

Photométrie Stellaire

Systèmes photométriques

Master Astrophysique 1ère année
Université de Toulouse

Magnitude apparente

Le flux de radiation à la longueur d'onde λ en provenance d'une étoile est modifié par l'atmosphère terrestre et par la réponse de l'instrument collecteur:

$$f = \int_0^{\infty} f_{\lambda}^0 T_{\lambda} R_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda$$

T_{λ} est le facteur de *transmission atmosphérique*

R_{λ} est la *réponse de l'instrument* (collecteur + détecteur)

G_{λ} est le facteur de *transmission du filtre* éventuel.

dimension d'un *flux d'énergie*: $J m^{-2} s^{-1} = W m^{-2}$ (SI) ou $erg cm^{-2} s^{-1}$ (cgs)

échelle des *magnitudes*: l'œil répond linéairement à une excitation qui croît de façon logarithmique ($k = 2.5$):

$$m_1 - m_2 = -k \log \left(\frac{f_1}{f_2} \right)$$

Le flux total est l'intégrale sur toute les longueurs d'onde de la densité de flux $S(\lambda)$:

$$S(\lambda) = f(\lambda) / \Delta\lambda$$

Unités de densité de flux:

SI: $\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ ou $\text{W m}^{-2} \text{\AA}^{-1}$

cgs: $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ ou $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$

Jansky: unité de densité de flux utilisée en radio-astronomie

$$\begin{aligned} 1 \text{ Jansky} &= 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1} \\ &= 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \end{aligned}$$

Exemples:

- Constante solaire: flux d'énergie total du soleil hors de l'atmosphère terrestre:
 $f_{\odot} = 1.353 \cdot 10^6 \text{ erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$
- Quasar 3C273: $S(\nu) = 46 \text{ Jansky}$ à 1400 Mhz

Magnitudes AB

Échelle spectro-photométrique absolue de Oke (1965)

$$AB = -2.5 \log_{10}(F_{\nu}) + 48.60$$

F_{ν} : $W m^{-2} Hz^{-1}$ ou $erg s^{-1} cm^{-2} Hz^{-1}$

AB de Vega = 0 à 5000Å

Magnitude AB:

$$m_{AB} = -2.5 \frac{\int f_{\nu} T_{\nu} d\nu/\nu}{\int T_{\nu} d\nu/\nu} - 48.60$$

T_{ν} est la transmission du filtre et f_{ν} est la distribution spectrale d'énergie de l'objet.

Conversion du système « Vega » au système AB:

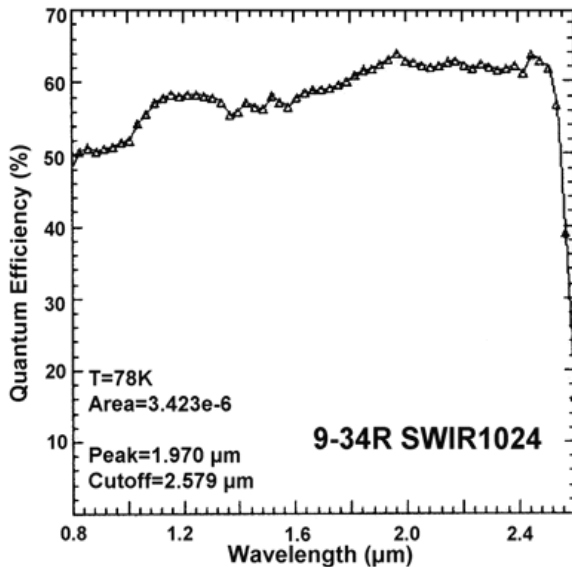
Magnitude AB d'une étoile de magnitude 0:

Filtre	B	-0.072
	V	0.018
	R	0.134
	I	0.425
	J	0.898
	H	1.380
	K	1.885

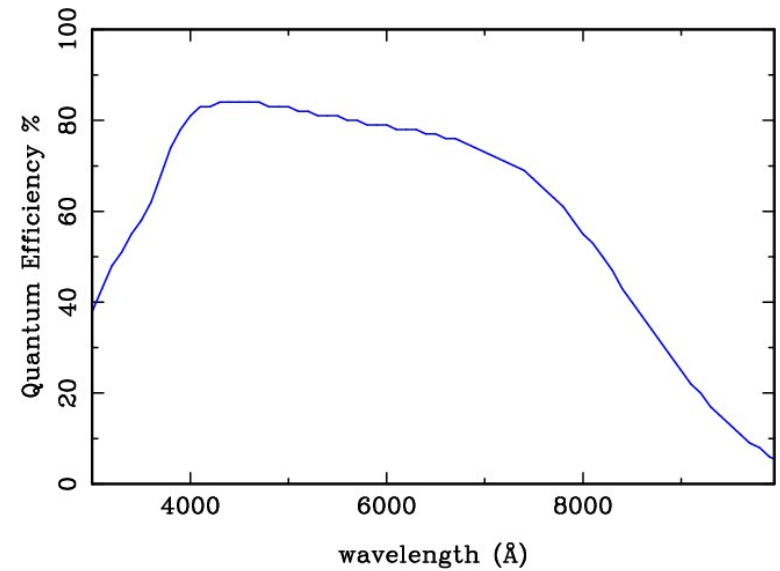
Réponse des détecteurs

- CCDs amincis: sensible dans le bleu
- CCDs épais: sensible dans le rouge
- Détecteurs infrarouge: ~80% entre 1000 nm et 2500 nm

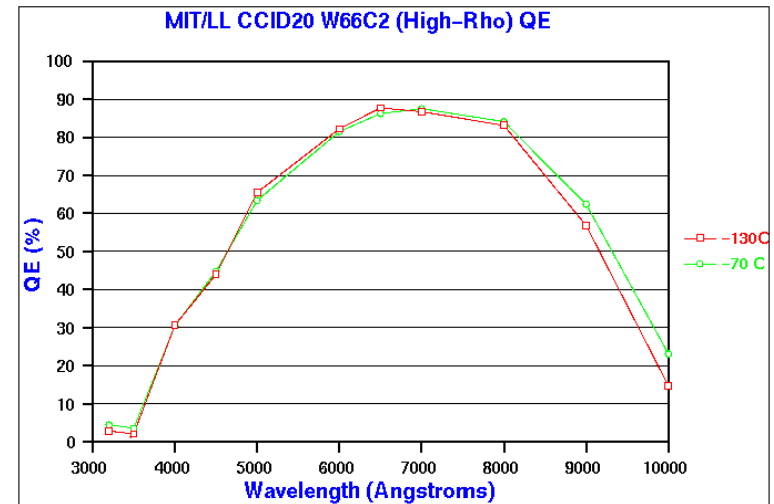
« Detector quantum efficiency: The quoted quantum efficiencies by Rockwell Scientific in J and K are between 70 and 85%. From on-sky tests, it appears that the four science chips have the same efficiency to within 10%. »



Réponse d'un détecteur IR Rockwell Hawaii-1Kx1K (1999)



Réponse d'un CCD aminci (caméra MEGACAM-CFHT, CCD EEV)



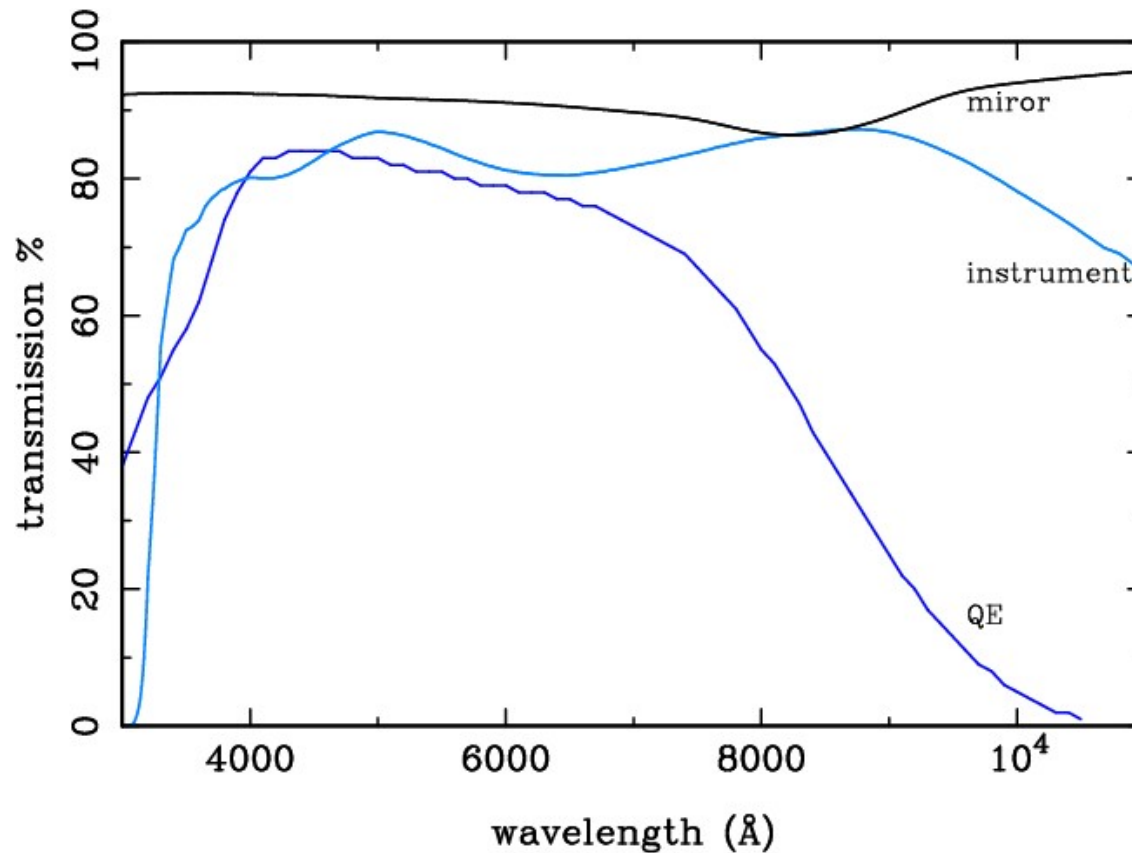
Réponse d'un CCD épais (CCD MIT)

$$f = \int_0^{\infty} f_{\lambda}^0 T_{\lambda} R_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda$$

T_{λ} est le facteur de *transmission atmosphérique*

R_{λ} est la *réponse de l'instrument* (collecteur + détecteur)

G_{λ} est le facteur de *transmission du filtre* éventuel.

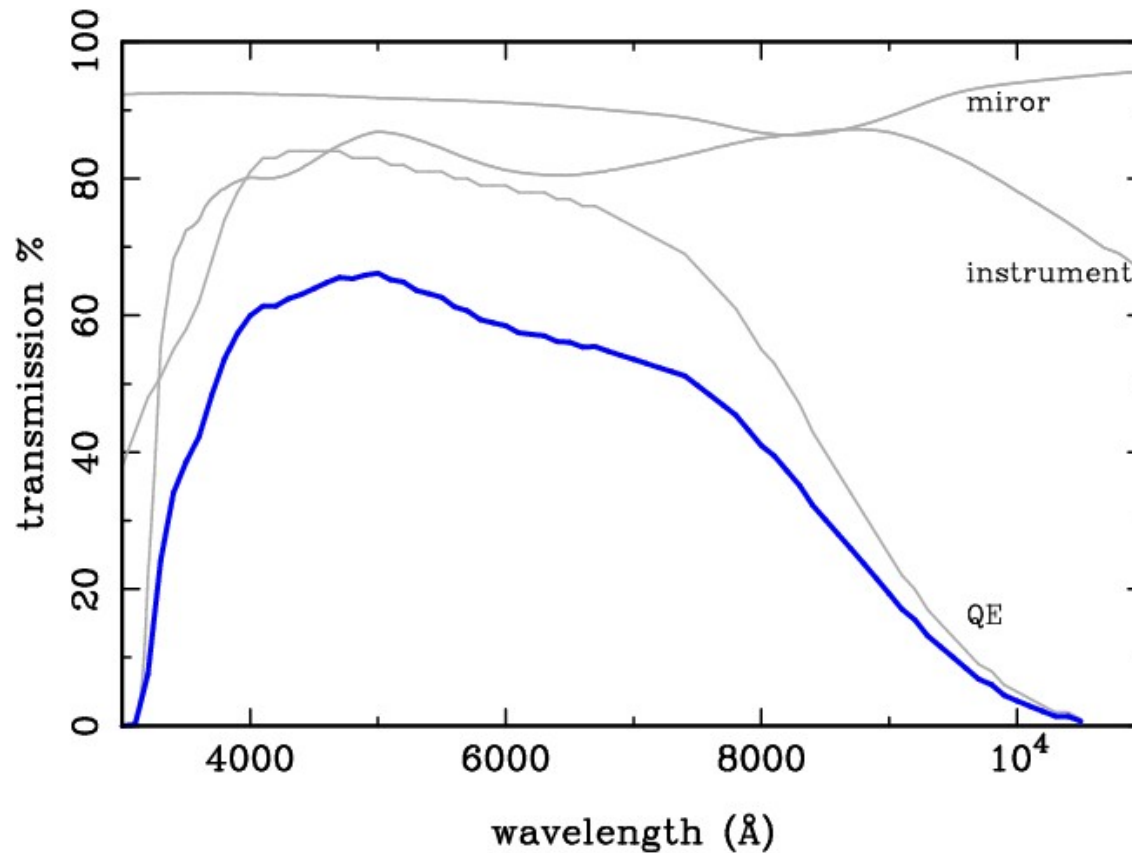


$$f = \int_0^{\infty} f_{\lambda}^0 T_{\lambda} R_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda$$

T_{λ} est le facteur de *transmission atmosphérique*

R_{λ} est la *réponse de l'instrument* (collecteur + détecteur)

G_{λ} est le facteur de *transmission du filtre* éventuel.

