



AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
Angle horaire/dec: 8h29m51s+16°37'33"
Az/Haut: +309°02'31"/-11°41'31"
Distance: 1.00636779 UA
Diamètre apparent: +0°31'47.1"

Date & Heu

120 // 8 // 10

Projet MARIS STELLA : récepteur stellaire de haute précision pour la navigation maritime

Loïc BARBOT, Marc FERRARI , Johan MONTEL, Yannick ROEHLLY,
Jean-Luc GACH, William THUILLOT, Kjetil DOHLEN

Magnitude absolue: 4.63
AD/DEC (J2000): 1h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 09h06m58s+16°37'33"
Angle horaire/dec: 8h29m57s/+16°37'33"
AZ/HA: 09°02'31"/-11°54'13"
Dist: 102.112 au
Diam: 1.1 au

Navigation et géolocalisation en mer

Souhait d'une alternative aux systèmes satellitaires :

- capteur optique : observation de la voûte céleste ;
- capteur inertiel : mesure de la verticale locale.



Principe : identifier une étoile au zénith

coordonnées de l'étoile : ascension droite α

déclinaison δ

rotation terrestre : angle horaire sidéral AH_{so}

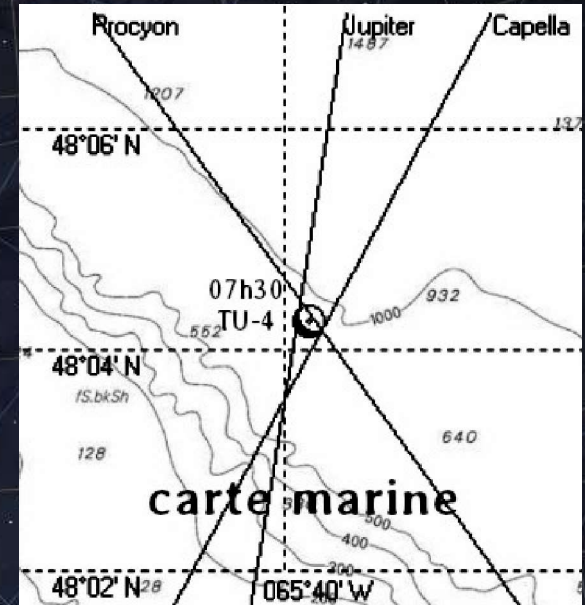
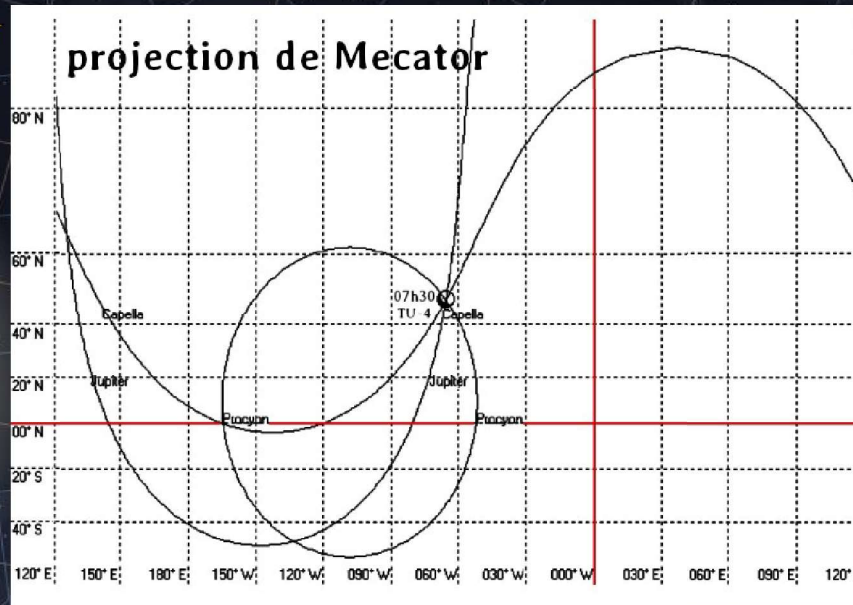
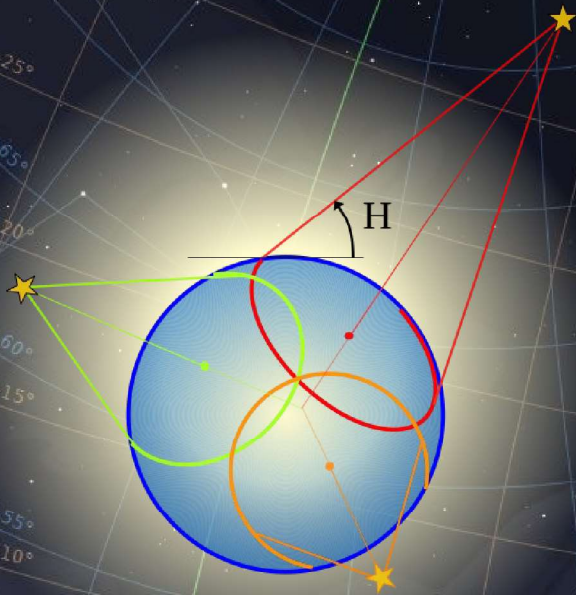
⇒ position du navire : latitude $\varphi = \delta$

longitude $G = AH_{so} - \alpha$

Magnitude absolue: 4.63
AD/DEC (J2000): 1h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 09h06m58s+16°37'33"
Angle ascension/dec: 8h29m51s/+16°33'
Azimut: 309°02'31"W-11°41'13"
Distance: 68.1 UA
Diamètre apparent: 0°31'

Pas d'étoile au zénith ?

comme au sextant, il faut 3 étoiles...



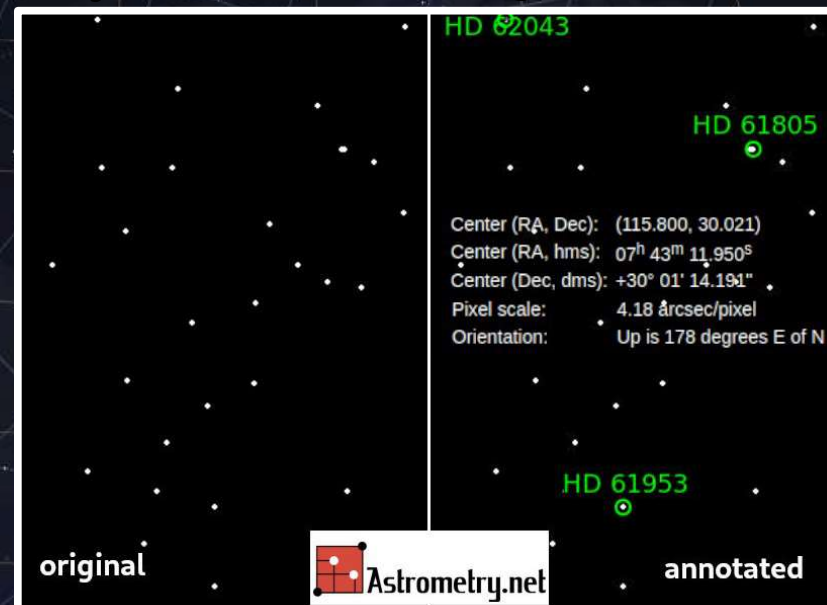
La navigation au sens large inclut la position, les attitudes (cap, gîte, assiette) et le temps !

Magnitude absolue: 4.63
 AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
 AD/DEC (de la date): 09h06m58s+16°37'33"
 Angle (traire): 8h29m51s/+16°37'33"
 Az/H: +30°/2'31"/-11°41'3"
 Dist: e
 Diam: 1p

Identification des étoiles

Avec plusieurs étoiles détectées (champ de vision large : > 10°x10°)

Nom de l'algorithme	Nombre minimum d'étoiles
Angle	2
Combine triangle	3
Pyramid	4
Quadrilateral	4
Pentagon	5
Quadrilateral pyramid	5
Triangular dipyramid	5



ou avec une seule étoile (champ de vision étroit : < 2°x2°)
 carte du ciel ou catalogue d'étoiles restreint
 selon la position estimée du navire
 et la direction visée (azimut, hauteur)

Magnitude absolue: 4.63
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s/+16°37'33"
Angle horaire/dec: 8h29m11s/+16°37'33"
Azimut/alt: 17°02'31"/11°1'31"
Dist. terre: 14110000000m
Diam. terre: 12756000m

Ordres de grandeur

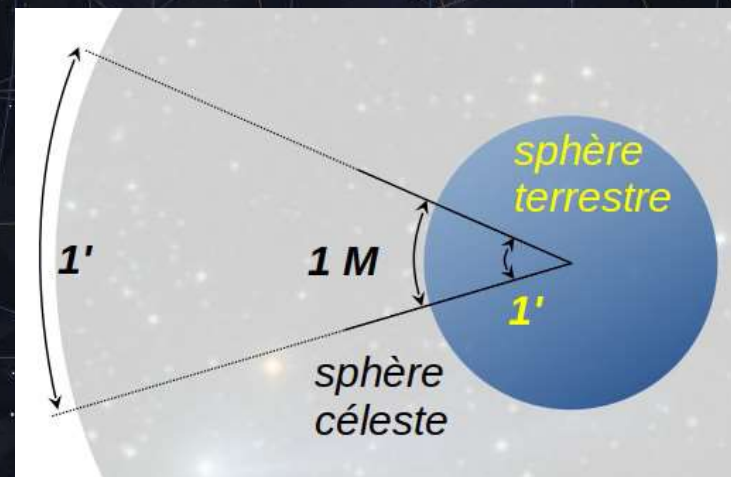
$$1 M = \frac{\text{périmètre terrestre}}{360^\circ \cdot 60'} = \frac{40\,000\text{ km}}{360^\circ \cdot 60'} = 1,852\text{ km}$$

$$\text{donc } 1'' = 1 \text{ arcsec, c'est } \frac{1 M}{60''} = \frac{1852\text{ m}}{60''} = 31\text{ m}$$

$$\frac{1 \text{ tour}}{1 \text{ jour}} = \frac{360^\circ}{24\text{ h}} = 15^\circ/\text{h} = 15''/\text{s} \text{ soit } 463\text{ m/s} \text{ à l'équateur}$$

Pour un point final à 100 mètres-près,
il faut observer des astres avec précision :

- ★ distances zénithales à 3 arcsec = 16 μrad ;
- ★ temps à 0,22 s.



Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 15h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
Angle horaire/dec: 8h29m51s/+16°37'33"
Az/Ha: 19°02'31"/-11°3'31"
Dist: 117.7
Diam: 1.1

Projets français

Projet MAGELLAN



Georges LAMY AU ROUSSEAU
<https://www.starnav.fr/>



Projet VISION



SAFRAN & SODERN

AIR & COSMOS, Première démonstration grand public du viseur diurne de Sodern, Salon du Bourget, juin 2023

Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 15h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
Angle horaire/dec: 8h29m51s/+16°37'33"
Az/Ha: 19°02'31"/-11°31"
Dist: 117.77
Diam: 1.2

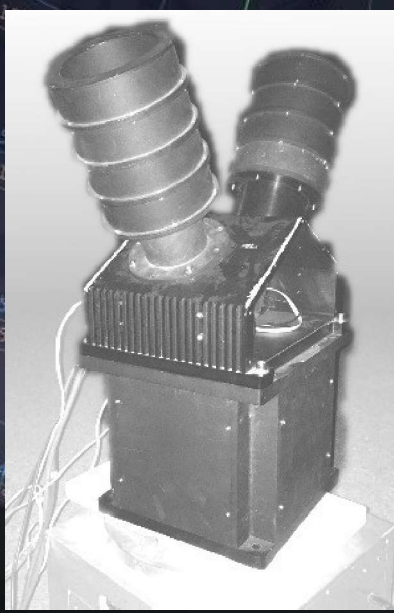
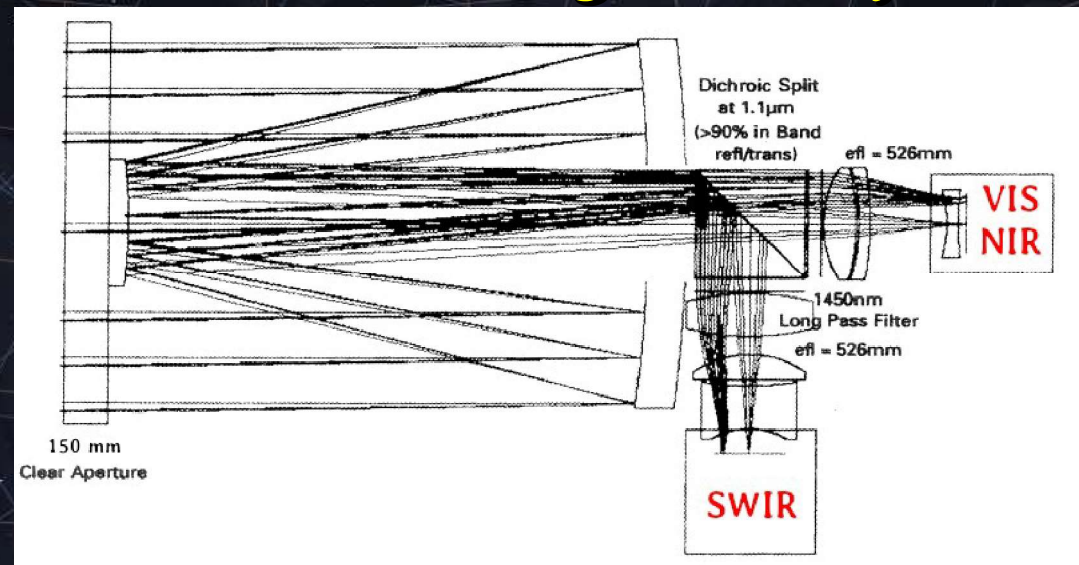
Date & Heu
120 // 8 // 10

Projets étrangers

High precision - automated celestial navigation system

TREX ENTERPRISES

5 à 100 m de précision satellites + étoiles



Mesures d'attitude à 5" près université chinoise des technologies de défense (position à 100 m près)

Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
Angle horaire/dec: 8h20m51s/+16°37'33"
Az/Ha: 19°02'31"/11°41'31"
Dist: 147.14
Diam: 4.7

Date & Heu
11:20 // 8 // 10

Précision disponible en 2023

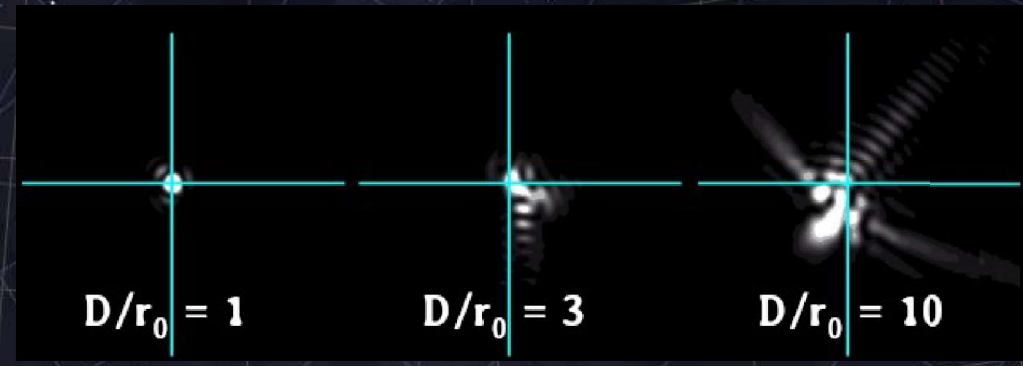
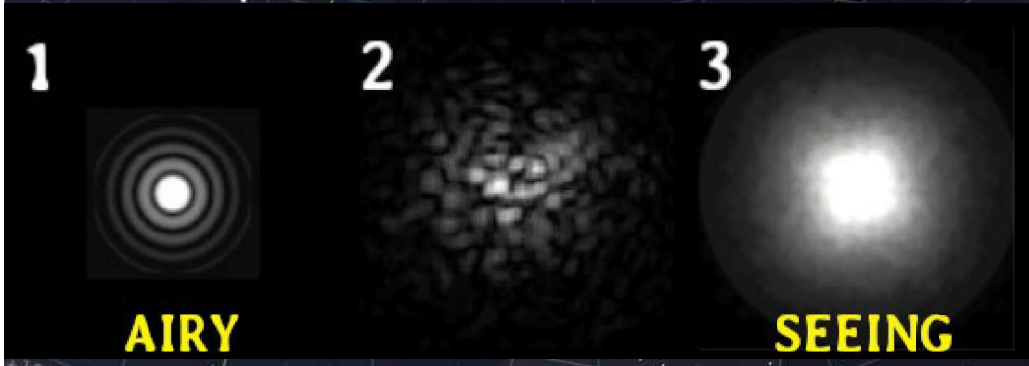
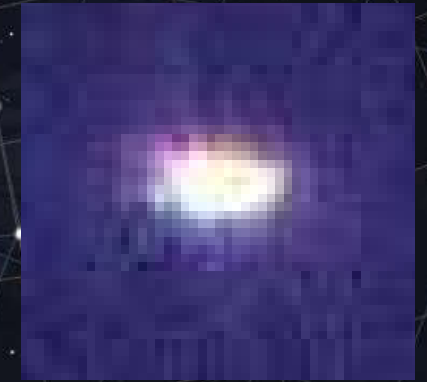
- 0,015" sur la position des étoiles (GAIA)
- 0,02" sur la position de la terre (INPOP)
- 0,1" sur la réfraction pour une hauteur $H > 20^\circ$
- 0,1" sur l'inclinomètre
- 0,1" à 1" sur la visée stellaire (compromis entre pixels et focale)
- 10^{-5} s/an de dérive sur une horloge à quartz
- 10^{-10} s/an de dérive sur une horloge atomique
- 0,001" sur les calculs (ou mieux : à la demande)
- 1" à 10" de diamètre de la tache d'AIRY (selon λ, D)
- $0,31'' \cdot \cos \varphi$ aberration diurne de la lumière (rotation terrestre)



Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
Angle/haire/dec: 8h29m51s/+16°37'33"
Az/haire/dec: +300°02'31"/-11°41'31"
Distance: 42.2 pc
Diamètre: 4.2 AU

Source d'erreur : les turbulences

Le vent en altitude crée des tourbillons de diamètre r_0 (paramètre de FRIED) durant une période $\tau_0 = r_0 / V = 1$ à 50 ms

