

# **Bilan Radio-Photométrique de son instrument**

**Estimation du S/B sur la magnitude de son instrument en fonction de l'exposition**



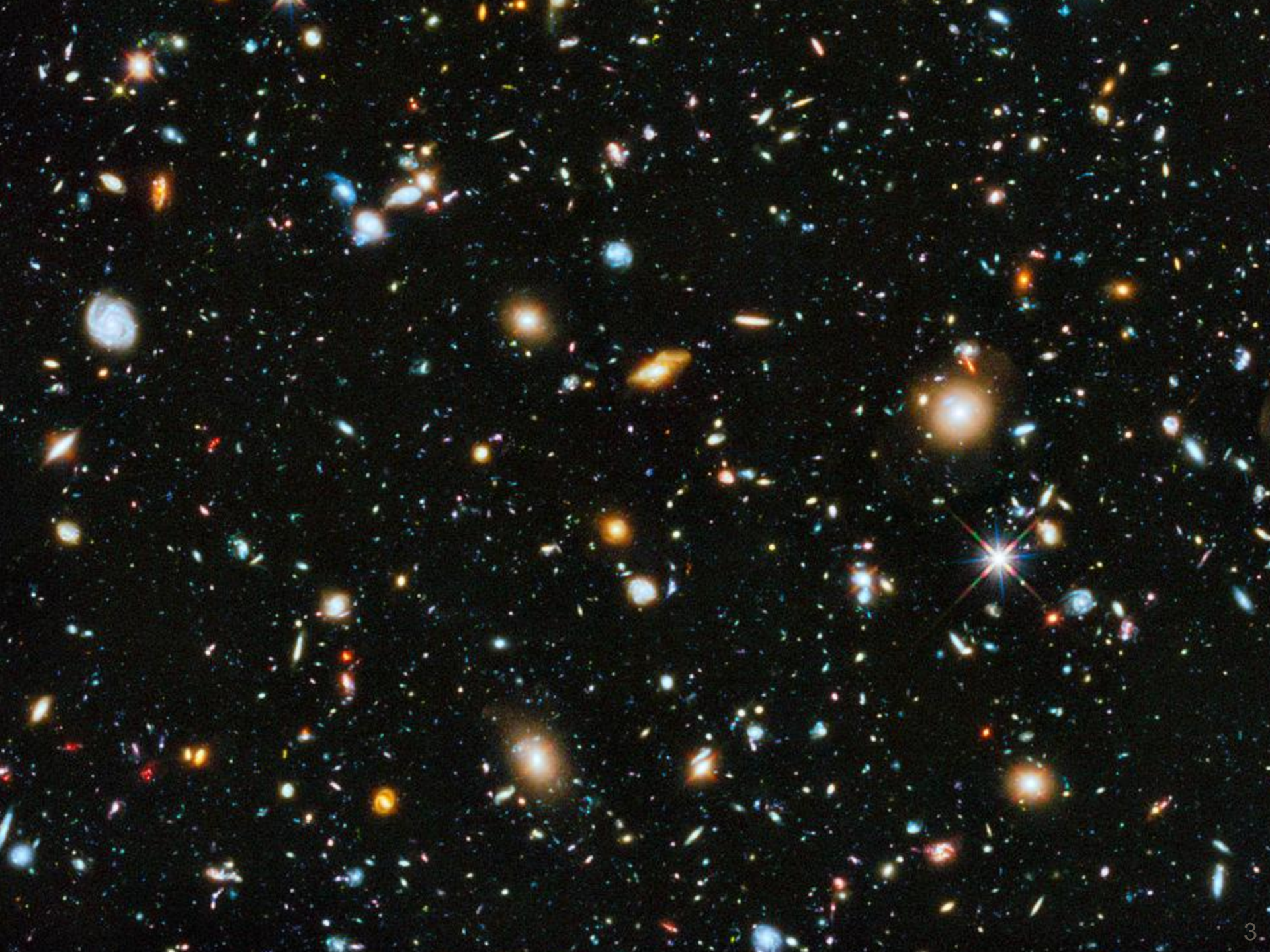
**Thierry Midavaine**

**[thierrymidavaine@saf-astronomie.fr](mailto:thierrymidavaine@saf-astronomie.fr)**

**Ecole de Photométrie 2021**

**Samedi 5 juin 2021 Zoom**





# Etablir son bilan radio-photométrique



- Une feuille de calcul
- Au départ pour valider son S/B dans la préparation d'une occultation d'une étoile par un astéroïde
- Généraliser la feuille pour les projets Pro-Am
- La décliner pour différents projets
- Capitaliser les retours d'expériences

# Plan



1. Rappels de radio-photométrie,
2. La magnitude en astronomie
3. L'éclairement des étoiles dans les différentes unités
4. L'éclairement délivré par les objets du système solaire éclairé par le Soleil
5. La Luminance du fond de ciel et la transmission atmosphérique
6. La définition et l'optimisation du télescope avec le capteur
7. Conclusion, Gaia...

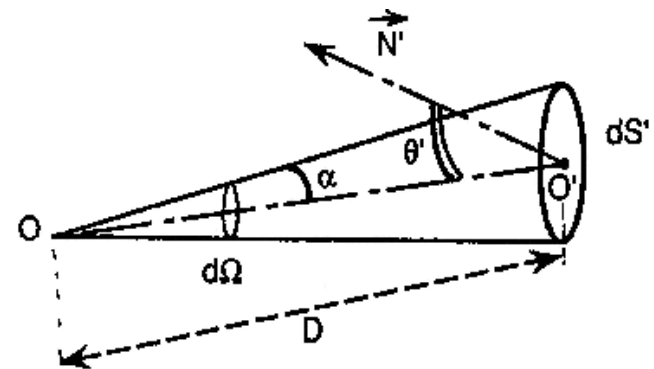
# 1. Rappels radiométrie photométrie

- Les grandeurs photométriques à bas niveau de lumière
- Définition
  - Photométrie : grandeurs **lumineuses** perceptibles à l'œil
  - Radiométrie : grandeurs **énergétiques** caractérisant les ondes électromagnétiques
- Photométrie «géométrique» satisfait aux lois optiques géométriques.
  - Elle ne tient pas compte des phénomènes ondulatoires de la lumière comme la diffraction et les interférences
  - Nous allons ici analyser l'impact de la diffraction, du seeing et de l'échantillonnage par les pixels de la tache image (ou PSF)

# Angle solide

- Angle solide
  - Définition : aire de la calotte sphérique ( $R=1$ ) définie par le cône qui s'appuie sur les contours apparent de l'objet.
  - Analogie 3D avec l'angle plan
  - Unité = stéradian (sr)

$$d\Omega = \frac{dS' \cos\theta'}{D^2}$$



POUR CONE AVEC 1/2 ANGLE AU SOMMET  $\alpha$

$$d\Omega = 2\pi \sin\alpha \, d\alpha \quad \text{SUR UNE COURONNE } d\alpha$$

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\alpha) \quad \longrightarrow \quad \text{SI } \alpha \text{ PETIT } \Omega \approx \pi\alpha^2$$

# Étendue géométrique

## ■ Étendue géométrique

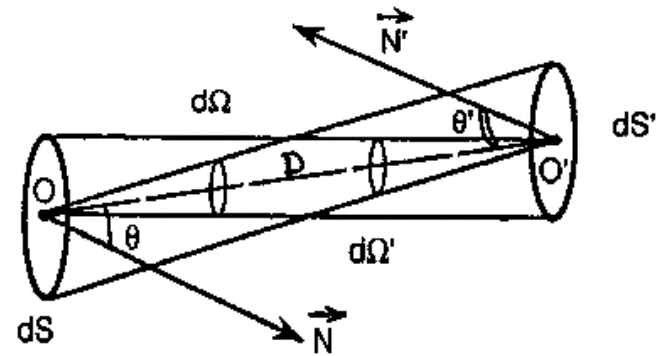
■ Définition : grandeur permettant de quantifier la «taille» d'un faisceau optique.

■ Unité =  $m^2 \times \text{stéradian}$  ( $m^2 \cdot \text{sr}$ )

■ Propriété : conservation de l'étendue géométrique.

$$d^2G = \frac{dS \cos\theta \cdot dS' \cos\theta'}{D^2}$$

$$d^2G = dS \cos\theta \cdot d\Omega = dS' \cos\theta' \cdot d\Omega'$$



(SYMETRIE)



# Grandeurs fondamentales photométriques de l'oeil

## Flux

- Unité = lumen (lm)
- *Flux*
  
- Bougie : flux = 13 lumen (= 1 candela x  $4\pi$  sr)

## Intensité

- Unité = la candela (cd)
- *Intensity*
  
- Bougie : intensité = 1 candela

## Eclairement

- Unité = lux (lux)
- *Illuminance / illumination*
  
- Bougie : éclairement =
  - 100 lux à 10 cm (= (1 candela x  $4\pi$  sr) / ( $4\pi \cdot 0.1^2$  m<sup>2</sup>))
  - 1 lux à 1 m

## Luminance

- Unité = candela / m<sup>2</sup> (cd/m<sup>2</sup>)
- Brightness / Luminance

# Grandeurs fondamentales radiométriques

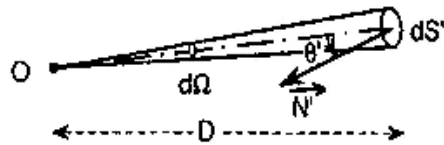
## Flux

- Définition : puissance émise par une source
- Unité = Watt (W)
- *Radiant power / Flux*

## Eclairement

- Définition : flux par unité de surface

$$E = \frac{d\phi}{dS_r}$$

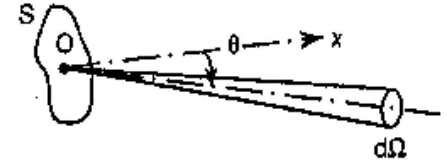


- Unité = watt / m<sup>2</sup> (W/m<sup>2</sup>)
- *Irradiance*

## Intensité

- Définition : flux émis par une source, dans un élément d'angle solide  $d\Omega$ , direction  $\theta$ .