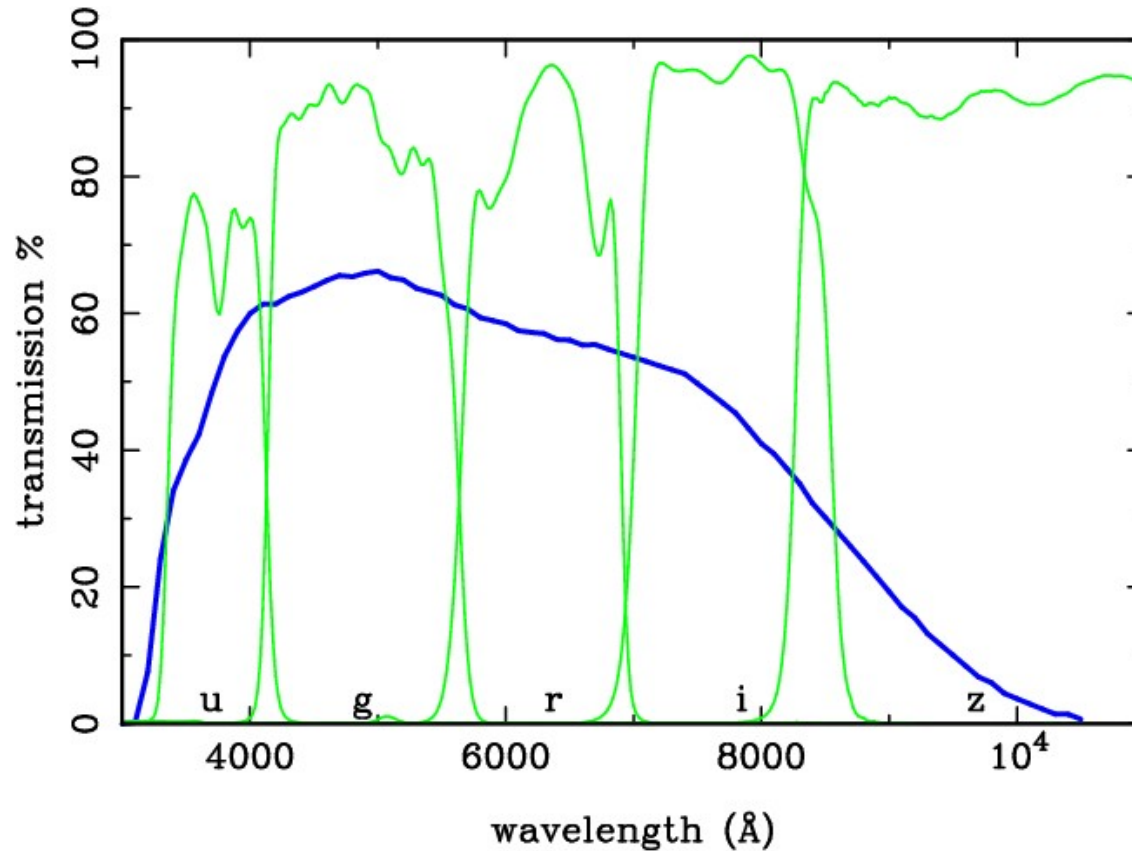


$$f = \int_0^{\infty} f_{\lambda}^0 T_{\lambda} R_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda$$

T_{λ} est le facteur de *transmission atmosphérique*

R_{λ} est la *réponse de l'instrument* (collecteur + détecteur)

G_{λ} est le facteur de *transmission du filtre* éventuel.

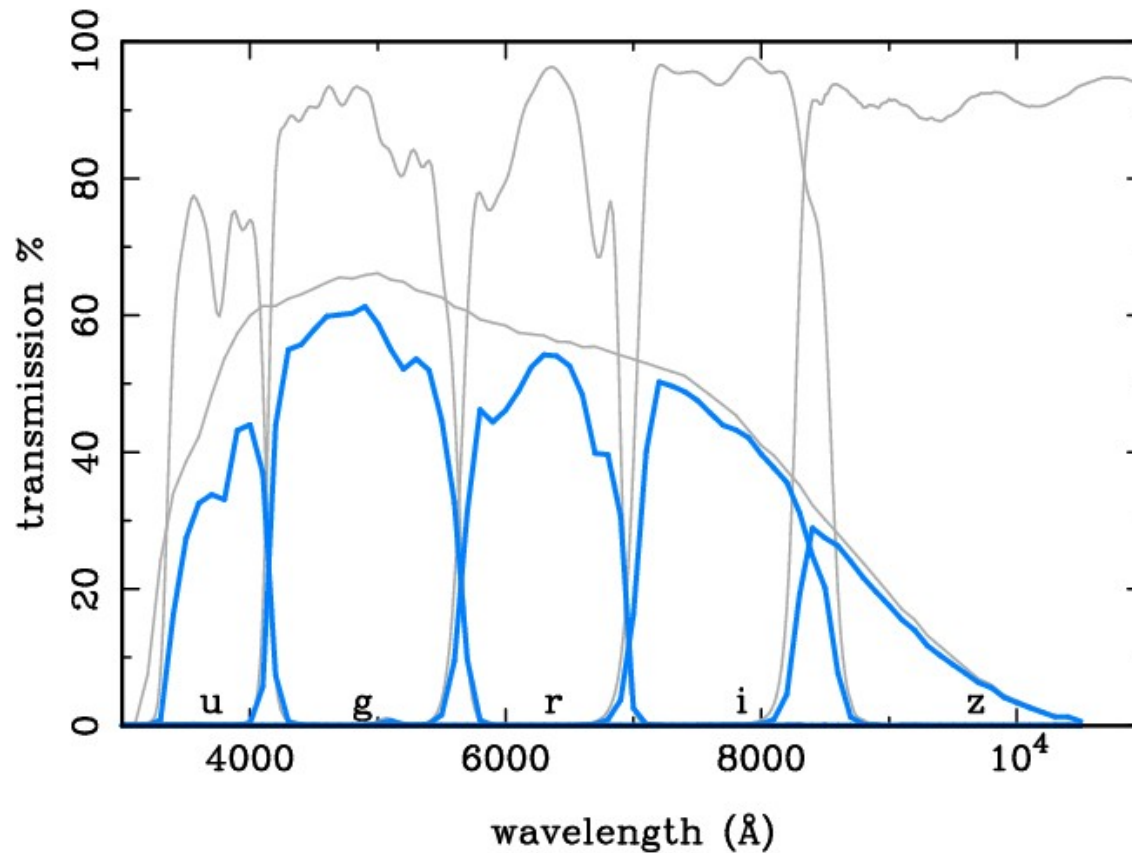


$$f = \int_0^{\infty} f_{\lambda}^0 T_{\lambda} R_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda$$

T_{λ} est le facteur de *transmission atmosphérique*

R_{λ} est la *réponse de l'instrument* (collecteur + détecteur)

G_{λ} est le facteur de *transmission du filtre* éventuel.

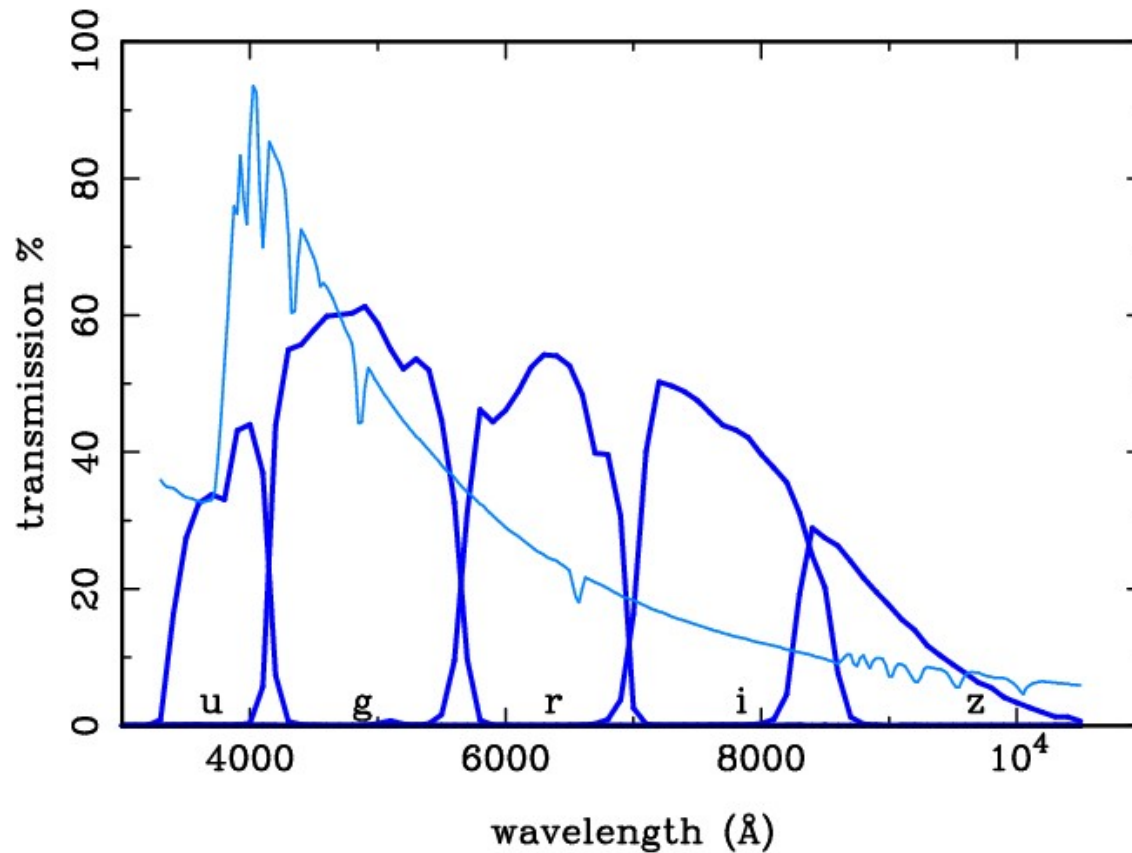


$$f = \int_0^{\infty} f_{\lambda}^0 T_{\lambda} R_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda$$

T_{λ} est le facteur de *transmission atmosphérique*

R_{λ} est la *réponse de l'instrument* (collecteur + détecteur)

G_{λ} est le facteur de *transmission du filtre* éventuel.



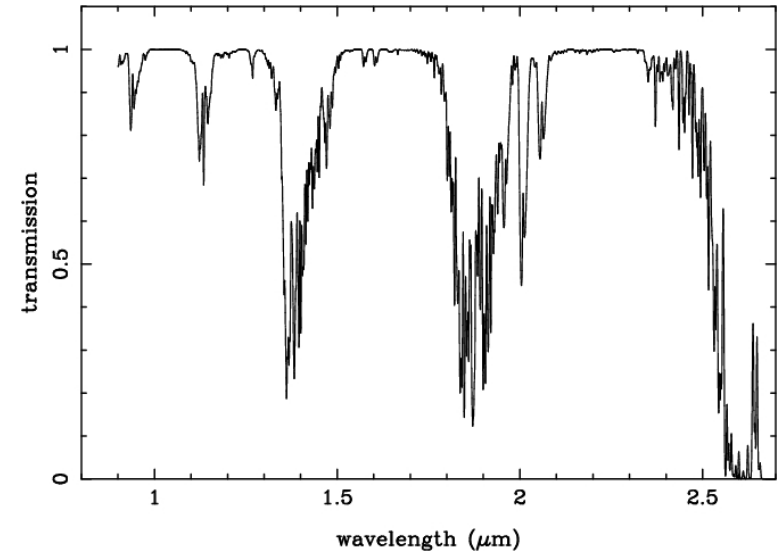
Transmission atmosphérique

Extinction atmosphérique: absorption + diffusion

- *Absorption* de la lumière par les molécules de l'atmosphère.

L'énergie absorbée est éventuellement ré-émise sous forme de bandes d'émission.

Spectre brut montrant les raies d'émission et les bandes moléculaires OH atmosphériques (image négative) obtenu avec FORS2-VLT. Les spectres de 2 galaxies apparaissent faiblement parmi les raies du ciel. Domaine visible: $\sim 5000\text{\AA}$ à 8000\AA .



Absorption par les molécules OH et H₂O dans l'infrarouge proche

- *Diffusion*: collision photon-particule et changement de direction du rayon lumineux.
 - Diffusion par les molécules: diffusion Rayleigh. Approximativement $\mu \propto \lambda^{-4}$.
 - Diffusion par les grains de poussière et les gouttes d'eau: diffusion de Mie. $\mu \propto \lambda^{-1}$.

