



Astro Club de La Girafe

LES MAGNITUDES EN ASTRONOMIE

Qu'est-ce-qui caractérise une étoile ?

Masse

Composition chimique

Température

Couleur

Diamètre

Luminosité

Distance

Les réactions nucléaires dépendent de la température et de la masse d'une étoile.

Pour que celles-ci s'amorcent il semble qu'il faut que la masse de l'étoile soit supérieure à 1/20 masse solaire.

Pour que les réactions nucléaires soient stables, il semble également que la masse ne doit pas dépasser 100 masses solaires.

Les dimensions des étoiles sont beaucoup plus variées et vont de 10^{-5} diamètre solaire à 1.000 diamètres solaires.

La luminosité d'une étoile représente sa puissance lumineuse rayonnée. Elle peut être mesurée et cette puissance s'exprime en Watts.

L'ÉCLAT D'UNE ÉTOILE

L'éclat d'une étoile correspond à la puissance lumineuse reçue sur Terre par unité de surface prise perpendiculairement à l'axe de visée.

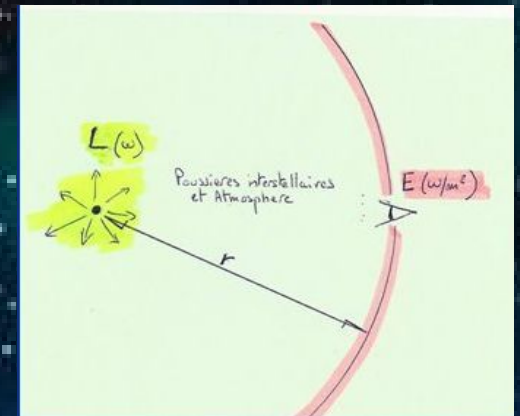
L'éclat (E) se mesure donc en W/m^2 .

La valeur de l'éclat est donc le rapport entre la luminosité de l'étoile L et l'unité de surface de la sphère dont le rayon est égal à la distance r qui sépare l'observateur à l'étoile :

$$E = L/S = L/4\pi r^2$$

L étant l'énergie totale rayonnée par l'étoile.

L'éclat diminue donc avec le carré de la distance.
Cette valeur n'a aucune relation directe avec les propriétés physiques et chimiques de l'étoile concernée.



UN PETIT APARTÉ

Puissance totale reçue sur la terre :
Éclat x surface ensoleillée

Diamètre de la terre = 12 700 Km

$$\text{Surface ensoleillée} = \frac{4\pi r^2}{2} = \frac{4\pi (6\,350)^2}{2}$$



Puissance totale reçue sur terre :

$$P = 1350 \times \frac{4\pi (6\,350)^2}{2}$$

$$P = 342.10^9 \text{ W}$$

Soit 342 milliards de Watts ou 210 centrales EPR de Flamanville!!



Les premiers hommes remarquèrent que les étoiles ne brillaient pas toutes du même éclat.

Ce fut l'astronome grec Hipparque qui vers 120 av. J-C, décida de classer les étoiles visibles à l'œil nu selon 6 graduations en fonction de l'intensité de leur luminosité.

Les premières à apparaître après le coucher du soleil étaient de première grandeur et les dernières étaient de la sixième grandeur.

Au XVIIIème siècle, John Herschel, le fils de William, fut le premier à utiliser un *astromètre* pour mesurer la luminosité des étoiles.

Relevons 2 ambiguïtés majeures sur le système de gradation des anciens :

1. Si nous comparons le système des grandeurs imaginé par les anciens et l'éclat d'une étoile, on constate que plus la puissance lumineuse de l'étoile est grande et plus son éclat augmente ; alors que la mesure établie par les anciens est tout le contraire, plus la puissance lumineuse de l'étoile est grande et plus la valeur de son éclat diminue.
2. La perception de l'œil humain n'est pas linéaire. Une étoile de deuxième grandeur n'est pas deux fois moins lumineuse qu'une étoile de première grandeur.



**LES MAGNITUDES APPARENTES
VISUELLES**

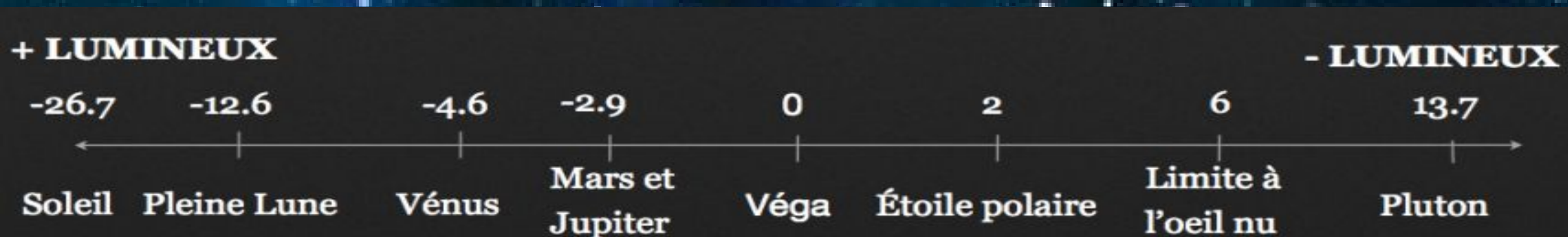
Les astronomes modernes ont voulu conserver la graduation des anciens pour quantifier la luminosité ou la magnitude visuelle des étoiles.

Plus l'astre est brillant et plus sa graduation est petite, voire même négative pour les plus brillants.

Le Soleil a une magnitude d'environ -26 et la pleine Lune de -12,5. Selon cette graduation, cela ne signifie pas que le Soleil est 2 fois plus lumineux que la pleine Lune.

