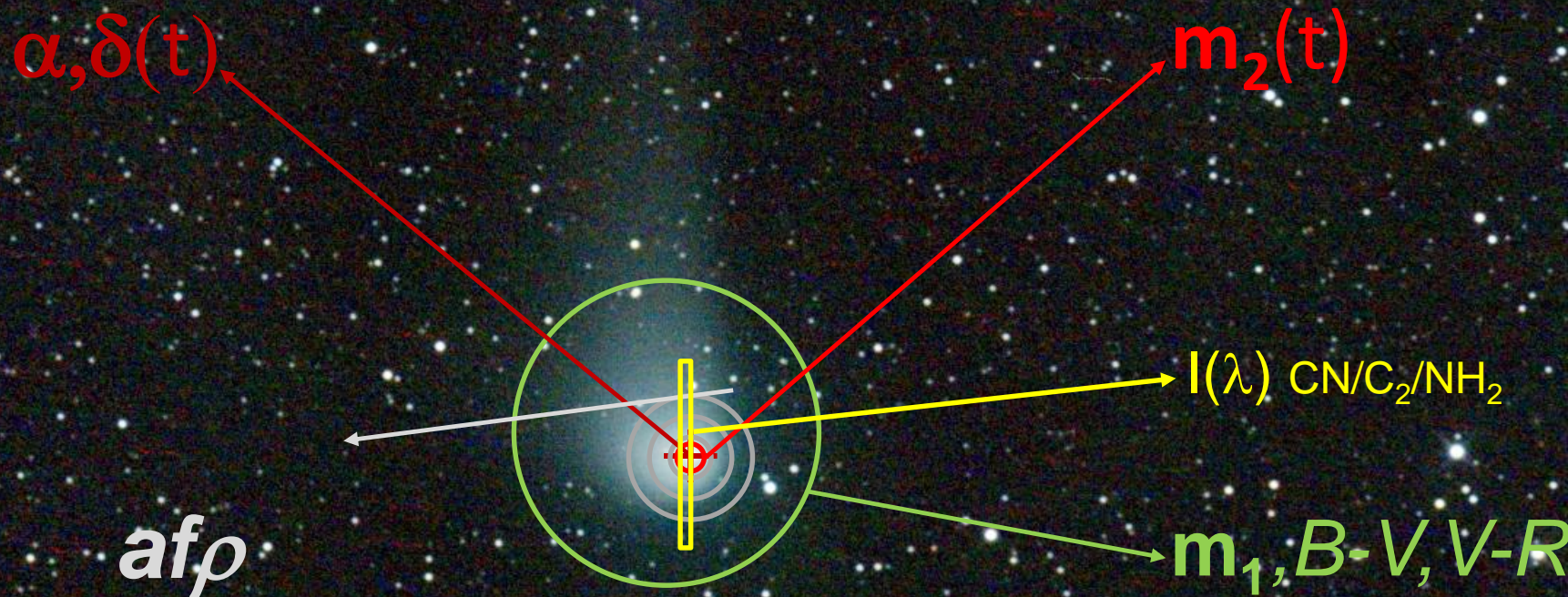


# Extraire la meilleure science de ses images cométaires



*N. Biver (SAF/LESIA Obs. de Paris, RCE 10 novembre 2024)*



# Pourquoi?

**ASTROMETRIE:** Caractériser l'orbite, les accélérations non-gravitationnelle, ... des nouvelles comètes découvertes:

**PHOTOMETRIE:** Quantifier l'activité d'une comète (magnitudes), sa variation temporelle à court (sursaut, rotation) et long terme; sa production de poussières (Afr)

**SPECTROSCOPIE:** Connaître la composition d'une comète (riche/pauvre en  $C_2$ ,  $NH_2$ , par exemple...)

→ pour préparer les observations à distance (sol / espace)

→ pour choisir les futures cibles de mission spatiales  
(par ex.: **Comet Interceptor:**

Comète à découvrir/choisir au moins 2 ans à l'avance)



# PHOTOMETRIE

Contexte général de la photométrie des comètes: Que veut-on mesurer?

D'où vient l'émission lumineuse des comètes?

- Qu'est ce qui constitue la chevelure des comètes
- Le continuum des poussières
- Les raies d'émissions du gaz

Comment faire une mesure objective, pourquoi?

- La magnitude totale = suivi d'activité, « visibilité »
- La magnitude nucléaire: variations à court terme
- Une quantité qui ne dépend pas de l'ouverture =  $Af\rho$



# Que mesurer sur une comète?

Noyau: 1 à 100 km

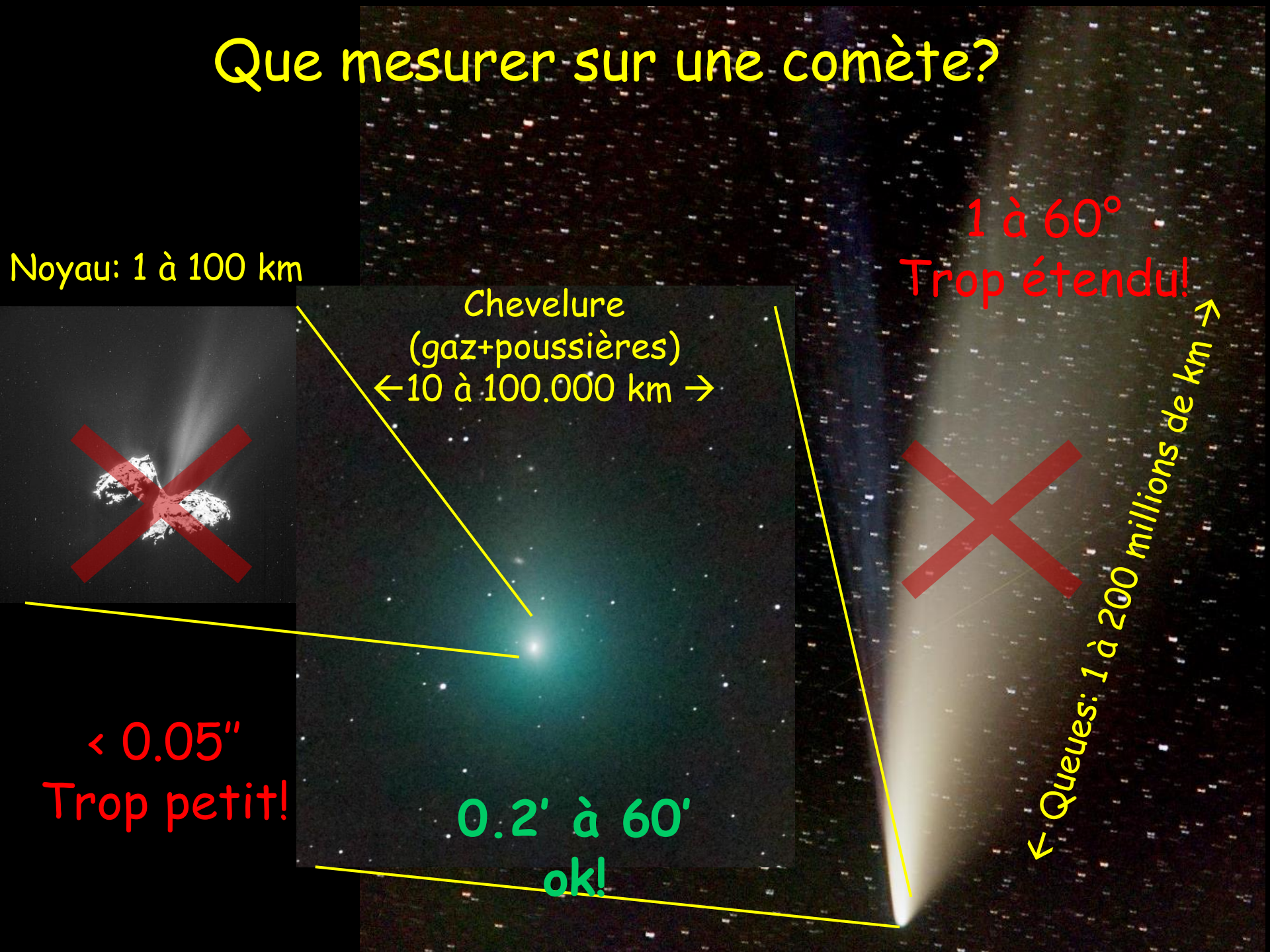
Chevelure  
(gaz+poussières)  
←10 à 100.000 km →

1 à 60°  
Trop étendu!

← Queues: 1 à 200 millions de km →

< 0.05"  
Trop petit!

0.2' à 60'  
ok!



# Qu'est ce que la coma ou l'atmosphère de la comète?

→ Etat stationnaire d'échappement de gaz et de poussières à partir du noyau ( $r =$  distance au noyau)

Cas « idéal »: symétrique sans variation temporelle:

Conservation de la matière (flux traversant une sphère de rayon  $r$ ) → **modèle de Haser** = la densité décroît en  $1/r^2$

$$n(r) = \frac{Q_{\text{molec.}} e^{(-r/l_{\text{molec.}})}}{(4\pi v_{\text{exp}} r^2)}$$

Radical:

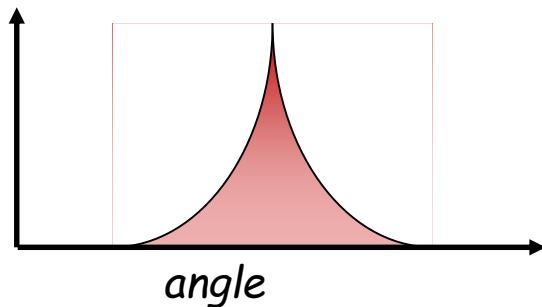
(espèce secondaire)

$n(r) \sim K/r$  près du noyau

$\sim K'e^{(-r/l_{\text{radical}})}/r^2$  plus loin

→ Intégration sur la ligne de visée:

$$N(\rho) = Q / (4v_{\text{exp}}\rho)$$



Pas de bord net,  
densité colonne en  $1/\rho$

→ Conséquence: Flux\* dans une ouverture de rayon  $\rho \sim K\rho$

$$\Rightarrow \text{mag}(\rho_1) = \text{mag}(\rho_2) + 2.5 \log(\rho_1/\rho_2)$$

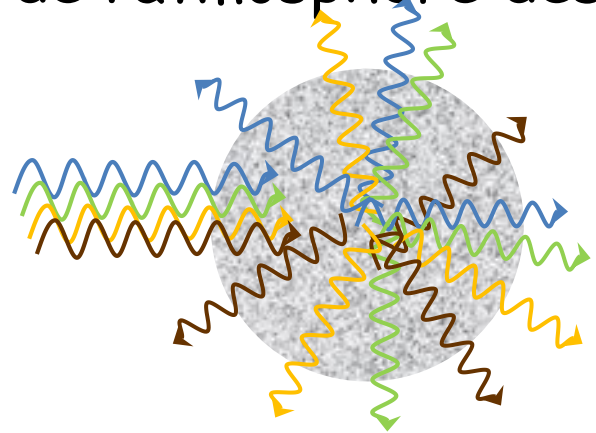
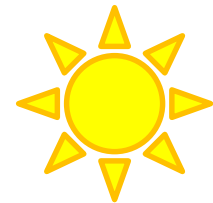
$F(\rho)/\rho =$  constante indépendante de  $\rho \rightarrow Af\rho$

\*: densité de flux en  $\text{W}/\text{m}^2$

# Quelle est l'origine de la lumière reçue de l'atmosphère des comètes?

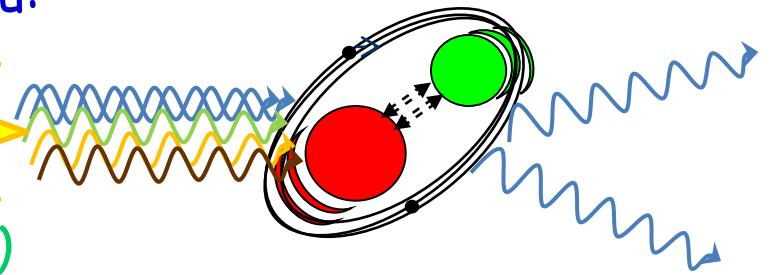
-Diffusion de la lumière solaire par les poussières:

