

***Progrès dans les technologies  
optiques et photoniques pour  
l'astronomie professionnelle et  
amateur***

***Thierry Midavaine***

***[thierrymidavaine@sfr.fr](mailto:thierrymidavaine@sfr.fr)***

***Conférence le 3 juin 2023***

***à la Société astronomique de Montgeron***

La recherche, les développements et la production industrielle ont un impact très fort sur la conception et les performances des instruments astronomiques :

- optiques de grands diamètres et de grands champs,
- optiques actives et adaptatives,
- technologies de détection CMOS à comptage de photon,
- technologies IR,
- filtres optiques,
- masques de phases et
- spectro imageurs

Constituent des exemples modernes

# Les problématiques instrumentales

1. Collecter des flux de photons
  - Surface de collection
  - Champ angulaire de collection
  - Résolution angulaire
  - Résolution temporelle
2. Détecter le flux et le convertir en données numériques
3. Analyser le flux
4. Bloquer ou rejeter des flux parasites pour analyser les sources à proximité

# Les technologies Infrarouges et le JWST

- Optiques de grands diamètres et de « grands champs »
- Le concept du télescope spatial : l'optique du JWST
- Optique active
- Les matrices actives et technologies de détection CMOS à comptage de photon
- Les instruments et les détecteurs matriciels plans focaux
- Filtres et traitements optiques
- Spectroscopie
- Coronographie et masques de phase

# 1. Optiques de grands diamètres et de grands champs

- Amateurs
- Professionnels

# L'optique : hiérarchie des conceptions

- Optiques réfractives, lunettes et réfracteurs
  - Sphériques
    - Lentilles simples,
    - doublets achromatiques
    - Apochromatiques
  - Combinaisons avec Asphériques
- Optiques réfléchives, télescopes
  - 1 miroir : Newton
  - 2 miroirs : Cassegrain, Ritchey Chrétien,...
  - 3 miroirs : TMA, Korsch
- Optiques catadioptriques : combinant les deux composants : lentilles réfractives et miroirs
  - Combinaisons à Miroir (1, 2, ou 3) +
    - Compensation de la courbure de champ
    - Correcteur de champ
    - Réducteur de focale
  - Combinaisons avec Pupille principale réfracteur et réflecteur :
    - les combinaisons « Schmidt »
    - Maksutov
    - Mangin
- Combinaisons avec lentilles diffractives
- Optique Free Form

# Low F/Number Assy

F/2 -F/3

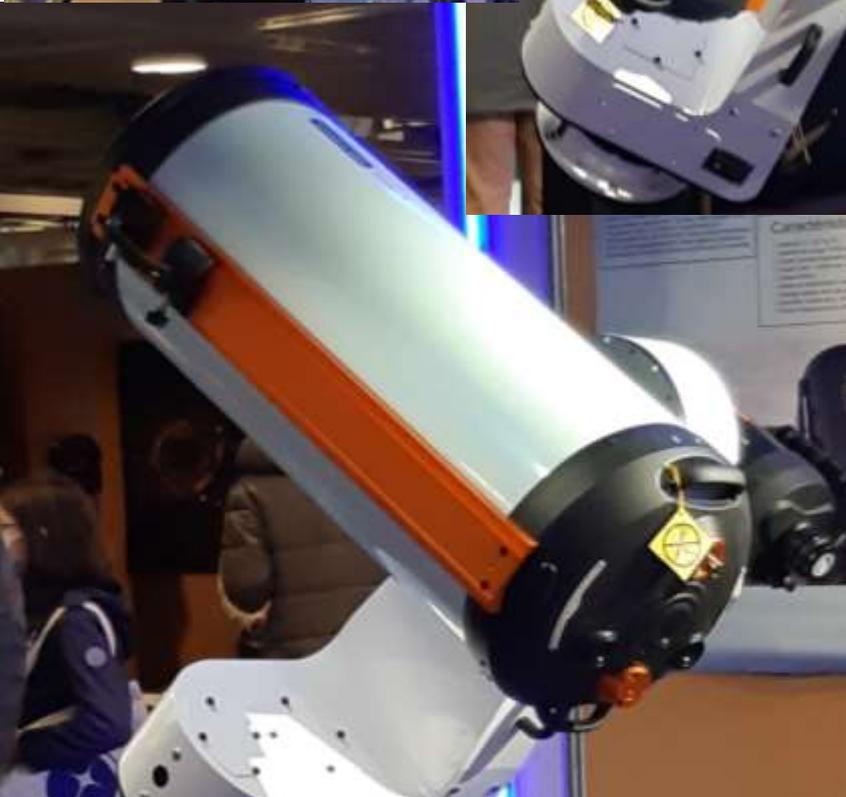


- SC Hyperstar
  - C14 Hyperstar
- Newton corrector at prime focus
  - Claudine Rinner Michel Ory
- RC with corrector at prime focus
  - Astrosib



Meaningfull with pixel shrinking





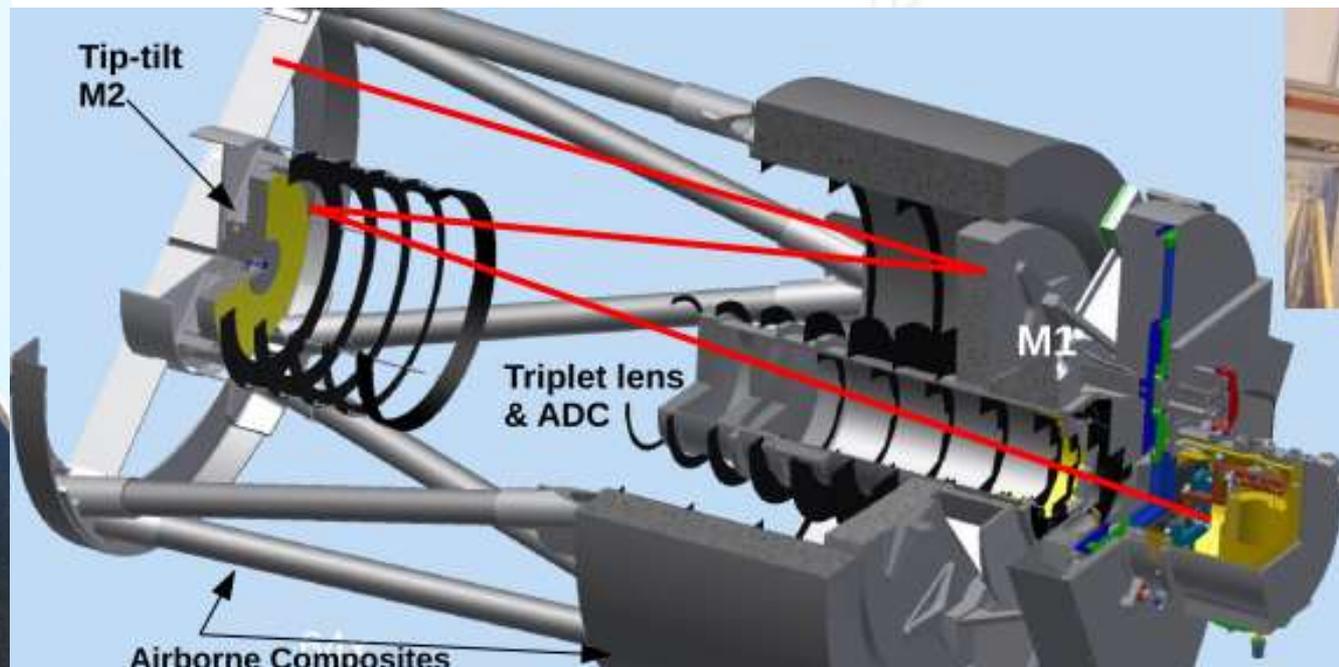
RASA 8 f/2, 11 et 14" f/2.2  
RC avec correcteur prime  
focus f/2.8



# Le réseau des Télescopes BlackGEM

## Phase 1:

- 3 wide field telescopes (8.1 square degr. total) —
- Primary mirror: 65cm diameter
- Sensitivity:  $g=23$  in 5 minutes
- Location: ESO La Silla
- Optical quality: seeing limited, 0.9" median
- Camera: 1 CCD/telescope, 10k x 10k, 0.56"/pixel
- Filters:  $u, g, q, r, i, z$  filter set, change in 3s



# Le concept du télescope spatial



1923 Evoqué par Hermann Oberth

1946 Article fondateur de Lyman Spitzer

1965 Lyman Spitzer dirige une  
commission pour définir les objectifs  
d'un télescope spatial

Aujourd'hui c'est 90 télescopes spatiaux  
qui ont été lancés

# Avantages d'un télescope spatial exploités par le JWST

Une résolution angulaire non gênée par la turbulence atmosphérique

Un accès au spectre IR sans être gêné par la transmission atmosphérique et l'émissivité de l'atmosphère à 273K

Une optique limitée par la diffraction dans un grand domaine de longueur d'onde et dans un grand champ pour distribuer le flux vers plusieurs instruments

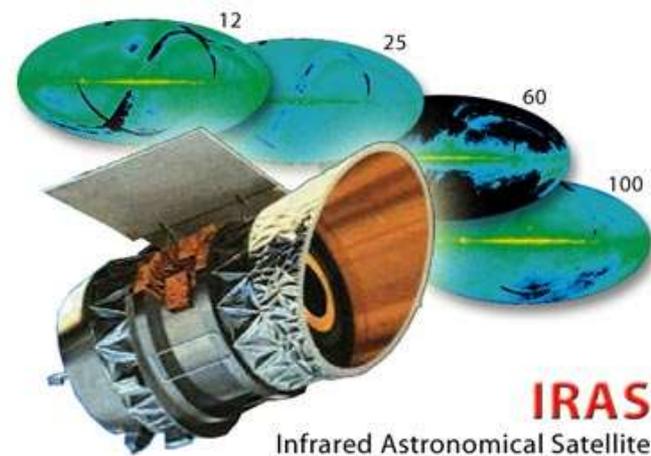
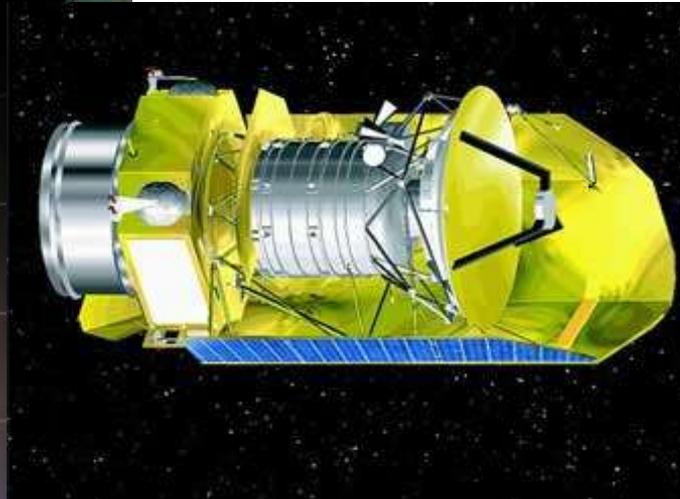
Un temps d'observation très long

Un refroidissement passif à moins de 60K de l'instrument complet

Pas de besoin de monture équatoriale ou de mécanique raide pour contrer la gravité

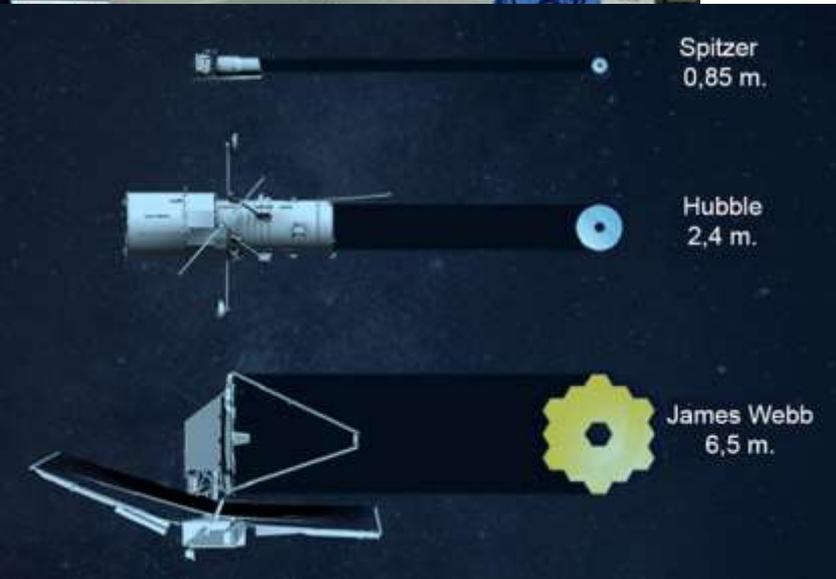
# Le Hubble Space Telescope (HST)





## Les télescopes spatiaux IR

IRAS	1983	0,57m	12-100 $\mu$ m
ISO		0,6m	5 $\mu$ m
HST	1990	2,3m	0,09 – 2,5 $\mu$ m
FIRST			85-900 $\mu$ m
Spitzer	2003	0,85m	3 – 160 $\mu$ m
Planck	2009		300 $\mu$ m-11,1mm
Herschel	2009	3,5m	55-672 $\mu$ m
JWST	2021	6,5m	0,6-29 $\mu$ m



# Le James Webb Space Telescope

32 ans de persévérance pour mettre des bijoux de technologies au service de la science



Maquette à l'échelle 1 du JWST devant le Goddard Space Flight Center (GSFC)

# Un miroir replié pour passer dans la coiffe d'Ariane 5



Le JWST entièrement assemblé et en position repliée en [salle blanche](#) à Kourou peu avant son installation sur son lanceur [Ariane 5](#) ; le technicien en bas de la photo donne l'échelle.

Wikipedia

Gabarit de 5m

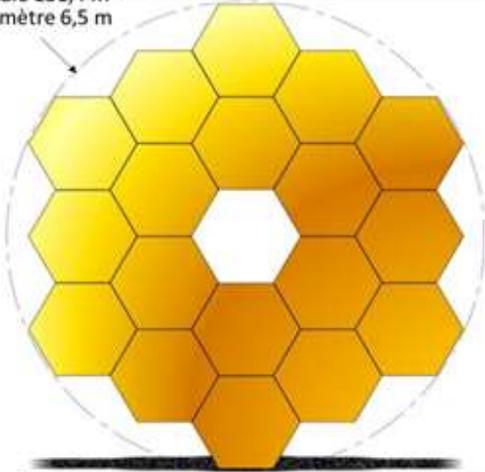
Le concept de miroir spatial replié étudié à Thales Alenia Space pour le télescope spatial Herschel de 4m (le précédent record de diamètre de miroir primaire spatial).

Permet en plus d'alléger l'ensemble du primaire monté.

Le HST (Hubble Space Telescope) 2,3m qui fonctionnera sans doute jusque 2030

# Combinaison optique du JWST

Focale 131,4 m  
Diamètre 6,5 m



Combinaison optique à trois miroirs :

TMA : formule anastigmatique à trois miroirs

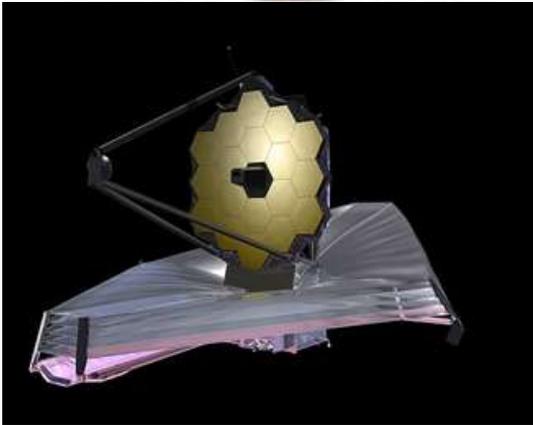
Combinaison Korsch destiné à minimiser les aberrations sur tout le champ utile

Primaire : 18 miroirs hexagonaux en BériIium

Diamètre effectif  $D=6,5\text{m}$

Focale  $f=131,4\text{m}$  ( $f/D = 20,2$ )

Domaine spectral complet couvert par l'optique de  $0,6\mu\text{m}$  à  $21\mu\text{m}$



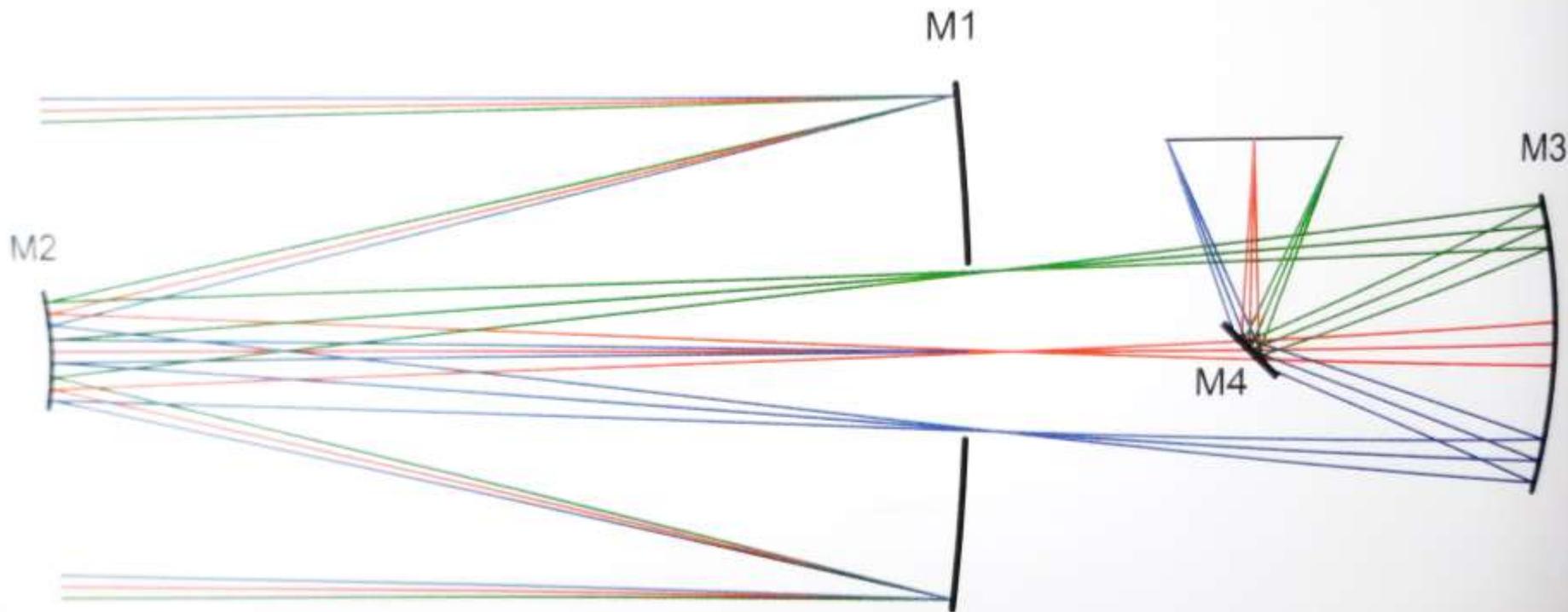


Figure 43-80: Three-mirror Korsch telescope with folding flat mirror [43-40].

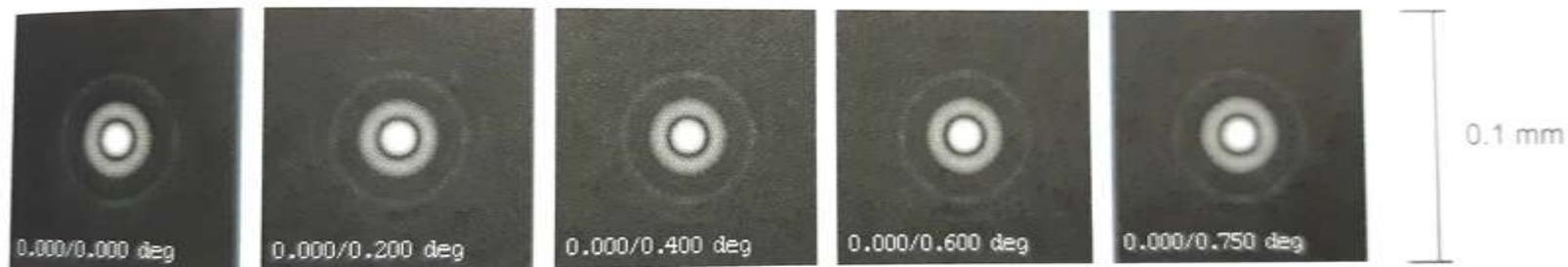
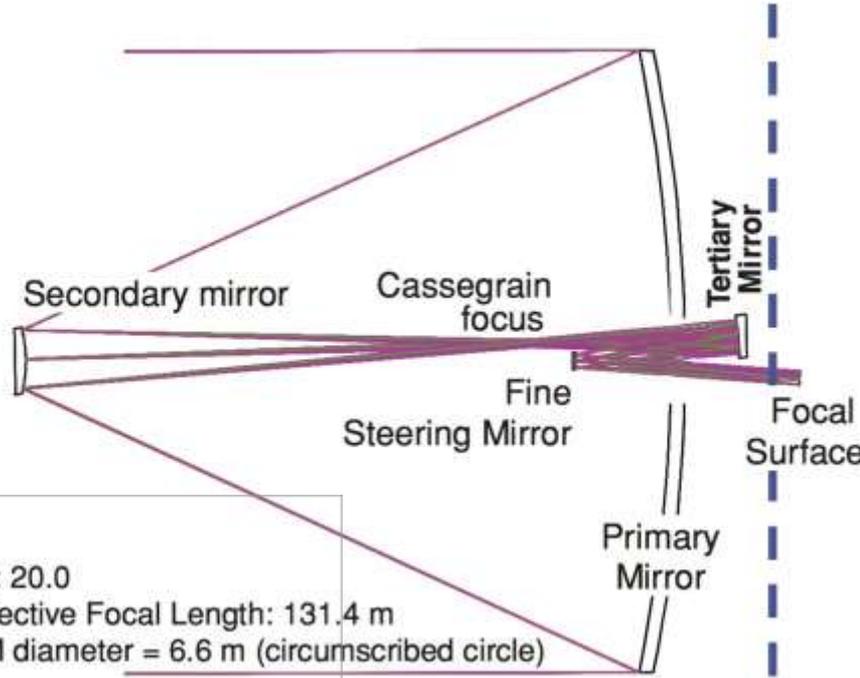
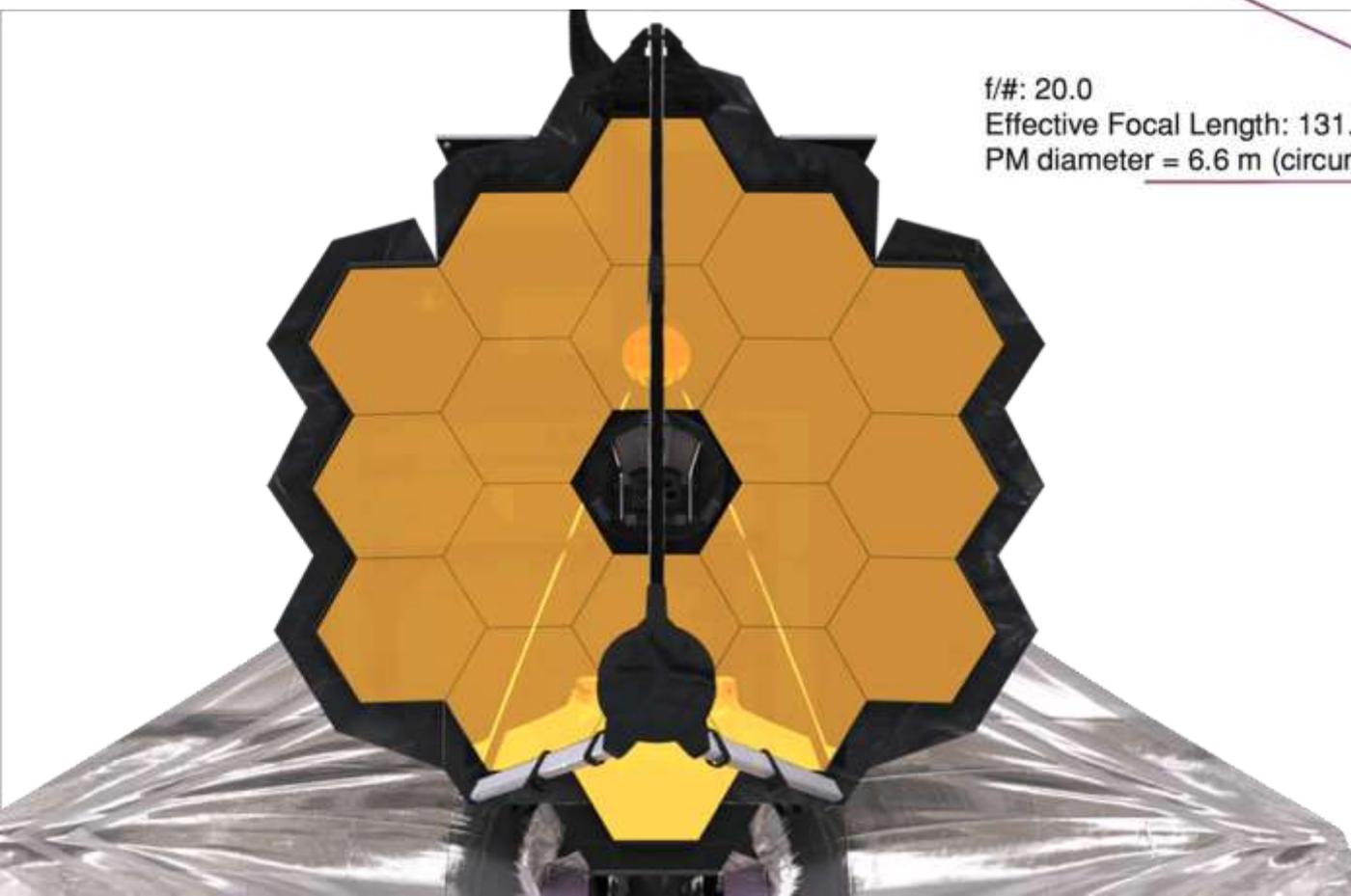
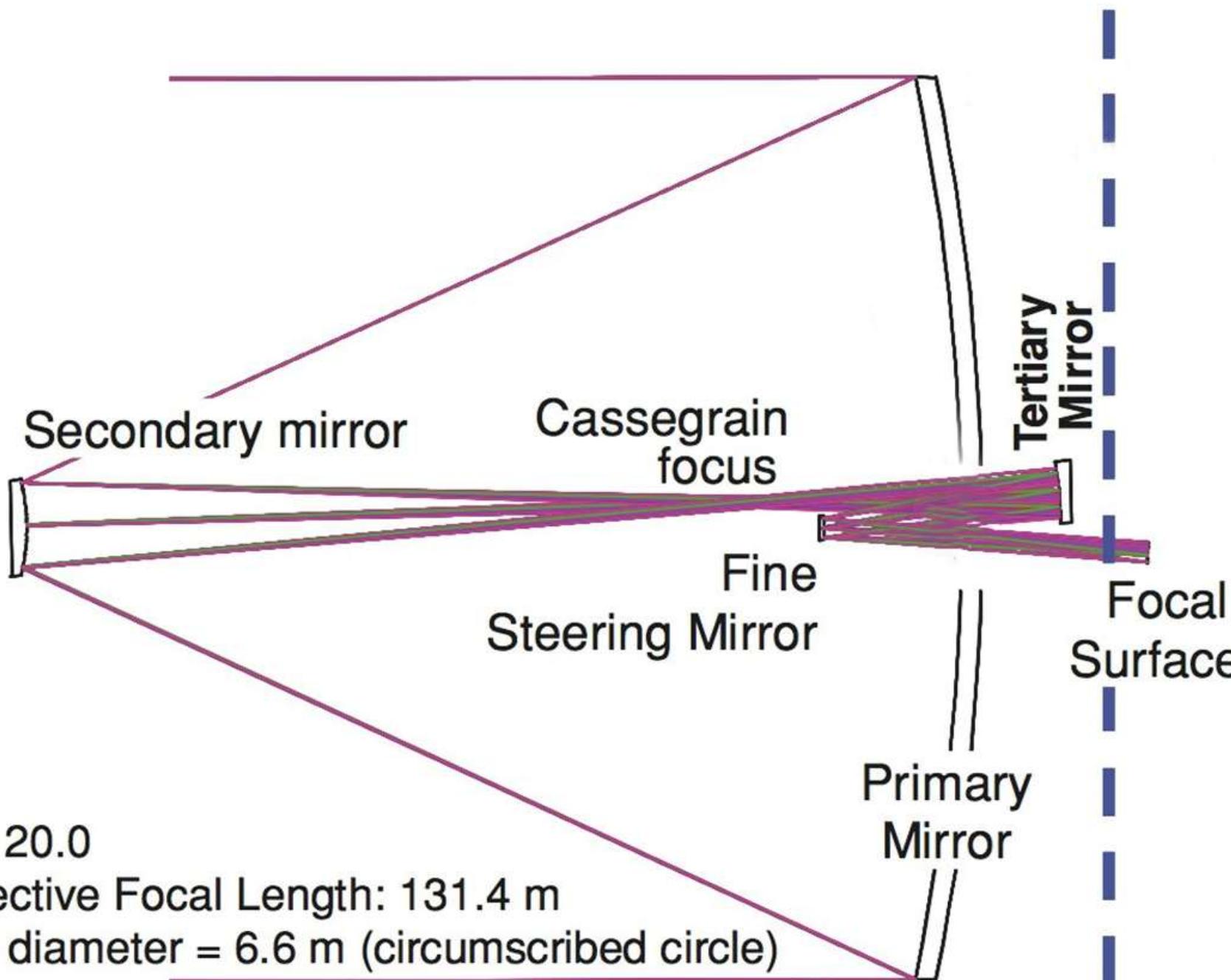


Figure 43-81: Diffraction PSF of the three-mirror Korsch telescope with folding flat mirror.



f/#: 20.0  
 Effective Focal Length: 131.4 m  
 PM diameter = 6.6 m (circumscribed circle)