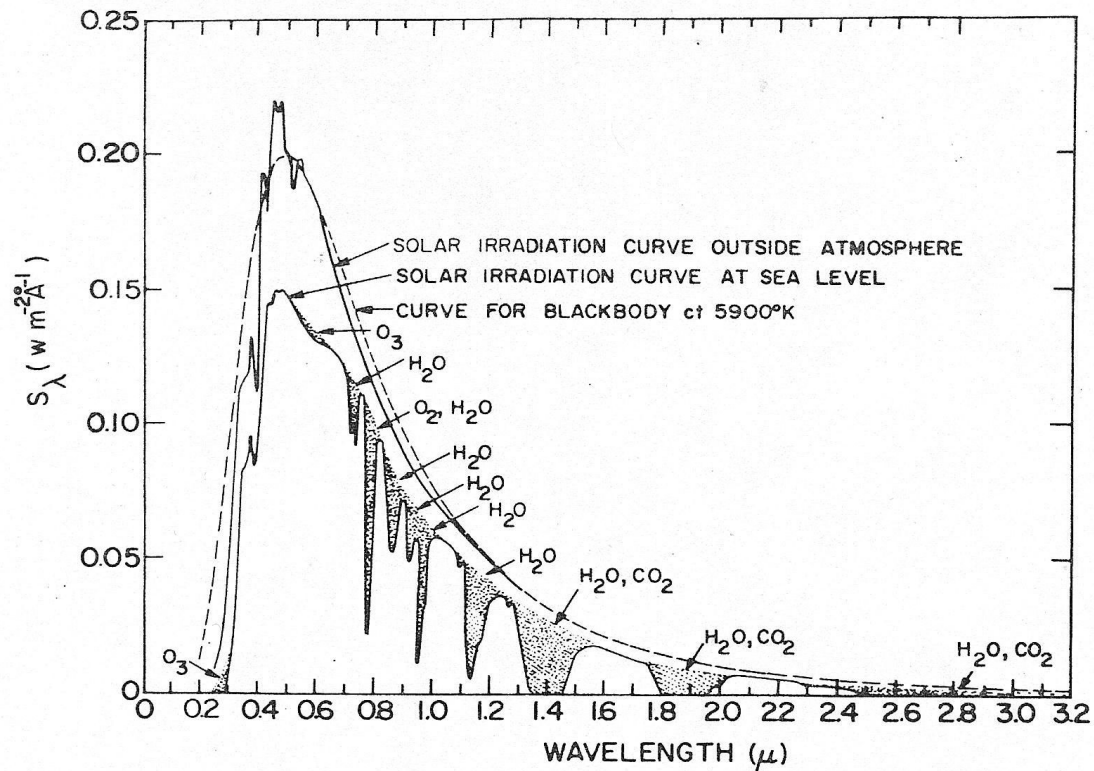


FIG. 5.16 Energy distribution in the solar spectrum.

Bandes d'absorption moléculaires dans l'atmosphère terrestre

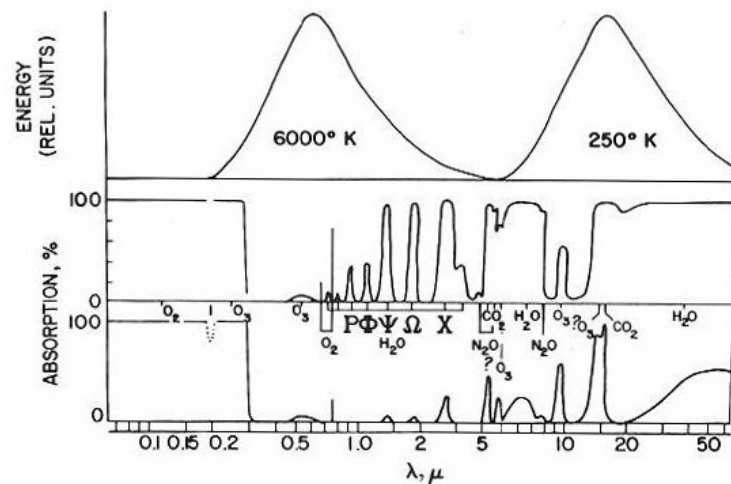


FIG. 3.3 Atmospheric absorption spectrum at the level of the earth's surface (the middle part of the figure) and at the altitude of 10 km (the lower curve). After Goody [34].

(« Radiation in the atmosphere », K. Ya. Kondratyev, 1969)

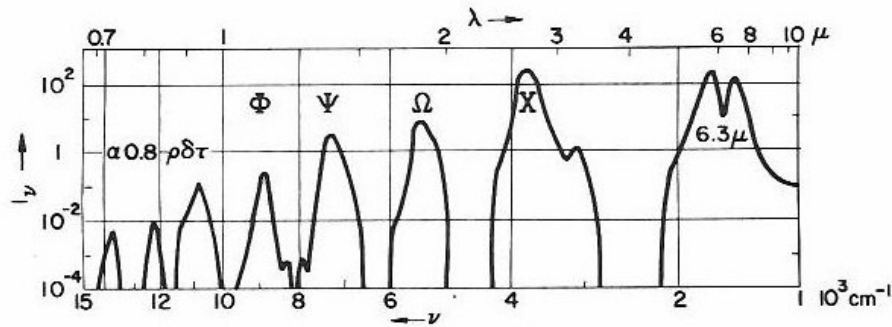


FIG. 3.6 Generalized absorption coefficient of water vapor. After Yamamoto and Onishi [85].

Bandes d'absorption moléculaires dans l'atmosphère terrestre

Absorption de l'eau

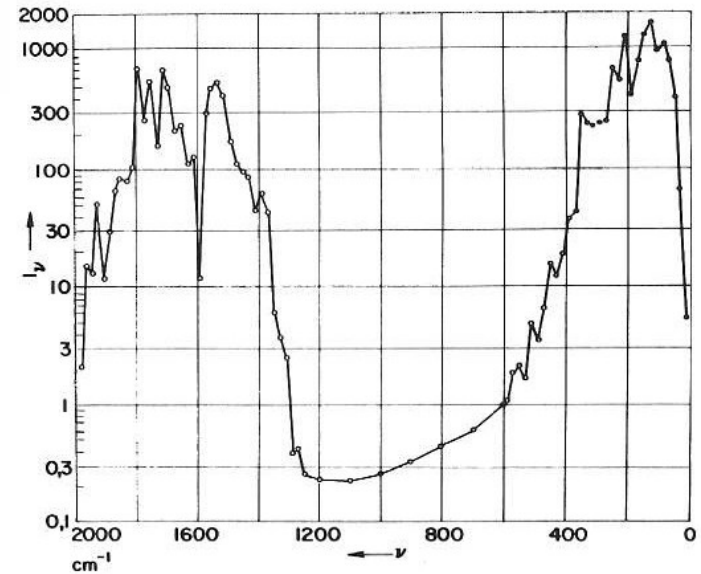


FIG. 3.8 Generalized coefficients of water vapor in the far infrared. After Yamamoto and Onishi [84].

(« Radiation in the atmosphere », K. Ya. Kondratyev, 1969)

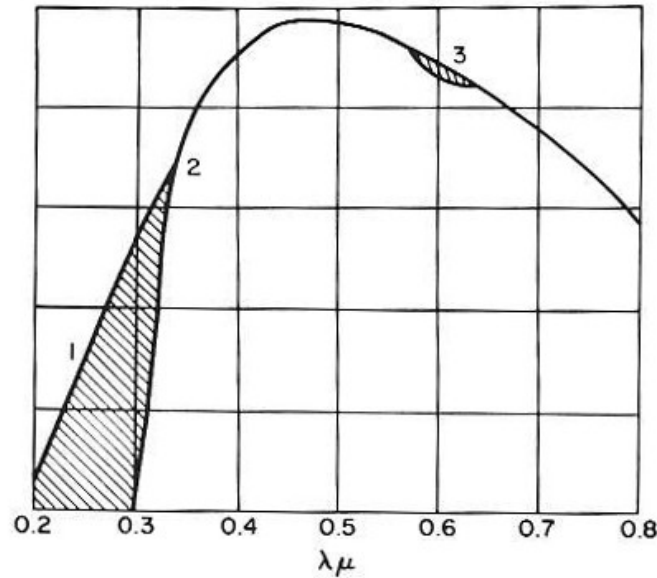


FIG. 3.15 Absorption of solar radiation by ozone. After Kalitin

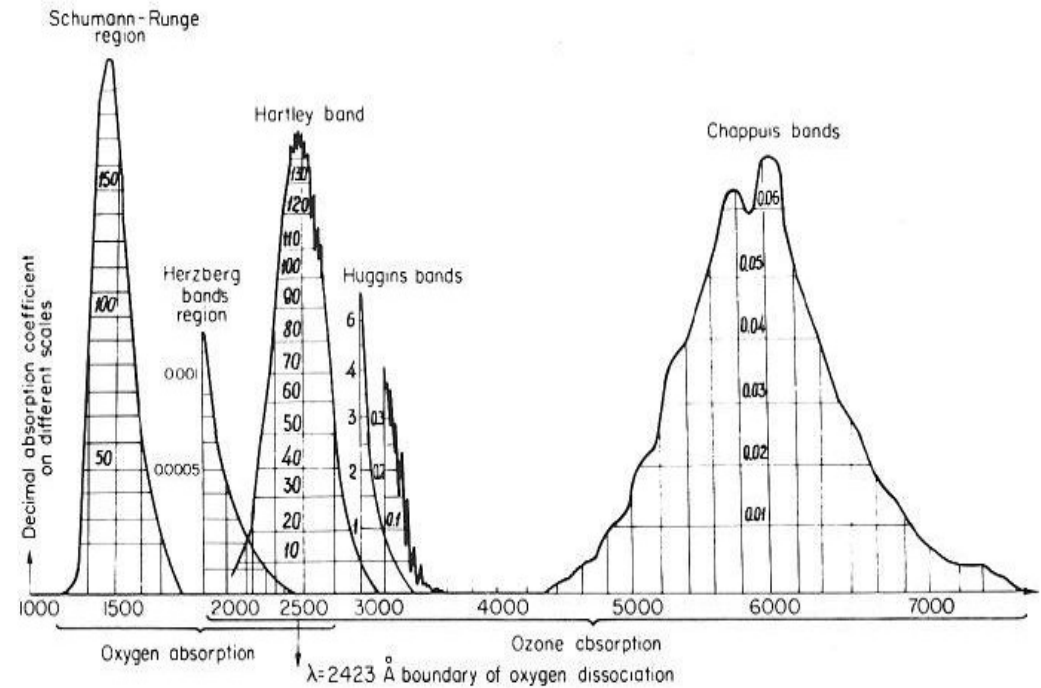


FIG. 3.14 Absorption coefficients of ozone and oxygen in the ultraviolet and visible spectral regions (on different scales). After Prokofyeva [101].

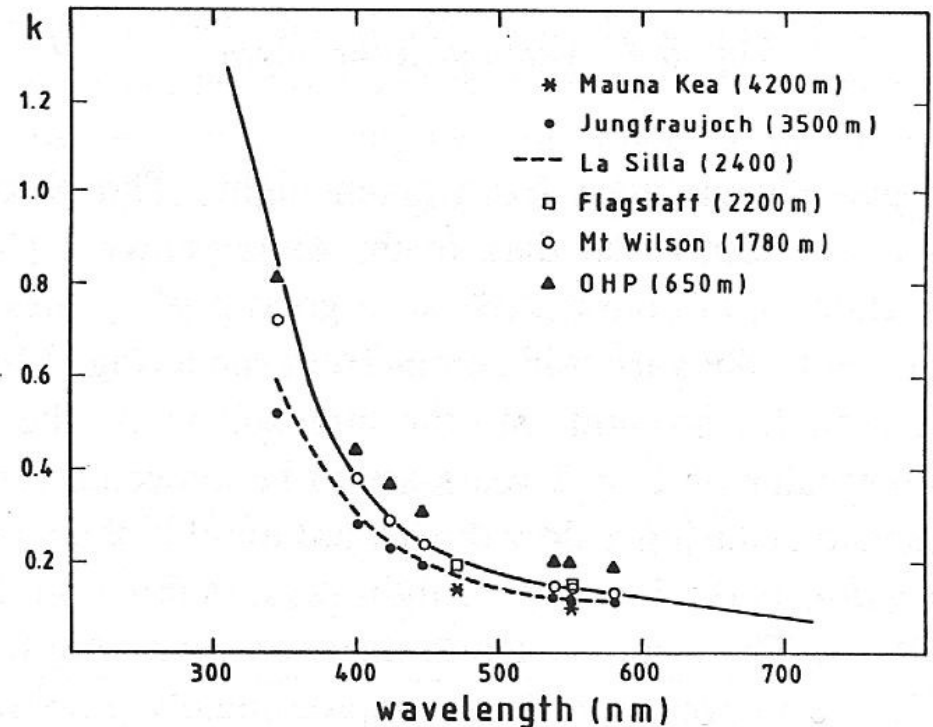
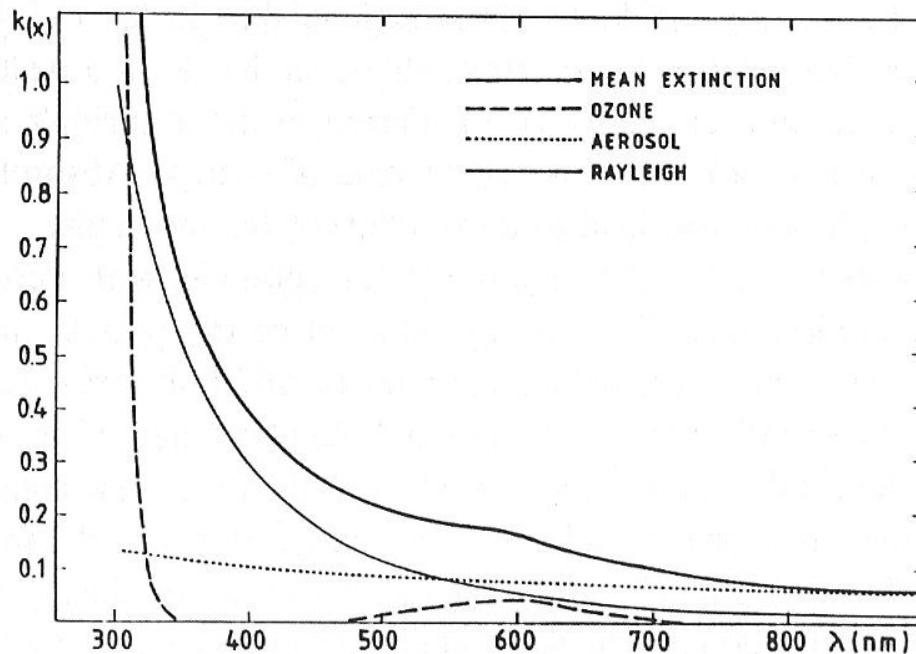
Bandes d'absorption moléculaires dans l'atmosphère terrestre