*(continuum visible,  $< 2.5\mu\text{m}$ )*



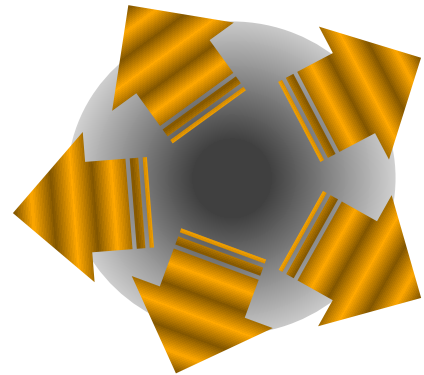
-Fluorescence des gaz entourant le noyau:  
(molécules, radicaux, ions)

*(raies d'émissions UV-Visible-IR)*



-(Émission thermique de corps noir  
des poussières -> IR thermique, Radio):

-Émission spontanée du gaz (Spectro Radio)





## PHOTOMETRIE: objectif

	CDD	APN	Visuel
- Magnitude « nucléaire » ( $\rho=6''$ ): $m_2$	x	x	x
- Magnitude totale: $m_1$	x	x	x
- $A_{f\rho}$	+filtre	x	
- Couleurs B-V, V-R	+fitres	x	

# PHOTOMETRIE: pré-requis

Références: étoiles (de champ) → choix étoiles / catalogue

Visuel: instrument et grossissement adapté:

$m_2$ : télescope + fort grossissement ( $\pm$ subjectif)

$m_1$ : plus petit instrument et plus petit grossissement permettant de voir la comète

## Imagerie numérique:

- (1) champ suffisant pour avoir toute la coma
- (2) correction de flat (pas de gradient notable)
- (3) linéarité: non saturation  $m_2$  et étoiles de référence

RAW/FITS (16bits):  $\Delta\text{mag}$  (min-max)  $\sim 11$

JPG: linéaire autour de  $m_2$  (*pour*  $\sim m_1 + 5 \text{ mag}$ )



# PHOTOMETRIE: pré-requis

Références: étoiles (de champ) → choix étoiles / catalogue

JPG: linéarité pour  $m_{\text{JPG}} > m_2$  ( $\sim m_1 + 3\text{--}5 \text{ mag}$ )

Test M45  $\alpha 7s$ :

Foyer T407mm

ISO\*temps:  $m_{\text{JPG}}$

40 > 4.5

400 > 7.2

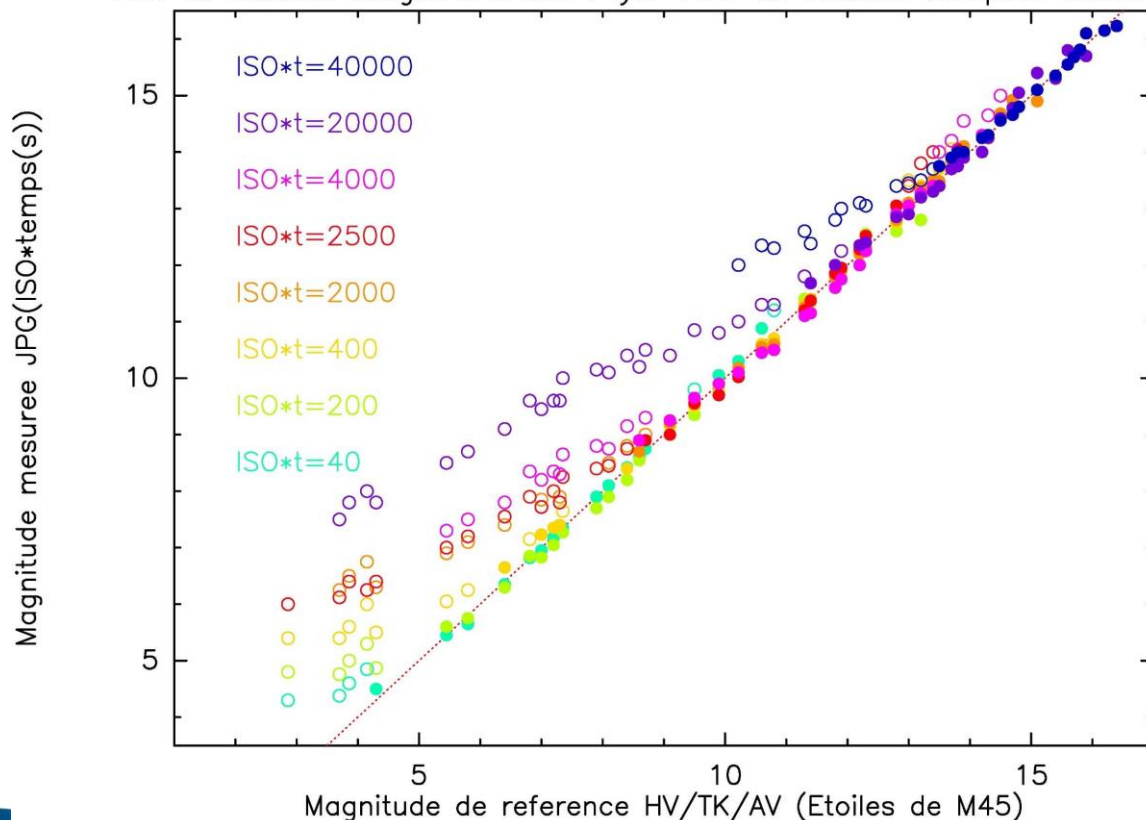
2000 > 9.0

4000 > 10.2

20000 > 12.5

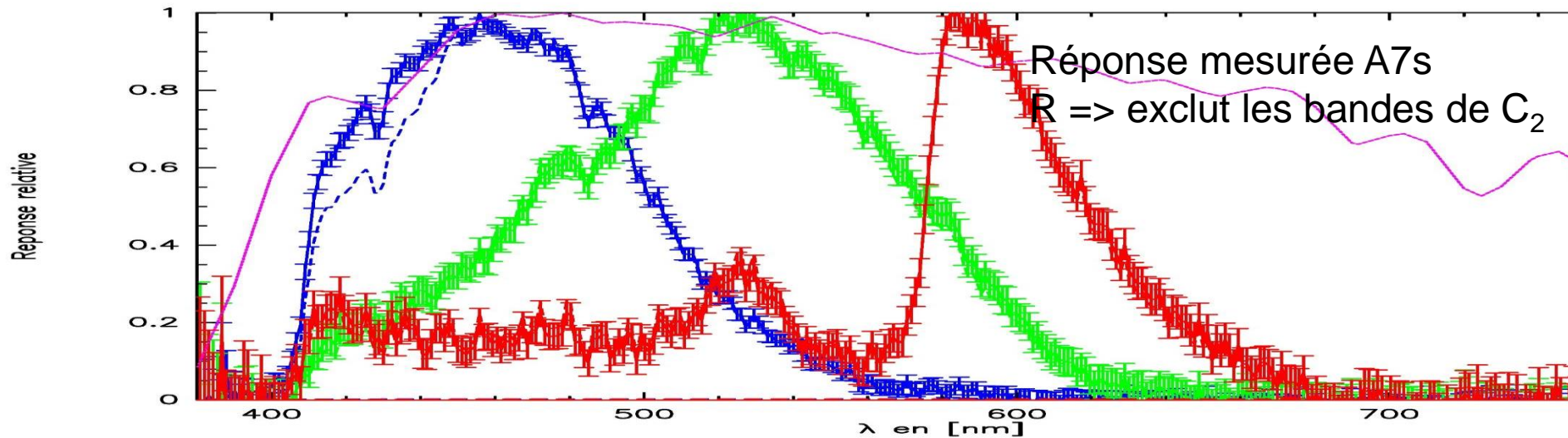
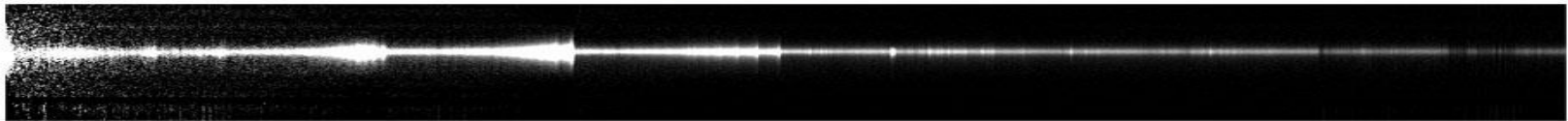
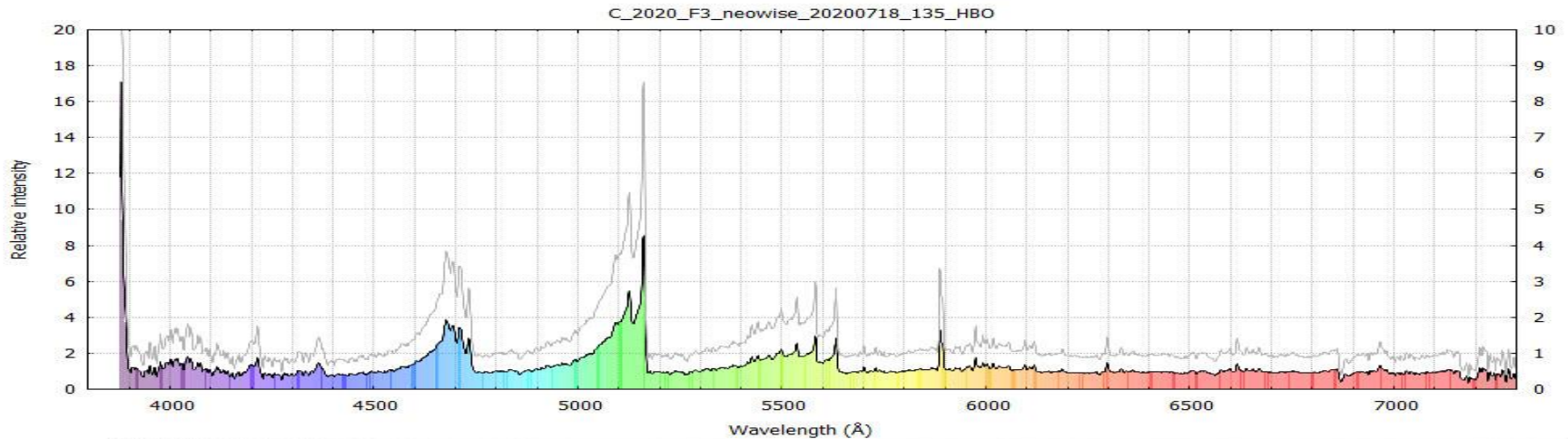
40000 > 13.8

Test de linearite images JPG  $\alpha 7s$  Foyer T407 en fonction ISO\*pose unitaire (s)



# PHOTOMETRIE

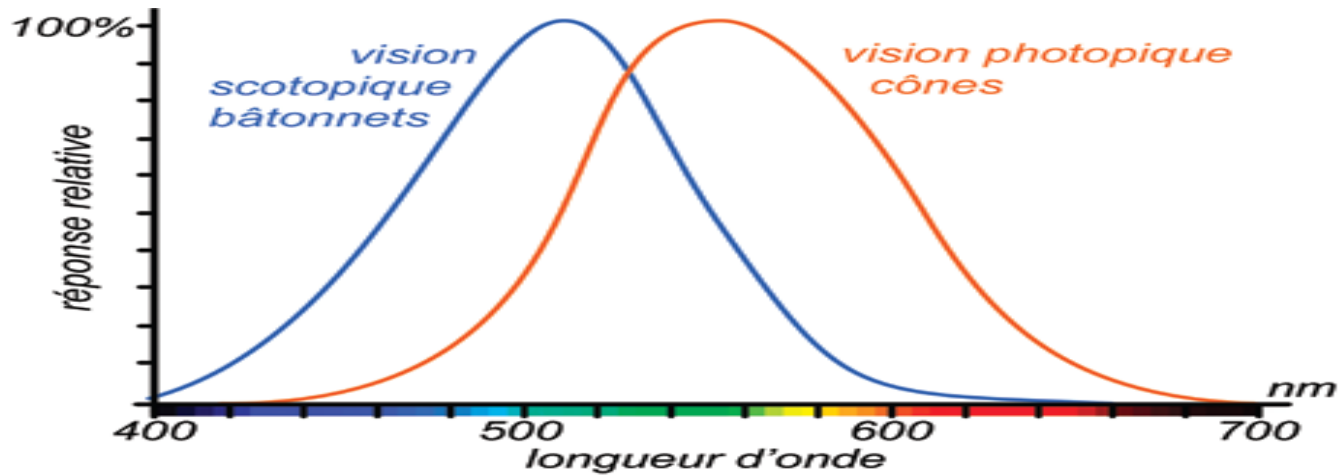
- Quel bande spectrale / couleur, Quel catalogue?