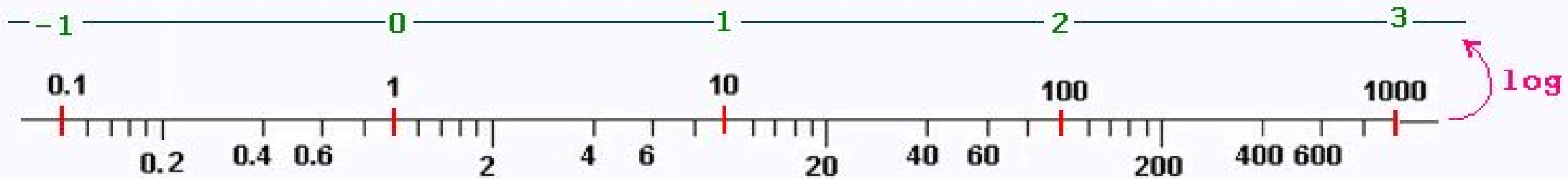
L'échelle de graduation des magnitudes ne se fait pas par des différences (soustractions) mais par des rapports (divisions).

C'est une échelle logarithmique créée en 1856 par l'astronome anglais Norman Pogson. C'est lui qui donna le nom de magnitude aux différences d'éclat.



L'ÉCHELLE DES LOGARITHMES

Échelle logarithmique à base 10



Pourquoi les mathématiciens ont-ils inventé cette échelle?

Car elle simplifie les calculs.

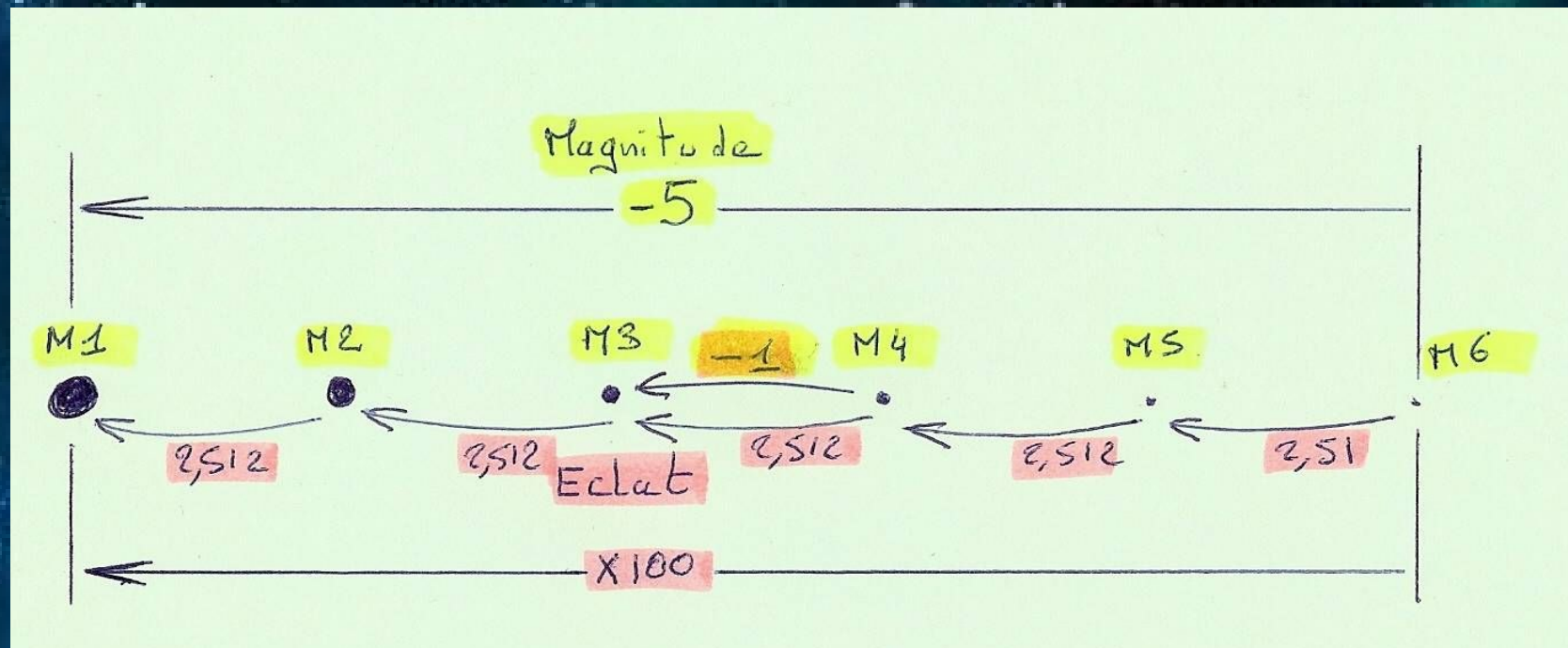
La multiplication se transforme en addition et la division en soustraction.

Les sensations perçues par l'œil et traitées par notre cerveau évoluent selon une échelle logarithmique.

LA LOI DE POGSON

Il fixa le principe que les étoiles de premier degré des grecs était 100 fois plus brillantes que celles du 6ème degré.

Ainsi une différence en magnitude de 1 correspond à un éclat multiplié ou divisé par $100^{1/5} = 2,512$



Il en résultera une loi mathématique qui permet la comparaison par différence (soustraction) entre les éclats mesurés de 2 étoiles.

LA LOI DE POGSON

$$m - m^{\circ} = a \log E/E.$$

$$- 5 = a \log 100$$

$$- 5/2 = a$$

$$a = - 2,5$$

Il ne faut pas confondre dans cette formule le coefficient a définissant la relation $(-2,5)$ avec la racine cinquième de 100 ($2,512$) indiquée précédemment comme rapport d'éclat de 100 fois entre deux étoiles séparées de 5 magnitudes.

$$m - m^{\circ} = - 2,5 \log E/E.$$


ou encore :
$$m = - 2,5 \log E + C$$

où C est une constante permettant de faire coïncider cette échelle avec celle des anciens.

On a fixé la magnitude apparente de l'étoile Véga à 0.
Dans ces conditions, la magnitude apparente d'une étoile se traduit par le rapport d'éclat entre cette étoile et l'étoile Véga.

