



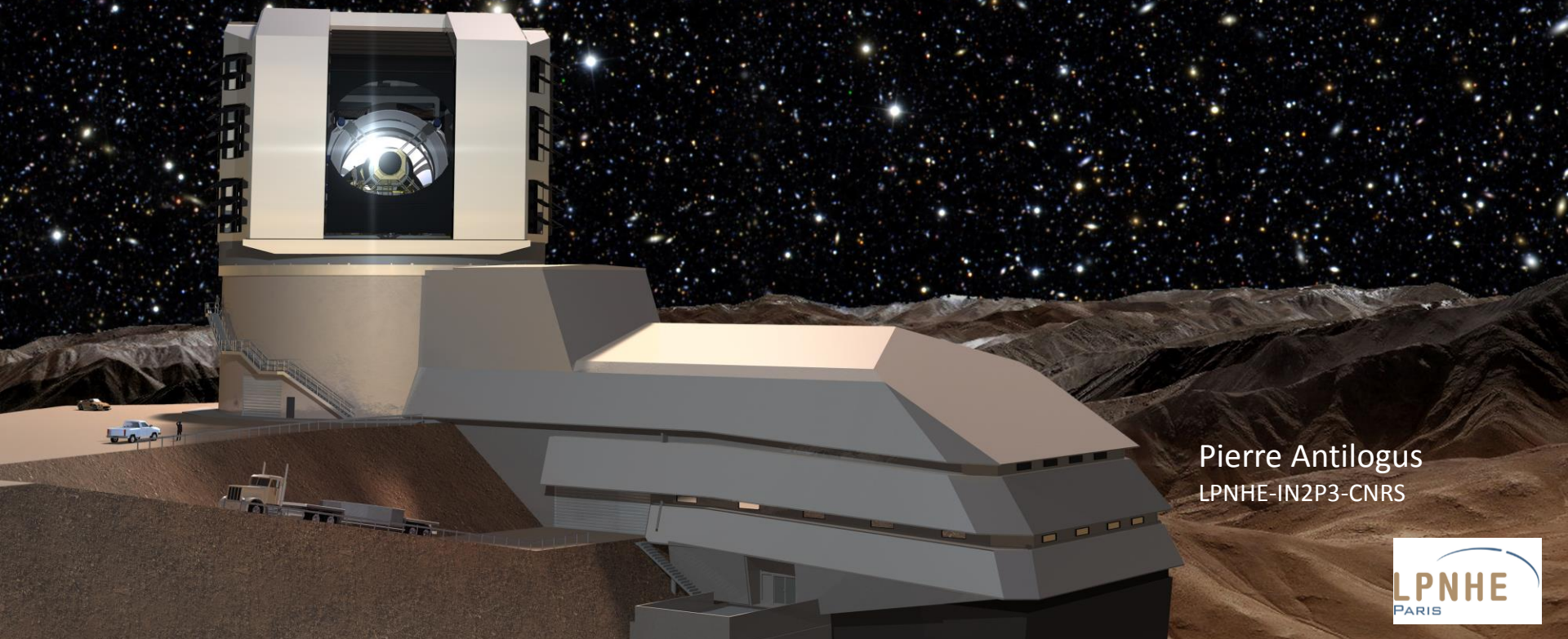
Journée thématique du réseau détecteurs semiconducteurs IN2P3 – IRFU

Les détecteurs à pixels

Jeudi 31 mai et vendredi 1^{er} juin 2018
Amphithéâtre du LPSC, Grenoble



La R&D pour les CCDs dédiée à l'astronomie



Pierre Antilogus
LPNHE-IN2P3-CNRS



1) DETECTEURS EPAIS

LE CONTEXTE :

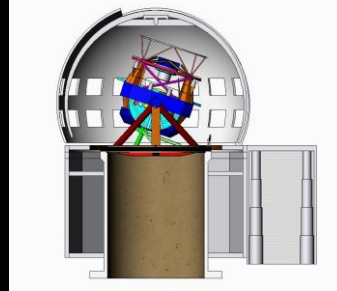
VOIR PLUS LOIN , FAIRE PLUS VITE , VOIR PLUS GRAND



Hubble

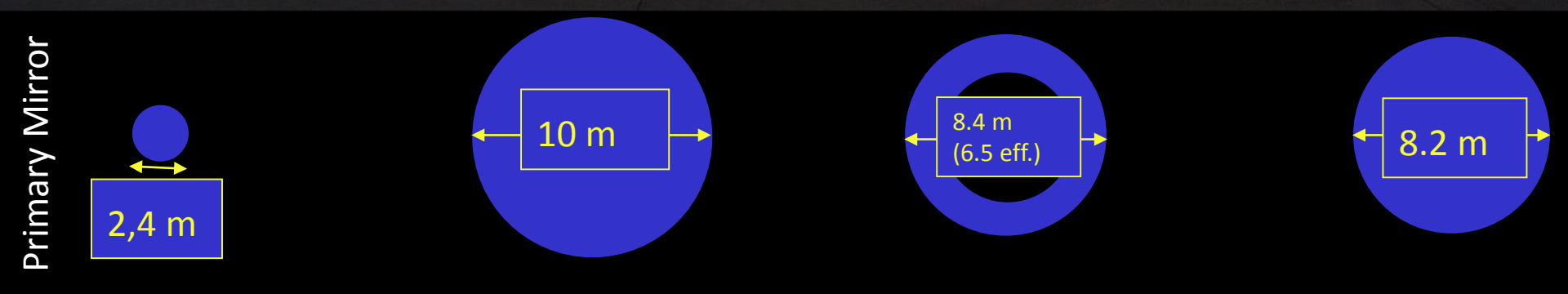
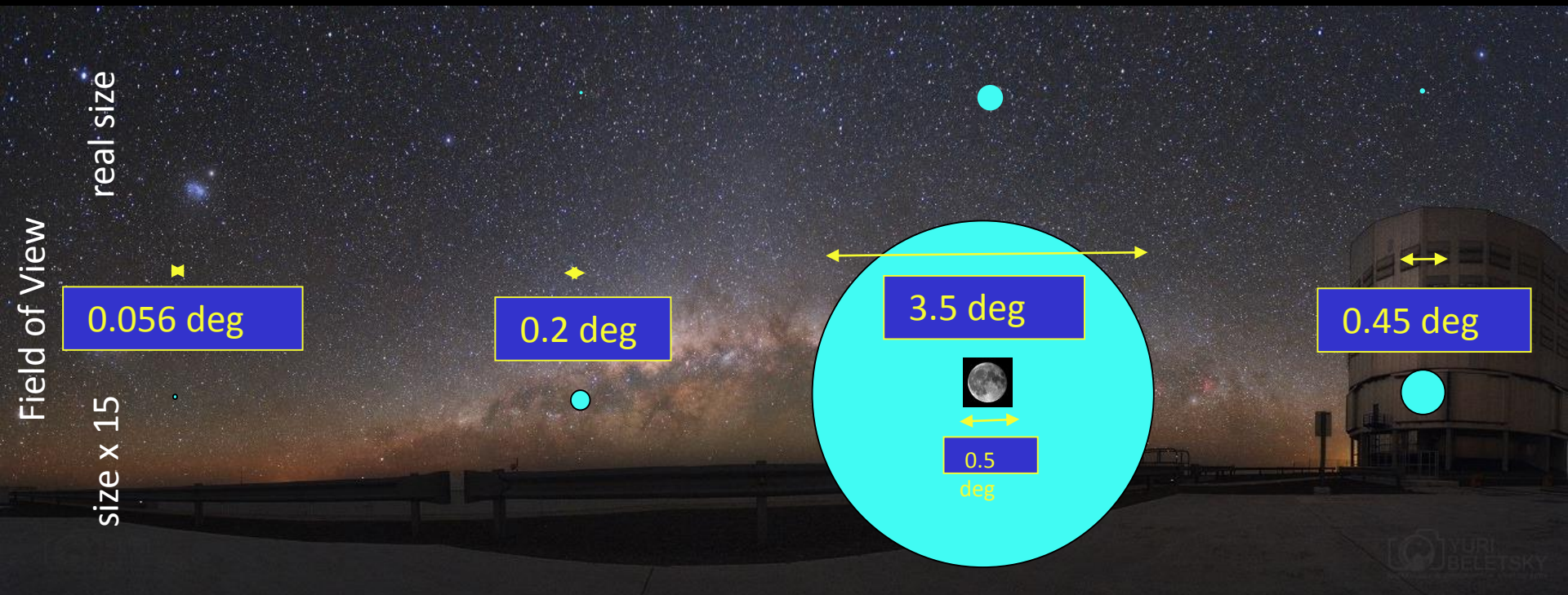


