

---

i r f u



saclay

# Imagerie CCD en astronomie

O. Boulade

Service d'Astrophysique, CEA/IRFU

# Plan du cours

---

i r f u



saclay

- 1er cours: généralités sur le détecteur CCD
  - Principes du CCD
  - Paramètres et performances
- 2ème cours: utilisation d'un détecteur CCD
  - Mesures des performances
  - Observations et traitement d'images
  - Développements récents
- 3ème cours: quelques problématiques particulières
  - CCDs et spatial
  - Utilisation des CCDs en astronomie X
  - Grands plans focaux à base de CCDs

---

i r f u



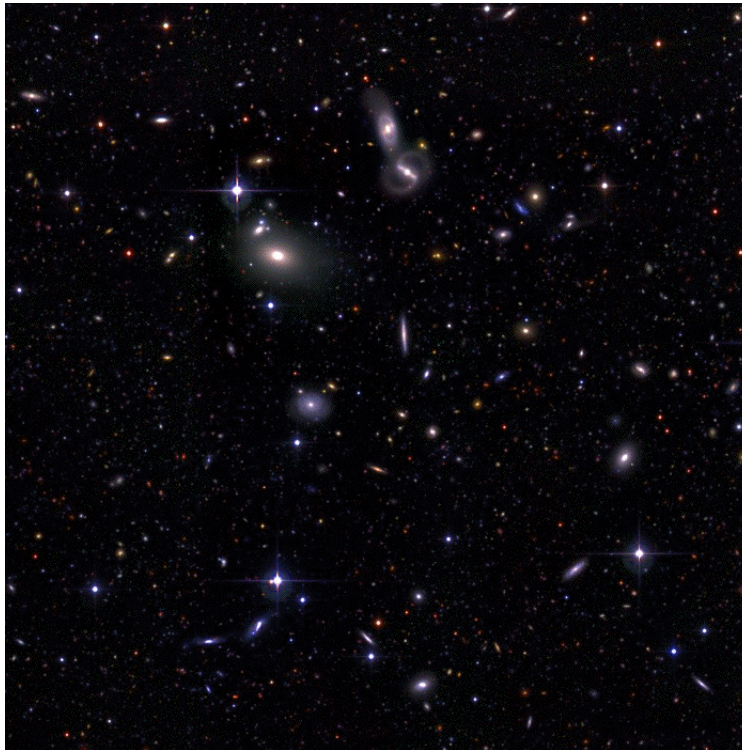
saclay

# Introduction

# Les CCDs en astronomie

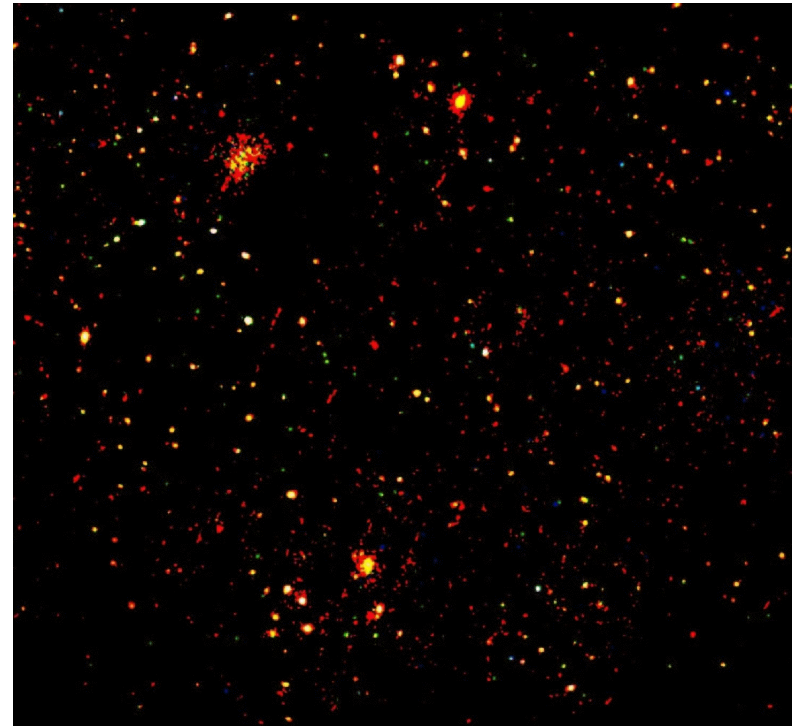
- CCDs utilisés en astronomie depuis 1980
  - Détecteurs de choix pour les longueurs d'onde du visible aux X
  - Grands plans focaux possibles

CFHT-MegaCam 450-900 nm



Canada-France-Hawaii Telescope Corporation & TERAPIX/IAP 2004

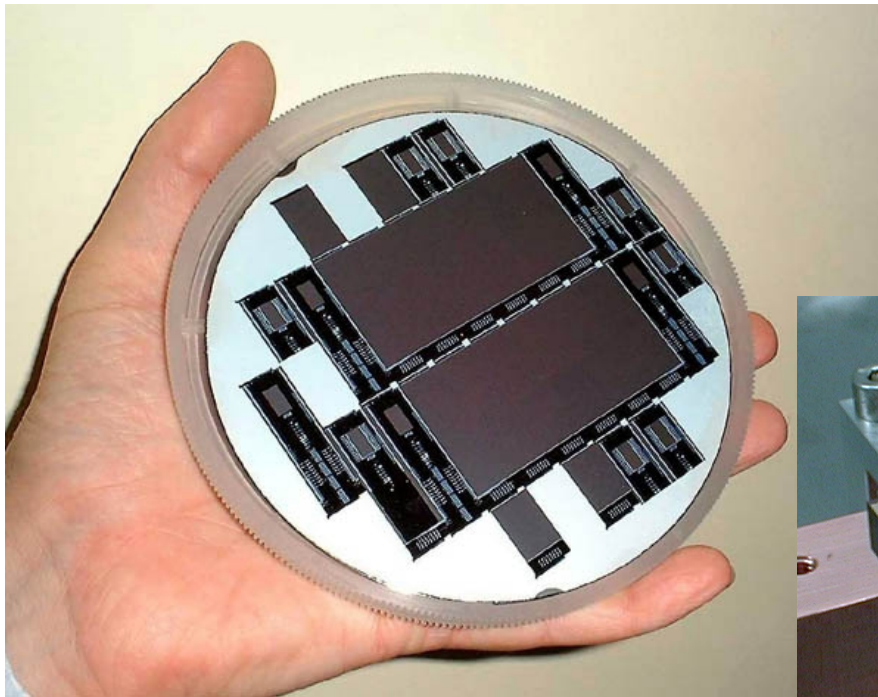
XMM-EPIC 0.3-10 keV



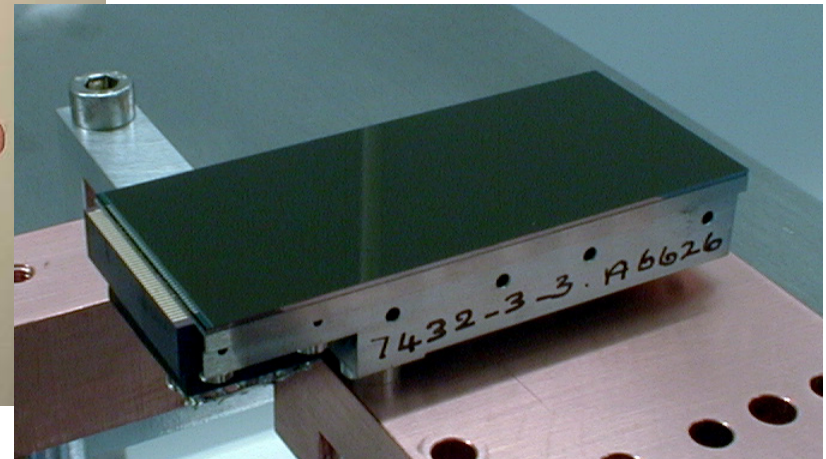
Courtesy of LSS Consortium, A. Read and ESA

# Un CCD, à quoi ça ressemble?

- Détecteur à base de silicium
  - Si dopé p ou n
  - Une grille d'électrodes définissant des « pixels »
  - Un (ou plusieurs) circuit(s) de lecture
  - CCD astronomique standard: 2Kx4K pixels de 15x15 $\mu$ m, 30x60mm



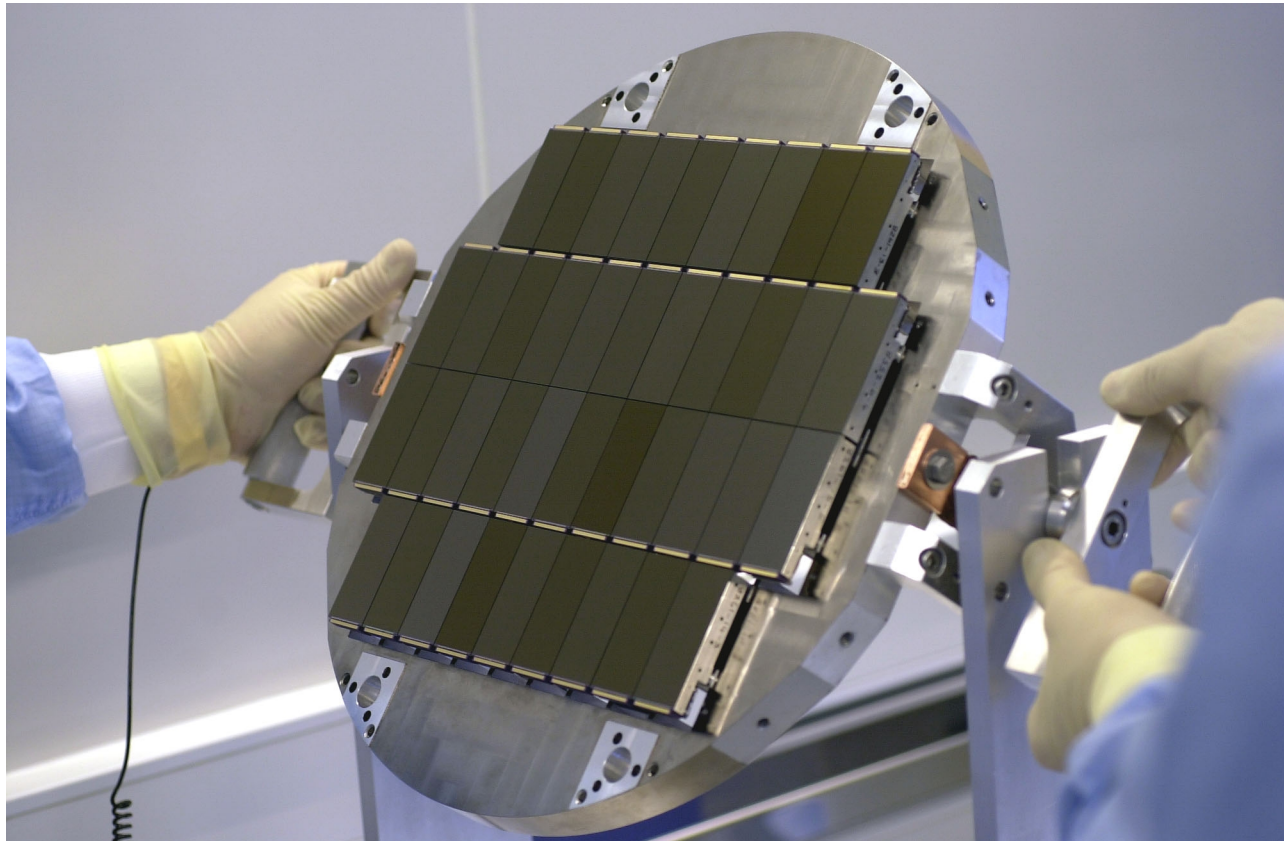
© e2v technologies



© CEA-DAPNIA

# Plan focal à base de CCDs

- Détecteurs « aboutables »
  - Mosaïque de CCDs permettant d'obtenir quelques  $10^9$  pixels



