - \log d^2$

Nous savons aussi que  $\log 100 = 2$

et que  $\log d^2 = 2 \log d$  (ce qui n'est qu'une propriété élémentaire des logarithmes)

donc  $m - M = -2,5 (2 - 2 \log d)$  et en effectuant les produits :

$m - M = -5 + 5 \log d$  que l'on exprime de la façon suivante

$$m - M = 5 \log d - 5$$

sous le nom de module de distance.

A partir du module de distance

$$m - M = 5 \log d - 5$$

en isolant  $\log d$  nous obtenons

$$(m - M + 5) / 5 = \log d$$

ce qui signifie que  $(m - M + 5) / 5$  correspond au logarithme de la distance recherchée.

Ainsi, connaissant la magnitude absolue d'une étoile par son type, et sa magnitude apparente par l'observation, on estime la distance  $d$  en appliquant l'équation suivante sur les mesures observées :

$d = 10^{((m - M + 5) / 5)}$  on obtient  $d$  en parsecs puisque c'est l'unité imposée dans la relation.

**On peut vérifier la validité de la relation sur l'estimation de la distance à laquelle le Soleil se trouve de la Terre, sachant que la magnitude  $M$  du Soleil est de  $+4,8$ , ce qui en fait une étoile modeste tant par la taille que par la température, et que la magnitude apparente est de  $-26,7$ .**

**On note que sa magnitude apparente négative dépasse celle de n'importe quel autre objet céleste en raison de sa proximité. Quelle est-elle en km ?**

Je compte sur vous pour résoudre ce petit problème mais avant, je voudrais vous signaler que si non n'avons parlé que de magnitudes apparentes et absolues il faut aussi préciser le domaine de sensibilité de l'organe de perception.

*Aussi existe-t-il d'autres critères de magnitude :*

Magnitude visuelle, sensibilité de la rétine

Magnitude photographique, celle des plaques photographique et maintenant des capteurs électroniques

Magnitude bolométrique, qui prend en compte la totalité du rayonnement



**Je vous  
remercie de  
votre attention**

**Y-a-t'il des questions ?**