Keck

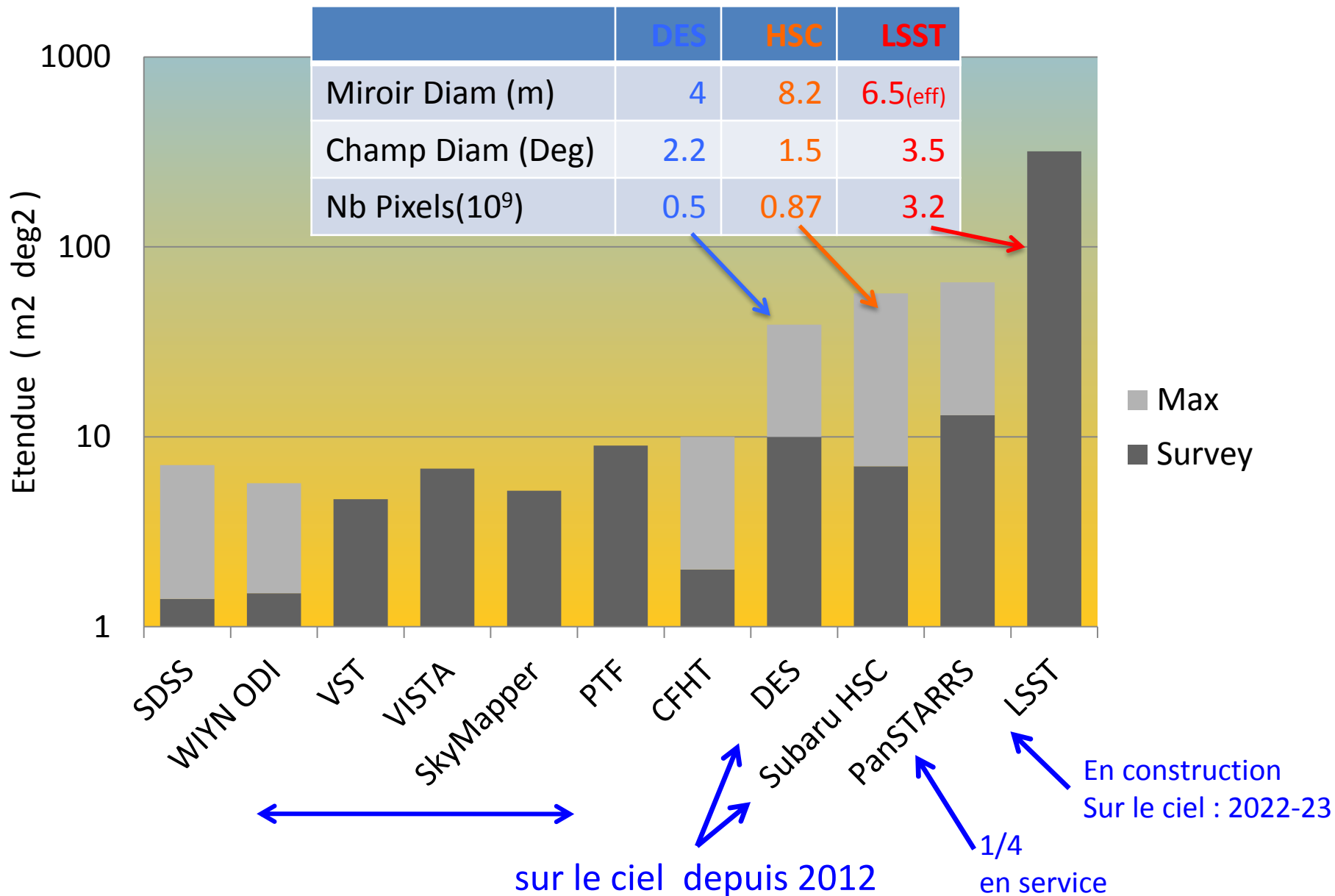


LSST

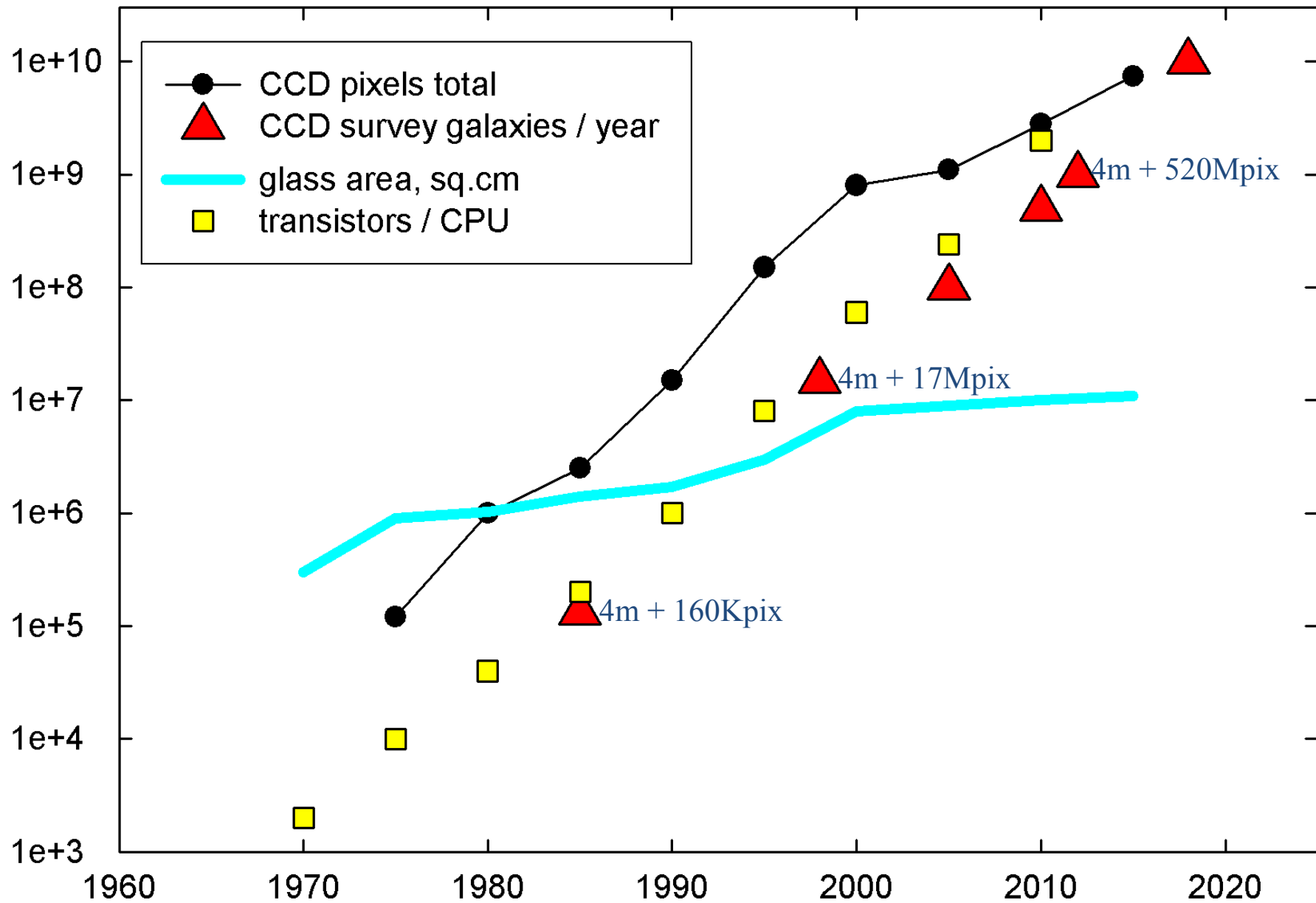
VLT



Etendue pour quelques telescope+camera (sol)



Trends in Optical Astronomy Survey Data



Tendance dans le développement de télescope grand champ

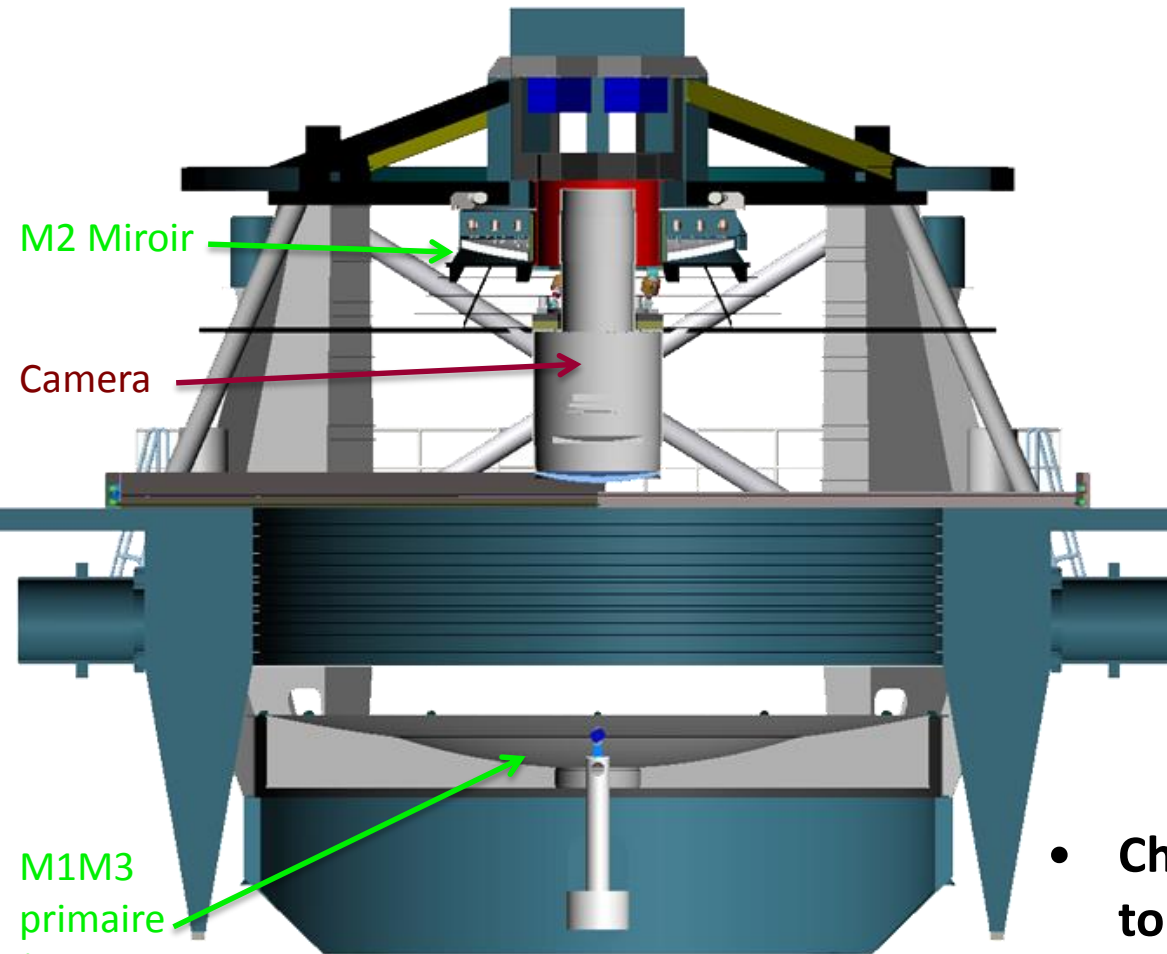
l'objectif : maximiser le volume d'univers sondé , et pour cela

- Augmentation de l'Etendue par
 - Une faible augmentation de la surface des miroirs
 - Forte augmentation du champs de vue / pixels de la camera
 - Augmentation du temps dédié aux relevés systématiques
 - LSST est le premier programme de cette taille avec 1 programme de relevé unique 100% du temps
- LSST = 1 telescope + 1 camera + 1 programme d'observation
- Minimiser les temps mort : ex limiter au maximum le temps de lecture des CCD
 - Voirs plus loin = voir plus rouge (= sensible proche IR $\sim 1 \mu\text{m}$)

Evolution associée pour les détecteurs →

- Wide / Large → Vers un nombre toujours plus important de pixel/détecteurs
- Fast / Rapide → Vers une vitesse de lecture plus rapide
- Deep/Profond → vers une sensibilité étendue UV-IR (360 nm – 1070 nm)

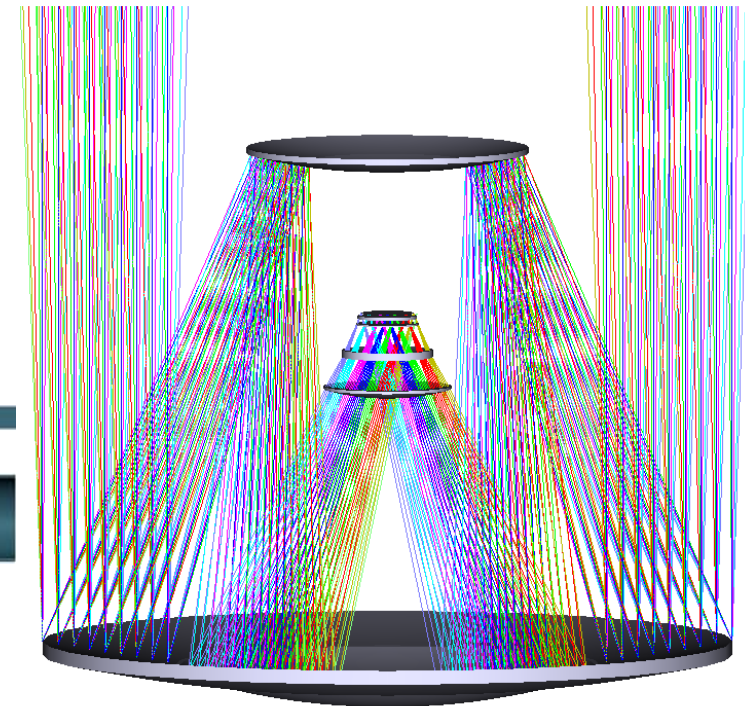
LSST Etendue : $319 \text{ m}^2 \text{ deg}^2$



M1M3
primaire
(8.4m,
6.7m
effectif)
& Miroir
tertiaire

Structure de 350 tones
60 tones de système optique

Concept Paul-Baker Optical modifié



- Change de pointé dans le ciel toutes les 39 seconds
- Se deplace de 3.5° vers le champ voisin en ~ 4 seconds

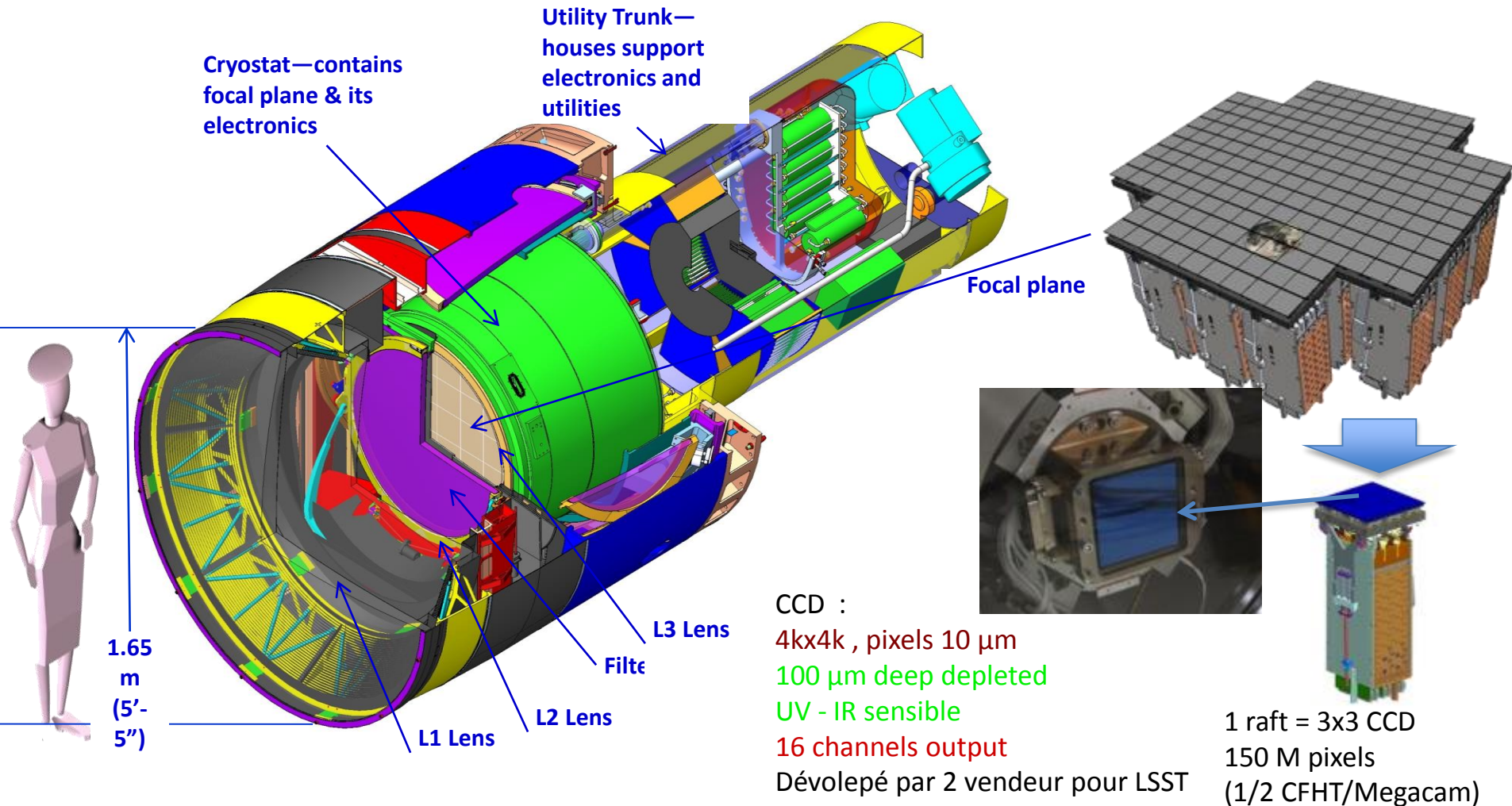
LSST : Wide , Deep and Fast

(2/2)