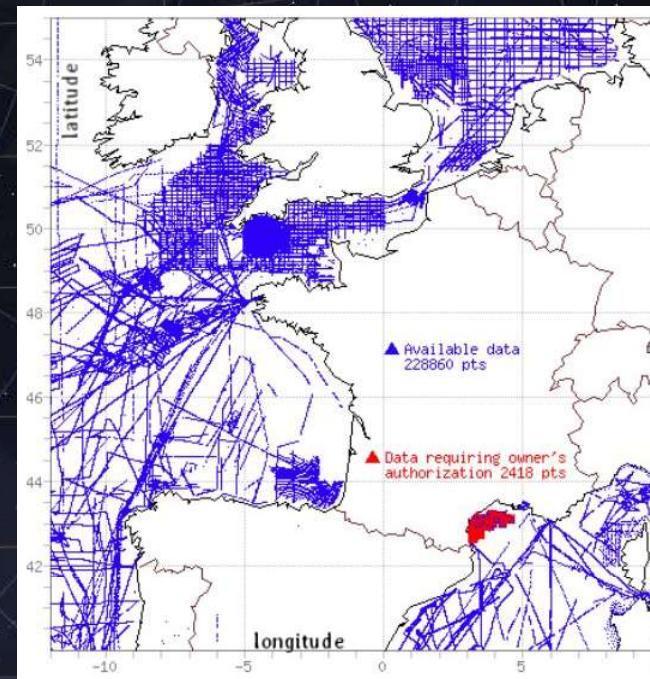
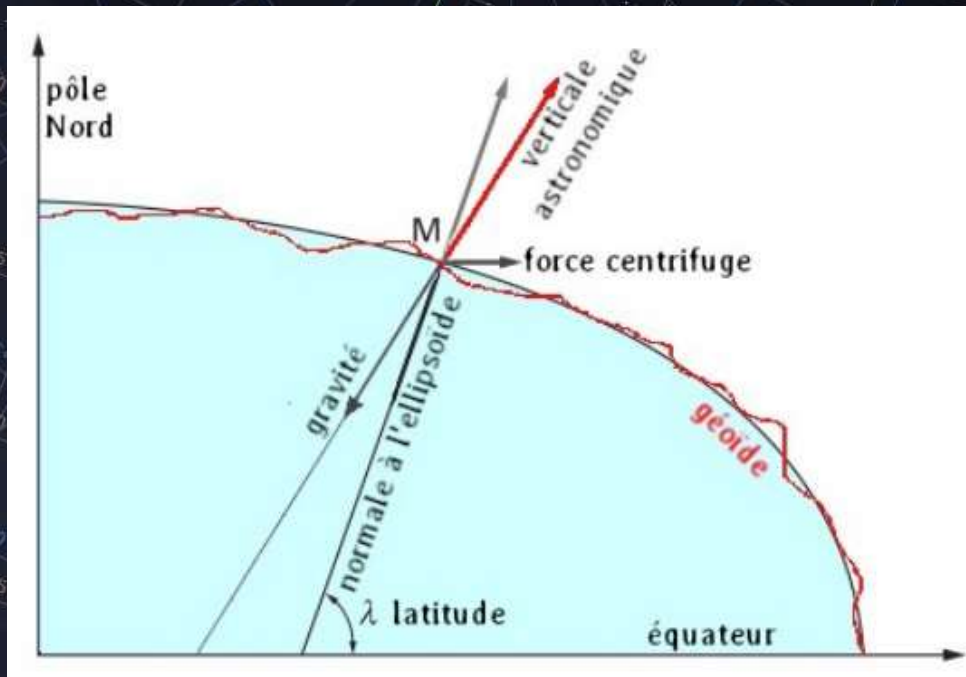


Vitesse de roulis des navires :

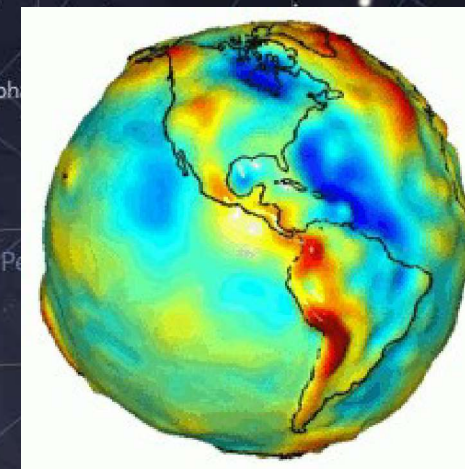
- $3^\circ/s = 10,8''/ms$ grand navire + météo moyenne
- $6^\circ/s = 21,6''/ms$ grand navire + tempête ou petit navire
- $9^\circ/s = 32,4''/ms$ petites embarcations + hautes vagues

Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
Angle horaire/dec: 8h29m51s/+16°37'33"
Az/El: +309°02'31"/-11°41'31"
Distance: 167.774
Diamètre: 1.4

Source d'erreur : la déviation de la verticale

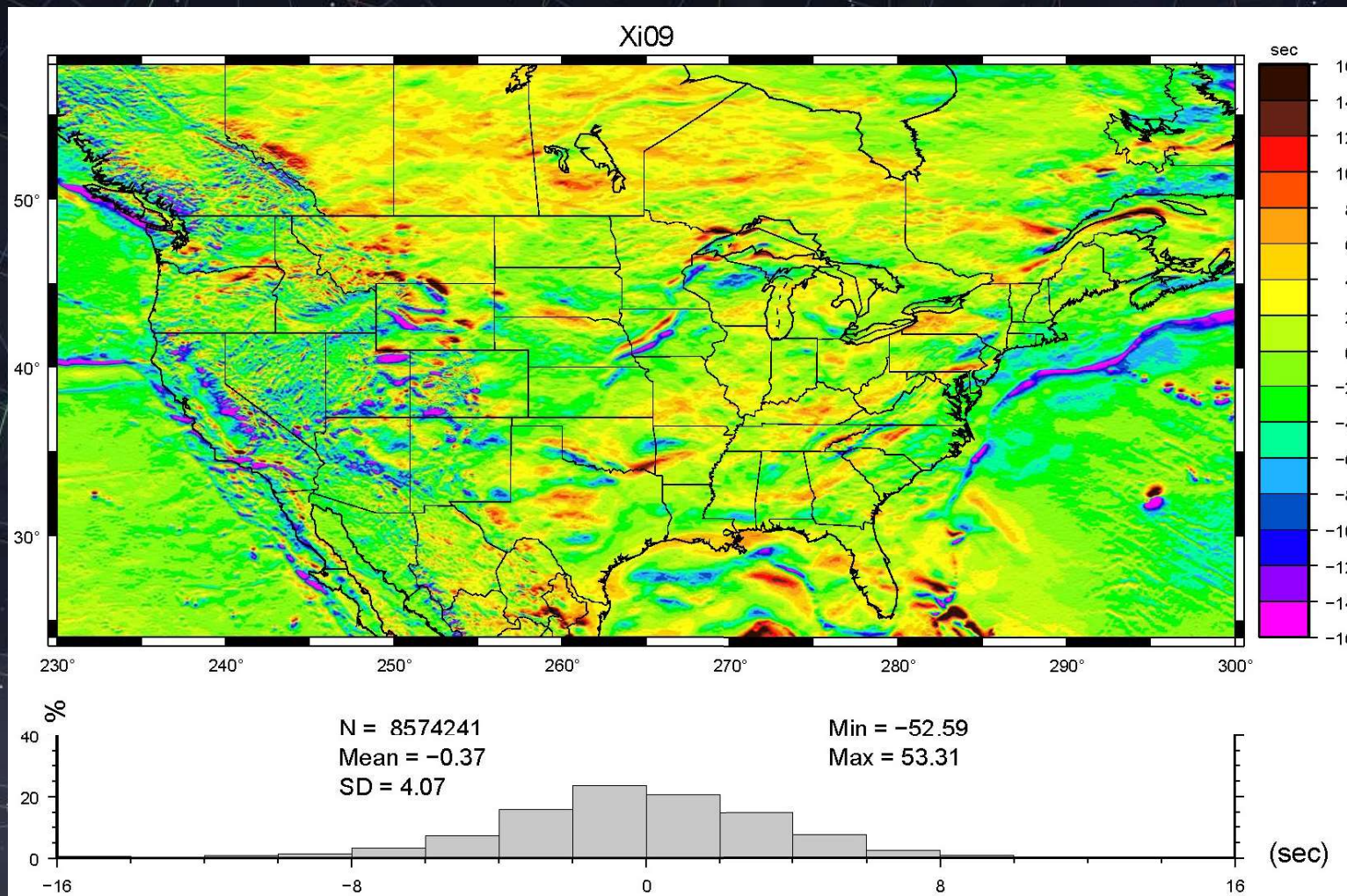


modèle EGM2008 :
1,3 arcsec de précision
mais très peu de mesures en mer



Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
Angle horaire/dec: 8h29m51s/+16°37'33"
Az/El: +309°02'31"/-11°41'31"
Distance: 67.77
Diamètre: 1.4