# PHOTOMETRIE

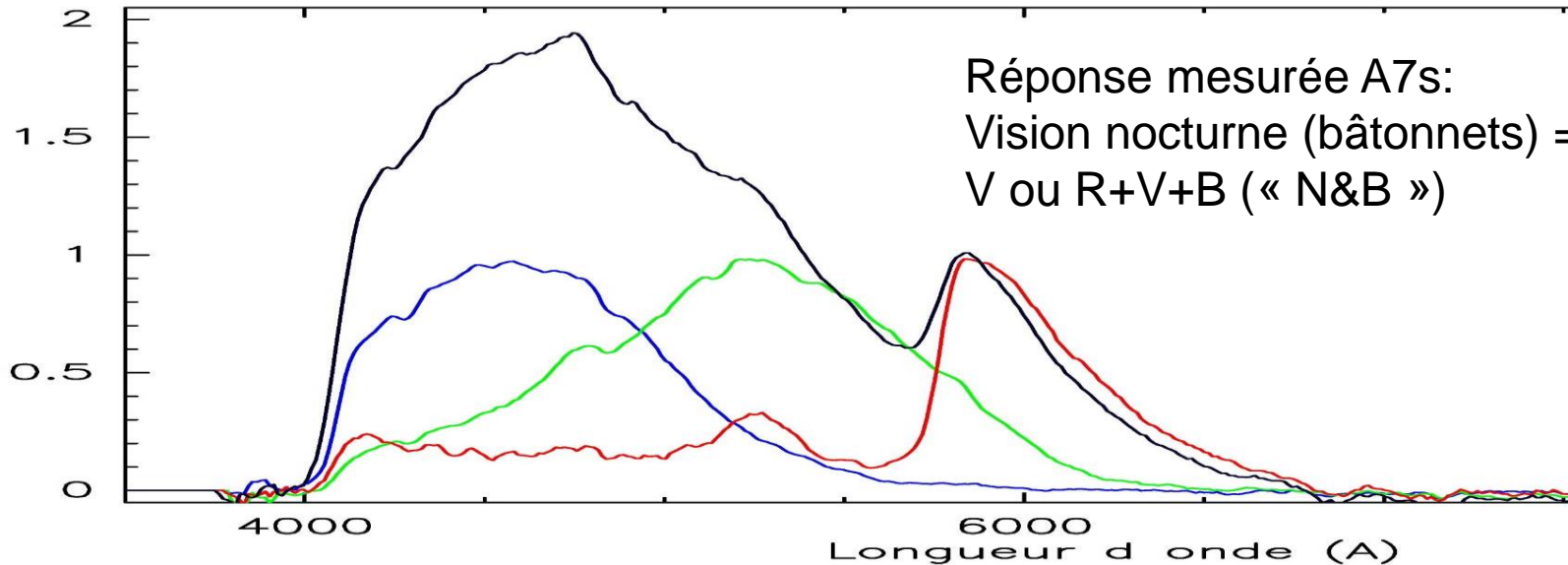
- Quel bande spectrale / couleur, Quel catalogue?



Réponse relative des cônes et bâtonnets en fonction de la longueur d'onde.

© ASTRODESSIN p.51

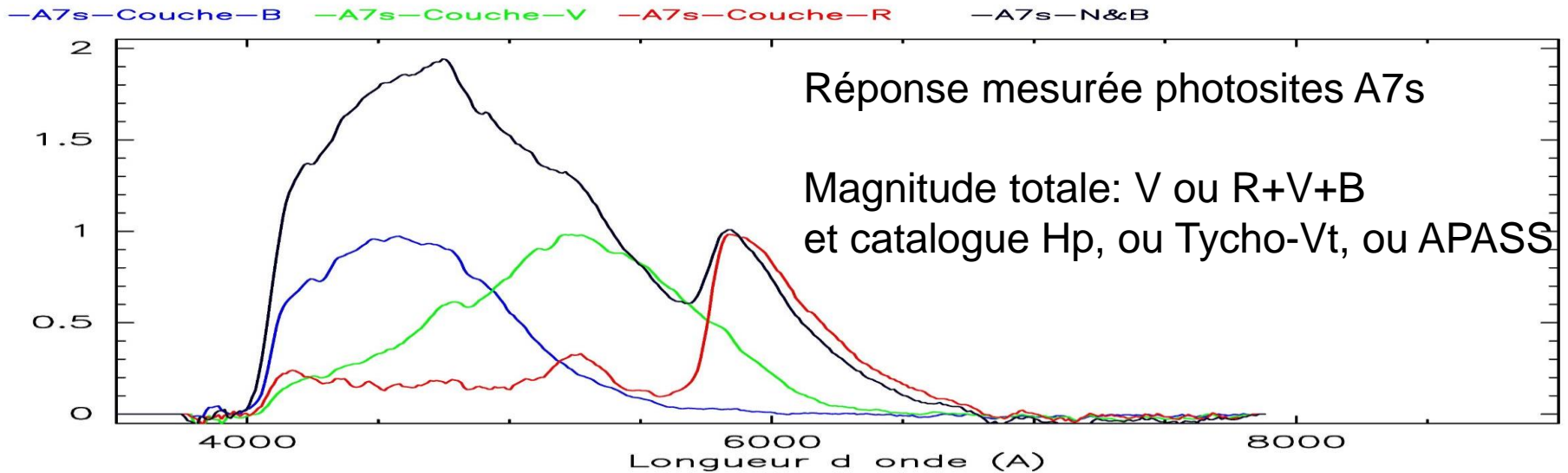
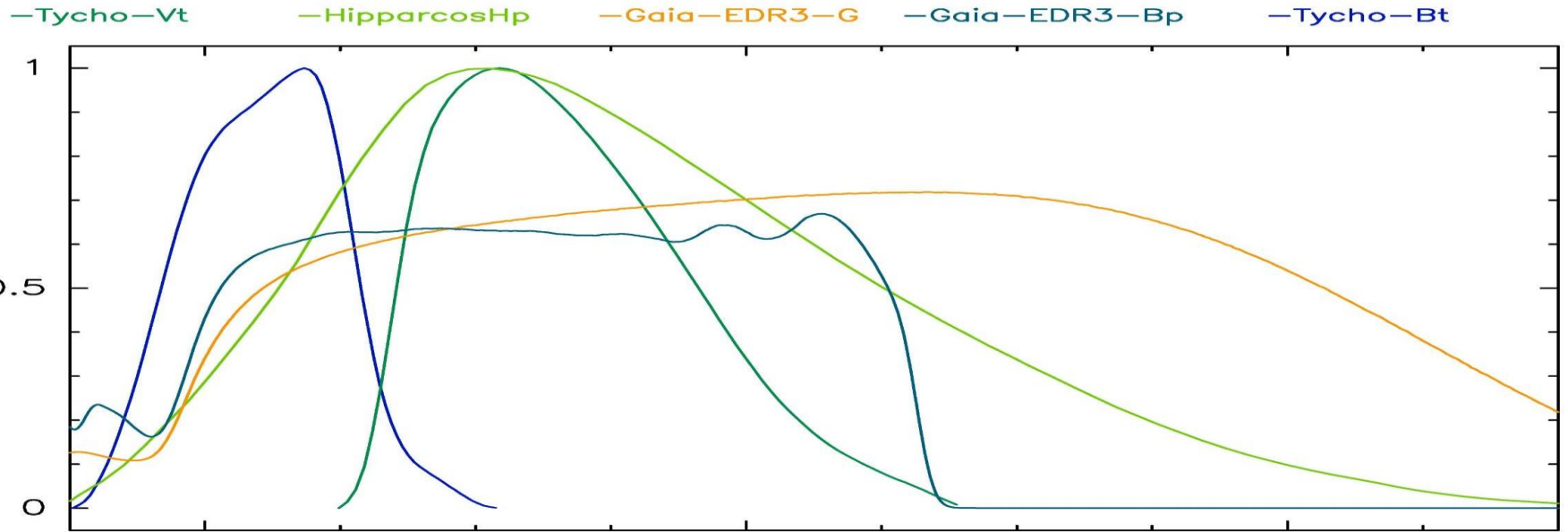
-A7s-Couche-B    -A7s-Couche-V    -A7s-Couche-R    -A7s-N&B



Réponse mesurée A7s:  
Vision nocturne (bâtonnets) =  
V ou R+V+B (« N&B »)

# PHOTOMETRIE

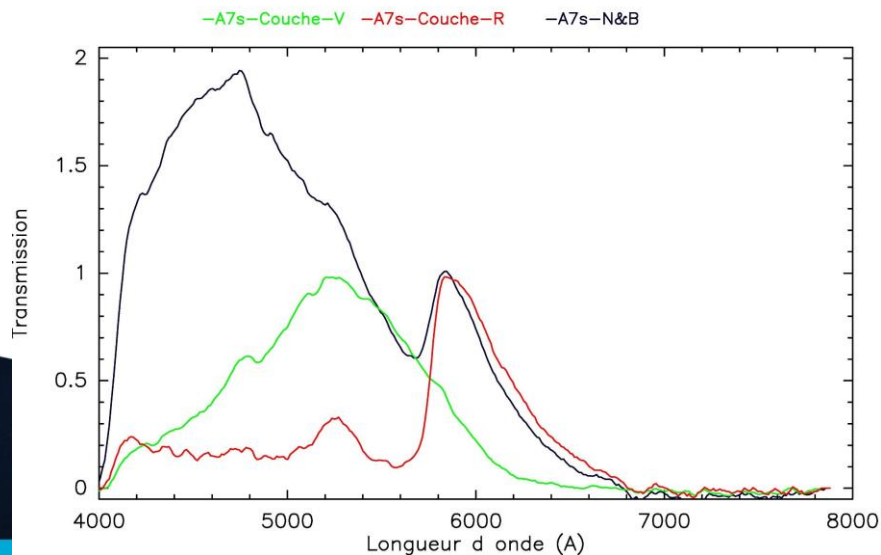
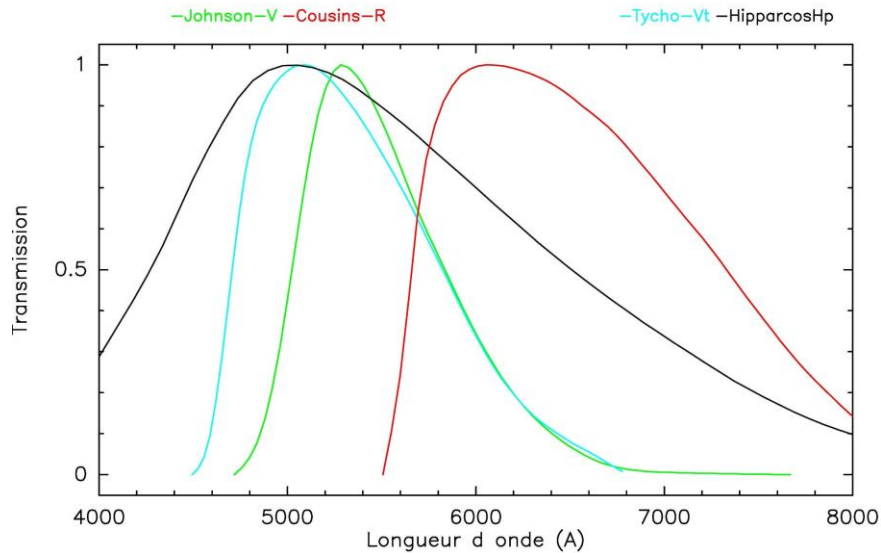
- Quel bande spectrale / couleur. Quel catalogue ?