Champ de vue : 3.5 deg (9.6 deg² = .023% du ciel ~ 40 fois la lune)

Diameter du plan focal : 64 cm ; 189 science CCD (21 rafts)

3024 canaux de lecture >3 10⁹ pixels ; Lecture en 2s



LSST volume de données : 1 nuit ~ 15 TB ...
et en 10 ans :

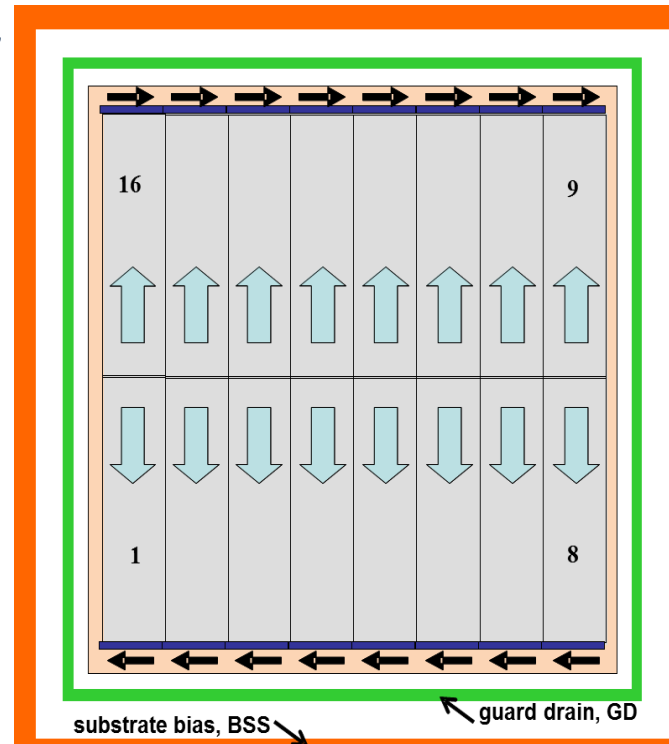
Nombre d' objets	$\sim 37 \cdot 10^9$ (20 10^9 galaxies /17 10^9 stars)
Nombre de mesures (forcées)	$\sim 37 \cdot 10^9 * 825 \sim 30 \cdot 10^{12}$
Nombre moyen d'alerte par nuit	$2 \cdot 10^6$ (10^7 avec le plan galatique)
Volume de données collectées per 24 hr	~ 15 TB
Volume d'image brute final	24 PB
Volume disque final	0.4 EB (400 PetaBytes)
Taille finale de la Base de donnée	15 PB

2) DETECTEURS EPAIS

EXEMPLE, LES CCD DE LSST

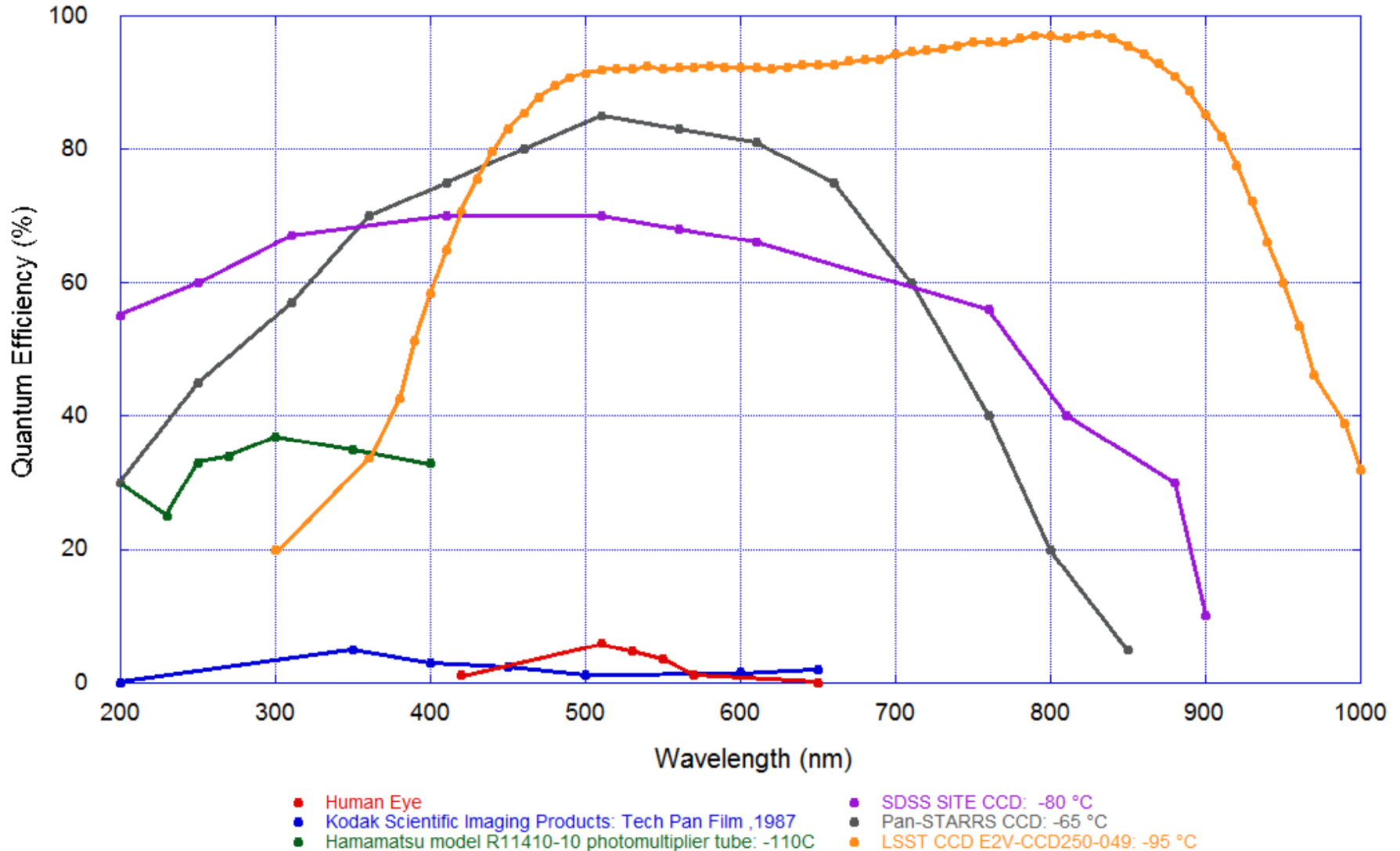
Les Detecteurs de LSST (1/2)

- Epaisseur $100\mu\text{m}$ (= sensibilité à l'IR)
- Si haute résistivité (nécessaire pour avoir un champ de dérive dans les 100mm) , fully-depleted
- une fenêtre d'entrée conductrice (pour imposer le champ de substrat / dérive) + un coating UV- IR + back-illuminated
- *Sensible dans un grand domaine optique + faible distorsion par diffusion*
- Format : 4K x 4K + 4 die sites/6" wafer + 16- sorties en //
- température de fonctionnement -100C
- suppression du courant d'obscurité
- *Lecture faible bruit ($< \sim 9 e^-$) en 2s*
- Taille de puits importante ($< 120 ke^-$)
- *Grande dynamique*



CCD épais → sensibilité augmentée dans l'IR

Wavelength versus Quantum Efficiency



Les Detecteurs de LSST (2/2)

- Pixels de $10\mu\text{m}$
 - ➔ *Petits pixels pour minimiser la taille de la camera / l'ombre sur le miroir / la taille de l'optique*
- Package Buttable : 92% fill factor
 - ➔ Minimiser les zones mortes
- faisceau rapide (f/1.2 beam)
- tolérance de planéité du plan focal / CCDs co-planaire à $\pm 10\mu\text{m}$!
 - ➔ Forte contrainte de con-focalité
- Format de senseur spécifique + interface fixe
 - ➔ Interchangeabilité entre # vendeurs

Chacun de ces paramètres / contraintes n'est pas unique/nouveau ...mais les mettre tous ensembles a été un challenge et rends la production lente , difficile et couteuse .

➔ $\sim > 4$ ans de R&D + développement chez 2 vendeurs

L'électronique de lecture

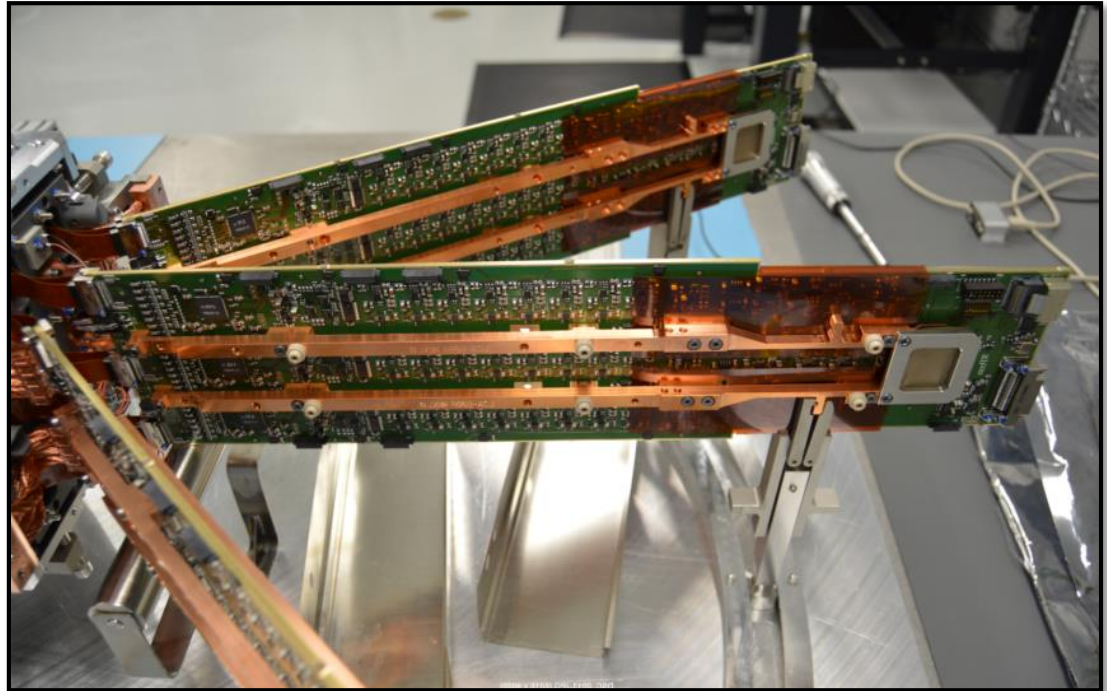
1 raft :

- 9 CCD
- 144 canaux video



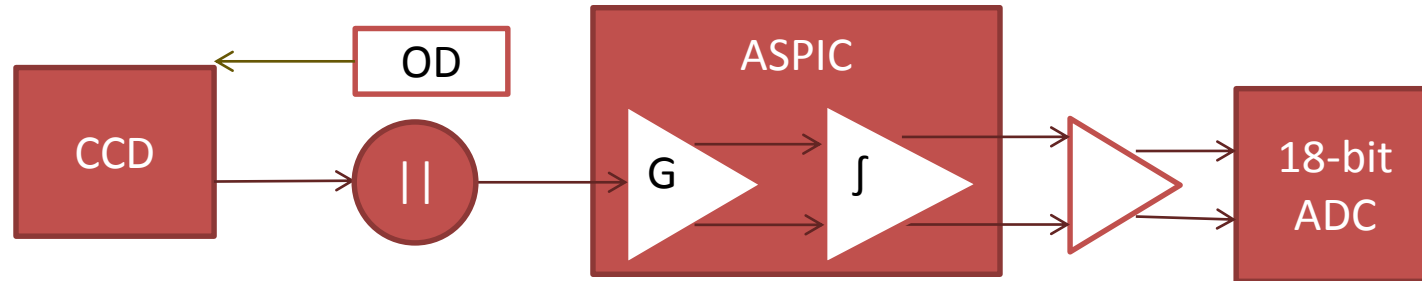
Effort important pour développer la chaîne de lecture :

- Fonctionne dans le cryostat (minimise les longueurs de câble)
- Rentre sous l'empreinte du détecteur
- Rapide / bas bruit / compact / faible X-talk ($\sim 10^{-5}$!!)