© CEA-DAPNIA/J.J Bigot

# Références

---

i r f u



saclay

- Détecteur CCD
  - Scientific Charge-Coupled Devices, J. Janesick, SPIE press, 2001
  - [http://www.ing.iac.es/~smt/CCD\\_Primer/CCD\\_Primer.htm](http://www.ing.iac.es/~smt/CCD_Primer/CCD_Primer.htm)
  - [http://www.astro.psu.edu/xray/docs/cal\\_report/cal\\_report.html](http://www.astro.psu.edu/xray/docs/cal_report/cal_report.html)
  - Forum de discussion CCD-world <http://www.ctio.noao.edu/CCD-world/>
  - Conférences Scientific Detectors Workshop 1996-2005, Kluwer/Springer
- Caméras CCDs
  - <http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Imaging/MegaPrime/>
  - Articles MegaCam: Boulade et al., Aune et al., Roussé et al., SPIE vol 4841, 2002; Borgeaud et al., SPIE 4008, 2000; de Kat et al., SDW, 2002
- Traitement d'images
  - <http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Elixir/home.html>
  - <http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS-DATA/rawdata.html#P3>
  - <http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS-DATA/dataprocessing.html>
  - <http://terapix.iap.fr>

# Historique

i r f u

cea

saclay

- 1970 : principe du CCD (Boyle et Smith, Bell Labs)
- 1974 : 1<sup>ère</sup> image astronomique (CCD Fairchild 100x100)



Janesick p.10

- 1979 : CCD RCA 512x320 aminci (3.5'x2' sur le ciel)
- 1981 : 1<sup>ères</sup> caméras CCDs en France (B. Fort, L. Vigroux)
- 1990 : 1ers CCDs « grand format » 2Kx2K (7'x7')
- 1994 : 1<sup>ères</sup> caméras mosaïque
- 1999 : caméra CFH12K, 12 CCDs 2Kx4K, 12Kx8K pixels (42'x28')
- 2002 : caméra MegaCam, 40 CCDs 2Kx4.5K, 20Kx18K pixels (1°x1°)
- 2008 : caméra GigaCam, 60 CCDs 4.8Kx4.8K, 38Kx38K pixels (2.5°x2.5°)



---

i r f u



saclay

# Principes du CCD

# Principes de fonctionnement du CCD

---

i r f u



saclay

- CCD: charge coupled device (DTC: dispositif à transfert de charges)
- 4 étapes
- Détection des photons incidents
  - Génération de paires électron-trou par effet photo-électrique
- Accumulation des charges
  - Capacité MOS (métal-oxyde-semiconducteur)
- Transfert des charges vers circuit de lecture
  - Transfert de proche en proche
- Lecture de l'information
  - Génération d'une tension au niveau du CCD puis transfert vers électronique externe et digitalisation
- Le terme CCD se réfère au mode de lecture de l'information, non à la génération de cette information.

# Détection des photons

- Effet photo-électrique dans un semiconducteur (Si)
  - Gap entre bande de valence et bande de conduction: 1.14 eV
  - Un photon incident d'énergie  $> 1.14$  eV crée une paire e-/trou
- Accumulation des charges: capacité MOS (métal-oxyde-semiconducteur)
  - Création d'une zone vide de porteurs de charge mobiles
  - Création d'un champ électrique pour séparer e<sup>-</sup> et trou

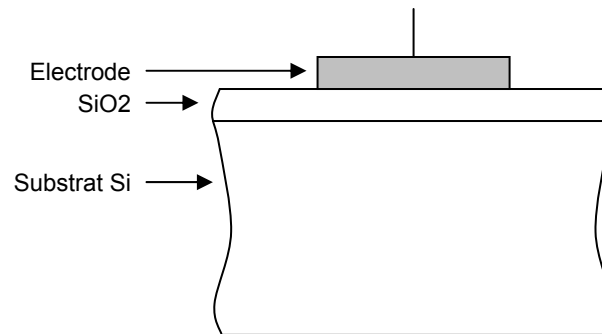
⇒ Un substrat Si, un isolant SiO<sub>2</sub>, une électrode

⇒ Si dopé « p »: porteurs majoritaires trous

⇒ Tension  $> 0$ : création zone vide de trous (zone de déplétion)

⇒ Les photo-électrons ne se recombineront pas

⇒ Accumulation des e<sup>-</sup> dans la zone de déplétion



# Collecte des photons

- CCD canal en surface (surface channel)
  - Pb: les  $e^-$  s'accumulent à l'interface Si-SiO<sub>2</sub>
  - Mauvaises performances: pièges, faible transfert, ...
- CCD canal enterré (buried channel)
  - Une couche de Si dopé n entre le SiO<sub>2</sub> et le Si dopé p: jonction pn
  - Création d'une zone de déplétion et d'un champ électrique interne qui sépare  $e^-$  et trous
  - Les  $e^-$  s'accumulent en profondeur

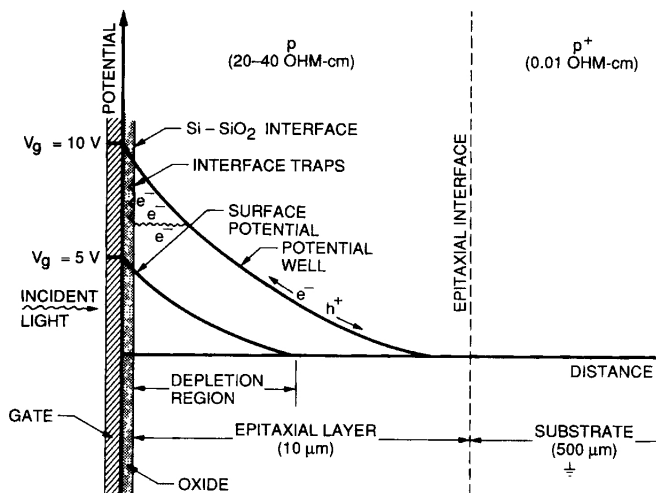


Figure 1.18 Surface channel potential well.

Janesick p.64

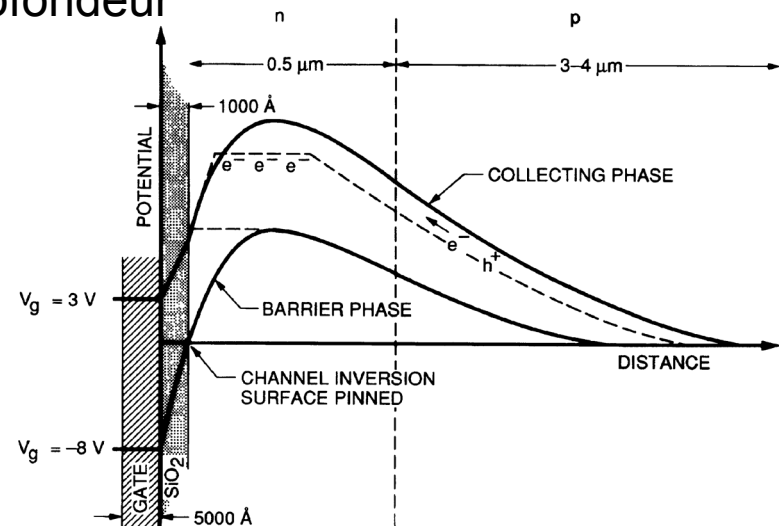
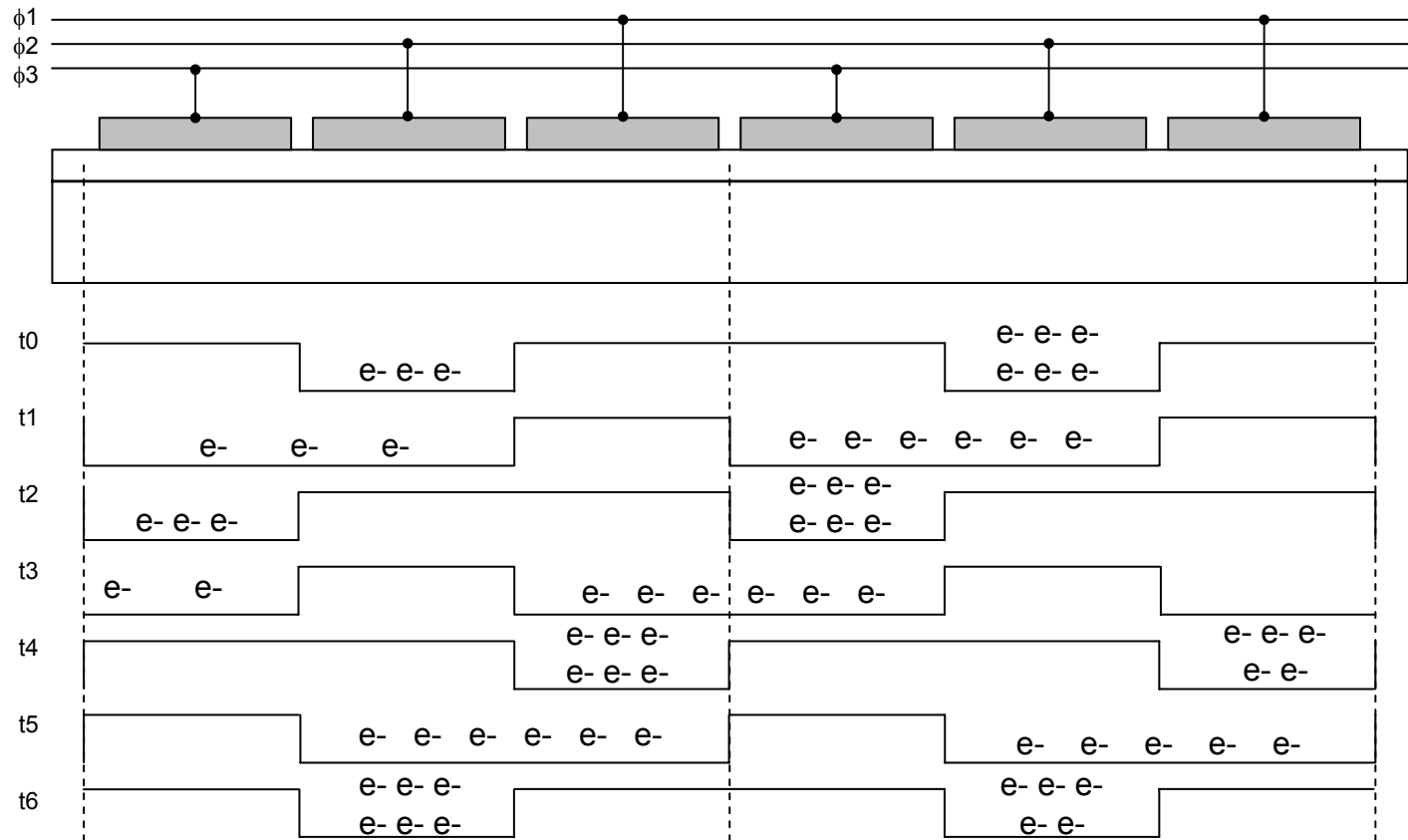
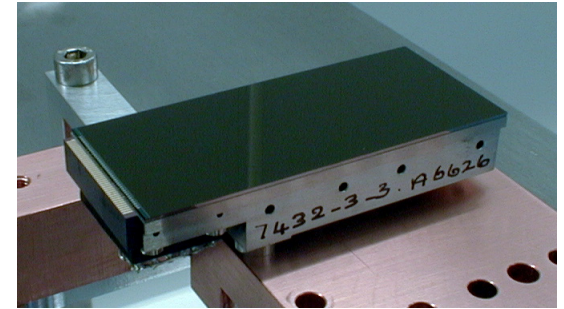


Figure 1.19 Buried-channel potential well.