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega}$$



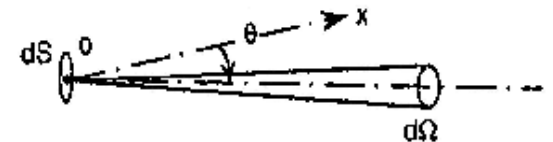
- Indicatrice d'intensité en fonction de la direction
- Unité = watt / stéradian (W/sr)
- *intensity*

## Luminance

### Source étendue

- Définition : flux émis par un élément de source  $dS$  dans un élément d'angle solide  $d\Omega$ , direction  $\theta$ .

$$L = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dS \cos\theta}$$



- Unité = watt / m<sup>2</sup> / stéradian (W/m<sup>2</sup>/sr)
- Indicatrice de luminance en fonction de la direction
- Conservation de la luminance au cours de la propagation, si pas d'atténuation
- *Radiance*

L'écran éclairé est caractérisé par sa Luminance

Elle est indépendante de la distance en faisant abstraction de la transmission atmosphérique





# Les 3 définitions de l'éclairement

Les éclairements sont définis usuellement à trois niveaux :

1.  $E_1$  Le niveau d'éclairement incident sur la scène
2.  $E_2$  Le niveau d'éclairement en entrée pupille
3.  $E_3$  Le niveau d'éclairement incident sur le détecteur dans le plan focal

## 2. La magnitude en astronomie

3 utilisations de la magnitude dans les unités :

- Le flux
- L'intensité Magnitude Absolue
- La luminance magnitude par arcsec<sup>2</sup>
- L'éclairement magnitude

La magnitude d'une étoile constitue un éclairement  $E_2$   
en dehors de l'atmosphère

# Les grandeurs radiométriques et unités

<i>Unités</i>	<i>Radiométriques</i>		<i>Photo-Visuelles</i>	<i>Photoniques</i>	<i>Astronomiques</i>
<i>Grandeurs</i>					
Energie		Joule J	lm.s	photons	
Flux	Watt	J.s <sup>-1</sup>	lumen	photons/s	
Intensité	W.sr <sup>-1</sup>		candela		Magnitude absolu
Luminance	W.sr <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup>		cd.m <sup>-2</sup>		mag/as <sup>2</sup>
Eclairement	W.m <sup>-2</sup>		lux		magnitude

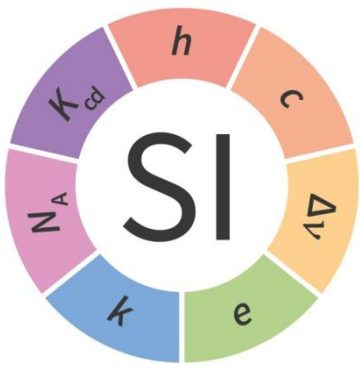
$$\text{mag/as}^2 = \text{magnitude par arcsec}^2$$

- La magnitude d'une étoile constitue un éclairement  $E_2$  en entrée pupille
- La magnitude par arcsec<sup>2</sup> d'un objet étendu ou du fond de ciel par exemple est une luminance
- La Magnitude Absolue d'une étoile donne son éclairement à une distance de 10 parsecs (32,6 année lumière) et se rattache à une intensité
- Il y a une correspondance entre le lux et la magnitude visuelle ou V
- La magnitude se décline dans différentes bandes spectrale UBVRIJKLM
- On parle aussi de magnitude photographique et de magnitude bolometrique



# La candela : une constante fondamentale

- Au XVIII<sup>eme</sup> siècle la bougie constitue une référence photométrique
- Le XIX<sup>eme</sup> siècle voit l'apparition de l'éclairage public
- 1889 Le Platine en fusion constitue la référence photométrique : La candela est l'intensité lumineuse d'une surface de  $1/60 \text{ cm}^2$  d'un corps noir à 2045K
- 1948 la conférence générale des poids et mesure défini la candela comme une constante fondamentale du Système International
- 1979 la candela est l'intensité lumineuse d'une source monochromatique à une longueur d'onde de 555nm dans le vide ou une fréquence de  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  de  $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$



# Les 7 constantes physiques

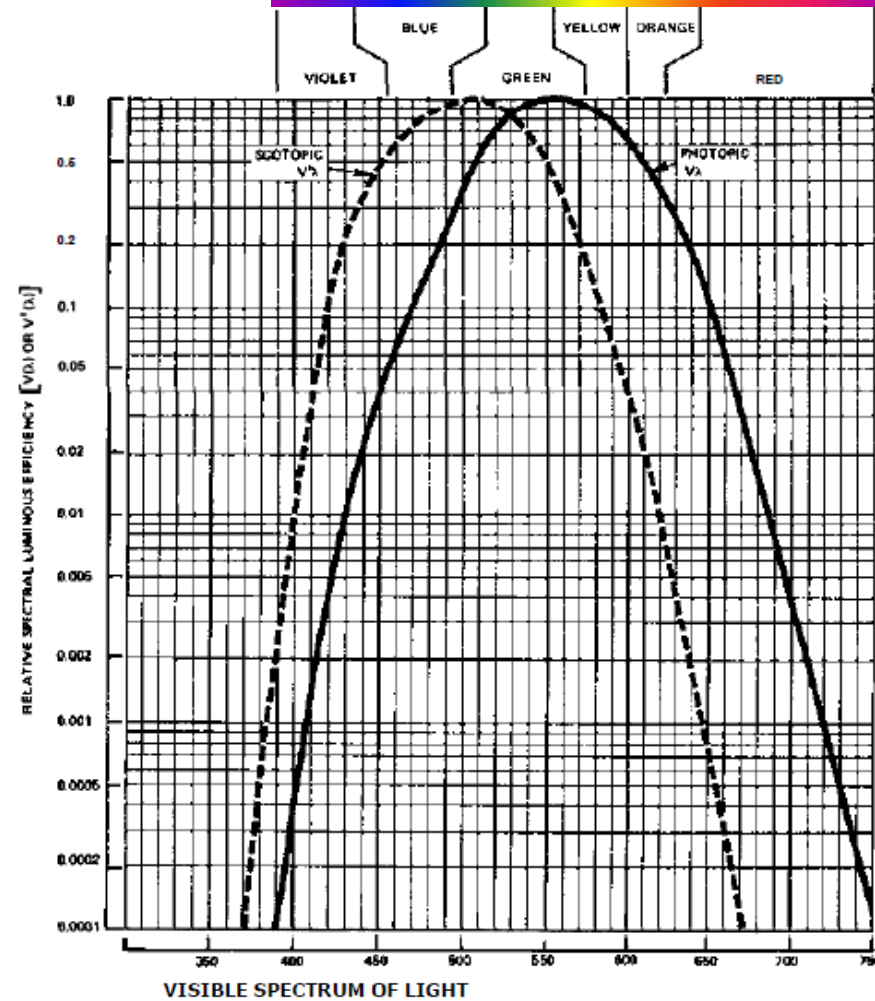
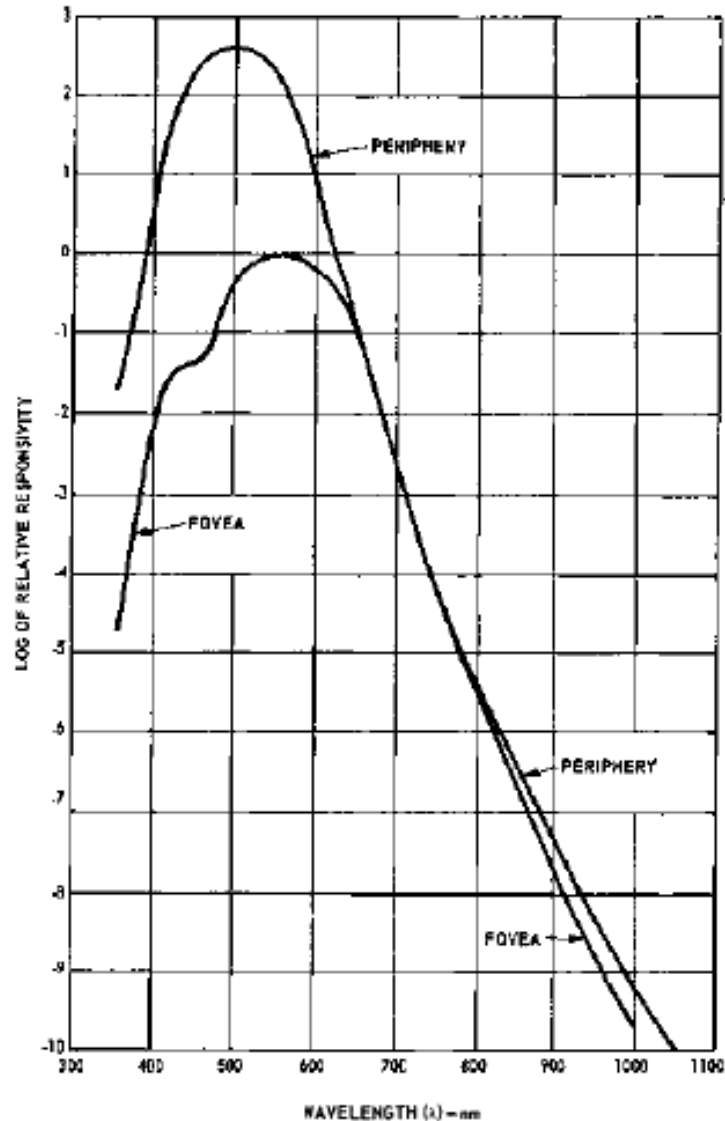
## Système International d'unités et Constantes Physiques

			unités	incertitude relative
La fréquence hyperfine du Cesium 133	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770.00	Hz	0
La vitesse de la lumière	c	299 792 458.00	m.s-1	0
La constante de Planck	h	6.626070150E-34	J.s	0
La charge de l'électron	e	1.602176634E-19	C	0
La constante de Boltzmann	k	1.3806490000E-23	J.K-1	0
Le Nombre d'Avogadro	$N_A$	6.0221401760E-23	mol-1	0
La candela ou l'efficacité lumineuse à 540E12Hz	$K_{\text{cd}}$	683.00	lm.W-1	0

$$540 \cdot 10^{12} \text{ Hz} = 555\text{nm dans le vide}$$

Nota les constantes fondamentales de la physique tiennent compte de la redéfinition du Système International d'unités SI depuis le 20 mai 2019.

# La sensibilité spectrale de l'oeil



Vacuum wavelength (nm)	Frequency ( $10^{12}$ Hz)	Brain color response
730-622	410-482	RED
622-597	482-503	ORANGE
597-577	503-520	YELLOW
577-492	520-610	GREEN
492-455	610-659	BLUE
455-370	659-810	VIOLET

# La magnitude V comme visible

- Elle est définie pour la réponse spectrale de l'œil en condition photopique
- Sa largeur photopique à mi hauteur va de 510nm à 610nm soit 100nm (98.978nm) de large avec un pic à 555nm
- La bande spectrale globale photopique de l'œil va de 390 nm à 760 nm soit 370nm de large
- Sa largeur scotopique à mi hauteur va de 450nm à 550nm soit 100nm de large avec un pic à 510nm
- La bande spectrale scotopique de l'œil va de 370nm à 650nm (soit 280nm)

# La magnitude en astronomie

- C'est une échelle logarithmique

$$\text{L'équation de Pogson : } m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log ( f_1 / f_2 )$$

- Une différence de 1 magnitude correspond à un rapport de

$$\sqrt[5]{100} = 2.511886432... \sim 2.512$$

$$f_1 / f_2 = (\sqrt[5]{100})^{m_2 - m_1}$$

- Un rapport 100 entre l'éclairement de deux sources correspond à une différence de 5 magnitudes.
- Un écart de 5 magnitudes = un facteur 100 en éclairement soit un facteur 10 en distance pour des sources de même intensité
- Une étoile de magnitude V 0 délivre un éclairement de  $2.65 \cdot 10^{-6}$  lux

# Conversions entre système d'unités

Une étoile de magnitude V 0 délivre donc un éclairement de  $2.65 \cdot 10^{-6}$  lux

- Pour avoir cet éclairement en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$

$$2.65 \cdot 10^{-6} \text{ lux} / 683 \text{ lm/W} * 10 = 3.92 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$$

- Pour avoir cet éclairement en  $\text{photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

À 555nm l'énergie du photon est égale à  $hc/\lambda = 357.9 \cdot 10^{-21}$  J

$$\text{ou } 3.92 \cdot 10^{-8} / 357.9 \cdot 10^{-21} = 1.09 \cdot 10^{11} \text{ photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$$

Une étoile de magnitude V 20 délivre un éclairement de  $1 \cdot 10^{-8}$  plus faible qu'une étoile de mag 0

# La milli-magnitude

Delta de magnitude	Rapport d'éclairements
20	100000000
10	10000
5	100
4	39.8107171
3	15.8489319
2	6.30957344
1	2.51188643
0.1	1.0964782
0.01	1.00925289
0.001	1.00092146

