

Atelier 6

Pratique de la photométrie.

Le problème de la classification des étoiles par leurs couleurs étant défini comment la mettre en pratique.

Problème : passer des magnitudes apparentes mesurées avec filtres, qui servent à définir U-B, B-V etc. et remonter ensuite à la magnitude absolue.

La **magnitude absolue** est définie comme celle de l'étoile observée à une distance de 10 pc. de la Terre.

$$M = m + 5 - 5 \log d(\text{pc}) - A$$

M magnitude absolue

m magnitude apparente.

d distance en psec.

A facteur correctif de mesure.

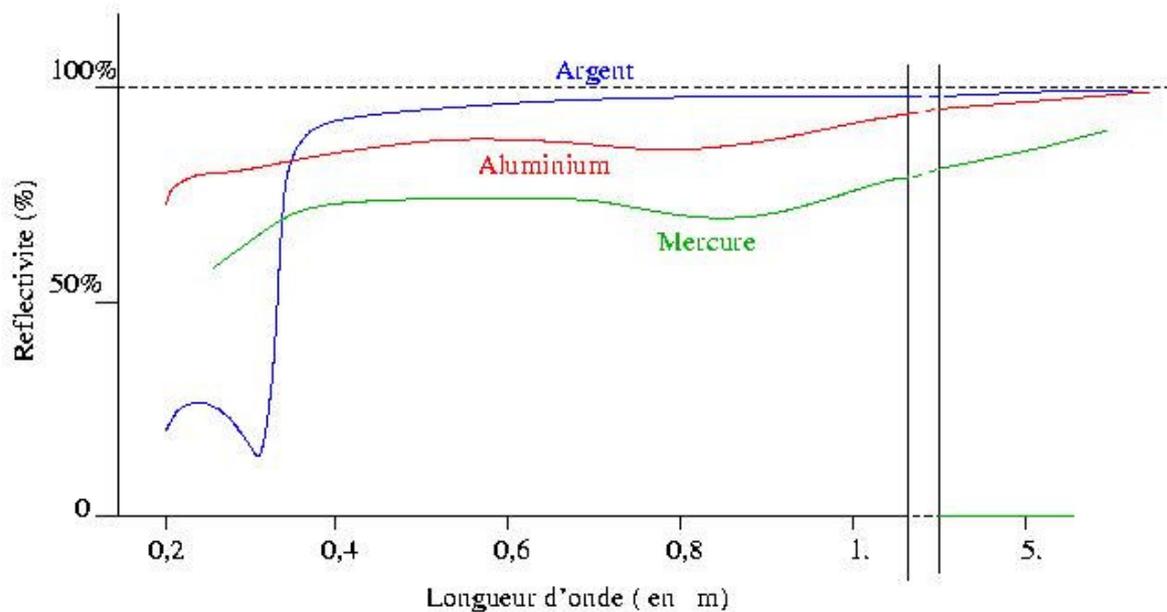
On voit donc que pour exprimer une magnitude absolue il faut connaître la distance de l'étoile, ce qui n'est pas évident. En revanche c'est souvent le procédé inverse qui est utilisé : à partir de la mesure de m et d'une hypothèse sur M , on déduit la distance.

Mesure de m .

La mesure à travers un filtre impose de bien connaître la courbe de réponse et si elle est bien conforme à la courbe standard, sinon il faut faire une correction qui en tienne compte. Ceci est évident à réaliser si on connaît le spectre initial de l'étoile, mais comme on ne connaît que le spectre mesuré c'est plus difficile.

Ce problème se pose quand on utilise des données de mesure anciennes, de quelques dizaines d'années, qui n'utilisaient pas toujours des filtres bien définis ou dans un système différent du Johnson. Par exemple le télescope Hubble n'utilise pas le système Johnson.

La mesure est également affectée par la qualité des surfaces réfléchissantes, qui sont fonction de la longueur d'onde (voir graphique). Les valeurs indiquées sont des valeurs théoriques maximales.