Voici quelques magnitudes d'étoiles, planètes et objets, dont les valeurs ont été arrondies:

- Soleil : -26
- Pleine Lune : -12,5
- Vénus : -4,5
- Jupiter : -2,5
- Sirius : -1,5 (étoile la plus lumineuse après le Soleil)
- Saturne : -1
- Véga : 0 (étoile de référence pour la magnitude 0)
- Étoile polaire : 2
- Magnitude limite à l'œil nu (moyenne) : 6
- Pluton : 13,5
- Objets trans-neptuniens : 20 à 23

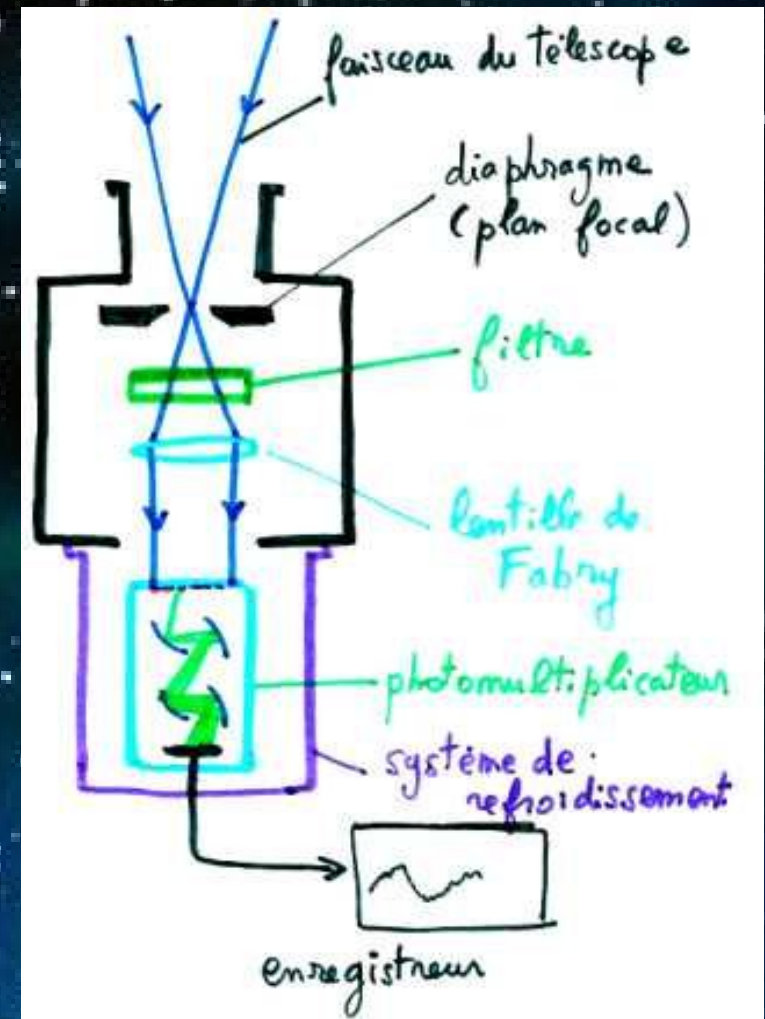


**LES MAGNITUDES APPARENTES
MONOCHROMATIQUES**

L'arrivée de la photographie en astronomie bouleversa les mesures. Les astronomes s'aperçurent que sur leurs plaques photographiques, les étoiles ne rayonnaient pas de la même façon dans toutes les différentes longueurs d'ondes de la lumière visible ou invisible.

Ils élaborèrent un système de mesure plus précis, dans lequel les magnitudes sont actuellement mesurées par des photomètres à travers des filtres standardisés.

Les photomètres sont des appareils basés sur la transformation de l'énergie des photons reçus sur une cellule photoélectrique, en un courant électrique facilement mesurable.



Les astronomes parlent ainsi de magnitudes visuelles, photographiques ou photométriques selon le type de récepteur utilisé (œil, plaque photographique ou photomètre).

C'est ainsi qu'a été créé en 1950 le système photométrique UBV également appelé le système Johnson. La gamme de longueur d'onde U correspond à l'ultraviolet, la B dans le bleu et la V dans le vert.

Ces magnitudes sont mesurées à travers des filtres standardisés de 360, 420 et 540 nanomètres.

Par la suite, le système a été étendu aux longueurs d'ondes du rouge (R) et de l'infrarouge (I, J, H, K, L, M, ...) pour utiliser au mieux les fenêtres de transmission de ces longueurs d'ondes et pour s'affranchir de la dispersion atmosphérique terrestre.

En pratique, on n'utilise que les différences de magnitudes (**U-B**, **B-V**, ...) d'un même domaine spectral, ce qui fait disparaître **C** dans la formule de Pogson : **$m = -2,5 \log E + C$** .