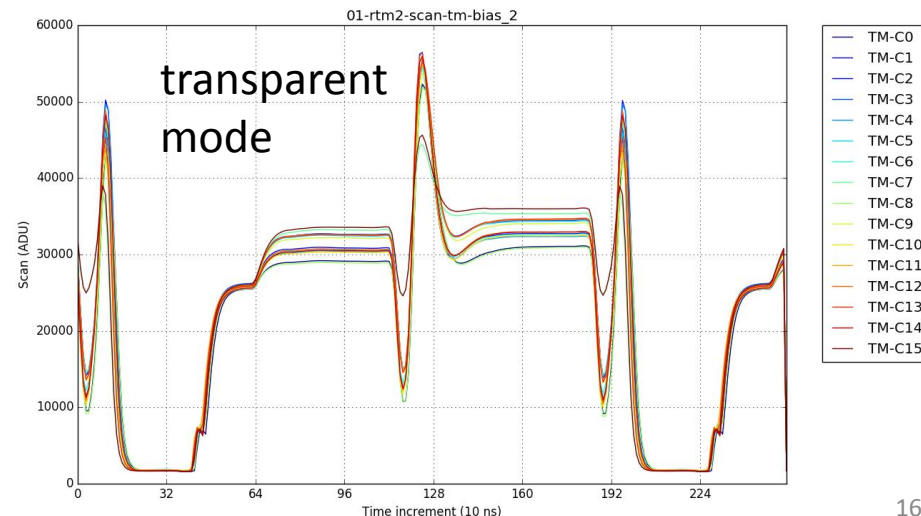
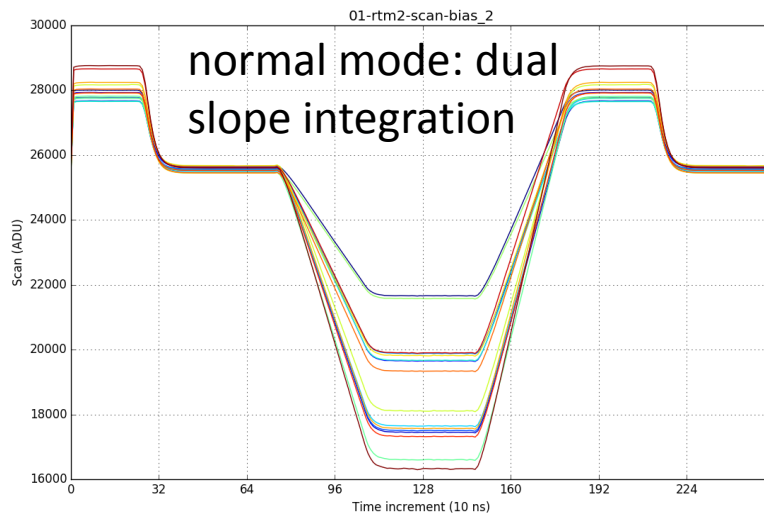
Un point clef du développement de cette électronique a été d'y inclure des capacités poussées de diagnostic , ainsi la chaîne vidéo peut se transformer en scope numérique 18 bits avec un échantillonnage de 10 ns , afin d'analyser finement la sortie des CCD .

Lecture CCD : Chaine Video "REB" (RAFT Electronic Board)



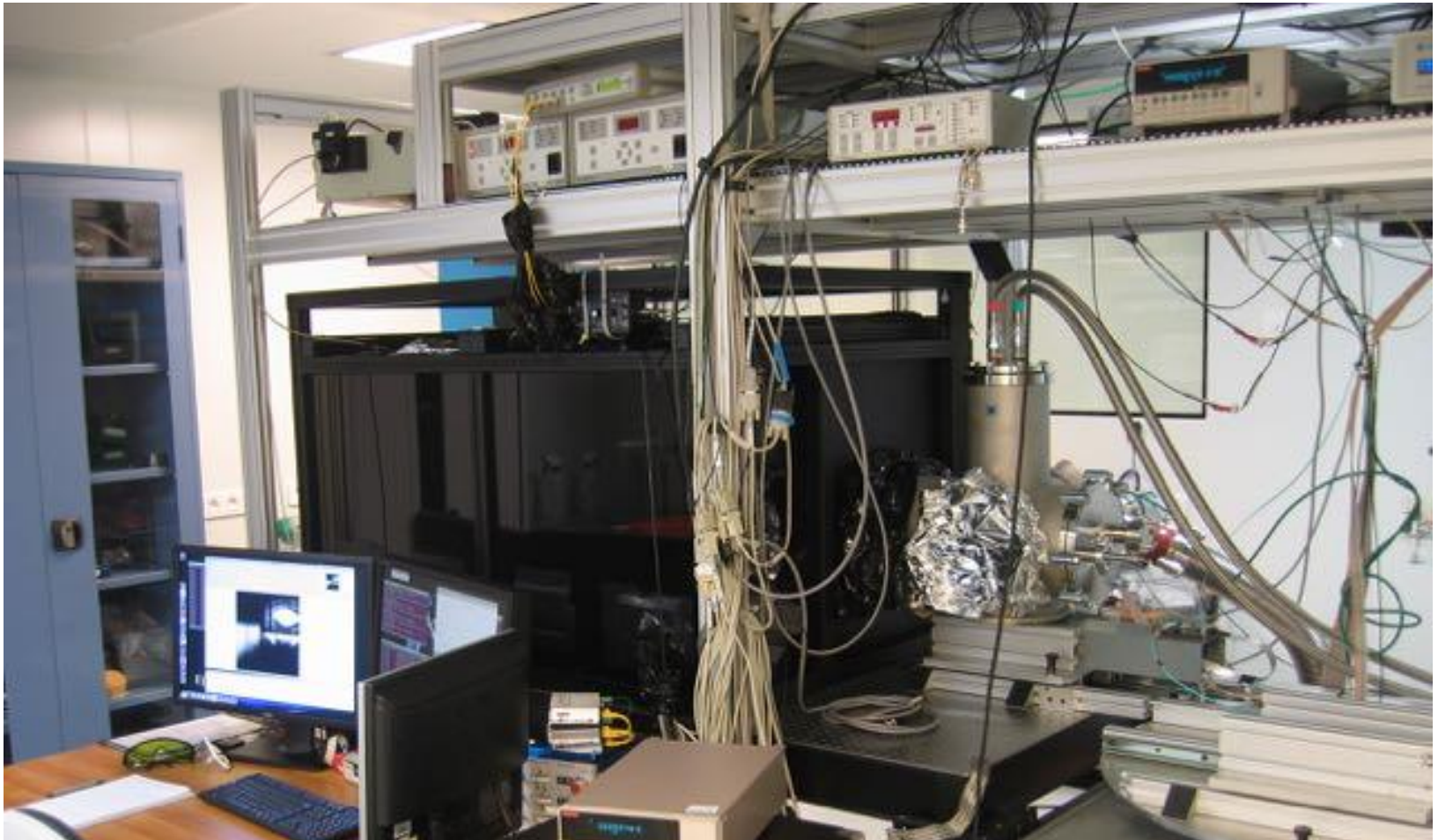
- ASPIC: Analog Signal Processing IC: amplification (x1.5-6.6), Dual Slope Integration et sortie différentielle
- "Transparent Mode" contourne l'étage d'intégration : la sortie de l' ASPIC devient un replica de la sortie CCD CCD
- L'acquisition se fait à travers la chaine video (18-bit , bas bruit)
- La lecture d'un pixel (2 μ s) , peut être décalé d'un pixel à l'autre , transformant la chaine video en scope numérique avec un résolution de 10 ns

Note: ADU value increases
when OS voltage decreases



Les CCD : un produit « artisanal »

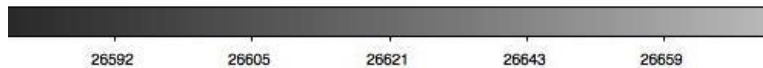
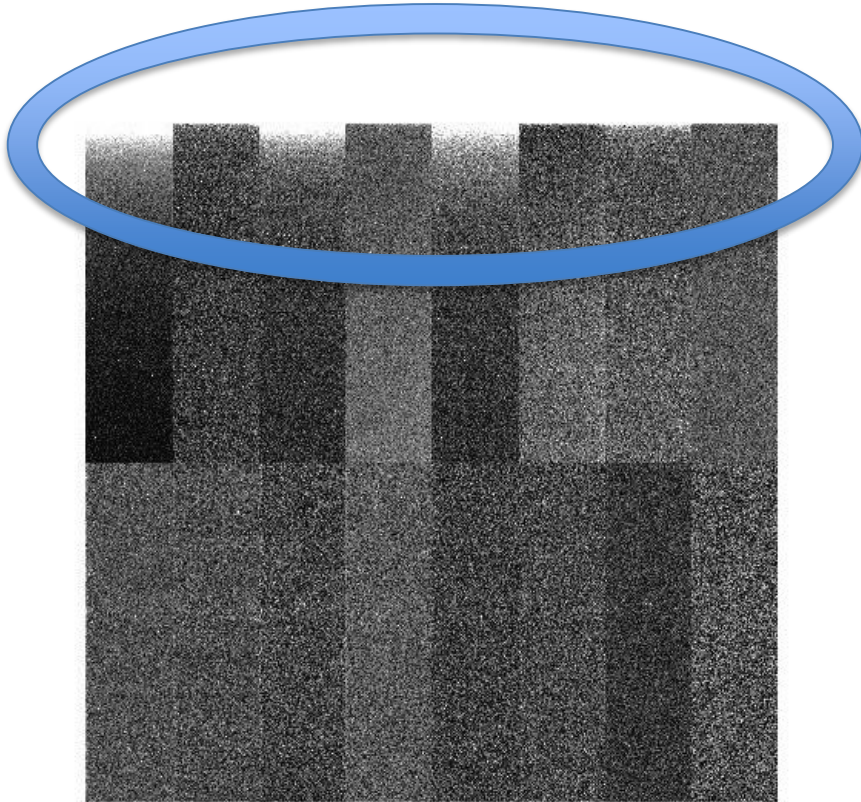
- Le comportement des CCD reste très individualisé .
- Les CCD épais sont récents et présentent encore des « surprises »
- Un effort important d'étude de ces détecteurs a été réalisé dans LSST afin d'optimiser leur utilisation / comprendre leur signaux.
- Un banc dédié , pour l'étude fine de ces CCD et optimiser leur lecture a été monté au LPNHE-Paris



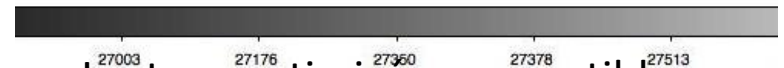
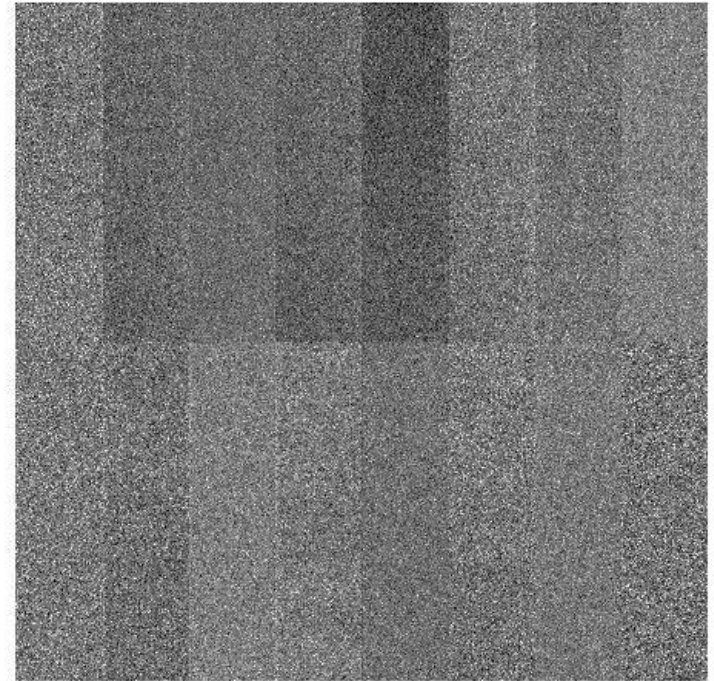
Quelques exemples de « feature » : Bias Drift

Quelque chiffre clefs : lecture 1 pixel : $2\mu\text{s}$, lecture 1 ligne 1 ms

Une dérive de la ligne de base de la sortie du CCD pendant les ~ 10 1^{er} lignes , a été observée chez un des vendeurs → nécessité de faire un flush de quelques ms du registre série avant de démarrer la lecture proprement dite.