Actuellement pratiquement seul l'aluminium déposé par projection sous vide est utilisé mais la qualité de réflexion dépend du procédé de fabrication et du vieillissement de la couche: oxydation, ternissement.

Il faut aussi tenir compte de la propreté des surfaces : miroir, fenêtres, faces des filtres, ces effets sont difficiles à évaluer et variables en particulier liés à l'hygrométrie de l'atmosphère : dépôts de buée. Les fumées, celles de cigarettes entre autres, sont mortelles pour l'optique.

Ces effets expérimentaux sont souvent difficiles à maîtriser car ils s'ajoutent à d'autres effets atmosphériques dont ils ne se distinguent pas aisément.

Corrections de mesure : facteur A

Ces corrections dépendent d'effets physiques et sont, théoriquement, évaluables mais requièrent souvent des données non connues. Elles se séparent en deux parties, les corrections atmosphériques et hors atmosphère mais les causes sont, au moins partiellement communes.

Déplacement du spectre dit aussi effet Doppler : essentiellement dû à la vitesse radiale du corps observé. Il peut s'agir d'un décalage vers le rouge, aussi bien que vers le bleu, selon que l'objet s'éloigne ou se rapproche de la terre. Cet effet est fondamental pour l'étude des raies du spectre, il permet d'ailleurs d'évaluer la vitesse radiale, pour la couleur son effet est plus faible pour les étoiles de la voie lactée, pour les galaxies il peut n'être pas négligeable, le spectre se déplaçant par rapport à la bande sélective du filtre.

Rougisement du spectre.

En traversant l'atmosphère ou les nuages moléculaires intra galactiques, la lumière est diffusée par les molécules, c'est la diffusion Rayleigh, ou par les poussières qui sont des amas de molécules.

La diffusion est d'autant plus forte et à grand angle que la longueur d'onde est petite par rapport aux centres diffuseurs. Cela s'observe facilement, le ciel est bleu (parfois) car la composante bleue des rayons du Soleil est diffusée à grand angle, en revanche le soir la lumière du soleil traversant une grande quantité d'atmosphère et vue sous un petit angle apparaît rouge, la composante bleu ayant été diffusée davantage que la rouge.

Après avoir traversé l'atmosphère un spectre aura donc la composante rouge moins diffusée que la bleue, cela produit le rougisement du spectre.

La formule de Rayleigh qui donne l'absorption moléculaire :

$$\sigma = 1,04 \times 10^5 (n - 1)^2 / \lambda^4$$

n = indice de réfraction

λ en μm

Montre bien la forte dépendance en fonction de la longueur d'onde λ .

Pour appliquer la formule il faut tenir compte :