Source d'erreur : la déviation de la verticale

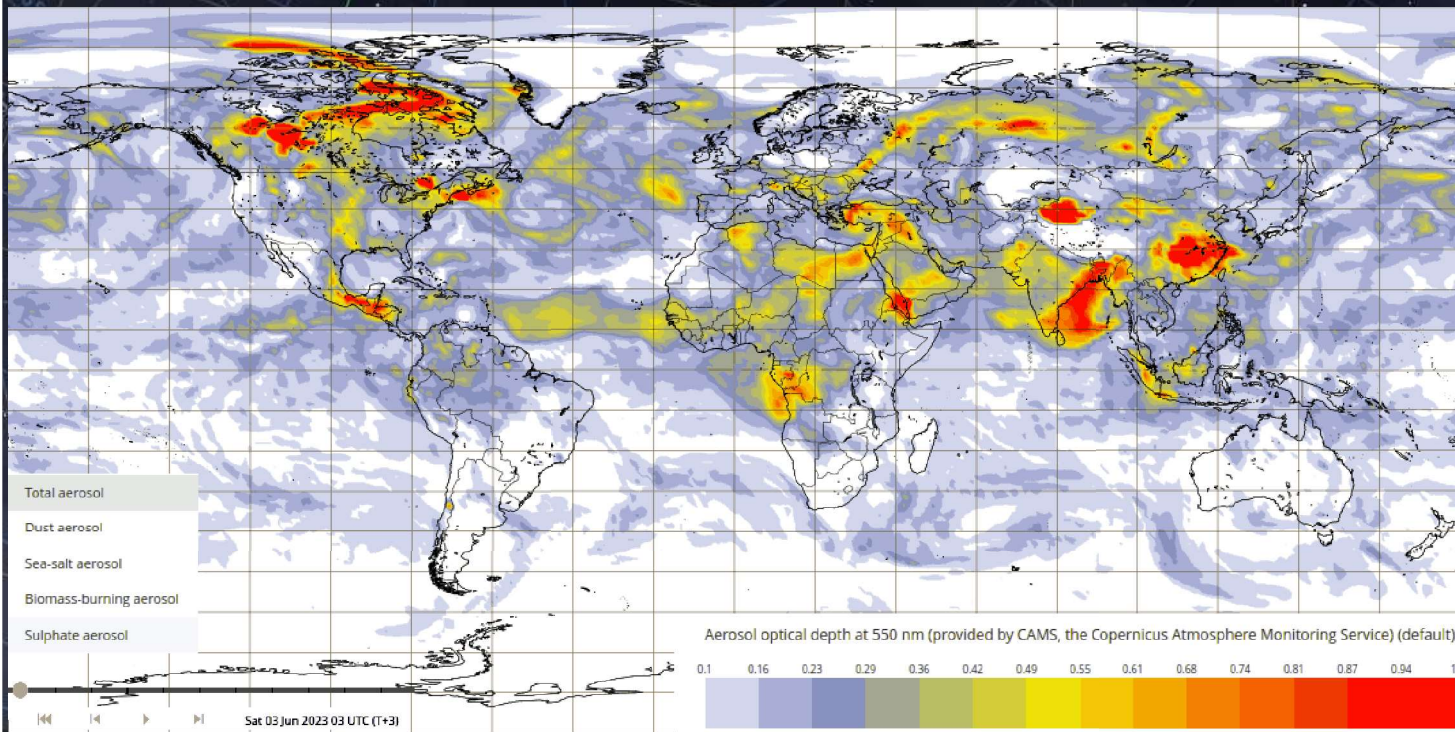
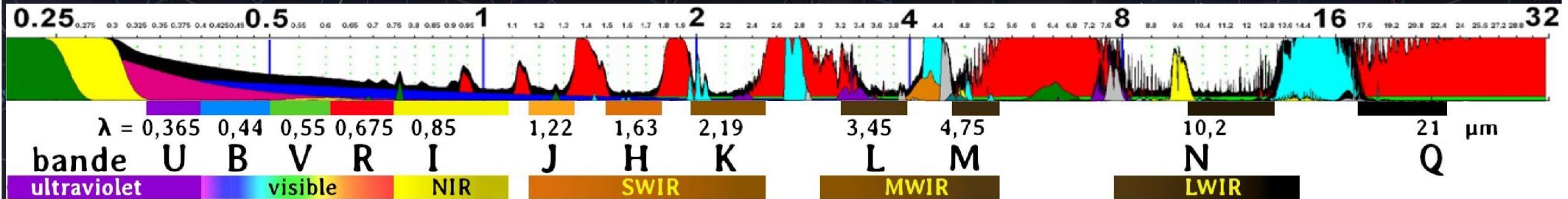


Magnitude: 4.83
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s/+16°37'33"
Angle horaire/dec: 8h29m51s/+16°37'33"
Az/H: 9°02'31"/-11°41'31"
Distance: 110.577
Diamètre apparent: 0.0077

Transfert radiatif

Date & Heu

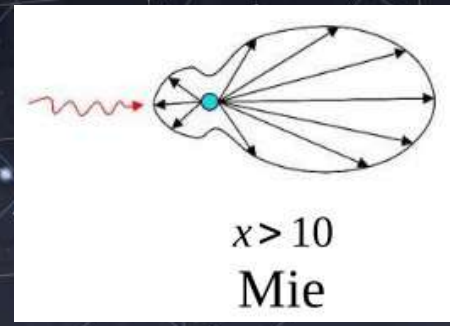
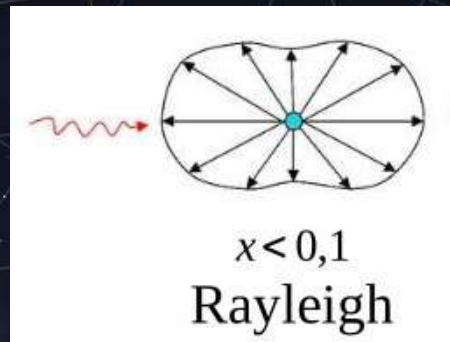
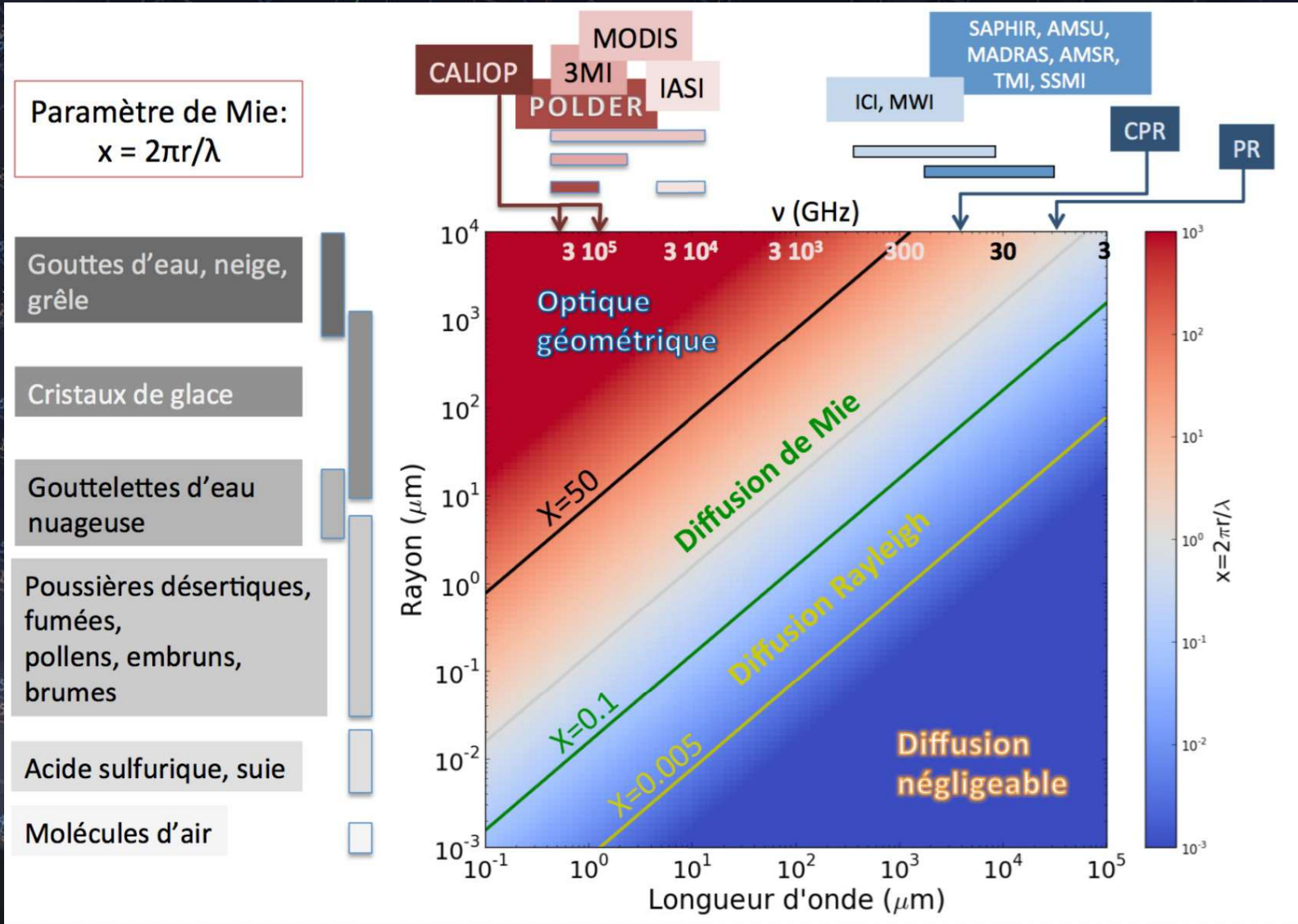
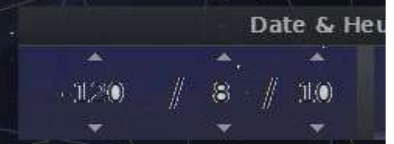
100 // 8 // 10