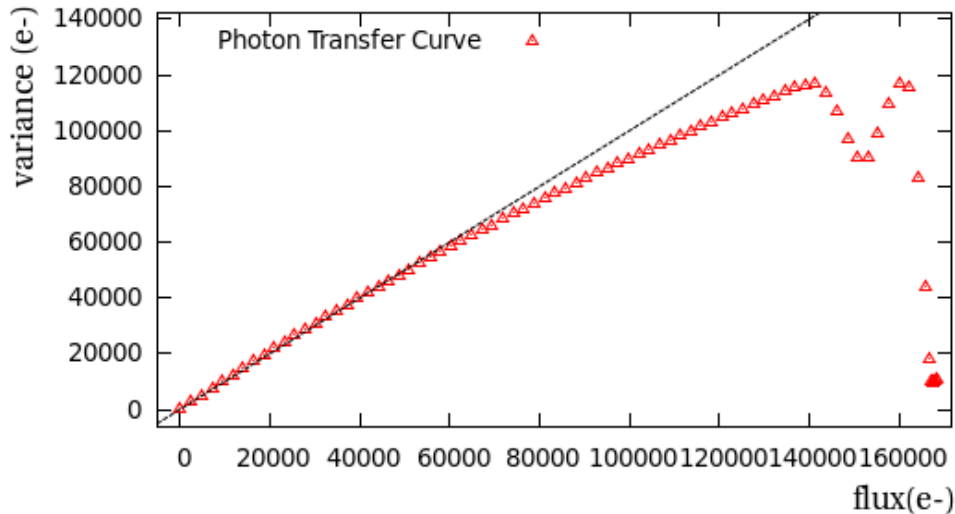


Lecture Standard



Lecture optimisée, compatible
avec l'électronique de LSST

Brighter-Fatter (1/2)



Les CCD en général et épais en particulier, présentent un problème identifié depuis les début des années 2000 :

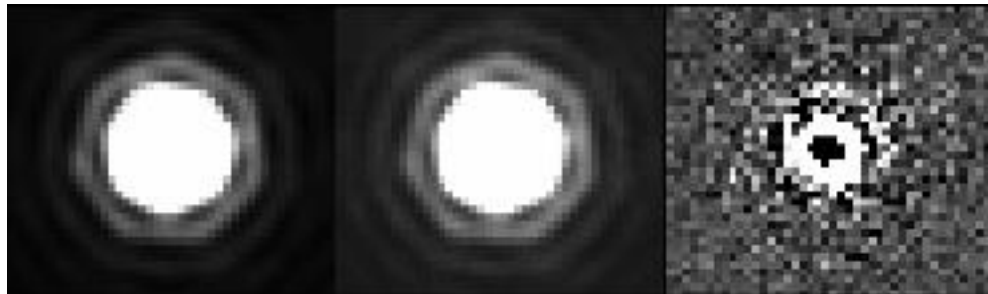
Dans les CCD “la variance brute” \neq flux
Cet écart apparent est due à des corrélations entre les pixels dans les Illuminations uniforme (Downing & al)

Le même effet distord la forme de spot / des étoile :

Une étoile brillante (Brighter) est plus “grosse” (Fatter) que un objet moins lumineux .

La corrélation entre les pixels « lisse » la forme du spot

(P.Antilogus, P.Astier, A.Guyonnet & al)



Gauche : 200-s spot; centre Σ 10x 20-s spots;
droite : différence.

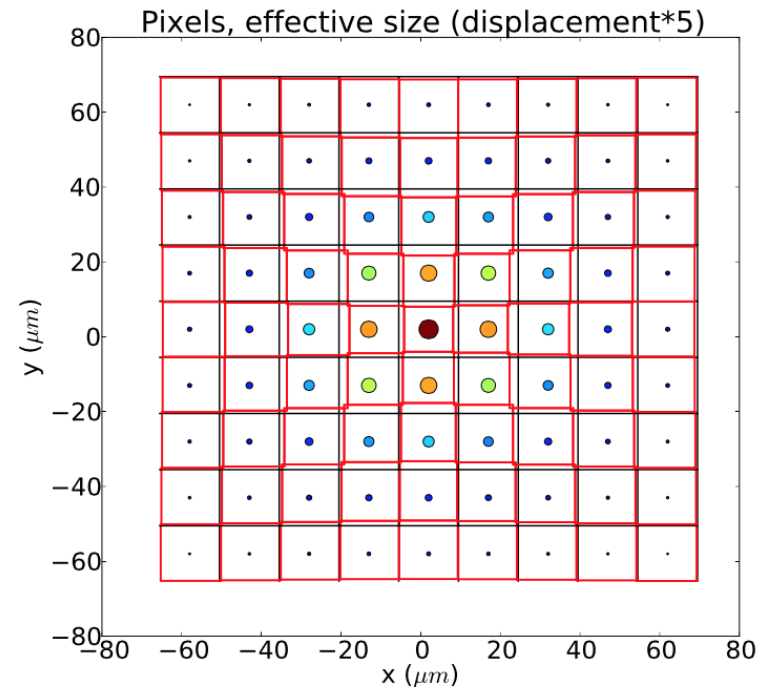
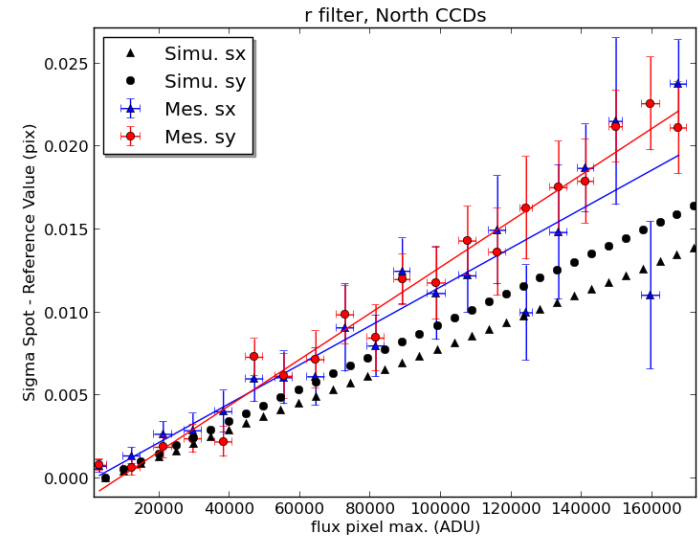
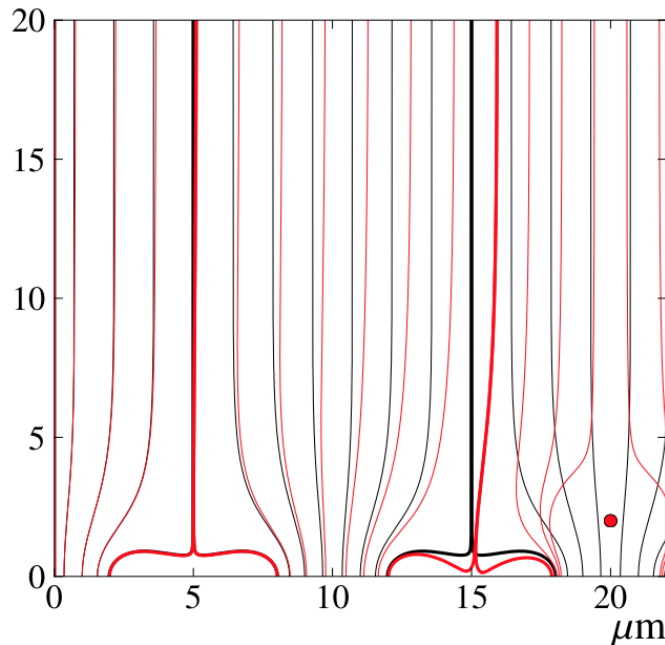
Avec le flux augmentation des ailles et diminution du pic \rightarrow effet Brighter-Fatter

Brighter-fatter (2/2)

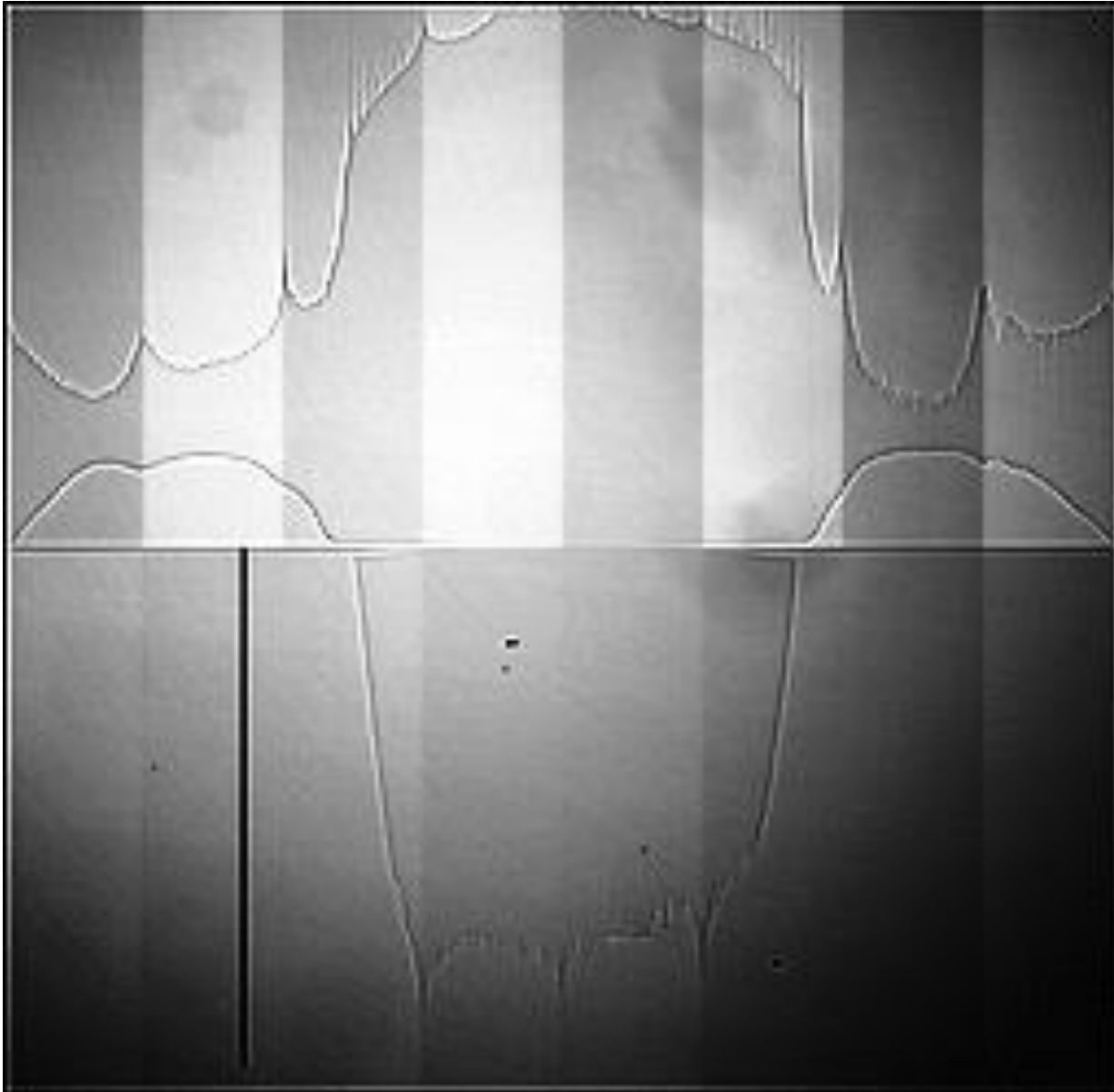
La psf pour des objets faibles-brillants
(donnés sur ciel de DECAM)

L'effet est compris comme l'impact sur le champ de dérive vu par les électrons des charges déjà collectées .