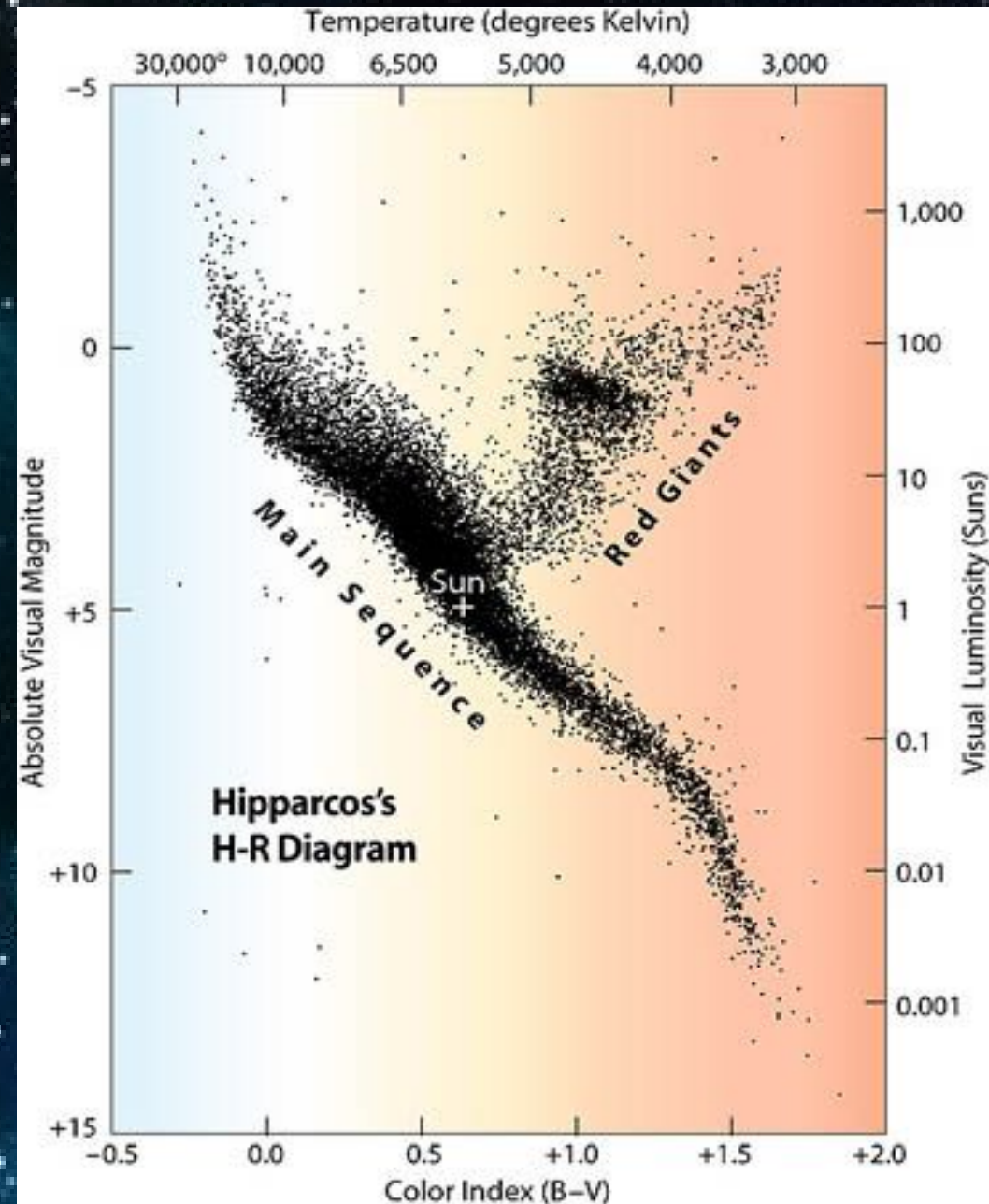
Ce tableau donne pour chaque filtre standard sa longueur d'onde (λ) et sa bande passante ($\Delta\lambda$).

domaine spectral	indice de couleur X	λ (μm)	$\Delta\lambda$ (μm)	Référence ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)
UV	U	0.36	0.068	$4.35 \cdot 10^{-8}$
bleu	B	0.44	0.098	$7.20 \cdot 10^{-8}$
visible	V	0.55	0.089	$3.92 \cdot 10^{-8}$
rouge	R	0.70	0.22	$1.76 \cdot 10^{-8}$
proche IR	I	0.90	0.24	$8.3 \cdot 10^{-9}$
proche IR	J	1.25	0.30	$3.4 \cdot 10^{-9}$
IR	H	1.65	0.35	$7.0 \cdot 10^{-10}$
IR	K	2.20	0.40	$3.9 \cdot 10^{-10}$
IR	L	3.40	0.55	$8.1 \cdot 10^{-11}$
IR	M	5.0	0.3	$2.2 \cdot 10^{-11}$

De nombreuses mesures ont été effectuées dans les systèmes **B** et **V** au fil des ans.

Les astronomes utilisent souvent comme indice de couleur les valeurs de **B – V** pour définir la couleur d'une étoile.

Le diagramme de Hertzsprung-Russell, qui montre la relation entre la luminosité d'une étoile et sa température, est généralement tracé avec l'indice de couleur (**B-V**) en tant qu'indicateur de température:



LES MAGNITUDES ABSOLUES

The background of the slide is a deep space image. It features a dense field of stars of various colors, including white, yellow, and blue. A prominent feature is a large, diffuse nebula or star-forming region with a vibrant blue and green glow, centered in the lower half of the frame. The overall color palette is dark, with the primary colors being deep blues and greens, punctuated by the bright points of light from the stars.

Une magnitude apparente, comme son nom l'indique, n'est qu'apparente.

Elle dépend de la nature de sa source, de son éloignement, de l'absorption interstellaire, de la diffraction atmosphérique et de la calibration du capteur utilisé ou de l'acuité visuelle de l'observateur.

Elle donne une information à corriger sur la luminosité émise par l'astre lui-même.

Les astrophysiciens, pour s'affranchir des effets de calibration, de distance ou d'absorption interstellaire et atmosphérique, ont créé la notion de magnitude absolue, notée M .