Janesick p.70

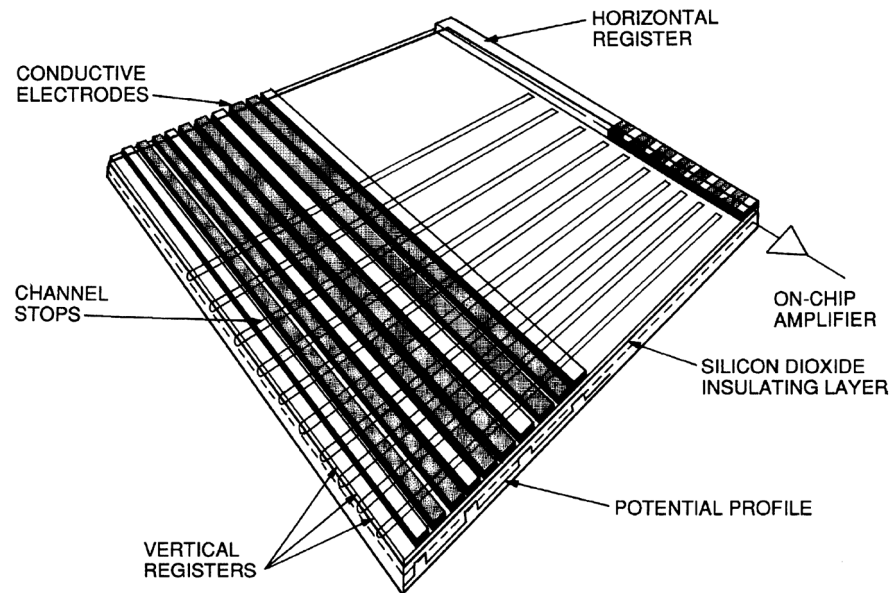
# Transfert des charges

- Plusieurs (3) électrodes par pixel
- Une électrode de collecte, et deux de barrière
- Transfert des charges de proche en proche
- Couplage des charges entre pixels



# Organisation matricielle des pixels

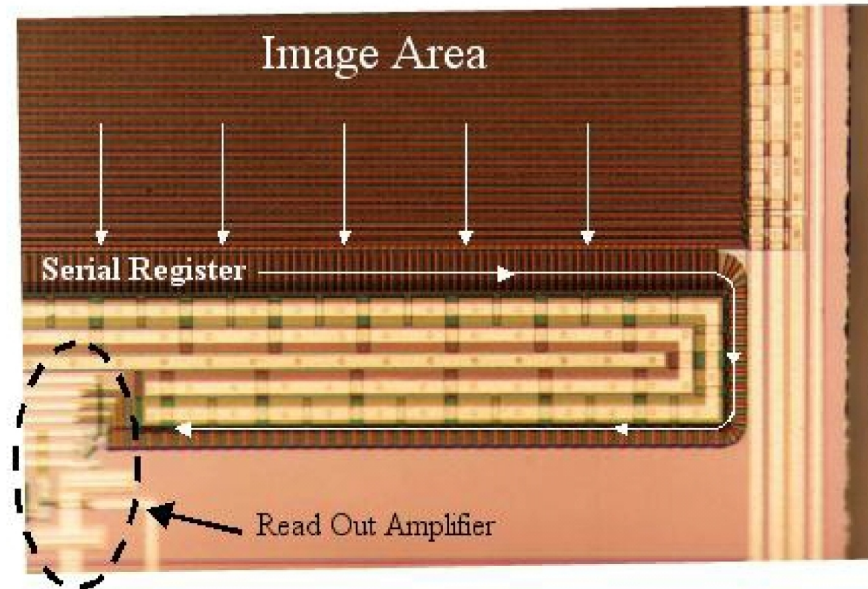
- Le long d'une colonne, les paquets de charges sont séparés les uns des autres par les différents potentiels générés par les électrodes
- Les colonnes de pixels sont séparées les unes des autres par un dopage p spécifique (« channel stop ») qui évite la diffusion des charges
- Une ligne supplémentaire de pixels, le registre série, est connectée au circuit de lecture



**Figure 1.7(b)** Primary components that make up a three-phase CCD.

Janesick p.24

- Transferts successifs du contenu des pixels
  - De la 1ère ligne dans le registre série
  - De chaque ligne dans la précédente
  - Du 1er pixel du registre série dans le circuit de lecture
  - De chaque pixel du registre série dans le précédent

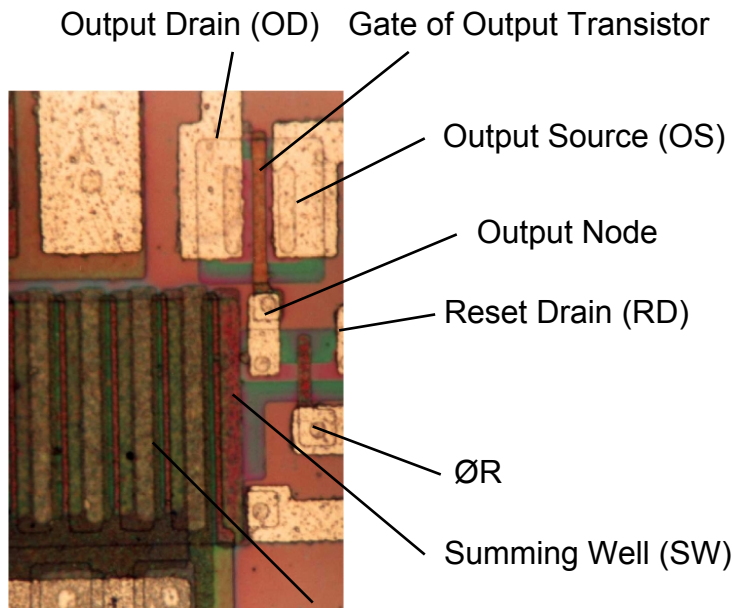


© e2v technologies

- Génération d'une tension aux bornes de la capacité de lecture
- Envoi vers l'électronique externe: échantillonnage, digitalisation, transfert vers ordinateur d'acquisition, stockage

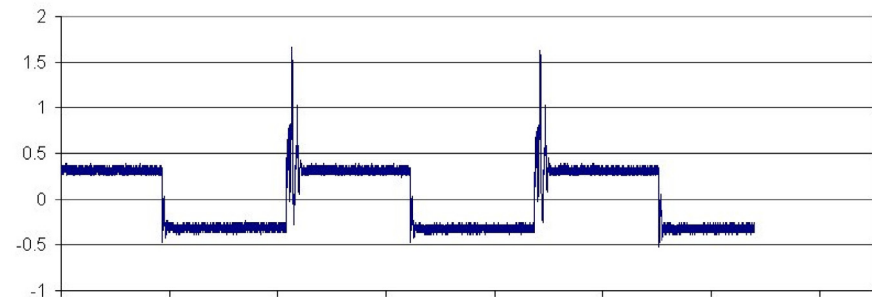
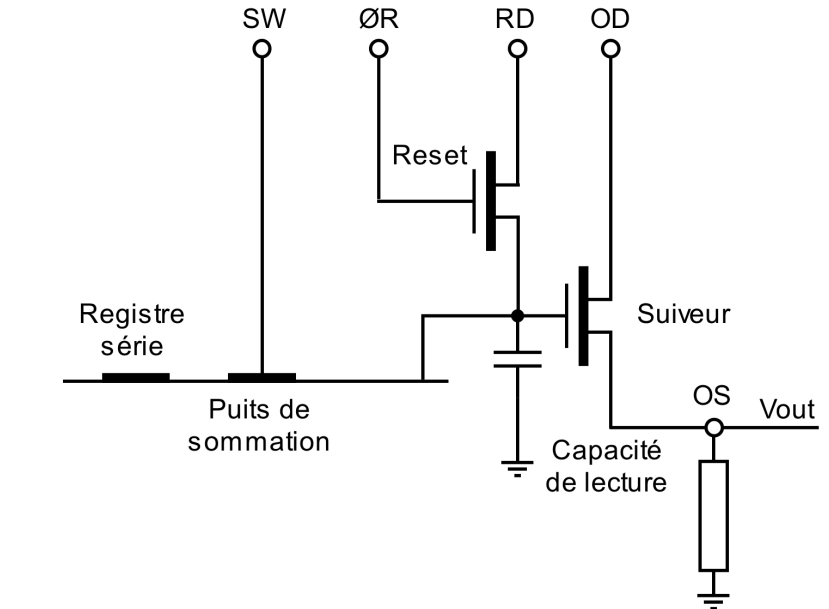
# Séquence de lecture

- Reset du niveau de sortie
- Transfert du pixel dans le « summing well » et mesure du niveau reset
- Transfert du « summing well » sur la capacité de lecture et mesure du niveau signal



Last few electrodes in Serial Register

[http://www.ing.iac.es/~smt/CCD\\_Primer/CCD\\_Primer.htm](http://www.ing.iac.es/~smt/CCD_Primer/CCD_Primer.htm)





- CCD « full frame »
  - Toute la zone du CCD est photosensible, et on commence la lecture à la fin de la pose
  - Principale architecture utilisée en astronomie
- CCD « frame transfer »
  - Une moitié du CCD est masquée et à la fin de la pose, on transfère les charges de la zone photosensible dans la zone masquée
  - La lecture de la pose  $n$  se fait en même temps que la pose  $n+1$
  - Parfois utilisé en astronomie (COROT)
- CCD « interline transfer »
  - Une colonne de pixels sur 2 est masquée, et on transfère chaque colonne photosensible dans la colonne masquée lui correspondant
  - Utilisation en cadence video (télévision)

---

i r f u



saclay

# Paramètres et performances

# Paramètres d'un CCD

---

i r f u



saclay

- Détection des photons
  - Rendement quantique (quantum efficiency QE)
- Collection des charges
  - Nombre de pixels
  - Capacité du pixel (full well)
  - Non uniformité pixel (pixel response non uniformity PRNU)
  - Diffusion
  - Courant d'obscurité (dark current)
  - Cosmétique
- Transfert de charges
  - Efficacité de transfert (charge transfer efficiency CTE)
- Lecture de l'information
  - Linéarité
  - Bruit de lecture (readout noise RN)
- Rapport signal à bruit