Ces charges (effet "répulsif") change la taille effective des pixels et génère une corrélation entre pixels



Tearing → Les trous issues de la pose précédente et non-évacués perturbent la collecte/lecture des images suivantes

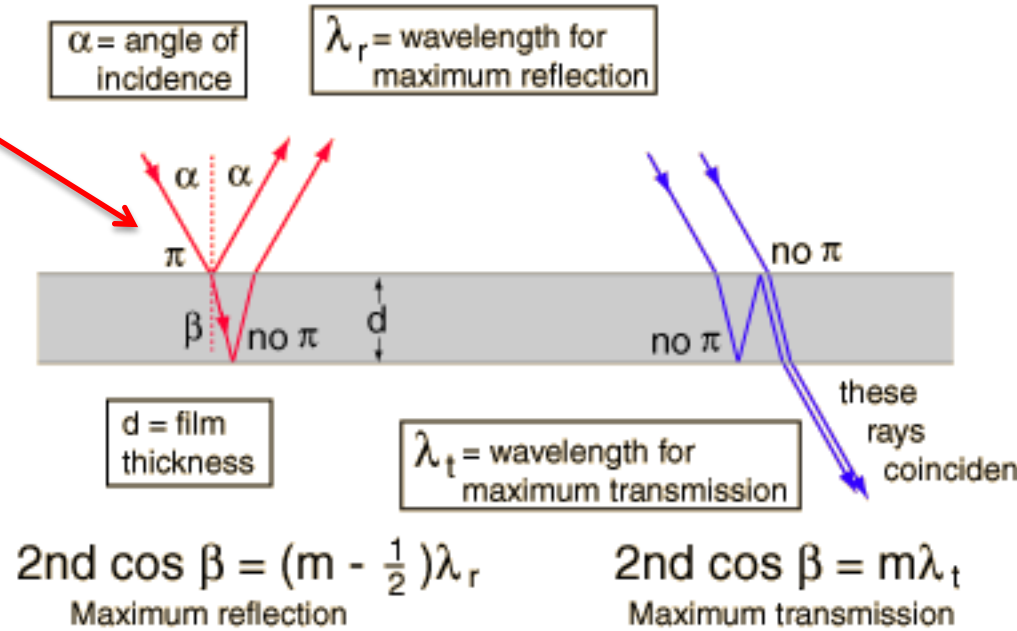


Mitigation : des contraintes sur les tentions et les séquences de lecture et de clear

.

What do we see ?

- There is in fact 2 options to make fringes in a CCD :
- The beam reflect on both side of a thin layer (ex isolation layer of SiO_2 at the bottom of the Si , d is the thickness of this layer $\ll 1 \mu\text{m}$)
- The beam reflect on both side of the CCD Si and interfere with the entering beam (then d is the thickness of the ccd $\sim 100 \mu\text{m}$)



We can directly measure the size of the layer by measuring the fringes at different lambda : you'll go through a full fringe (ex : bright to bright) for

$$\delta \lambda / \lambda = \lambda / (2 n_{\text{si}} d + \lambda)$$

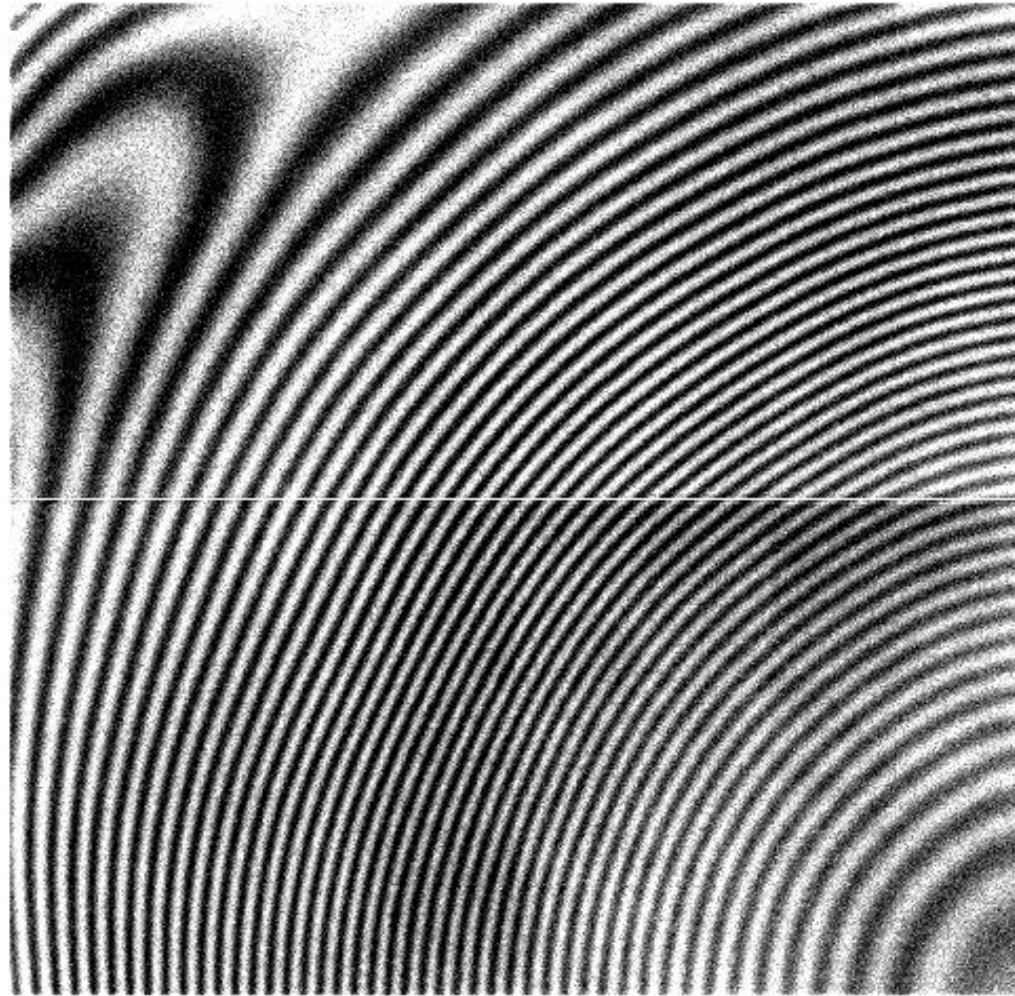
So for $100 \mu\text{m}$ and $\lambda = 960$,
 you got $\delta \lambda = 1.3 \text{ nm}$

LSST test bench data are taken by default with a monochromator beam open at 10 nm ...
➔ NO WAY YOU CAN SEE FRINGES FROM $100 \mu\text{m}$ Si WITH SUCH SETUP

Mesure directe de l'épaisseur de la couche mince produisant les franges

Données de 960 nm à 1010 nm , avec un pas de 2nm and et une fente ouverte à ~ 2.5 nm

On en déduit une épaisseur des couches minces de ~ 10 μm ???



3) LE GERMANIUM : UNE OPTION INTÉRESSANTE

Germanium Charge-Coupled Devices for SWIR and X-Ray Imaging

C. Leitz, S. Rabe, I. Prigozhin, M. Zhu, B. Burke, K. Ryu, M. Cooper, R.
Reich, K. Johnson, W. Hu, B. Felton, M. Cook, C. Stull, V.
Suntharalingam

September 27, 2017



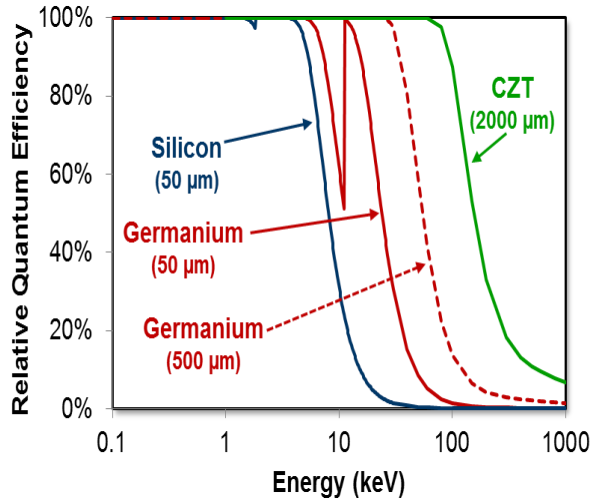
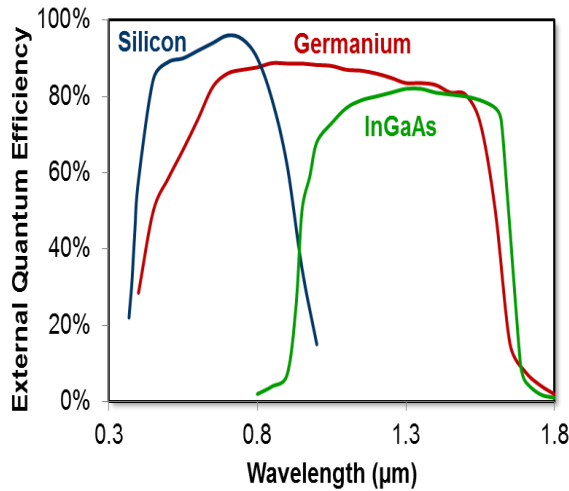
This material is based upon work supported under Air Force Contract No. FA8721-05-C-0002 and/or FA8702-15-D-0001. Any opinions, findings, conclusions or recommendations expressed in this material are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the U.S. Air Force.

© 2017 Massachusetts Institute of Technology.

Delivered to the U.S. Government with Unlimited Rights, as defined in DFARS Part 252.227-7013 or 7014 (Feb 2014). Notwithstanding any copyright notice, U.S. Government rights in this work are defined by DFARS 252.227-7013 or DFARS 252.227-7014 as detailed above. Use of this work other than as specifically authorized by the U.S. Government may violate any copyrights that exist in this work.

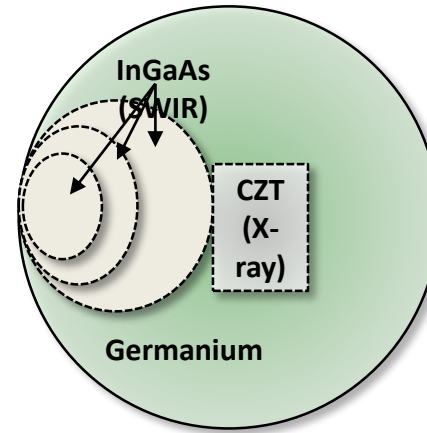
Motivation

SWIR & X-Ray Band Sensitivity [1-3]

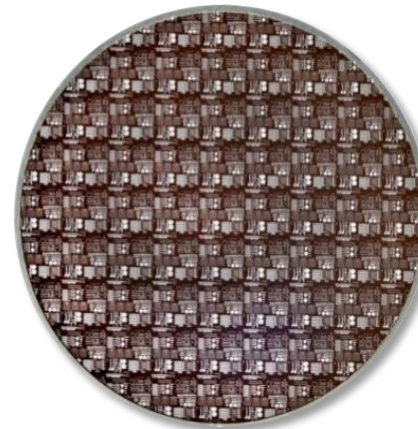


Disruptive Potential for Imaging in These Bands

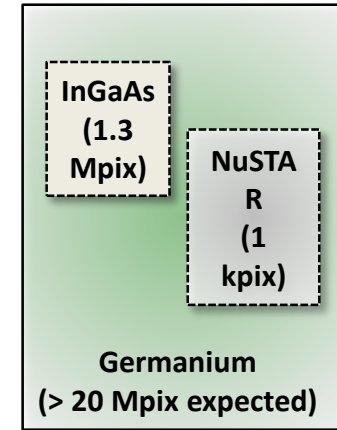
Wafer Size Comparison



200 mm



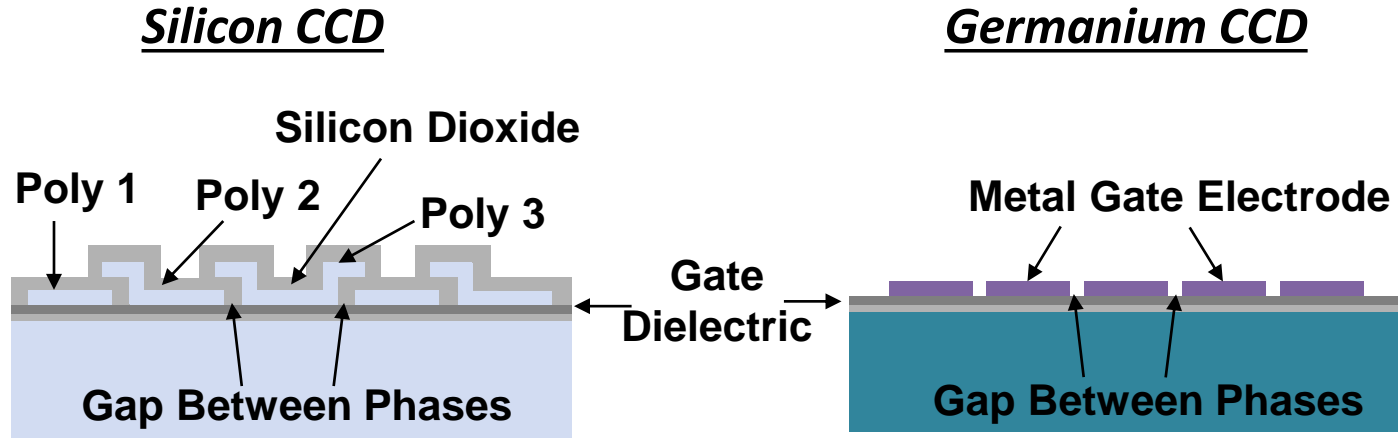
Sensor Size Comparison



5 cm

- High-quality gate dielectrics enable CCDs
- No bump-bonding required
- Compatible with Si CCD tool set