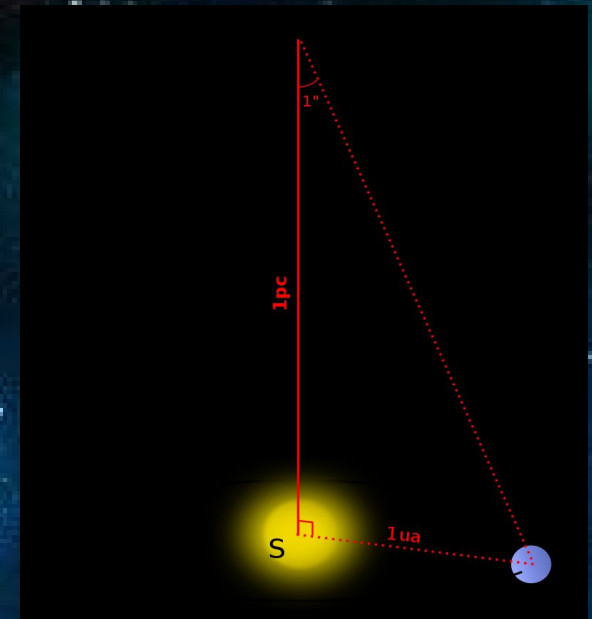
S'AFFRANCHIR DES DISTANCES

Prenons une ampoule électrique. Elle paraît plus lumineuse à 5 mètres qu'à 10 mètres. La lumière perçue ne renseigne pas sur la puissance inscrite sur la lampe tant que l'on ne sait pas à quelle distance elle se trouve.

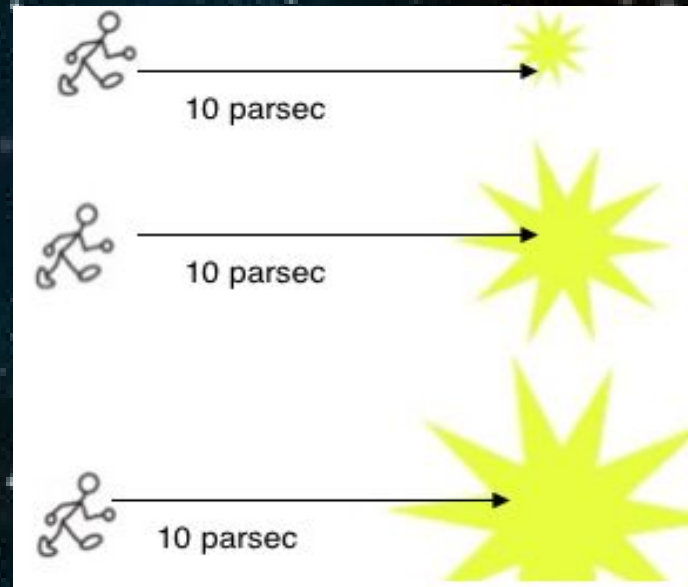
Pour permettre les comparaisons, les astrophysiciens ont décidé de mettre toutes les étoiles à la même distance de 10 parsecs.

Le parsec (symbole : pc) correspond à la distance à laquelle nous verrions la distance Terre-Soleil (1 UA) sous un angle d'une seconde d'arc (parallaxe). Le pc correspond à 3,26 années-lumière soit $3,086 \cdot 10^{16}$ mètres.

Les astronomes ont inventé le parsec, car si la parallaxe d'une étoile est exprimée en seconde d'arc, son inverse correspond à la distance de cette étoile exprimée en pc.



Par définition, la magnitude absolue d'une étoile est donc la magnitude apparente qu'aurait cette étoile si elle était distante de 10 parsecs.



Selon la loi de l'éclat et celle de Pogson vues précédemment, elle se définit comme suit :

$$M = -2,5 \log E + C \text{ avec } E = L/4\pi d^2 \text{ et où } d = 10 \text{ pc}$$

Cette nouvelle échelle des magnitude permet d'évaluer la vraie luminosité de l'étoile, mais aussi sa distance :

$$M = -2,5 \log \frac{L}{4\pi 10^2} + C \quad \text{et} \quad m = -2,5 \log \frac{L}{4\pi d^2} + C$$

$$m - M = -2,5 \log \frac{10^2}{d^2}$$

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

La valeur $m - M$ est appelée **Module de distance** et est notée μ
Cette dernière formule, à l'aide des magnitudes apparentes relevées de nombreuses fois pour les étoiles calibrées, permet d'en déduire la distance d .

Ce tableau donne les distances et les magnitudes apparente et absolue de quelques étoiles dans la bande de fréquence V :

Étoile	m (v)	M (v)	Distance (pc)
Soleil	-26,78	4,8	$4,83 \cdot 10^{-6}$
Sirius	-1,46	1,4	2,68
Arcturus	-0,06	-0,2	10,66
Alpha du Centaure	-0,1	4,3	1,32
Véga	0,04	0,5	7,6
Capella	0,08	-0,6	12,5
Rigel	0,11	-7,0	190
Procyon	0,35	2,6	3,4
Bételgeuse	0,80	-6,0	200
Altair	0,77	2,3	4,9
Antarès	0,92	-4,7	133
Deneb	1,26	-7,3	515
Étoile polaire	2,09	-3,5	131
Étoile de Barnard	9,70	13,3	1,9
Proxima du Centaure	11	15,4	1,32

S'AFFRANCHIR DES EFFETS DE CALIBRATION

En observation visuelle, s'affranchir de nos différences d'acuité n'a que peu de sens, puisque nos mesures ou dessins n'ont pas à avoir une grande précision.

Les astrophotographes amateurs et professionnels utilisent pour faire de l'astrométrie des images propres à l'aide de techniques devenues maintenant courantes sur les logiciels de traitement d'images : Flat, Dark, Offset... Rendons hommage ici à Christian Buil qui a mis ces outils à notre portée.

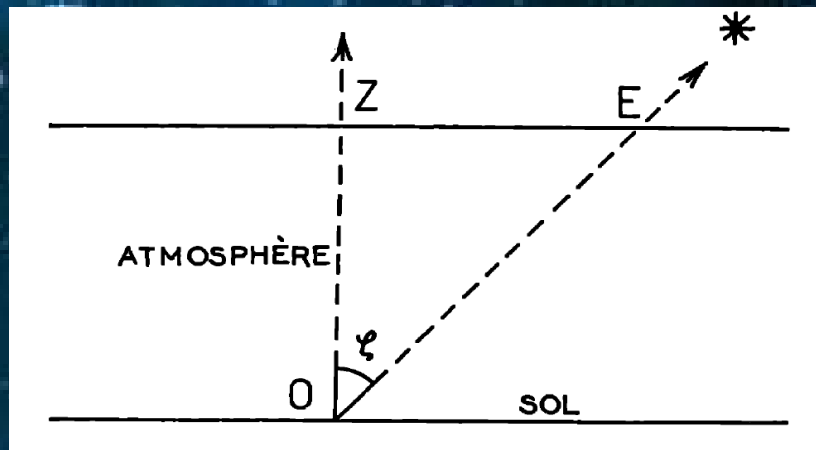


Les études photométriques utilisent des méthodes de comparaison avec des étoiles calibrées. La calibration de ces étoiles a été établie suite à de nombreuses observations et fait l'objet de tables spécifiques (UCAC4, Tycho2, etc...).