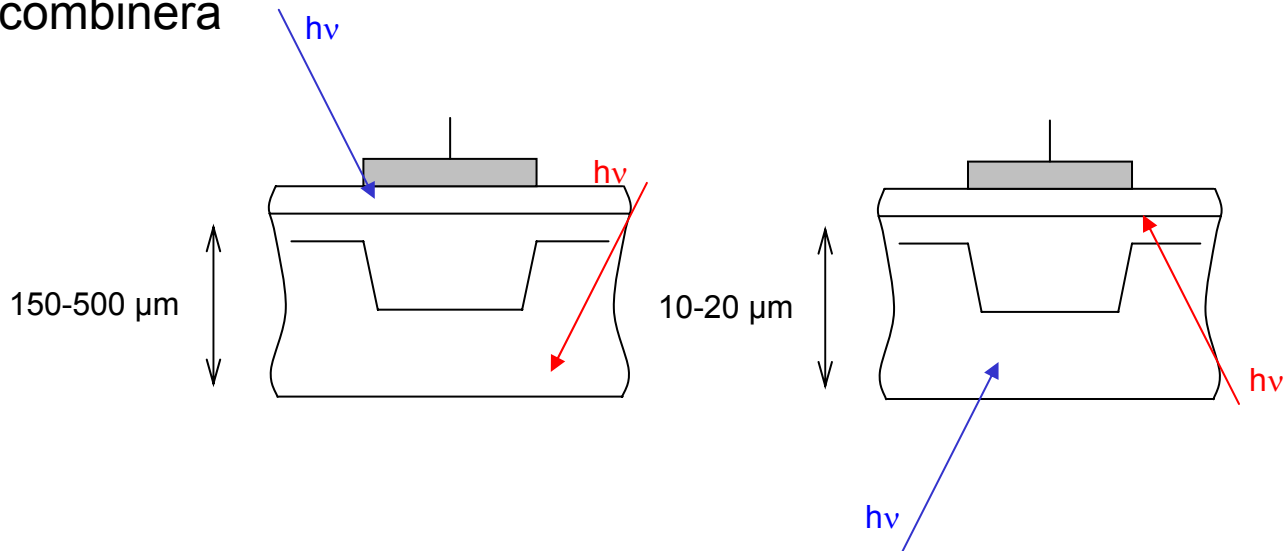
# Rendement quantique (QE)

---

- Mesure de l'efficacité de conversion photon - électron
  - Un photon d'énergie  $<$  gap Si (1.14 eV) ne peut pas créer de paire électron-trou
    - QE = 0% pour une longueur d'onde  $>$  1.1  $\mu\text{m}$
    - Pour observer en IR, il faut utiliser un autre semiconducteur, ex Ge (gap 0.66 eV, longueur d'onde  $<$  1.6  $\mu\text{m}$ ), mais mauvaises performances en mode CCD
  - Un photon d'énergie comprise entre 1.14 et 3.1 eV crée une paire électron-trou: domaine visible (400 - 1100 nm)
  - Un photon d'énergie  $>$  3.1 eV crée plusieurs paires électron-trou: un photon X d'énergie 5.9 keV (longueur d'onde 0.21 nm) génère 1620 e-
  - Au delà de 10 keV, la probabilité d'interaction d'un photon avec un électron est trop faible: pas de détection

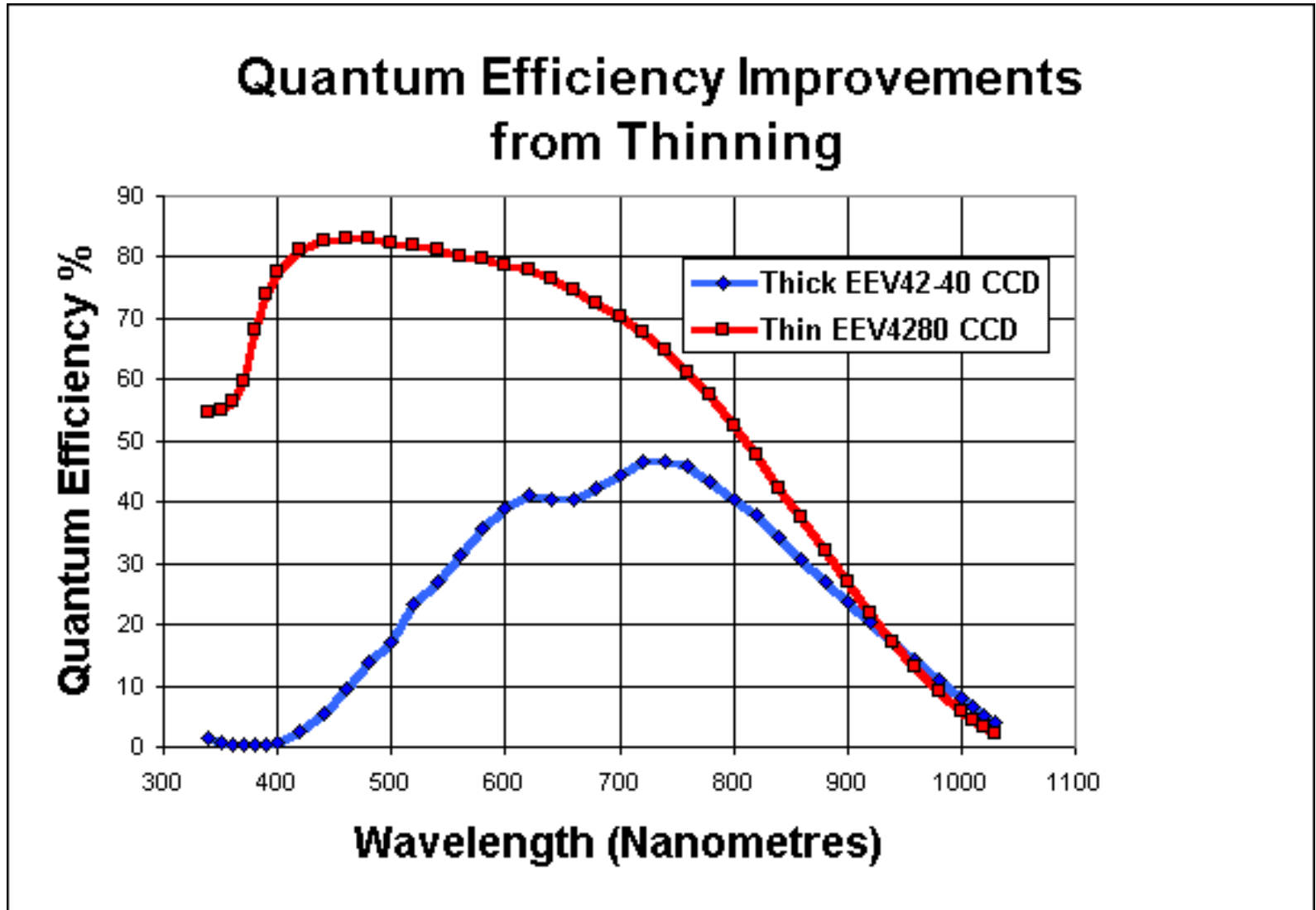
# Dépendance en longueur d'onde du QE

- La profondeur de pénétration du photon dépend de son énergie
  - Pour un photon « bleu » (400 nm):  $\sim 0.2 \mu\text{m}$
  - Pour un photon « rouge » (800 nm):  $\sim 10.5 \mu\text{m}$
- Pb: si l' $e^-$  est créé dans une zone trop éloignée du champ électrique, il se recombinera



- CCD épais et éclairé par l'avant: rendement quantique très faible dans le bleu, moyen dans le rouge (QE max  $\sim 50\%$ )
- Pour avoir un bon QE dans le bleu, il faut un CCD aminci et éclairé par l'arrière (QE  $> 80\%$ ), mais faible rendement dans le rouge
- CCD aminci très délicat à fabriquer: beaucoup plus cher

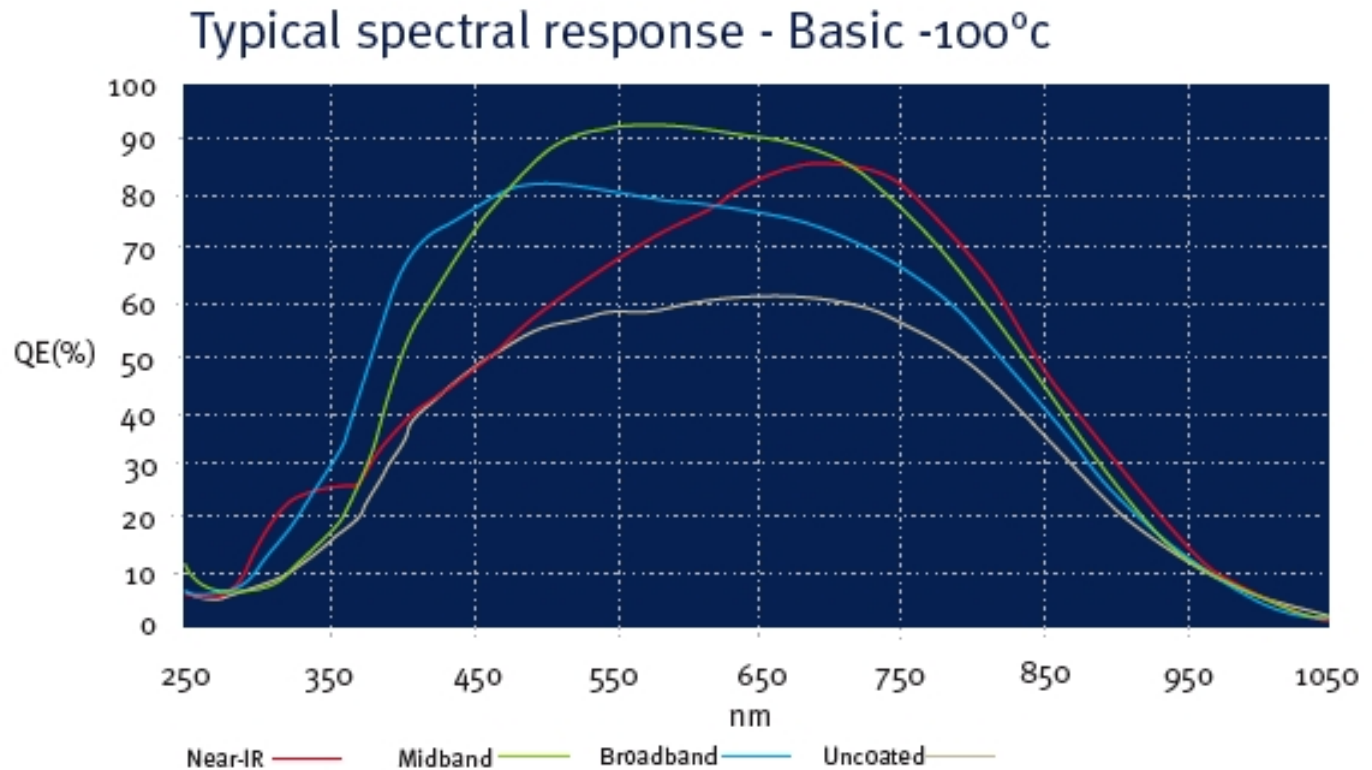
# CCD épais vs CCD aminci



[http://www.ing.iac.es/~smt/CCD\\_Primer/CCD\\_Primer.htm](http://www.ing.iac.es/~smt/CCD_Primer/CCD_Primer.htm)