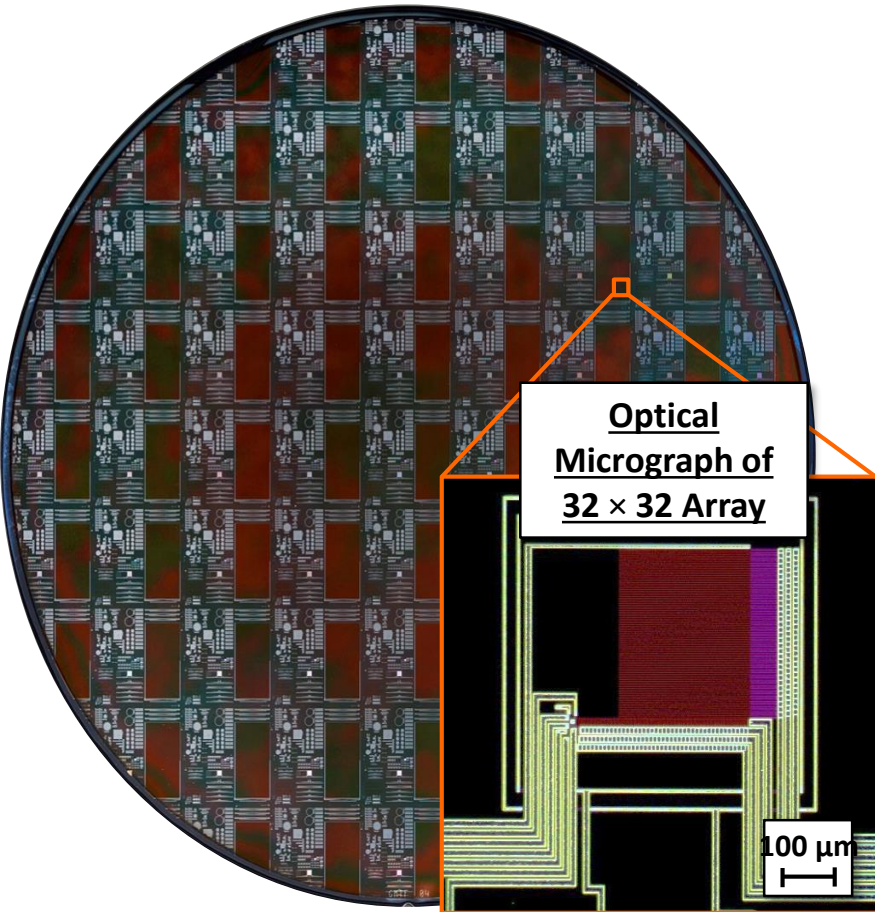
Germanium CCD Fabrication Challenges



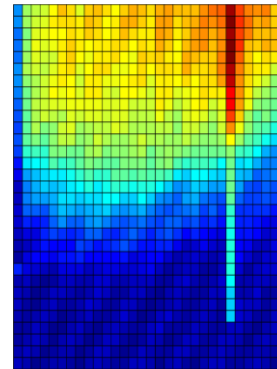
Fabrication Challenge	Mitigation Plan	Other Alternatives
Cannot use overlapping poly-silicon process to define phases	Single-level CCD	Low-temperature fabrication processes
Charge transfer inefficiency due to large gap between phases	248-nm lithography to define sub-300 nm gap	193-nm or e-beam lithography
Low sensitivity in front illumination due to metal shading	Back illumination	Engineered substrate for rapid prototyping
Column isolation	Dopant-based isolation	Develop LOCOS process

Demonstration en 2017 avec $32 \times 32 \times 8.1 \mu\text{m}$ Array

operable pixel arrays at -60°C

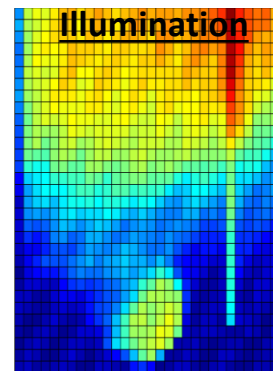


Dark Response



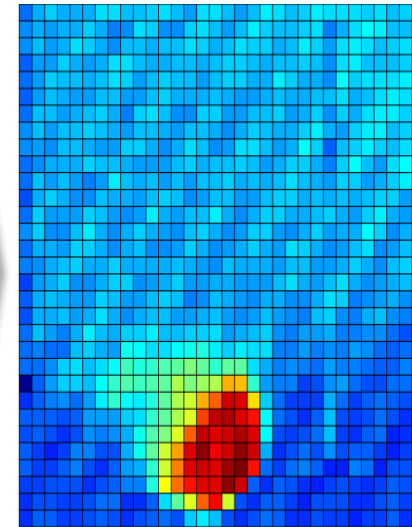
Scale: 4000-8000DN

**Red LED
Illumination**



Scale: 4000-8000DN

Subtracted Image



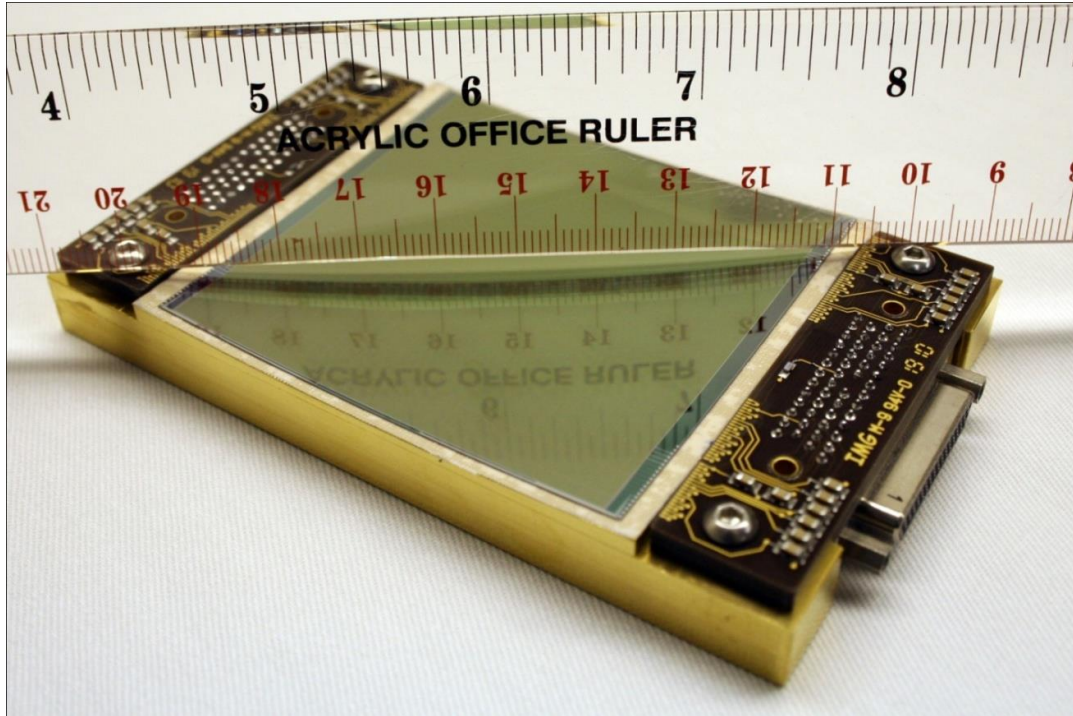
Scale: -500-2000DN

4) LES DETECTEURS COURBES : UNE AUTRE OPTION INTÉRESSANTE

Points clef des détecteurs courbes :

- **La complexité optique pour obtenir un plan focal plat à un cout :**
 - Financier
 - Poids (espace)
 - En performance , en particulier au niveau transmission optique
- **La courbure peut être fixe ou modulée , compatible ou non avec une utilisation cryogénique**
- **L'épaisseur du CCD est un facteur important**
- **Grande courbure / petite courbure avec des détecteurs petit / grand**
- **La précision de la courbure est un point délicat**
- **Grand public : cameras sans miroir / téléphone portable**

Milestone 2013 : ESO / ITL 1st CCD Astro courbe : 4k x 4k, 15 um detector

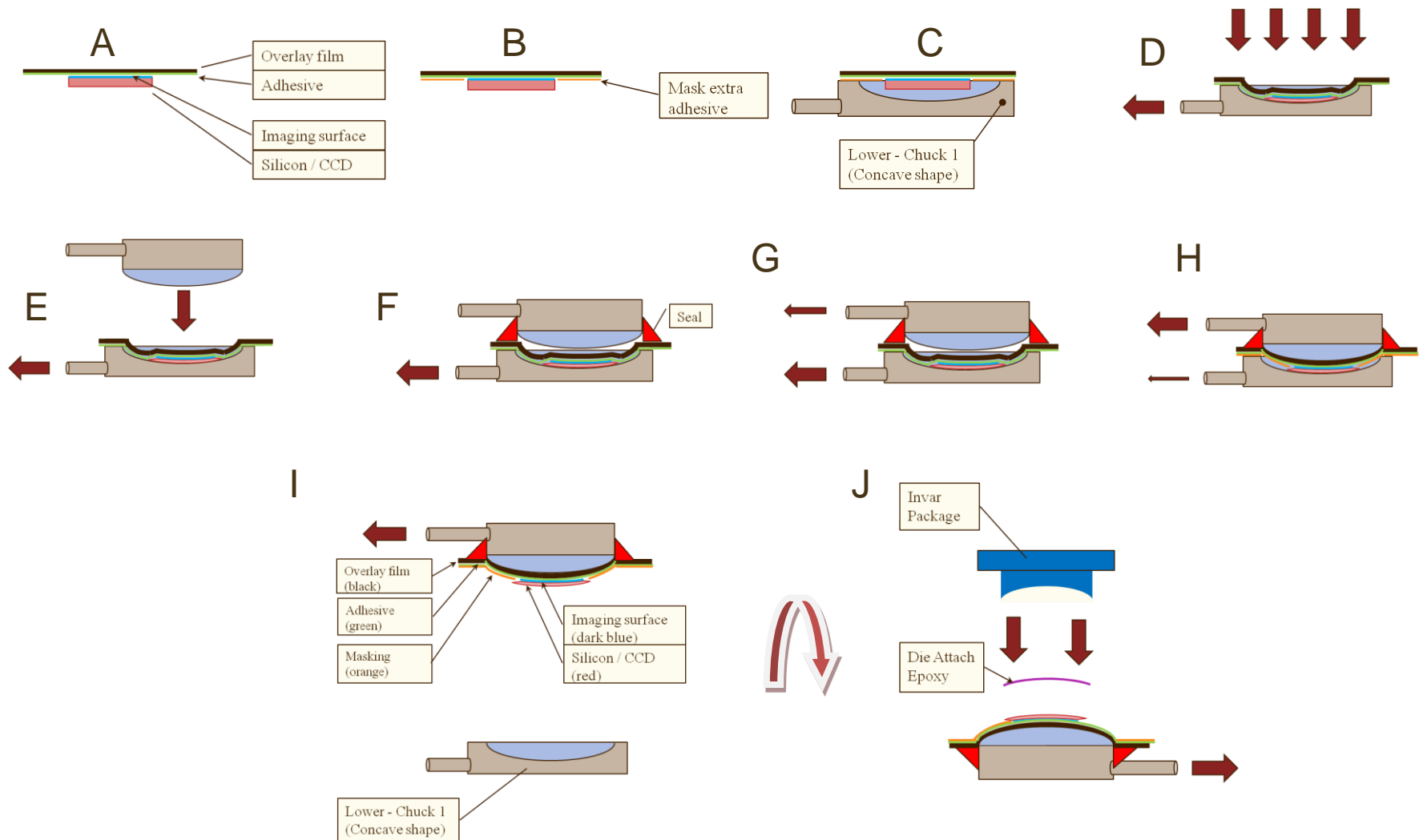


- 1st grand détecteur courbe
- Epaisseur $\sim 200 \mu\text{m}$, frontside
- Rayon de courbure : 500 mm
- Concave
- Fonctionne en Cryo, caractérisé avant et après avec des résultats similaires
- Courbé au delà de la limite connue