Un écart de  $m_2 - m_1 = 1$  millimagnitude = 0,001 correspond par la formule :

$$f_1 / f_2 = ({}^5\sqrt{100})^{m_2 - m_1}$$

à un rapport de flux  $f_1/f_2$  de 1.000921

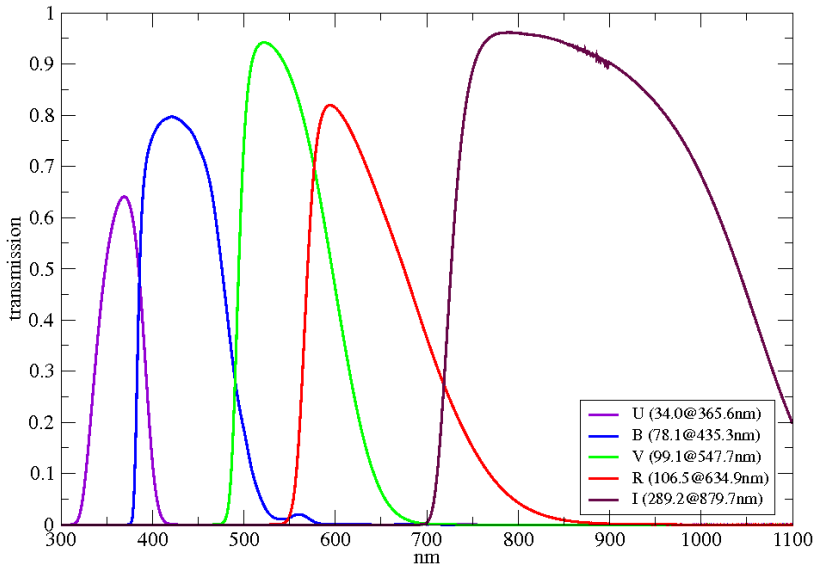
$$(f_2 + \delta f) / f_2 = 1 + \delta f / f_2$$

ou un écart relatif de  $\delta f / f_2 = 0,000921$  en éclairement

# Les bandes spectrales UBVRI en astronomie

## ➤ Système photométrique Johnson and Cousins

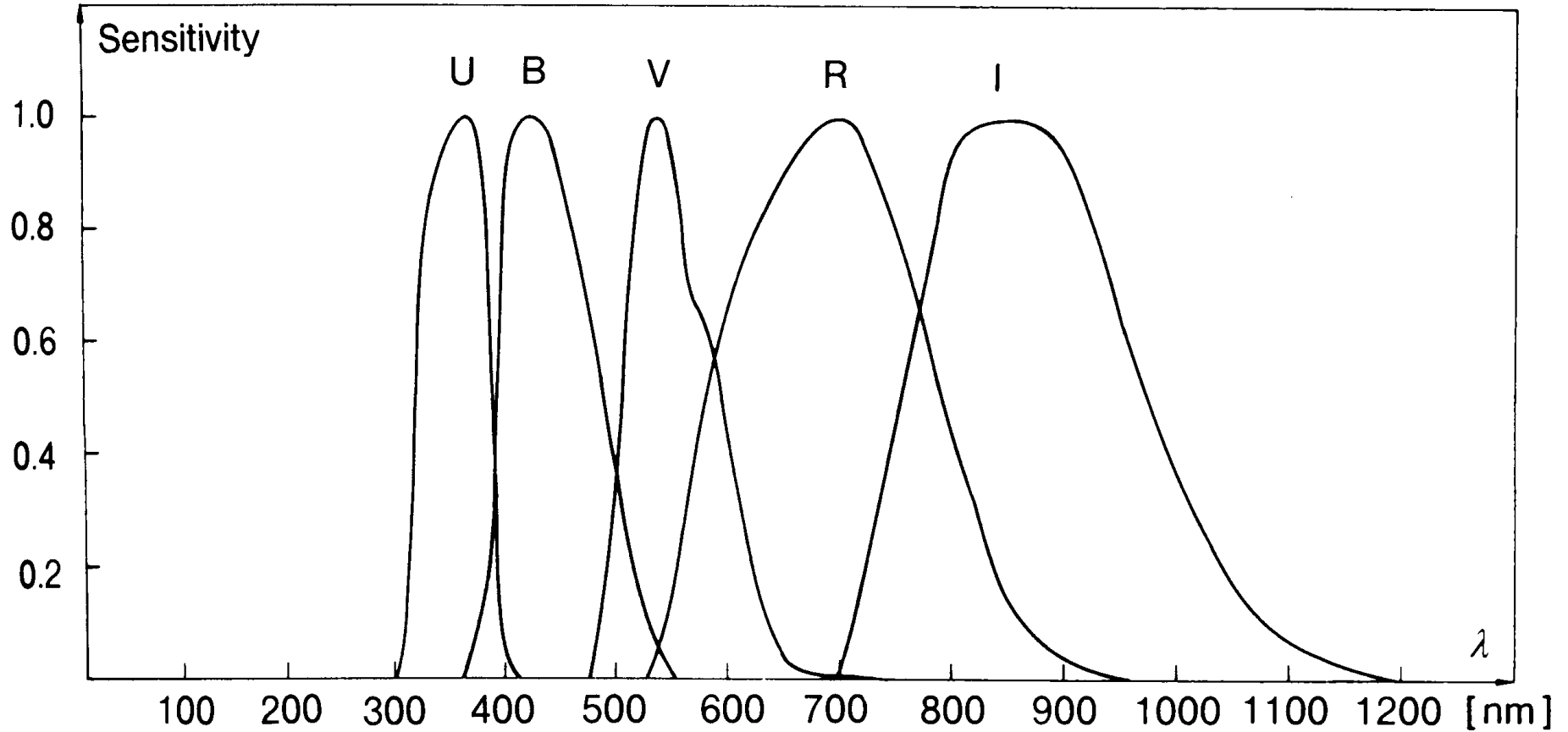
## ➤ U B V R I J K L M N



Filter Letter	Effective Wavelength Midpoint $\lambda_{\text{eff}}$ For Standard Filter <sup>[2]</sup>	Full Width Half Maximum <sup>[2]</sup> (Bandwidth $\Delta\lambda$ )	Variant(s)	Description
<b>Ultraviolet</b>				
U	365 nm	66 nm	u, u', u*	"U" stands for ultraviolet.
<b>Visible</b>				
B	445 nm	94 nm	b	"B" stands for blue.
V	551 nm	88 nm	v, v'	"V" stands for visual.
G			g, g'	"G" stands for green (visual).
R	658 nm	138 nm	r, r', R', R <sub>c</sub> , R <sub>e</sub> , R <sub>j</sub>	"R" stands for red.
<b>Near-Infrared</b>				
I	806 nm	149 nm	i, i', I <sub>c</sub> , I <sub>e</sub> , I <sub>j</sub>	"I" stands for infrared.
Z	900 nm <sup>[3]</sup>		z, z'	
Y	1020 nm	120 nm	y	
J	1220 nm	213 nm	J', J <sub>s</sub>	
H	1630 nm	307 nm		
K	2190 nm	390 nm	K Continuum, K', K <sub>s</sub> , K <sub>long</sub> , K <sup>8</sup> , nbK	
L	3450 nm	472 nm	L', nbL'	
<b>Mid-Infrared</b>				
M	4750 nm	460 nm	M', nbM	
N	10500 nm	2500 nm		
Q	21000 nm <sup>[4]</sup>	5800 nm <sup>[4]</sup>	Q'	

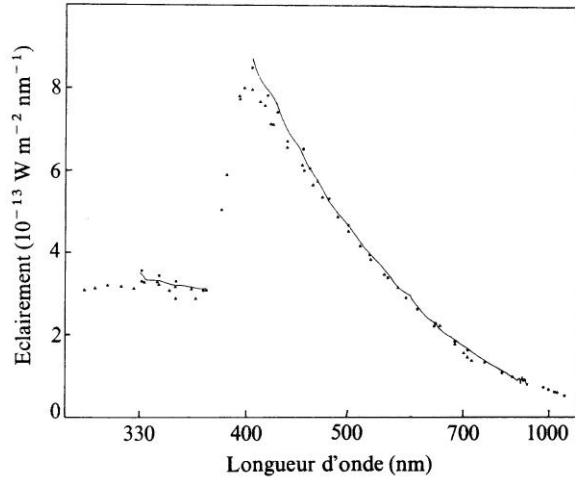


# Bandes UBVR I



# 3. Les étoiles

## Vega l'étoile de magnitude 0

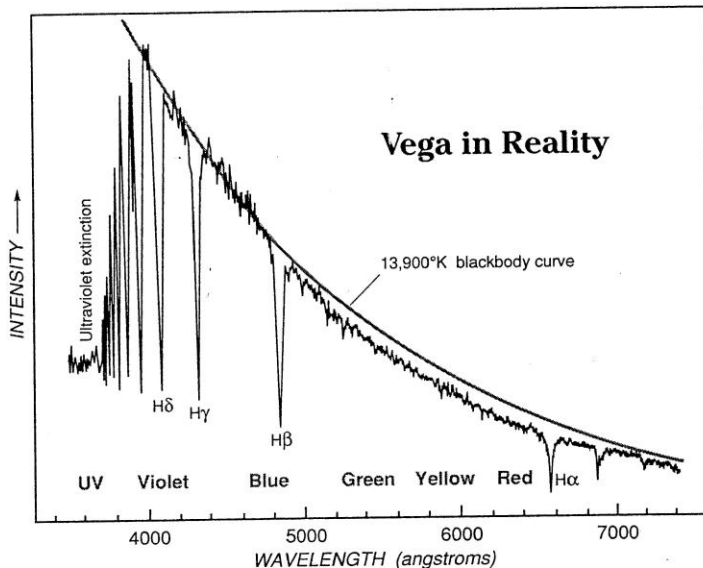


- Les étoiles sont des corps noir. Elles sont caractérisées par une classe spectrale O, B, A, F, G, K, M, liées à leur température de surface et aux raies d'absorption de leur atmosphère

- Leur classe spectrale est trouvée en mesurant l'indice de couleur donné par la différence de magnitude dans deux couleurs :

- U-B
- B-V
- V-R

- Une étoile de type  $A_0$  a un indice de couleur au-delà de la bande V de 0



# La classe spectrale et l'indice de couleur

Etoiles de la séquence principale

	U-B	B-V	V-R	V-I	V-J
O0	-1.33	-0.46			
O5	-1.19	-0.33	-0.15		
O6	-1.17	-0.33			
O7	-1.15	-0.32			
O8	-1.14	-0.32			
O9	-1.12	-0.31	-0.15		
B0	-1.08	-0.3	-0.13	-0.42	
B1	-0.95	-0.26			
B2	-0.84	-0.24	-0.1		
B3	-0.71	-0.2			
B5	-0.58	-0.17	-0.06		
B6	-0.5	-0.15	-0.02		
B7	-0.43	-0.13			
B8	-0.34	-0.11			
B9	-0.2	-0.07			
A0	-0.02	-0.02	0.02	0	0
A2	0.05	0.05	0.08		
A5	0.1	0.15	0.16		
F0	0.03	0.3	0.3	0.47	0.55
F2	0	0.35	0.35		
F5	-0.02	0.44	0.4		
F8	0.02	0.52	0.47		
G0	0.06	0.58	0.5	0.93	1.02
G2	0.12	0.63	0.53		
G5	0.2	0.68	0.54		
G8	0.3	0.74	0.3		
K0	0.45	0.81	0.64	1.4	1.5
K5	1.08	1.15	0.99		
M0	1.22	1.4	1.28	2.2	2.3
M5	1.24	1.64	1.24	2.8	

D'après Astrophysical Quantities 4eme edition

# La classe spectrale et la température des étoiles

## Temperature Etoile séquence principale de classe

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>W (Wolf-Rayet)</b>	30000									
<b>O</b>	50000					44500	41000	38000	35800	33000
<b>B</b>	30000	25400	22000	18700		15400	14000	13000	11900	10500
<b>A</b>	9520	9230	8970	8720		8200		7850	7580	
<b>F</b>	7200		6890			6440			6200	
<b>G</b>	6030		5860			5770			5570	
<b>K</b>	5250	5080	4900	4730	4590	4350		4060		
<b>M</b>	3850	3720	3580	3470	3370	3240	3050	2940	2640	2500
<b>R et N</b>	2000									
<b>S</b>	3000									
<b>I</b>	1500									