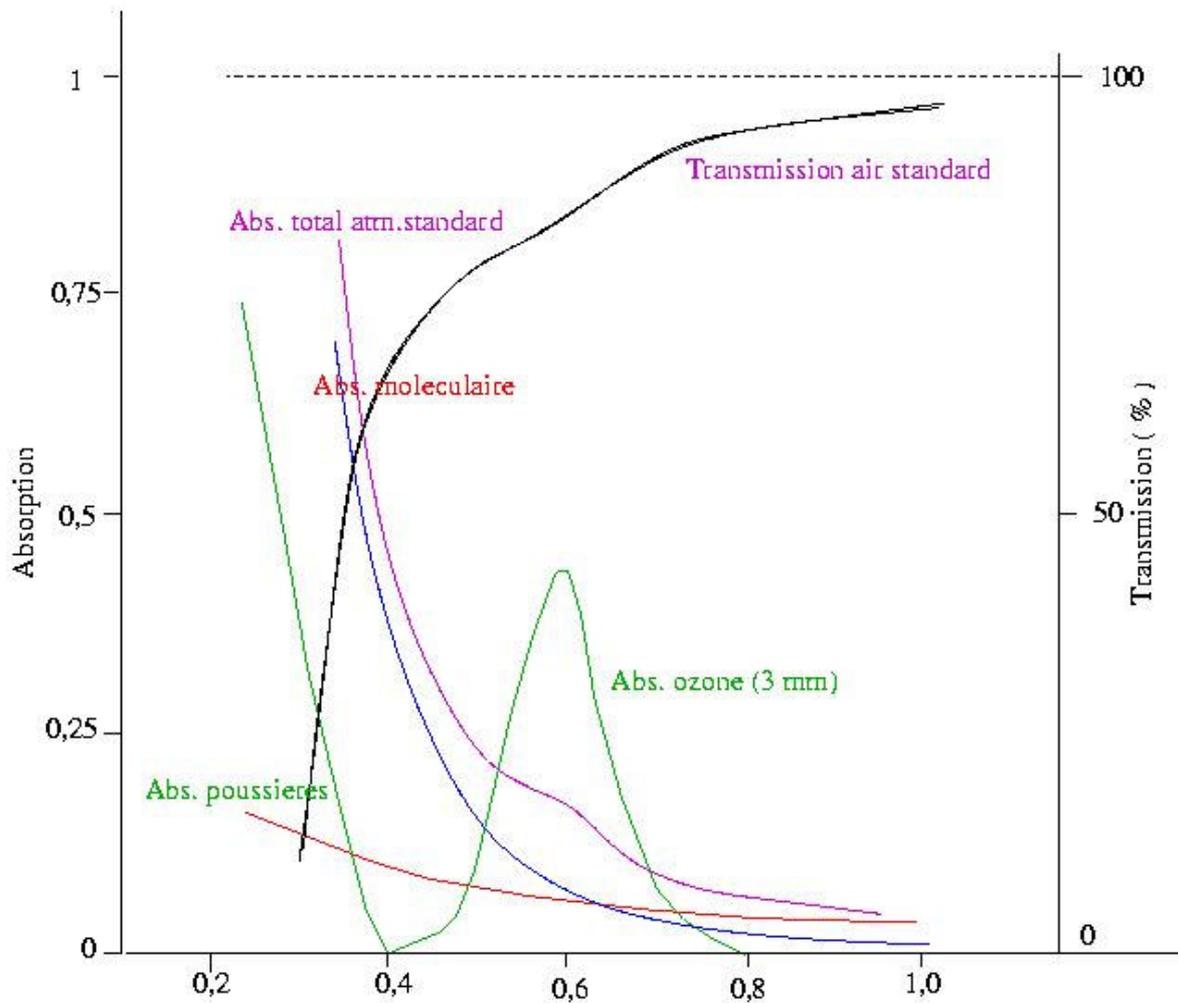
- De l'épaisseur d'air traversée qui dépend de l'altitude de l'observation, de l'angle zénithal d'observation θ (effet en $1/\cos \theta$) et de la pression atmosphérique.
- De la composition moléculaire de l'air, les trois composantes principales : azote : 78,08%, oxygène 20,94%, argon 0,93% en volume, sont fixes, la contribution de vapeur d'eau varie de 0,1% à > 2,8% selon les endroits. (En général quand la concentration en eau atteint ces valeurs hautes elle se marque par des condensations et gouttelettes, on déclare la nuit non photométrique et on passe à autre chose).

L'absorption sur les poussières est beaucoup plus aléatoire et dépend fortement du site. Dans poussière on inclut bien entendu les aérosols et condensats de vapeur d'eau, communément appelés nuages.

Quand les centres diffuseurs ont entre 0,1 et 10 fois la longueur d'onde on parle de diffusion de Mie, plus gros ce sont des poussières.

La dépendance en longueur d'onde est beaucoup plus faible, on la prend en $\lambda^{-1,3}$. Les grandes longueurs d'ondes, infrarouges, sont peu absorbées, les planètes qui émettent surtout en infrarouge peuvent être observées à travers les nuages (au moins certains nuages !).