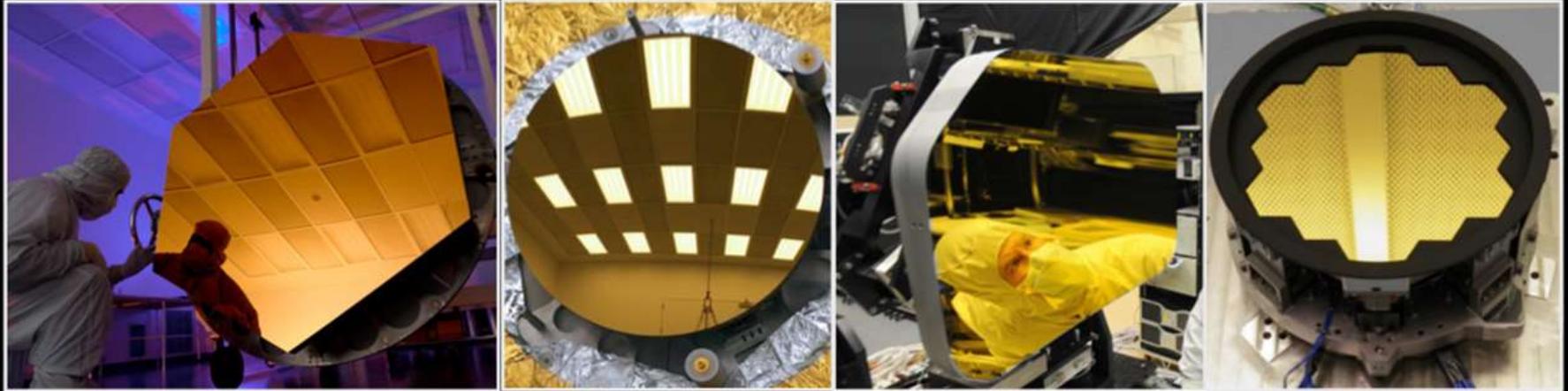
f/#: 20.0  
Effective Focal Length: 131.4 m  
PM diameter = 6.6 m (circumscribed circle)

Primary Mirror Segment

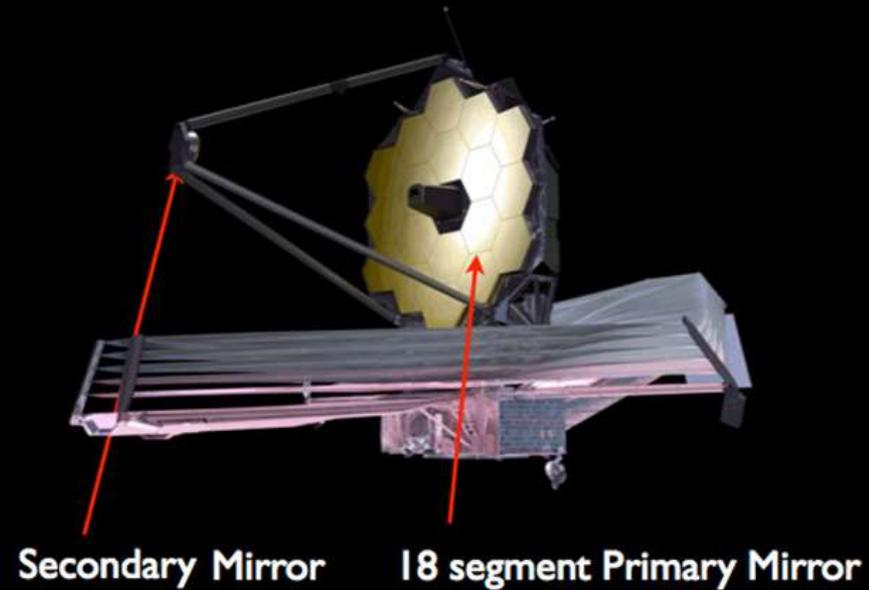
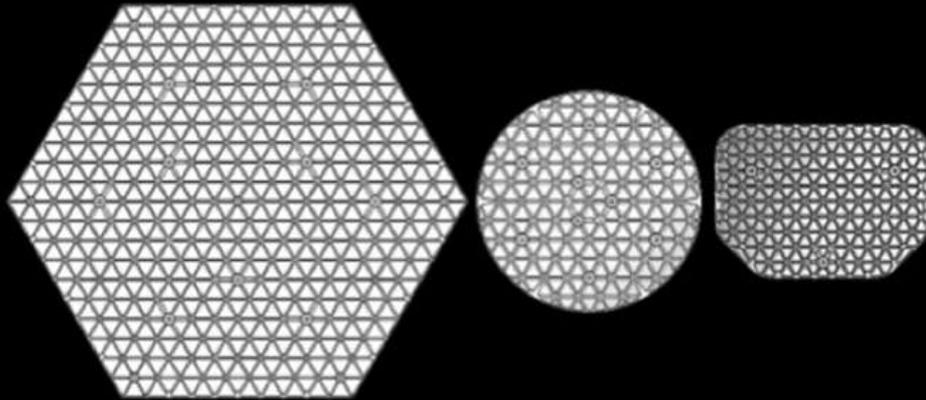
Secondary Mirror

Tertiary Mirror

Fine Steering Mirror



Rear side view of mirrors showing relative size



Secondary Mirror

18 segment Primary Mirror

# Traitement or

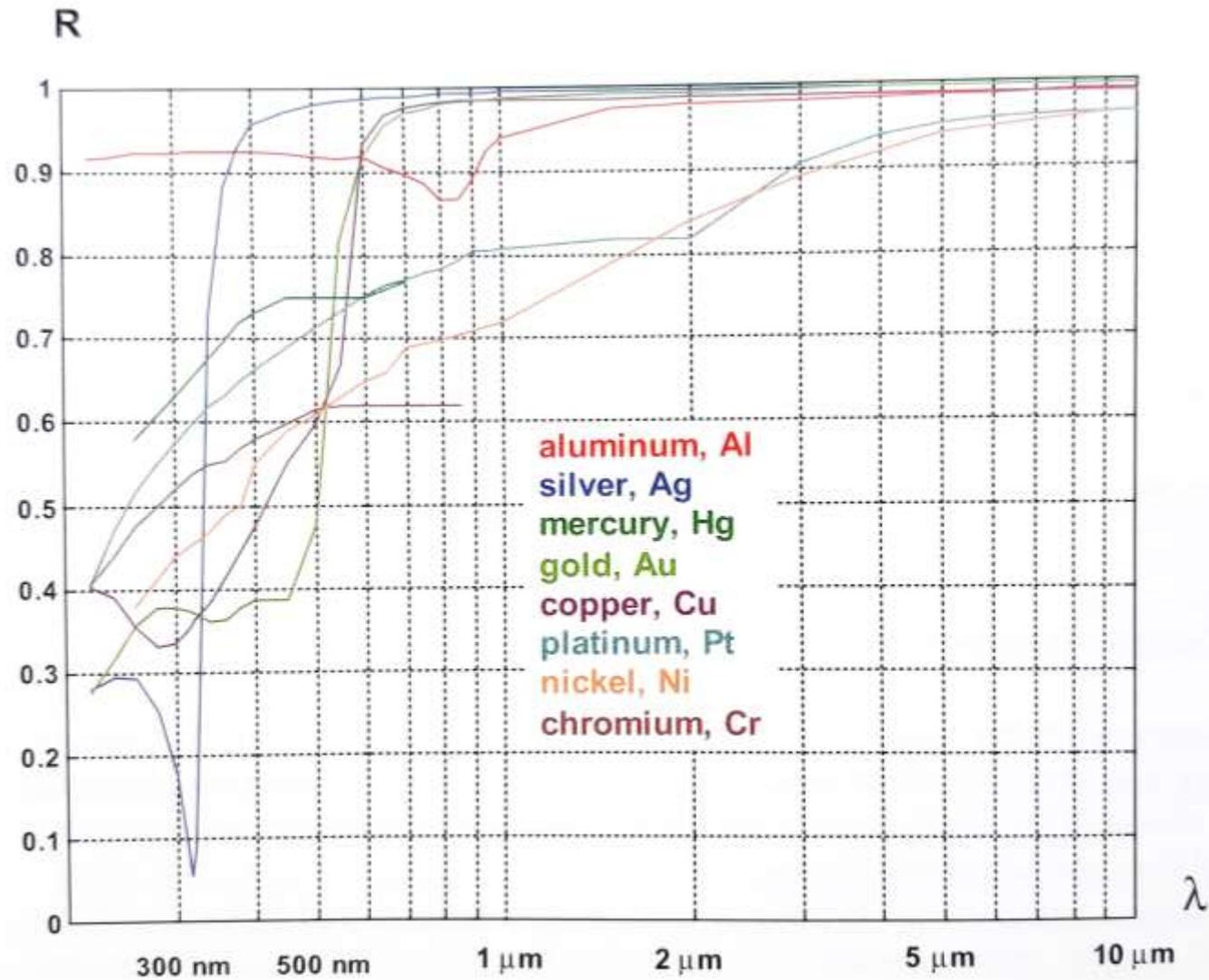
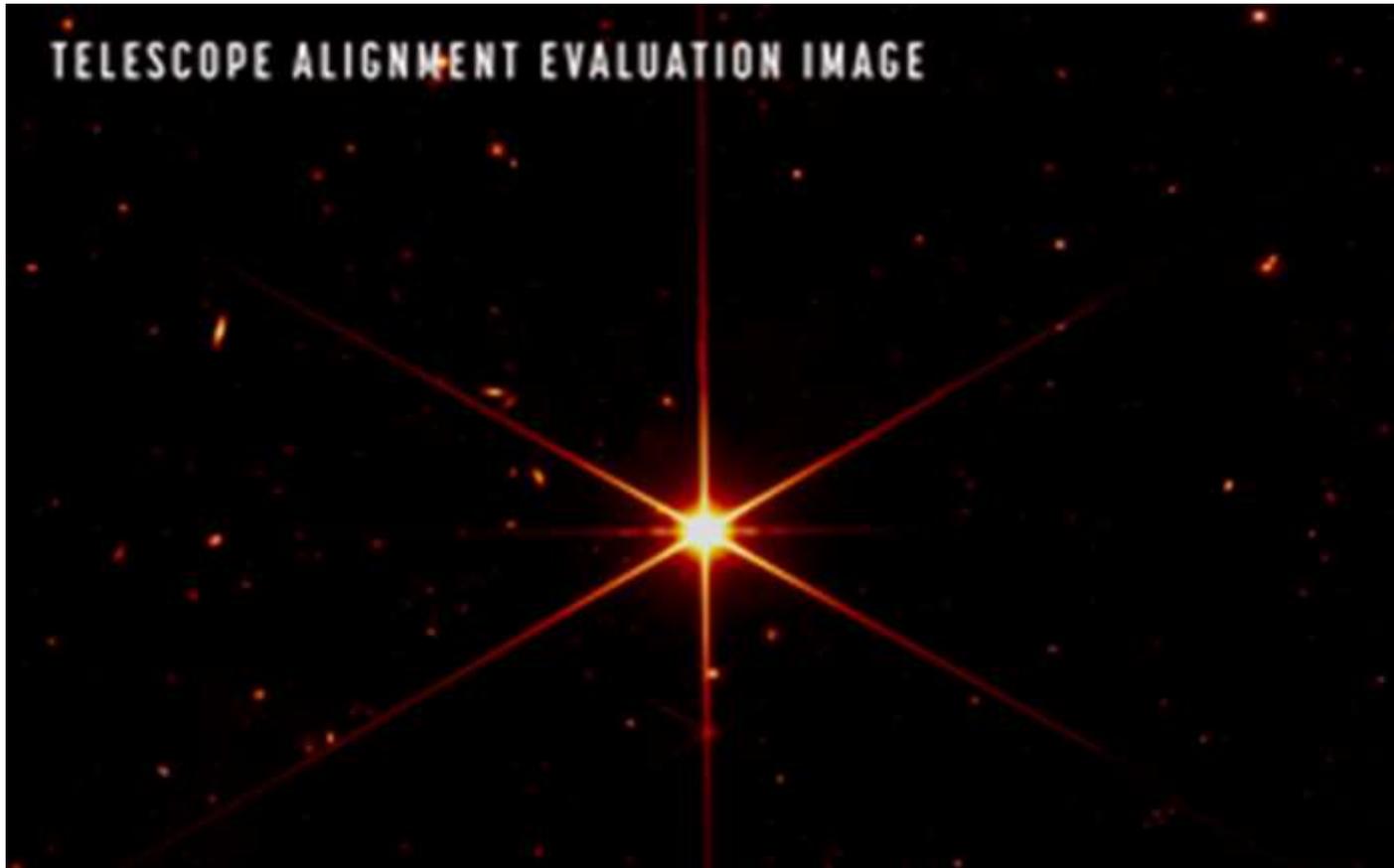


Figure 4-47: Spectral reflectivity of certain metals.



résultat de l'alignement et de la mise en phase de tous les segments hexagonaux du miroir primaire obtenu en mai 2022 avec une résolution de 70 milli-arcseconde.

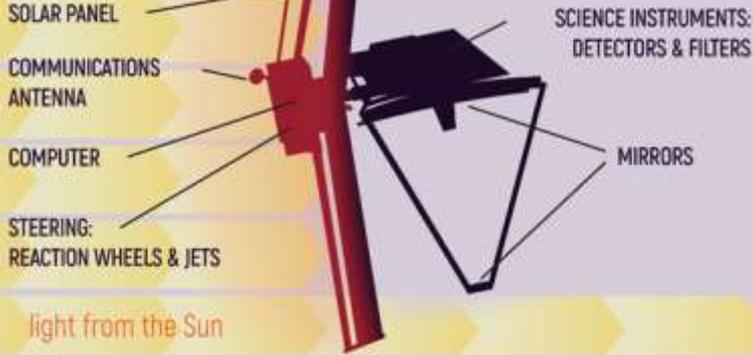
# The Two Sides of the Webb Telescope

## Hot side

185° Fahrenheit  
(85° Celsius)

## Cold side

-388° Fahrenheit  
(-233° Celsius)



## Cross-Section of Webb's Five-Layer Sunshield

Light and heat from the Sun hits the shield, heating it up.

Each layer of material blocks some heat, deflects the rest harmlessly out the sides.

Very little heat gets through all the layers to the cold side of the telescope.



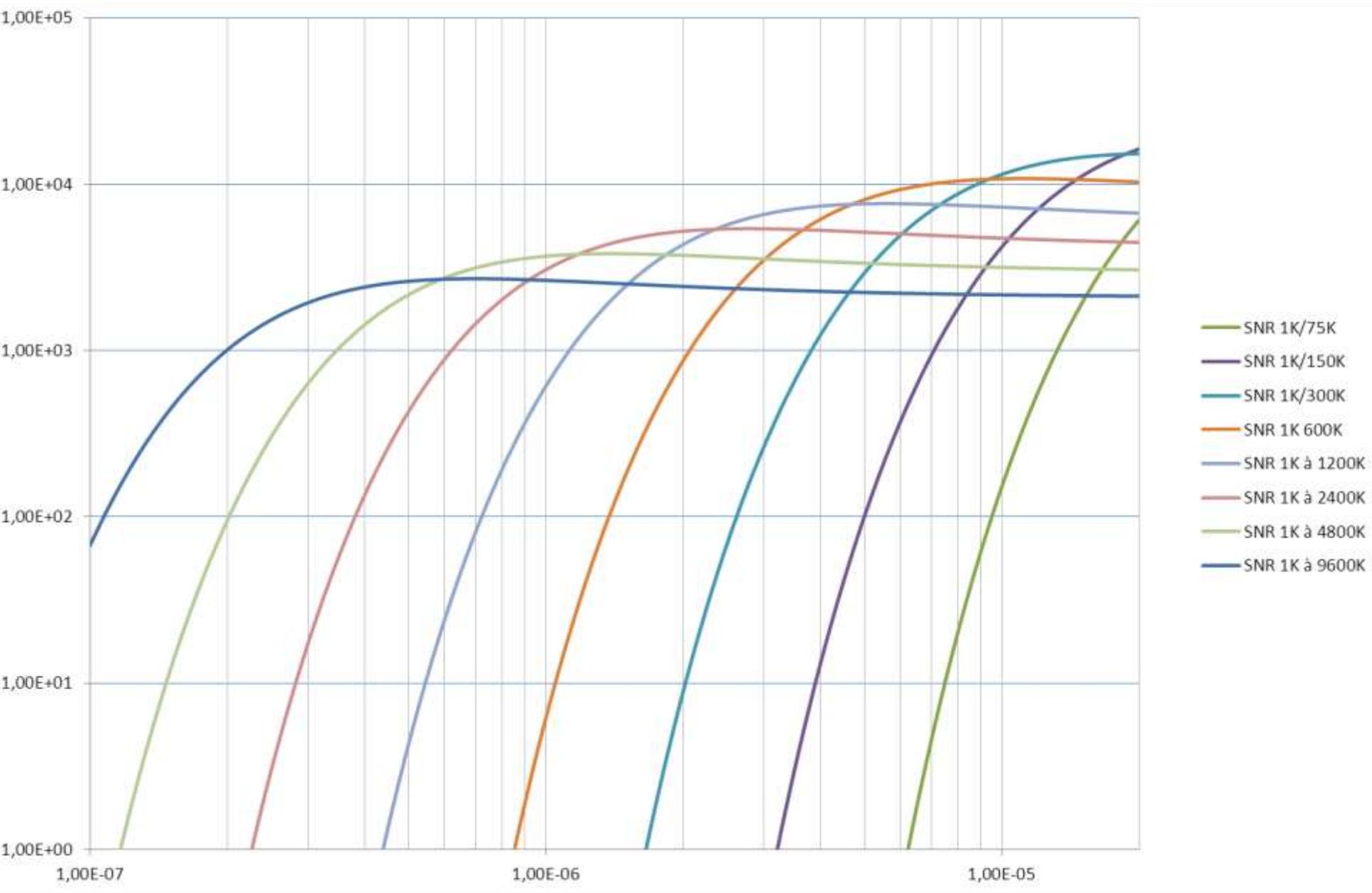
L'ensemble de l'instrument est refroidi de manière passive à une température voisine de 40 Kelvin grâce à un bouclier thermique de 12m x 22m, en kapton, composé de cinq couches. Ce bouclier, également déployable, protège le télescope des rayonnements infrarouges et de la lumière parasite. Il doit résister aux températures extrêmes rencontrées par les surfaces exposées au Soleil. Les instruments et plans focaux nécessitent des températures plus basses qui vont de 39K à 7K, obtenues avec des machines cryogéniques.

## 2. La détection et le domaine quantique

### **Le domaine spectral du photon porteur de l'information :**

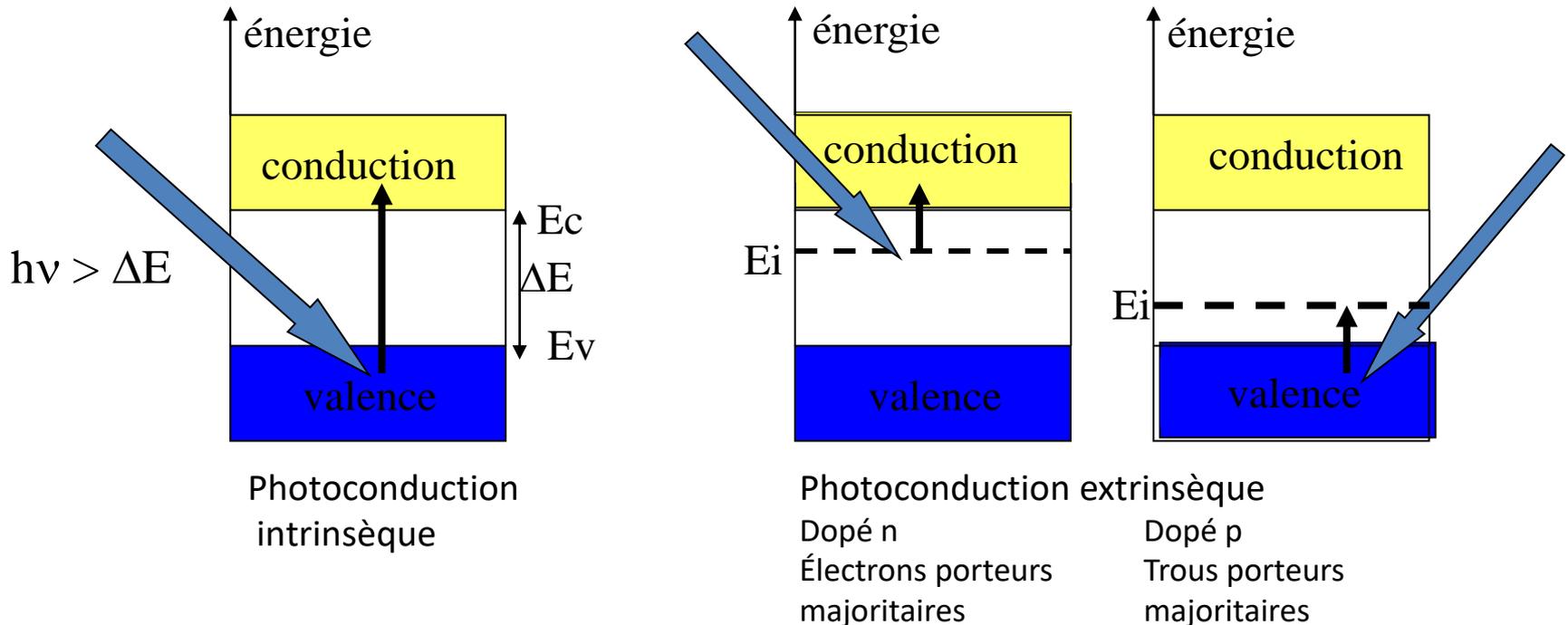
- Comparons l'énergie du photon :  $E = h.\nu = h.c/\lambda$   
Ou encore  $\lambda = h.c/E$
- Au bruit thermique :  $k.T$   
(Sur Terre  $T = 300K$ )
- l'énergie du photon  $> k.T$  pour  $\lambda < 48\mu m$
- Chaque photon peut interagir avec un atome, un ion ou une molécule (dans un état solide, liquide, gaz, plasma) et leur céder toute leur énergie avec une certaine probabilité.

# S/B pour une différence de température de 1K à différentes températures en phot/s/pixel



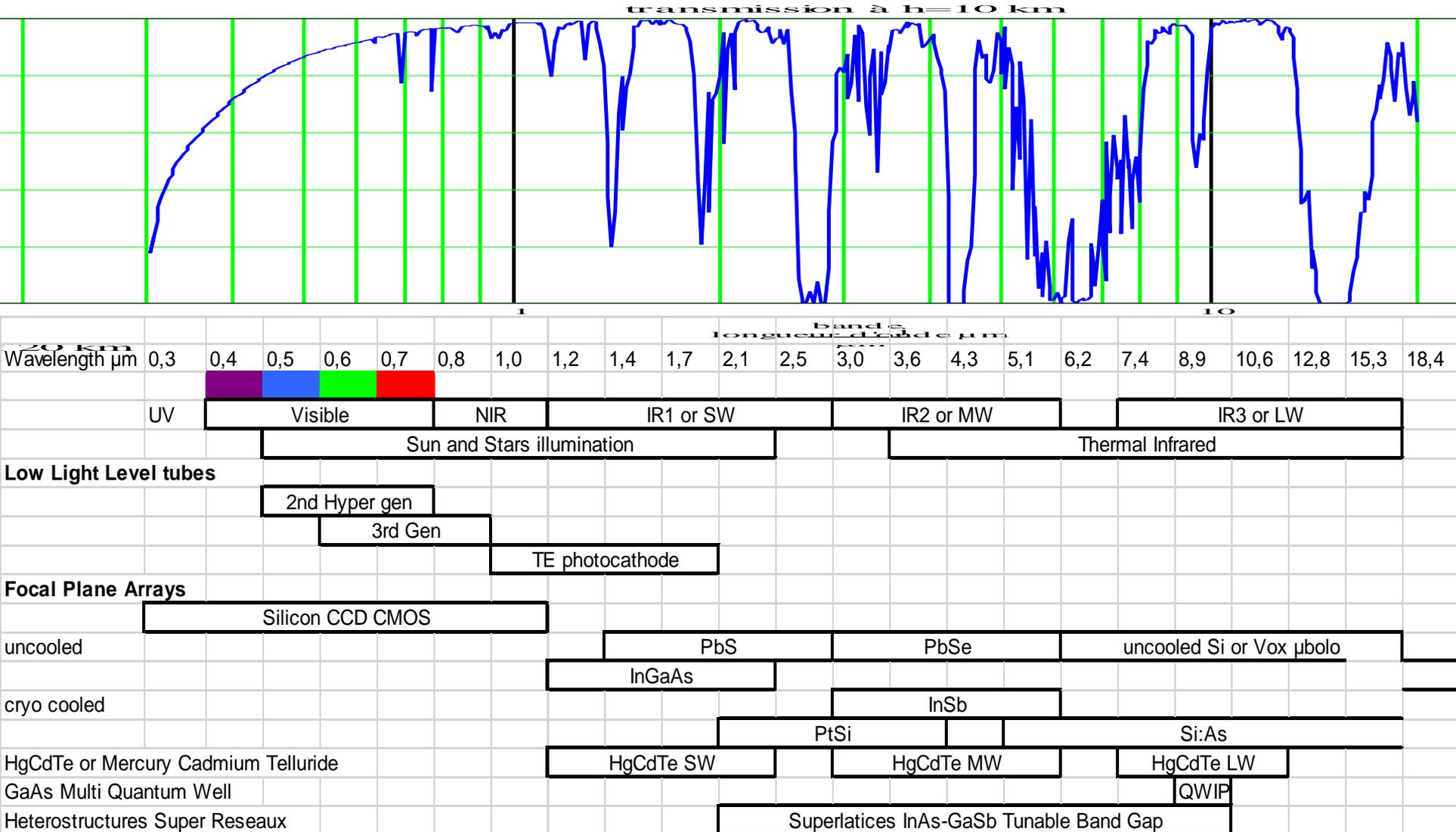
# Effet Photoconducteur

- Matériau homogène pur ou accueillant des impuretés: dopage n ou dopage p.
- Diagrammes énergétiques



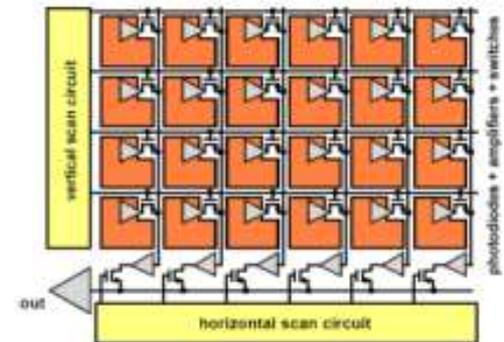
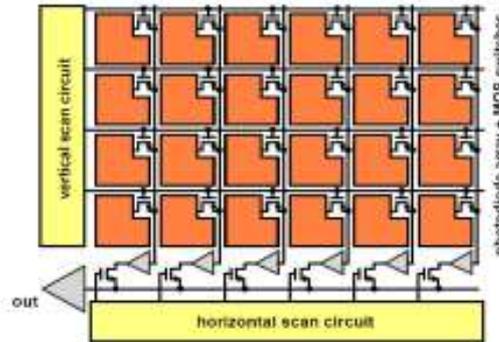
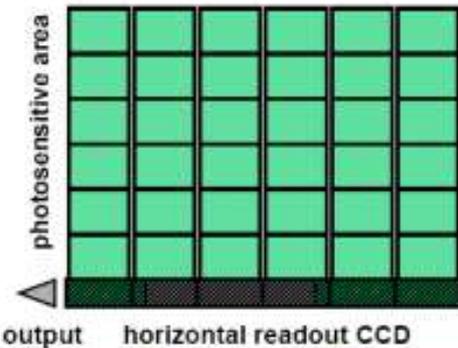
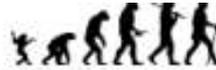
- Au repos le matériau est isolant, les porteurs dans la bande de conduction abaisse la résistivité.