# PHOTOMETRIE

-Quel bande spectrale / couleur, Quel catalogue?



Catalogues de magnitudes:

Source	Vizier	Bande	mags	$M_{\text{Soleil}}$
(code ICQ)				

Hipparcos (118218 étoiles)

HV	I/239	V	-1 – 9	-26.77
	I/239	Hp	-1 – 9	-26.69

Tycho (2.5M étoiles)

TK	I/259	$V_T$	4 – 11	-26.78
----	-------	-------	--------	--------

AAVSO All Sky (61M étoiles) = APASS 9

AV (AQ)	II/236	V	8 – 16	-26.77
		$r'$	8 – 16	-26.96

Gaia DR3 (1811M étoiles)

	I/355	Bp	4 – 21	-26.72
	I/355	G	4 – 21	-26.52
		R		-26.57

# COMMENT FAIRE UNE BONNE PHOTOMETRIE?



*NON !*



Exemple: Comète C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) le 4.8 Novembre 2024

Visuel: Jumelles 7x50:  $m_1=7.1$  Dia $\sim 10'$  - ciel médiocre SQM=19.4

(1) Photo 135mm F/D 2.5 16 poses de 15-20s

(2) Photo Foyer T407mm F/D 4.3 32pose de 1s

Corrections flat, alignement sur la comète et sommes sans saturer





**Photométrie  $m_1$ :**      Etape n°1 = étalonnage des magnitudes  
⇒ Calcul de la constante de magnitude sur des étoiles de référence  
    (ex: étoiles de référence de magnitudes 10 à 15, catalogue APASS)  
Ouverture  $\rho=6$  pixels (12") sur l'étoile, ciel médian entre  $\rho = 50$  et 60 pixels

The screenshot shows the Iris software interface (Version 5.59) with a star field. Two sets of concentric circles are drawn around stars, representing the aperture photometry setup. A dialog box titled "Photométrie d'ouverture" is open, showing the following settings:

- Nombre de cercles: 3 (selected)
- Fond de ciel médian:
- Rayon des cercles d'ouverture:
  - Rayon 1: 6
  - Rayon 2: 50
  - Rayon 3: 60
- Constante des magnitudes: 25.450

Buttons "OK" and "Annuler" are visible at the bottom of the dialog.

In the top right corner, a "Sortie" panel displays the following data:

- Fichier    Edition
- Nombre de pixels pour l'évaluation du ciel = 3444
- Intensité = 17851.0 - Magnitude = 14.821
- Niveau moyen du fond de ciel = 484.0
- Phot mode 3 - (562, 901)
- Nombre de pixels dans le cercle intérieur = 113
- Nombre de pixels pour l'évaluation du ciel = 344
- Intensité = 17976.0 - Magnitude = 14.813
- Niveau moyen du fond de ciel = 484.0

The status bar at the bottom left indicates "Prêt".

Photométrie  $m_1$ : Etape n°2 = mesure sur la comète

- estimer (en saturant et resserrant les niveaux) le diamètre maxi

$D_m$  de la coma

- fixer les cercles 2 et 3 de mesures du fond de ciel médian au-

delà de  $\emptyset_{max}$

Mesurer les magnitudes sur une ouverture de  $\sim 12''$  ( $m_2$ ) à  $\emptyset_{max}$  ( $m_1$ )

The screenshot shows the Iris software interface (Version 5.59) with a star field image. Two concentric circles are drawn around a central star. A 'Sortie' window is open, displaying the following data:

Sortie	
Fichier Edition	
Nombre de pixels pour l'évaluation du ciel = 1415	
Intensité = 4086752.0	Magnitude = 8.922
Niveau moyen du fond de ciel = 484.0	
Phot mode 3 - (587 . 591)	
Nombre de pixels dans le cercle intérieur = 7068	
Nombre de pixels pour l'évaluation du ciel = 1415	
Intensité = 4097381.0	Magnitude = 8.919
Niveau moyen du fond de ciel = 484.0	

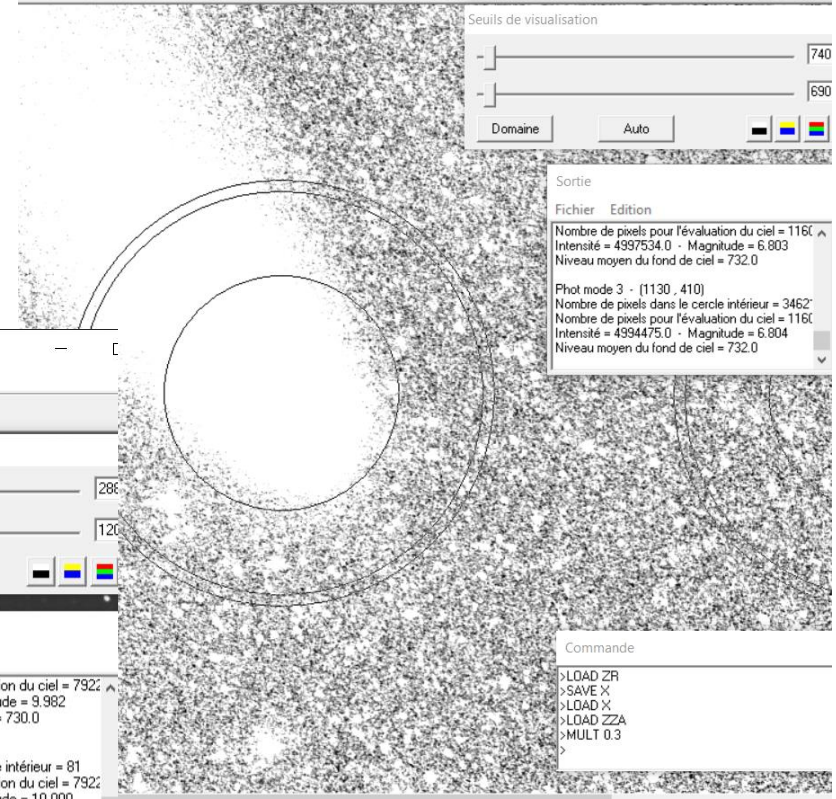
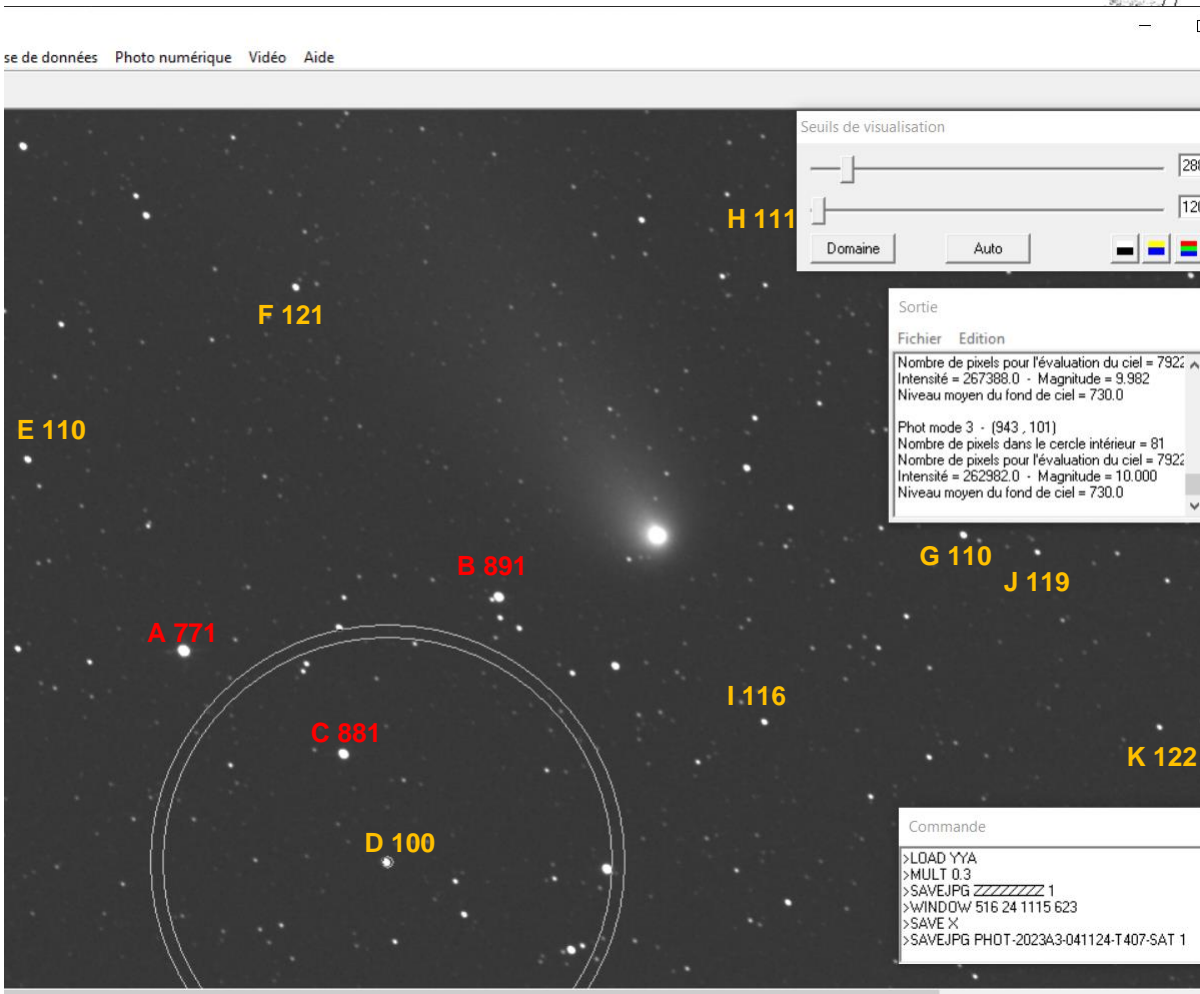
The 'Commande' window shows the following commands:

```
>load zza  
>mult 0.3  
>
```

The status bar at the bottom indicates: Prêt | 16 bits | X: 587 | Y: 591 | I: 737