Les valeurs quottées ci-dessous dans le graphique se réfèrent à de très bonnes conditions, pour les poussières elles peuvent être jusqu'à dix fois plus mauvaises.



Pour l'atmosphère l'ozone a un effet particulièrement violent, bien qu'étant en quantité quasi négligeable, dans le domaine de l'ultra violet, donc à la limite du filtre U. Il s'agit aussi bien de la couche d'ozone en stratosphère que de l'ozone diffus. La courbe d'absorption de l'ozone représentée sur le graphique est relative à une concentration de 3mm, jamais atteinte heureusement, son effet réel moyen correspond à l'épaulement vers 600 nm sur la courbe totale.

La courbe d'absorption totale tient compte d'un taux de poussières léger, il peut varier de 1 à 10, dans ces cas la transmission a une toute autre allure.

Les effets de rougissement créés par l'atmosphère se produisent également dans les nuages moléculaires intra galactiques traversés par la lumière avant de parvenir sur Terre. Elle peut mener à une absorption totale. Par exemple le centre galactique est complètement caché en visible par des nuages de poussières, mais observable en infra rouge.

Les nuages moléculaire n'ont pas la même composition que l'atmosphère, on y trouve principalement les molécules d'eau, de gaz carbonique et des radicaux carbonés : CHO, CNH, CH₄, ...leur composition est établie à partir des raies

d'absorption qu'on y mesure mais les corrections correspondantes ne sont pas évidentes.

Un autre effet des poussières est de s'aligner selon la direction des champs magnétiques présents dans la galaxie et de diffuser la lumière en la polarisant partiellement, il faut alors en tenir compte si le récepteur est sensible à la polarisation.

Un autre endroit où les effets de rougissement sont particulièrement important sont les jeunes étoiles en formation au sein de nuages de gaz et de poussières qui sont directement absorbants.

On peut constater que les corrections ne sont pas négligeables, cumulées elles peuvent être de 10 à 100%, et souvent incertaines. Quand on espère mesurer une magnitude à 1% près ou mieux, ce qui est le but quand on cherche à mesurer le taux de variabilité intrinsèque d'une étoile, ou par exemple rechercher les occultations par des planètes, les variations d'effets atmosphériques sont critiques, même si on ne veut mesurer que les magnitudes relatives.

C'est pourquoi dans les mesures on se réfère souvent à des étoiles types, bien étalonnées par des mesures multiples, que l'on trouve en catalogue, celui de Henden est l'un des plus utilisé. On choisit une (ou des) étoiles de référence proches de celle que l'on veut mesurer, de façon à se trouver dans des conditions d'absorption atmosphériques proches et on travaille par comparaison en mesure relative.

On peut aussi utiliser la moyenne de plusieurs étoiles du champ dont on se convainc qu'elles ne sont pas variables, et estimer ainsi la variation relative par rapport à cette moyenne, c'est très utilisé pour les occultations ou les lentilles gravitationnelles où l'on compare des images prises à plusieurs heures ou jours d'intervalle.

Effets de bord (limb darkening)

Quand on mesure la luminosité d'une surface, étoile ou autre objet, ce qui est significatif est la lumière émise perpendiculairement à la surface selon la ligne de visée. Cela n'est réalisé qu'au centre du disque. Dès qu'on s'en éloigne on observe sous un certain angle α . La luminosité totale est obtenue en intégrant sur tous les points de la surface émettrice, qui est une demi sphère.

L'émission du rayonnement est en général indépendante de la direction sous laquelle on la regarde, émission dite « Lambertienne », loi d'émission en :

$$\frac{dL}{d\Omega} = 2\pi \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \cdot d\varphi$$

ce qui revient à dire que le flux de lumière reçu de la demi sphère est la même que celui reçu par un disque dont la luminosité est constante et égale à celle du centre. Parfait !