# Les semiconducteurs pour la détection IR

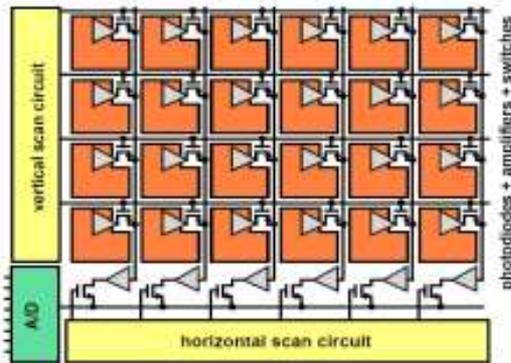


# Matrices CCD Interlignes et CMOS DRO

## Architecture evolution

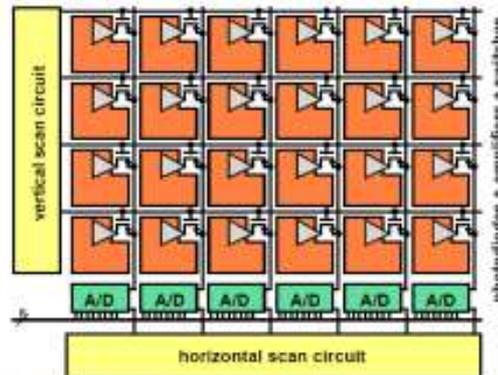


## Charge-Coupled-Device



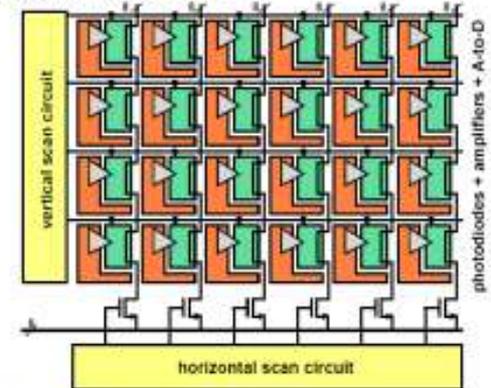
APS on-chip ADC

## Passive nixel



APS column ADC

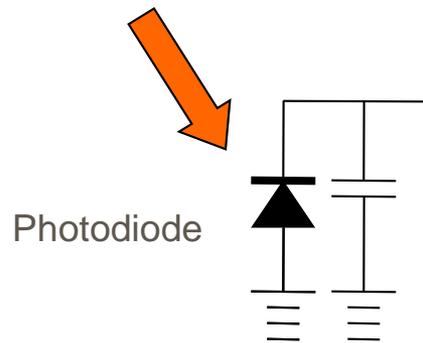
## Active nixel



APS In-pixel ADC

CCD or CMOS image sensors for consumer digital still photography ? Prof. Albert J.P. THEUWISSEN, 2001

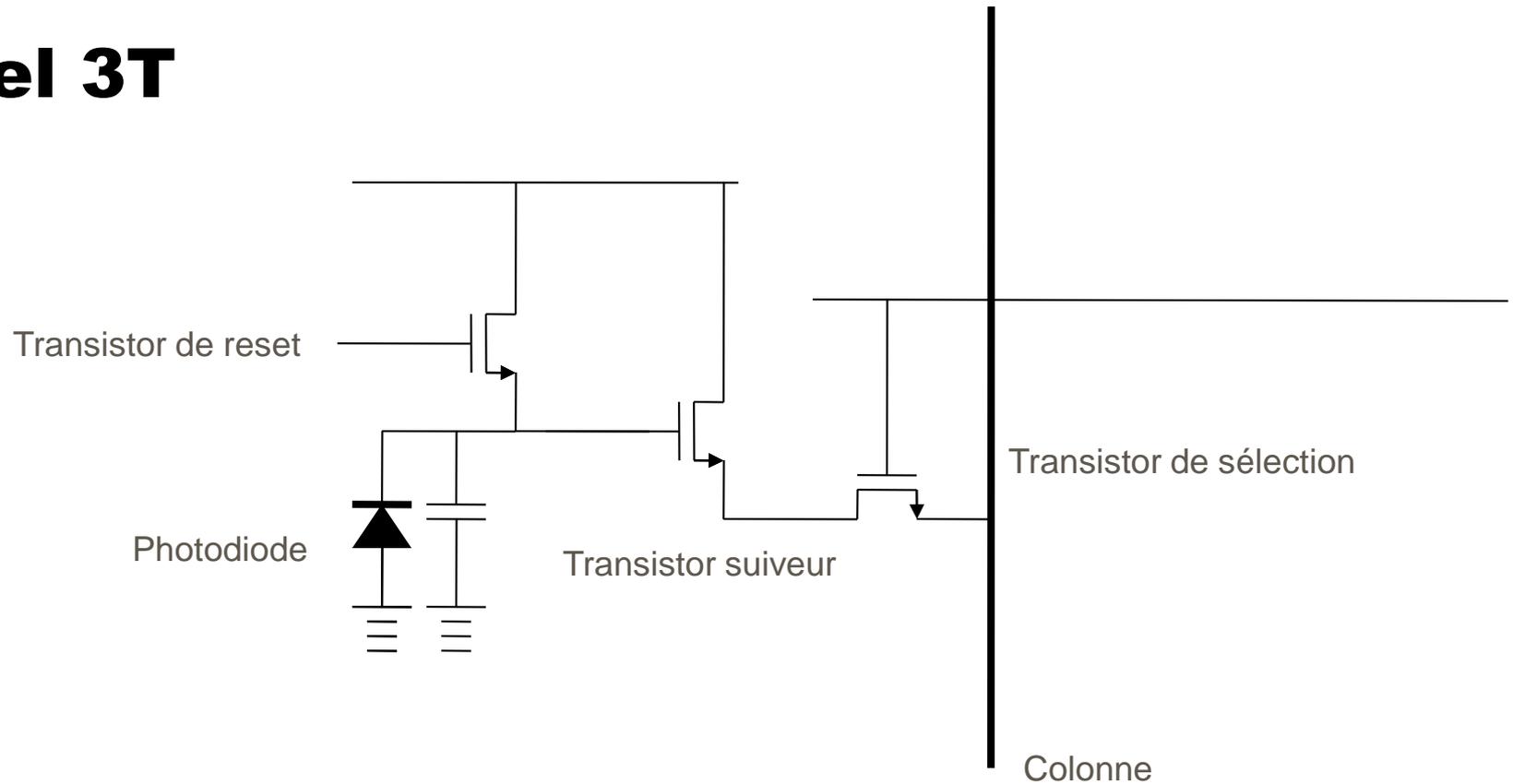
# PIN Photodiode



Le pixel est composé :

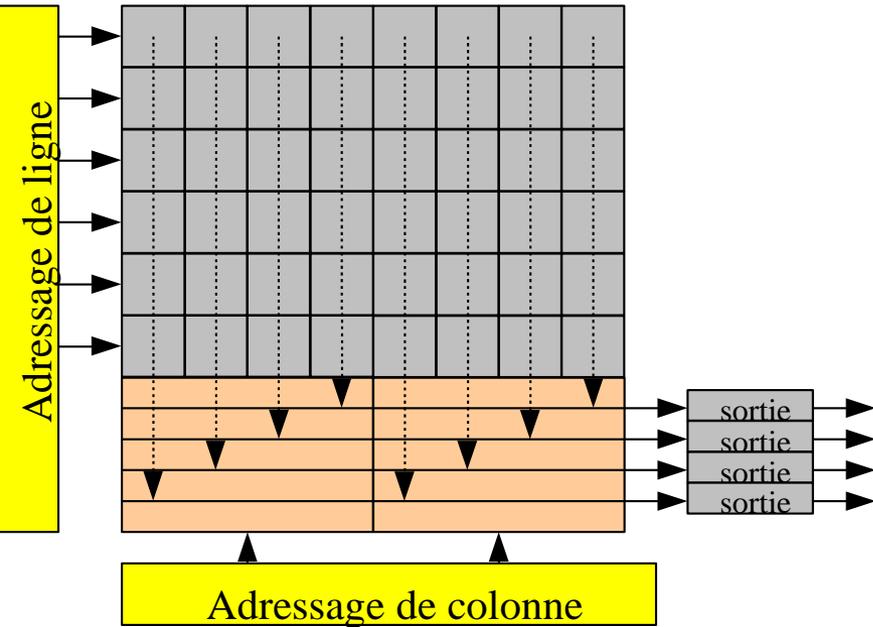
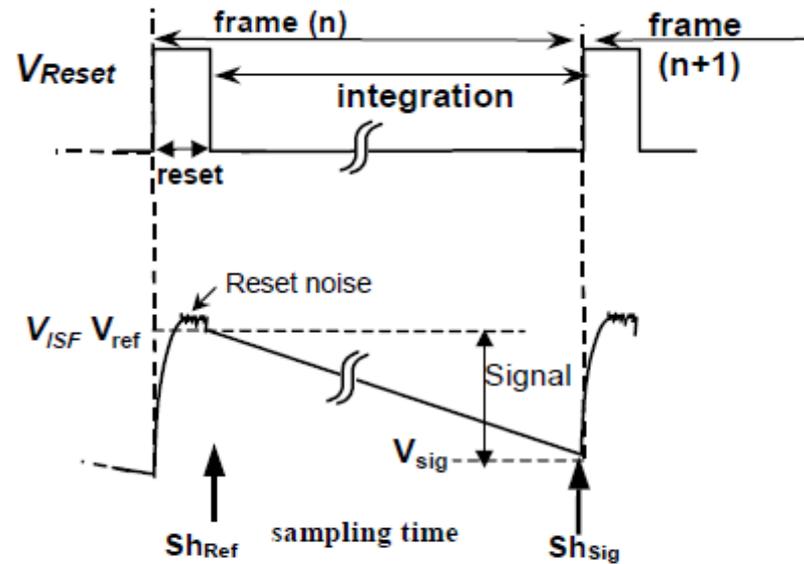
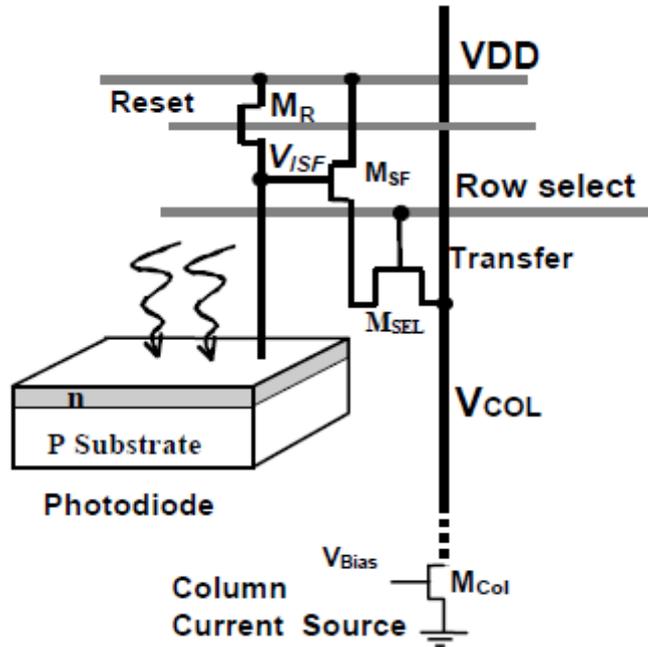
- d'une photodiode PIN (3 zones : dopage **P**, Intrinsèque et dopage **N**) qui constitue l'élément sensible
- couplée à une capacité
- Et à plusieurs transistors : La gated photodiode avec un ampli MOS ou pixel actif

# Pixel 3T



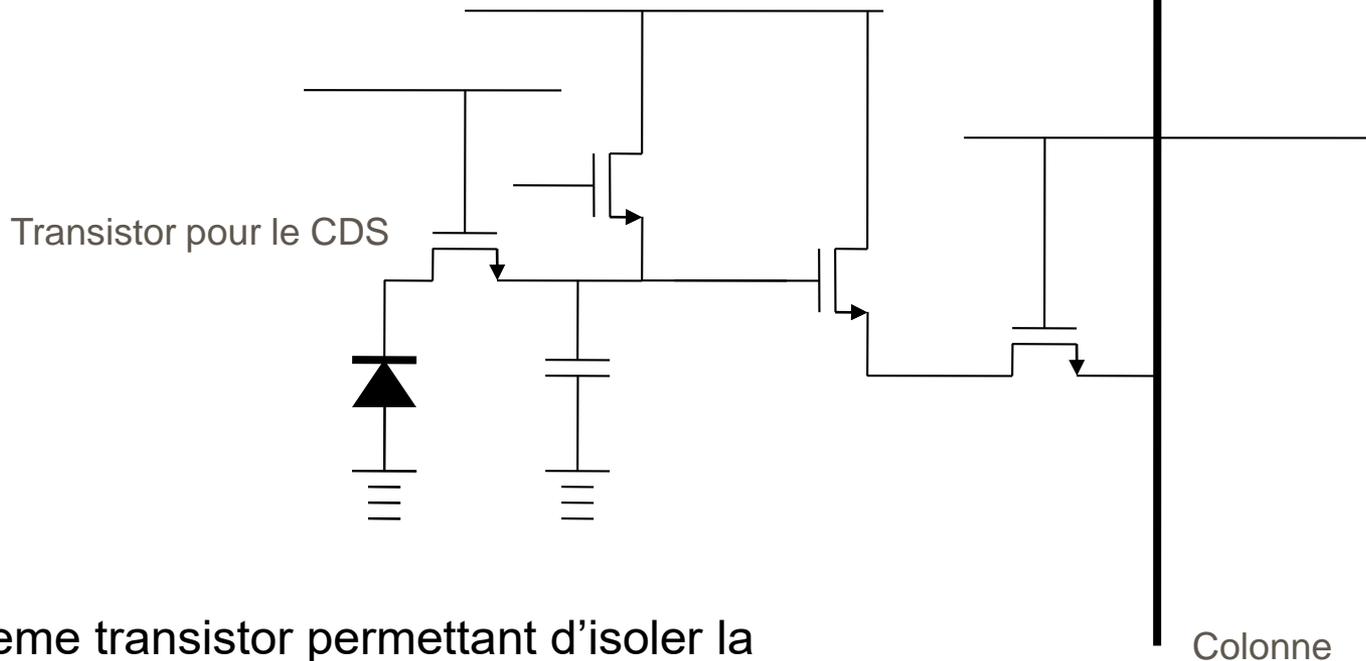
- Chaque pixel comprend :
  - La photodiode PIN et une capa de stockage des pré-charges
  - Un transistor de reset
  - Un transistor suiveur (SFD Source Follower per Detector) qui assure la conversion charge tension sur une haute impedance
  - Un transistor de sélection de la ligne du pixel à lire connecté à la colonne

# CMOS APS 3T



- Mode d'intégration lecture de type ERS (electronic rolling shutter) :
  - S/H dans le pixel
- Bruit important :
  - Bruit de reset en kTC
- Par le passé FF faible pour les petits pixels
  - Couches de métaux
  - $\mu$ -lentilles

# Pixel 4T : pinned photodiode



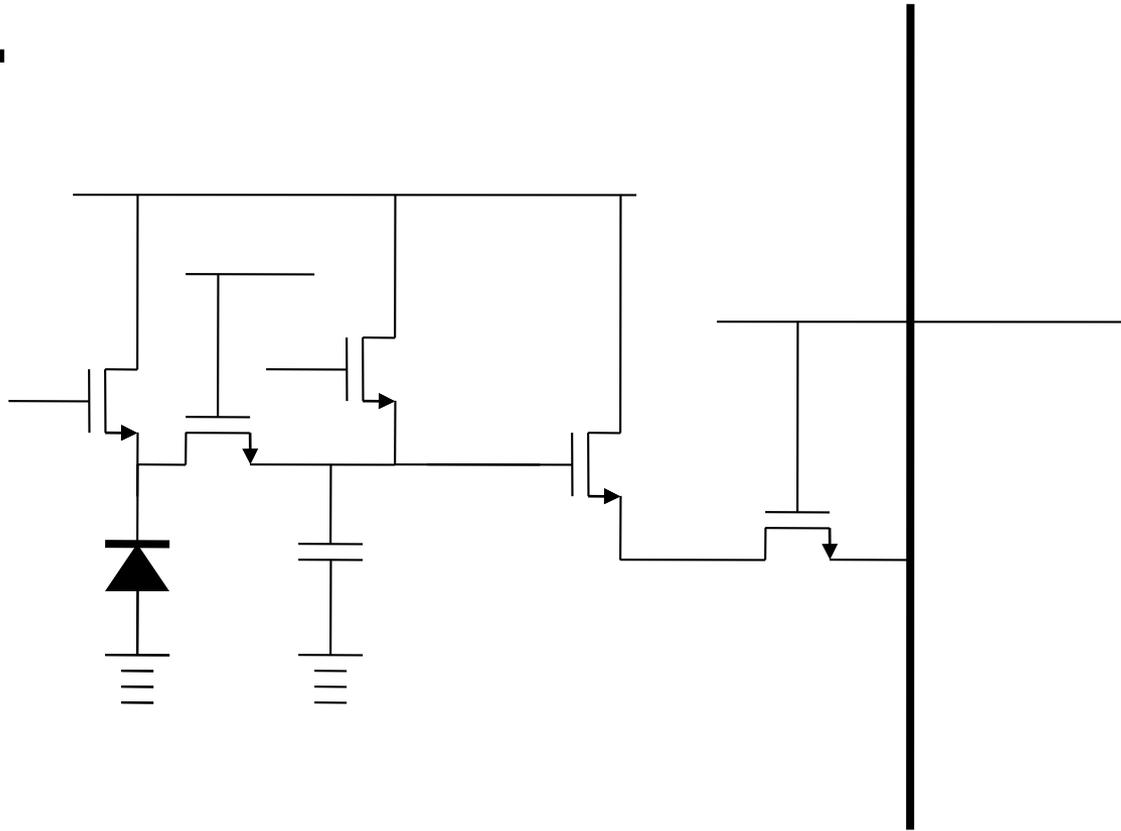
➤ 4eme transistor permettant d'isoler la photodiode et la capa de collection des charges permettant de faire un CDS et de neutraliser le bruit en kTC

- CMOS+diffusion spéciale
  - Pour le marché des mobiles
- Permet de faire du CDS :
  - Diminution forte du bruit kTC 1 e- ou moins
  - Réduction du FPN
- Accessible en standard
- Mode Rolling Shutter



# Pixel 5T

Transistor de  
Global Shutter



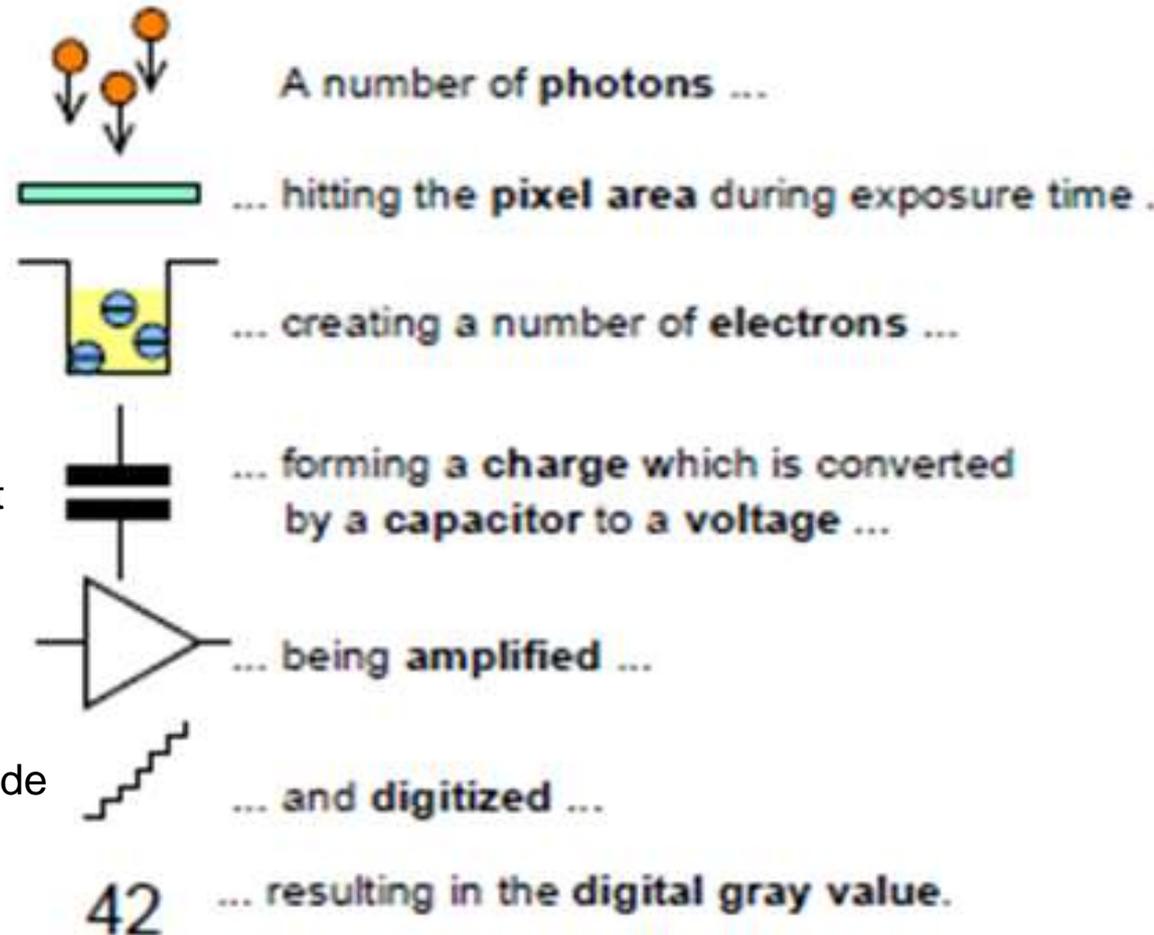
- Introduction d'un 5eme transistor pour réaliser la fonction Global Shutter
- pour synchroniser l'exposition sur tous les pixels
- Piloter le temps d'exposition
- Faire un antiéblouissement
- Intégration pendant la lecture

L'introduction de transistors supplémentaires (6T, 7T, 8T...), de capa supplémentaires pour augmenter la dynamique réduire le bruit à bas niveau. Des interconnexions entre pixels peut permettre de faire du traitement d'image dans le pixel ou entre pixels voisins.

# Le signal détecté : Nombre de photo-électrons – une amplitude digitale

Du photon au bit :

- Un éclairement  $E_3$  en photons/m<sup>2</sup>/s
- Une surface pixel  $p^2$
- pendant un temps d'exposition  $t_{exp}$
- Génère un nombre de charges en électrons ou en paires électrons trous
- Une capa ou un convertisseur courant tension génère une variation de tension  $\Delta V_D$
- Le signal est amplifié et filtré
- Il est convertis par un CAN en niveau de bits
- Il est affiché en niveau de gris



# Intégration sur le chip

- Sur le chip on peut intégrer :
  - La surface sensible (génération des photoélectrons)
  - L'accumulation du signal
  - La fonction obturation pour le pixel et pour toute la matrice
  - La conversion courant tension avec des lois linéaires ou non linéaires
  - Des éventuelles fonctions de détection ou de traitement local dans le pixel ou avec les pixels adjacents
  - les fonctions de pilotage du capteur et de lecture (avec des tensions plus faibles que sur un CCD) avec des fonctions : fenêtrages, accès aléatoire au pixel...
  - L'amplification du signal et la conversion analogique numérique : jusqu'à un ou deux CAN par colonne (et dans le futur dans le pixel)
  - Des fonctions de mémoire
  - Des fonctions de traitement d'image
  - La correction de non uniformité
- Vers la camera mono puce (camera on chip)...
- Vers l'intégration en z

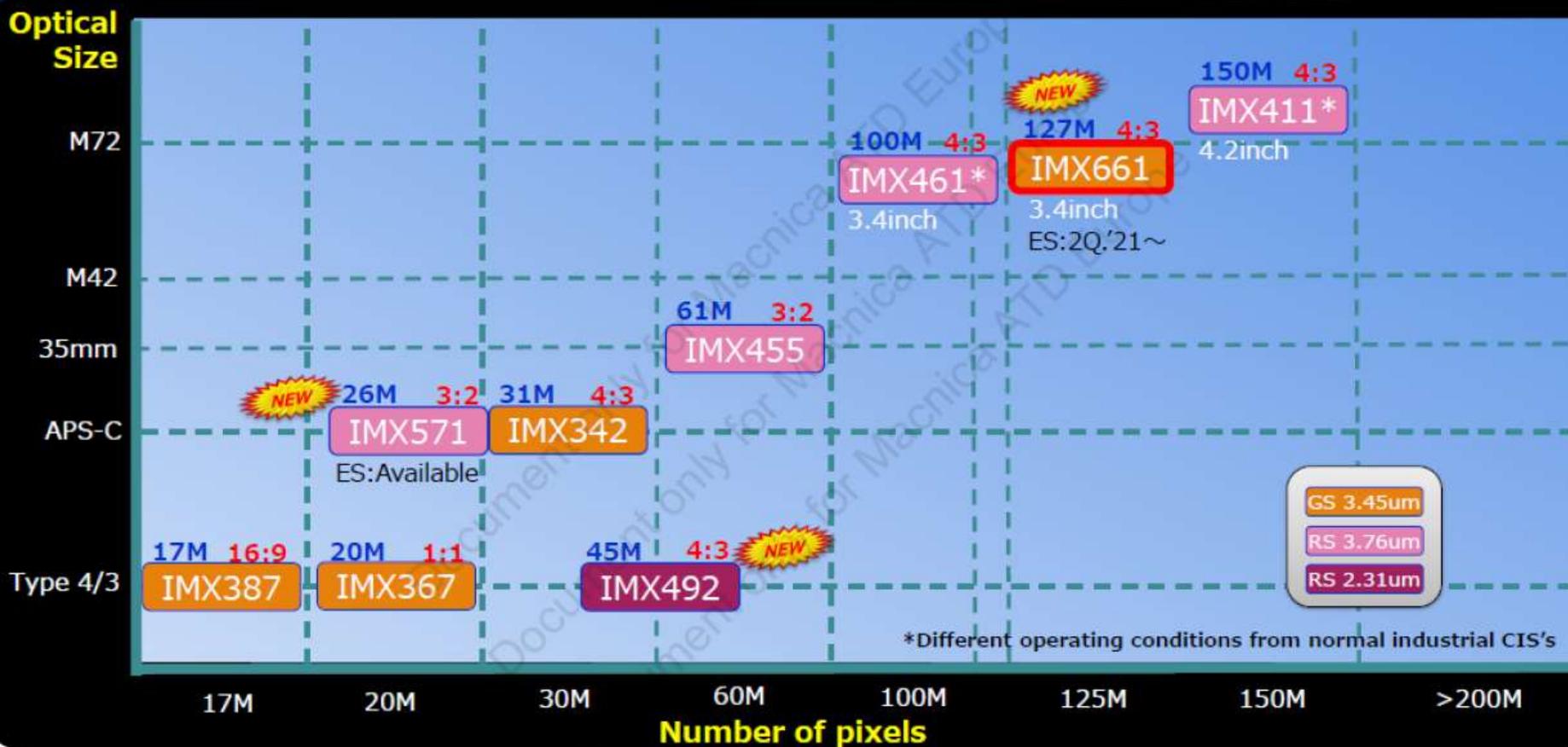
# Sony alpha 7SR V

l'Alpha 7RV offre une haute qualité d'image plein format de 61 MP et un enregistrement vidéo 8K, pour capturer des détails et des textures jamais vus auparavant. Il comprend également un système de stabilisation d'image intégré 8 stops, un écran multi-angle de 2 millions de points unique à 3 axes et un viseur électronique haute...



# Large format Sensor Line-Up (GS & RS)

SONY



# IMX571 (2021)

22x28, 26Mpixels  
6244x4168 pixels

6.84 fps, 16bit

12bit 4K video

ZWO2600MMPro

QHY268Mpro

# IMX455 (2020)

STARVIS Backill 3.76μm pitch

24x36, 61Mpixels  
9568x6380 pixels

RS 72MHz 2304Mbps

36dB PGA circuit 16bit A/D

3.9fps, 16bit

8K video 30fps

ZWO6200MMPro

QHY600Pro

The analog PGA image diagram is shown below:

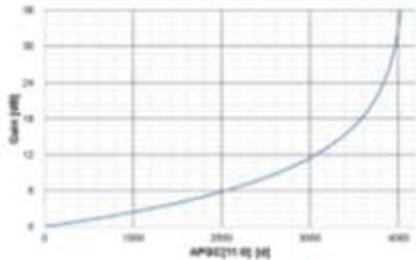
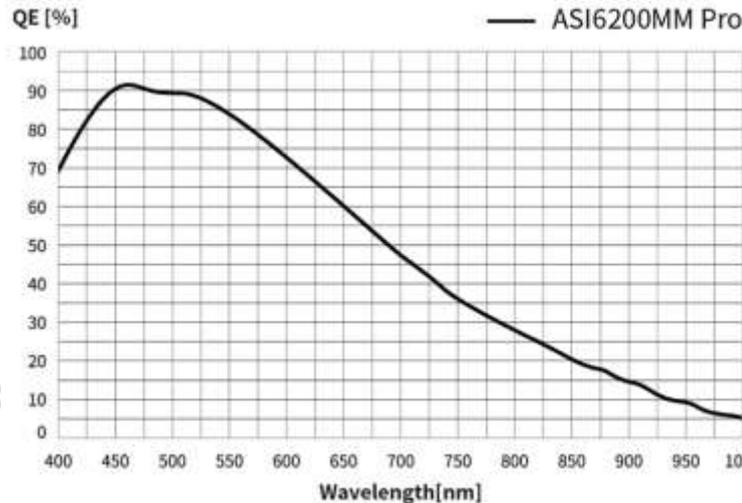


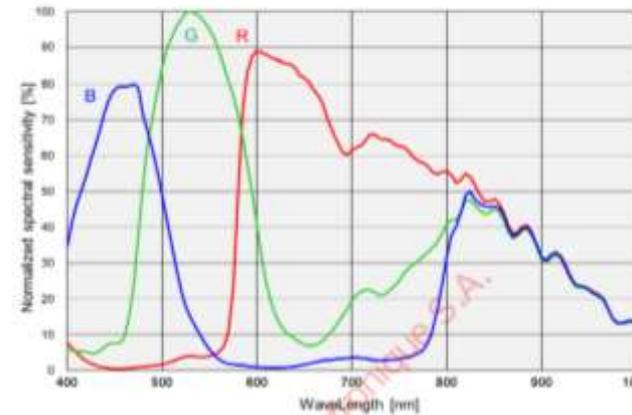
Fig. Analog Gain

Analog gain of 0 dB to 36 dB corresponding to each color can be set according to the setting value gain setting registers. The relational formula for the register setting value and the gain is shown below.

$$\text{Gain [dB]} = -20 \log \left( 1 - \frac{\text{APGC\_X [111: 8]}}{4095} \right) \quad X = N, S$$

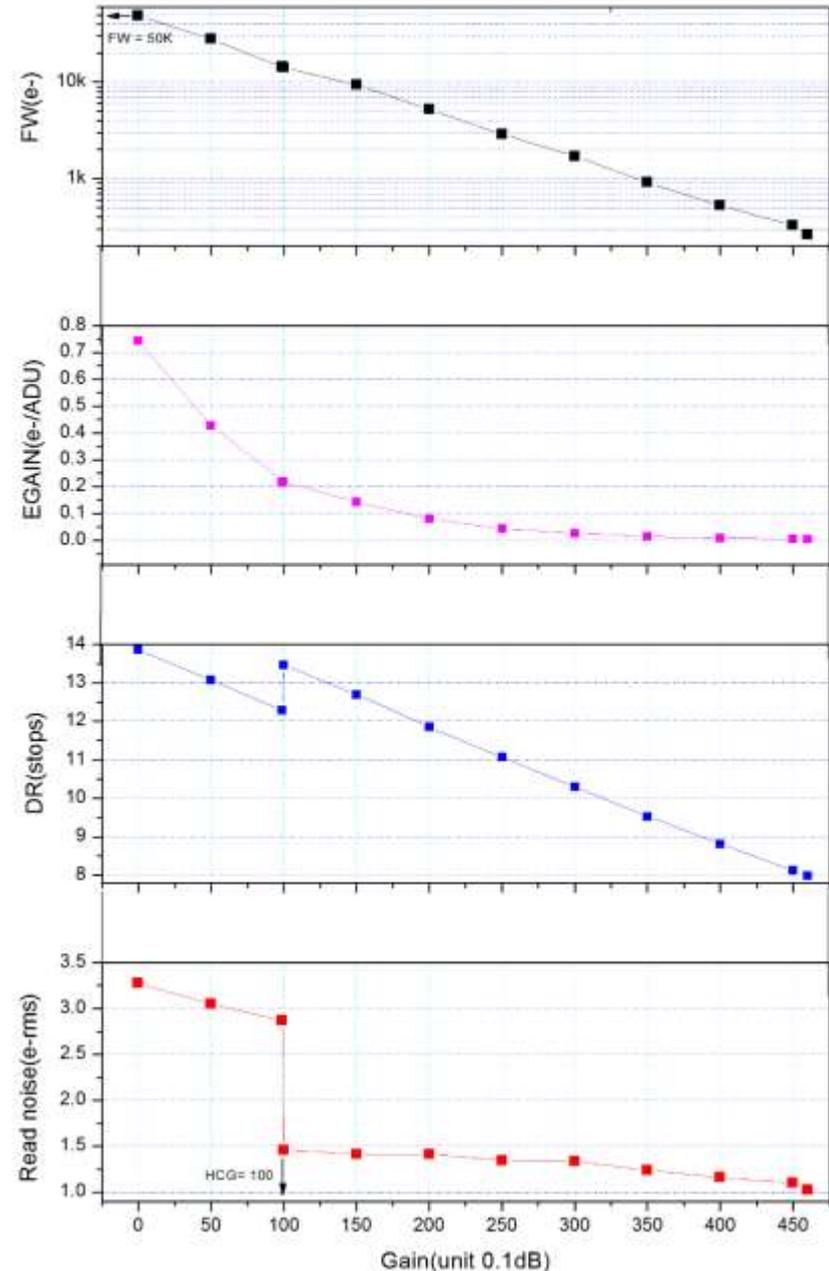


(Include AR coating characteristics but excludes light source characteristics.)