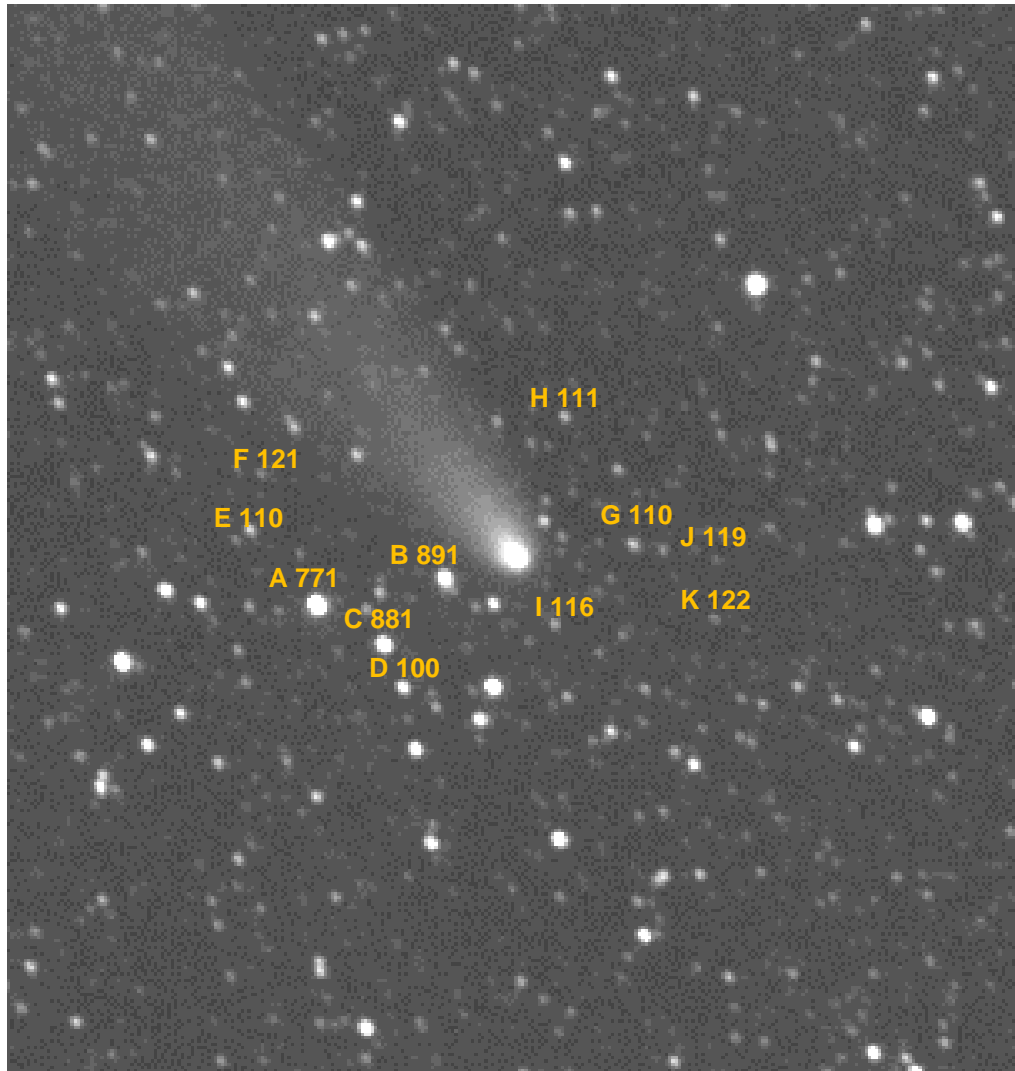
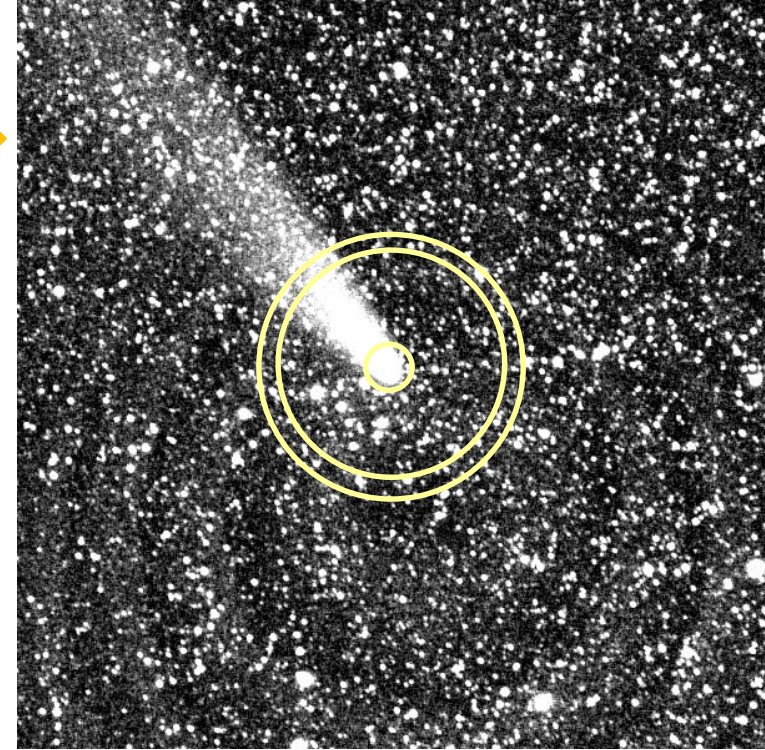
Les niveaux sont resserrés au max (visu) pour estimer le diamètre de la coma (ici  $\rho_1=210''$   $m_1 \sim 6.8$ ) et où prendre le ciel (ici  $\rho_2=360''$   $\rho_3=380''$ )



L'échelle des magnitudes (constante) est calée sur une étoile de référence non saturée (ici D de mag. 10.0) et contrôlée (ajustée) sur d'autres étoiles autour de la comète.

Vérifications: saturation  $m < 9.5$ . « Noyau »  $m_2(\rho=6'')$  mesuré à 10.1 = ok

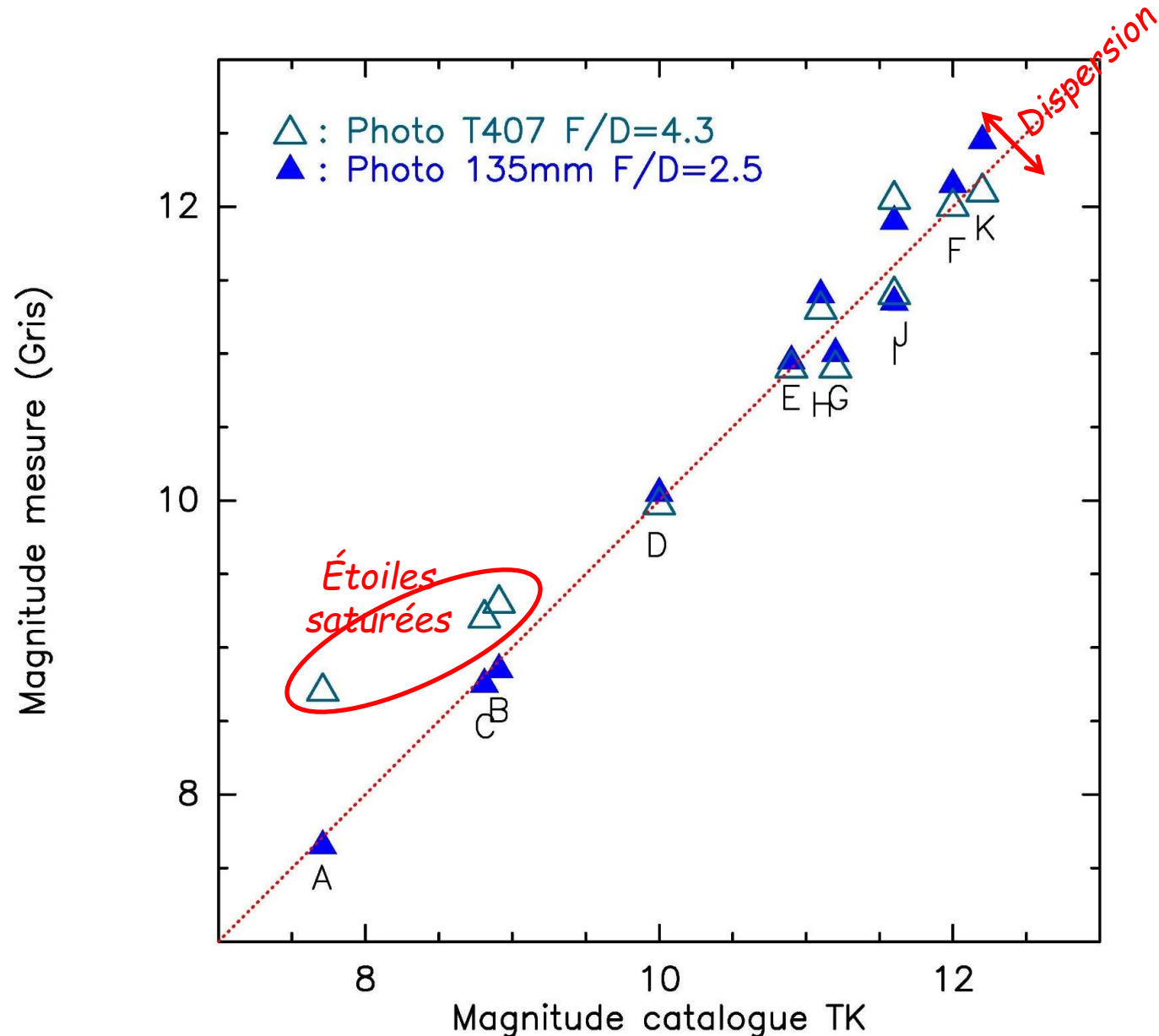
Les niveaux sont resserrés au max (visu) pour estimer le diamètre de la coma (ici  $\rho_1=208''$  (16pix)) et où prendre le ciel (ici  $\rho_2=80$  pix =  $1040''$   $\rho_3=90$ pix =  $1170''$ )



L'échelle des magnitudes (constante) est calée sur une étoile de référence non saturée (ici D de mag. 10.0) et contrôlée (ajustée) sur d'autres étoiles autour de la comète.

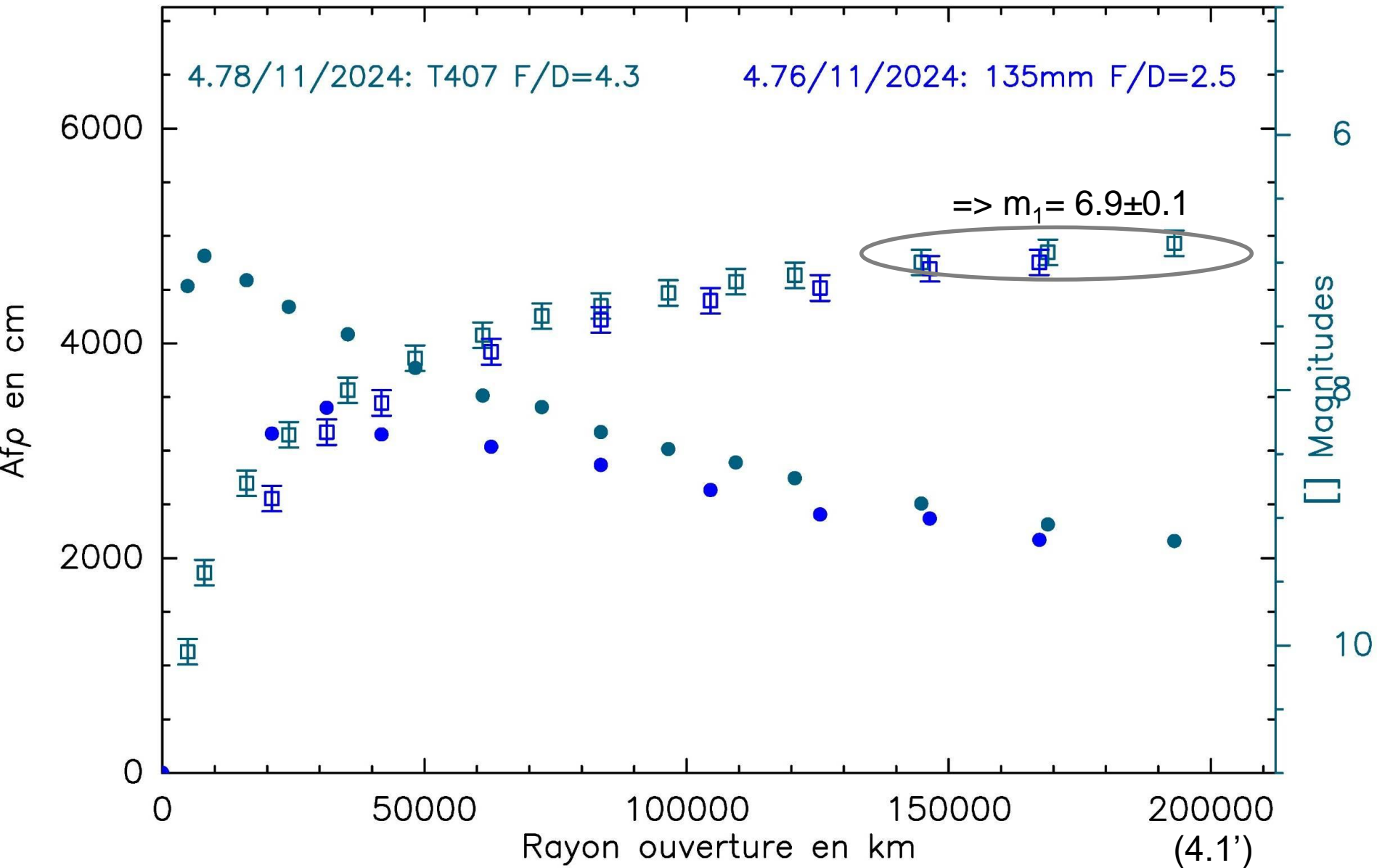
Vérifications: saturation  $m < 7$ . « Noyau »  $m_2(\rho=26'')$  mesuré à 8.9 = ok