S'AFFRANCHIR DES ABSORPTIONS ATMOSPHÉRIQUES ET INTERSTELLAIRES

L'absorption interstellaire est minimale dans l'infrarouge et inversement proportionnelle à la longueur d'onde ($1/\lambda$). La comparaison des spectres dans le rouge et dans le bleu de la lumière visible reçue permet de déterminer le facteur correctif à la formule de la magnitude visuelle.

Pour l'absorption atmosphérique, la couche d'air peut être considérée comme une couche plane si l'on observe pas trop près de l'horizon.



L'absorption est proportionnelle à l'épaisseur d'air traversée.

Dans ces conditions, l'épaisseur traversée $OE = OZ \sec z$ avec $\sec z = 1/\cos z$

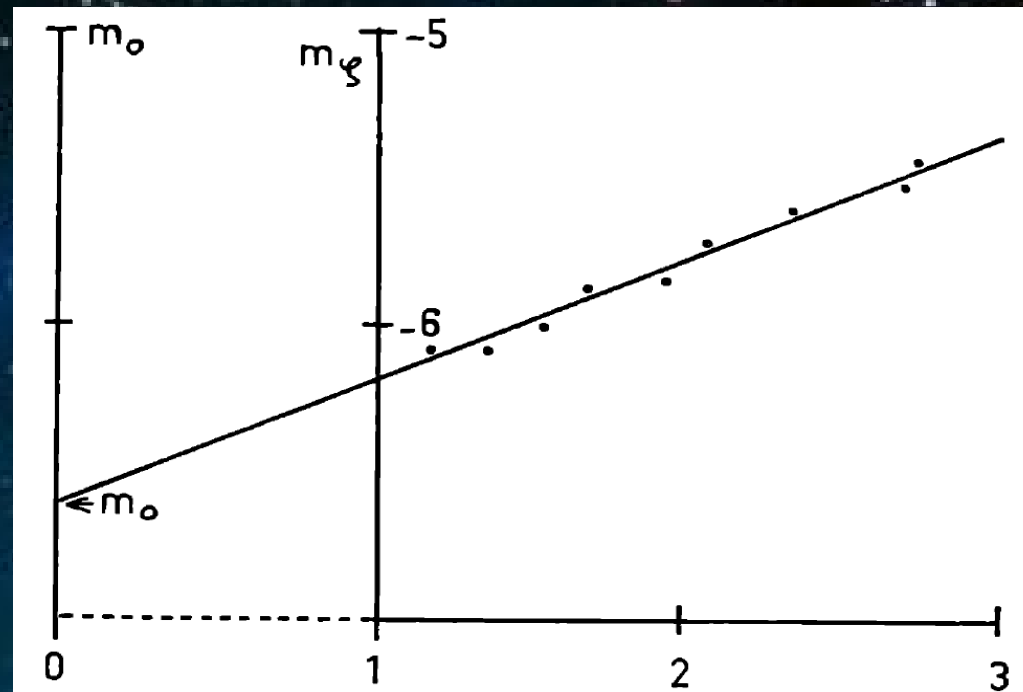
La magnitude mesurée à distance zénithale est $m_z = m_0 + K \sec z$
Avec m_0 pour la magnitude hors de l'atmosphère

Pour calculer k , durant l'observation on mesure la magnitude visuelle d'une même étoile à différentes hauteurs sur l'horizon.

Les magnitudes obtenues s'alignent sensiblement sur une droite.

La droite ainsi obtenue s'appelle la droite de Bouguer.

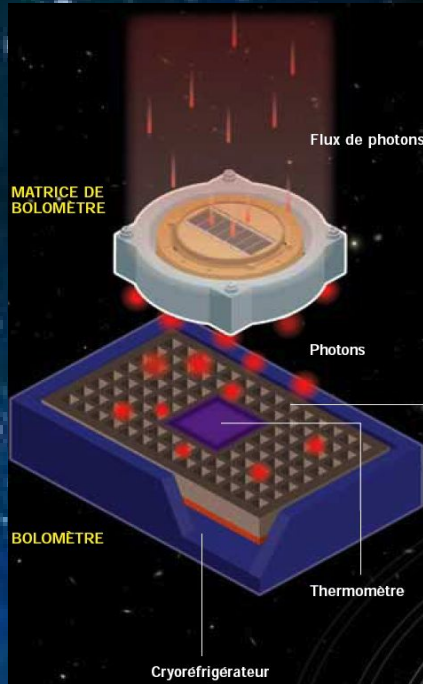
L'ordonnée à l'origine de cette droite donne – empiriquement – la valeur de m_0 permettant le calcul de K et de la magnitude hors atmosphère.