# Les étoiles de magnitude zero

Les étoiles de magnitude zéro de type A0 de magnitude 0 constitue la référence en UBVRI elles définissent un éclairement E0 de référence

	$\lambda_0$	$\Delta\lambda$	$e_0$
	m	m	Wm <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup>
U	3.56E-07	3.40E-08	4.35E-02
B	4.35E-07	7.81E-08	7.20E-02
V	5.48E-07	9.91E-08	3.92E-02
R	6.35E-07	1.07E-07	1.76E-02
I	8.80E-07	2.89E-07	8.30E-03

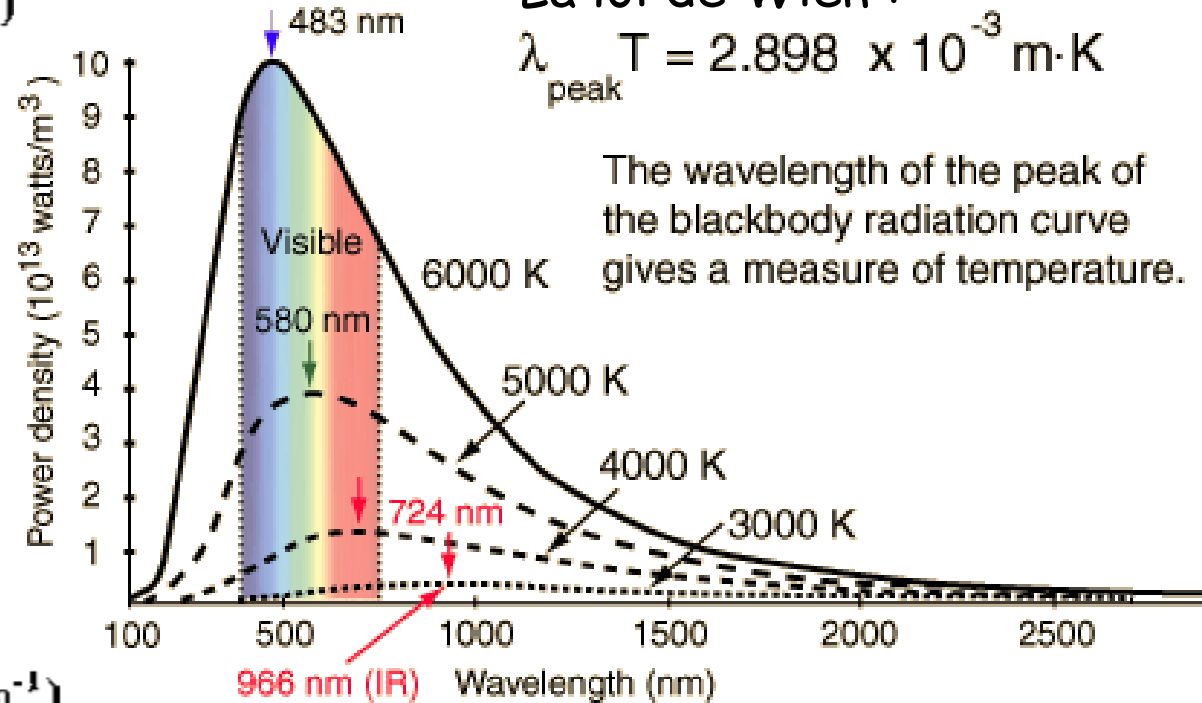
# En faisant l'hypothèse que les étoiles sont des corps noirs : Les différentes expressions de la Loi de Planck :

$$M_\lambda = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (\text{in } \text{W m}^{-2} \text{ m}^{-1})$$

La loi de Wien :

$$\lambda_{\text{peak}} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$$

The wavelength of the peak of the blackbody radiation curve gives a measure of temperature.



$$L_\lambda = \frac{2c^2 h}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (\text{in } \text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-1})$$

$$\eta_\lambda = \frac{2c}{\lambda^4 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (\text{in number of photons } \text{s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-1})$$

$$L_\nu = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{(e^{h\nu/kT} - 1)} \quad (\text{in } \text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1})$$

# La magnitude des objets du Système Solaire

Le Soleil éclaire les objets par exemple ici un astéroïde :

Un CN à 5800K dont on calcule la Luminance spectrale

Le diamètre apparent du Soleil vu depuis la Terre à une distance de 1 UA nous donne sa surface ou plus exactement sa section droite

Vu depuis l'astéroïde à la distance  $R_{sa}$  le Soleil de diamètre  $D_s$  présente un angle solide :

$$\Omega_S = \pi \cdot D_s^2 / 4 / R_{sa}^2$$

Le Soleil délivre un Eclairement  $E_1$  au niveau de l'astéroïde :  $L \cdot \Omega_S$

La réflexion de l'astéroïde détermine son intensité apparente qui est donnée par :

Sa surface apparente  $S_a$

$$S_a = \pi \cdot D_a^2 / 4$$

son albedo  $\rho$

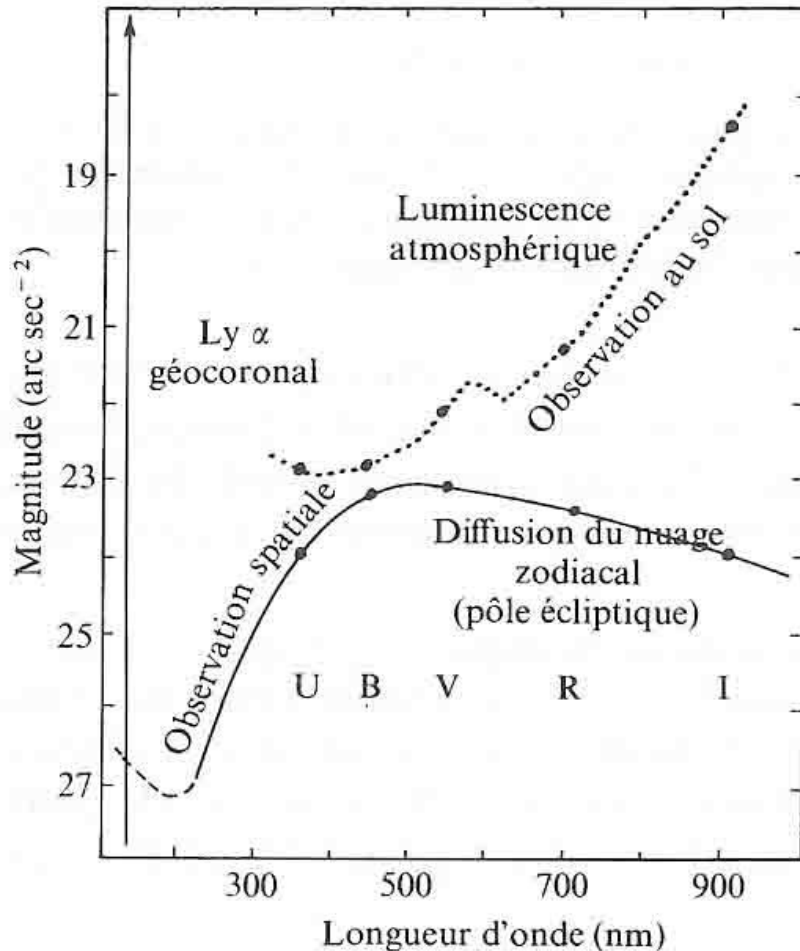
Avec une hypothèse de réflexion lambertienne dans  $\pi$  sr.

La Terre reçoit enfin un éclairement apparent déterminé par la distance entre l'astéroïde et la Terre  $R_{aT}$

$$E_a = L \cdot \Omega_S \cdot \pi \cdot D_a^2 / 4 \cdot \rho / \pi / R_{aT}^2$$

En plus on peut tenir compte de l'angle de phase  $\theta$  pour corriger l'intensité apparente par un terme en  $\cos^2 \theta$

## 5. Le fond de ciel : en magnitude par arc sec<sup>2</sup>

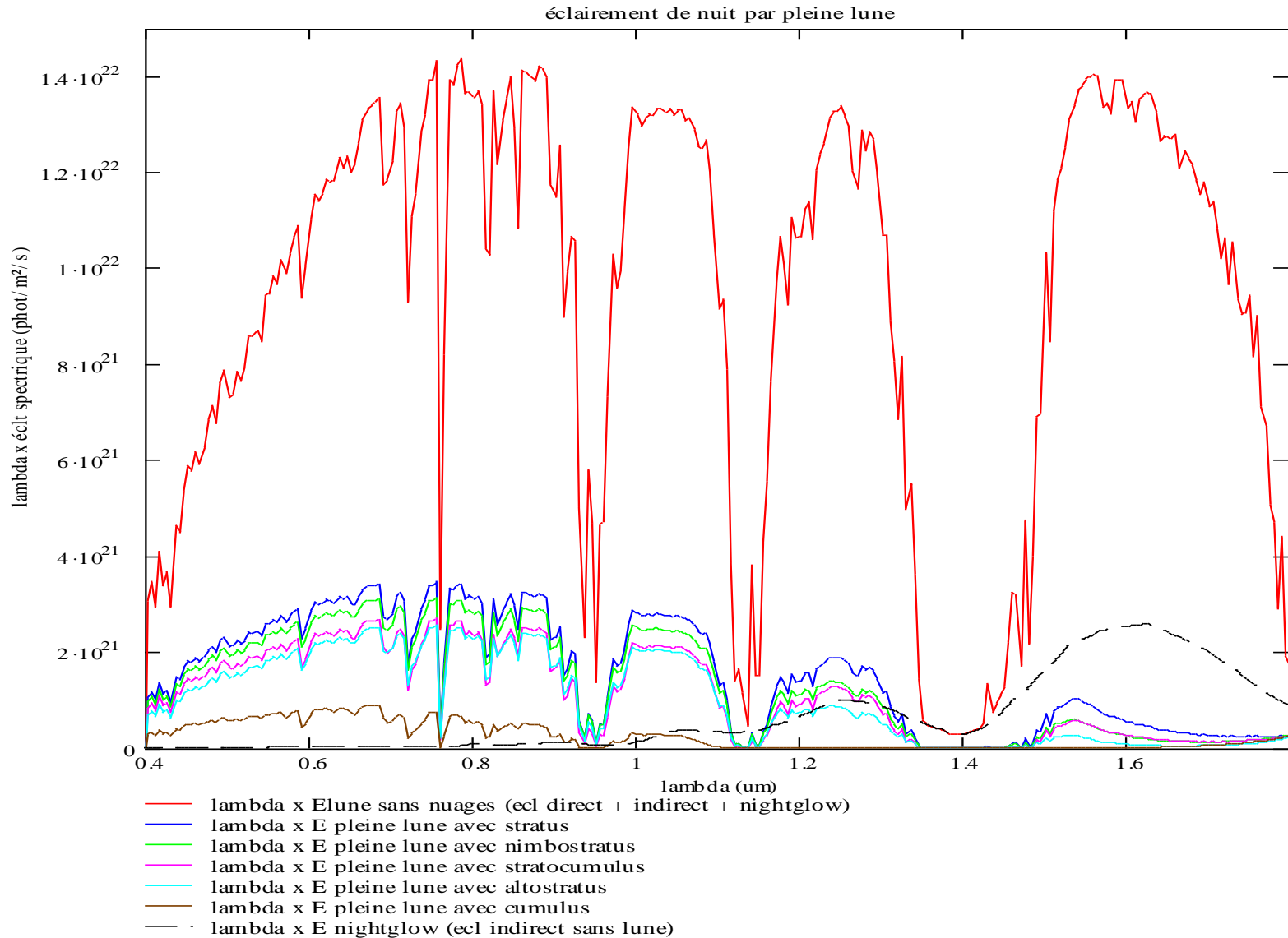


- La luminance du fond de ciel ou des objets étendus peuvent être intégrés sur un angle solide pour mesurer leur éclairement en magnitude ou leur luminance en mag/arc sec<sup>2</sup>
- 1 arc sec = 5 μrd
- 1 arcsec<sup>2</sup> = 25 10<sup>-12</sup> sr