Absorption de l'ozone

(« Radiation in the atmosphere », K. Ya. Kondratyev, 1969)

Dépendance de l'extinction atmosphérique avec la longueur d'onde

- Conditions normales dominées par la diffusion Rayleigh.
- L'extinction dans le rouge est moindre que dans le bleu.
 - 15% au zénith à $\sim 5000\text{\AA}$
 - $\sim 100\%$ à 2900\AA
- Cause de la couleur bleue du ciel (diffusion Rayleigh).



Masse d'air

variation d'intensité dans une couche dh de l'atmosphère:

$$dI(\lambda, h) = \kappa(\lambda, h) \rho(h) I(\lambda, h) \sec z \, dh$$

κ est le coefficient d'absorption, ρ est la masse spécifique de l'air et z la distance zénithale.

En intégrant entre le site d'observation (h_0) et les couches externes de l'atmosphère (h_1):

$$I(\lambda, h_0) = I(\lambda, h_1) e^{-\int_{h_0}^{h_1} \kappa(\lambda, h) \rho(h) \sec z \, dh}$$

L'angle z dépend de l'altitude, à cause de la réfraction, et en première approximation $\kappa(\lambda)$ ne dépend pas de l'altitude:

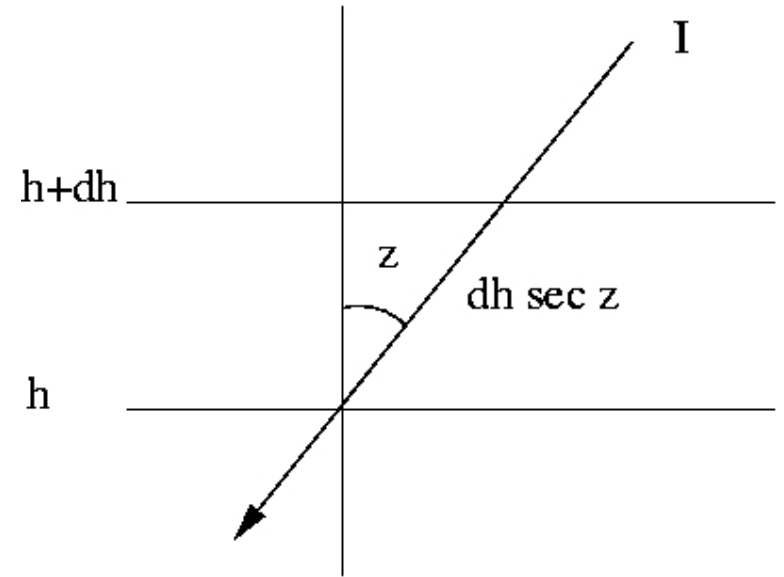
$$I(\lambda, h_0) = I(\lambda, h_1) e^{-\kappa(\lambda) \int_{h_0}^{h_1} \rho(h) \sec z(h) \, dh}$$

L'intégrale est la masse d'air contenue dans la colonne parallèle au rayon lumineux, de section unité. En photométrie la définition de la "*masse d'air*" est:

$$X = \frac{\int_{h_0}^{h_1} \rho(h) \sec z(h) \, dh}{\int_{h_0}^{h_1} \rho(h) \, dh}$$

d'où:

$$I(\lambda, h_0) = I(\lambda, h_1) e^{-\kappa(\lambda) X(z)} \int_{h_0}^{h_1} \rho(h) \, dh = I(\lambda, h_1) e^{-\kappa(\lambda) X(z)} \alpha$$



exprimée en magnitudes:

$$\begin{aligned} m(\lambda, h_0) &= m(\lambda, h_1) + 2.5 \log(e) \kappa(\lambda) X(z) \alpha \\ &= m(\lambda, h_1) + k(\lambda) X(z) \end{aligned}$$

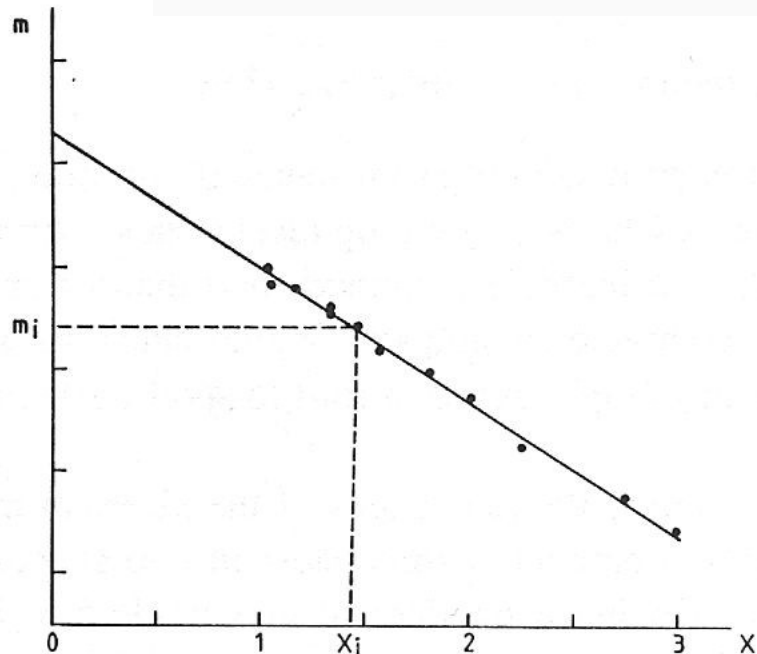
Cette expression est appelée *loi de Bouguer*.

$k(\lambda)$ est le *coefficient d'extinction* monochromatique

$$k(\lambda) = 2.5 \log(e) \kappa(\lambda) \alpha \approx 1.086 \kappa(\lambda) \alpha$$

Approximation pour le calcul de la masse d'air (Hardie, 1962):

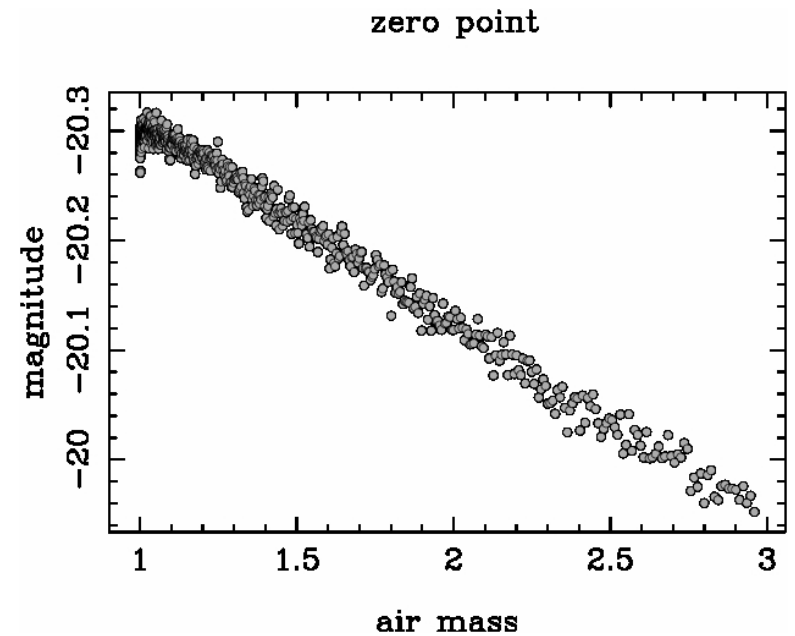
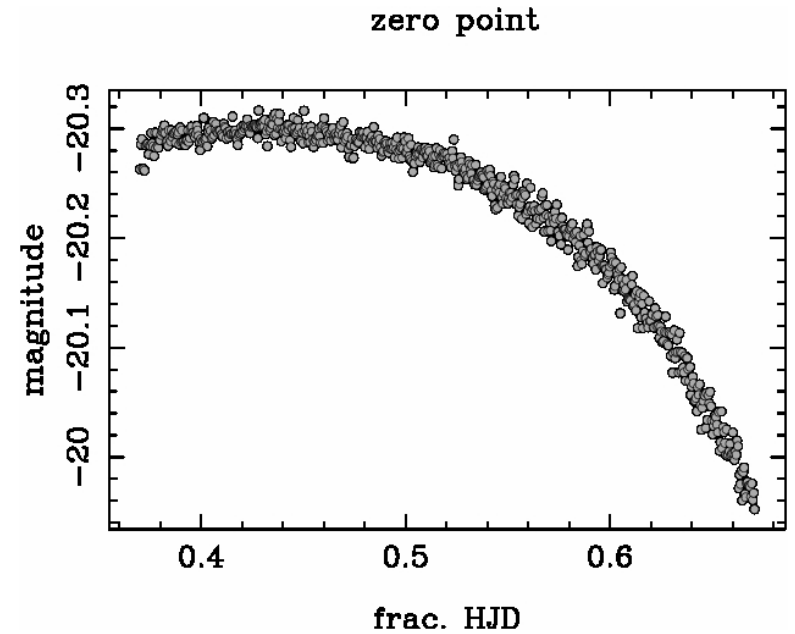
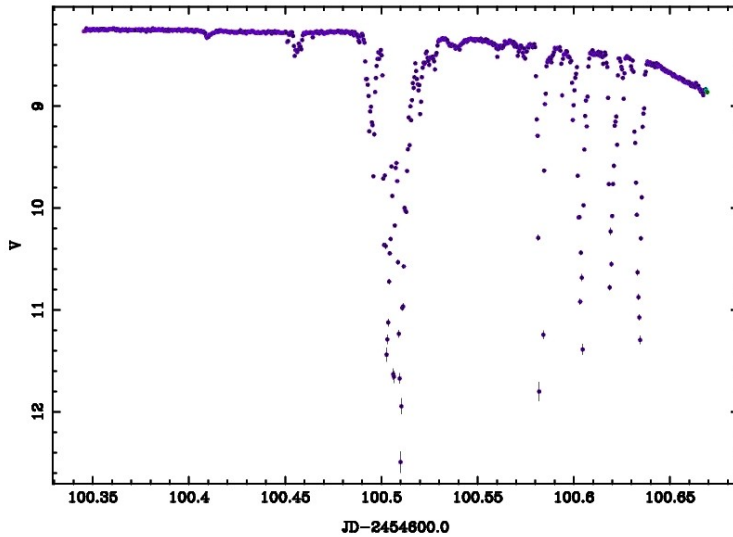
$$X = \sec z - 0.0018167(\sec z - 1) - 0.002875(\sec z - 1)^2 - 0.0008083(\sec z - 1)^3$$



Une des étapes de la réduction des observations de photométrie consiste à calculer la magnitude en dehors de l'atmosphère $m(\lambda, h_1)$

Zero point: magnitude instrumentale
d'une étoile constante de référence
 $-2.5 \log(\text{ADU})$

Variation de la magnitude
instrumentale d'une étoile constante
durant une nuit avec passages
nuageux



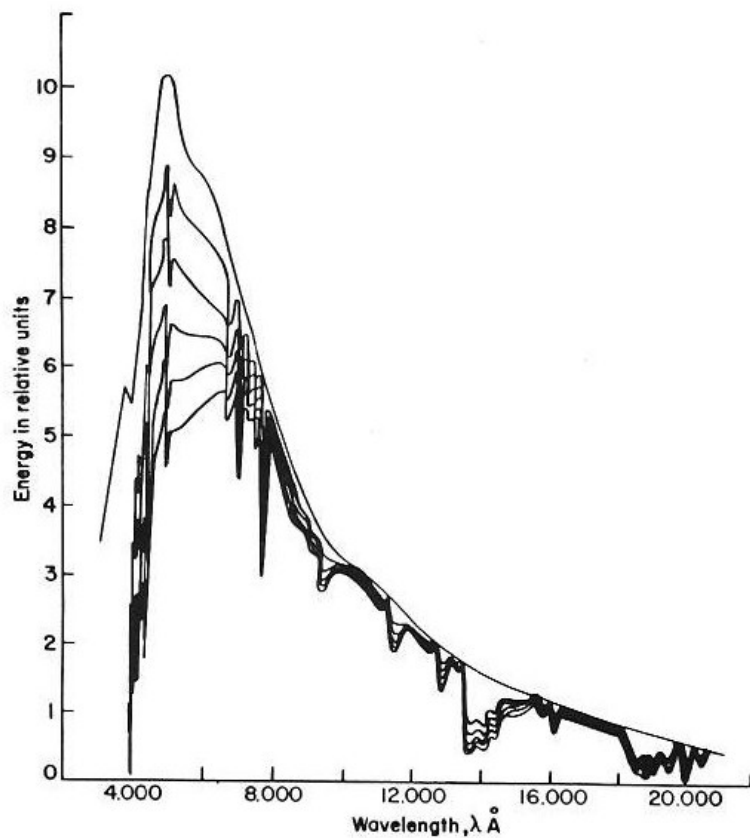


FIG. 5.1 Energy distribution in the solar spectrum with clear skies and at different atmospheric masses; $w_\infty = 0.05 \text{ g/cm}^2$.