# Traitement AR

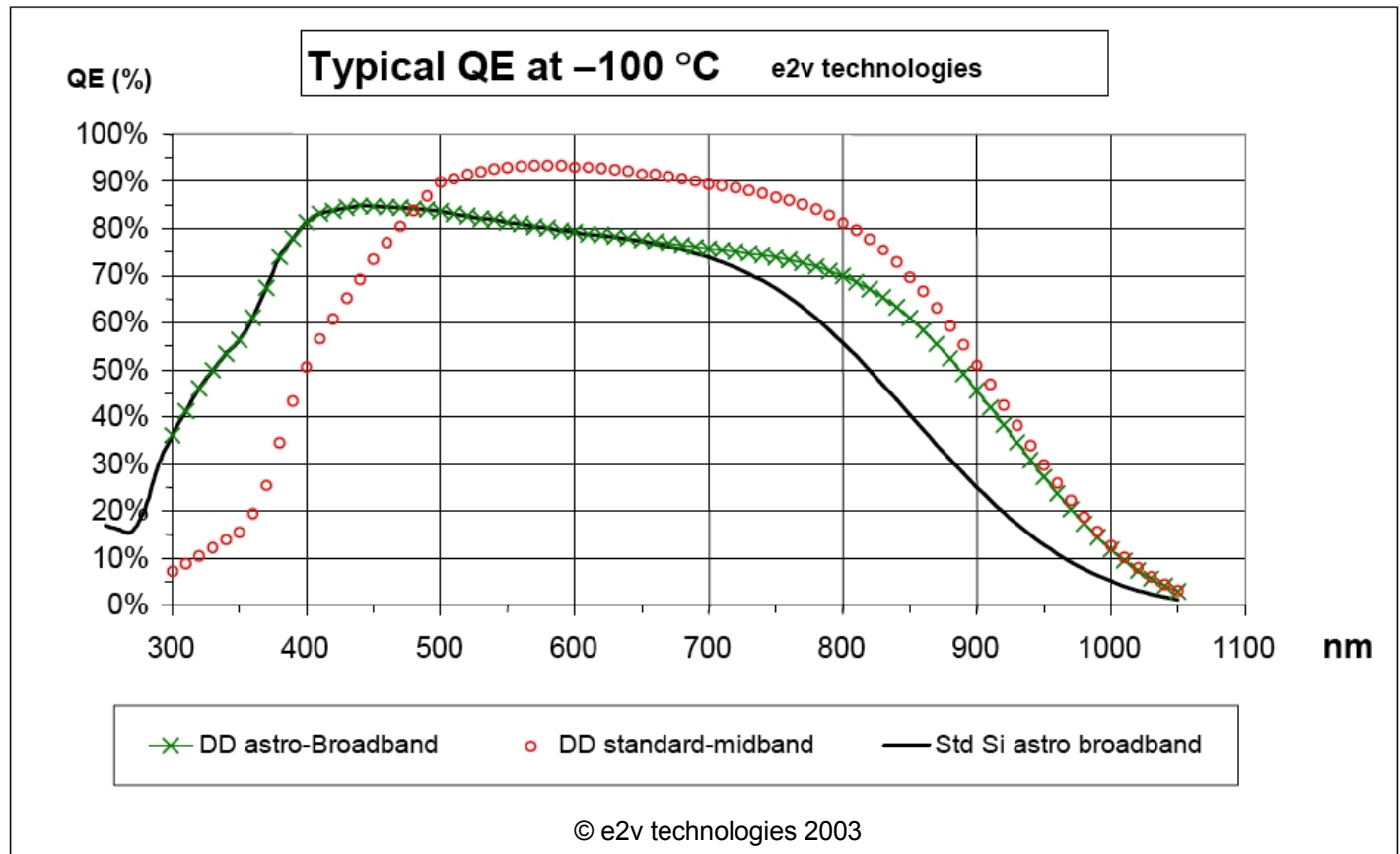
- Indice de réfraction du Si: 3.6
- Coefficient de réflexion =  $(1-n_{\text{Si}})^2/(1+n_{\text{Si}})^2 = 0.32$ 
  - Un CCD éclairé par l'arrière nécessite un traitement anti-reflet pour maximiser le QE



© e2v technologies 2003

# CCD « deep depletion »

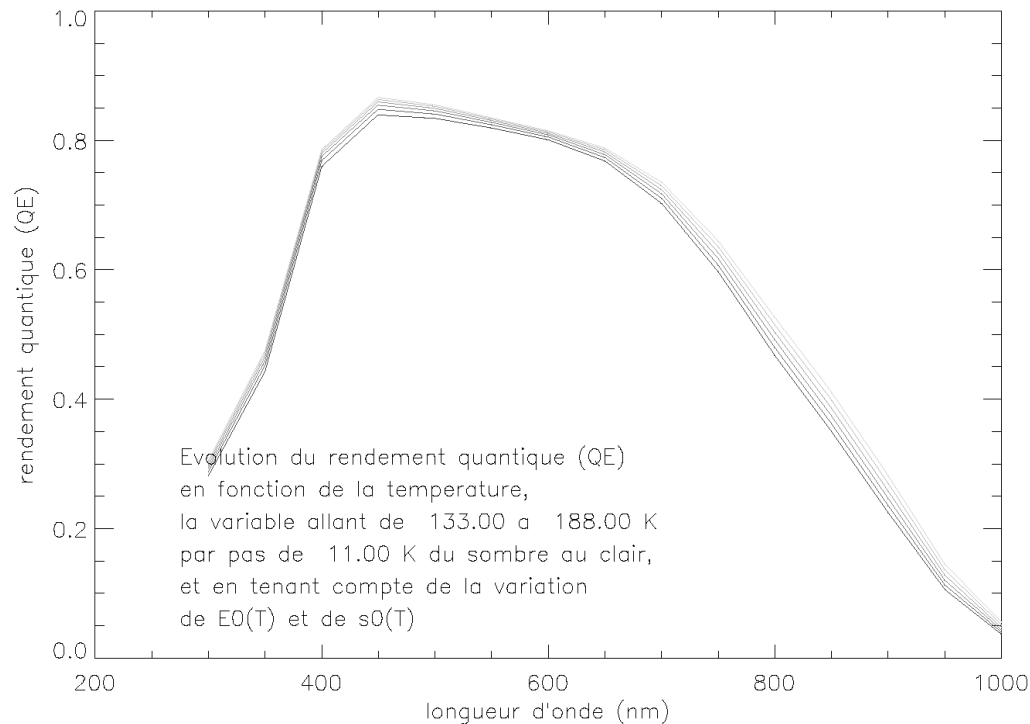
- CCD aminci éclairé par l'arrière
- Epaisseur substrat augmentée pour détecter dans le rouge: 40  $\mu\text{m}$
- Zone de déplétion augmentée pour détecter dans le bleu: Si haute résistivité ( $\sim 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ )





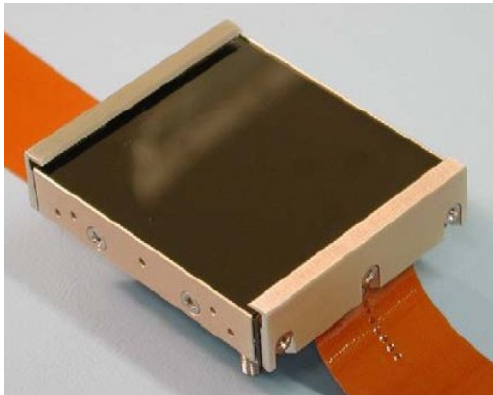
# Dépendance en température du QE

- Plusieurs paramètres dépendent de la température
  - Energie de gap du Si
  - Profondeur d'absorption des photons
  - Champ électrique dans le Si
  - Taux de recombinaison des  $e^-$
- Le QE augmente avec la température:  $\sim 1\%$  par degré pour  $e2v$  4290

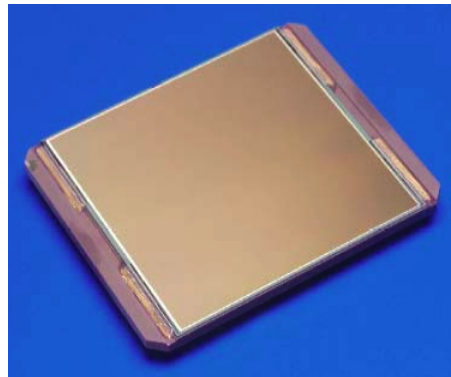


# Evolution de la taille des CCDs

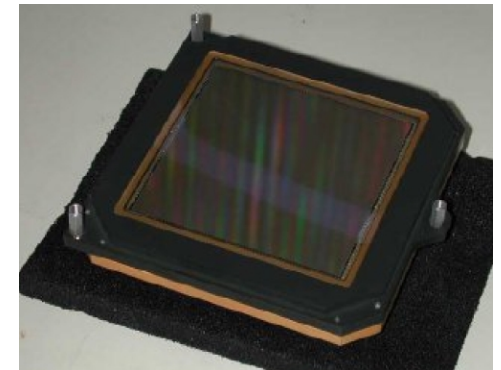
- 1er CCD astronomique: Fairchild 100x100
- 1979: CCD RCA 512x320, pixels  $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$
- 1990: premiers CCDs 2Kx2K
- Le standard astronomique est un CCD 2Kx4K, pixels de  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$
- Les CCDs géants (4Kx4K à 9Kx9K) commencent à être utilisés en astronomie mais:
  - Temps de lecture longs
  - Taille des wafers limitée donc petits pixels, peu efficaces
  - Grand nombre de transferts
  - Rendement de fabrication faible, donc coût élevé



e2v 4Kx4K  $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$



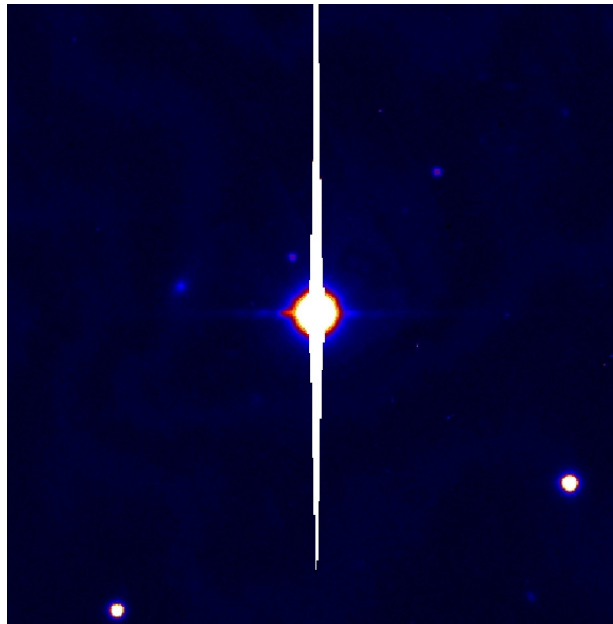
Fairchild 4Kx4K  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$