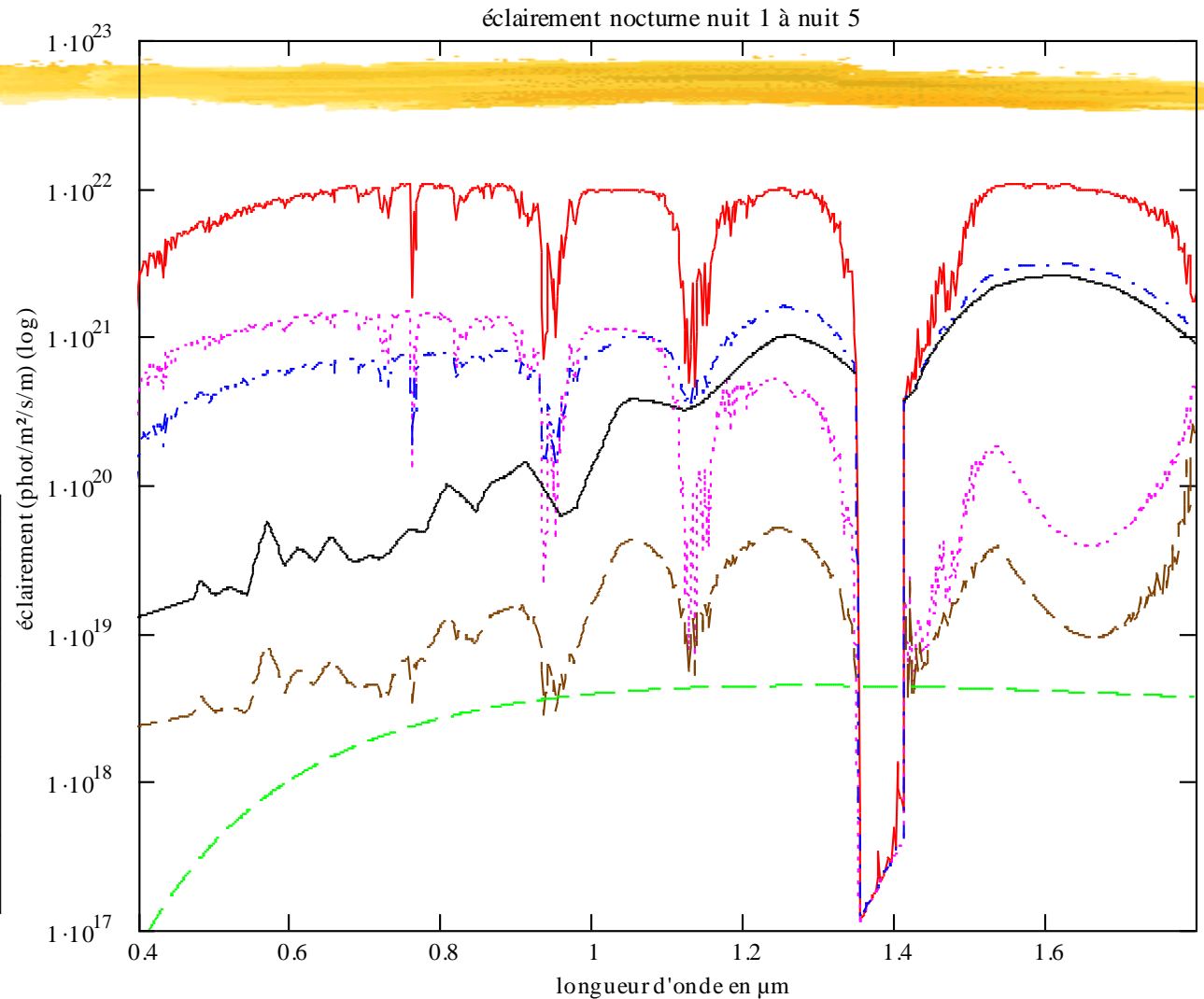


# Eclairements photoniques



# Les spectres d'éclairement des 5 niveaux de nuit

Level	Sky cond.	Ground illumination	Weight
Units		mlux	%
1	Full Moon	1000 - 40	14
2	Full Moon cloudy	40 - 10	24
3	Moon quarter	10 - 2	7
4	Clear without moon	2 - 0.7	27.5
5	Cloudy Without Moon	0.7 - 0.1	27.5
	Under canopy Cave	<0.1	



- nuit 1 - 200 mlx
- ⋯ nuit 2 - 30 mlx
- · - nuit 3 - 14 mlx
- nuit 4 - 0.8 mlx
- · - nuit 5 - 120 µlx
- · - corps noir à 2856 K (éch log arbitraire en nb photons)

# Evaluation du fond

La transmission atmosphérique induit pour la Visée zénithale depuis le niveau de la mer une perte de 0,3 magnitude

La diffusion atmosphérique induit une luminance de fond de ciel

- Naturelle
- Artificielle par la diffusion de l'éclairage urbain : la pollution lumineuse

## ➤ Un fond de ciel à

magnitude 20 par arcsec<sup>2</sup> :  $4.2 \cdot 10^5 \times 10^{-8}$

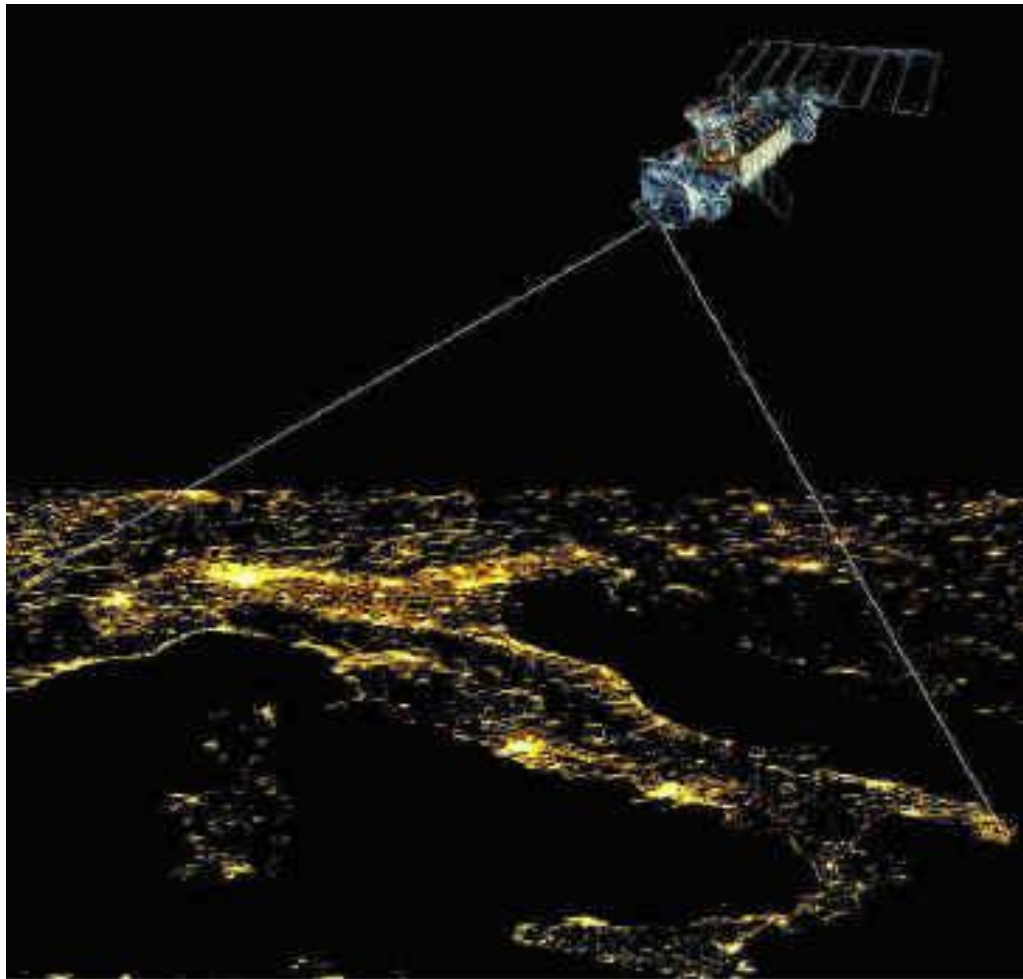
soit:  $4.2 \cdot 10^{-3}$  photon.s<sup>-1</sup>.as<sup>-2</sup>

sur 3 ' et 100ms: 14 photons

Soit une fluctuation RMS de 4

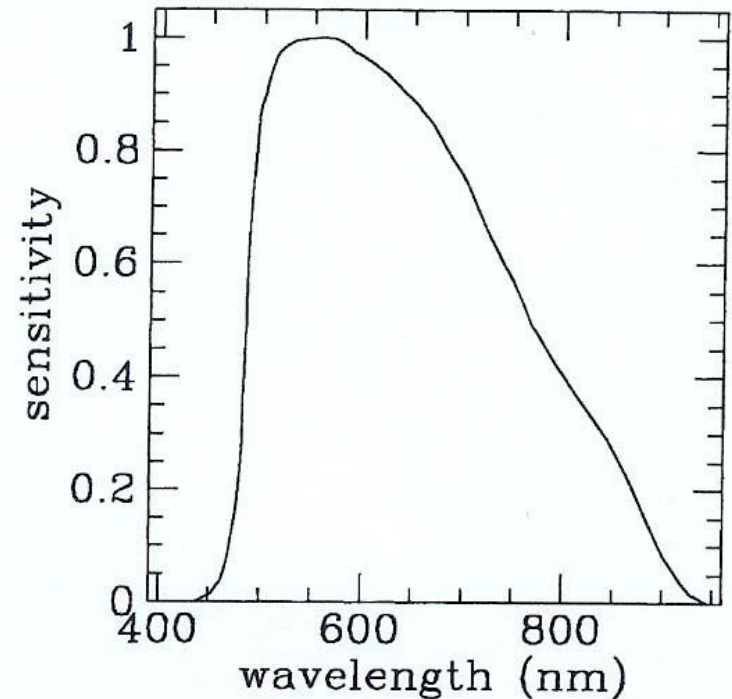
Un ciel non pollué sur Terre : magnitude 22 par arsec<sup>2</sup>

# L 'atlas mondial de la brillance du ciel de P. Cinzano



Domaine de radiance depuis  $1.54 \cdot 10^{-9}$  jusqu'à  $3.17 \cdot 10^{-7} \text{ W.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$

à 550nm  $1.47 \cdot 10^{-3} \text{ W.lm}^{-1}$



**Figure 1.** Spectral sensitivity of the OLS-PMT detector of DMSP satellite *F12*

# Nouvel Atlas Mondial de la Luminance du fond de ciel

- Après la première édition en 2001, Fabio Falchi publie en 2016 un nouvel Atlas mondial
  - Données spatiales de instruments VIIRS et DNB
  - Logiciel de modélisation de propagation et diffusion atmosphérique
  - Luminance en bande V
  - Atlas de la pollution lumineuse