>> *Mike Lesser & Olaf Iwert*

ESO / ITL curving process: 2 Vac

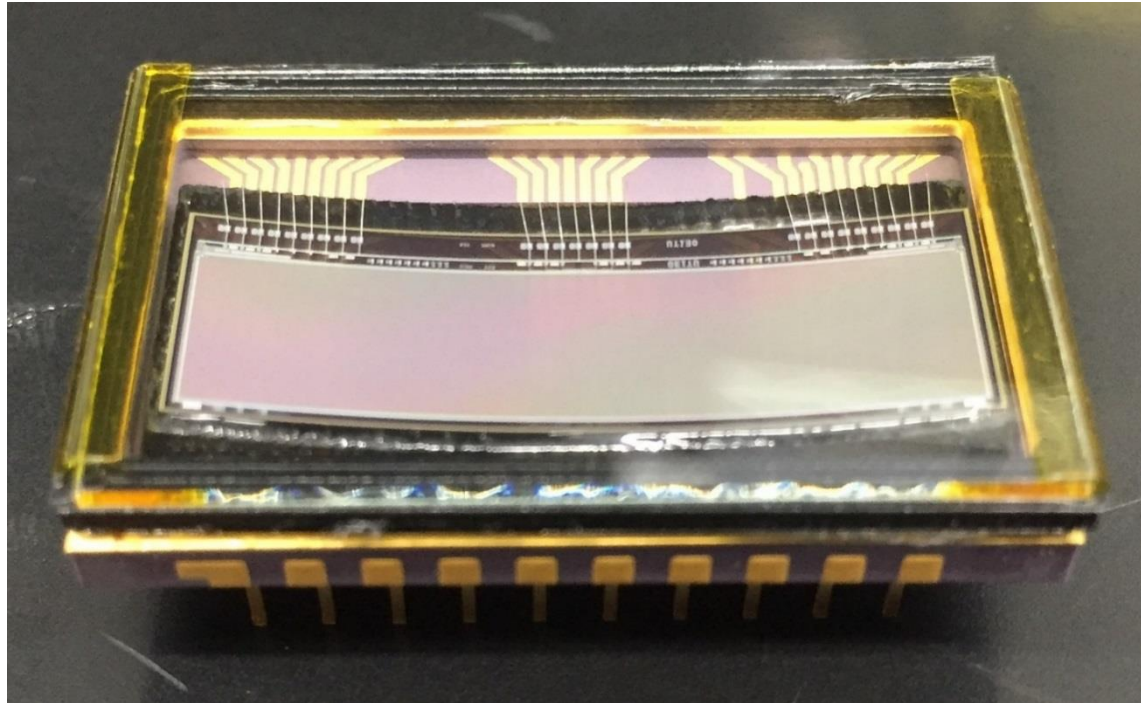
Overview of process steps:



E2V DEVELOPEMENTS

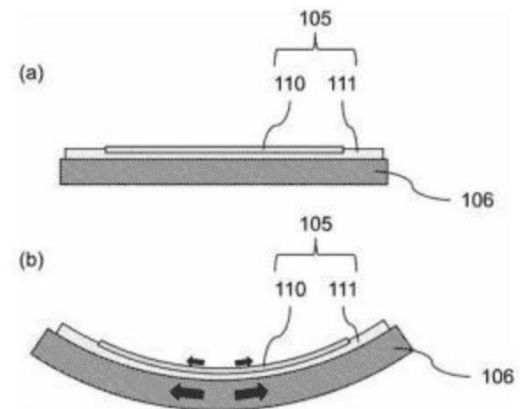
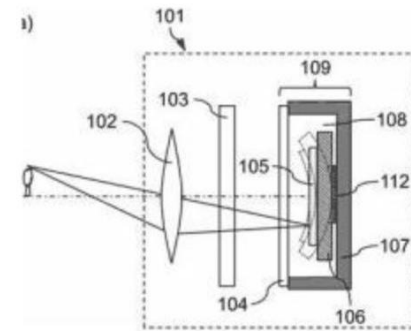
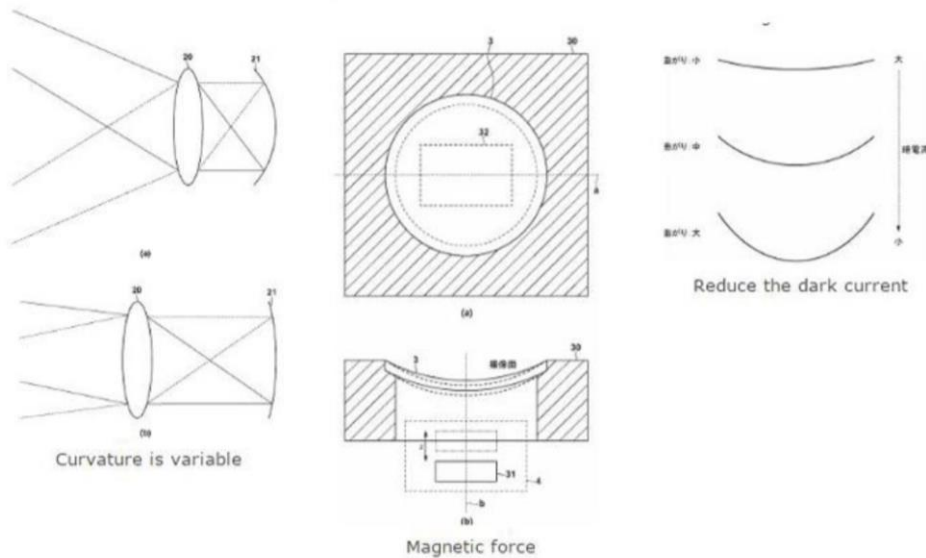
Demonstrateur:

- CCD30-11, frontfaced,
- Aminci à 150 μm
- [1024 X 256; 27 * 7 mm]
- Package en ceramique avec un insert courbe
- Courbure Cylindrique uniquement
- Rayon de courbure = 7 cm
- Plusieurs détecteur ont été fabriqué , d'autre vont suivre.

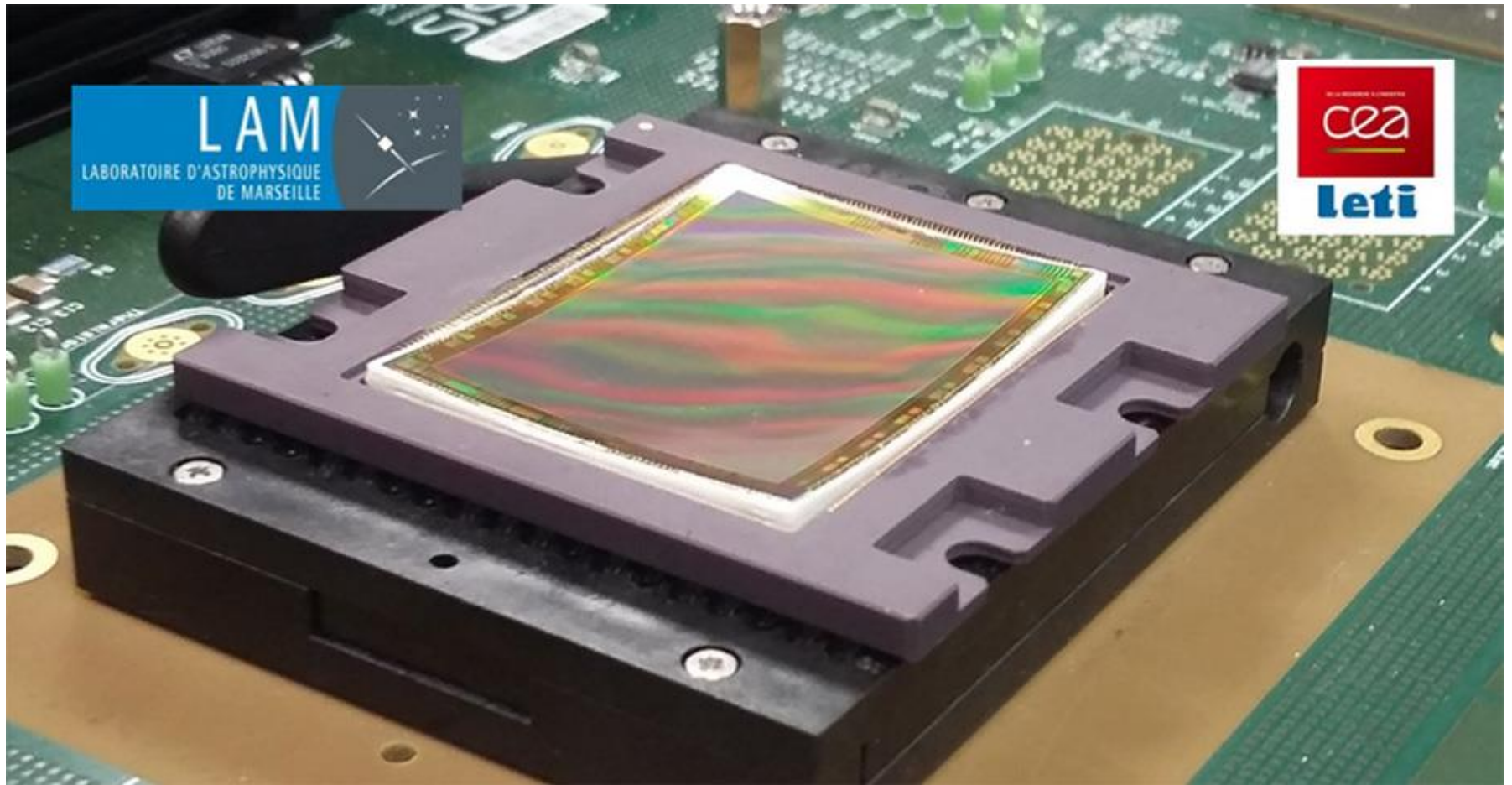


DEVELOPMENTS “Grand Public”

- Domaine très actif (Sony , Nikon, Canon, Toshiba, Apple , Microsoft)
- Ex : Canon , au moins 4 brevets récents sur les senseurs courbes
2016-173496; 2016-197603; 2016-201425; 2016-213571
- Modulation de la courbure au vol (magn./piezo)
- Reduction du courent d’obscurité



LAM / CEA / LETI DEVELOPMENTS



5) FABRICANT : QUELQUES NEWS

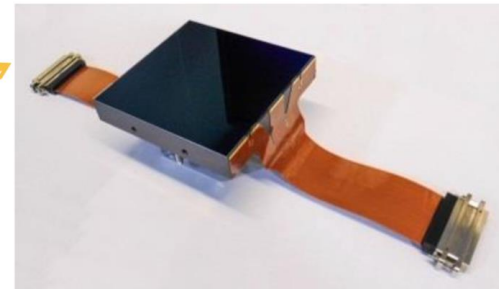
A suite of imaging CCDs for astronomy

Overview of “ground-based” sensors; Space sensors not included here

- CCDs of many formats and types available- see www.teledyne-e2v.com
- Standard products and custom variants

Key ones used for astronomy:

- | | | |
|-------------|------------|--------------------------|
| • CCD290-99 | 9K x 9K | Imaging/spectroscopy |
| • CCD231-C6 | 6K x 6K | Imaging/spectroscopy |
| • CCD231-84 | 4K x 4K | Imaging/spectroscopy |
| • CCD44-82 | 2K x 4K | Imaging/spectroscopy/WFS |
| • CCD47-20 | 1K x 1K FT | Guiders |
| • CCD220 | 240 X 240 | AO |



Also, deserves a highlight:

- CCD250 LSST 4K x 4K



Large area CCD performance

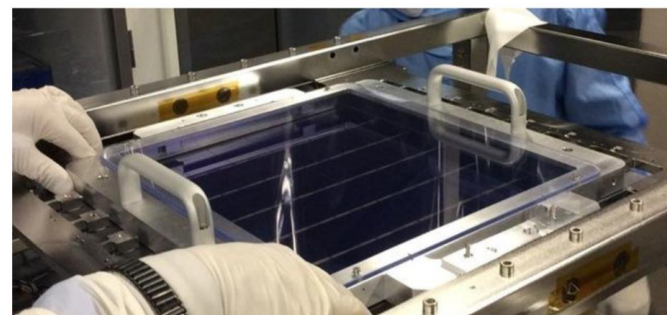
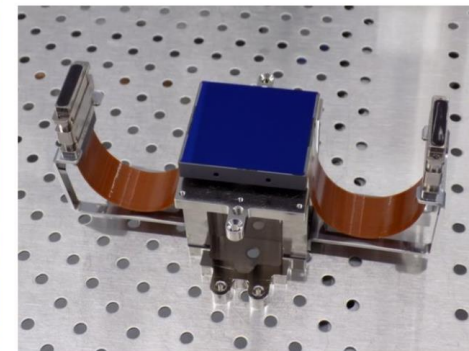


Space sensors- Euclid CCD273-84

MISSION: To map geometry of the dark universe.

- 4096 X 4096 12 μm pixels
- Low voltage process
- 4 x low noise high responsivity amplifiers $\sim 7\mu\text{V}/\text{e}$
- Low noise typically $\sim 2\text{e}$ at 70kHz readout frequency
- Image full well capacity $\sim 220\text{ke}$
- Deep depletion silicon back-thinned for high QE at 900nm
- 4 side SiC buttable package with flexi connectors
- 36 FM devices in the 600 MPixel focal plane

49 FMs delivered to ESA



Focal plane picture courtesy of M Berthé CEA

Teledyne High Performance Imaging Sensors

Teledyne DALSA

Waterloo, Ontario (Design, I&T)
Bromont, Quebec (CCD fab)

Teledyne e2v Space Imaging

Chelmsford, England (Design, Fab, I&T)
Grenoble, France (Design, I&T)



Teledyne Imaging Sensors

Camarillo, California
(Design, Fab, I&T)

Teledyne Judson Technologies

Montgomeryville, Pennsylvania
(Design, Fab, I&T)

- Teledyne utilizes leading CMOS foundries for fabrication of CMOS image sensors
- Including staff who work in machine vision (locations not shown on map), Teledyne employs 100 CMOS image designers and 7 CCD designers