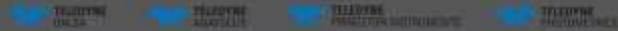
## Le gain des cameras CMOS Sony

- en centibel !?! C'est pas clair
- Gain de X équivaut à un gain de  $10^{X/200}$
- Un gain de 0                           vaut x1
- Un gain de 100                       vaut x 3,16
- Un gain de 200                       vaut x 10
- Un gain de 300                       vaut x 31,6
- Un gain de 400                       vaut x 100

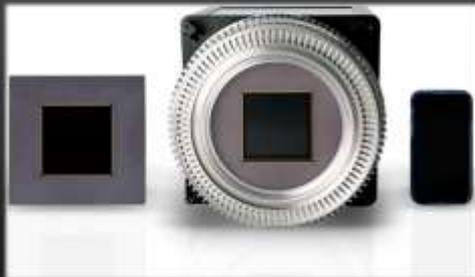


# COSMOS large format 64Mpixel CMOS camera for ground-based astronomy

Sony Cheriyan, Jose Angel Segovia de la Torre, Jose Alberto Villegas Calvo, Jon Kurvits, Jason Nottingham, Jason McClure



## Introduction



- Massive 8120 x 8120 format – 10um pixel
- Back illuminated >90% QE
- 14, 16, and 18 bit HDR readout
- Rolling and Global Shutter
- Sensor cooling < -25°C
- < 0.05 e-/p/s dark current
- < 1 e- rms read noise with CM5
- > 80ke- FWC in low gain
- Up to 22 fps
- Light Weighted Design ~18 kg



- Joint effort comprising > 40 contributors across 4 countries
- Teledyne AnaFocus – Sensor design & development
- Teledyne Princeton Instruments and Photometrics – Camera design and development
- Teledyne Dalsa – CXP12 Frame Grabber

## COSMOS 64Mpixel Sensor

COSMOS sensor consists of 8120x8120 10um low noise pixel array at 22fps

- Stitched sensor: 5x5 tiles of 1620x1620 pixels
  - Fabricating 3k and 6k variants
- Back thinned: 10um epi thickness
- 128 OB columns on both sides
  - line noise and offset correction
- 47 LVDS high speed data ports deliver up to 37.6Gbps.
- Low power mode: 15W -> 4W
  - Automatically cuts power to many active circuits during expose state
  - Eliminates sensor glow and allows deeper cooling for long exposures
- Rolling shutter and Global shutter with CDS

200 mm wafer – 1 sensor

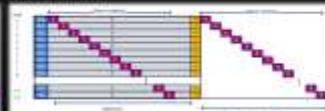
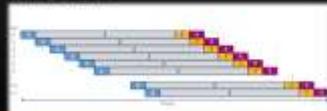


Tile arrangement

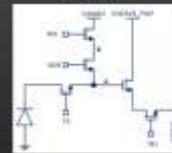


Rolling shutter

Global shutter



### 5T Pixel



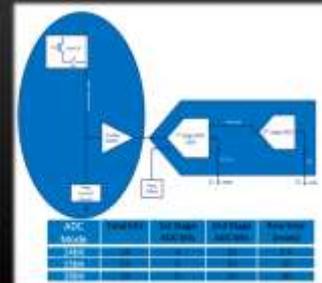
### COSMOS sensor pixel architecture

- 5T architecture with dual conversion gain, low noise source follower
- High conversion gain -> HDR is low charge is transferred to floating diffusion (FD) allowing low noise data
- Low conversion gain -> HDR transistor is active, capacitance in A and B are connected allowing > 80ke- FWC

### COSMOS sensor ADC architecture

- Two stages ADC architecture:
  - 1<sup>st</sup> stage Sigma-Delta converter, 2<sup>nd</sup> single-slope ADC.
- Programmable 14 to 16 bit resolution
- The two-stages ADC oversamples the pool directly reducing source follower noise with equivalent sample rate of 11MSamples/s.
- The ADC noise contribution varies from 35.5uVrms at 16bits resolution to 84uVrms at 14 bits resolution.

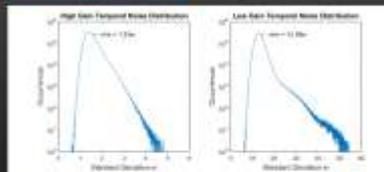
### ADC Architecture



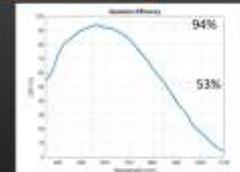
## Electro-Optical Performance

Rolling shutter 14b INVT CDS (low gain and high gain)

### Temporal Noise Distribution

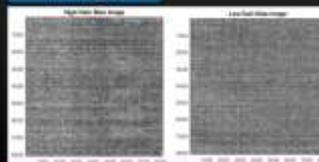


### Quantum efficiency



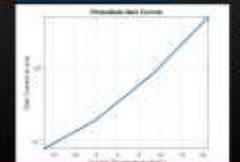
- 94% @ 550 nm
- 53% @ 850 nm

### Dark Images



- 3D fixed pattern noise corrected
- 1 us acquisition

### Dark Current



- Low power mode not enabled
- Measured in test chamber – not COSMOS vacuum chamber
- Doubling coeff. ~ 6.4 deg
- 0.08 e-/p/s @ -17.3 degC

## Camera System

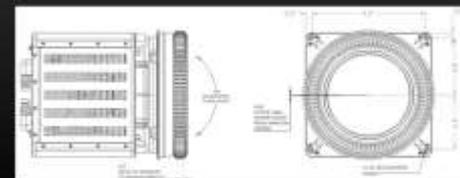
Camera Housing



18 Kg Mass Goal

- Carbon Fiber panels
- Light weighted Aluminum internal load bearing structure.

Exterior Dimensions



## Photon-number-resolving megapixel image sensor at room temperature without avalanche gain

JIAJU MA,<sup>\*</sup> SALEH MASOODIAN, DAKOTA A. STARKEY, AND ERIC R. FOSSUM

Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire 03784, USA

<sup>\*</sup>Corresponding author: jiaju.ma.th@dartmouth.edu

Received 7 July 2017; revised 22 October 2017; accepted 23 October 2017 (Doc. ID 301901); published 29 November 2017

Jot : la plus petite chose en grec

De 0,17 à 0,21 e rms

Le pixel intègre des photons et délivre des bits

Introducing the new qCMOS<sup>®</sup>

# ORCA-Quest<sup>®</sup>

Photon Number Resolving



“Light is possibility itself.”

— TERUO HIRUMA  
PHOTONICS VISIONARY AND FORMER  
PRESIDENT OF HAMAMATSU PHOTONICS

LOW READOUT NOISE

**0.27** ELECTRONS RMS

ULTRA-QUIET SCAN

HIGH QE

**90%** @475 nm

BACK-ILLUMINATED qCMOS

HIGH RESOLUTION

**4096 × 2304**

9.4 MEGAPIXELS

HIGH SPEED

**120** FRAMES/S

@4096 × 2304 PIXELS (16 BIT)

# histogram

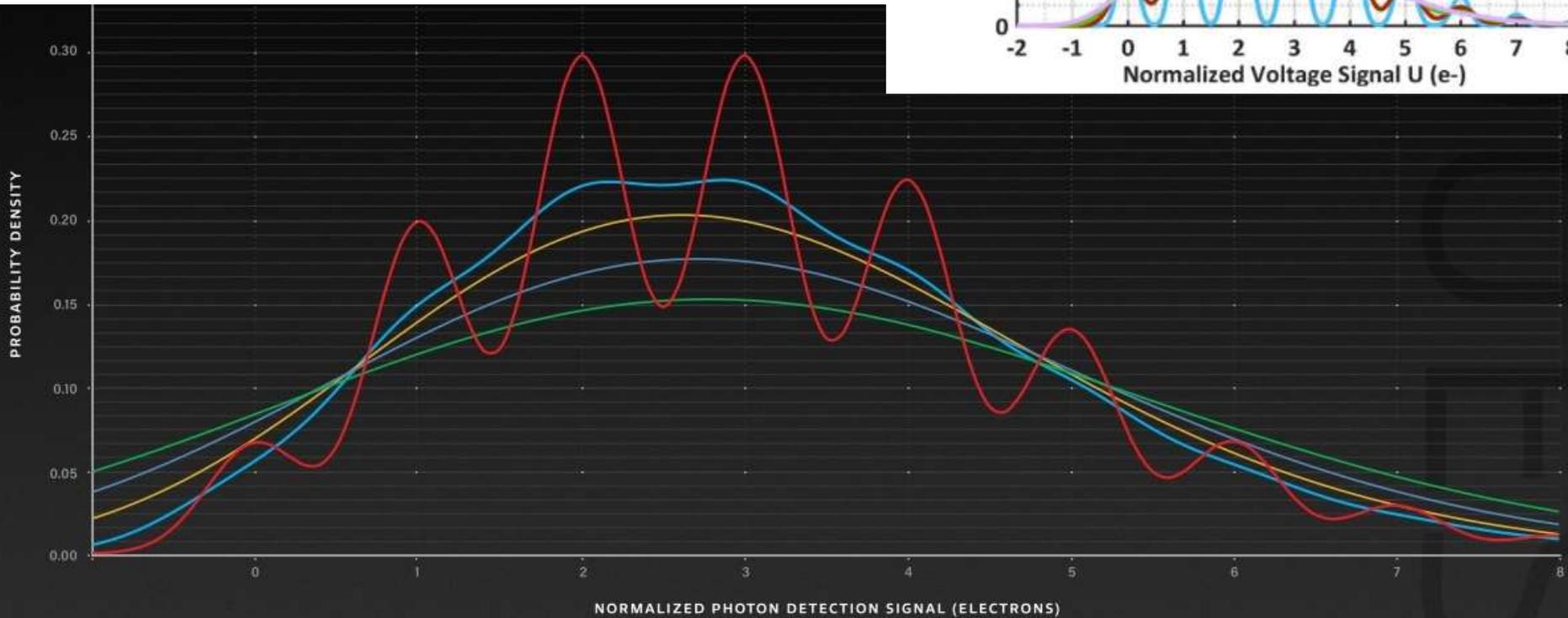
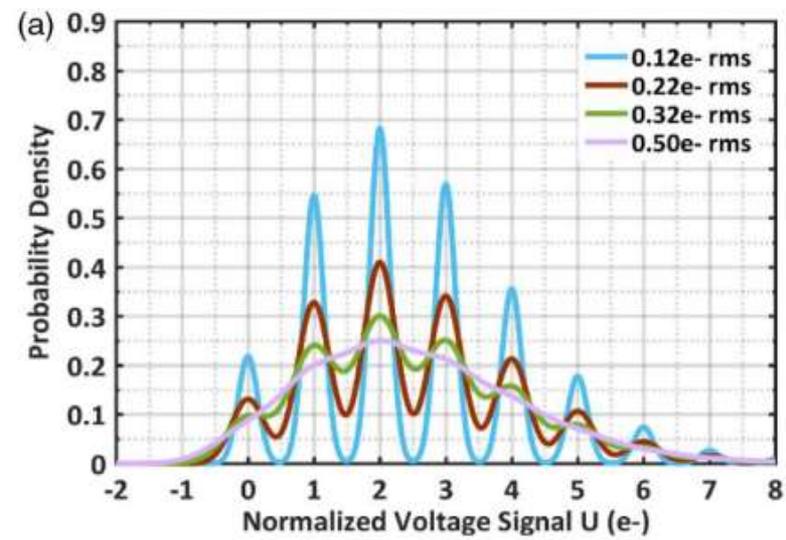


Fig. 1-1

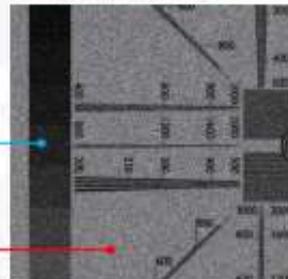
## The effect of camera noise on photon number resolving

All five curves plot the probability distribution for a theoretical signal with a mean of three photoelectrons. The x-axis is the normalized signal in photoelectrons and the y-axis is the probability for a discrete photon number. In red is the calculated distribution for the ORCA-Quest with 0.27 e- rms. All other curves are calculated with increasing read noise: 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 e- rms. As read noise increases, the distribution becomes blurred and there is no distinction between discrete photoelectron numbers. Photon number resolving is impossible even at 0.5 e- rms.

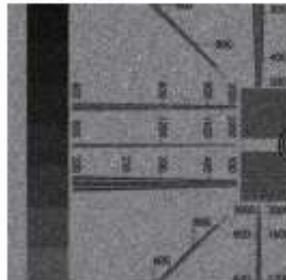
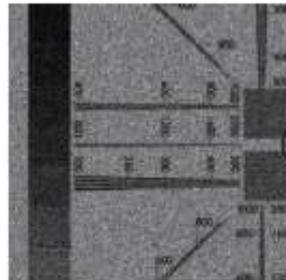
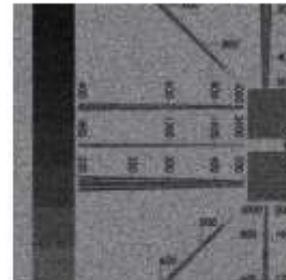
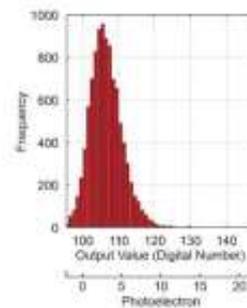
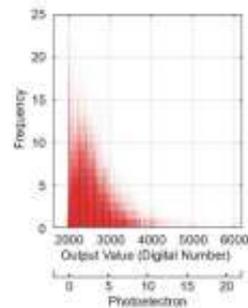
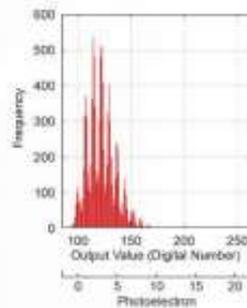
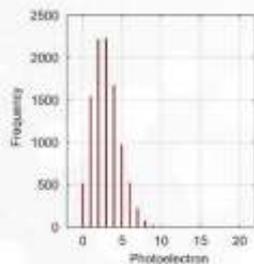
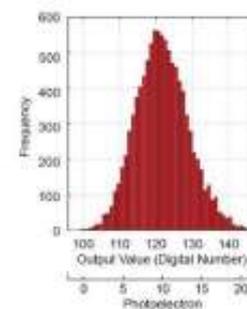
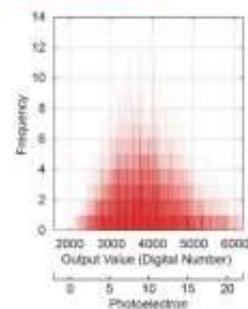
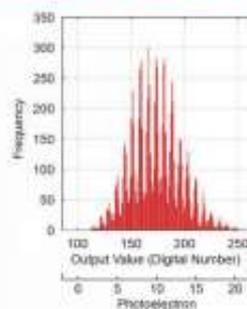
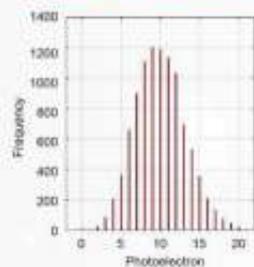
- 0.27 electrons
- 0.5 electrons
- 1.0 electrons
- 1.5 electrons
- 2.0 electrons

**ORCA<sup>®</sup>-Quest**

Photon Number Resolving

Approx. 3  
electrons/pixelApprox. 10  
electrons/pixel**ORCA<sup>®</sup>-Quest**

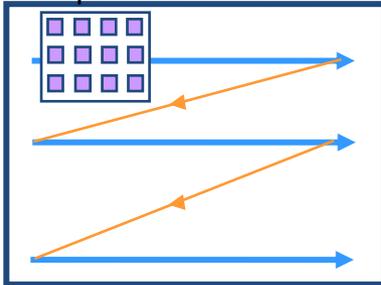
Ultra-Quiet Scan

**EM-CCD camera****Gen II sCMOS camera****Average number of photoelectrons generated per pixel: 3 electrons****Average number of photoelectrons generated per pixel: 10 electrons**

# Les générations de détecteurs et cameras IR

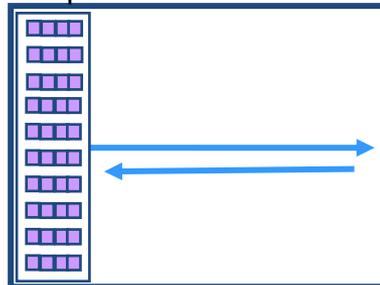
## 1ere Gen

Depuis les année 1970



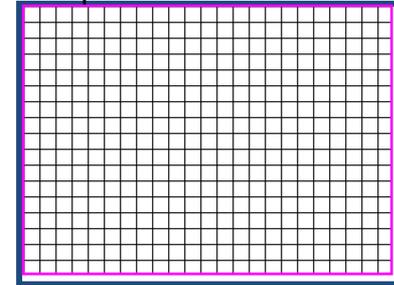
## 2eme Gen

Depuis les années 1990



## 3eme Gen

Depuis les années 2000

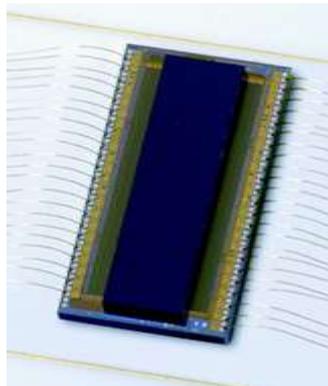


## Taille des plans focaux en nombre de pixels

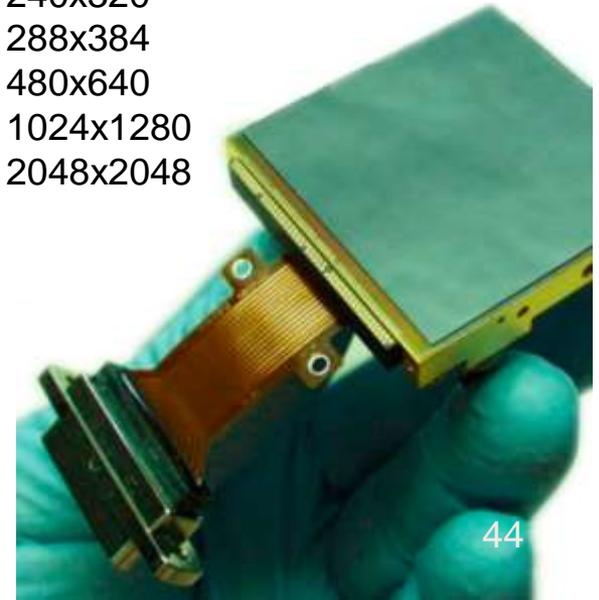
- 1
- 2
- 4Q
- 12x4 (SMT)



- 288x4
- 576x6



- 240x320
- 288x384
- 480x640
- 1024x1280
- 2048x2048



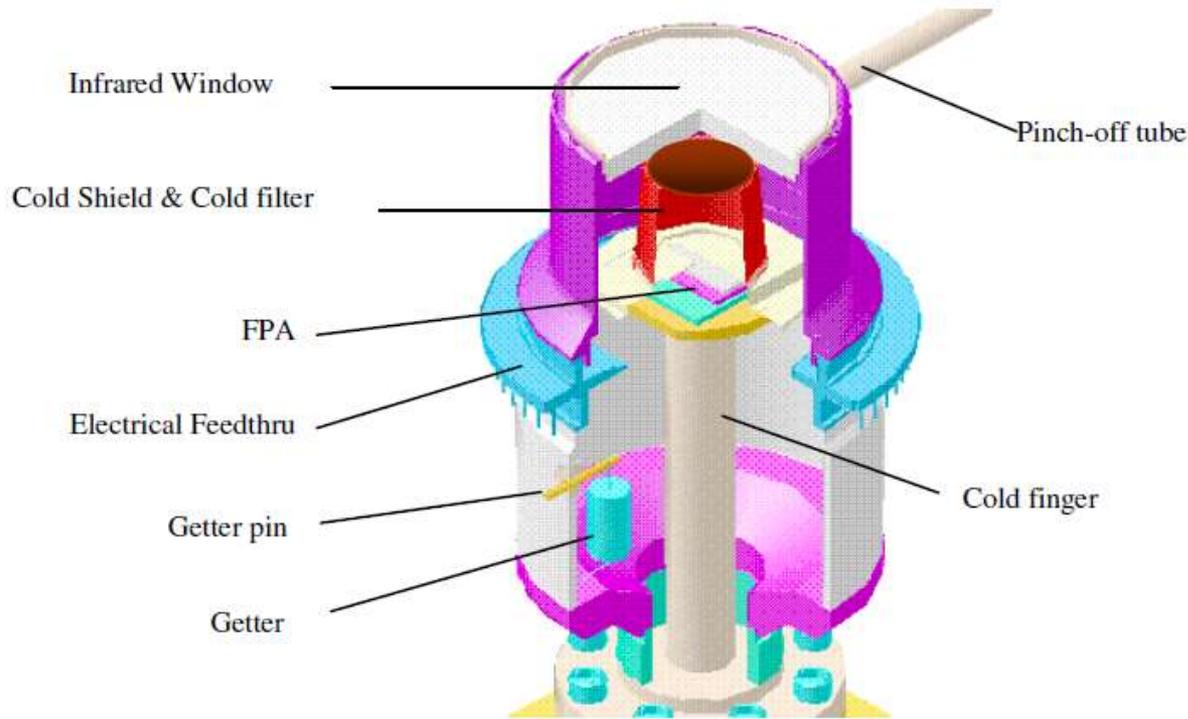
# Refroidissement des détecteurs IR

Il est impératif de refroidir les détecteurs IR du fait de son faible gap et afin de :

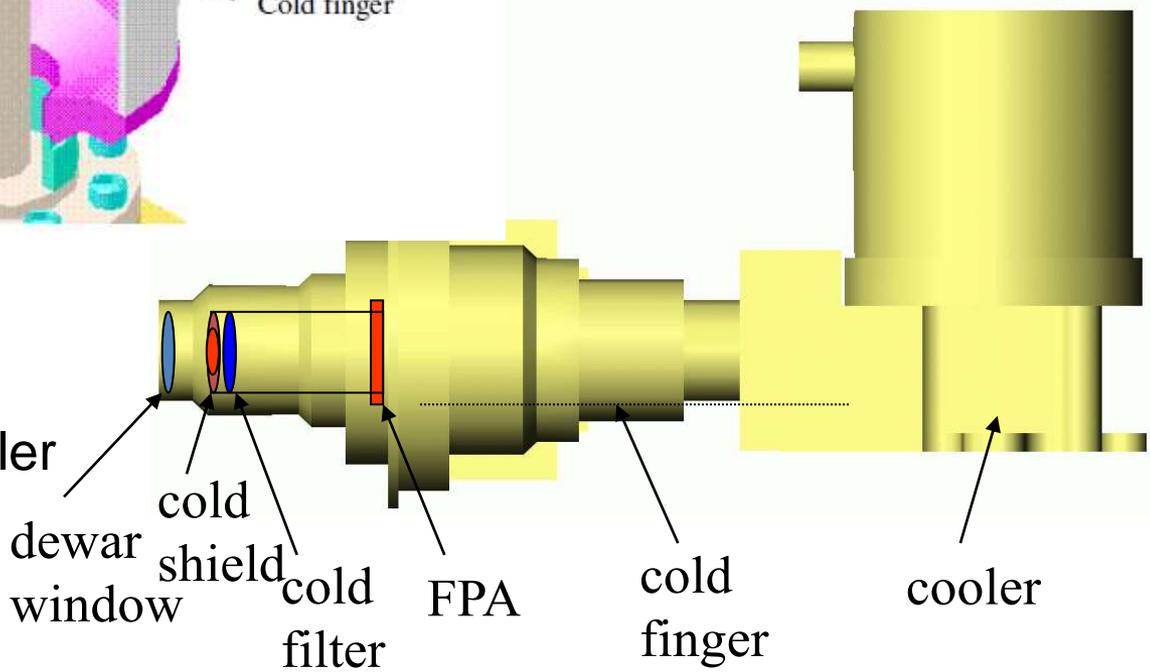
- « éteindre » le rayonnement propre de l'élément sensible. Sinon le composant est saturé de porteurs libres du fait de la statistique liée à  $kT$  face au gap du semi-conducteur.
- Réduire l'influence du fond ambiant vu par le détecteur grâce au diaphragme froid et au filtre froid
- Réduire le courant d'obscurité qui est activé thermiquement et donc son bruit de grenaille associé
- Réduire le bruit d'agitation thermique

On place le détecteur IR dans un cryostat pour l'isoler thermiquement, augmenter l'efficacité du refroidisseur, pour réduire son bruit et diminuer le fond parasite.