Fairchild 9Kx9K  $8.75\mu\text{m} \times 8.75\mu\text{m}$

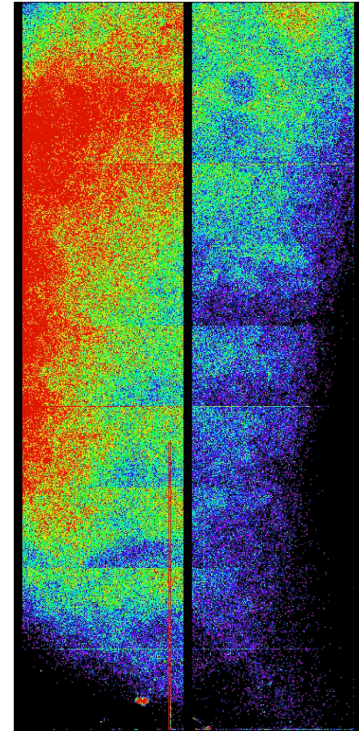
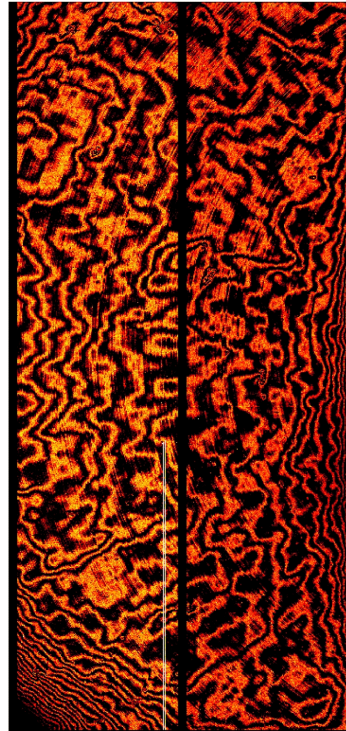
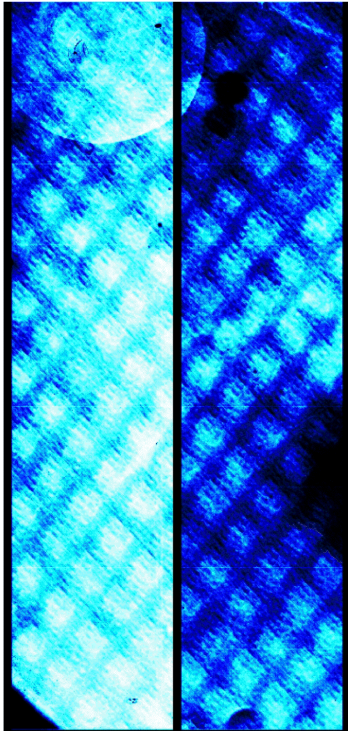
# Capacité pixel (full well)

- Nombre maximum de charges qu'un pixel peut contenir
- Dans un CCD actuel avec un pixel de  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ , on atteint une capacité  $\sim 200\text{-}250 \text{ ke}^-$
- Détermine la dynamique possible du CCD (rapport entre les signaux min et max détectables)
- Quand le pixel est plein, il y a saturation (blooming): les charges débordent sur les pixels adjacents le long de la colonne
- La technique du « clocked anti blooming » permet de limiter cet effet



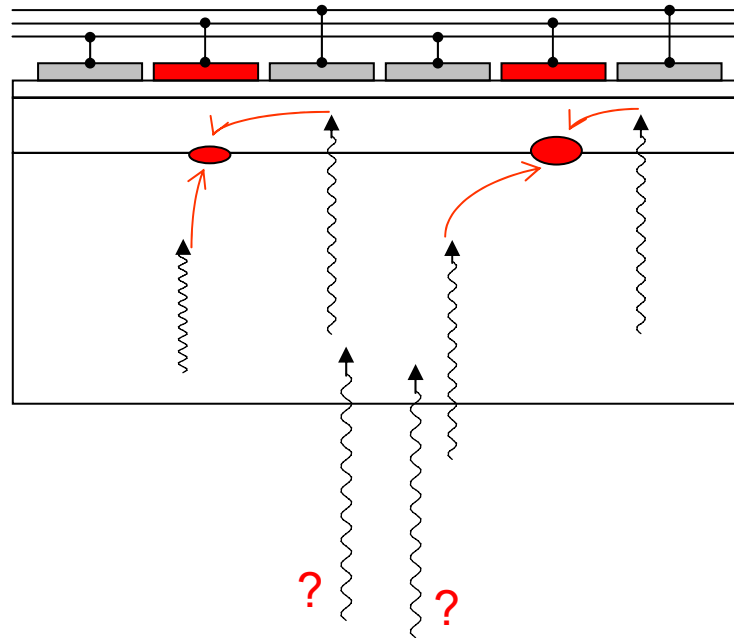
# Non uniformité pixel (PRNU)

- Variation de sensibilité de pixel à pixel
- Origine liée au process: précision de la lithographie, amincissement, franges d'interférence dues à des réflexions internes, ...
- Non uniformité dépendante de la longueur d'onde
- Niveau typique: 1-2%, corrigeable par la technique du champ plat (flat field): on illumine la surface du CCD avec une source uniforme



# Diffusion des charges

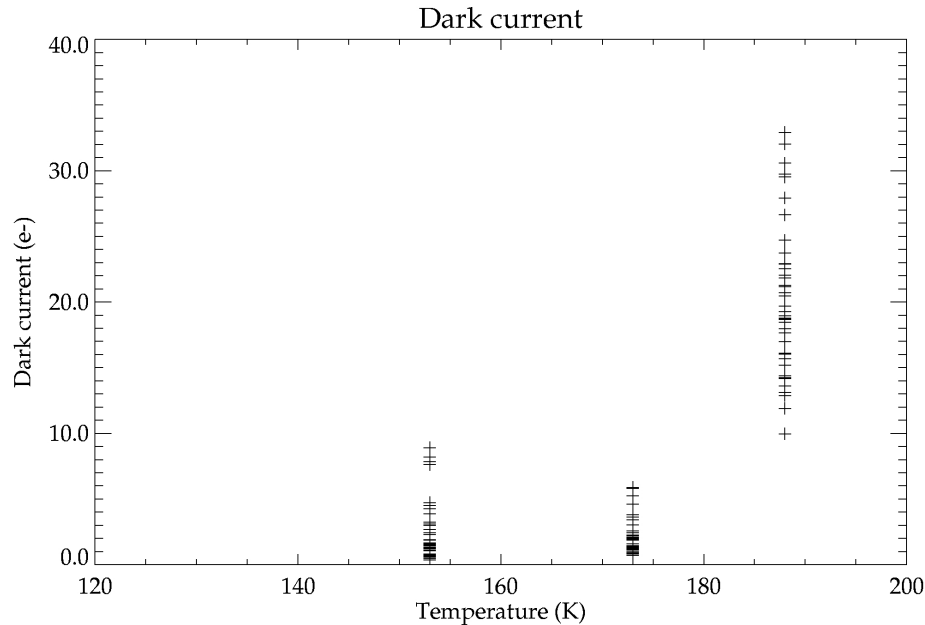
- Les  $e^-$  qui « voient » le champ électrique s'accumulent à la jonction p-n
- Ceux qui sont générés trop loin (à la frontière de 2 pixels, trop loin dans le substrat, sous les channel stops, ...) diffusent et peuvent être collectés dans différents pixels: dégradation de la résolution spatiale



- En pratique: CCD e2V 4280, pixels de  $13.5 \mu\text{m}$ , taille effective  $16 \mu\text{m}$
- Problème potentiel pour les CCDs très épais ( $\sim 100\text{-}300 \mu\text{m}$ )

# Courant d'obscurité (dark current)

- Charges parasites créées par agitation thermique
- Pour diminuer le niveau de courant d'obscurité, il faut refroidir le CCD
- CCD e2V aminci:  $Q_d/Q_{d_0} = 122T^3 e^{-6400/T}$ ,  $Q_{d_0}$  dark à l'ambiante
- A 150-160K, courant de l'ordre de quelques e-/pixel/heure



- Mode « multi-pinned phase » (MPP): permet de réduire le courant d'obscurité à haute température (-40°C) d'un facteur  $\sim 100$  (élimine le courant d'obscurité généré à l'interface Si-SiO<sub>2</sub>)
  - Le mode MPP diminue aussi le full well d'environ 1/3

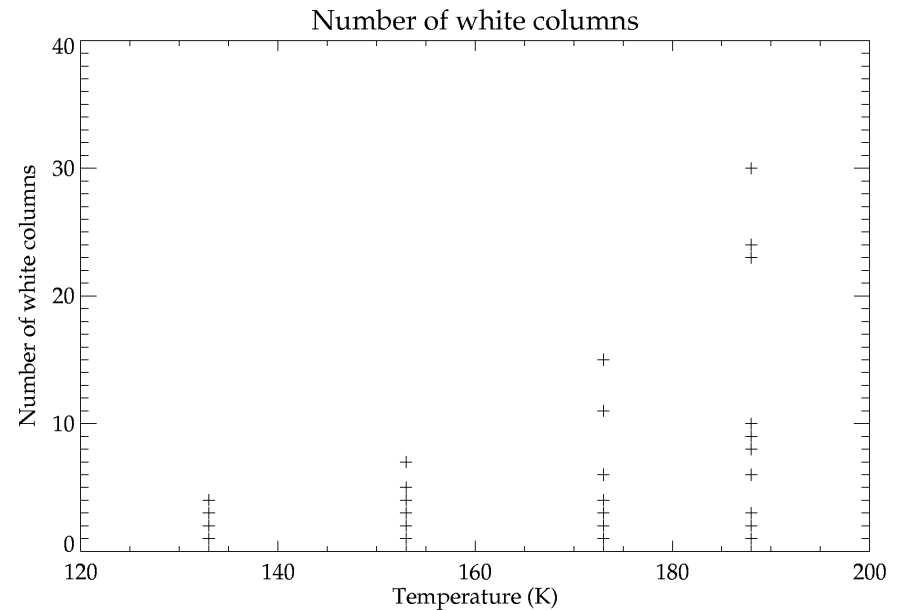
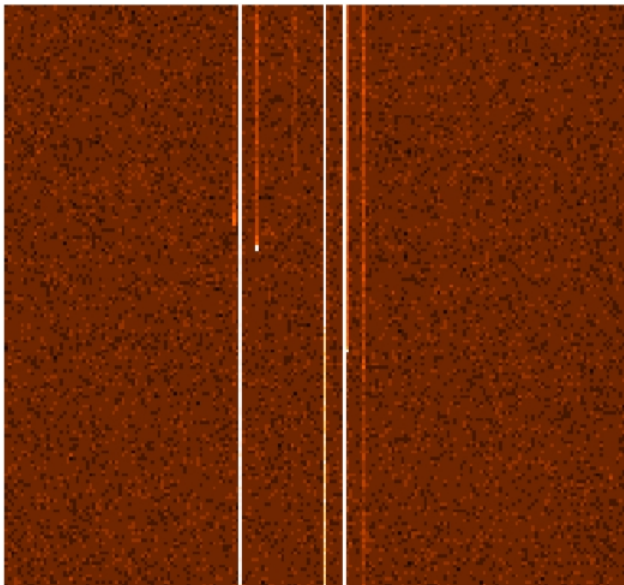
# Cosmétique

i r f u



saclay

- Proportion de pixels défectueux (« hot » pixels, « white » pixels)
- Courant d'obscurité très élevé généré par des défauts locaux d'un pixel
- Le principe du CCD fait qu'un pixel chaud génère une colonne chaude
- En particulier, le registre série ne doit comporter aucun pixel défectueux
- La qualité cosmétique limite le rendement de fabrication et la taille des CCDs, et détermine le prix!
- Cosmétique fortement dépendante de la température
- CCDs MegaCam (e2V 4290): 0.1% de colonnes chaudes à 153K