Falchi *et al.* *Sci. Adv.* 2016;2:e1600377 10 June 2016

## RESEARCH ARTICLE

---

### ENVIRONMENTAL PROTECTION

## The new world atlas of artificial night sky brightness

Fabio Falchi,<sup>1\*</sup> Pierantonio Cinzano,<sup>1</sup> Dan Duriscoe,<sup>2</sup> Christopher C. M. Kyba,<sup>3,4</sup> Christopher D. Elvidge,<sup>5</sup> Kimberly Baugh,<sup>6</sup> Boris A. Portnov,<sup>7</sup> Nataliya A. Rybnikova,<sup>7</sup> Riccardo Furgoni<sup>1,8</sup>

2016 © The Authors, some rights reserved;  
exclusive licensee American Association for  
the Advancement of Science. Distributed  
under a Creative Commons Attribution  
NonCommercial License 4.0 (CC BY-NC).  
10.1126/sciadv.1600377















# Luminance du fond de ciel photopique

		ph.cm-2.s-1.sr-1		μcd.m-2		V mag.as-2	
		min	max	min	max	max	min
Contribution à la luminance du fond de ciel de la pollution lumineuse	Gris	8,61E+05	9,47E+06	2,5	27,7	26,6	24,0
	Bleu	9,47E+06	2,84E+07	27,7	83,2	24,0	22,8
	Vert	2,84E+07	<b>8,61E+07</b>	83,2	<b>252</b>	22,8	<b>21,6</b>
	Jaune	8,61E+07	2,58E+08	252	756	21,6	20,4
	Orange	2,58E+08	7,75E+08	756	2268	20,4	19,2
	Rouge	7,75E+08	2,32E+09	2268	6804	19,2	18,0
	Blanc	2,32E+09		6804		18,0	
Luminance naturelle du fond de ciel			<b>8,61E+07</b>		<b>252</b>		<b>21,6</b>
Luminance totale du fond de ciel (naturelle + pollution)	Gris	8,70E+07	9,56E+07	254,5	279,7	21,6	21,5
	Bleu	9,56E+07	1,15E+08	279,7	335,2	21,5	21,3
	Vert	1,15E+08	1,72E+08	335,2	504	21,3	20,9
	Jaune	1,72E+08	3,44E+08	504	1008	20,9	20,1
	Orange	3,44E+08	8,61E+08	1008	2520	20,1	19,1
	Rouge	8,61E+08	2,41E+09	2520	7056	19,1	18,0
	Blanc	2,41E+09	8,61E+07	7056	252	18,0	

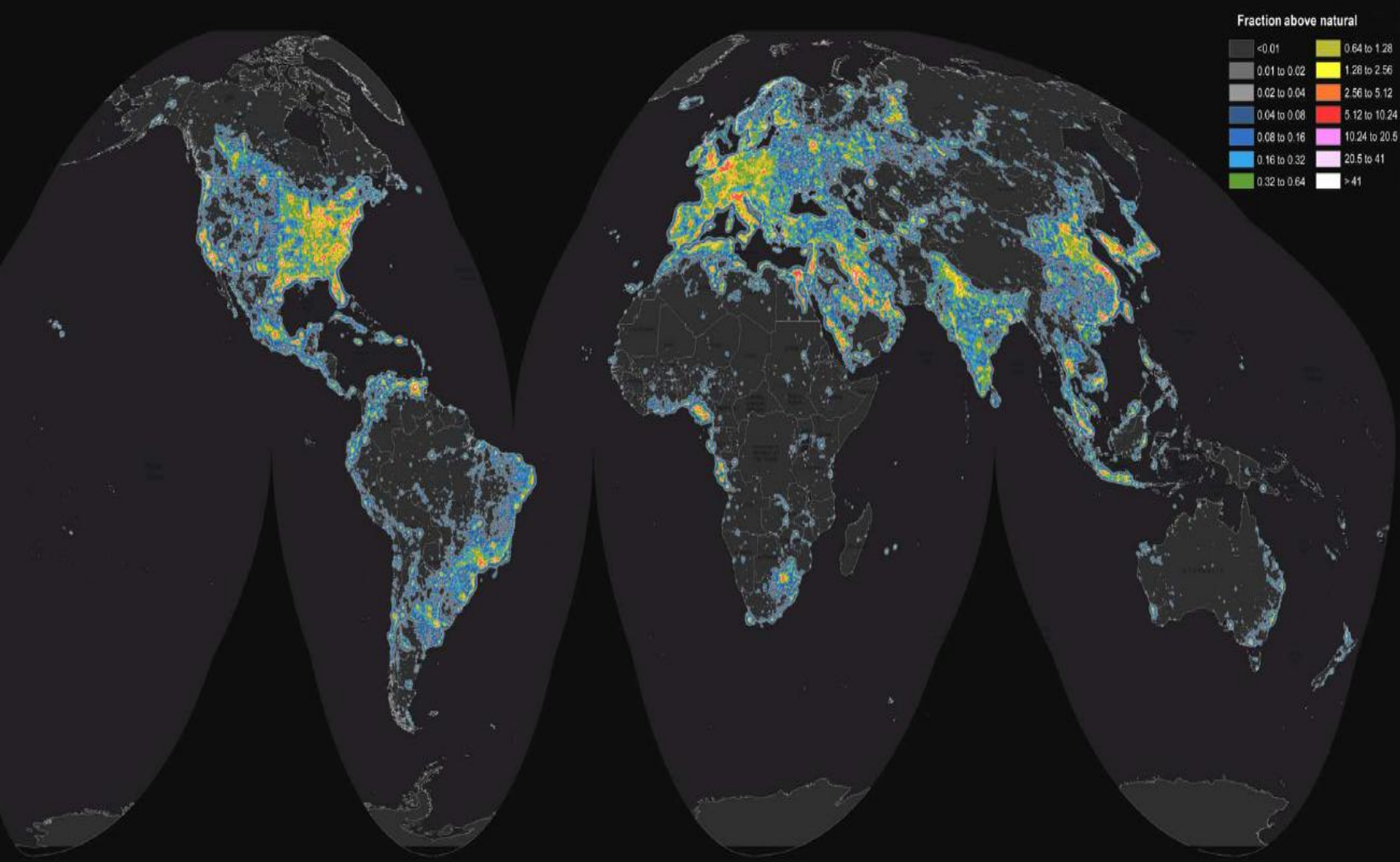
# Code couleur en ratio de la luminance naturel du fond de ciel

- La luminance naturelle du fond de ciel est de 22,0 mag/arcsec<sup>2</sup> soit 174 $\mu$ cd/m<sup>2</sup> (hors étoiles brillantes et VL)
- Le night glow peut provoquer un accroissement de luminance de 0,5 magnitude
- Si la luminance du fond de ciel est uniforme alors on a un éclaircissement de 550 $\mu$ lux au sol

**Table 1. Color levels used in the maps.** The first column gives the ratio between the artificial brightness and the natural background sky brightness (assumed to be 174  $\mu$ cd/m<sup>2</sup>); the second column gives the artificial brightness ( $\mu$ cd/m<sup>2</sup>); the third column gives the approximate (that is, assuming a natural background of 22 mag/arcsec<sup>2</sup>) total brightness (mcd/m<sup>2</sup>); and the fourth and fifth columns give the colors.

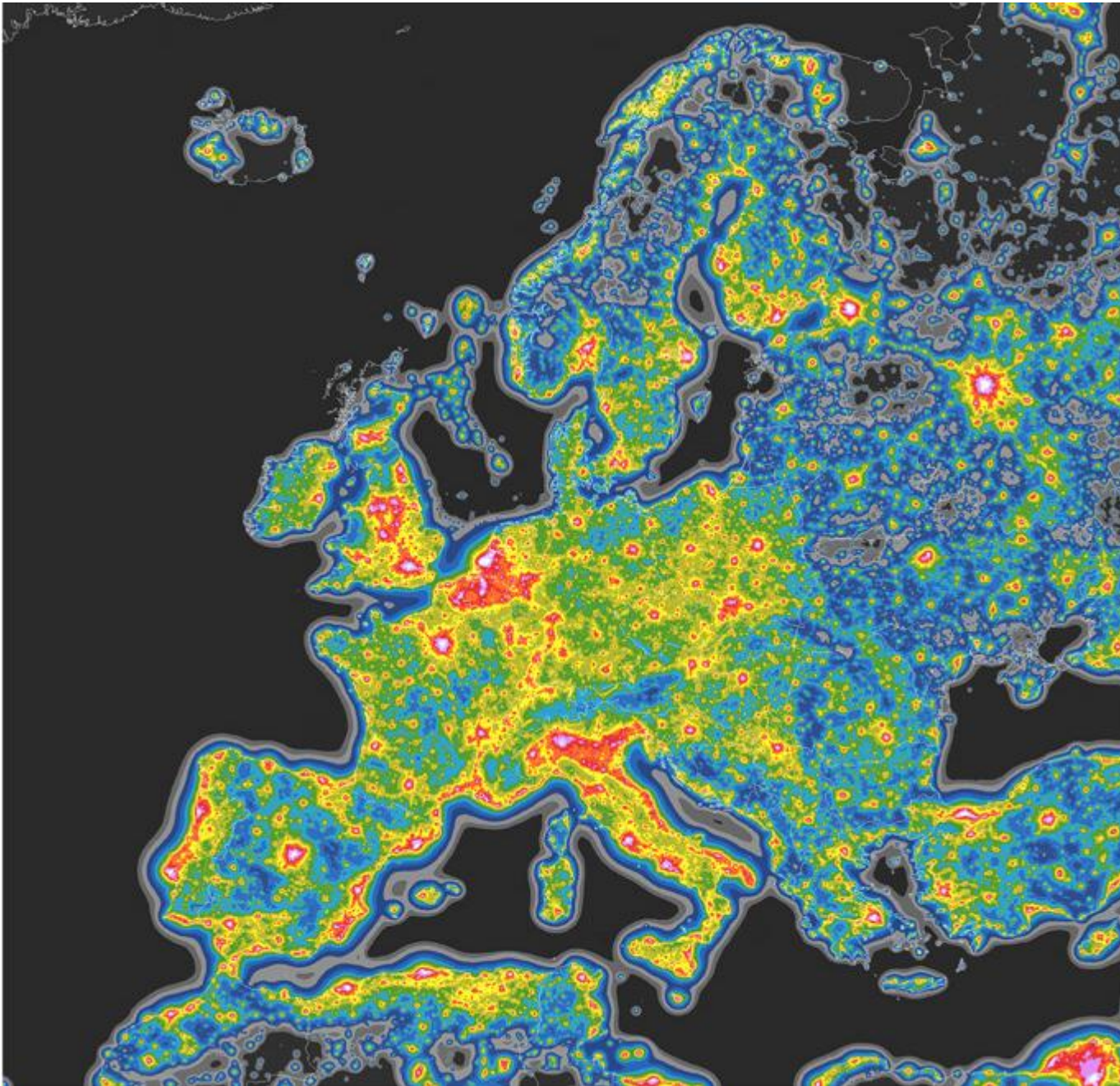
Ratio to natural brightness	Artificial brightness ( $\mu$ cd/m <sup>2</sup> )	Approximate total brightness (mcd/m <sup>2</sup> )	Color	
<0.01	<1.74	<0.176	Black	
0.01-0.02	1.74-3.48	0.176-0.177	Dark gray	
0.02-0.04	3.48-6.96	0.177-0.181	Gray	
0.04-0.08	6.96-13.9	0.181-0.188	Dark blue	
0.08-0.16	13.9-27.8	0.188-0.202	Blue	
0.16-0.32	27.8-55.7	0.202-0.230	Light blue	
0.32-0.64	55.7-111	0.230-0.285	Dark green	
0.64-1.28	111-223	0.285-0.397	Green	
1.28-2.56	223-445	0.397-0.619	Yellow	
2.56-5.12	445-890	0.619-1.065	Orange	
5.12-10.2	890-1780	1.07-1.96	Red	
10.2-20.5	1780-3560	1.96-3.74	Magenta	
20.5-41	3560-7130	3.74-7.30	Pink	
>41	>7130	>7.30	White	