Copernicus Atmosphere Monitoring Service, Aerosol forecasts

Magnitude absolue: 4.83
 AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
 AD/DEC (de la date): 9h06m58s/+16°37'33"
 Angle horaire/dec: 8h29m51s/+16°37'33"
 Az/El: 9°02'31"/-11°41'31"
 Distance: 11.4 ± 0.2 pc
 Diamètre apparent: 0.0077"

Transfert radiatif



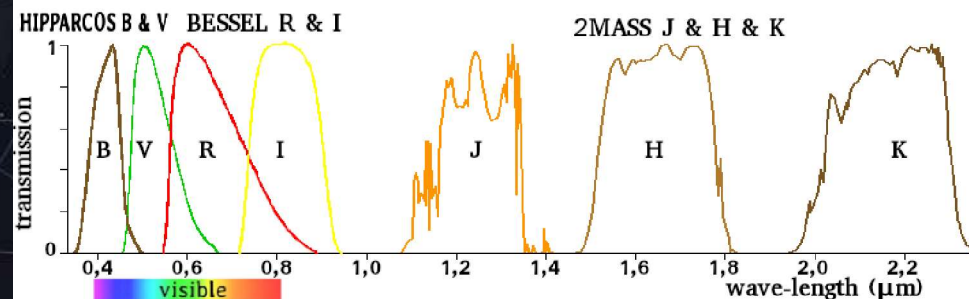
La lumière des étoiles

$$mag_V = -2,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{E_V}{E_{V0}} \right)$$

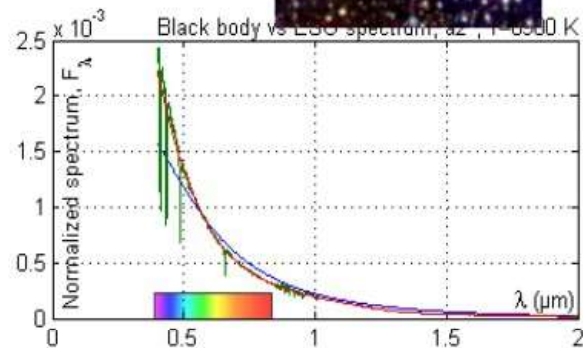
formule de la magnitude apparente en bande V

E_V flux de l'étoile reçu dans la bande V à la surface terrestre

E_{V0} flux de Véga reçu dans la bande V à la surface terrestre



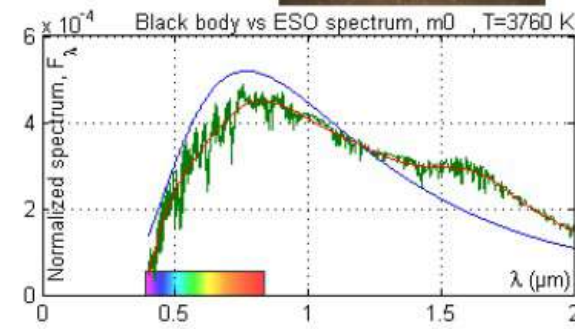
magV = 1,25
magI = 1,04
magJ = 0,95
magH = 0,87
magK = 0,88



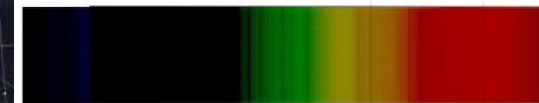
Deneb
α Cygne, type spectral A2



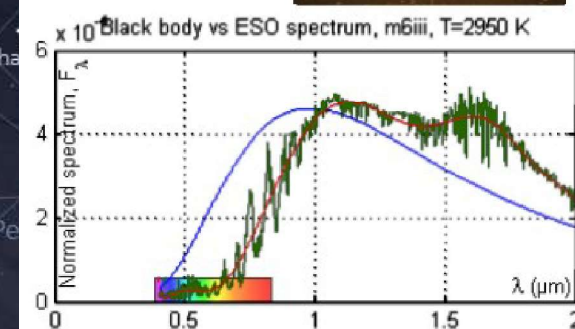
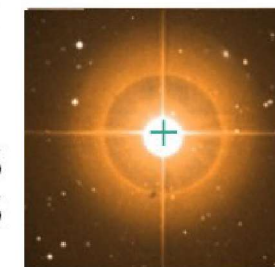
magV = 0,91
magI = -1,87
magJ = -2,73
magH = -3,49
magK = -3,79



Antares
α Scorpion, type spectral M0



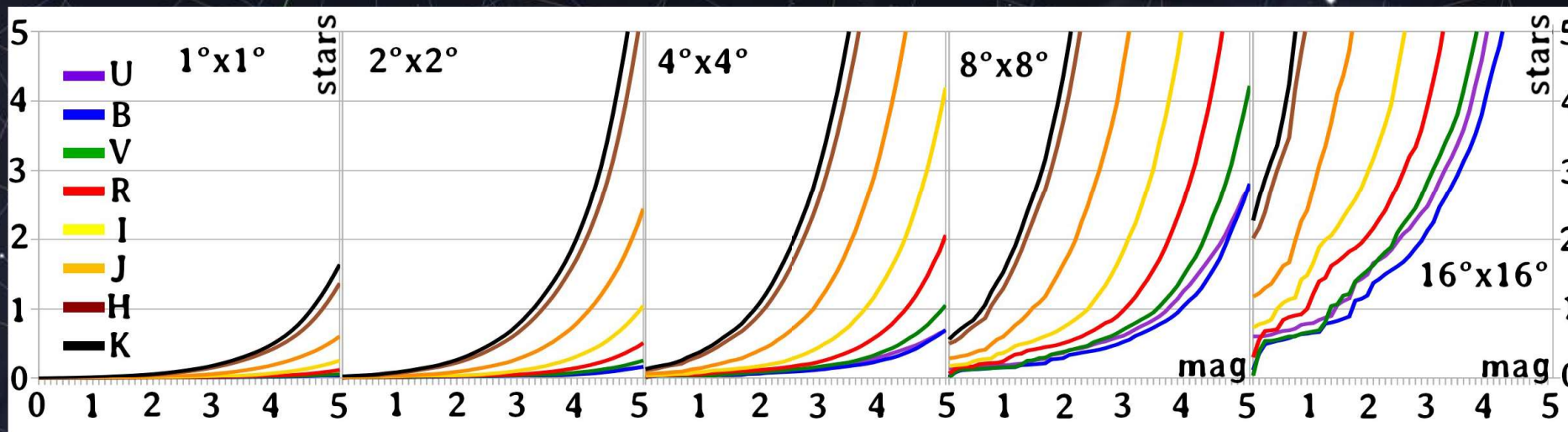
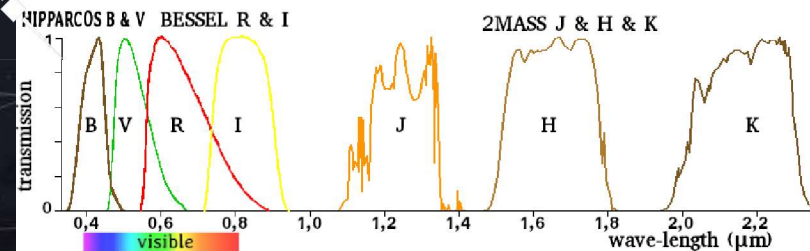
magV = 5,01
magI = 0,26
magJ = -0,81
magH = -1,75
magK = -2,05



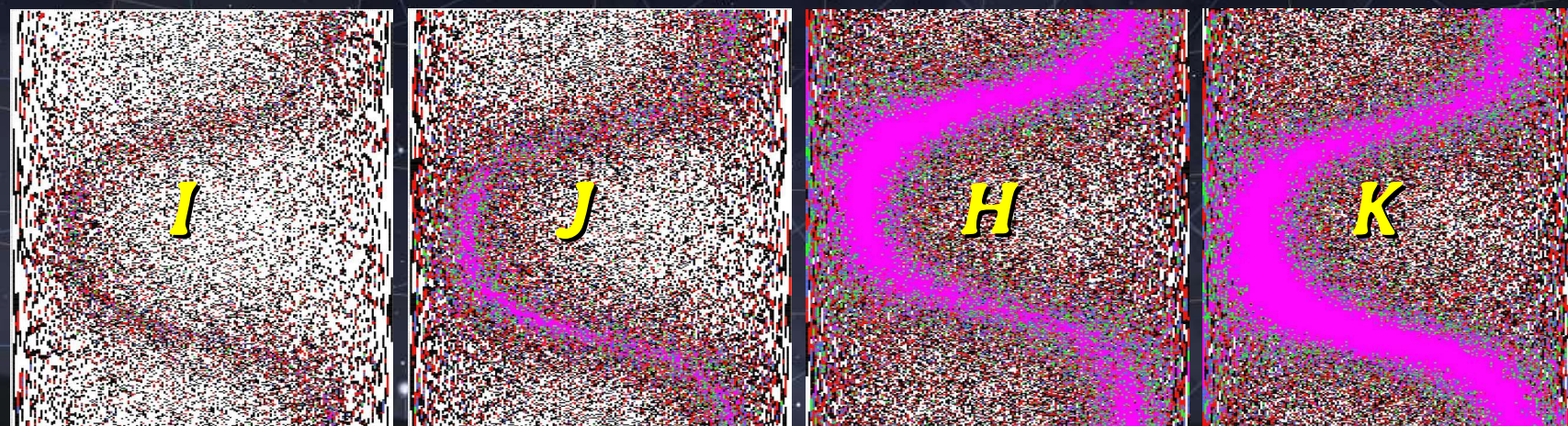
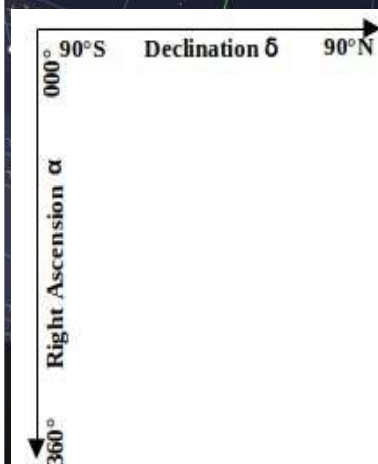
G Her (étoile géante)
type spectral M6