# Efficacité de transfert de charges (CTE)

i r f u



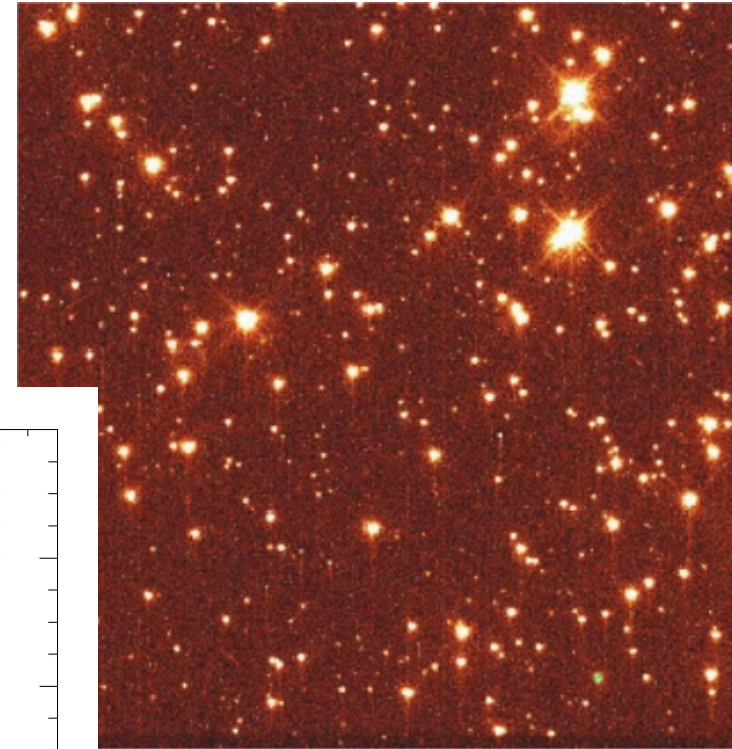
saclay

- Fraction des charges transférées d'un pixel au précédent pendant la lecture
- Pour  $n$  transferts,  $S_{out} = CTE^n \times S_{in}$
- Paramètre fondamental qui détermine la qualité des images:
  - Avec une CTE de 99.99%, il n'y a plus que 90% du signal dans un pixel après 1000 transferts, et 67% du signal après 4000 transferts
- La CTE dépend de nombreux paramètres: température, vitesse de transfert, quantité de charges à transférer, ...
- La CTE est dégradée par la présence de pièges (dus au design, à la fabrication ou aux radiations), qui relâchent les charges après un certain délai:
  - CCD à canal en surface: CTE  $\sim 0.99$  (après 100 transferts, il reste 36.6% du signal)
  - CCD à canal enterré actuel: CTE  $\sim 0.999999$  (après 4000 transferts, il reste 99.6% du signal)

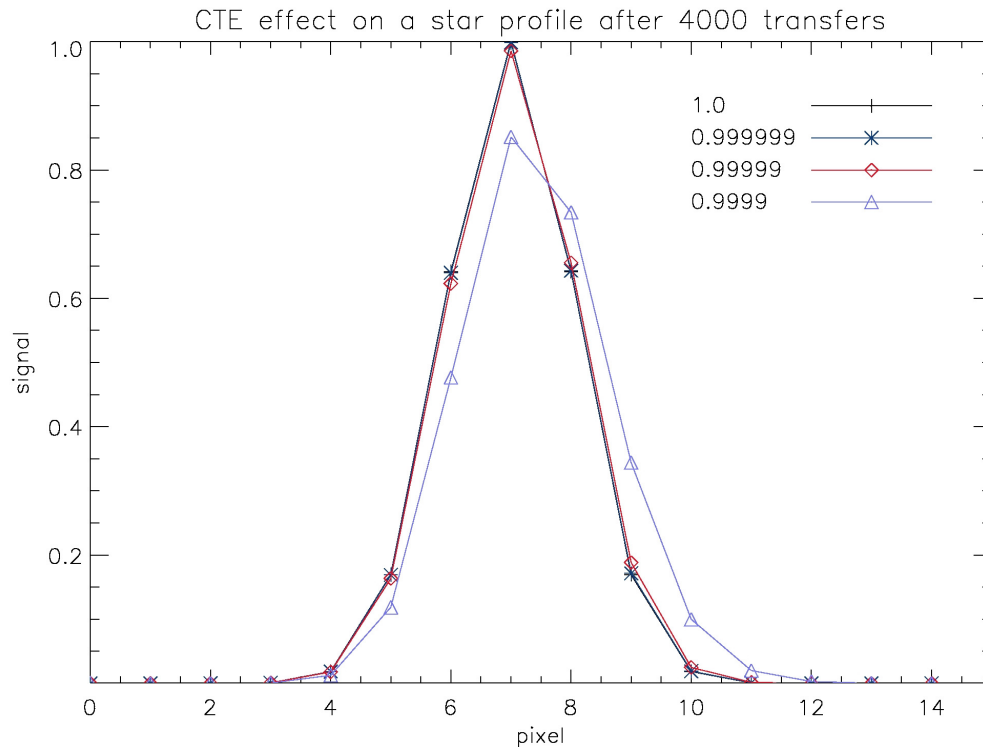


# Dégradation de la qualité image par la CTE

- La CTE génère une traînée des images
  - Pas très gênant en photométrie
  - Beaucoup plus gênant en imagerie

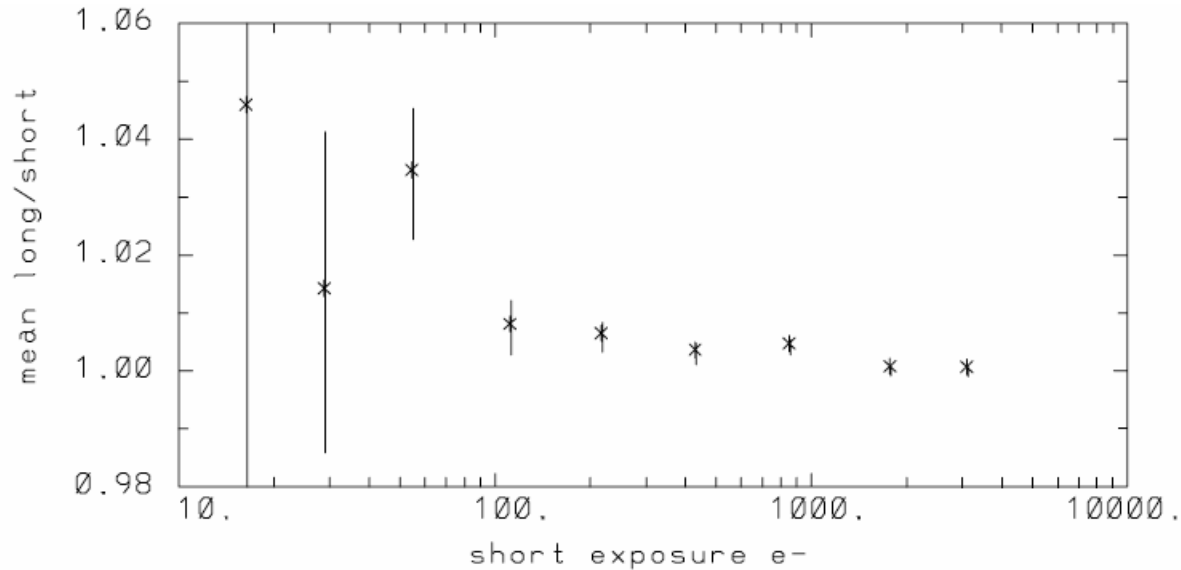


NASA HST/STIS



# Linéarité

- La conversion charges-tension du circuit de sortie est linéaire sauf à très bas signal



Gilliland, ACS ISR0401, 2004

- Typiquement un CCD est linéaire sur une très grande plage: 100 - 200ke-, avec une non linéarité <1%

# Bruit de lecture

irfu

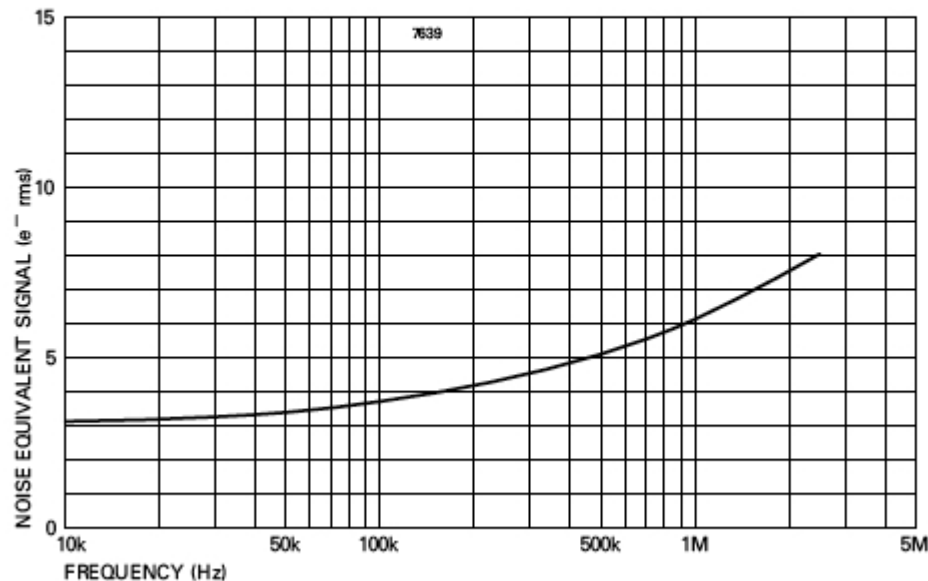


saclay

- Bruit blanc de l'amplificateur du circuit de sortie
- Dépend de la vitesse de lecture

## TYPICAL OUTPUT CIRCUIT NOISE

(Measured using clamp and sample, temperature range 140 - 230 K)

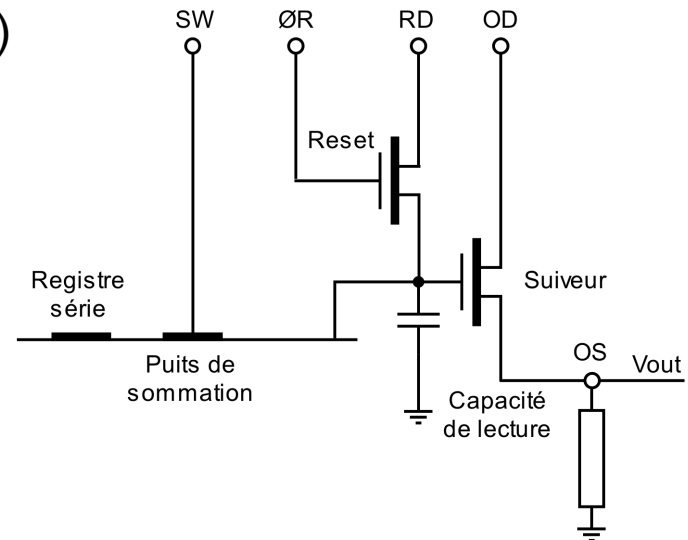
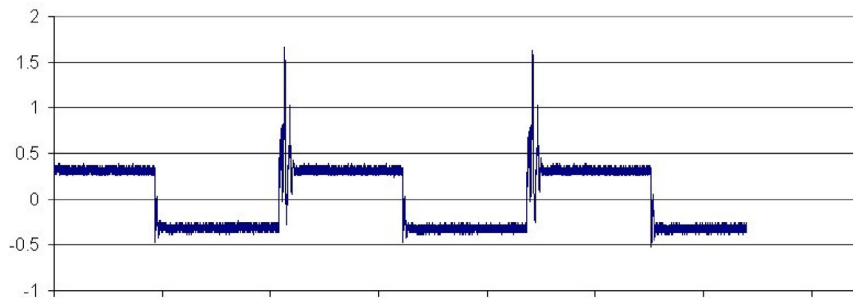