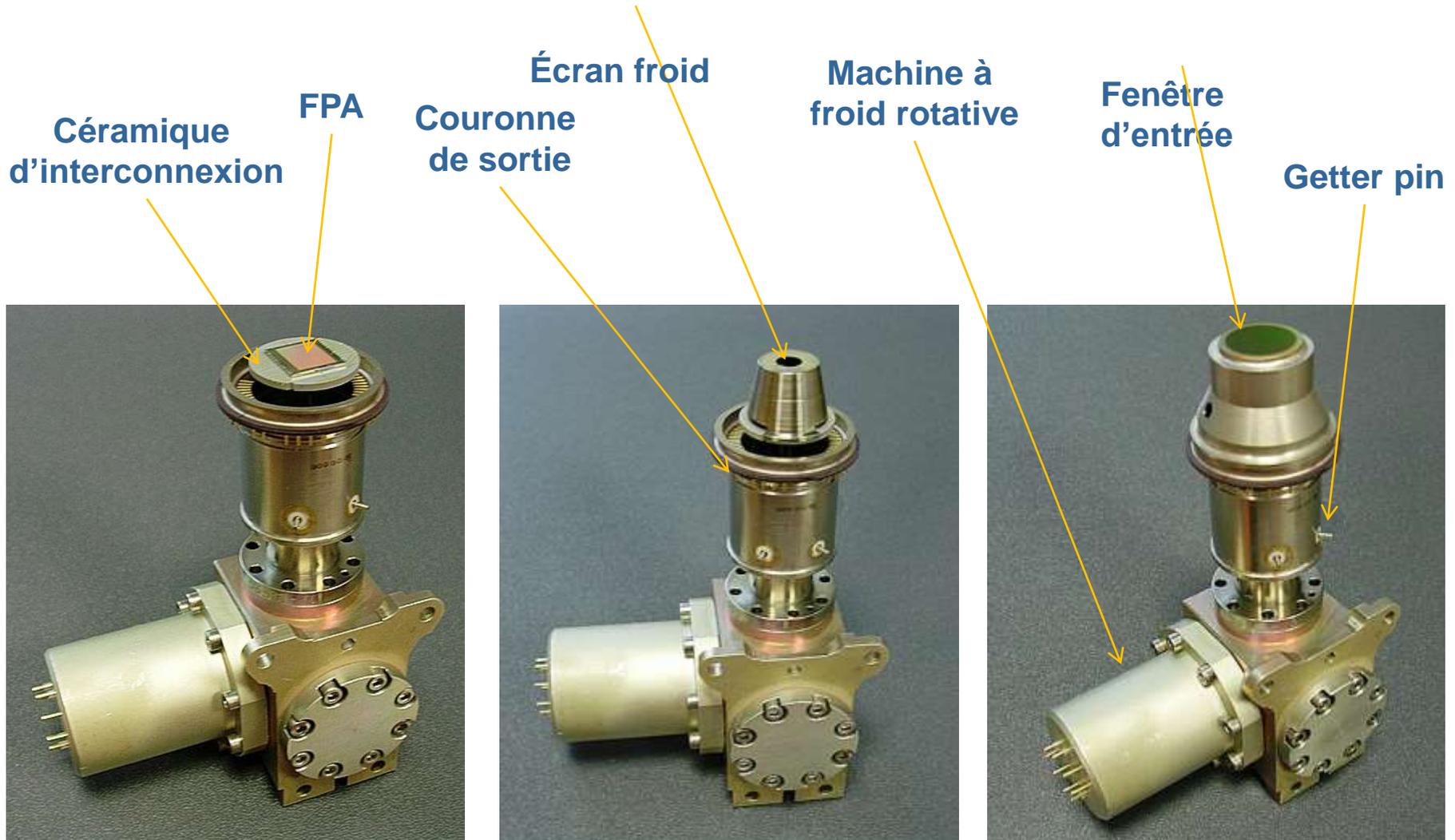
# Description d'un cryostat et de l'IDCA (Integrated Detector and Cooler Assembly)



## Ensemble IDCA (Integrated Detector and Cooler Assembly)



# Description d'un cryostat



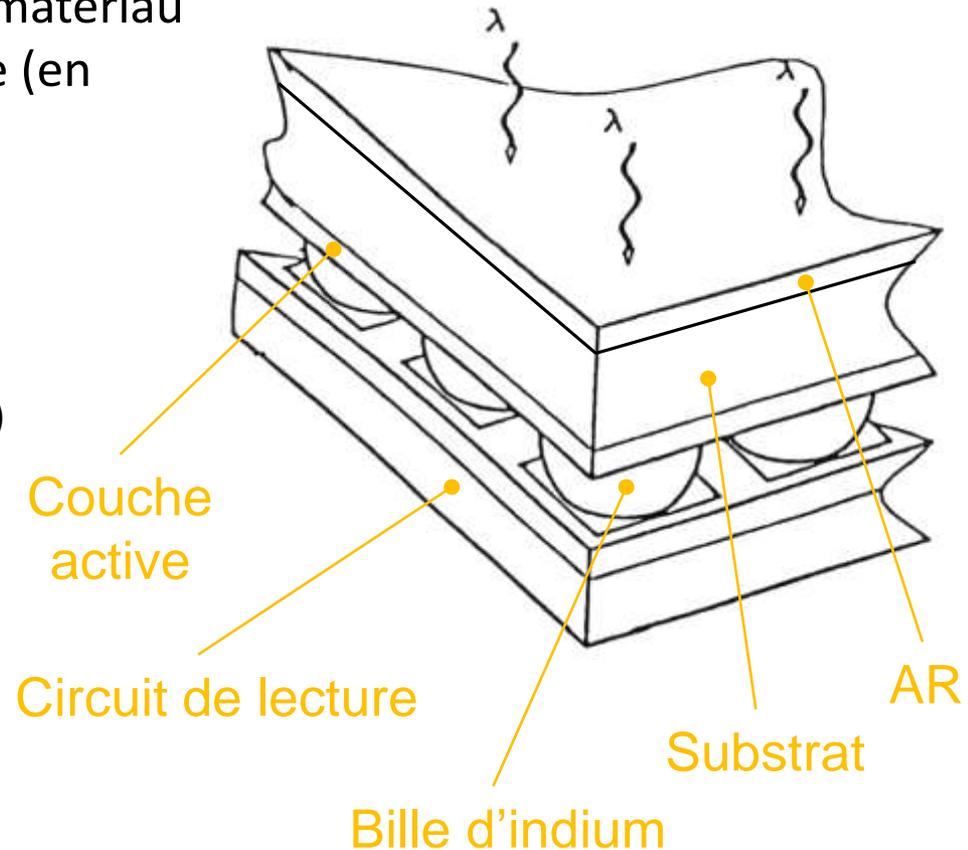
# Structure d'un plan focal matriciel hybride

Association d'un circuit de détection (matériau transducteur) et d'un circuit de lecture (en silicium)

Hybridation par l'intermédiaire de billes d'indium

- Forte densité (pitch jusqu'à  $10\mu\text{m}$ )
- Assure la connexion électrique, mécanique et thermique

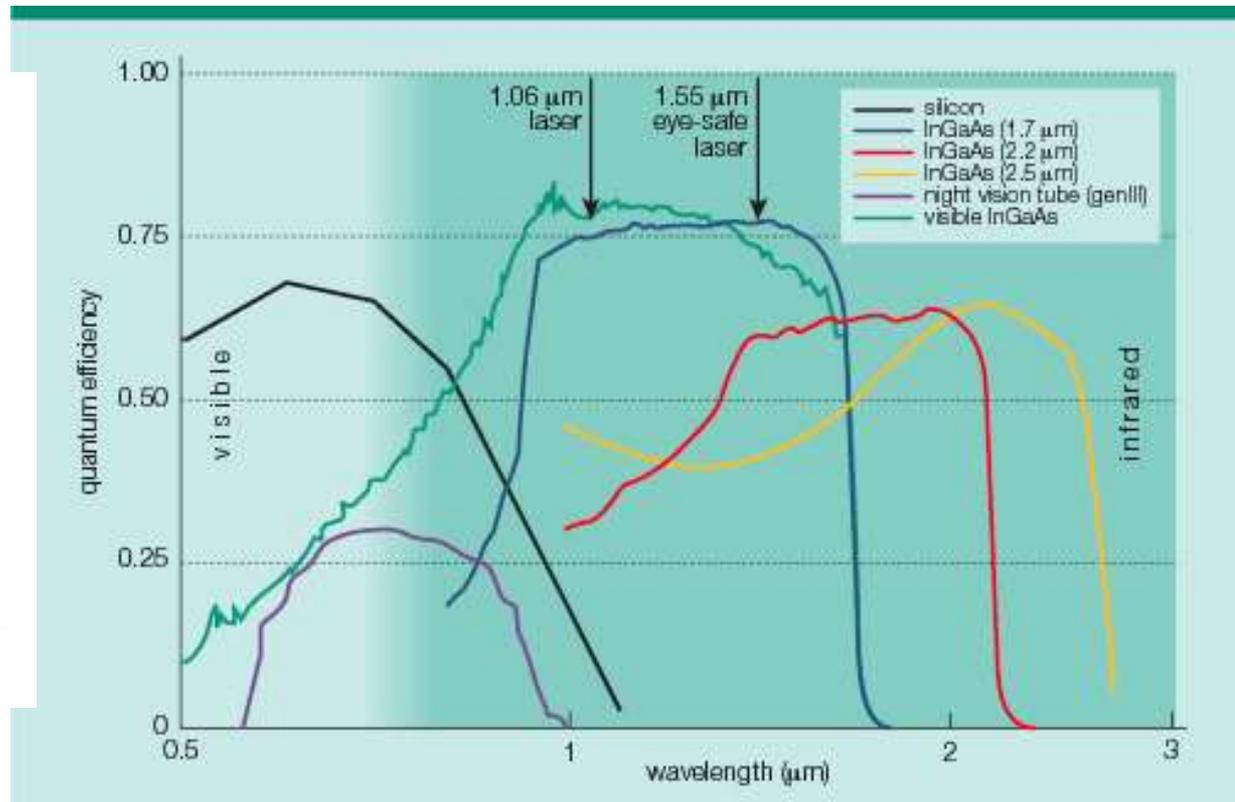
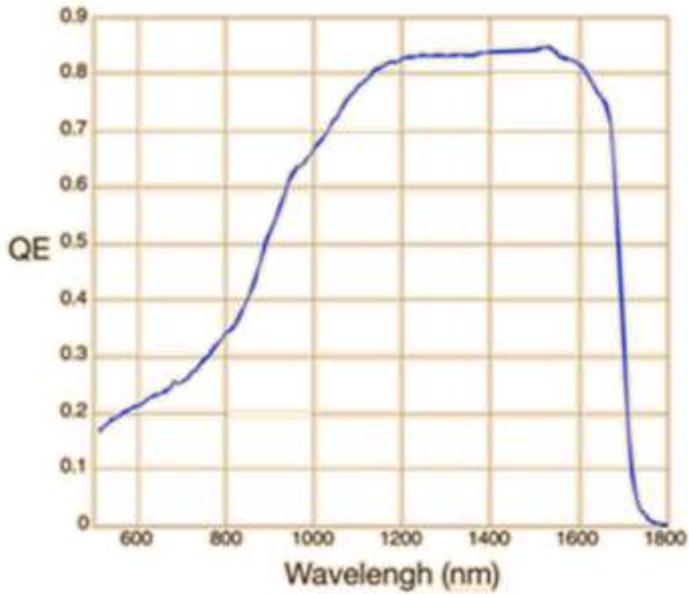
Absorption en face arrière



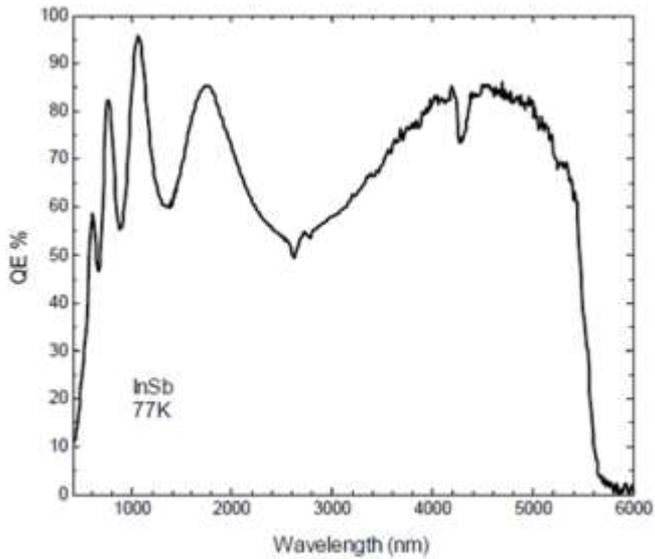
InGaAs



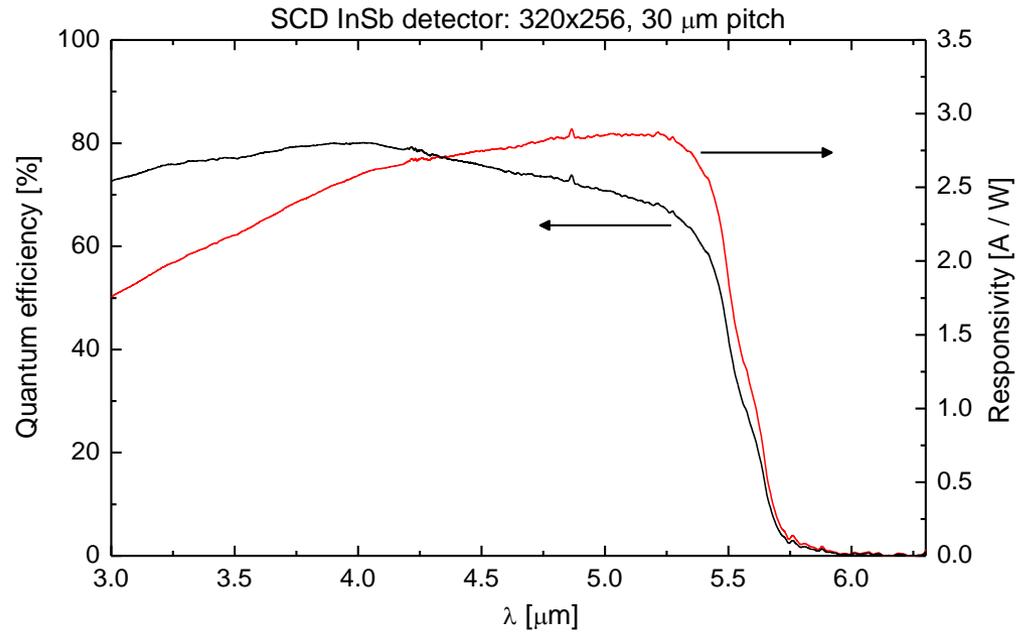
Camera InGaAs Raptor photonics



# InSb

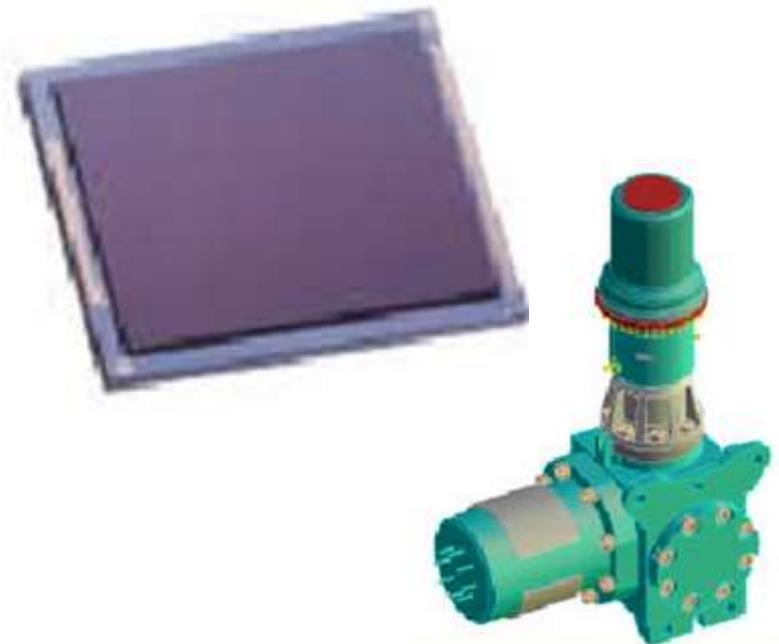
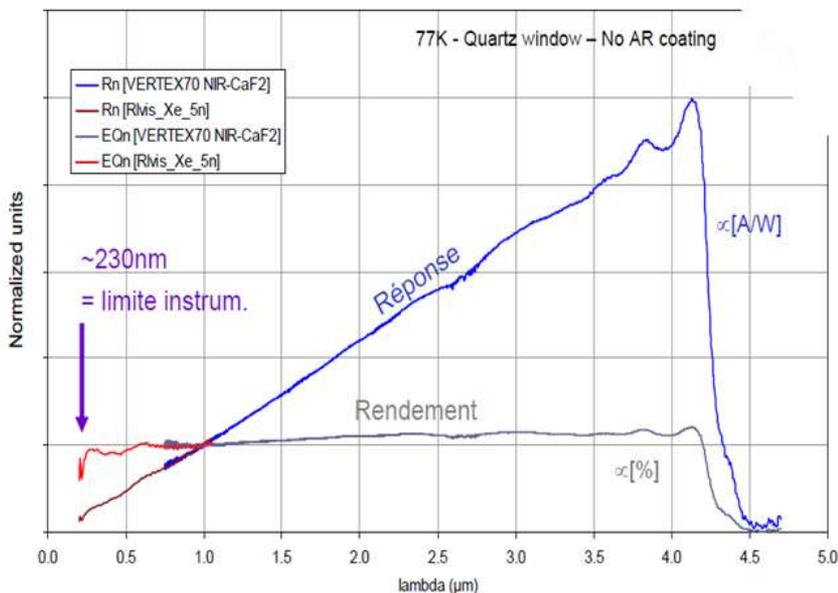


Spectral photo-response (including A.R. coating)



# Détecteurs HgCdTe SWIR, MWIR ou LWIR

- Gap variable suivant le dosage Hg-Cd
- Utilisation en bandes 1 à 3, 3 à 5 et 8 à 12  $\mu\text{m}$
- Mosaïques : 320\*240, 288\*384 ; 640\*512 ; 1280\*1024 (3-5) ; 2048\*2048
- Barrettes : 288\*4, 1024\*4, 480\*4, 960\*4
- Performances excellentes à 77K, encore assez bonnes à 200K
- Technologie bien maîtrisée (investissements importants) ; mais uniformité de réponse moyenne.



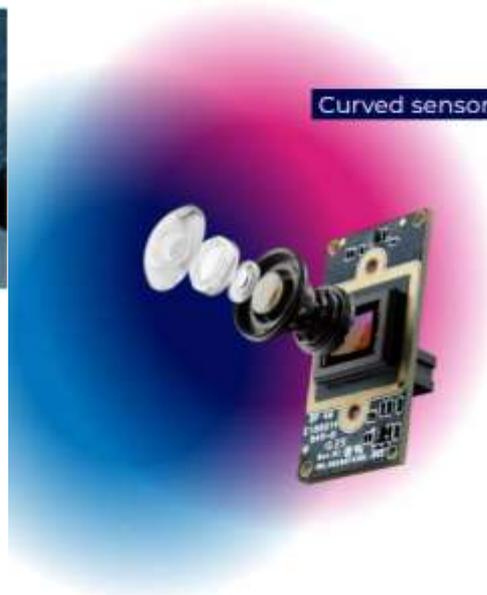
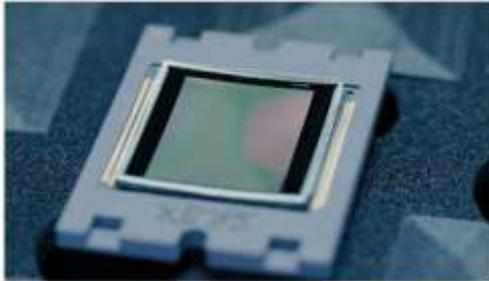
# Les cameras First Light Imaging



# Courbure des matrices de détecteurs

Curve : Emmanuel Hugot

Silina : Wilfried Jahn



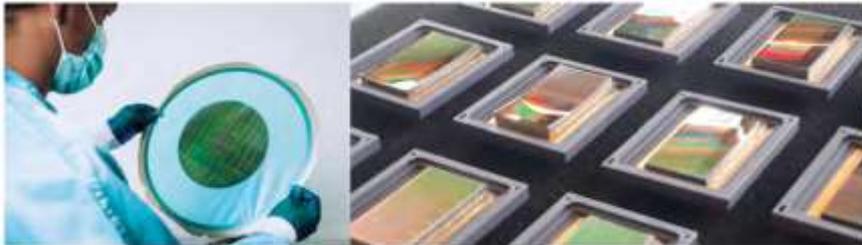
## ADVANTAGE 2

### Simpler and less expensive camera

SILINA curved sensors enable to remove optical elements. The camera is simpler, less expensive, and faster to align.

You realize significant savings on components and on alignment time during camera production :

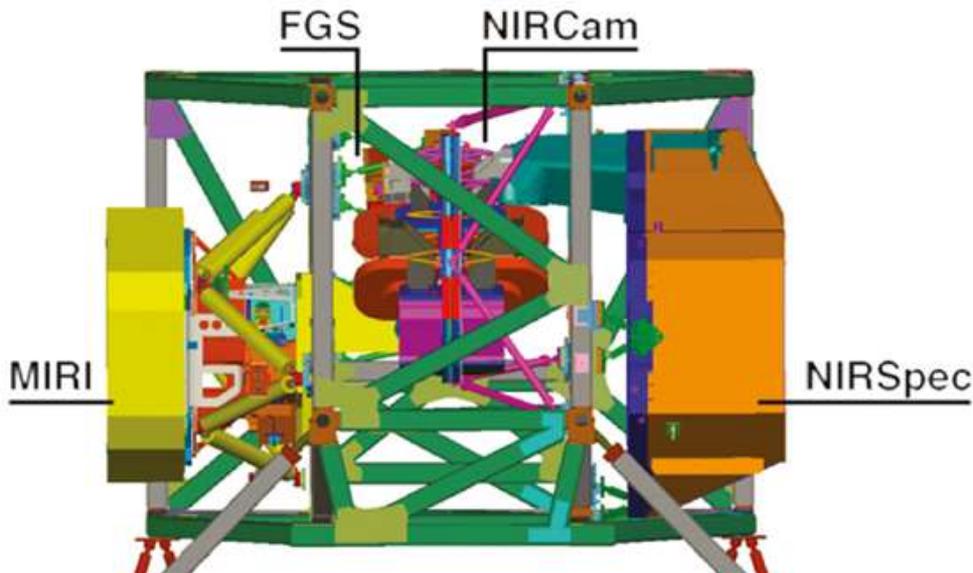
- ▶ Up to -60% optical elements
- ▶ Up to -75% aspherics
- ▶ Faster metrology & alignment
- ▶ Faster integration

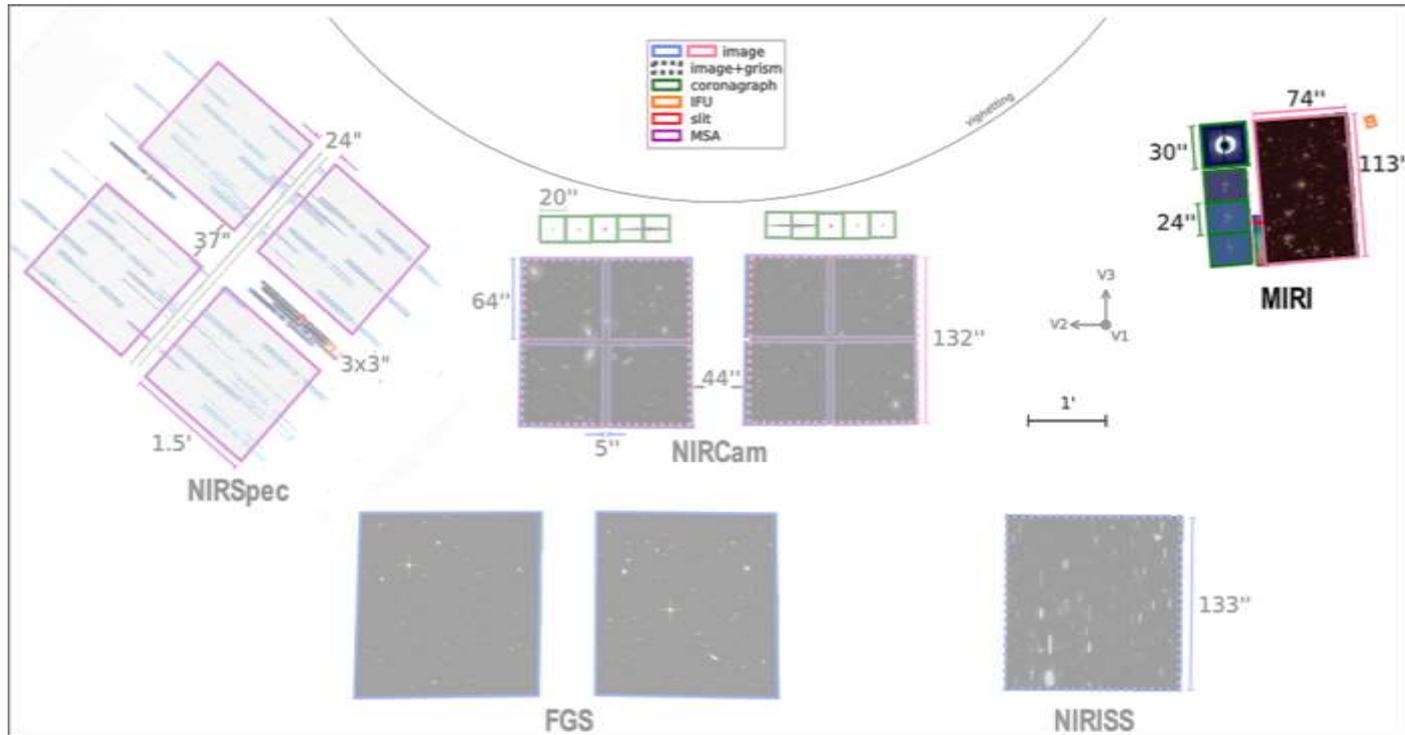


# Les instruments et détecteurs plan focaux du JWST

Au foyer du télescope, monté au dos du miroir primaire, 4 instruments sont intégrés au sein du module ISIM (Integrated Science Instrument Module). Ils vont détecter et analyser les flux IR :

1. NIRC*am* : Near-Infrared Camera de 0,6 à 2,3 $\mu\text{m}$  et 0,6 à 5,0 $\mu\text{m}$
2. MIRI : Mid-Infrared Instrument couvre le domaine 4,9 à 29 $\mu\text{m}$
3. NIRISS : Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph
4. NIRSpec : Near-Infrared Spectrograph 0,6 – 5,3 $\mu\text{m}$





Positions et valeurs des champs des instruments dans le plan focal du télescope

Pour tous ces instruments deux familles de matrices de détecteurs infrarouges ont été développées :



1. NIRCam (Near-Infrared Camera) est constitué de deux modules, le premier couvrant le domaine de 0,6 à 2,3 $\mu$ m et le second de 2,4 à 5,0 $\mu$ m. La camera est dotée de nombreux filtres à bande large et à bande étroite. Elle peut fonctionner en mode spectrographie et en mode coronographie grâce à des masques. En outre, elle a un mode analyseur de front d'onde pour assurer périodiquement la mise en phase de tous les segments du miroir. L'instrument a été réalisé par l'université de l'Arizona avec Lockheed Martin's Advanced Technology.

# Le Capteur NIRCAM H2RGs

Hawaii 2RG, est livré en deux versions :

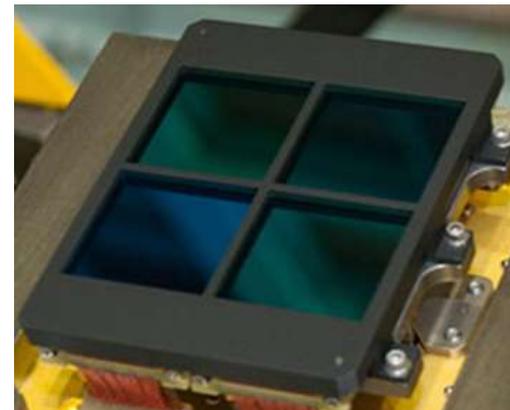
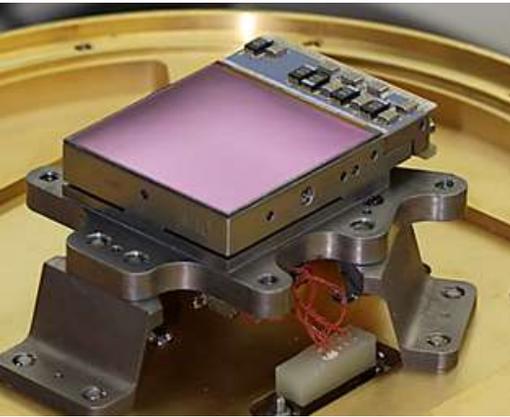
- HgCdTe Teledyne Imaging Sensor Camarillo
- 2048 x 2048
- Pas pixel 18 $\mu$ m
- Version 1 bande spectrale : 0,6 $\mu$ m à 2,5 $\mu$ m
- Version 2 bande spectrale : 0,6 $\mu$ m à 5 $\mu$ m
- Refroidissement à 40K
- Champ angulaire d'un pixel ou IFOV :

$$a_p = 18E-6/131,4m = 1,37E-7rd = 0,028 \text{ seconde d'arc}$$

- le champ angulaire total  $a_T$  imagé par la matrice de détecteurs.

$$a_T = 2048 * a_p = 57,9 \text{ secondes d'arc} = 2,81 E-4 \text{ rd ou encore } 1/60^\circ$$

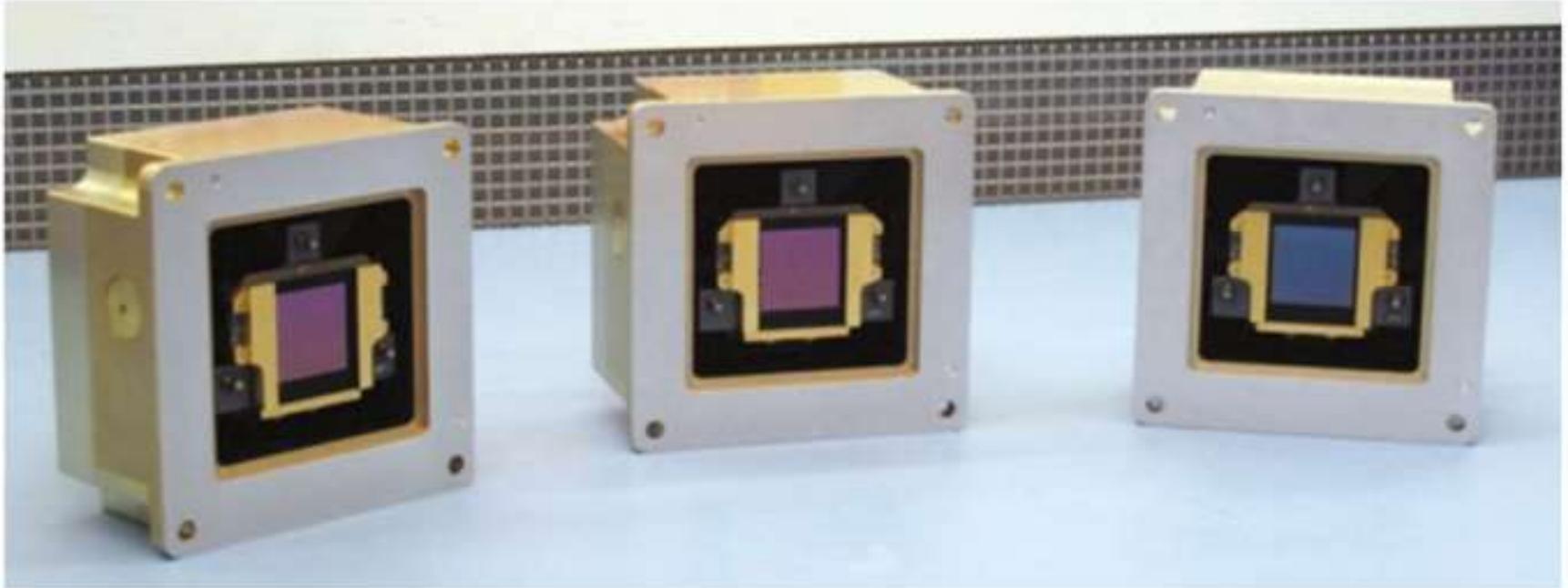
Ils sont réalisés en HgCdTe hybridé sur un circuit de lecture Silicium. Ces matrices peuvent être aboutées pour former des mosaïques pour couvrir le plan focal.