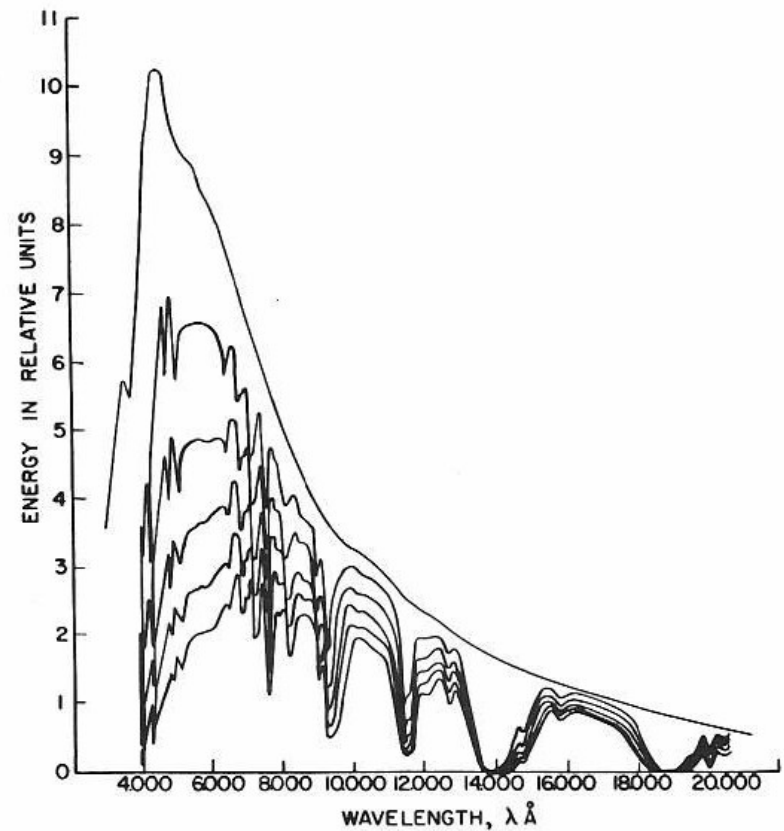


FIG. 5.2 Energy distribution in the solar spectrum in the conditions of a turbid atmosphere; $w_\infty = 1.37 \text{ g/cm}^2$.

Effet de la masse d'air sur le spectre solaire

A gauche: atmosphère sèche à haute altitude.

A droite: atmosphère humide au niveau de la mer.

(air masses: 1, 2, 3, 4, 5)

(« Radiation in the atmosphere », K. Ya. Kondratyev, 1969)

Couleurs - Système photométrique

La dépendance de f_λ avec la longueur d'onde (spectre) n'est pas la même d'une étoile à l'autre: les étoiles n'ont pas toutes la même couleur !

Pour obtenir des informations sur la distribution spectrale d'énergie, on mesure la luminosité des objets célestes à travers des filtres qui délimitent un domaine de longueur d'onde. Un ensemble de filtres définit un *système photométrique*.

$$m = m_0 - 2.5 \log_{10} f$$

m_0 est une constante arbitraire défini pour chaque filtre.

Indice de couleur

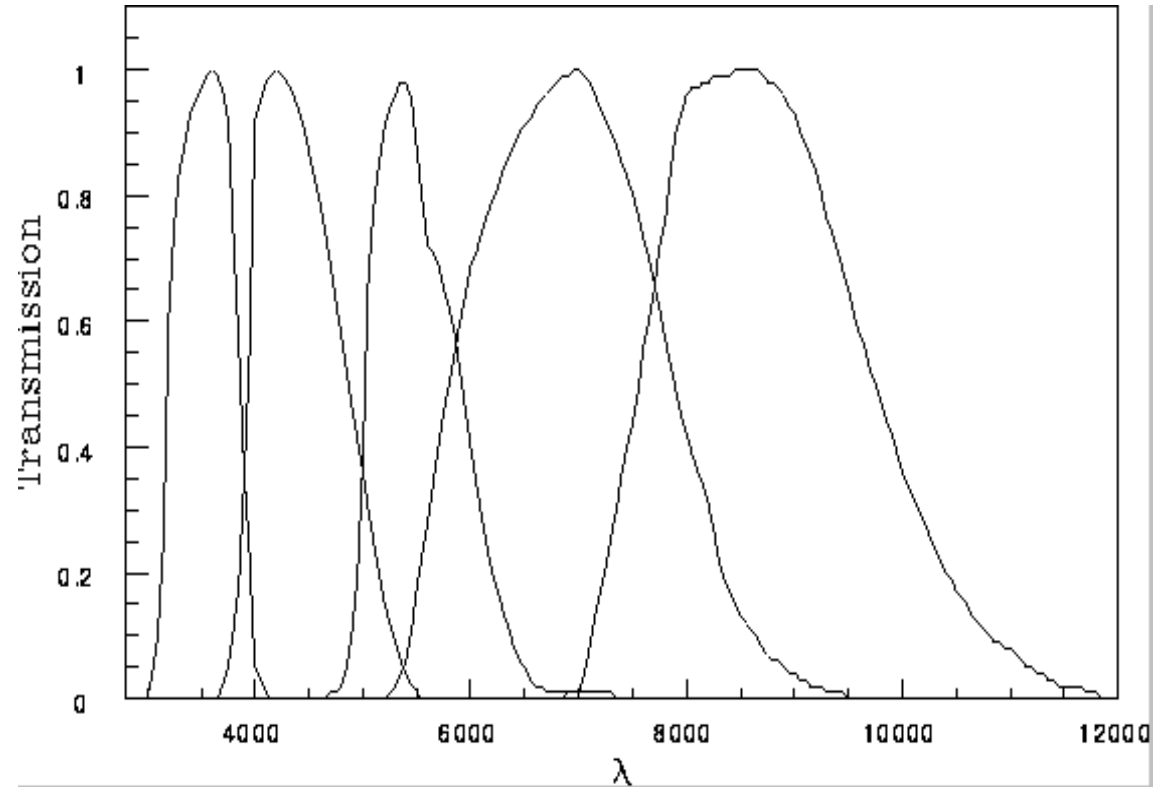
Comparer les magnitudes apparentes d'une étoile mesurées dans 2 filtres différents A et B revient à estimer le rapport d'énergie rayonnée par l'étoile dans 2 domaines de longueur d'onde:

$$m_A - m_B = -2.5 \log \left(\frac{\int_0^\infty S_\lambda(A) f_\lambda^0 d\lambda}{\int_0^\infty S_\lambda(B) f_\lambda^0 d\lambda} \right)$$

$$S_\lambda = T_\lambda R_\lambda G_\lambda$$

Système photométrique de Johnson

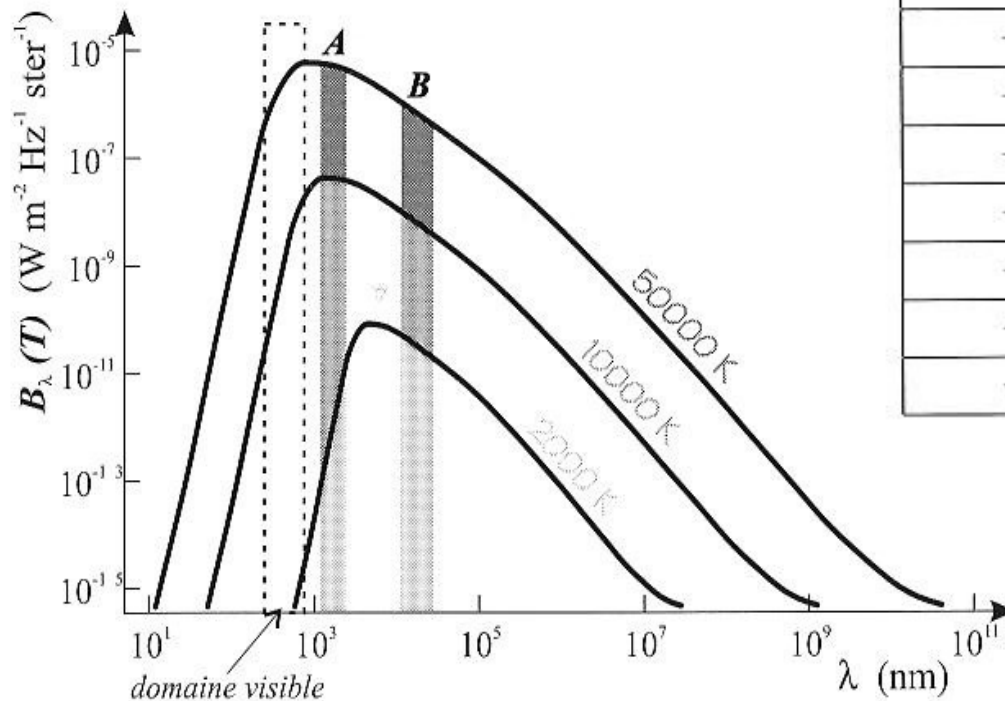
filtre	longueur d'onde centrale (nm)	largeur (nm)
U	365	70
B	440	100
V	550	90
R	720	220
I	900	240