Mais l'émission n'est jamais réellement Lambertienne et chaque étoile, en plus de sa photosphère émettrice, est entourée par une chromosphère, beaucoup moins dense que la photosphère et difficilement visible, c'est la couronne observée sur le Soleil durant les éclipses. Si cette chromosphère émet peu, en revanche elle absorbe. En particulier la lumière émise au bord du disque traverse en fait une couche importante de chromosphère et donc le bord du disque apparaît plus sombre. Ce phénomène d'obscurcissement du bord n'a été observé que très récemment sur de grosses étoiles par suite de la bonne définition du HST qui permet de balayer la surface de l'étoile. La correction est liée au type d'étoile dont les chromosphères varient selon l'état d'évolution.

On connaît très bien cet effet pour le Soleil, il est facile à observer, et fait l'objet de tabulations.

Bien entendu cet obscurcissement est fonction de la longueur d'onde.

Traitement d'image.

Problème : extraire de la donnée ce qui appartient à l'étoile de ce qui ne lui appartient pas, c'est-à-dire, la lumière parasite dite de fond de ciel et celles d'autres étoiles confondues dans la tache de seing.

Quand c'est une étoile couplée ou en coïncidence accidentelle dans la limite de la résolution angulaire, c'est en général par le mélange des spectres qu'on les distingue.

Pour l'élimination du fond, supposé continu sous l'étoile on l'interpole entre ses valeurs qui encadrent l'étoile en adaptant une surface continue (polynomiale) et en soustrayant sa contribution sous la tache de seing. Il existe dans les programmes de traitement d'images toutes sortes d'algorithmes de synthèse d'ouverture qui font le partage entre un fond adapté et une forme supposée de tache de seing ou de développements en ondelettes ou autres. Quand on travaille sur une étoile bien centrée on connaît ou on étalonne la forme de la tache de seing sur des étoiles brillantes, quand on travaille sur un champ étendu d'étoiles hors axe le problème se complique car la tache de seing varie d'un point à l'autre du champ par des effets de coma en particulier.

Si le fond de ciel est trop important le résultat n'est jamais bon et il vaut mieux ne pas faire de photométrie dans ces conditions.

Qu'est-ce qu'un bon ciel ??

Contributions relatives du ciel nocturne.

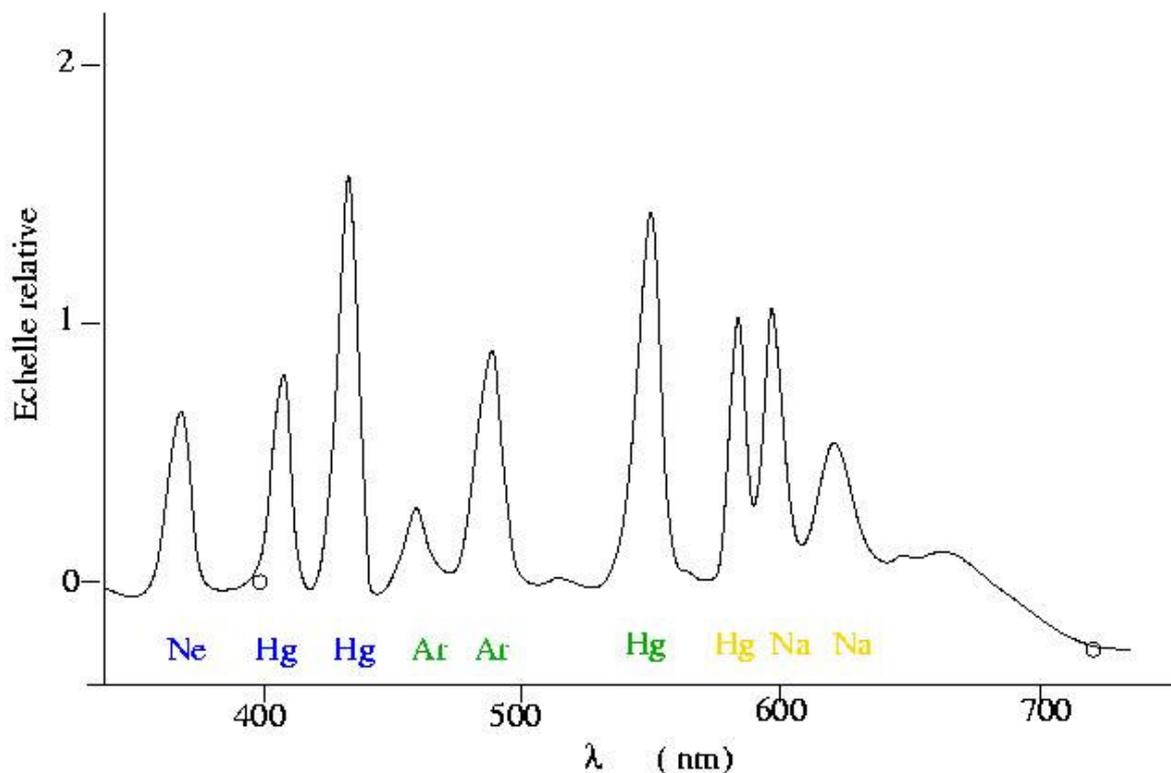
On peut bien entendu ne les définir que pour des conditions moyennes.