# Etoiles de références utilisées: magnitude catalogue vs magnitude mesurée

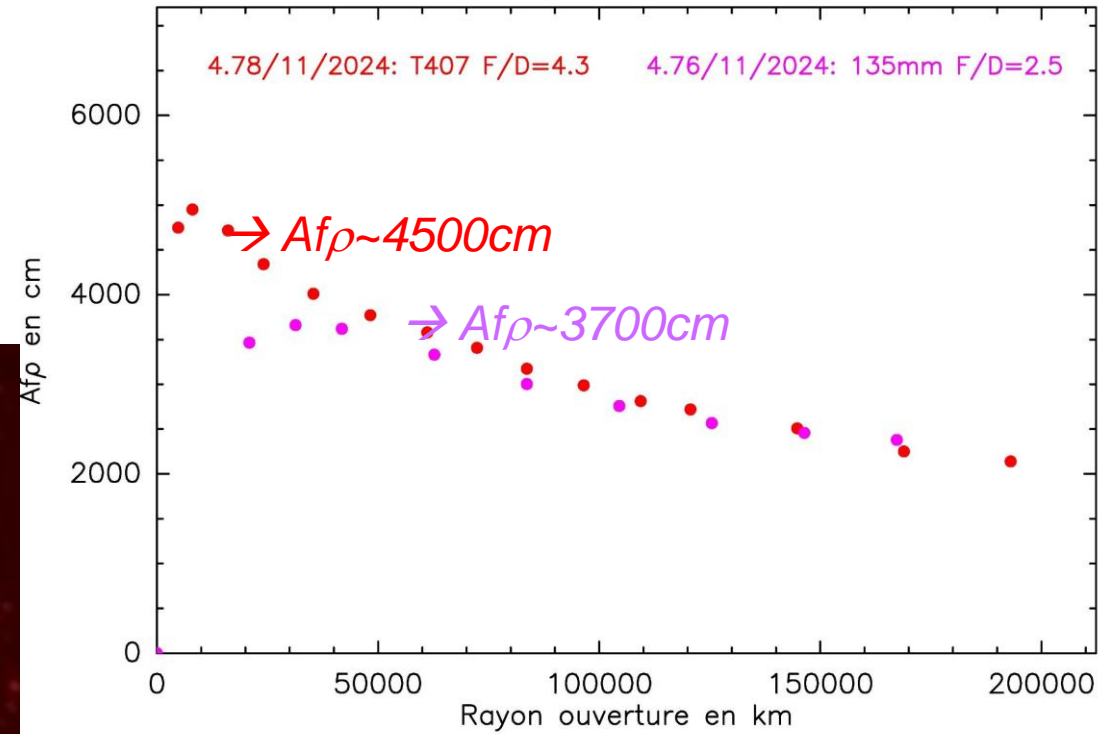
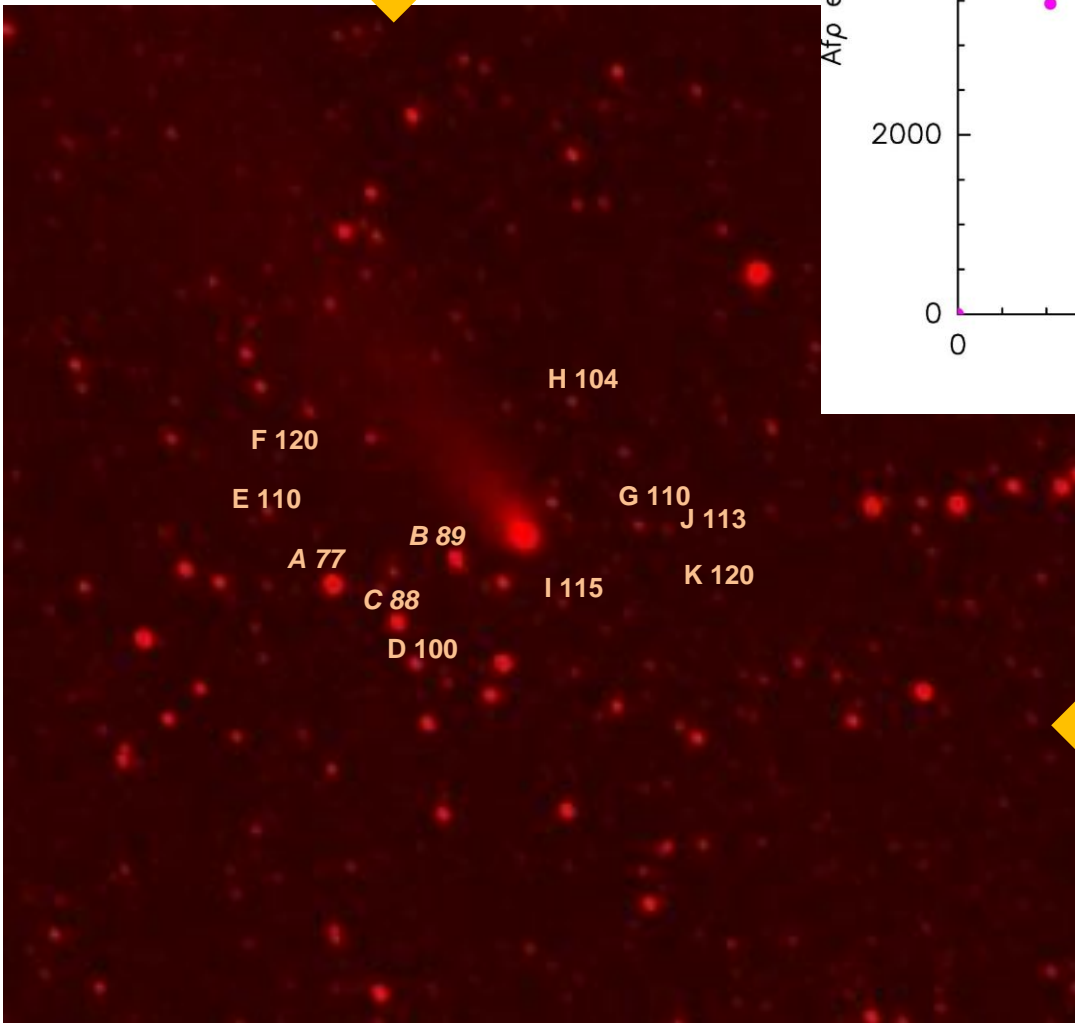




C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) :  $\text{Mag}(\rho) \rightarrow \text{af}\rho$  Niveaux N&B



Idem pour travailler sur les couches R V B de l'image couleur:  
R pour rejeter les émissions gazeuses



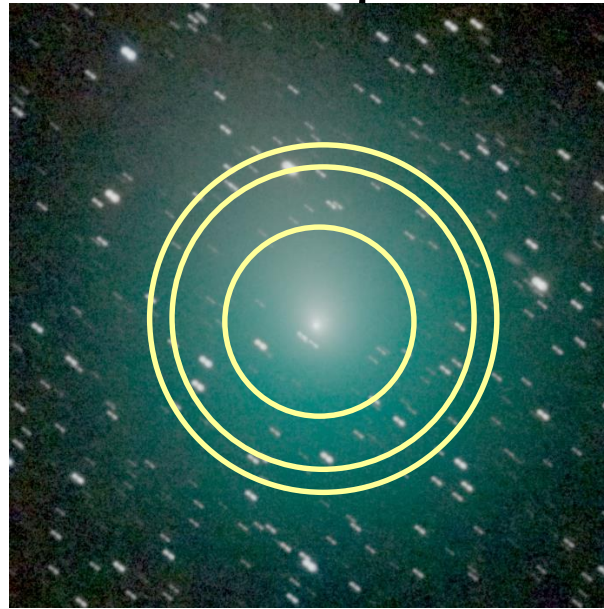
Magnitudes R: l'échelle des magnitudes (constante) est calée sur une étoile de référence non saturée (ici D de mag.  $r'$  10.0) et contrôlée (ajustée) sur d'autres étoiles autour de la comète.  
Conserver les magnitudes V du catalogue APASS reste plus proche de la bande passante du capteur.



## Erreurs fréquentes:



Intégration insuffisante  
=> coma sous-estimée



Seuils mal ajustés /  
champ trop petit =>  
coma sous-estimée



Etoile brillante: à mesurer  
séparément et retirer (calcul)



Centre coma saturé =>  
prendre poses plus  
courtes et normaliser

Mauvais / pas de flat  
<= ciel mal-estimé





# PHOTOMETRIE: $Af\rho$

-  $Af\rho$ : estimation de la production de poussières (1cm ~ 1kg/s)

=> flux (intégré) dans une ouverture de rayon  $\rho$

=>  $Af\rho$  (albédo x fraction occupé x rayon ouverture  $\rho$ ) =  
flux ( $\rho$ ) / flux solaire /  $\rho$  (indépendant de  $\rho$ )

Formule pratique: la magnitude étant =  $m_0 - 2.5 \log(\text{flux})$

$$Af\rho = \frac{(2\Delta r_h)^2}{\rho} 10^{0.4(m_{Sun} - m_{Comete}(\rho))}$$

Pour une ouverture rectangulaire x.y centrée:  $\rho = \sqrt{x \times y / \pi}$   
( $\Delta$ ,  $\rho$  en cm,  $r_h$  en au)