Magnitude absolue: 4.83
 AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
 AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
 Angle horaire/dec: 8h21m15s/+16°37'33"
 Az/Alt: +309°02'31"/1°41'31"
 Distance: 6779 AU
 Diamètre apparent: +18.3"

La lumière des étoiles



Nbre étoiles mag<6 dans un champ 1°x1°

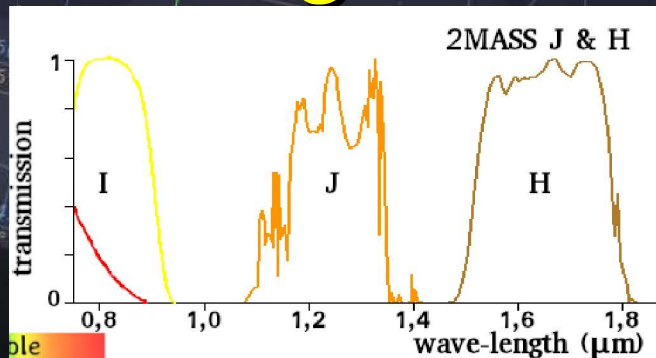
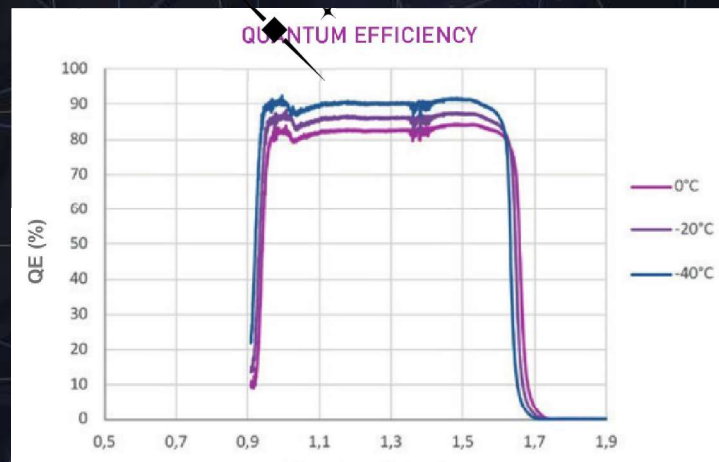


Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
Angle: ...
Az/Alt: ...
Distar: ...
Diamètre: ...

SWIR : InGaAs

- basse définition : 640 x 512 pixels
 - taille pixel (pas) : 15 μm
 - température de travail : -20° to -40°C
- mais...

- + détecte les étoiles de jour
- + plus d'étoiles en bandes J et H qu'en « visible »
- + 1 image avec 2 ms de pause suffit



Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
Ahorair: 8h29m51s/+16°37'
A: +10° 31' 11" 41' 31"
D: ar: 7' 11" 41' 31"
D: m: e: 7.1

Détection stellaire de jour en 2021

Marseille, altitude 50 m, à 11:00 :

caméra C-RED2 InGaAs 0.9-1.7 μm
640x512 pixels de 15 μm
objectif ZEISS, focale 300 mm, N=4
champ 1.8°x1.5°
résolution 10,3 arcsec / pixel

bruit de lecture $< 30 e^-$
température -40°C (2 Peltier)
filtre passe-bas $\lambda < 1,3 \mu\text{m}$
filtre passe-haut $\lambda > 1,5 \mu\text{m}$

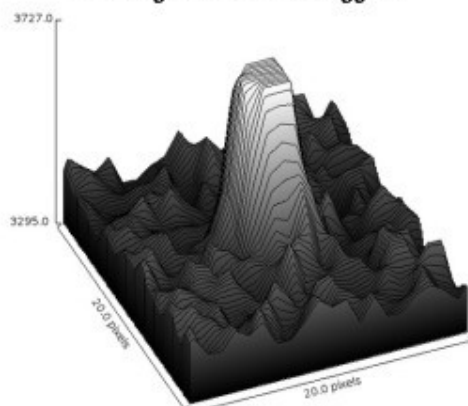
Capella (~3 étoiles visible)
magJ = -1.29 (35 en J)
magH = -1.72(90 en H)



Véga (~39 étoiles visible)
magJ = -0.18 (149 en J)
magH = -0.03 (225 en H)