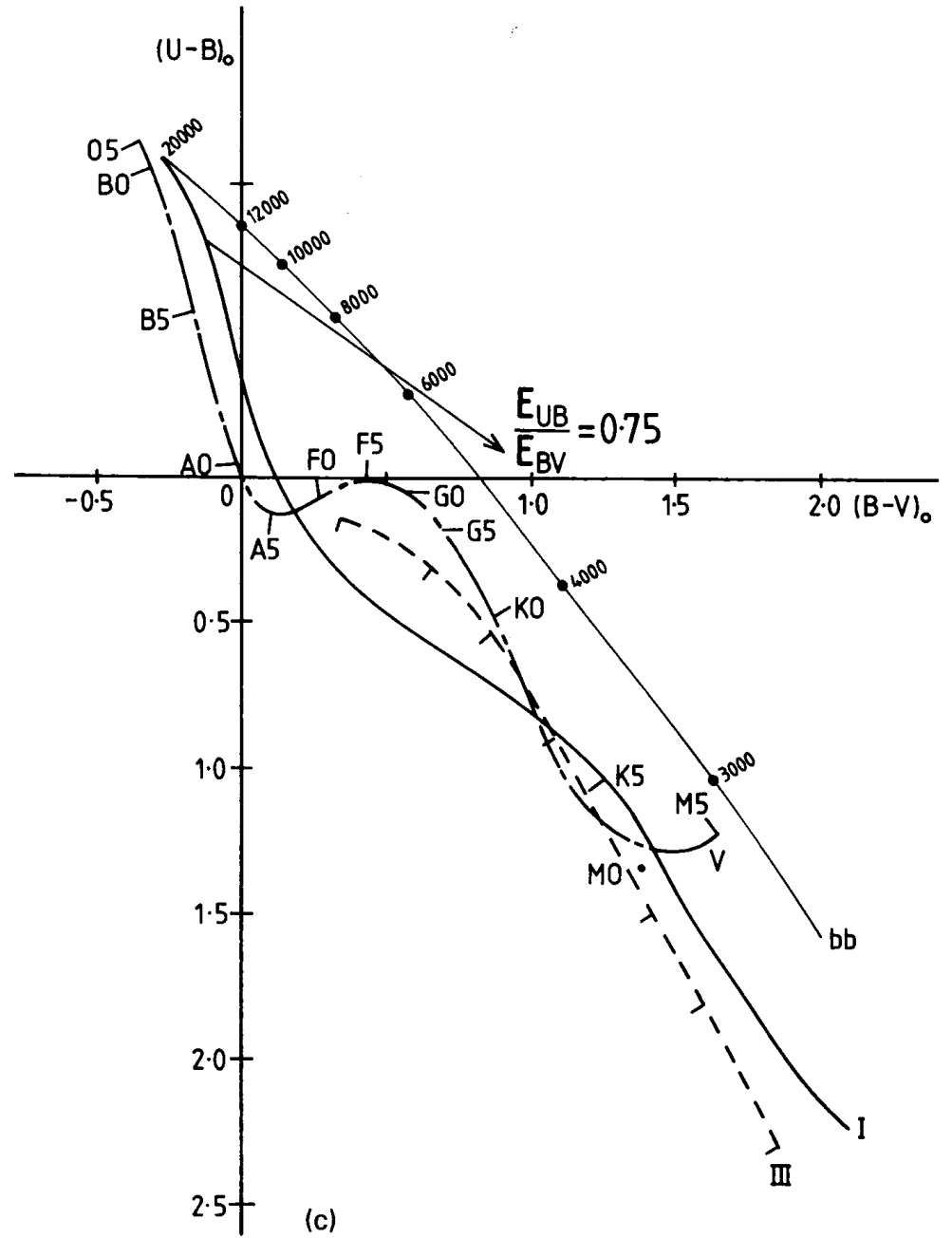
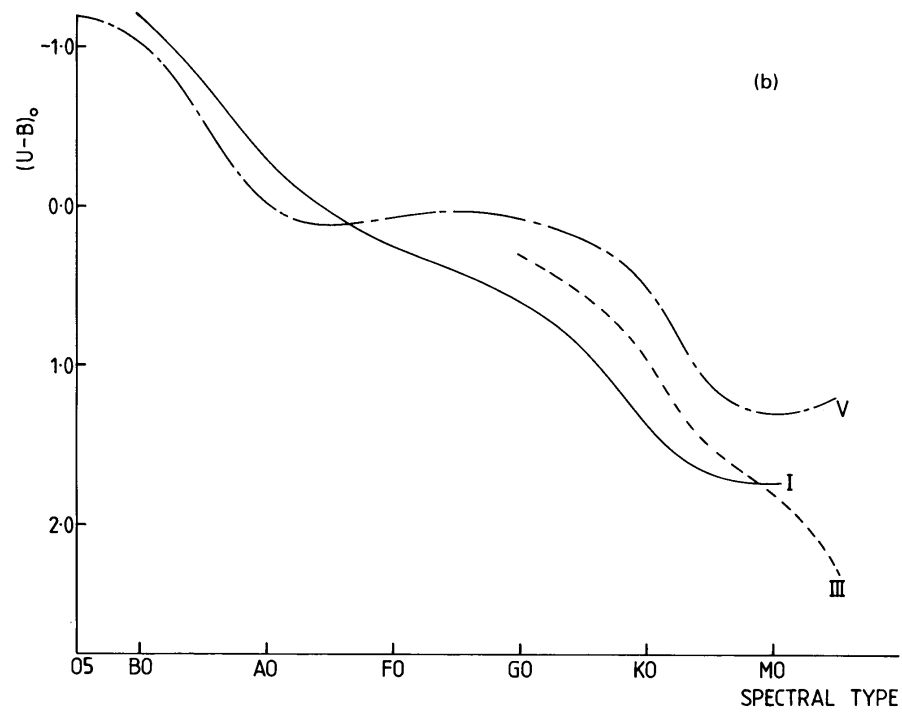
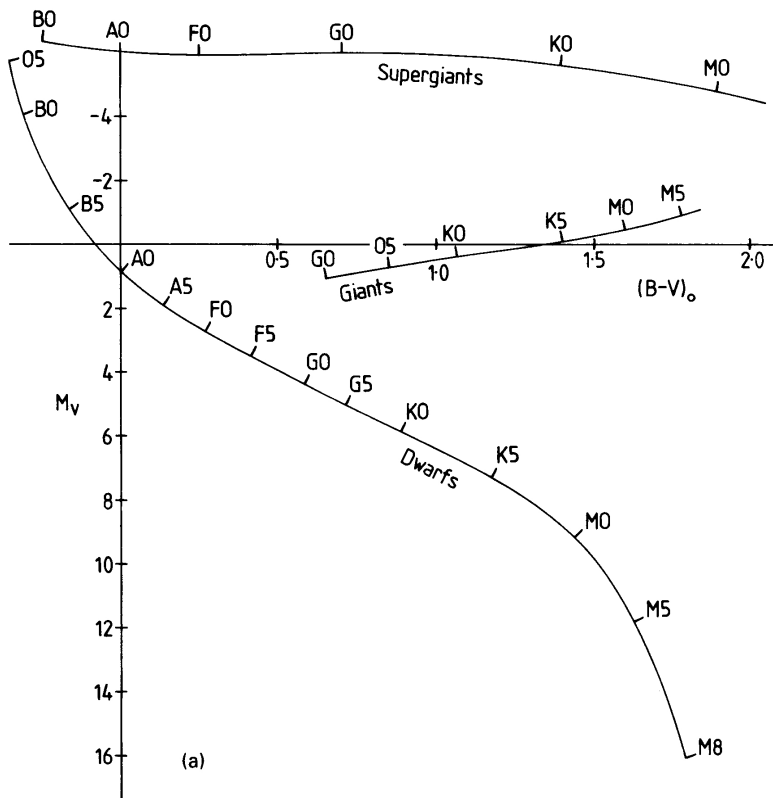
dans le système de Johnson, $m(Vega) = 0$. quelque soit le filtre.

unités de longueur d'onde (visible, proche infrarouge): $10000 \text{ \AA} = 1000 \text{ nm} = 1 \text{ }\mu\text{m}$

Couleur et Température effective:



$(B - V)_0$	$T_{eff,*}$ (V)	$T_{eff,*}$ (III)	$T_{eff,*}$ (I)
-0.32	37000	37000	
-0.31	33000	33000	35000
-0.30	30500	30500	34700
-0.28	27200	27200	33800
-0.26	24500	24500	26000
-0.22	19800	19800	21200
-0.16	14500	14500	15700
-0.08	11100	11100	11900
0.00	9480	9480	9600
+0.08	8700	8700	8500
+0.16	8150	8130	7700
+0.30	7300	7270	6800
+0.50	6310	6270	6020
+0.70	5540	5480	5460
+0.90	5090	5020	4980
+1.10	4600	4580	4570
+1.30	4100	4060	4260
+1.50	3500	3780	4020



Système de Genève

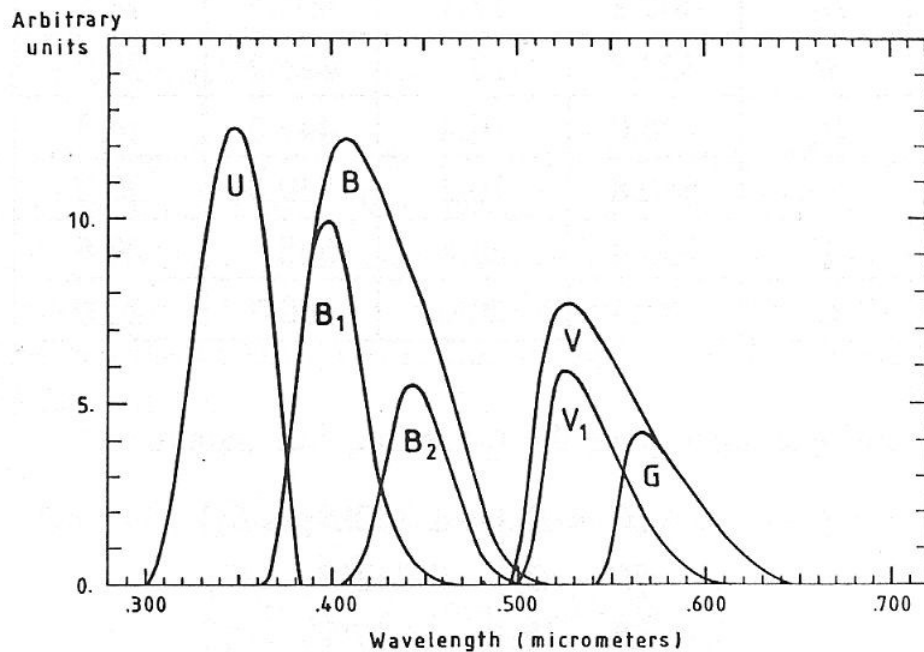
Les filtres "U", "B" et "V" de Genève sont proches des filtres de Johnson.

Les filtres B_1 , B_2 et V_1 , G ont une réponse incluse dans la réponse des filtres B et V.

La réponse des filtres est définie avec la réponse spectrale d'une photocathode S11.

Les observations dans ce système sont toujours données par rapport au filtre B: ce sont des indices de couleurs, U V B_1 B_2 V_1 G.

Les gradients $[B_1 - B_2]$, $[B_2 - V_1]$ et $[V_1 - G]$ permettent le calcul de paramètres stellaires indépendants de l'extinction interstellaire.



	λ_0 (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
U	346.4	19.5
B1	401.5	18.8
B	422.7	28.2
B2	447.6	16.3
V1	539.5	20.2
V	548.8	29.6
G	580.7	20.0

Système de Walraven UBLUW

Il n'existe qu'un seul photomètre de Walraven.
Il mesure simultanément les 5 couleurs.

	λ_0 (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
V	547	72
B	432	45
L	384	23
U	363	24
W	325	14

Système de Strömgen uvby β

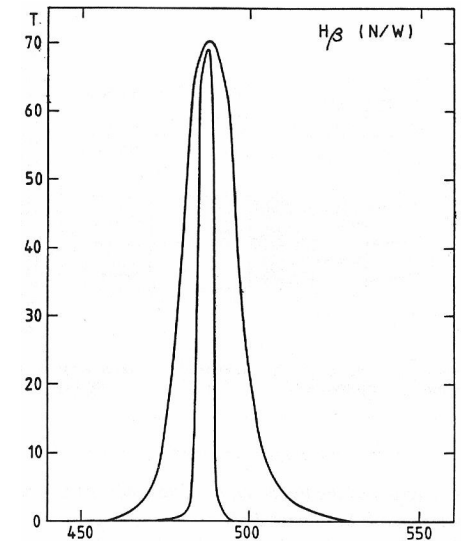
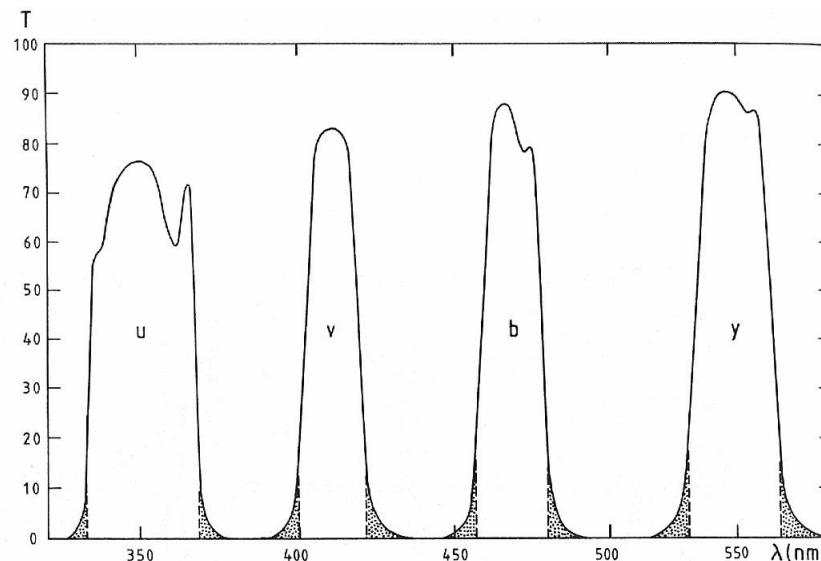
Système supposé être indépendant de la réponse du détecteur.

L'indice $m_1 = (v-b) - (b-y)$ est un indicateur de la métallicité des étoiles.

L'indice $c_1 = (u-v) - (v-b)$ mesure la discontinuité de Balmer.

l'indice $\beta = H\beta_w - H\beta_n$ est un indice de luminosité pour les étoiles O-A et de température pour les étoiles A-G.