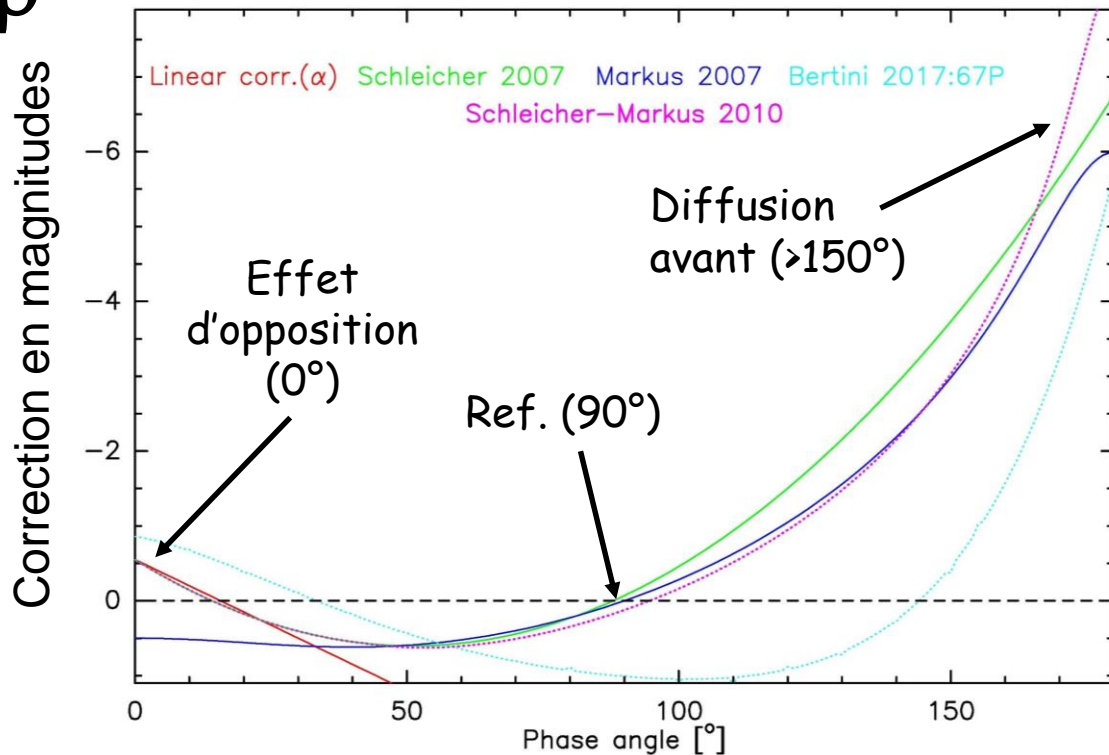
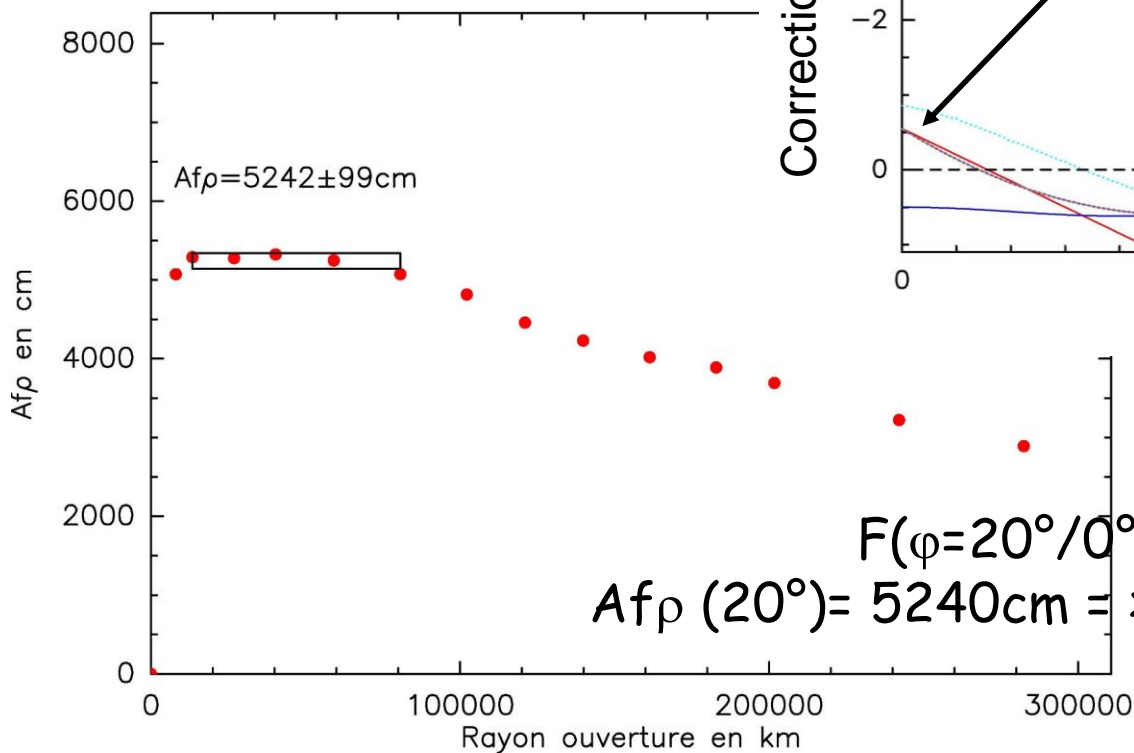
*La magnitude du soleil doit correspondre à celle de la bande utilisée pour l'image  
et du catalogue d'étoile*

# PHOTOMETRIE: $Af\rho$

Mesure  $Af\rho$  et correction de phase:

ex.: 29.9/7/2022  $\varphi=20^\circ$

C/2017K2:  $\text{Mag}(\rho) \rightarrow af\rho$



$$F(\varphi=20^\circ/0^\circ) = 0.67:$$

$$Af\rho(20^\circ) = 5240 \text{ cm} \Rightarrow Af\rho(0^\circ) = 7860 \text{ cm}$$

# RESUME: PHOTOMETRIE: $m_1$

Magnitude totale:  $m_1$ : donner le diamètre d'ouverture utilisée et la bande spectrale (bande V ou proche):



Outils informatiques:

- Mesures IRIS (photométrie ouverture après étalonnage)
- Software AIRTOOLS: <https://github.com/ewelot/airtools>
- Software KOPR (Jakub Cerny)

Que faire des mesures:

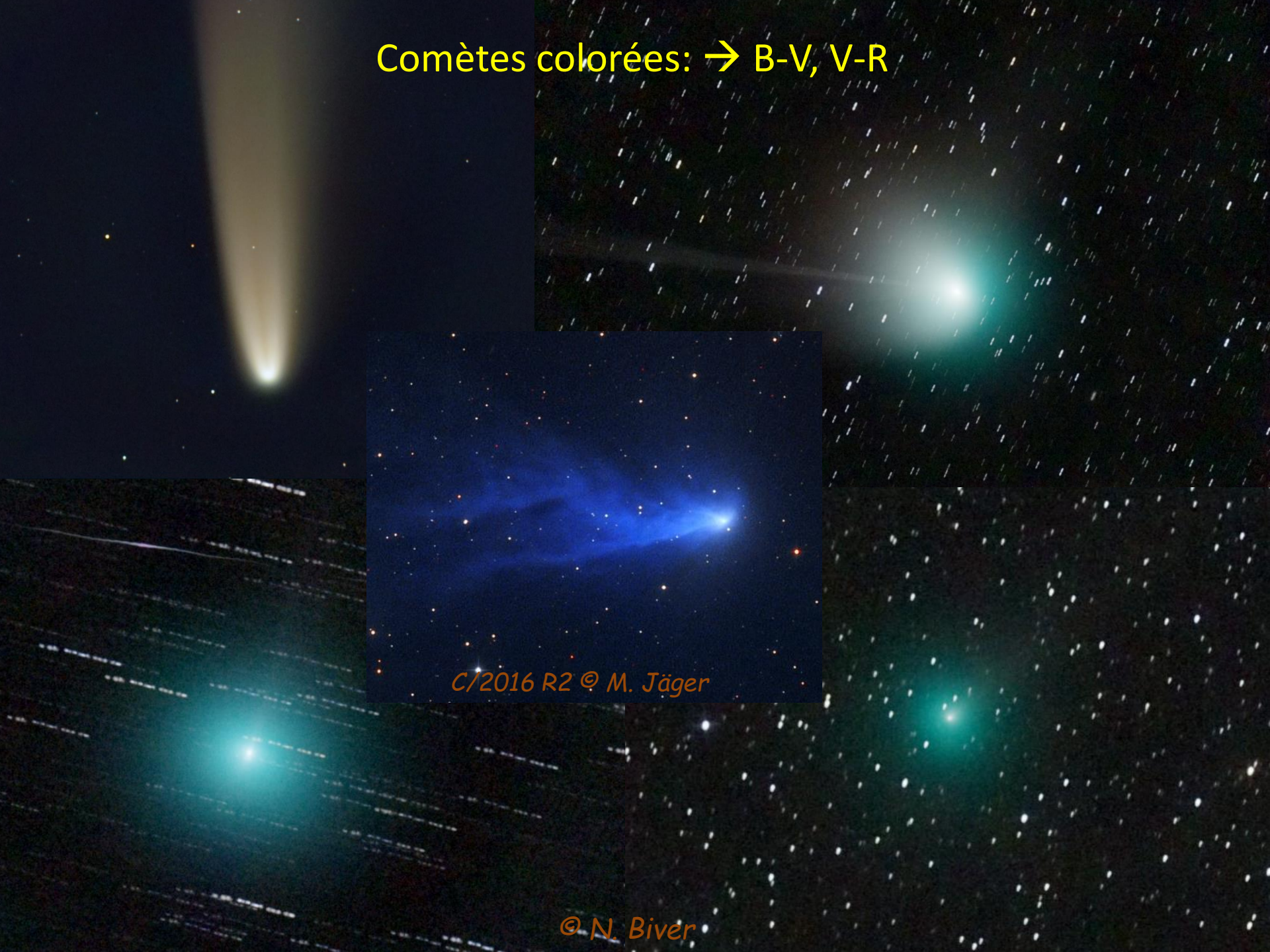
- Magnitudes documentées => [cobs.si](http://cobs.si), [lesia.obspm.fr/comets](http://lesia.obspm.fr/comets)
- $A_{f\rho}$  => [lesia.obspm.fr/comets](http://lesia.obspm.fr/comets), CARA, ... publications



## PHOTOMETRIE:

- Magnitude « nucléaire » ( $r=6''$ ):  $m_2$
  - Magnitude totale:  $m_1$
  - $Af\rho$
  - Couleurs B-V, V-R:
    - > mesurer magnitudes totale
    - couche R, V, B
    - ou avec les filtres R, V, B, (I, U, G,...)
- $\Rightarrow V-R \ll 0 \Rightarrow$  comète « gazeuse » ( $C_2$ )
- $\Rightarrow B-V < 0 \Rightarrow$  comète gazeuse voire riche en  $CO^+$