LES MAGNITUDES BOLOMÉTRIQUES

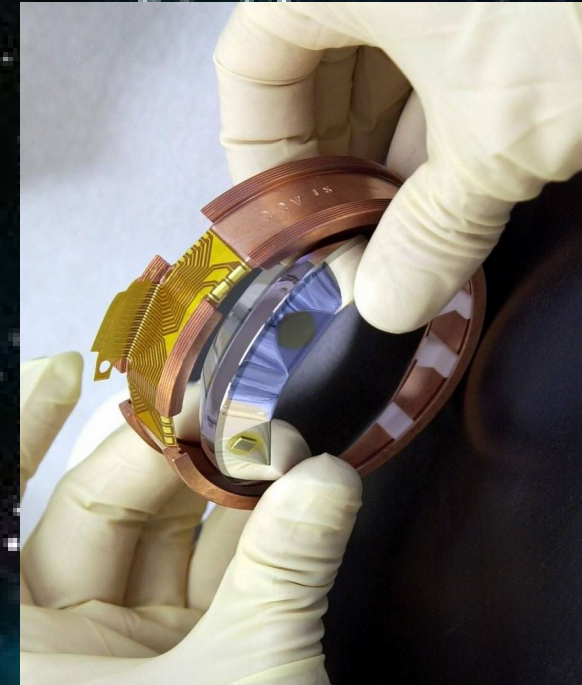
The background of the slide is a deep space image. It features a dense field of stars of various colors, including white, yellow, and blue. A prominent feature is a nebula with a mix of blue and green hues, which appears to be the source of the ambient light. The overall effect is that of a vast, star-filled galaxy or star cluster.

Les magnitudes bolométriques visuelles m_{Bol} et absolue M_{Bol} désignent la magnitude d'une étoile en prenant en compte la totalité de l'énergie rayonnée dans les différentes longueurs d'onde, du domaine radio aux rayons gamma.



Un bolomètre est formé d'un cristal auquel on couple un thermomètre, le tout placé dans un calorimètre interdisant tout échange de chaleur avec l'extérieur. Lorsqu'une particule arrive sur le cristal, elle y dépose de l'énergie qui en élève la température.

La mesure de cet échauffement, qui se compte en millièmes de millièmes de degrés, permet d'obtenir la valeur du dépôt d'énergie.



La magnitude bolométrique m_{Bol} est généralement inaccessible à l'observation, car l'atmosphère terrestre empêche la détection de la totalité de l'énergie émise par l'étoile.

Elle nécessite l'utilisation pour chaque domaine spectral, de capteurs spécialisés appelés bolomètres, embarqués sur des satellites.

Les magnitudes bolométriques sont directement reliées aux magnitudes apparentes et absolues par la correction bolométrique (BC) qui est toujours négative. Celle-ci est fonction de la température de l'étoile, donc de son type spectral.

$$m_{\text{Bol}} = m(v) - \text{BC} \quad \text{et} \quad M_{\text{Bol}} = M(v) - \text{BC}$$

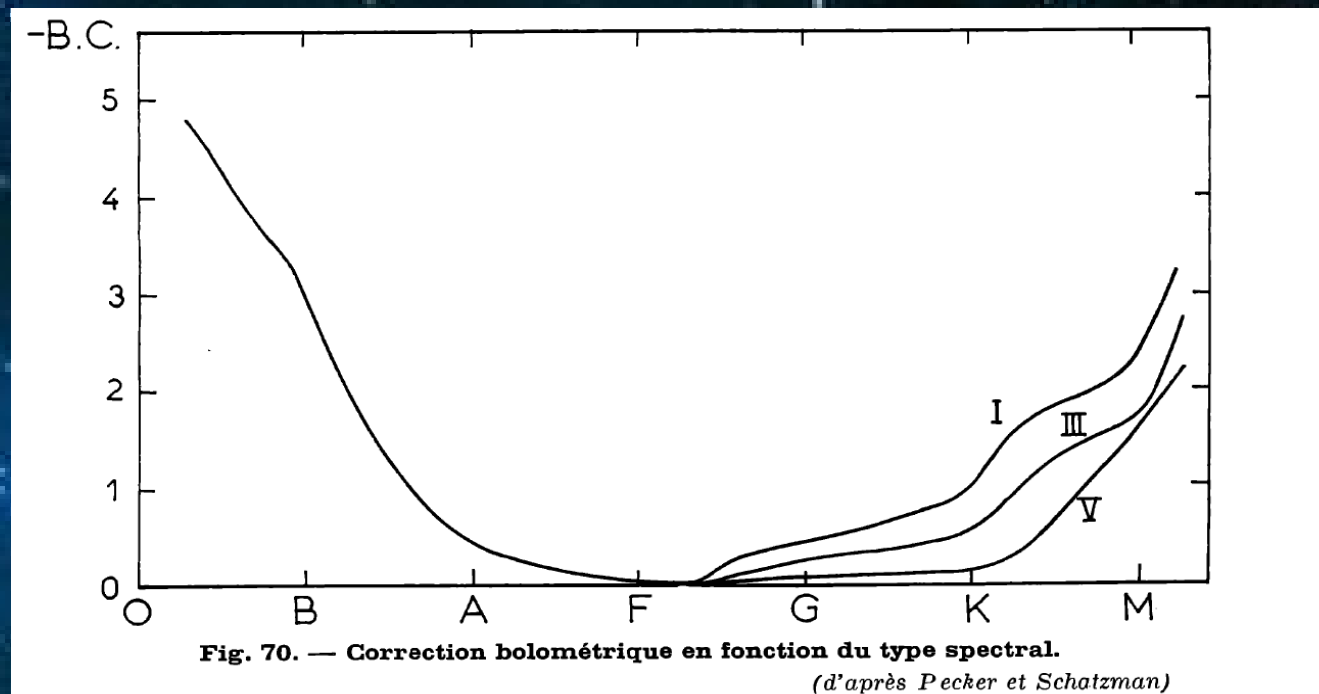


Tableau donnant les corrections bolométriques pour différents types spectraux d'étoiles.

LES MAGNITUDES SURFACIQUES

The background of the slide is a deep space image. It features a dense field of stars of various colors, including white, yellow, and blue. A prominent feature is a nebula with a mix of blue and green hues, creating a soft, ethereal glow. The overall composition is centered, with the text overlaid on the middle of the image.

La magnitude surfacique d'un objet, notée m_s , est une moyenne de sa magnitude apparente visuelle par rapport à sa surface calculée en secondes ou en minutes d'arc au carré.