	λ_0 (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
u	350	34
v	410	20
b	470	16
y	550	24
H β_w	486	15
H β_n	486	3



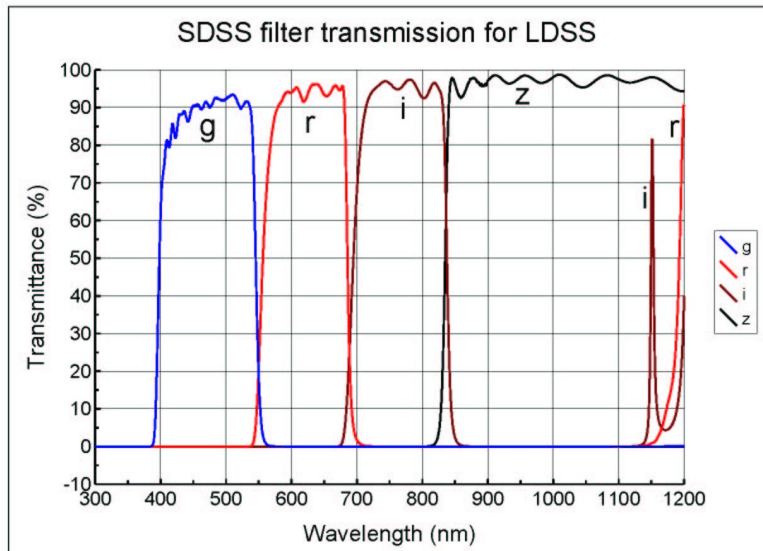
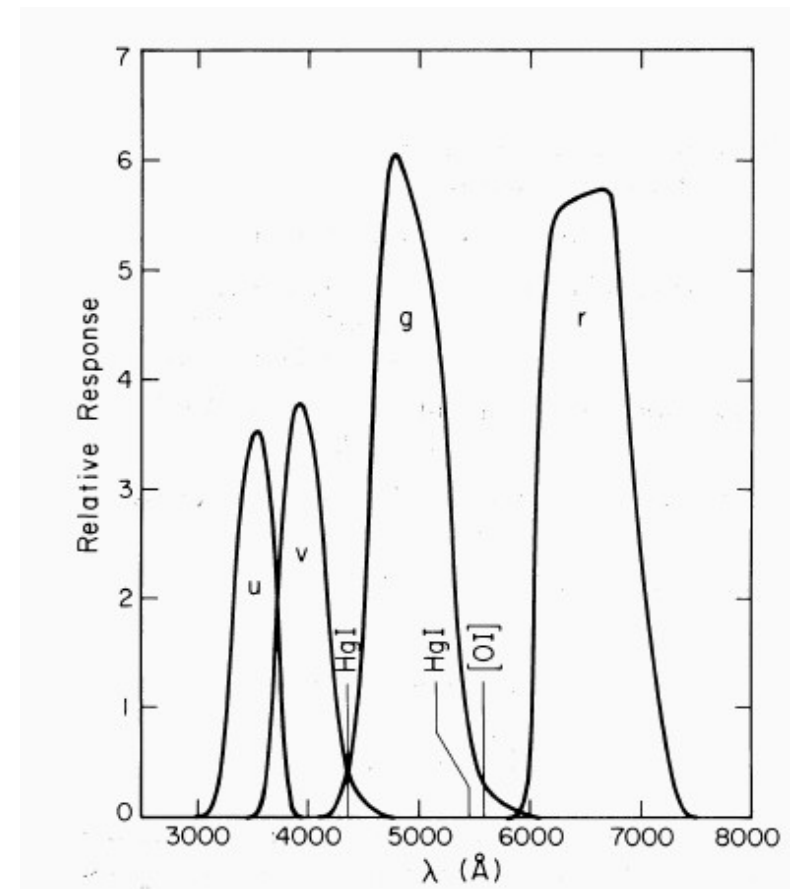
Filtres de Thuan-Gunn

Thuan, T.X., Gunn, J.E., 1976, PASP 88, 543

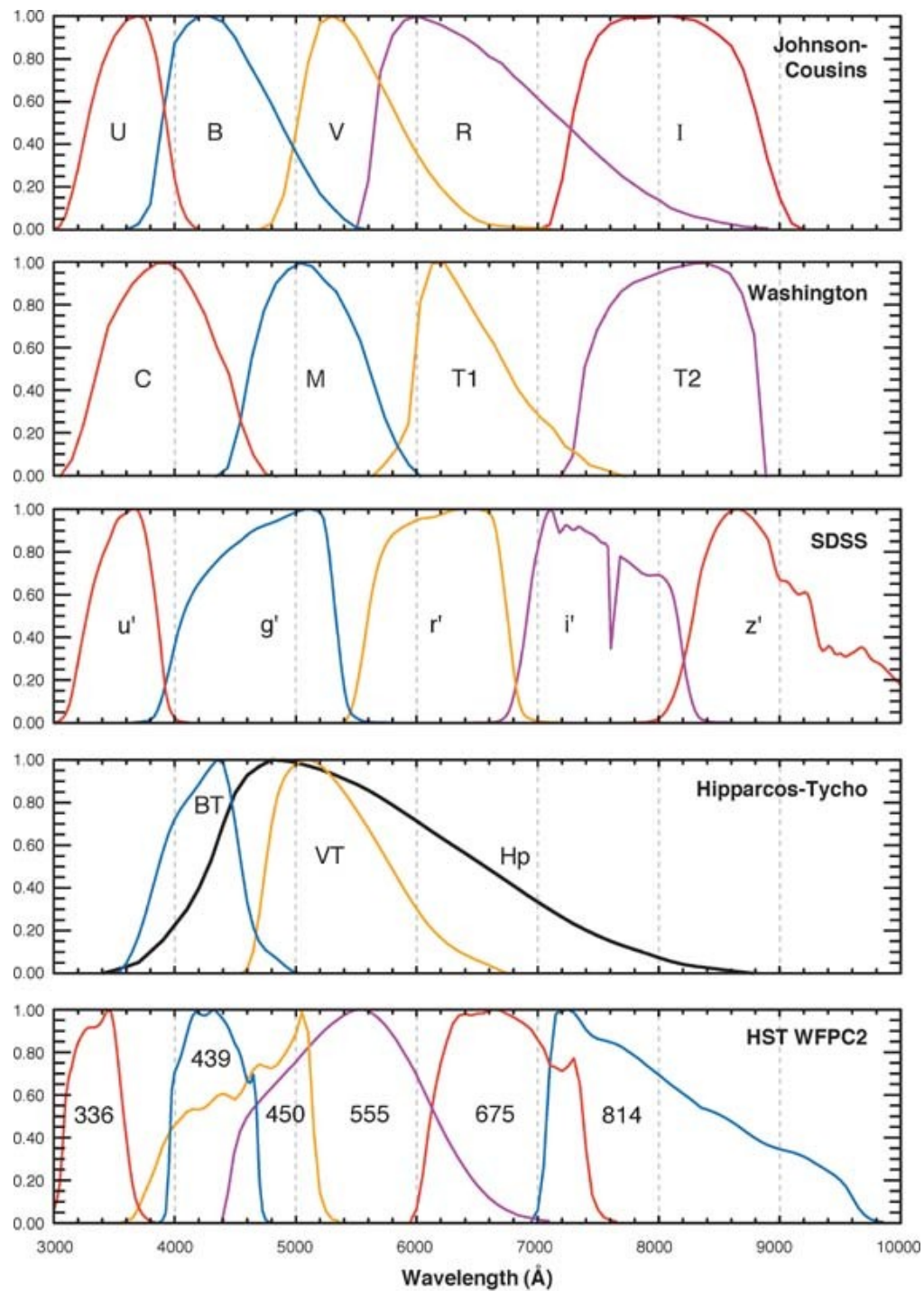
$$\left. \begin{aligned} g &= 9.50 \\ g-r &= 0.00 \\ u-v &= 0.00 \\ v-g &= 0.00 \end{aligned} \right\} \text{BD } +17^{\circ} 4708$$

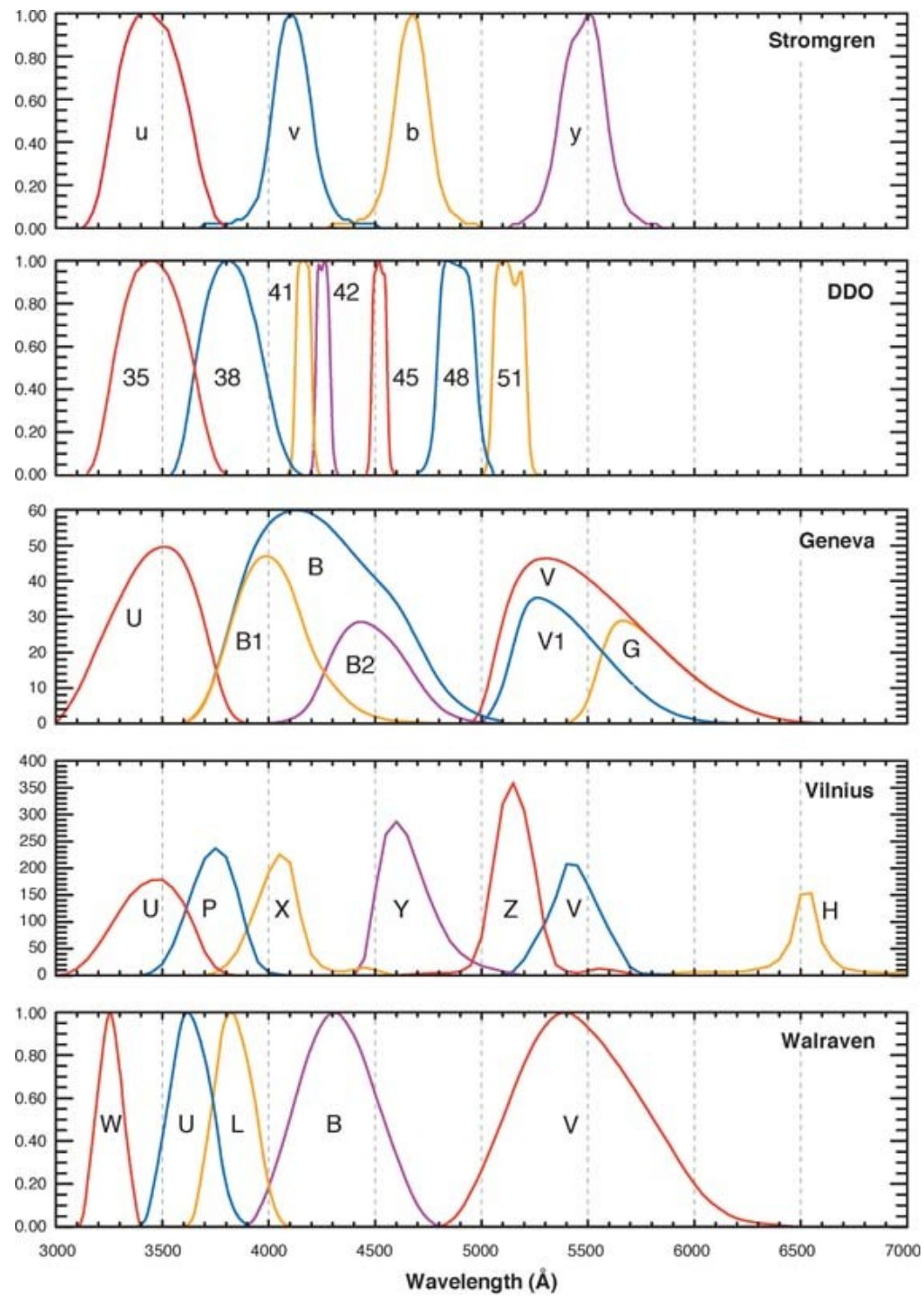
uvgr system		
Filter	$\bar{\lambda}_{\text{eff}}(\text{\AA})$	$\Delta\lambda(\text{\AA})$
u	3530	400
v	3980	400
g	4930	700
r	6550	900

$$\begin{aligned} B-g &= 0.14 + 0.63 (B-V) \\ u-b &= -0.28 + 0.94 (U-B) \\ v-V &= -0.69 + 1.69 (B-V) \end{aligned}$$



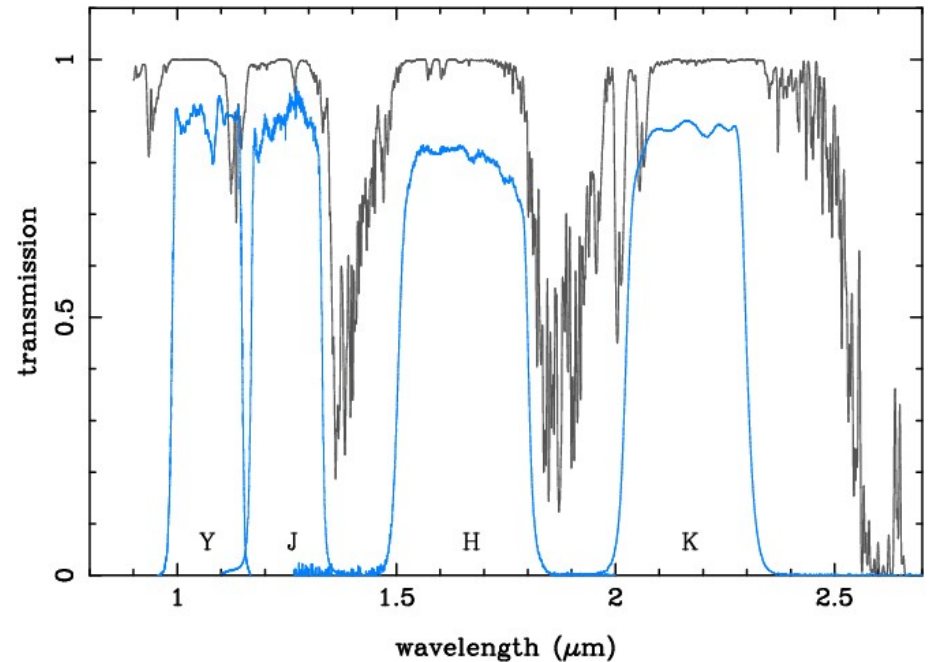
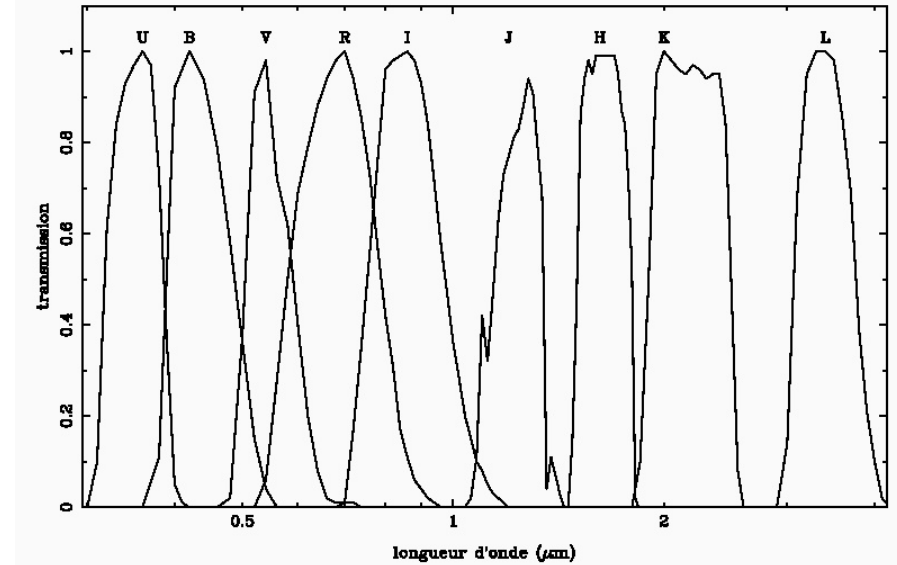
Filtres du survey Sloan