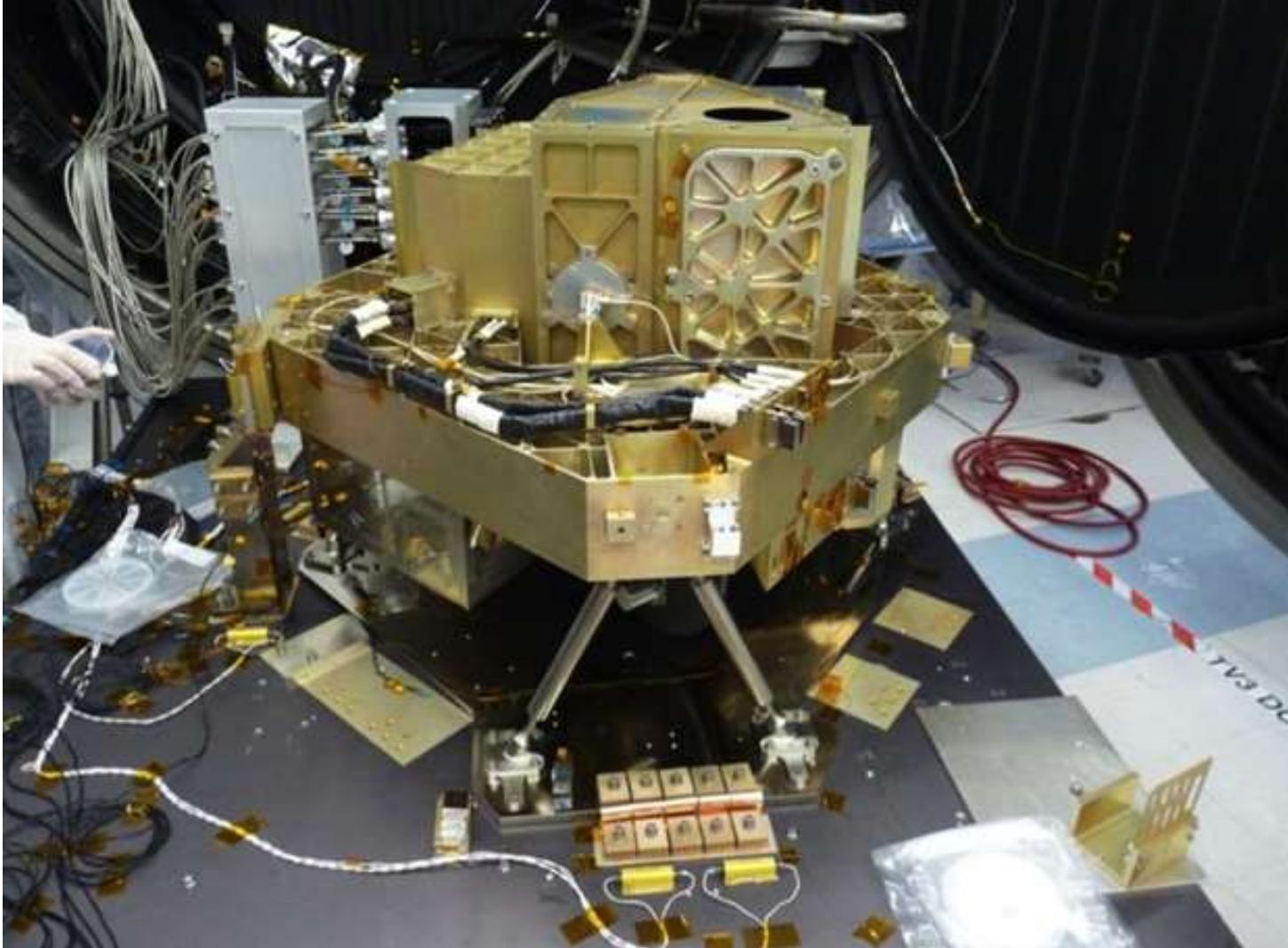
2. MIRI : L'instrument est refroidi à 7K. Il est équipé d'une caméra dotée de 9 filtres segmentant le domaine spectral, d'un spectrographe basse résolution de 5 à 12 $\mu$ m et d'un spectrographe moyenne résolution de 4,9 à 28,8 $\mu$ m. MIRI est aussi doté de masques de coronographie. L'instrument a été réalisé par un consortium européen sous la responsabilité de l'ESA avec le Jet Propulsion Laboratory.



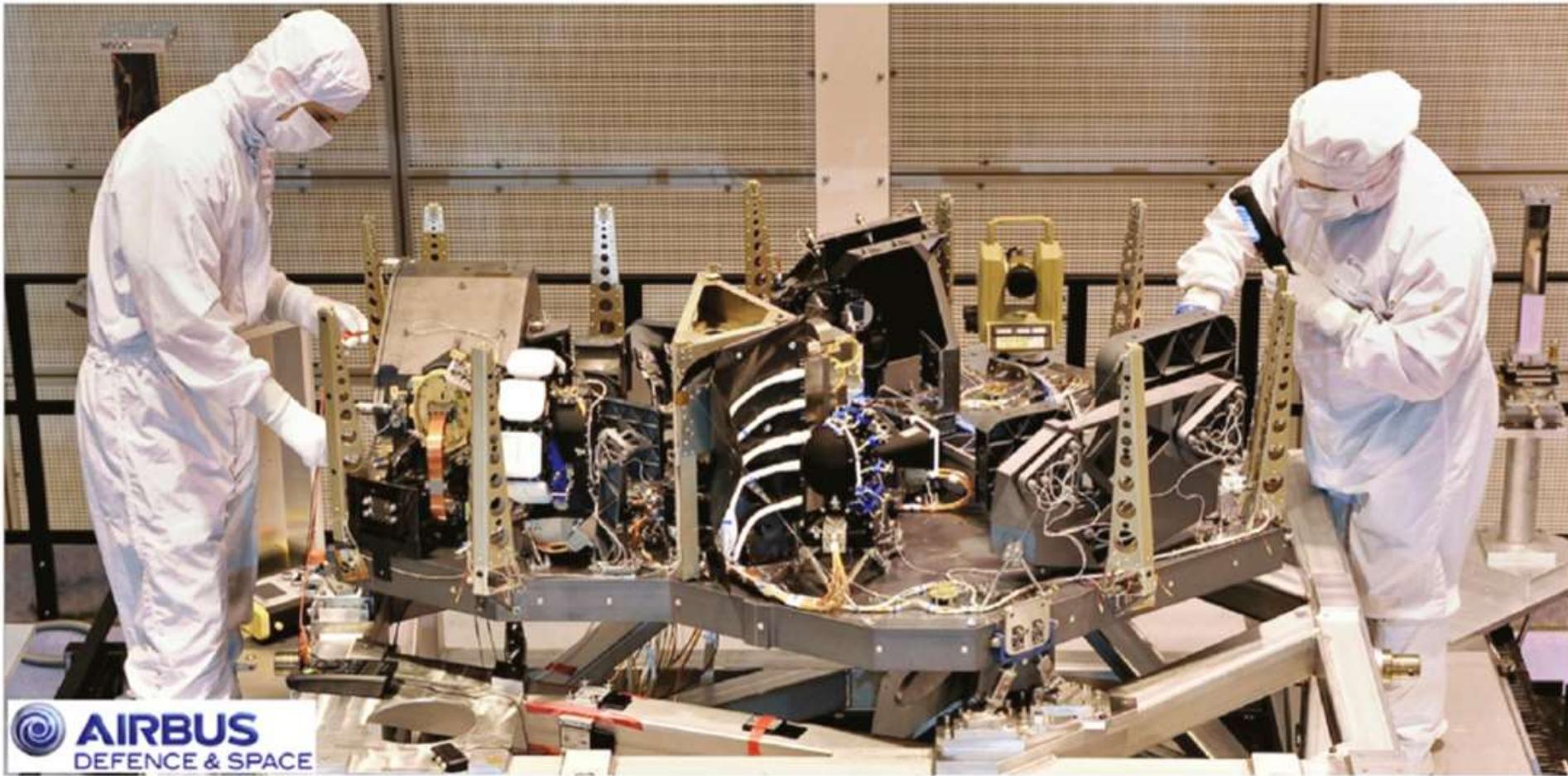
Le modèle de vérification de l'imageur MIRI durant une inspection à Saclay. (Crédit CEA/NASA)



La seconde famille de détecteurs pour MIRI est sensible de 5 à 28 $\mu$ m en Silicium dopé Arsenic (Si :As) dans un format 1048x1048 au pas de 25 $\mu$ m. Elle est fabriquée par Raytheon Vision Systems également en Californie.



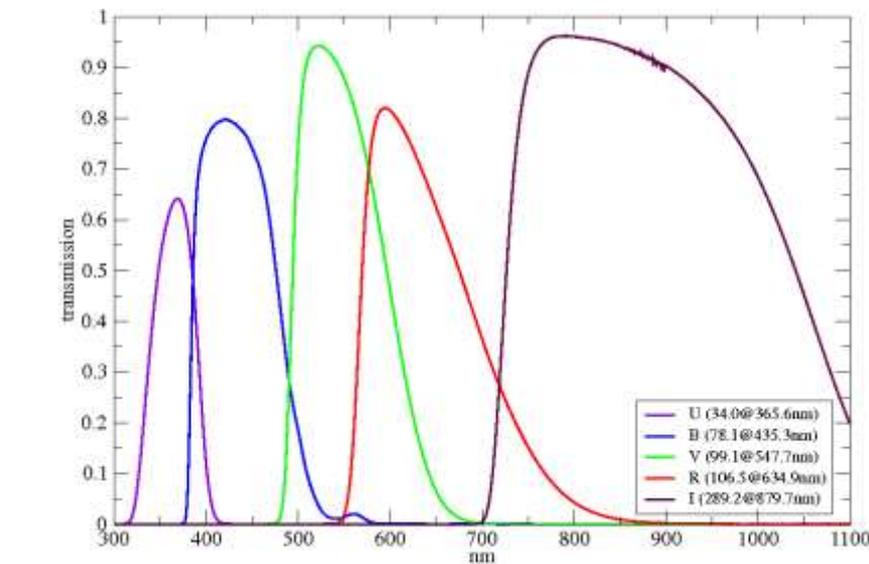
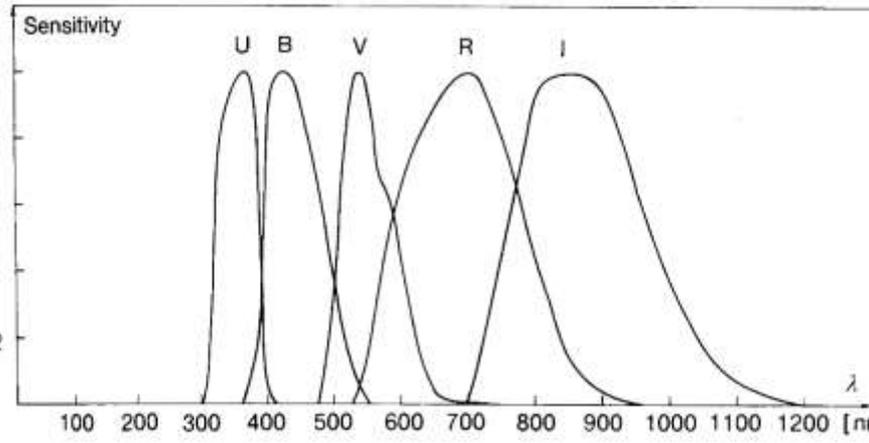
3. NIRISS (Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph) offre des modes de spectroscopies sans fente entre 0,6 et 5 $\mu$ m en basse résolution et grand champ moyenne résolution et haute stabilité photométrique. C'est une contribution de l'Agence Spatiale du Canada.



4. NIRSpec (Near-Infrared Spectrograph) est un spectrographe couvrant le domaine à 0,6 à 5,3 $\mu$ m dotés de plusieurs fentes et doté d'un mode spectroscopie multi-objet en utilisant une matrice de micro-miroirs. NIRSpec a été réalisé par Airbus Industries pour l'ESA.

# Les filtres en astronomie

## 10 From 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
Ultraviolet				
U	365 nm	66 nm	u, u', u*	"U" stands for Ultraviolet.
Visible				
B	445 nm	94 nm	b	"B" stands for Blue.
V	551 nm	88 nm	v, v'	"V" stands for Visual or Visible
G			g, g'	"G" stands for Green.
R	658 nm	138 nm	r, r', R', R <sub>c</sub> , R <sub>e</sub> , R <sub>j</sub>	"R" stands for Red.
Near-Infrared				
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'	
Mid-Infrared				
M	4750 nm	460 nm	M', nbM	
N	10500 nm	2500 nm		
Q	21000 nm <sup>[4]</sup>	5800 nm <sup>[4]</sup>	Q'	

# Combinaisons de filtres alternatifs

- Johnson Cousins : UBVRI
- Bessell,
- Sloan Digital Sky Survey (SDSS) : ugriz de 14.5 à 19.5
- u'g'r'i'z'
- Pan-STARRS gp1, rp1, ip1, zp1, yp1
- RGB

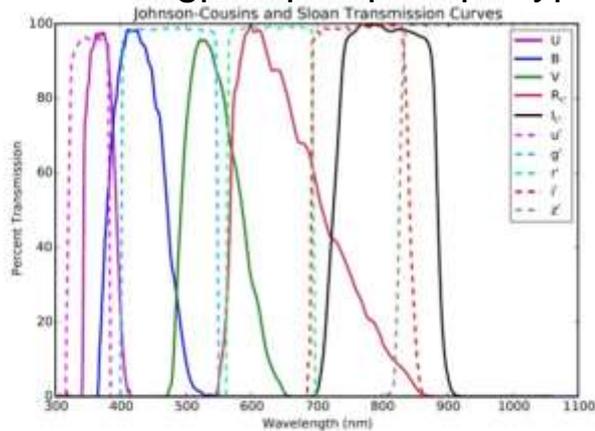
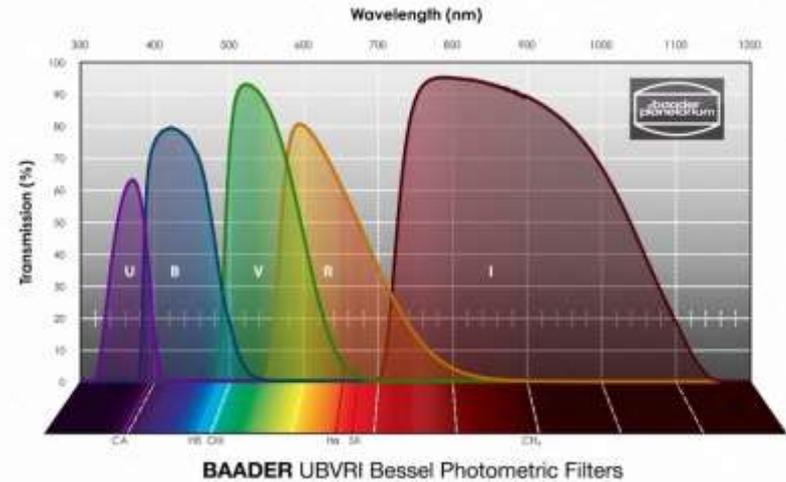
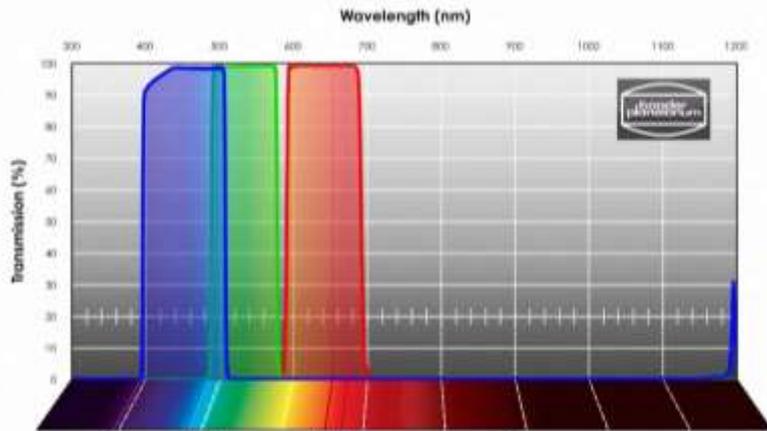


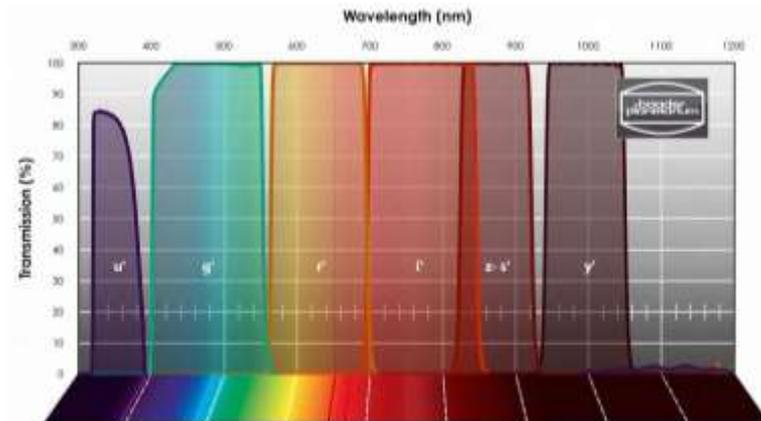
Fig. 4. Astrodome transmission curves for the Johnson-Cousins (UBVR<sub>c</sub>) and the Sloan (u'g'r'i'z') photometric systems.



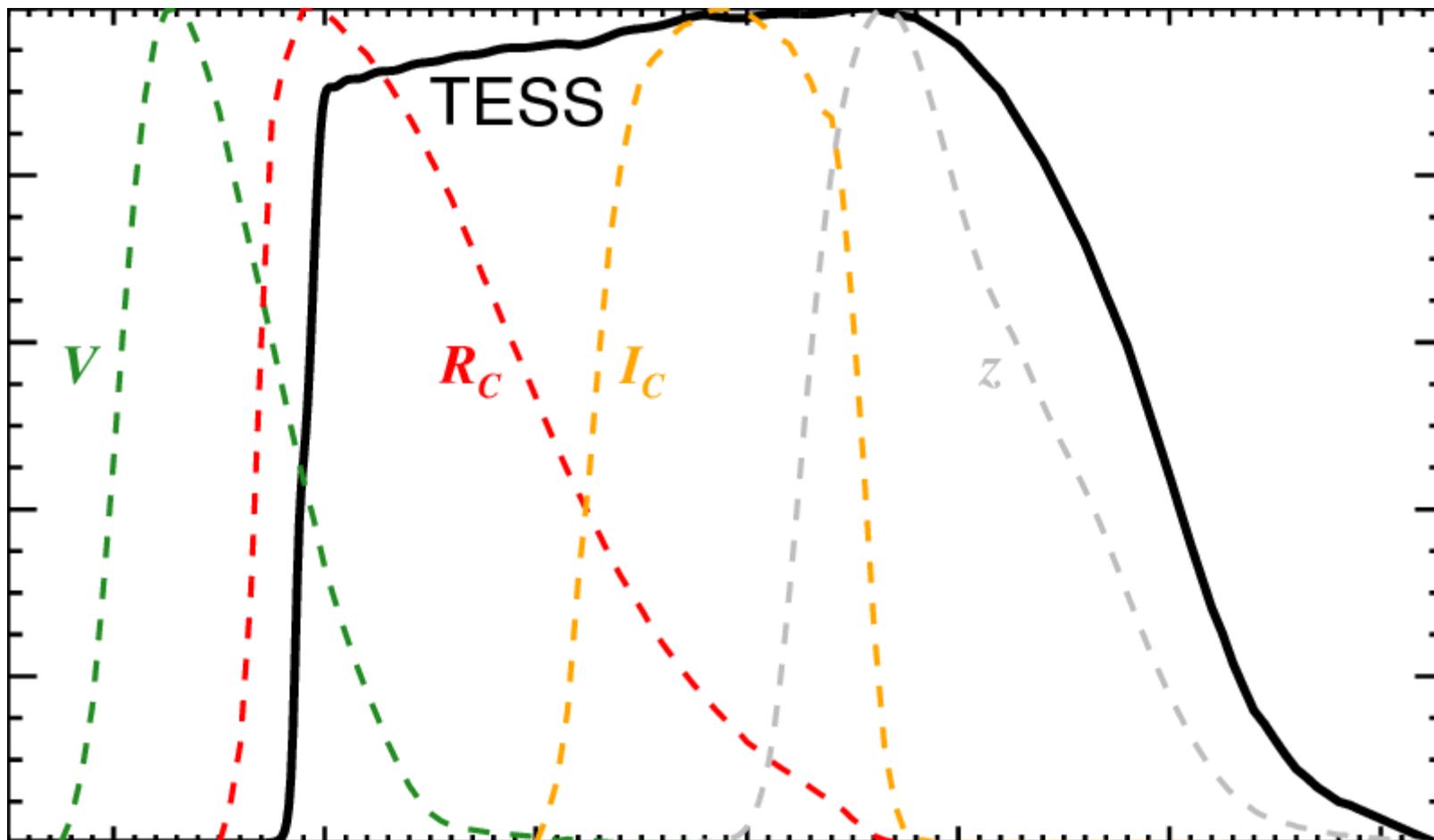
BAADER UBVRi Bessel Photometric Filters



BAADER RGB CMOS Filter - CMOS-optimized

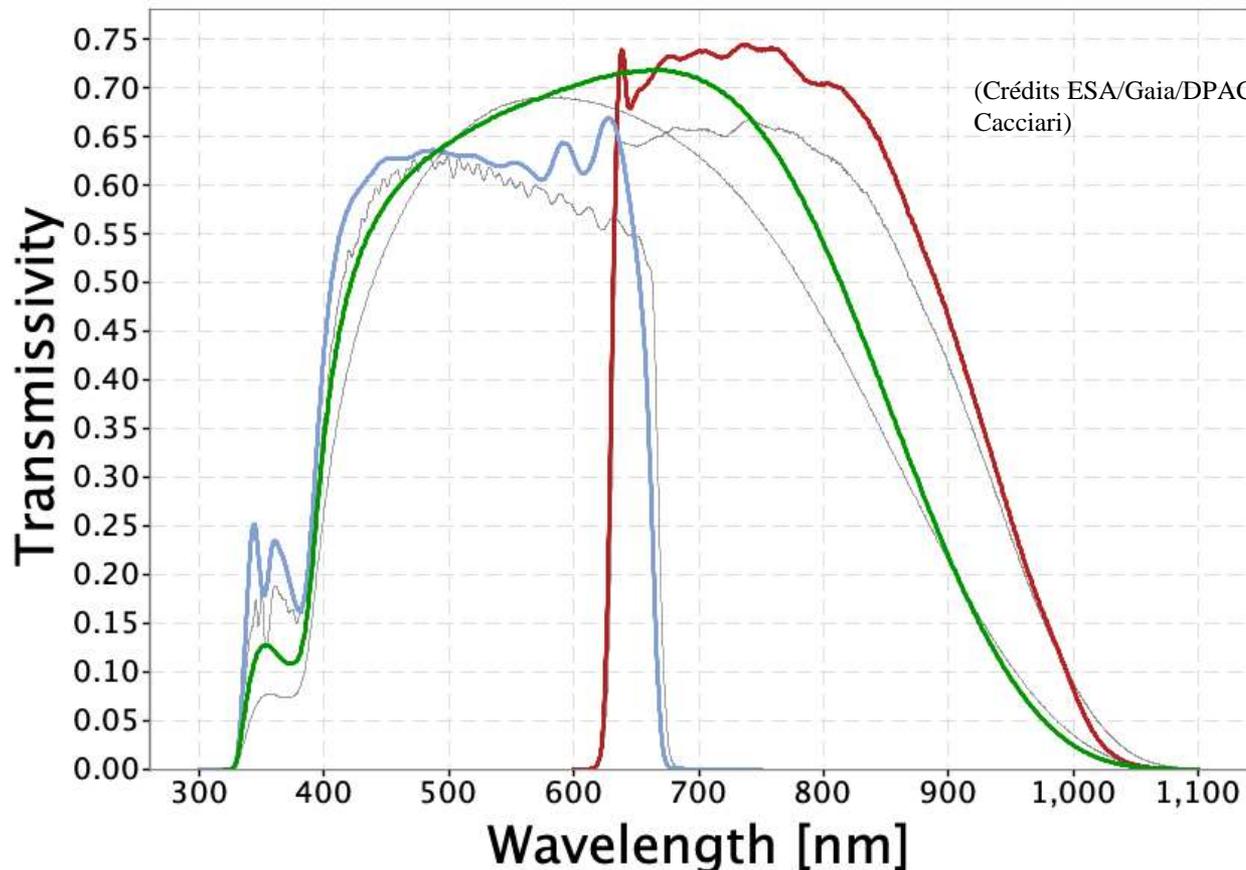


BAADER SLOAN/SDSS (u'g'r'i'z') Photometric Filters



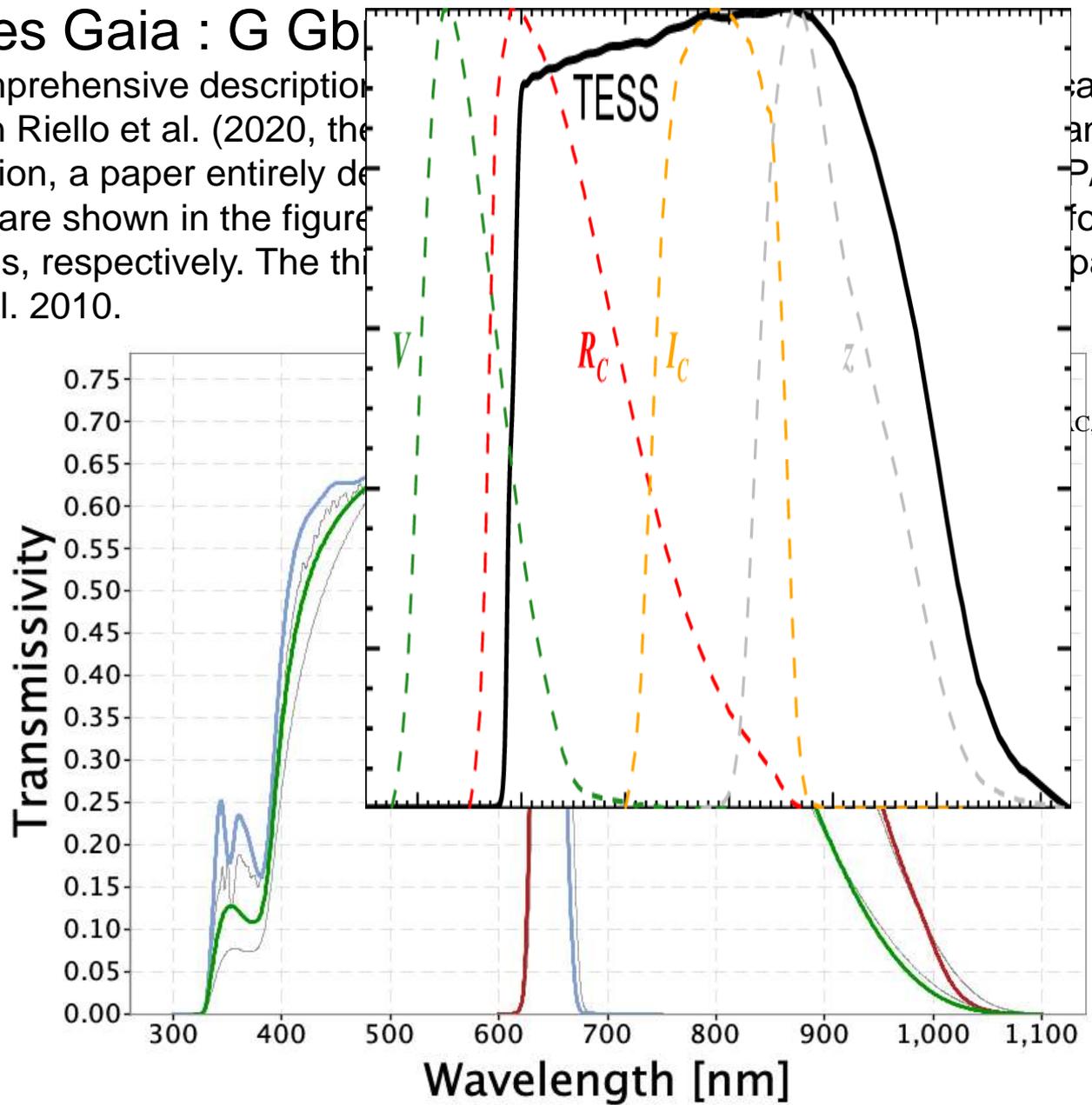
# Les filtres Gaia : G Gbp et Grp

A more comprehensive description of the photometric and spectral external calibrations will be published in Riello et al. (2020, the paper presenting the EDR3 photometry) and Montegriffo et al. (in preparation, a paper entirely dedicated to the external calibration of the BP/RP spectra). The passbands are shown in the figure above as green, blue, and red solid lines for the G, G\_BP, and G\_RP bands, respectively. The thin grey lines show the nominal, pre-launch passbands published in Jordi et al. 2010.



# Les filtres Gaia : G Gb

A more comprehensive description published in Riello et al. (2020, the (in preparation, a paper entirely de passbands are shown in the figure G\_RP bands, respectively. The th in Jordi et al. 2010.



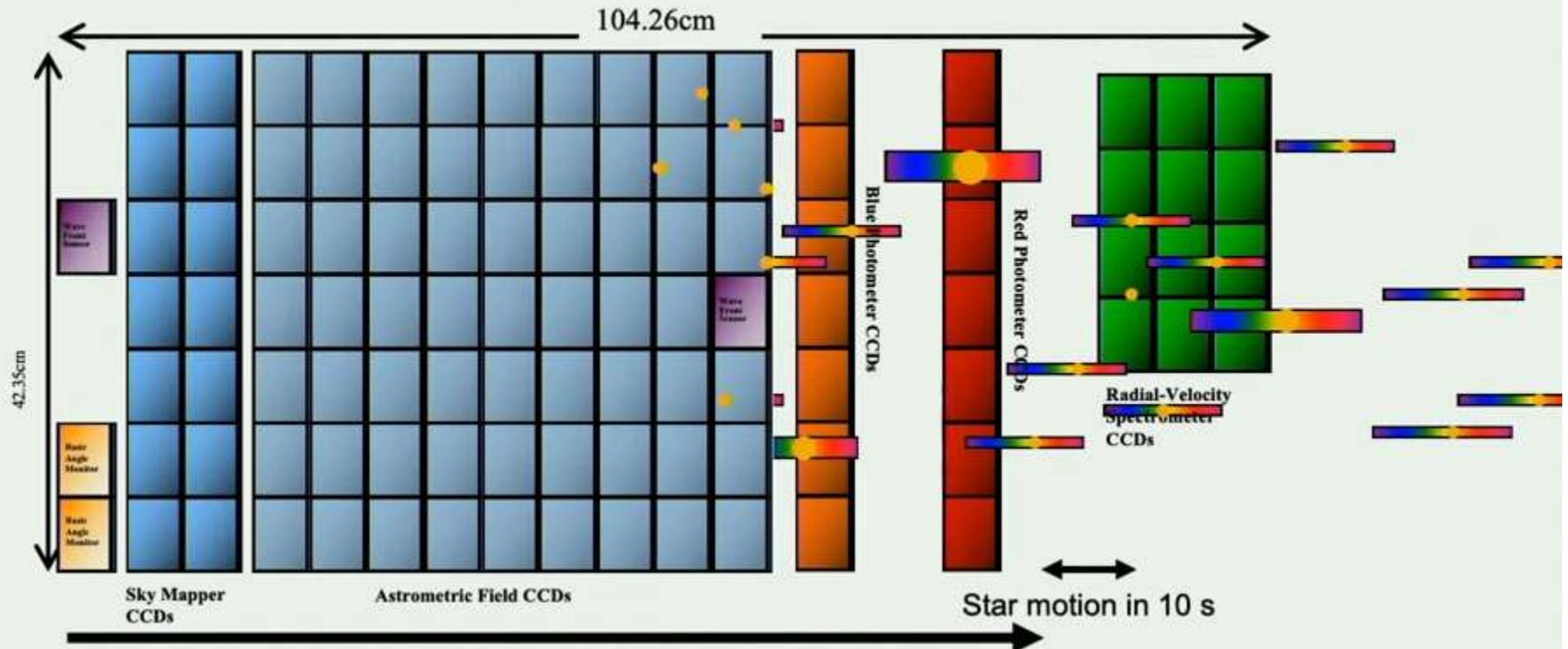
calibrations will be and Montegriffo et al. P/RP spectra). The for the G, G\_BP, and passbands published

C, P.Montegriffo, F. de Angeli, C.