# Atlas mondial de la luminance du fond de

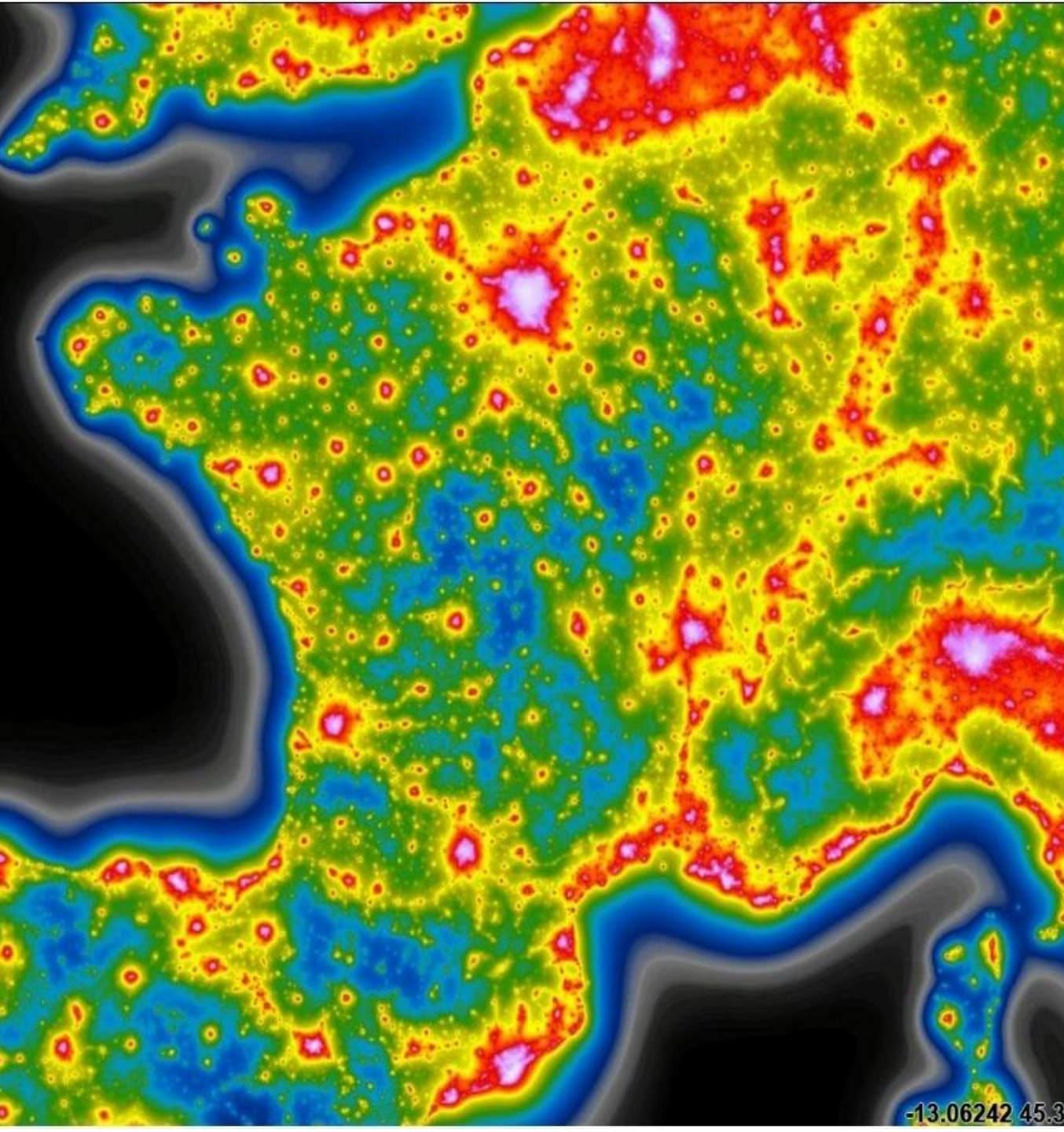




# Falchi 2016 Atlas



# Fond de ciel en France



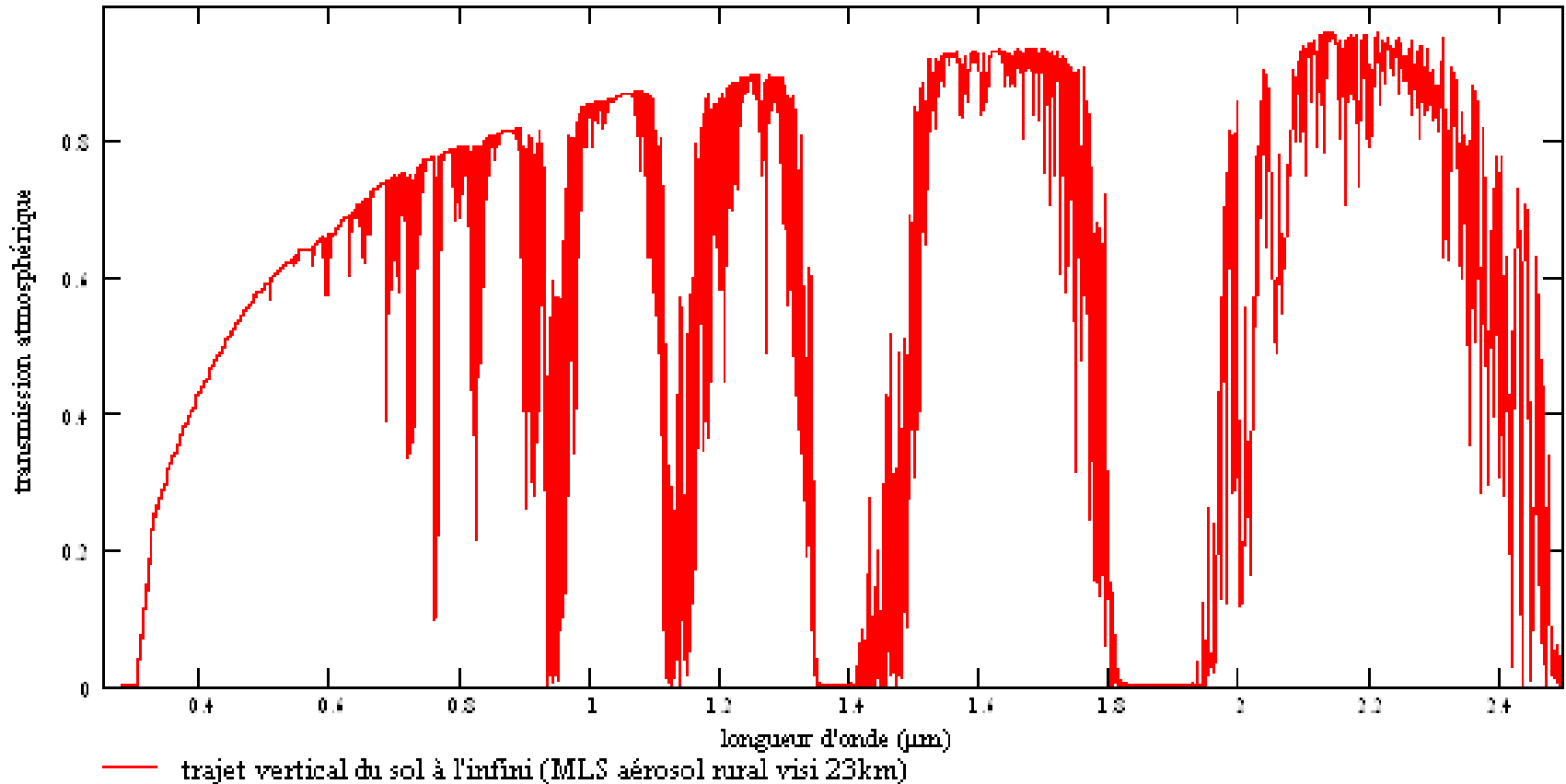
Fraction above natural

	<0.01		0.64 to 1.28
	0.01 to 0.02		1.28 to 2.56
	0.02 to 0.04		2.56 to 5.12
	0.04 to 0.08		5.12 to 10.24
	0.08 to 0.16		10.24 to 20.5
	0.16 to 0.32		20.5 to 41
	0.32 to 0.64		>41

Nuit 3		2.56 to 5.12
Nuit 3		5.12 to 10.24
Nuit 2		10.24 to 20.5
Nuit 2		20.5 to 41
Nuit 1		>41