En observation visuelle, la magnitude donnée pour les objets est donc trompeuse pour les objets de grande surface.

Il existe une relation entre la taille de l'objet, sa magnitude apparente et sa magnitude surfacique :

$$m_s = m + 2,5 \log (\pi a.b/4)$$

a et b : grand axe et petit axe de l'ellipse formée par l'objet.
Le cercle est considéré comme une ellipse particulière.

Quelques exemples de calcul de magnitude surfacique :

$$M104 \Rightarrow m_s = 8,3 + 2,5 \times \log [(3,14 \times 9 \times 4) / 4] = 11,9$$

$$M33 \Rightarrow m_s = 5,7 + 2,5 \times \log [(3,14 \times 69 \times 42) / 4] = 14,1$$

$$M13 \Rightarrow m_s = 5,8 + 2,5 \times \log [(3,14 \times 20 \times 20) / 4] = 12$$

$$M57 \Rightarrow m_s = 9,7 + 2,5 \times \log [(3,14 \times 1,4 \times 1) / 4] = 9,8$$

$$M101 \Rightarrow m_s = 8,3 + 2,5 \times \log [(3,14 \times 29 \times 27) / 4] = 15,3$$

$$M51 \Rightarrow m_s = 9,0 + 2,5 \times \log [(3,14 \times 10 \times 8) / 4] = 13,5$$

En observation visuelle, les objets qui ont une forte magnitude surfacique (chiffre faible) sont plus faciles à observer et tolèrent le grossissement.

A l'inverse les objets qui ont une faible magnitude surfacique (chiffre fort) supportent moins bien les forts grossissements.

LA MAGNITUDE VISUELLE

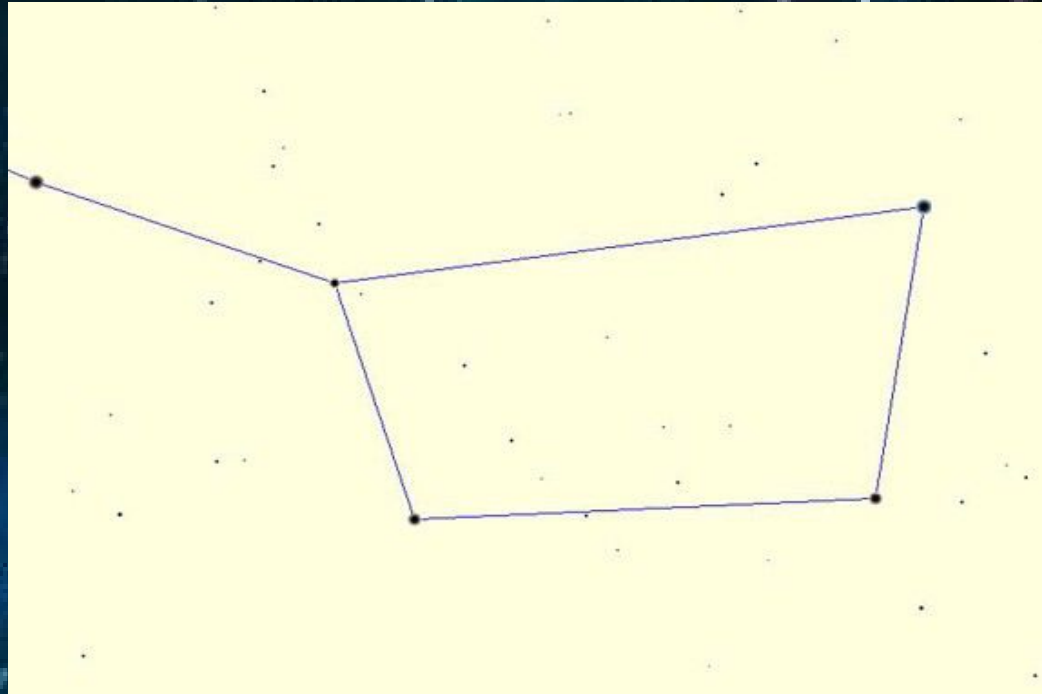
LIMITE À L'ŒIL NU

(M_{vlon})


La Mvlon (on prononce Mavlone) permet de déterminer la transparence du ciel, qui dépend de la turbulence des masses d'air en altitude, de la pollution lumineuse, de l'altitude du site, etc...

La magnitude limite minimum pouvant être perçue par l'œil humain est de 6, mais c'est une moyenne. Elle varie selon les individus et diminue avec l'âge.

La méthode la plus utilisée est celle de la visualisation du nombre des étoiles que nous voyons à l'œil nu dans le ciel, par exemple dans le quadrilatère de la constellation de la Grande Ourse.



Nombre d'étoiles	1	2	3	4	5	6	7	8
Mvlon	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,3	6,4	6,6



**LA MAGNITUDE LIMITE
D'UN INSTRUMENT**

La magnitude limite d'un instrument est une donnée théorique qui ne permet que la comparaison entre plusieurs instruments.

Elle est donnée par la formule :

$$M_{\text{Lim}} = 2,1 + 5 \log D$$

où D est le diamètre en mm de l'instrument.

La magnitude limite en observation visuelle dépend essentiellement du diamètre de votre pupille d'œil, qui diminue avec l'âge. Avant 20 ans, elle est de 7 mm, puis 4 mm de 20 à 40 ans et 2,5 à 3 mm à 60 ans.

La formule usuelle est :

$$M_{\text{Lim}} = m + 5 \log (D/d)$$

où D est le diamètre en mm de l'instrument, d le diamètre en mm de la pupille d'œil et m la magnitude visuelle du ciel prise généralement à 6.

Cette magnitude limite en observation dépend aussi du grossissement. En grossissant on peut gagner 1 magnitude, car on assombrit le fond de ciel. En ville, avec la pollution lumineuse, on peut perdre jusqu'à 3 magnitudes.

Merci d'avoir écouté... sans dormir !