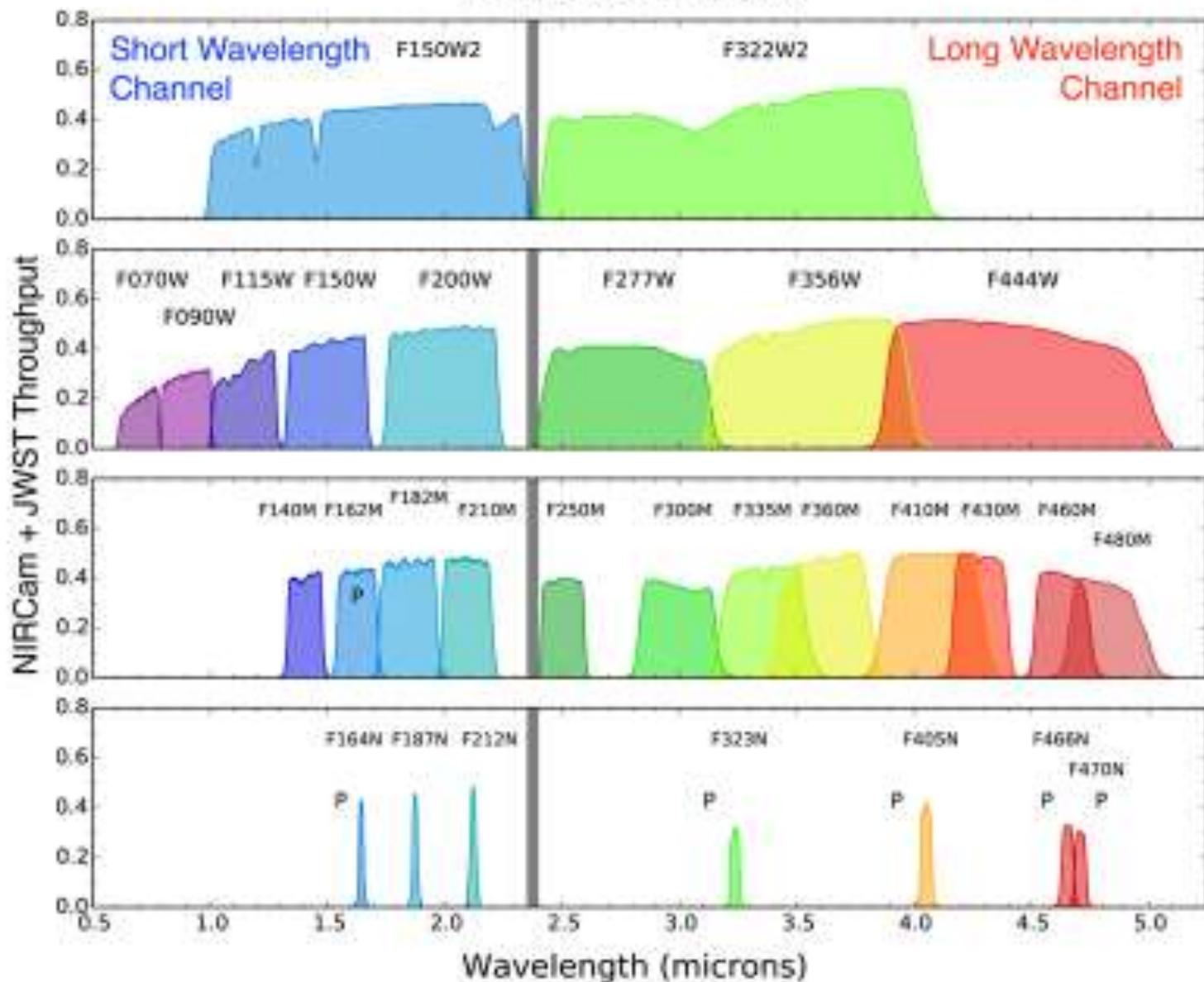
# Gaia focal plane



106 CCDs , 938 million pixels, 2800 cm<sup>2</sup>



# NIRCam Filters





# Optique adaptative

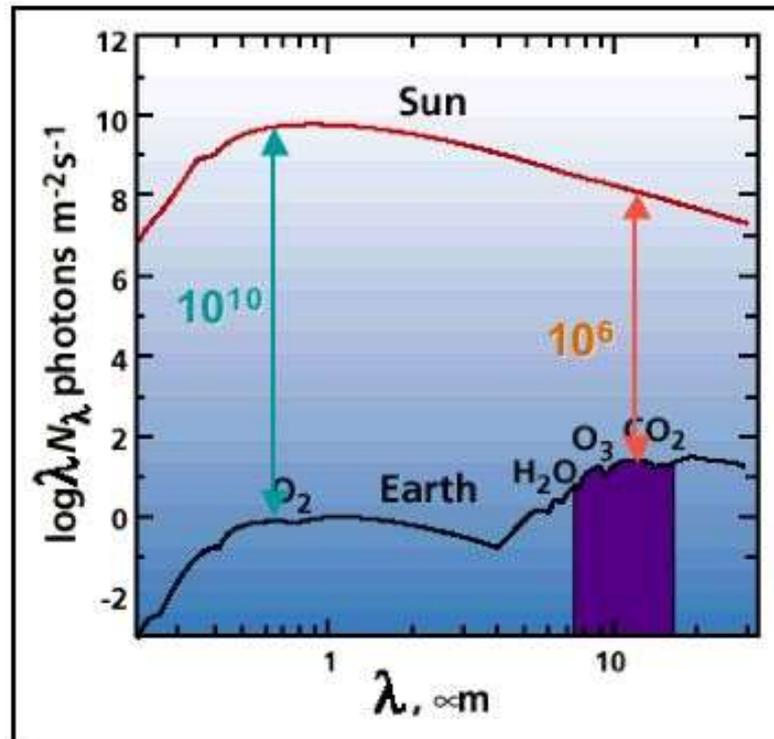
Le diamètre de Fried en m avec  $\lambda$  la longueur d'onde en mètre

$$r_0 \sim 0.1 \left( \frac{\lambda}{0.5 \cdot 10^{-6}} \right)^{1.2}$$

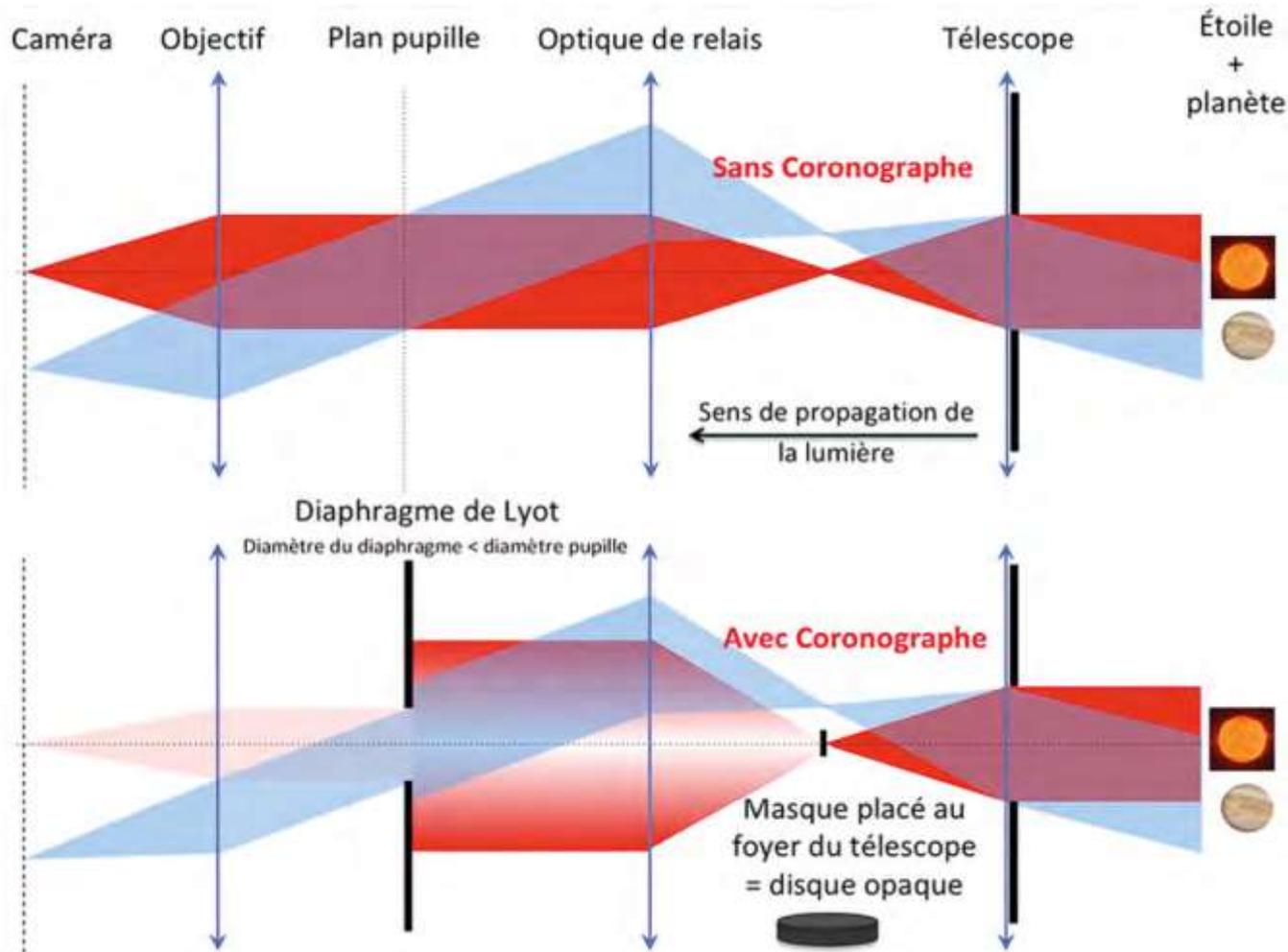
# Coronographie stellaire

## Observations au voisinage des étoiles :

- Recherches de compagnons
- Recherches de planètes
- Recherches des disques protoplanétaires

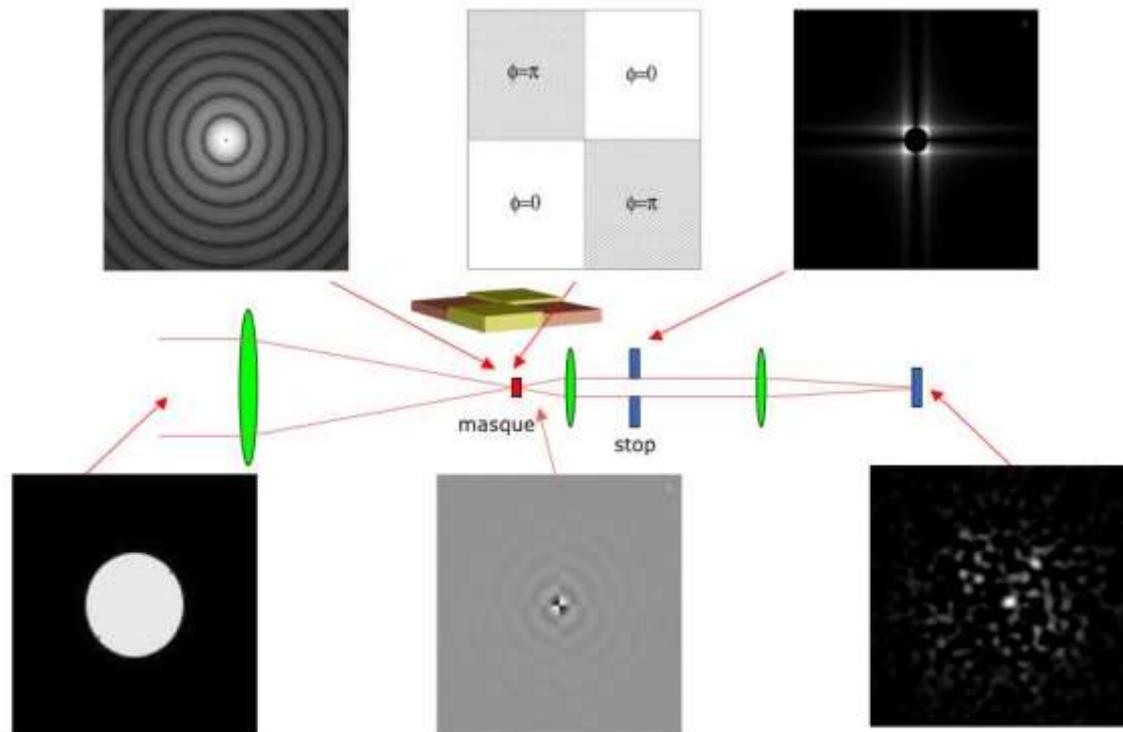


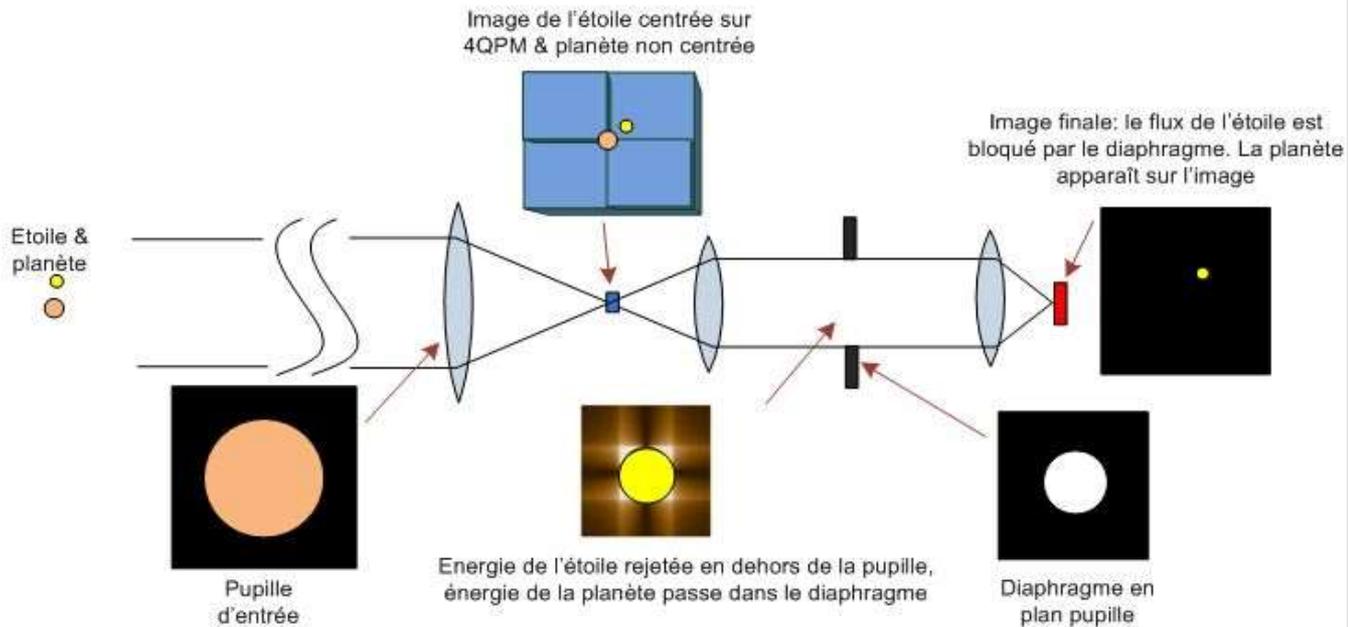
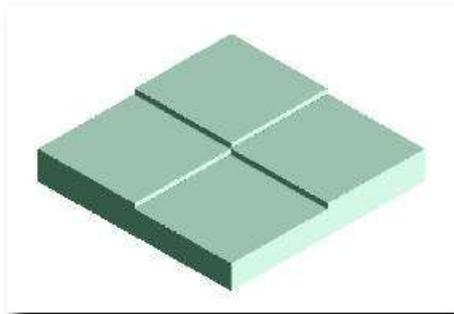
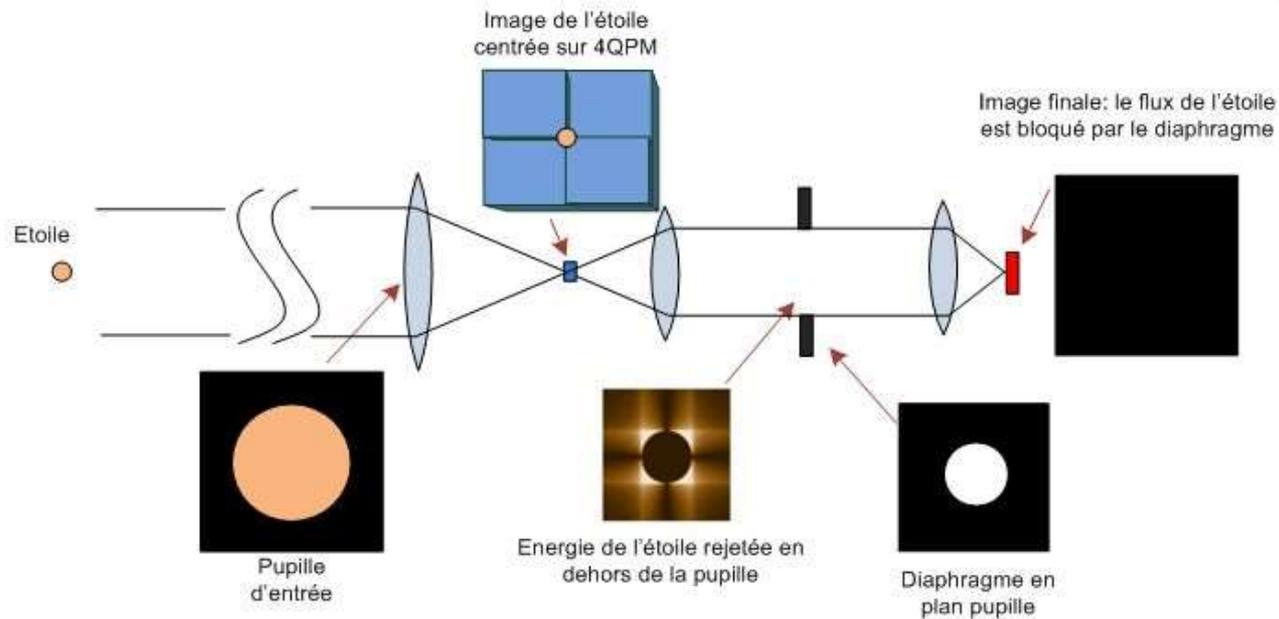
- Le précurseur : le coronographe de Bernard Lyot
- Le coronographe stellaire



# Le masque de phase

Daniel Rouan





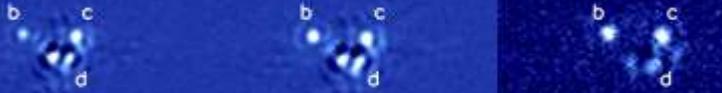
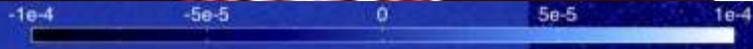
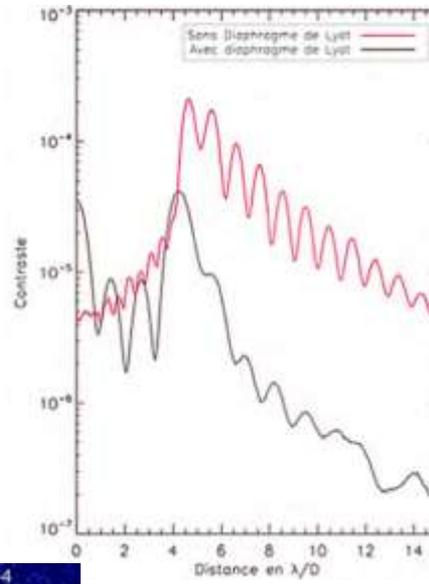
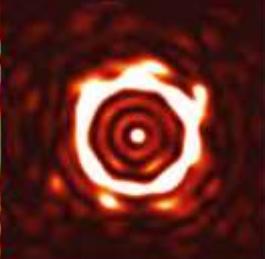
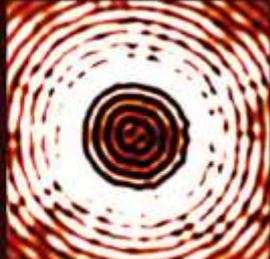
### Diaphragme de Lyot ?

Sans

Avec

Tache de diffraction  
hors masque  
 $t_{\text{exposition}} = 30 \mu\text{s}$

Tache de diffraction  
centrée sur le masque  
 $t_{\text{exposition}} = 30 \text{ ms}$

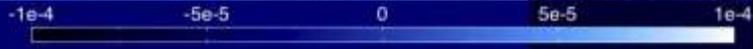


F1065C

F1140C

F1550C

5"



F1065C

F1140C

F1550C

5"

F1065C

F1550C

F2300C

5"

# La conversion de lambda

## Thèse Thales de Romain Demur

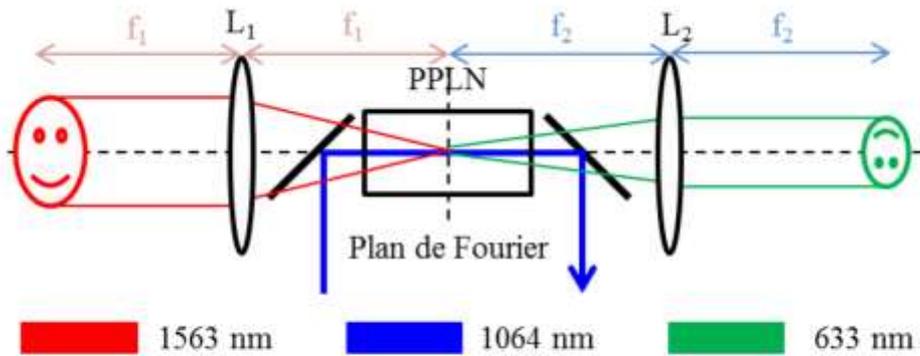


Figure 2-23 : Schéma optique utilisé dans les simulations et correspondant aux expériences

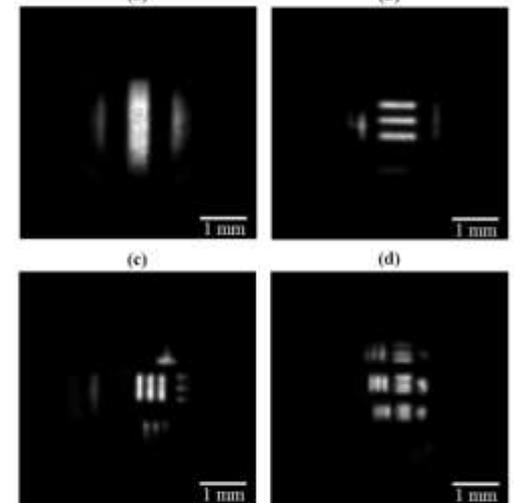
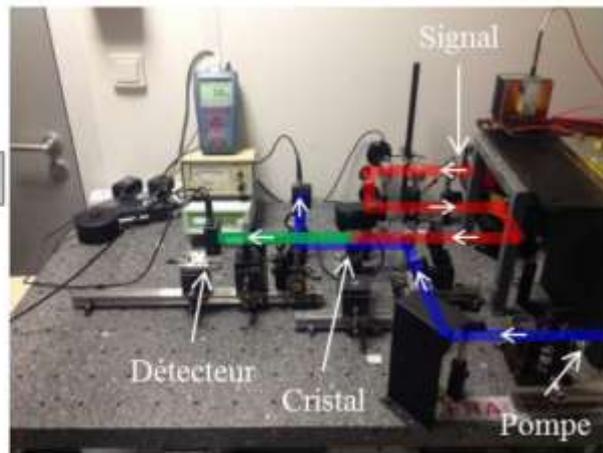
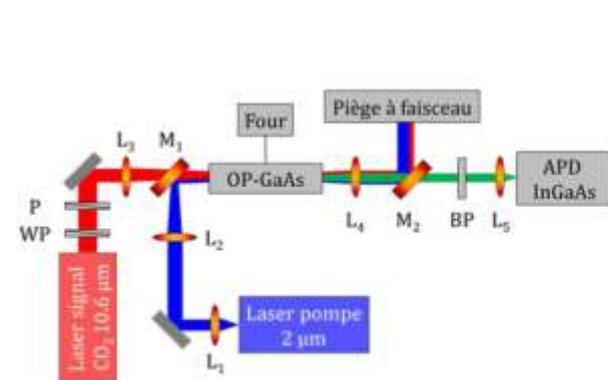
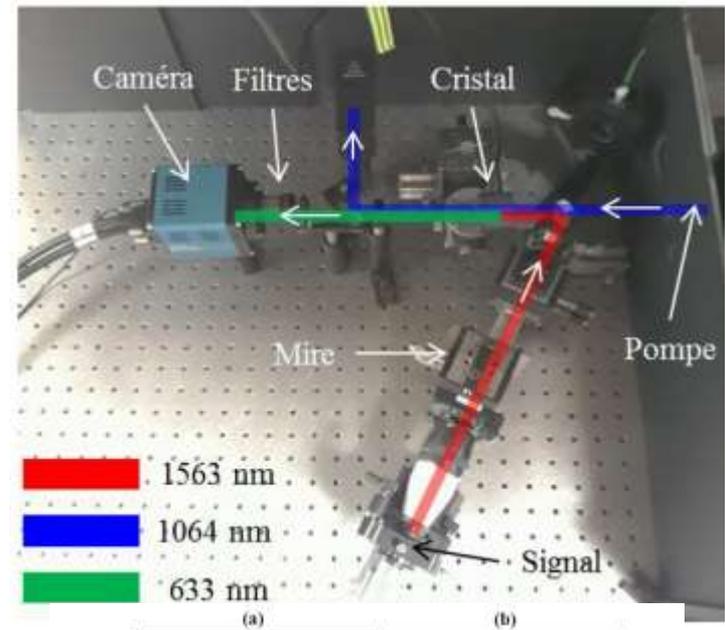
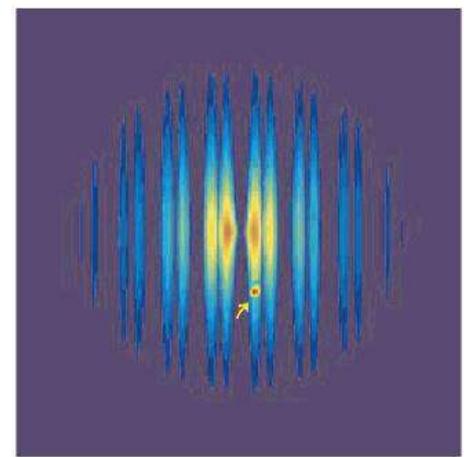
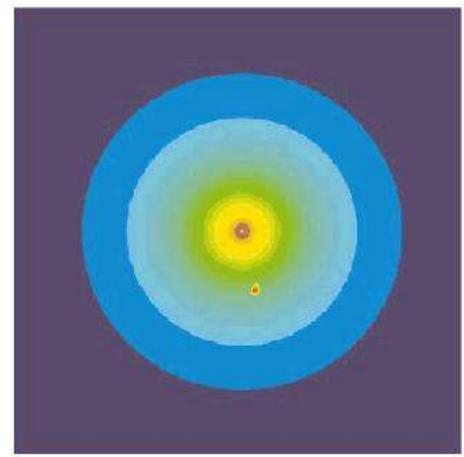
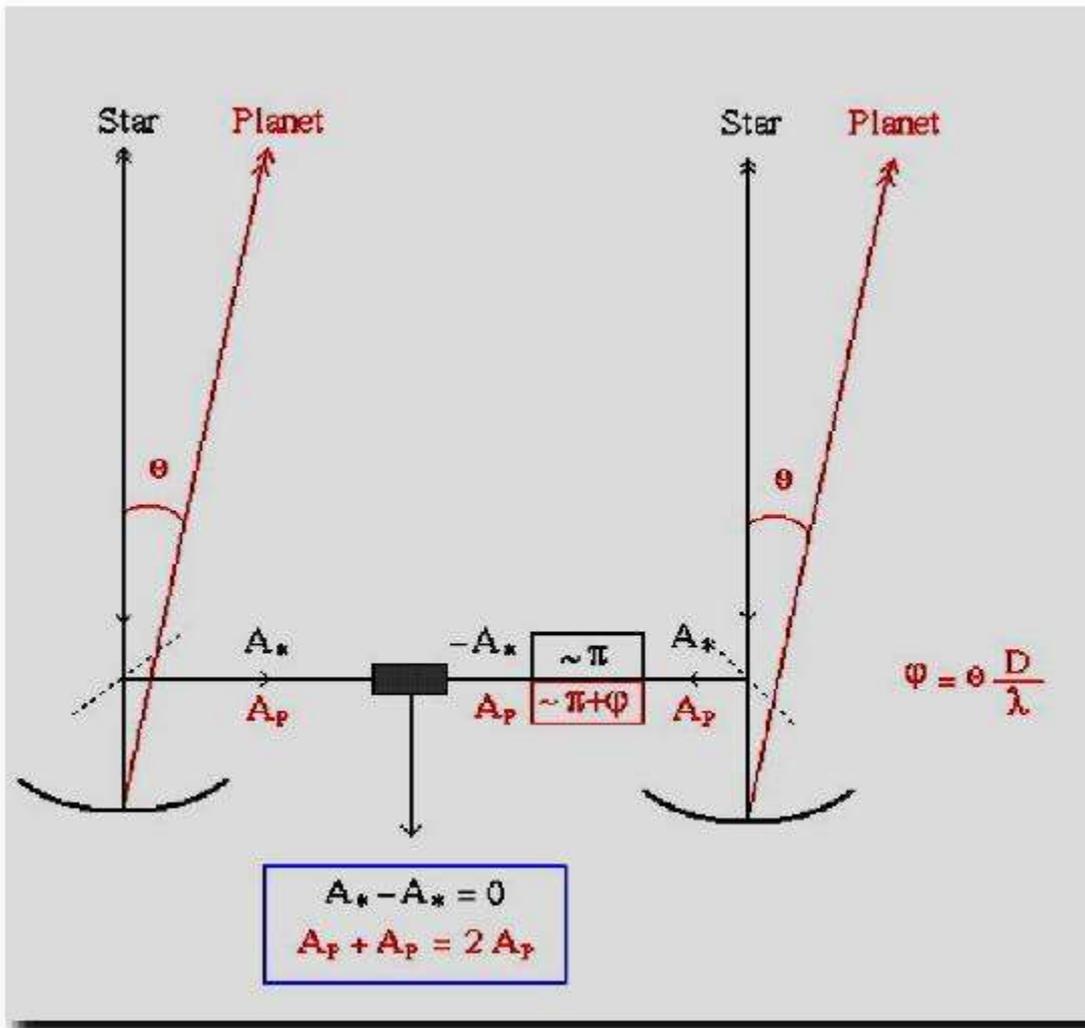