Comètes colorées: → B-V, V-R



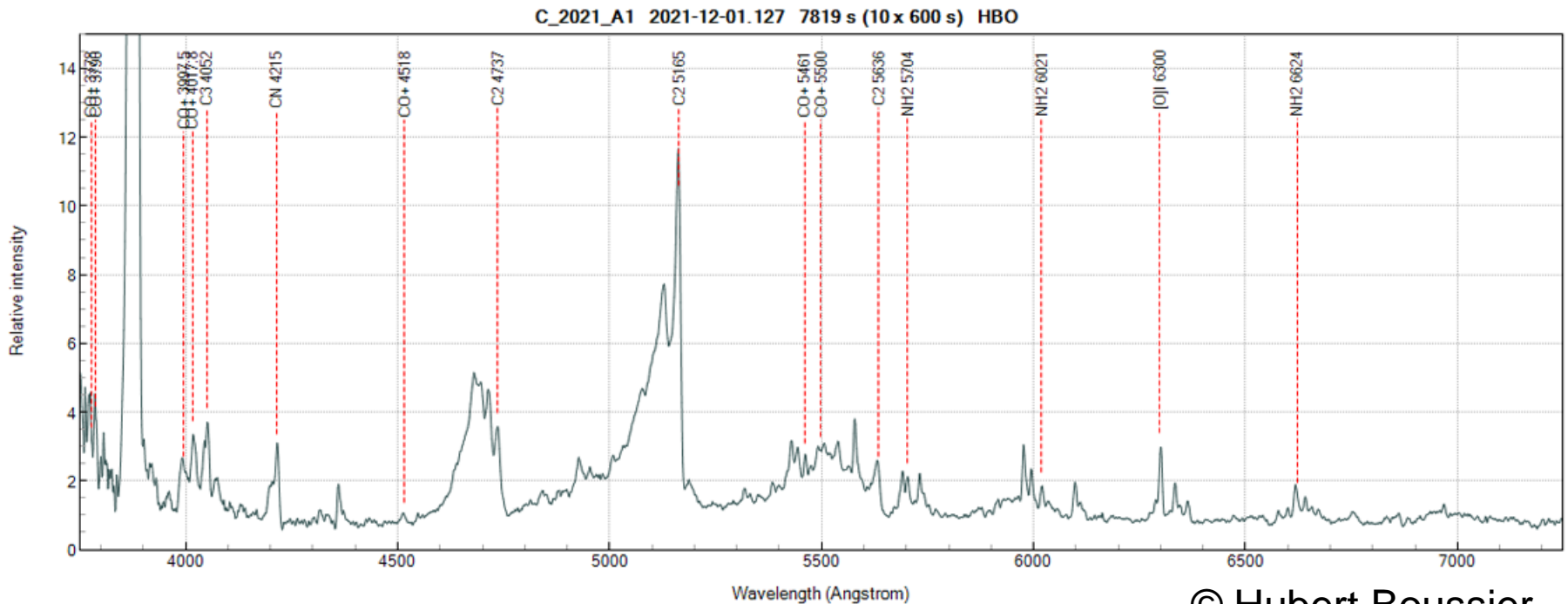
*C/2016 R2 © M. Jäger*

*© N. Biver*



# SPECTROSCOPIE

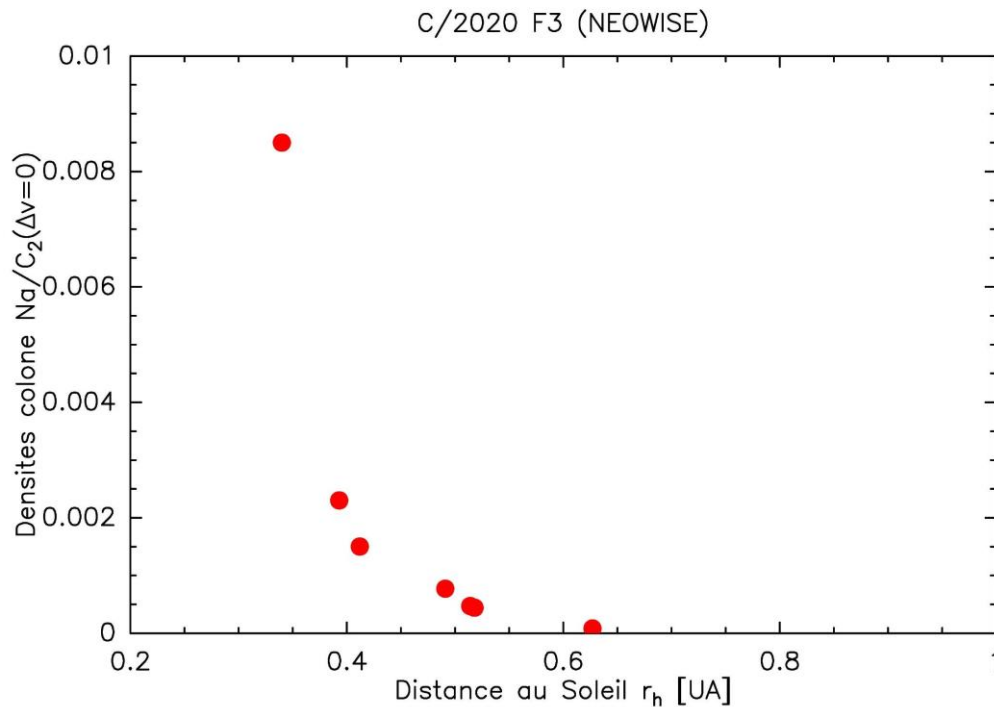
- spectro à fente, moyenne résolution:  $\lambda/\delta\lambda \sim 600$   
(ALPY, UVEX)
- objectif: avoir une idée de la composition de la coma:
  - présence de CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, NH<sub>2</sub>, O, Na, CO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>
  - rapports d'abondance



# SPECTROSCOPIE

- objectif: avoir une idée de la composition de la coma:  
rapports d'abondance de  
CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, NH<sub>2</sub>, O, Na, CO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>

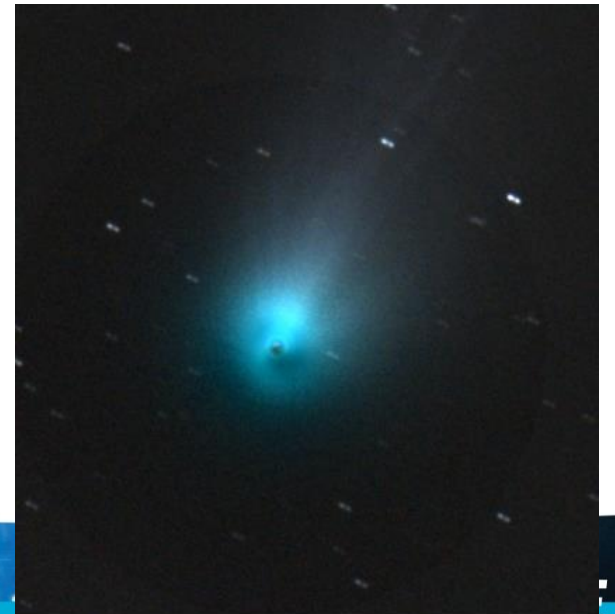
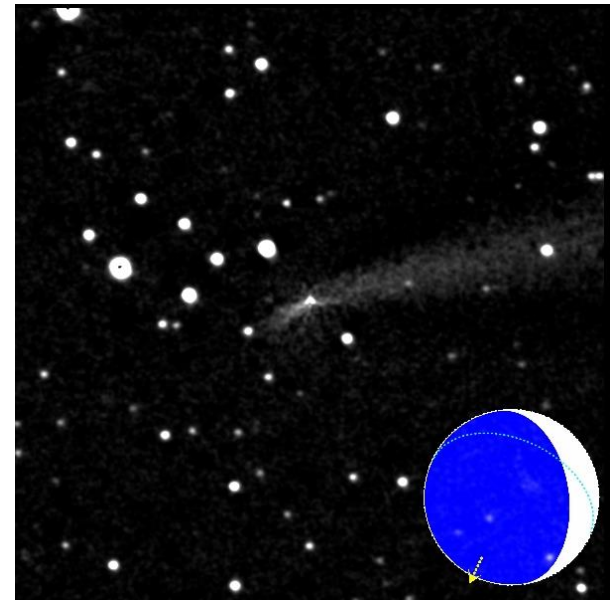
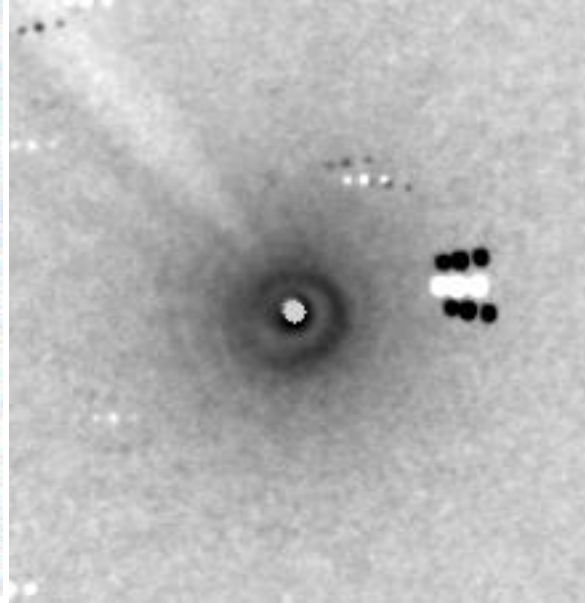
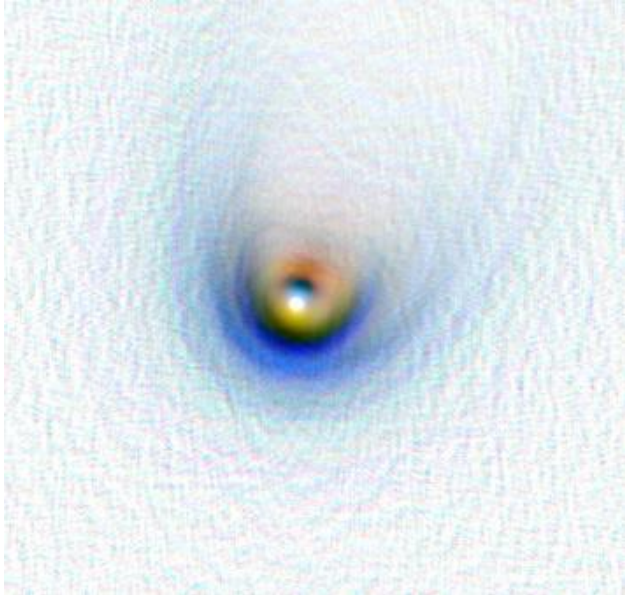
Espèce	$\lambda$	L/N ( $10^{-20}$ J/s)
CN	389nm	2.2 à 4.5 ( $v_h$ )
C <sub>2</sub>	470nm	2.4
	510nm	4.5
	560nm	2.1
	610nm	0.7
C <sub>3</sub>	405nm	10.
NH <sub>2</sub>	543nm	0.010
	573nm	0.011
	598nm	0.016
Na	590nm	30 à 500
CO <sup>+</sup>	401nm	0.21
	426nm	0.17
	455nm	0.10
N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	391nm	3.5





# MORPHOLOGIE

- position des jets
- période de rotation, de jets / enveloppes



# MORPHOLOGIE

Techniques:

Gradient radial (enveloppes), rotationnel (jets linéaires)

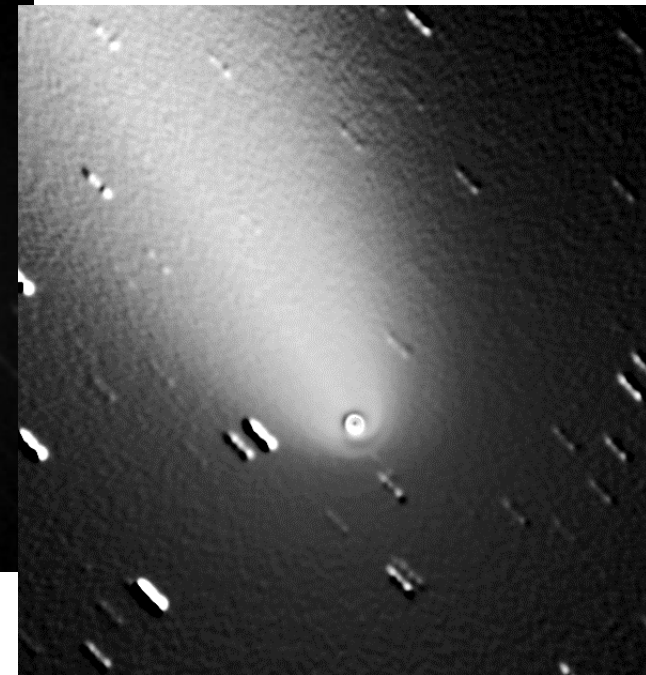
Moins biaisé: retrait/division (par  $1/\rho$ ) de la composante isotrope



Visu logarithmique



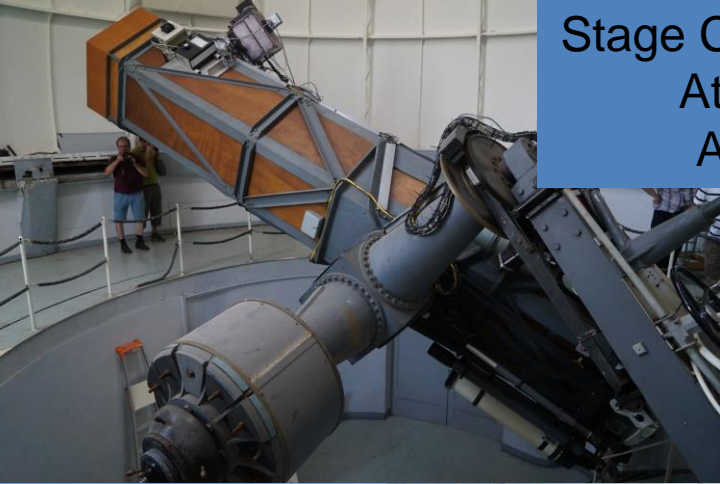
Visu linéaire après  $\times \rho$



+ gradient radial



Stage Comète OHP (30/08-01/09/2024):  
Ateliers et 3 nuits au T120cm  
A renouveler chaque année





# ET ENCORE...

Images grand champ → étude des queues:

- développement queues atomiques Na, Fe,..
- Synchrones dans la queue de poussières, antiqueue,... => tailles des grains
- Queue ionique: mesures du vent solaire: vitesse, variation champ magnétique...

Références, liens:

Base de données d'observations  
(Astrométrie/Photométrie/Spectroscopie/Photos)

<http://www.lesia.obspm.fr/comets/>

Liste d'échange:

<https://groups.io/g/groups/cometes/>

Workshop de Prague 2022 (lien vers les présentations):

<https://www.europlanet-society.org/pro-am-comet-community-hybrid-workshop-annoucement-of-draft-programme/>