Les unités étant peu parlantes on adoptera une unité imagée : le nombre d'étoiles de magnitude 10 par deg^2 , on utilisera aussi le stilb, unité photométrique.

Source	Photographique 10 ^{ème} mag (deg) ²	Visuel	Photométrie 10 ⁻⁹ stilb
Scintillation de l'air (zénith)			
Lignes atomiques	0	40	3
Continuum	30	50	4
Lumière zodiacale (hors zodiaque)	60	100	6
Etoiles faibles (m > 6)			
Pole galactique	16	30	2
Ciel moyen	48	95	7
Equateur galactique	140	320	23
Lumière galactique diffuse	10	20	1
Brillance totale			
Zénith, ciel moyen	145	290	21
Alt. 15 deg, ciel moyen	190	380	28

Les valeurs indiquées ci-dessus concernent les causes « naturelles », elles sont souvent dominées par les causes artificielles : éclairages publics ou privés.

A titre d'exemple la figure suivant donne un relevé spectroscopique du ciel à Paris, il est nettement dominé dans le domaine visible par les raies d'émission de l'éclairage public, on peut en distinguer quelques unes très caractéristiques des lampes couramment utilisées.



Quelques unités pour ceux qui ne sont pas rebutés.

$$1 \text{ photon} = 1,986 \times 10^{-7} / \lambda \text{ (}\lambda \text{ en nm) erg}$$

1 rayleigh = R = 10^6 photons émis dans toutes les directions par cm^2 de colonne verticale et par sec

$$R = 1,58 \times 10^{-2} / \lambda(\text{nm}) \text{ erg.cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ au zénith}$$

$$R = 1,96 \times 10^{-11} \text{ stilb pour } \lambda = 550 \text{ nm}$$

1 étoile de (mv=10) près de 550 nm et en atmosphère claire

$$= 0,036 \text{ R /nm}$$

$$= 0,072 \times 10^{-9} \text{ stilb}$$

Quelques compléments :

Indice de couleur du ciel nocturne $\sim +0,7$

Brillance de la lune : pleine lune en étoiles de mv=10 / (deg)²

Photographique 11000

Visuel 1000

Facteur de phase $\Phi(\alpha)$, voir courbe.

α est l'angle entre la terre et le Soleil vu depuis la Lune.

(Notez que la courbe $\Phi(\alpha)$ avec cette définition de α est valable pour toutes les planètes et permet de calculer leur variation d'éclat)