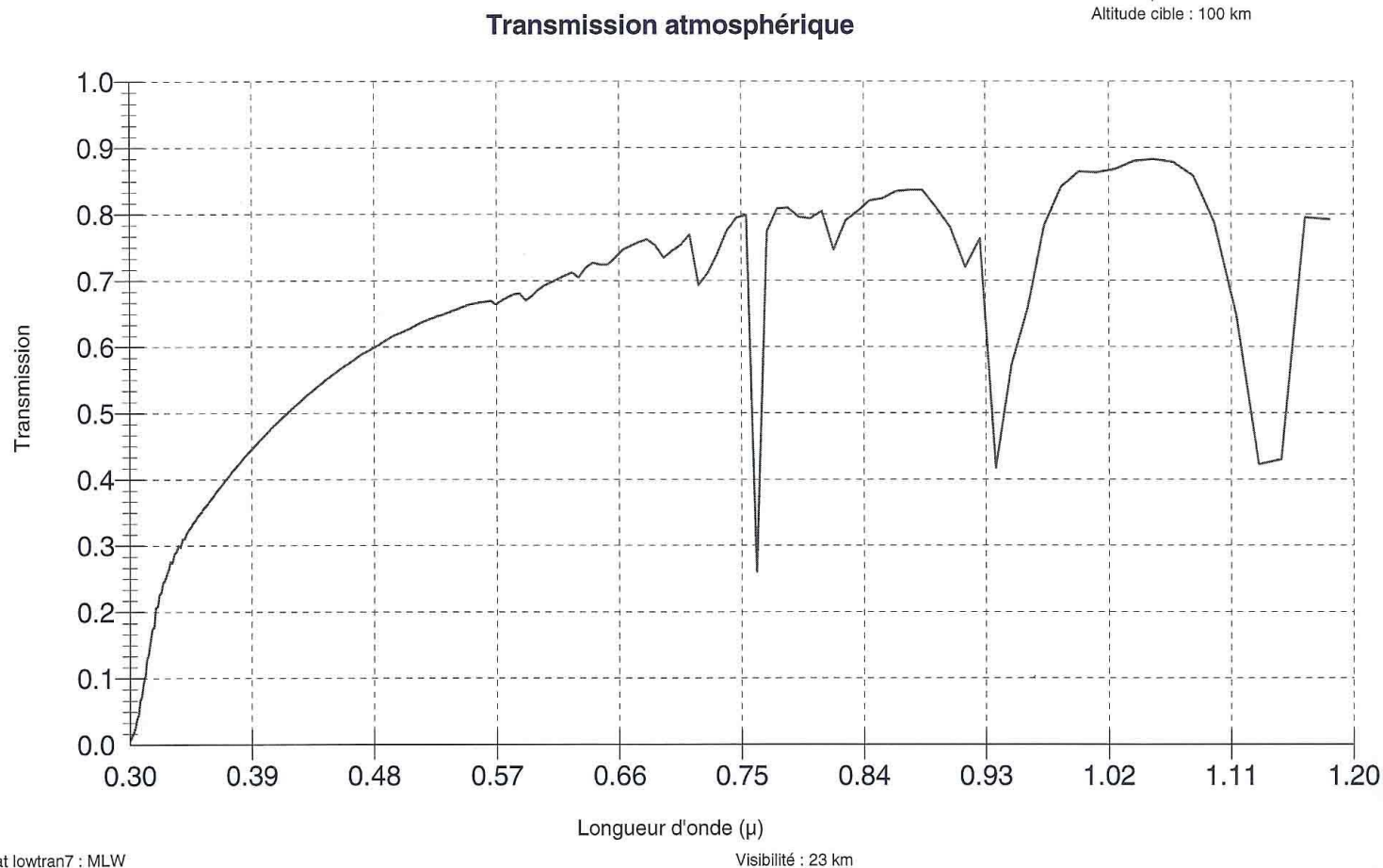
-13.06242 45.35

# La transmission atmosphérique



# La transmission atmosphérique

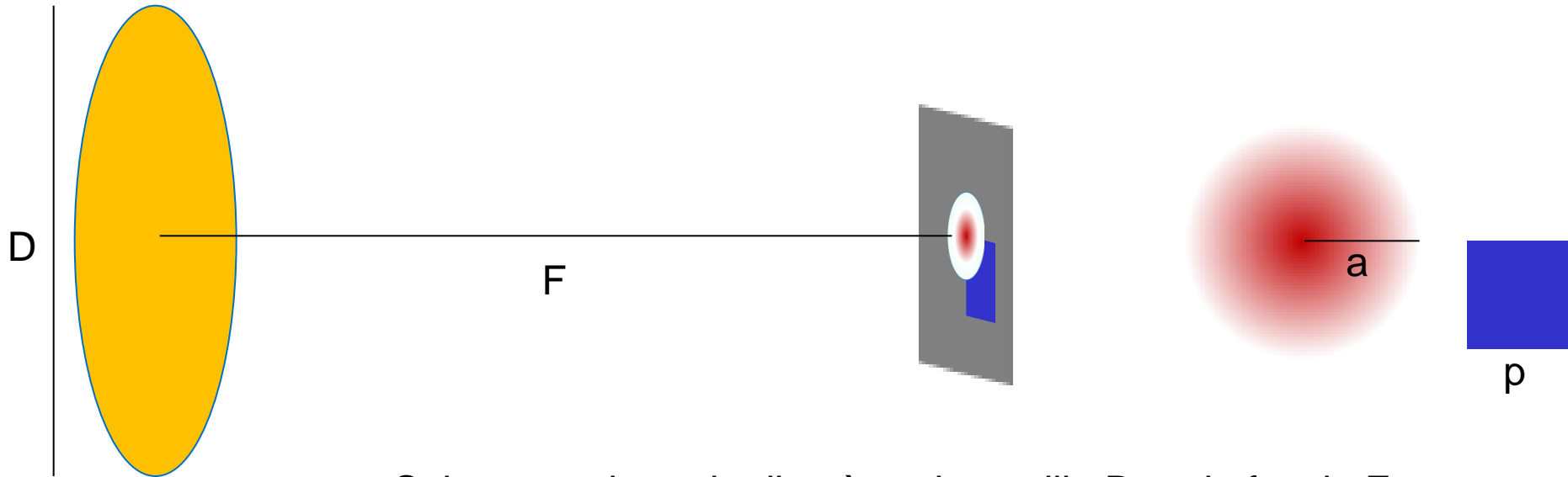
Visée zénithale depuis le niveau de la mer :  
perte de 0,3 magnitude



# Visée verticale – visée horizontale

- Epaisseur atmosphère équivalente à la pression normale :
- $P = 101325 \text{ N/m}^2$
- $N = 6,022 \cdot 10^{23}$
- 1 mole de gaz = 22,4 litres
- Masse d'une mole d'atmosphère = 28g
- Epaisseur d'atmosphère équivalente à la pression au niveau de la mer  
= 8271m de trajet horizontal au niveau de la mer

## 6. La définition et l'optimisation du télescope avec le capteur



Soit une optique de diamètre de pupille  $D$  et de focale  $F$  :

Sa surface  $S = \pi \cdot D^2 / 4$  en  $m^2$

A la limite de diffraction, la résolution  $\varepsilon$  est donnée par  $\varepsilon = 1,22 \cdot \lambda / D$

$\varepsilon$  définit le rayon angulaire du premier anneau noir de la tache de diffraction en radian (rd)

Sa dimension au foyer de l'optique est de rayon  $a = \varepsilon \cdot F$

$p$  le pas pixel

# Le pixel, la résolution,

- **Adaptation du pixel à la résolution de l'optique**

Considérons une caméra dotée d'un objectif de diamètre  $D$  définissant ainsi la surface  $S$  de la pupille d'entrée :

$$S = \pi \cdot D^2 / 4$$

Pour de bonnes optiques, limitées par la diffraction la figure d'Airy nous donne un lobe central dont le diamètre délimité par le premier anneau noir a un diamètre correspondant à deux fois le pouvoir de résolution angulaire  $\varepsilon$  :

$$2\varepsilon = 2,44 \cdot \lambda / D$$

En appliquant le théorème de Nyquist en plaçant deux échantillons dans le lobe de la figure d'Airy, on pourra optimiser la focale  $F$  et le pas  $p$  du pixel d'échantillonnage du plan focal à la valeur de  $\varepsilon$  telle que :

$$\varepsilon = p / F$$

# Le signal photonique



➤ Il est proportionnel :

- A la luminance de l'objet pour les objets résolus, sinon à l'éclairement
- A la transmission de l'atmosphère et de l'optique
- $1/(F/D)^2$  pour les objets résolus sinon à  $D^2$
- Au temps de pose
- A la bande spectrale de réception
- Au rendement quantique du récepteur
- Au nombre d'images accumulées



# Le bruit de photon

## ➤ Le bruit temporel

- Sur un signal constant la fluctuation RMS d'une image à une autre est égal à la racine carré du nombre de photons collectés

## ➤ Le bruit spatial

- Sur un signal constant la fluctuation sur une même image d'un pixel à un autre est égal à la racine carré du nombre de photons collectés

$$\text{Le } S/B = N/\sqrt{N} = \sqrt{N}$$

# Les lois de la mag limite



- 1 Nous sommes limités par le bruit de lecture: alors le gain sera proportionnel à la variation de la surface de la pupille et à l'augmentation du temps d'exposition.
- 2 Nous sommes limités par le flux de photons détecté dans le fond de ciel, alors le gain sera proportionnel à la variation du diamètre de la pupille et la racine carré de l'augmentation du temps d'exposition.

Il faut caractériser :

- Le fond
- La fluctuation du fond
- Le rapport signal sur bruit.

# 7. Conclusions et questions ?



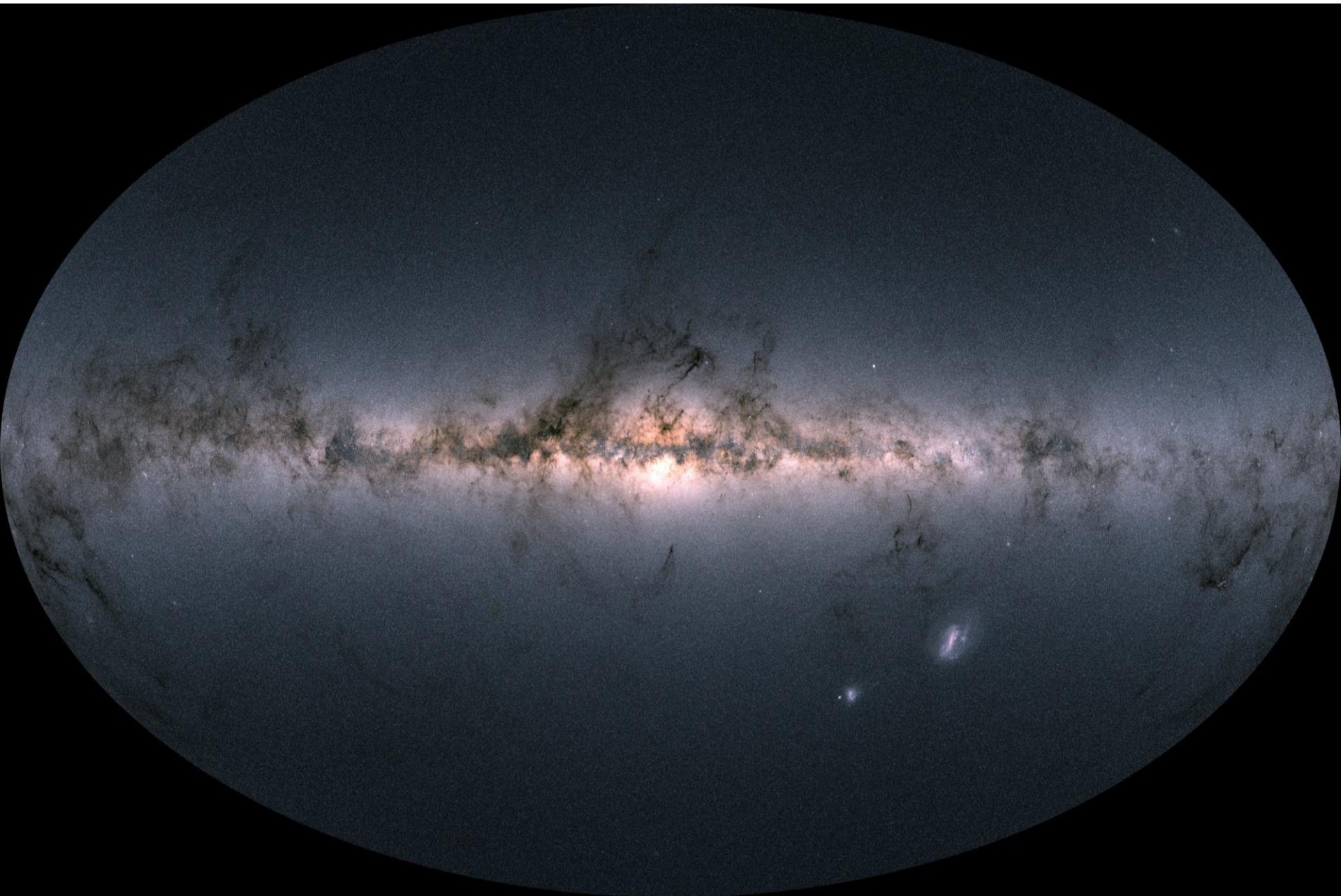
# GAIA DR2 avril 2018

Gaia DR2, c'est ici !  
C'est la Galaxie en infinis détails  
et en couleur !!

European Space Agency  
[www.esa.int](http://www.esa.int)

Crédit: Gaia/ESA/DPAC





# Le catalogue GAIA

- Catalogue de 1,7 Md d'étoiles
- Mesure en deux couleurs B et R sur 1,3 Md d'étoiles au millième : le diagramme HR :
- Spectre des étoiles
- Le diagramme HR : Magnitude absolue vs Indices de couleur G-K (Vert – 2 $\mu$ m)

Il révèle un grand nombre de naines brunes : des petites étoiles froides rayonnant dans l'infrarouge contribuant au fond de ciel en SWIR

	Nb de sources dans Gaia DR2
Nombre de sources avec positions et magnitudes	1 692 919 135
Sources avec parallaxes et mouvements propres	1 331 909 727
Sources avec la couleur rouge, $G_{RP}$	1 383 551 713
Sources avec la couleur bleue, $G_{BP}$	1 381 964 755
Sources avec vitesse radiale	7 224 631
Courbes de lumière de sources variables	550 737
Objets du Système Solaire	14 099
Sources avec température de surface	161 497 595
Sources avec une mesure de l'extinction sur la ligne de visée	87 733 672
Sources avec rayons et luminosité	76 956 778