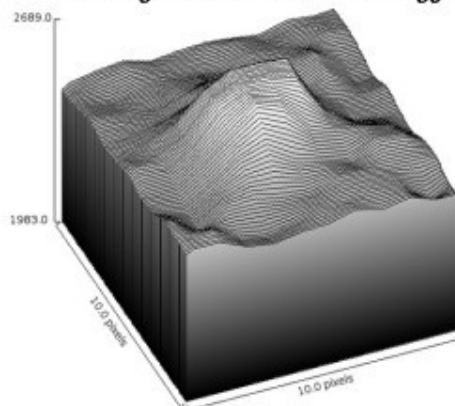
Détection stellaire de jour en 2023

sans filtre ni baffle



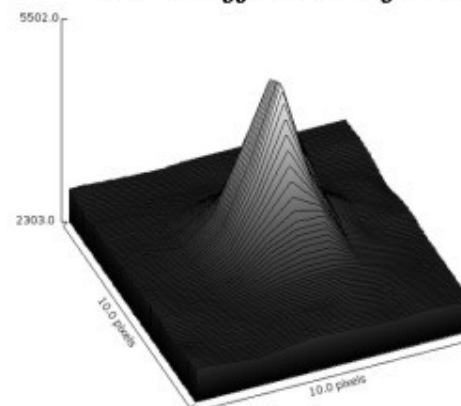
contraste = 83 ; RSB = 61,2

avec filtre H sans baffle



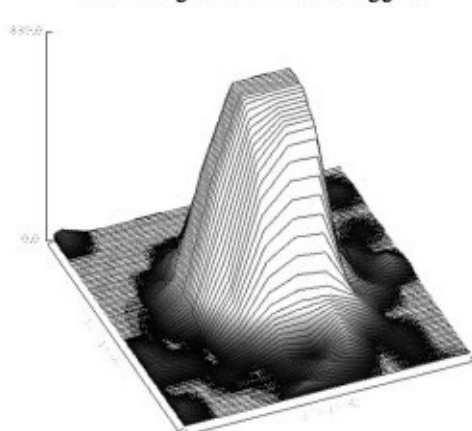
contraste = 0,17 ; RSB = 15,5

avec baffle sans filtre



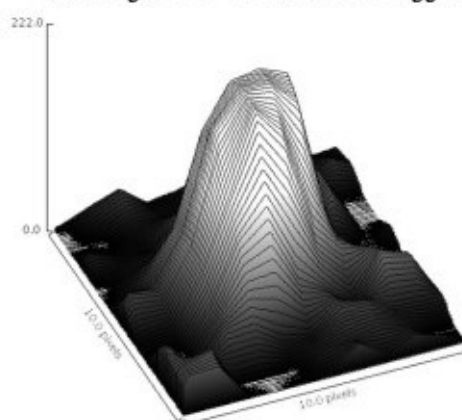
contraste = 0,95 ; RSB = 78,3

sans filtre ni baffle



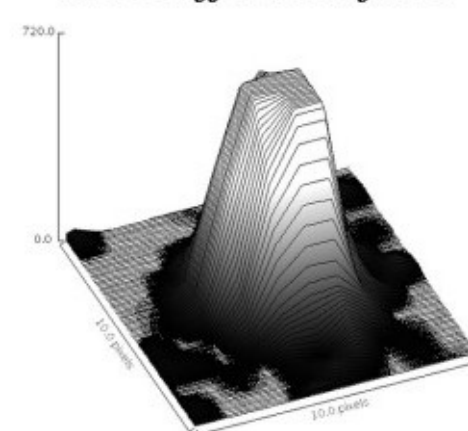
contraste = 244 ; RSB = 142,8

avec filtre H sans baffle



contraste = 45 ; RSB = 28,7

avec baffle sans filtre



contraste = 294 ; RSB = 157,1

Conclusion

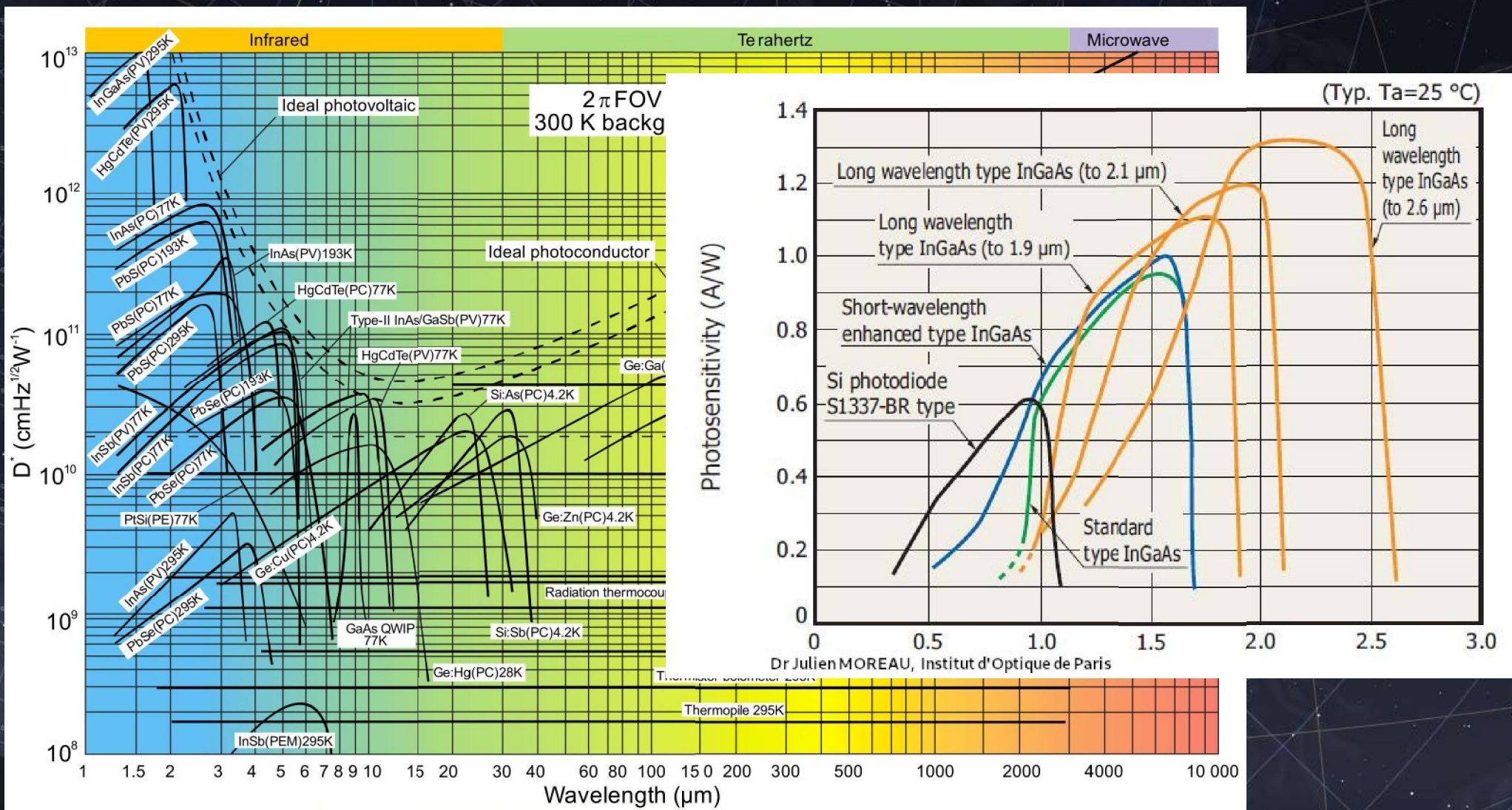
détection stellaire diurne validée (TRL 5)
tests à poursuivre pour chercher la magnitude limite

la précision s'améliore avec :
- le nombre d'images
- le nombre d'étoiles

le système est inopérant par ciel totalement couvert,
brouillard ou fortes précipitations

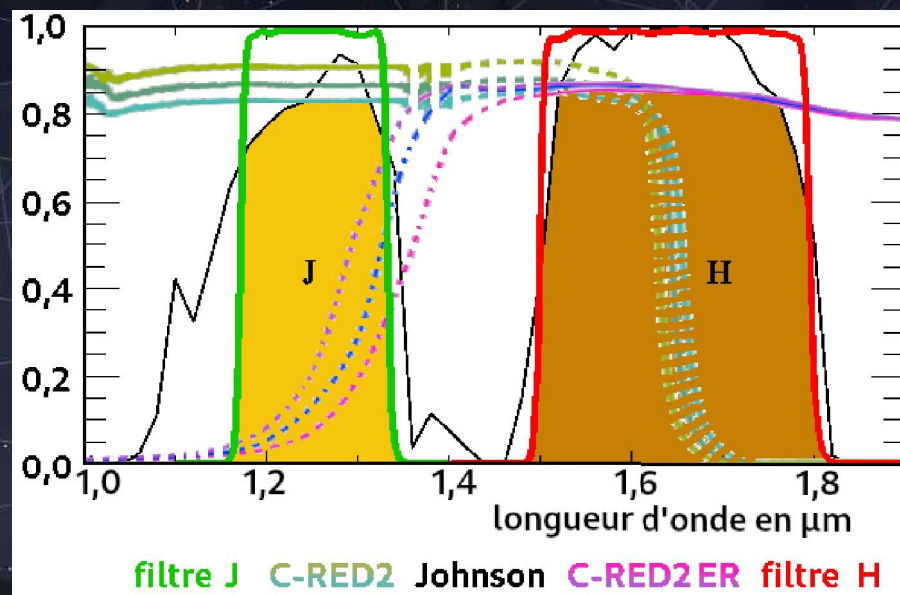
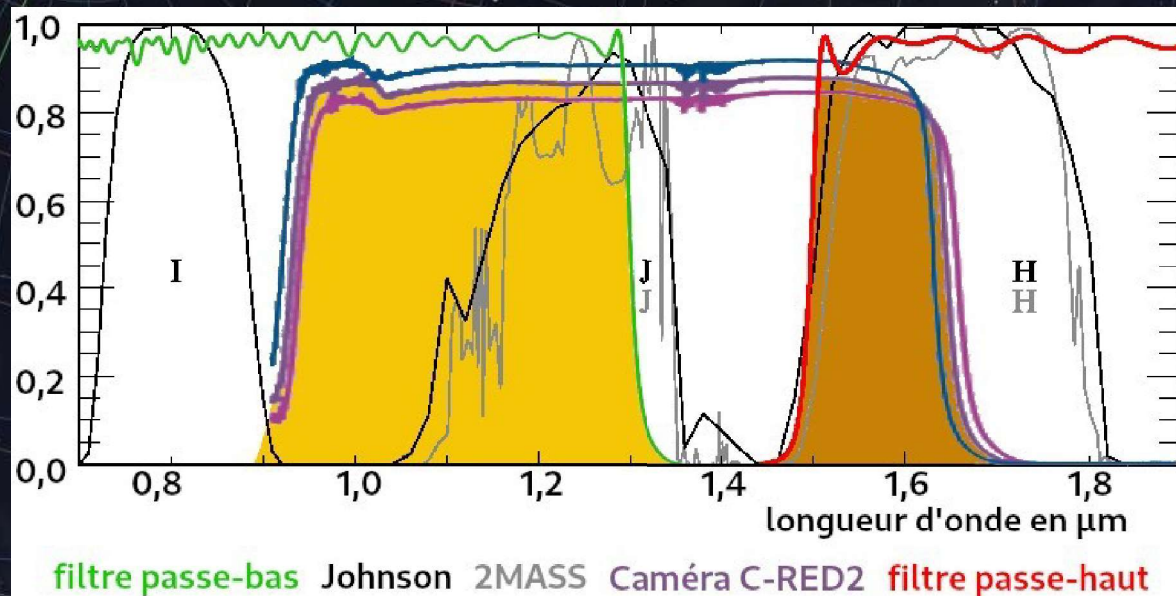
Magnitude absolue: 4.83
 AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
 AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
 Angle horaire/dec: 8h09m51s/+16°37'33"
 Az: 309°02'31" 11°41'31"
 Dist: 17.797 pc
 Diam: 1.16 arcmin