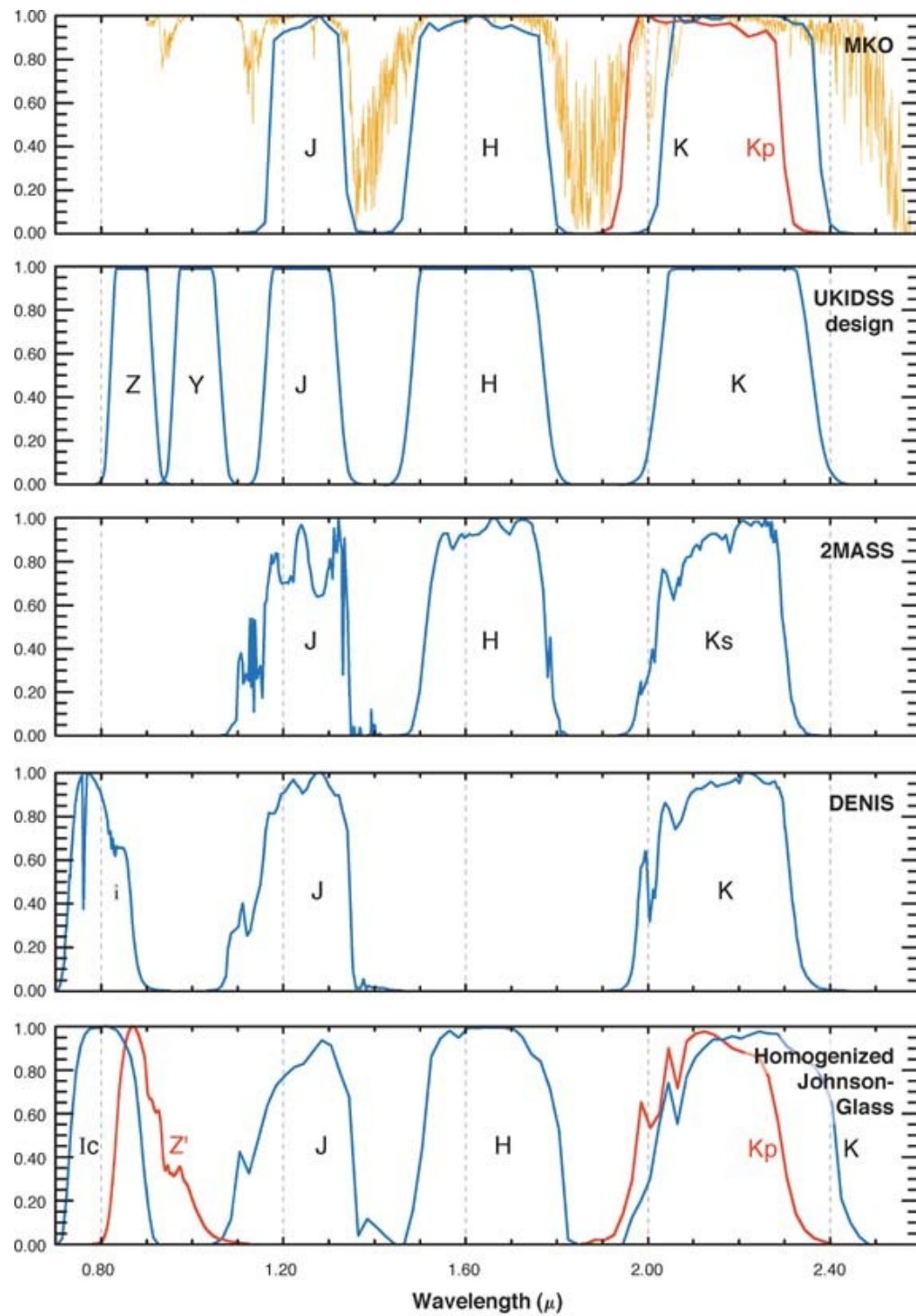


Filtres proche-infra-rouge

filtre	longueur d'onde centrale (μm)	largeur (μm)
J	1.25	0.29
H	1.635	0.29
K	2.16	0.3
L	3.8	0.6
M	4.75	0.7



Dans le proche infrarouge, les filtres utilisent les fenêtres de transmission atmosphériques laissées par les bandes d'absorption de l'eau et de la molécule OH.



Extinction interstellaire

Le milieu interstellaire (MIS) affecte la lumière qui la traverse: lors de l'analyse de données photométriques on doit en tenir compte pour retrouver les caractéristiques intrinsèques des objets observés.

Le phénomène d'extinction est similaire à celui de l'atmosphère terrestre, mais dominé par la *diffusion par les poussières*. La loi d'extinction peut s'écrire:

$$I_{obs}(\lambda) = I_{int}(\lambda) e^{-\kappa(\lambda) \int_0^{\infty} \rho(h) dh}$$

soit en magnitude:

$$\begin{aligned} m_{obs}(\lambda) &= m_{int}(\lambda) + 2.5 \log(e) \kappa(\lambda) \int_0^{\infty} \rho(h) dh \\ &= m_{int}(\lambda) + A(\lambda, dir) \end{aligned}$$

où A est appelé *absorption totale*.

A dépend de la longueur d'onde et sera spécifié pour chaque filtre d'un système photométrique. Par exemple A_V pour le filtre V du système de Johnson.

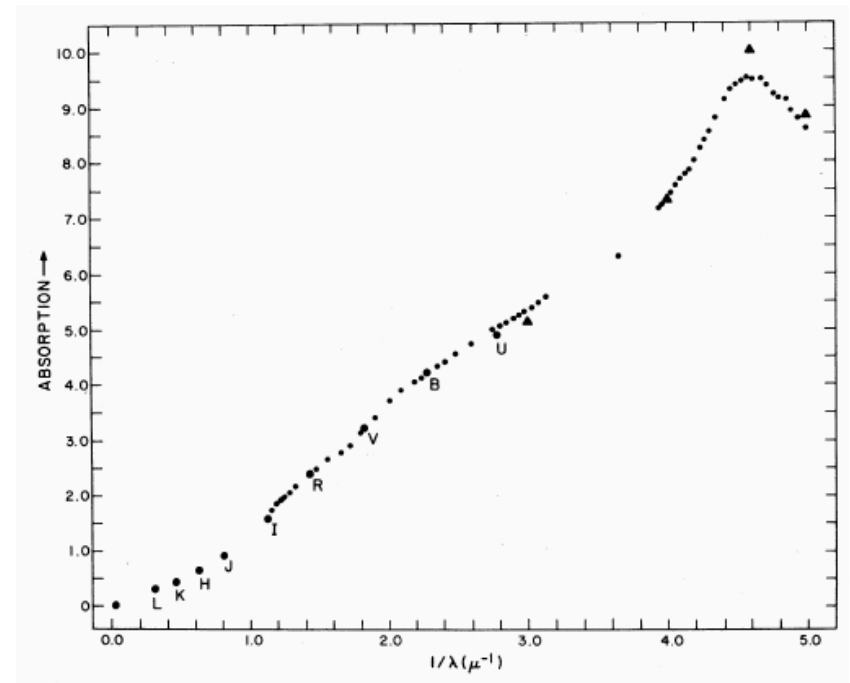
La loi d'extinction en fonction de la longueur d'onde est en général rapportée au coefficient d'absorption à 5500\AA , et plus pratiquement au filtre V du système de Johnson:

$$\zeta(\lambda) = \frac{\kappa(\lambda)}{\kappa(\lambda = 5500\text{\AA})}$$

Dépendance du coefficient d'extinction avec la longueur d'onde

Comme le phénomène principal est la diffusion par les poussières (diffusion de Mie), la loi d'extinction suit assez bien une loi en $1/\lambda$ dans le visible.

A cause de la forme de la dépendance du coefficient d'extinction avec la longueur d'onde, on parle souvent de "*rougissement interstellaire*",



(R.E. Schild, 1977, Astron. J, 82, p337)

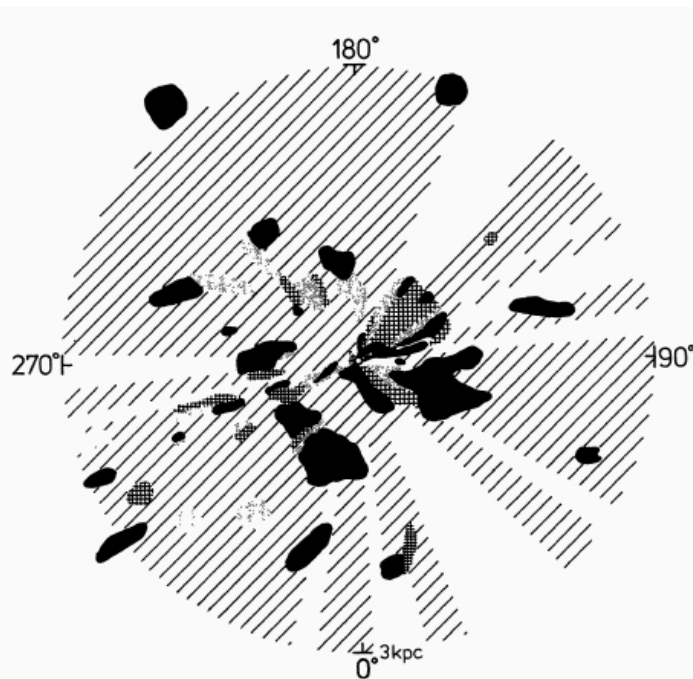


FIGURE 9a. — The galactic distribution of the dust for $r \leq 3$ kpc

// // // // $a_v = A_v/\text{kpc} < 1^m/\text{kpc}$
 $1^m/\text{kpc} \leq a_v < 2^m/\text{kpc}$
 x x x x x $2^m/\text{kpc} \leq a_v < 3^m/\text{kpc}$
 ■ ■ ■ ■ ■ $a_v \geq 3^m/\text{kpc}$

Distribution de l'extinction interstellaire

Il existe de cartes donnant l'extinction en fonction des coordonnées galactiques.

La figure ci-contre montre la distribution de la poussière jusqu'à 3kpc du Soleil déduite des mesures d'extinction interstellaire..

Excès de couleur

Une conséquence de la dépendance du coefficient d'extinction avec la longueur d'onde est que les indices de couleurs sont également affectés (cf. "rougissement interstellaire").

On définit ainsi un *excès de couleur* par la différence des indices de couleur observés et intrinsèques, par exemple:

$$E_{B-V} = (B - V)_{obs} - (B - V)_{int} = A_B - A_V \text{ (Johnson)}$$
$$E_{b-y} = (b - y)_{obs} - (b - y)_{int} = A_b - A_y \text{ (Strömrgren)}$$

On utilise fréquemment le rapport:

$$R = \frac{A_V}{E_{B-V}}$$

pour caractériser l'extinction interstellaire.

Si on a déterminé E_{B-V} dans la direction d'une étoile, l'absorption totale dans un filtre donné F sera

$$A_F = R_F E_{B-V}$$

Le tableau ci-contre donne les valeurs de R pour des filtres du système de Johnson.

filtre	λ (μm)	λ^{-1} (μm^{-1})	$\frac{A_\lambda}{E_{(B-V)}}$
J	1.25	0.80	0.87
I	0.90	1.11	1.50
R	0.70	1.43	2.32
V	0.55	1.82	3.10
B	0.44	2.27	4.10
	0.40	2.50	4.40
U	0.344	2.91	4.90

Bibliographie

Astronomical photometry, C. Sterken, J. Manfroid,
Kluwer Academic Publishers, 1992

Introduction to astronomical photometry, E. Budding,
Cambridge University Press 1993

Radiation in the atmosphere, K. Ya. Kondratyev
Academic Press 1969

Standard Photometric Systems, Michael Bessell,
Annual Review of Astronomy & Astrophysics, vol. 43, Issue 1, pp.293-336
<http://arjournals.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev.astro.41.082801.100251>

D. S Hayes, 1985, Proceedings of IAU Symposium 111, p. 225