Figure 4-12 : Quelques images de mire, (a) 0.5 lp/mm, (b) 1.41 lp/mm, (c) 2 lp/mm et (d) 3.17 lp/mm

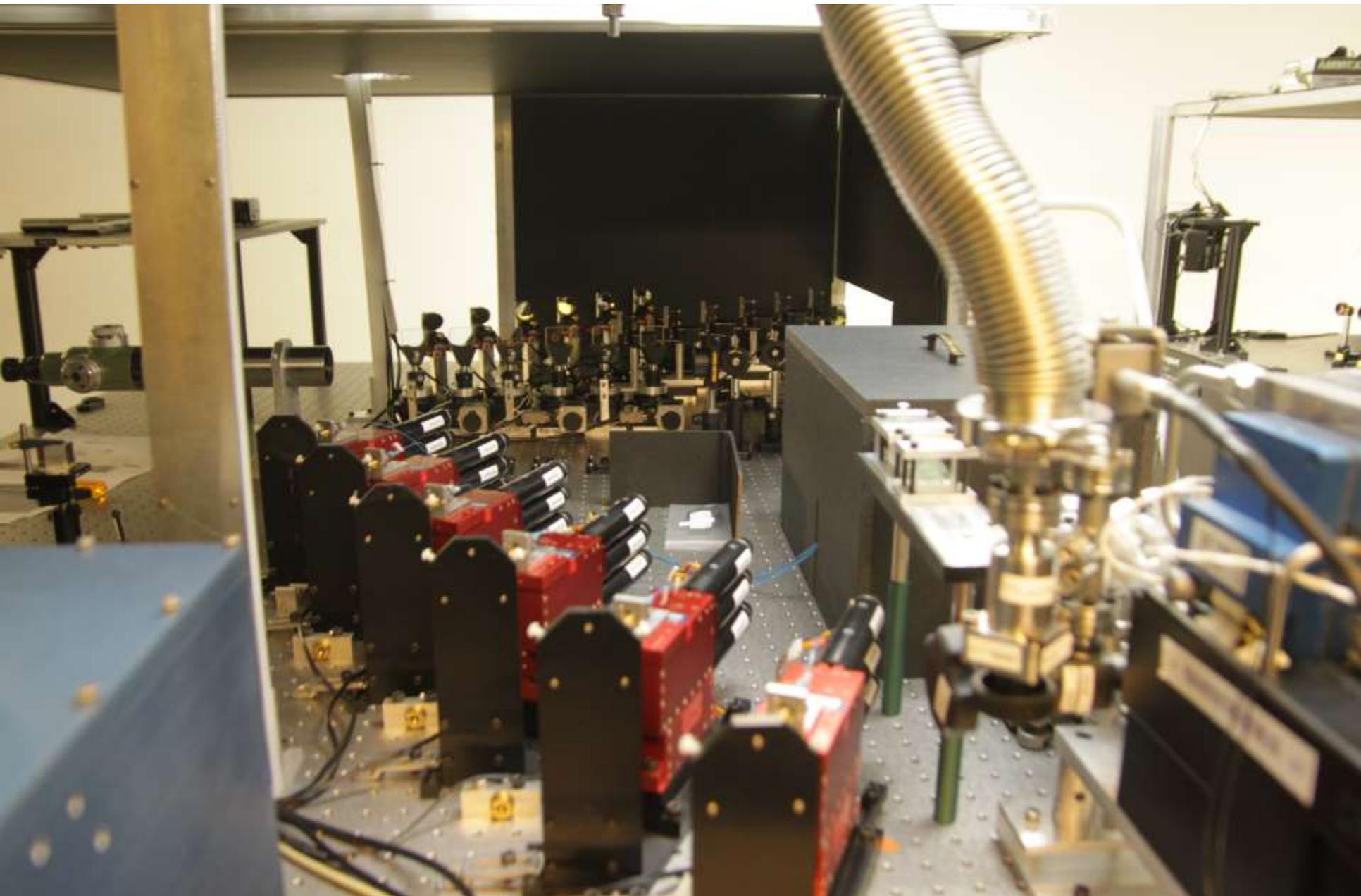
# L'interférométrie optique

## Deux alternatives

- Optique en propagation libre
- Optique guidée
  
- Le VLTI
- CHARA au Mont Wilson



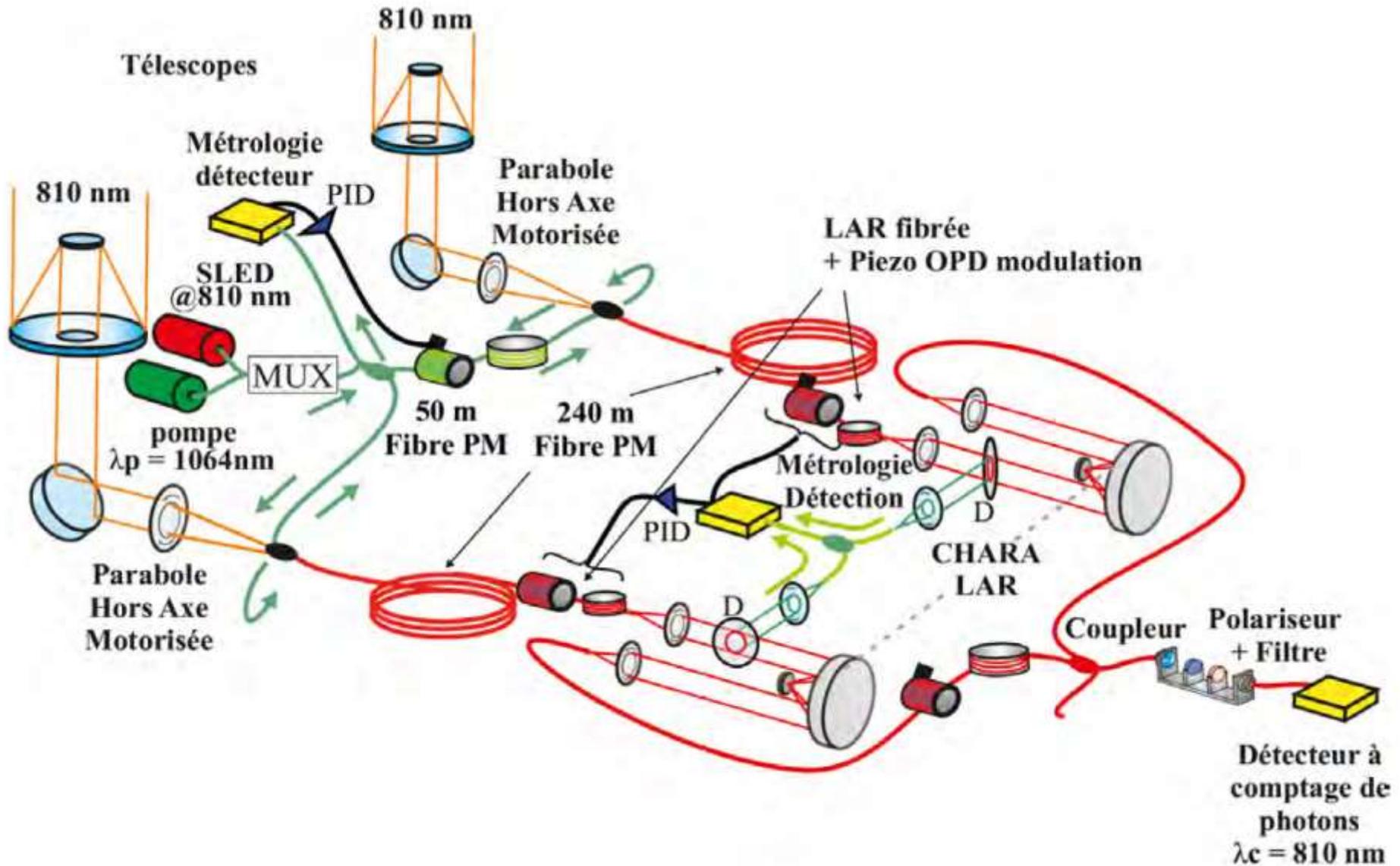


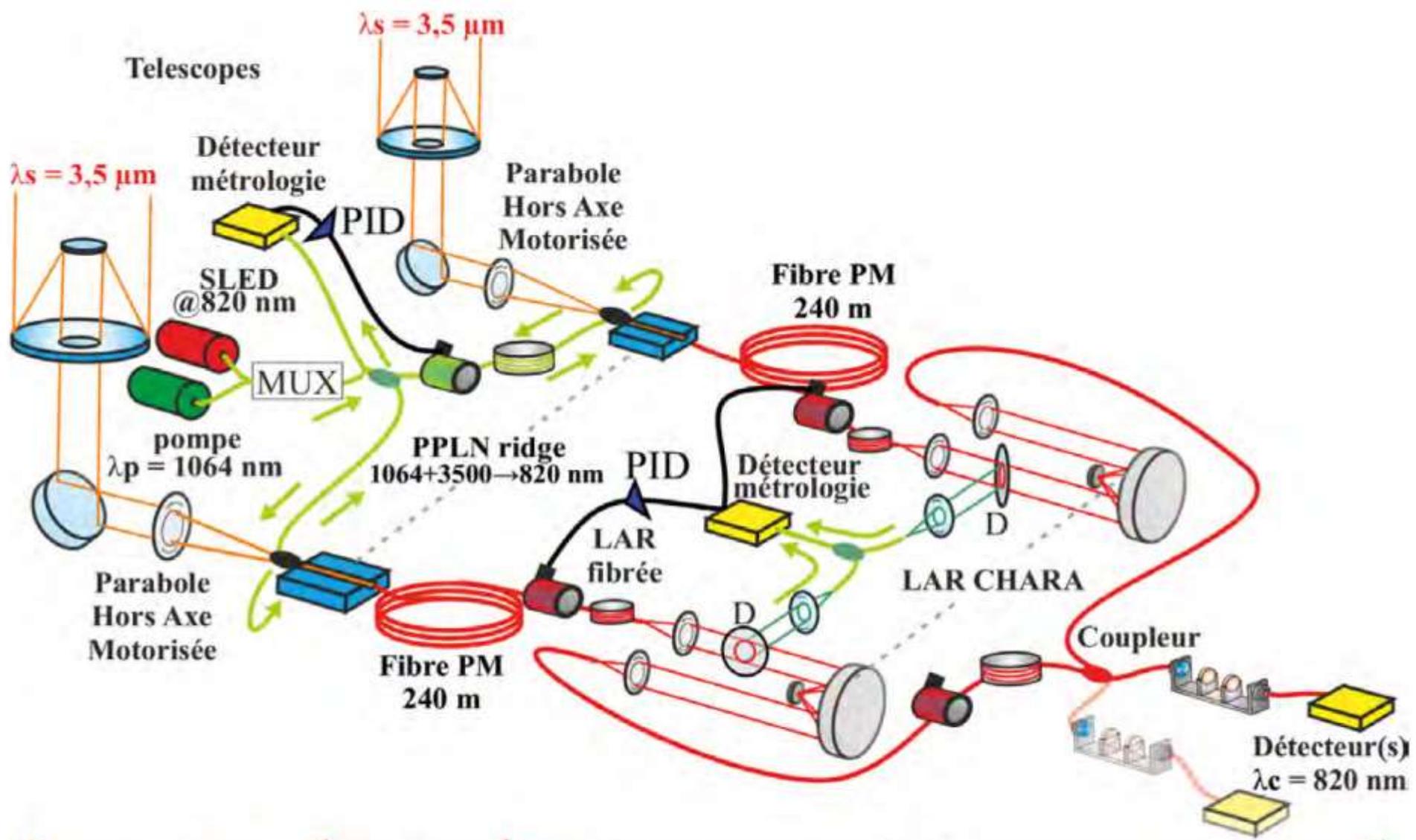


# Projet ALOHA

Astronomical Light Optical Hybride Analysis

Ludovic Grossard, Francois Reynaud





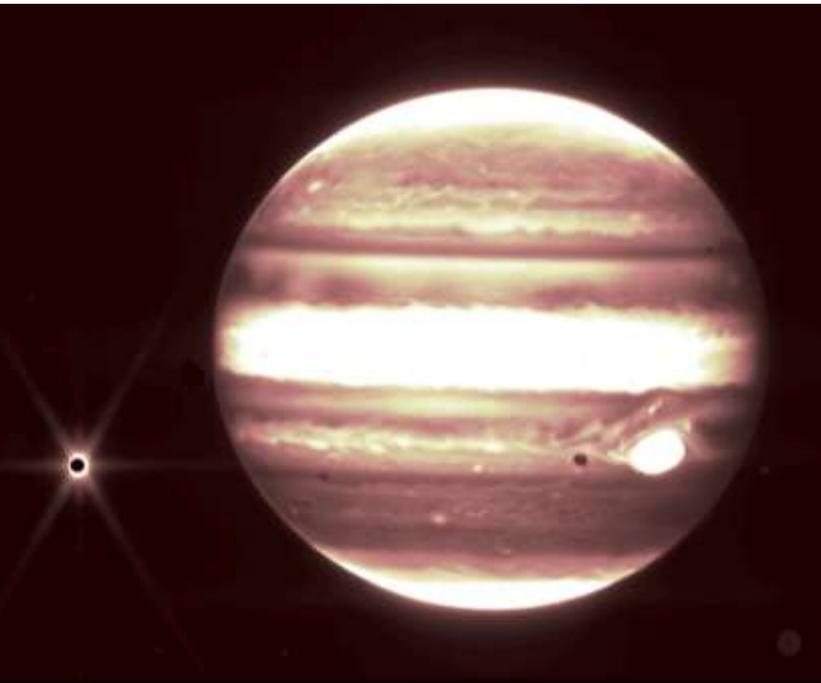
Étage MIR  
+ conversion  
de fréquences

Propagation fibrée  
longue distance  
à 820 nm

Interféromètre à 820 nm

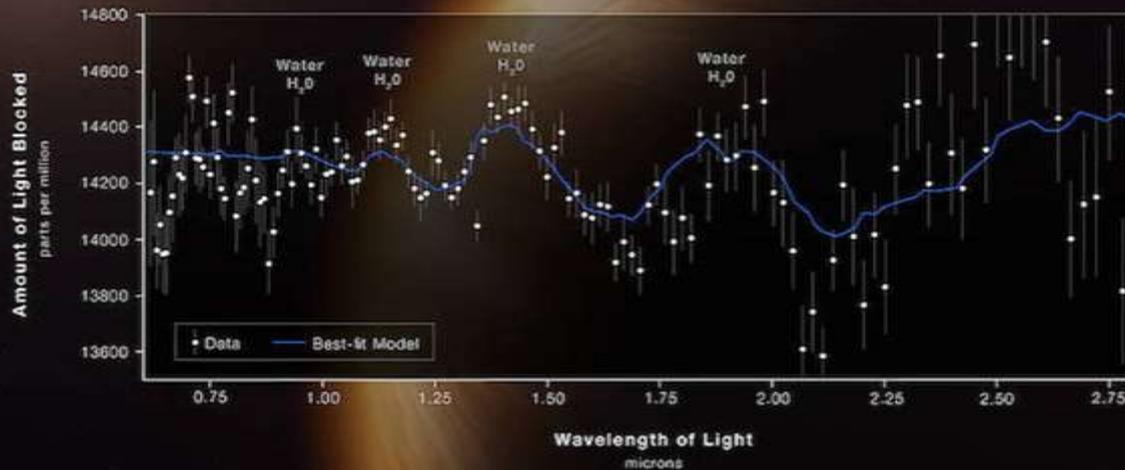
# JWST premières images

Jupiter, center, and its moon Europa, left, are seen through the James Webb Space Telescope's NIRCам instrument 2.12 micron filter. Credits: NASA, ESA, CSA, and B. Holler and J. Stansberry (STScI)



# HOT GAS GIANT EXOPLANET WASP-96 b ATMOSPHERE COMPOSITION

NIRISS | Single-Object Slitless Spectroscopy



**WEBB**  
SPACE TELESCOPE

Spectre de l'atmosphère de l'exoplanète WASP-96b pendant son transit obtenu avec NIRISS entre 0,6 et 2,8 $\mu$ m. Grâce au fruit du travail de toute la communauté astronomique professionnelle et amateur, les éphémérides des passages des planètes devant leur étoile permettent de programmer l'acquisition de son spectre avant et pendant le transit. La différence permet de délivrer le spectre de l'absorption de l'atmosphère de la planète réalisé ici pour la première fois. La mise en évidence de présence de vapeur d'eau en dit long sur les capacités de sondages ouvertes par le JWST.

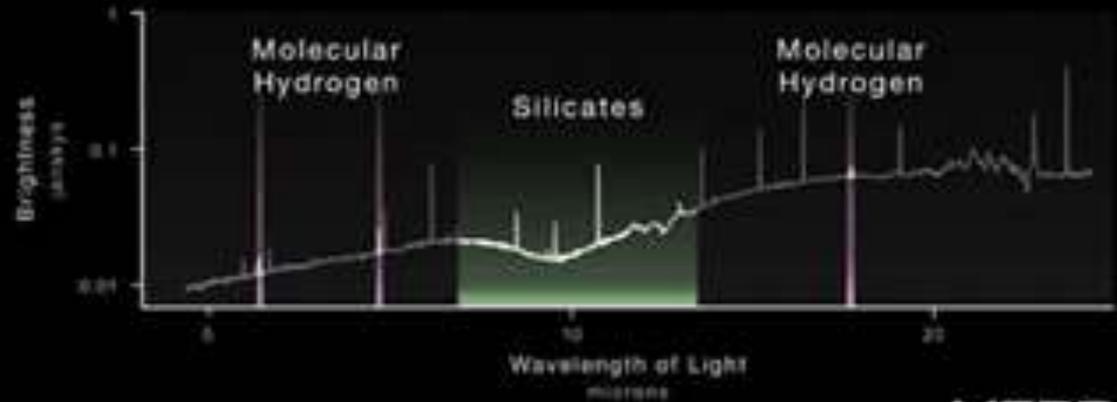
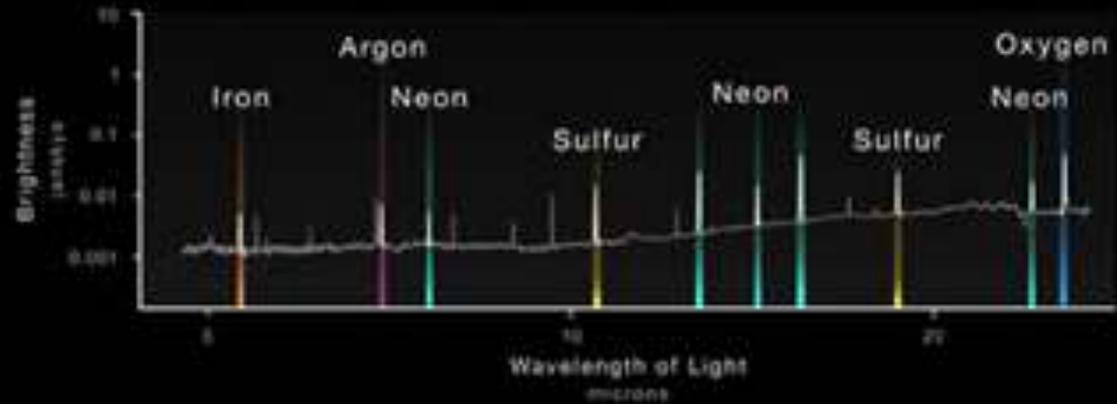
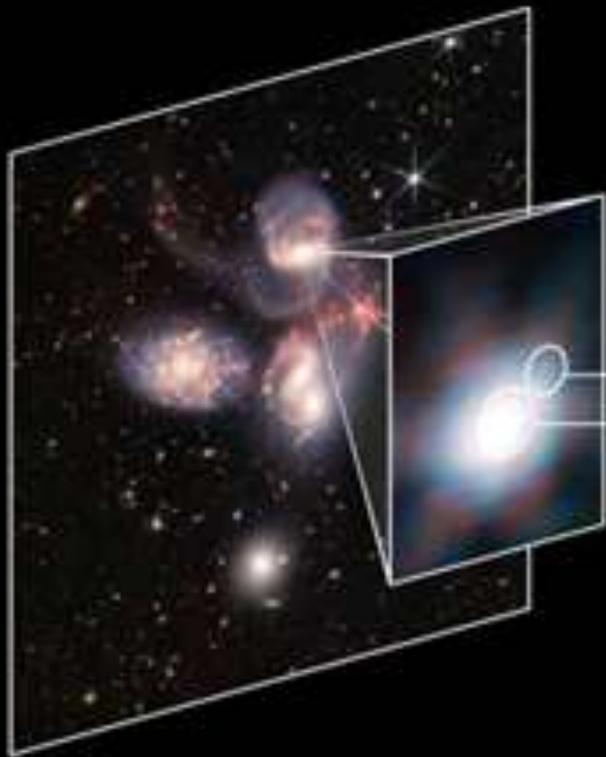




# COMPOSITION OF GAS AROUND ACTIVE BLACK HOLE

NIRCam and MIRI Imaging

MIRI IFU Medium Resolution Spectroscopy



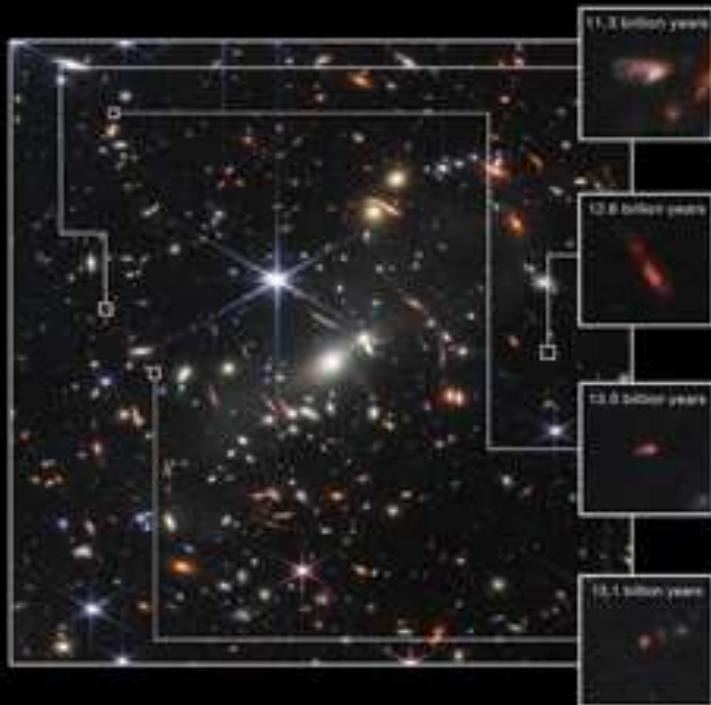


Première image de l'Univers profond délivrée à gauche par MIRI et à droite par NIRCam . Les centaines de galaxies sont visualisées par leurs signatures IR provenant de la température des poussières chauffées par les étoiles dans l'image de gauche et du décalage vers les grandes longueurs d'onde de ses composantes stellaires du fait de l'expansion de l'Univers dans l'image de droite. Au-delà de l'aspect fascinant de la densité des galaxies, nous pouvons constater que dans l'IR elles se détachent sur un fond sombre provenant de l'âge de l'Univers et de sa finitude.

GALAXY CLUSTER SMACS 0723

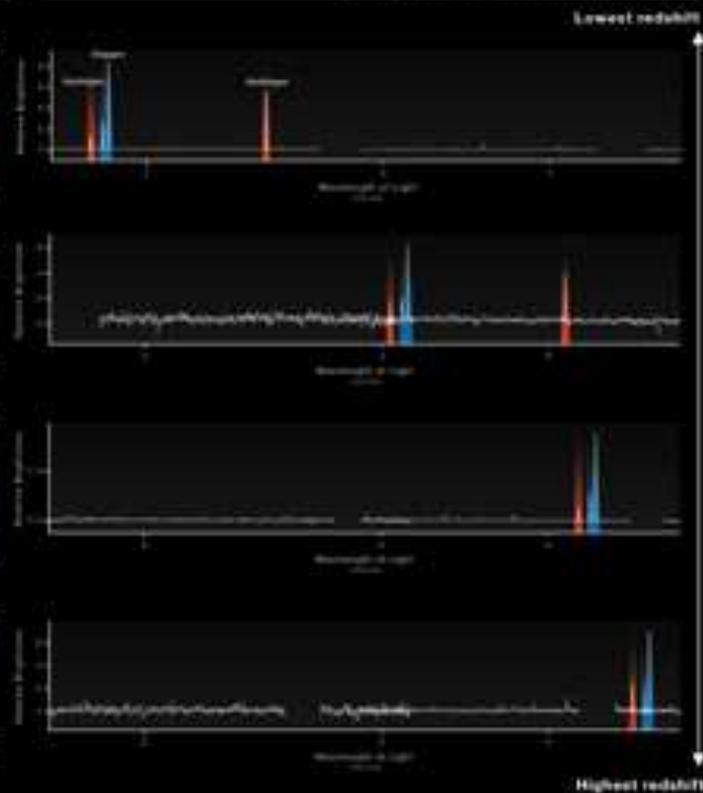
# WEBB SPECTRA IDENTIFY GALAXIES IN THE VERY EARLY UNIVERSE

NIRCam Imaging



**WEBB**  
SPACE TELESCOPE

NIRSpec Microshutter Array Spectroscopy



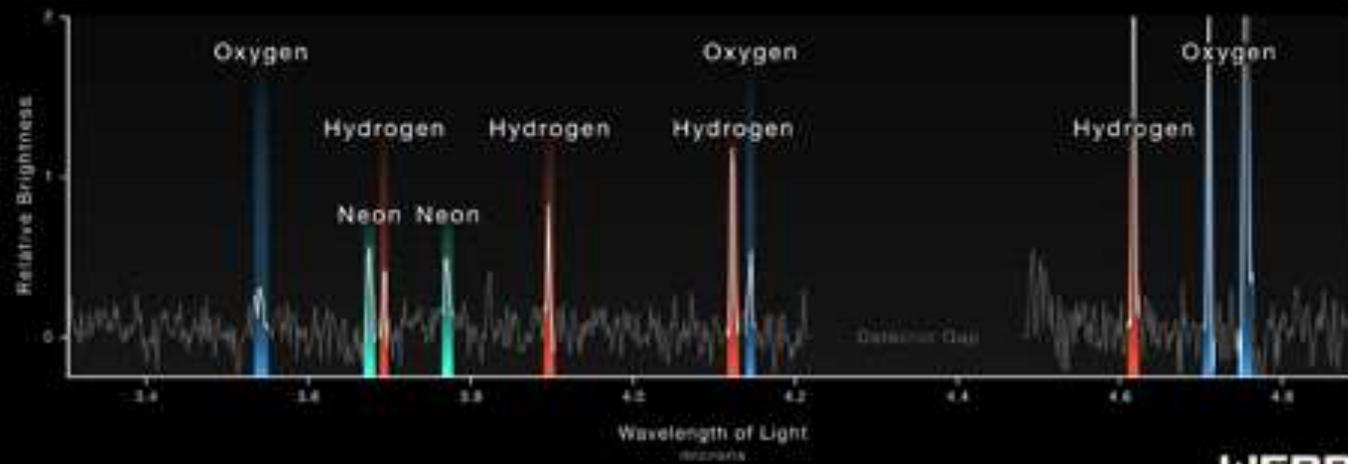
DISTANT GALAXY BEHIND SMACS 0723

# WEBB SPECTRUM SHOWCASES GALAXY'S COMPOSITION

NIRCam Imaging



NIRSpec Microshutter Array Spectroscopy



**WEBB**  
SPACE TELESCOPE

# Bibliographie

- [1] Cours imagerie IR Thierry Midavaine (IOGS, ESPCI, EUROSABE)
- [2] Documentations Lynred
- [3] Le JWST article association Alumni IOGS aout 2022 Thierry Midavaine
- [4] Le JWST Jean-Pierre Martin
- [5] Le JWST un autre regard sur l'Univers conférence Patrick Lécureuil
- [6] numéro spécial de Photoniques n°117 decembre 2022
- [7] L'optique Diophantienne Lesia Daniel Rouan  
<https://lesia.obspm.fr/perso/daniel-rouan/OptiqueDiophantienne/definitions.html>
- [8] Teledyne conférence SPIE
- [9] First Light Imaging

Crédits photo : BlackGEME, NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), NASA STScI, ESA, CSA, Teledyne, Raytheon Vision System, Airbus, CEA - Saclay Paris Tech Photoniques, Lynred, First Light Imaging et Thierry Midavaine