Technologies des capteurs



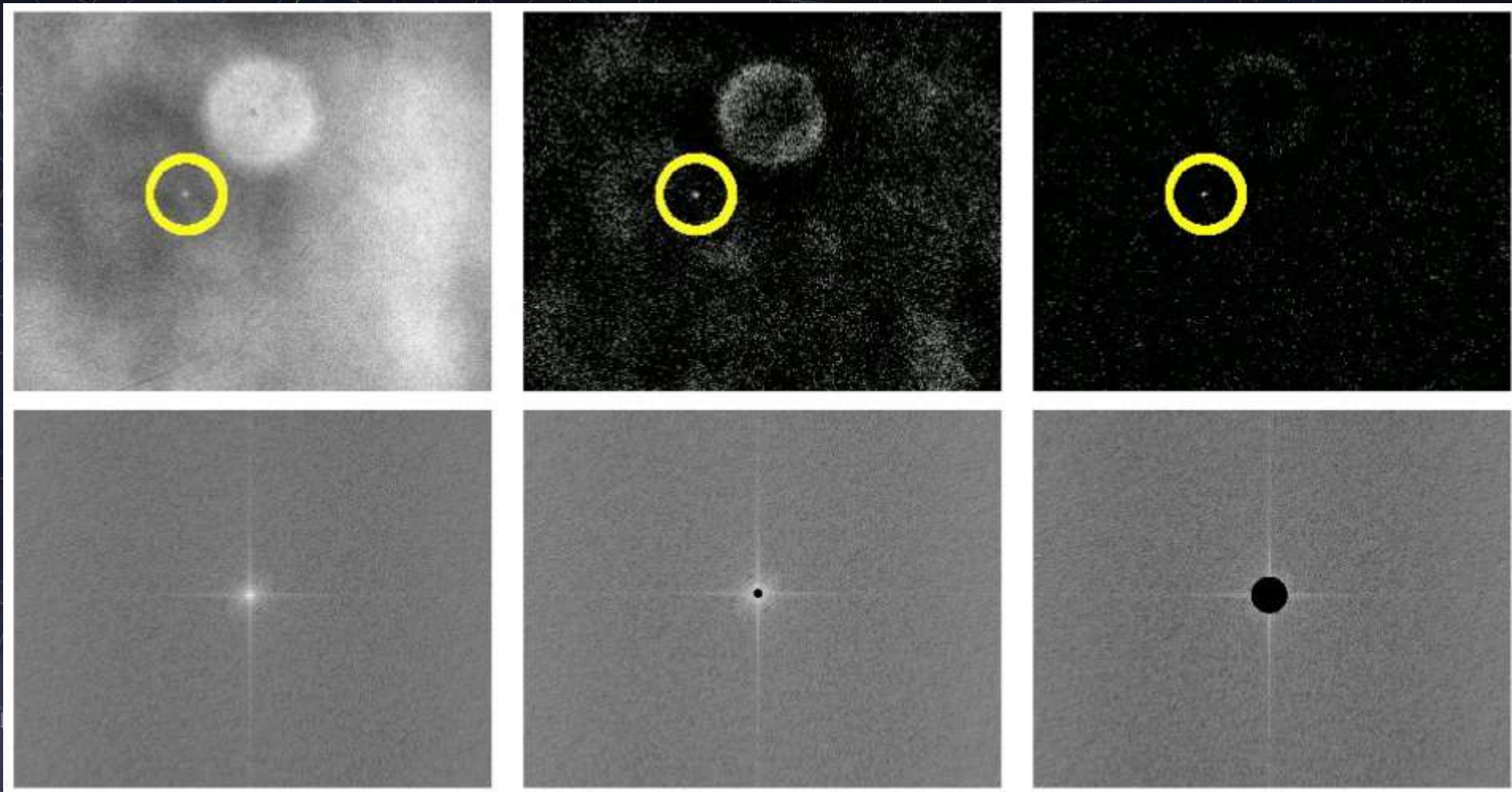
Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s/+16°37'33"
Ascension droite/dec: 8h29m51s/+16°37'33"
Azimut: 309°02' - 11°41'31"
Dist. nom: 130.7 UA
Dist. réelle: 0" 17.1"

Tests en 2021 et 2023



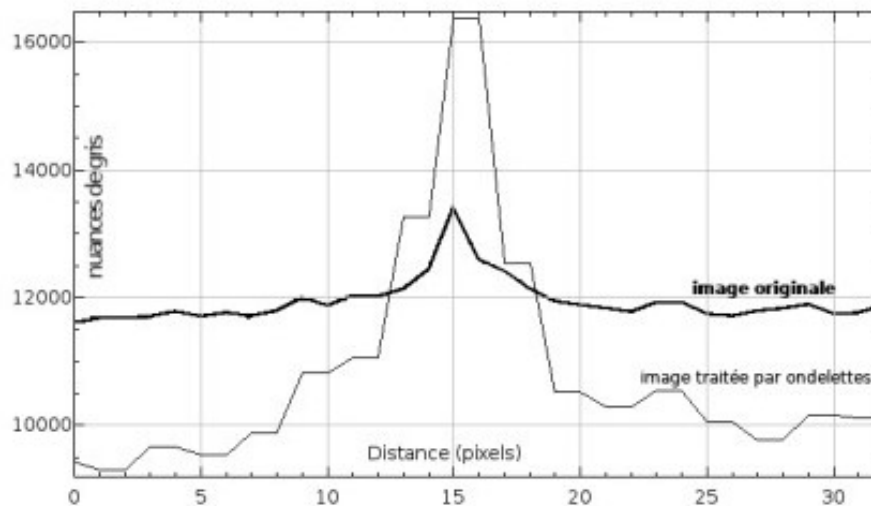
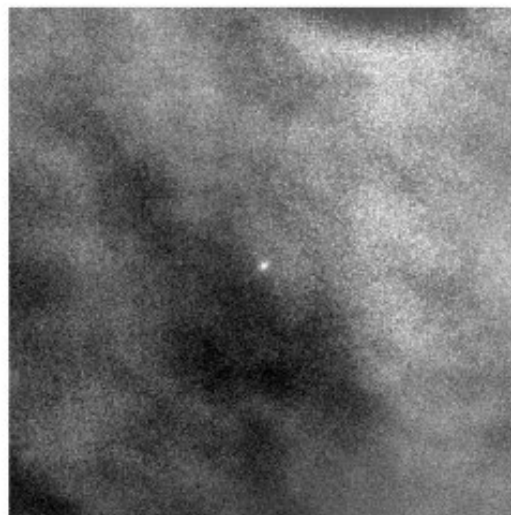
Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s/+16°37'33"
Ascension droite/dec: 8h07m51s/+16°37'33"
Azimut/altitude: 309°02'31"/-41°01"
Distance: 101.27 ly
Diamètre apparent: 0.11"

Traitement des images



plan de Fourier, filtre passe-haut

Traitement des images



traitement par ondelettes

Traitement des images

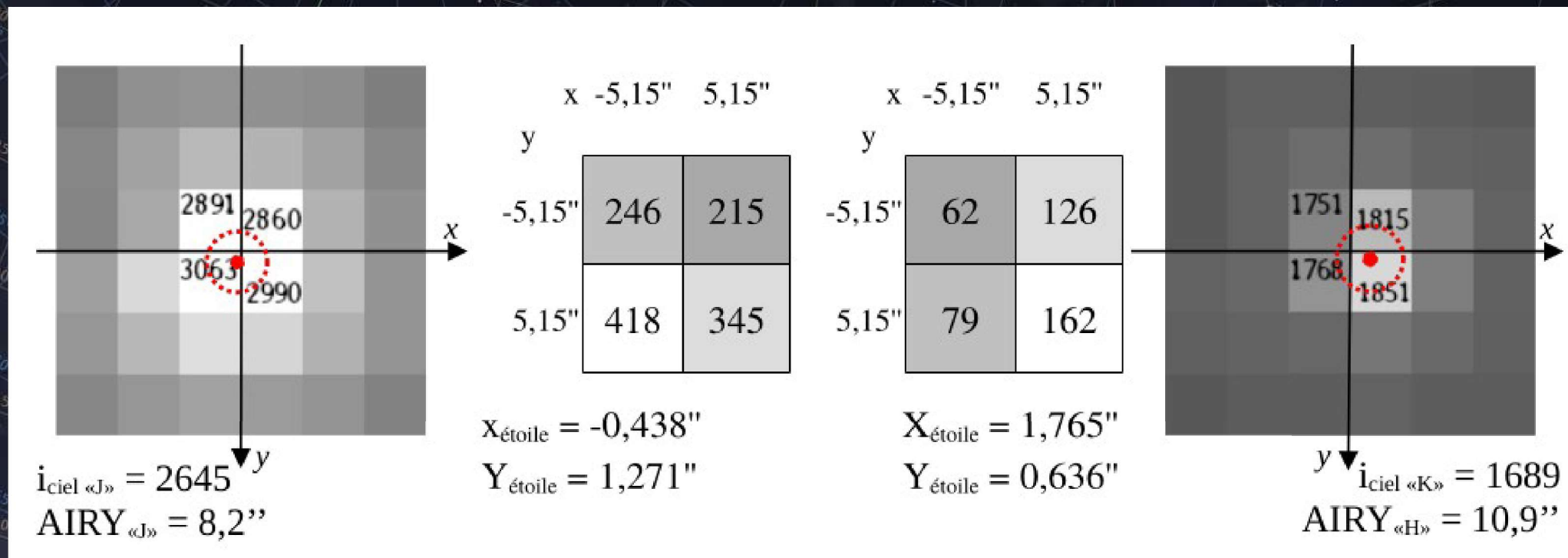


image en filtre « J »

image en filtre « H »

calcul de la position du centre de l'étoile

Magnitude absolue: 4.83
AD/DEC (J2000): 11h00m35.7s/+6°25'22.5"
AD/DEC (de la date): 9h06m58s+16°37'33"
Angle ascension: 8h29m51s/+16°37'33"
Azimut: +33°02'31"/+11°47'31"
Distance: 115.33
Diamètre apparent: +8.3"

Date & Heu
11:20 / 8 / 10

Changement de repères

- ★ astronomique ARa, D
- ★ terrestre φ, G
- ★ local H, Z
- ★ navire S, G
- ★ caméra x_{pix}, y_{pix}