© e2v technologies 2003

- Il faut trouver un compromis entre la vitesse de lecture (et le temps de télescope perdu) et le niveau de bruit
- Typiquement, bruit ~4-5 e<sup>-</sup>

# Double échantillonnage corrélé

- Il faut une capacité très petite pour une bonne sensibilité:  $V = Q/C$
- Le bruit associé au niveau de reset est un bruit blanc (bruit «  $kTC$  »):  
$$N(V) = \sqrt{kT/C} \text{ ou } N(e^-) = \sqrt{ktC}/q$$
- Pour  $C=40\text{fF}$ , on a  $S_V=4\mu\text{V}/e^-$  et  $N=57e^-$ : bruit beaucoup trop élevé!
- On supprime ce bruit en mesurant à la fois le niveau référence et le niveau pixel: double échantillonnage corrélé (« CDS »)
  - « Clamp and sample », « Dual slope integrator »
  - CDS digital (Gach et al., PASP 115, 1068, 2003): niveaux échantillonnés 100 à 200 fois, puis traitement digital du signal: nécessite des ADC rapides ( $\geq 10\text{MHz}$ )



# « On-chip binning »

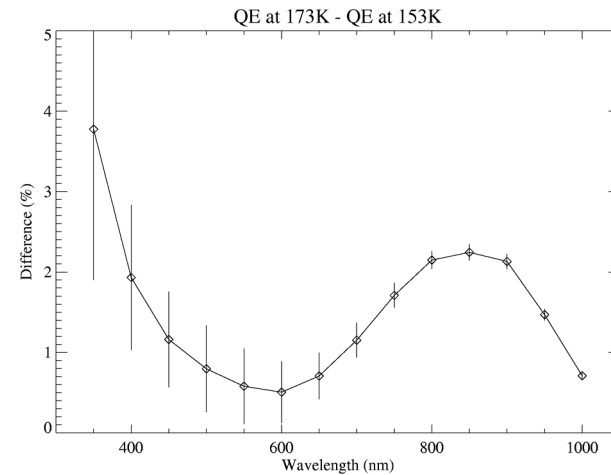
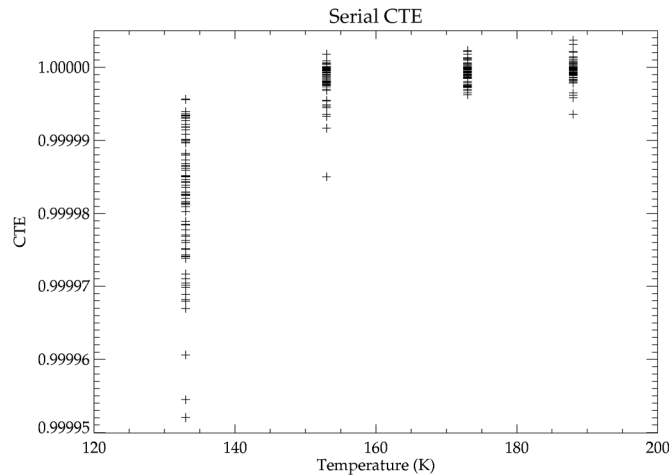
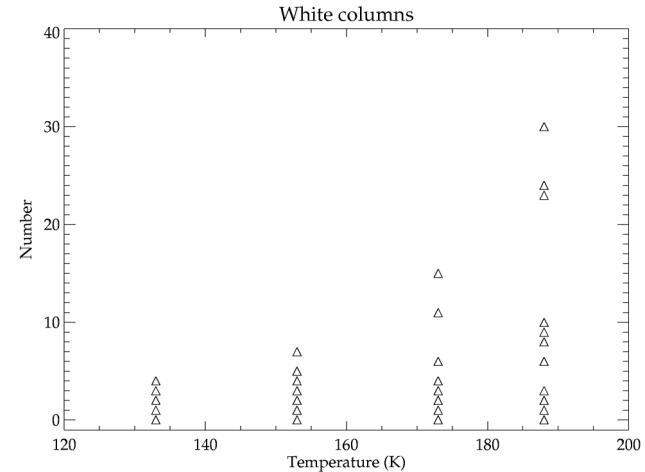
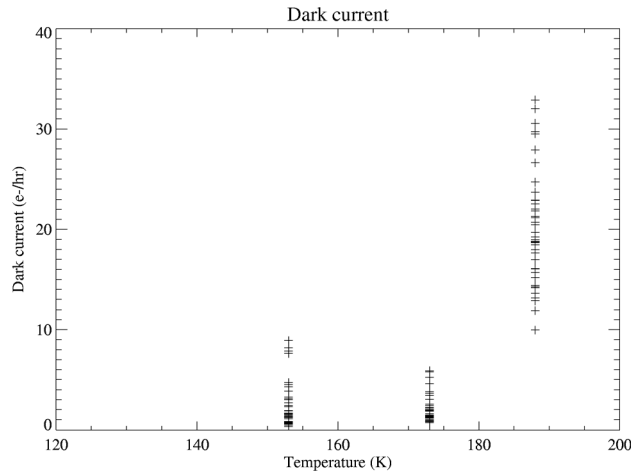
---



- On peut additionner le contenu de plusieurs pixels avant la lecture
  - Transfert de la 1ère ligne de la zone image dans le registre série
  - Transfert de la 2ème ligne de la zone image dans le registre série
  - ⇒ Addition des contenus des 2 premières lignes
  - Transfert du 1er pixel du registre série dans le summing well
  - Transfert du 2ème pixel du registre série dans le summing well
  - ⇒ Addition du contenu des pixels (1,1), (2,1), (1,2) et (2,2)
  - Transfert du summing well dans le circuit de lecture
- Augmentation du rapport signal à bruit
- Augmentation de la vitesse de lecture
- Baisse de la résolution spatiale
- On peut transformer un CCD 4Kx4K avec pixels de  $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$  en un CCD 2Kx2K avec pixels de  $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ ...

# Température optimale de fonctionnement

- Certaines performances varient avec la température
  - Il existe une plage de températures optimales vers 150-170K

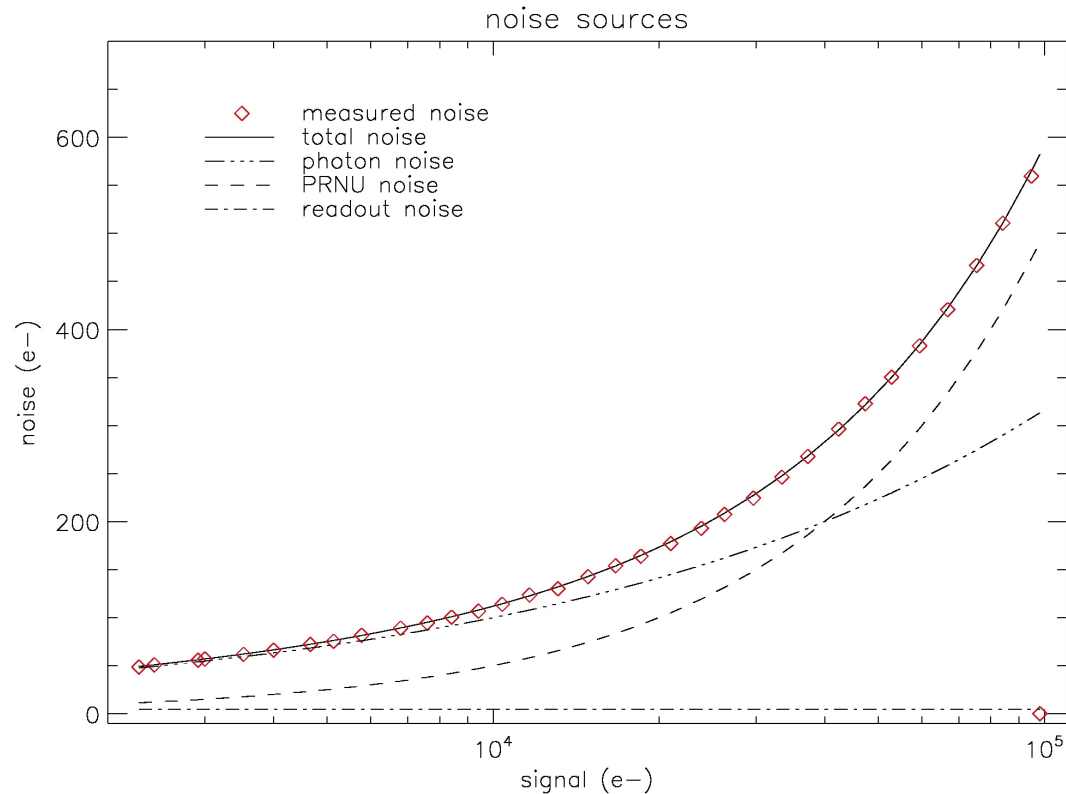


# Sources de bruit

- Bruit de photons (shot noise)
  - Statistique de Poisson:  $N_{\text{ph}} = \sqrt{S_{\text{ph}}} = \sqrt{S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}}}$
- Bruit du courant d'obscurité
  - Même statistique que les photons:  $N_{\text{dc}} = \sqrt{S_{\text{dc}}}$
- Bruit de non uniformité de réponse des pixels
  - Proportionnel au signal:  $N_{\text{ff}} = \text{ff} \times S_{\text{ph}} = \text{ff} \times (S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}})$
- Bruit de lecture
  - Constant:  $N_{\text{rn}} = \text{RN}$
- Bruit total = somme quadratique des différentes sources de bruit
  - Bruit total:
$$N_{\text{tot}} = \sqrt{S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}} + S_{\text{dc}} + \text{ff}^2 \times (S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}})^2 + n_{\text{pix}} \times \text{RN}^2}$$
  - Rapport signal à bruit:
$$\text{SNR} = S_{\text{sc}} / \sqrt{S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}} + S_{\text{dc}} + \text{ff}^2 \times (S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}})^2 + n_{\text{pix}} \times \text{RN}^2}$$

# Rapport signal à bruit

- 3 régimes de fonctionnement
  - A très bas signal, SNR dominé par le bruit de lecture:  $N_{\text{tot}} \approx \text{cte}$
  - Puis par le bruit de photons:  $N_{\text{tot}} \approx \sqrt{S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}} + S_{\text{dc}}} \propto \sqrt{t_{\text{pos}}}$
  - Puis par la PRNU:  $N_{\text{tot}} \approx \text{ff} \times (S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}}) \propto t_{\text{pos}} \Rightarrow \text{SNR constant!}$
- La courbe bruit vs signal est appelée « photon transfer curve »





# Temps de pose et rapport signal à bruit

---

- En pratique
  - Courant d'obscurité négligeable:  $S_{dc} \sim 5-10 \text{ e}^-/\text{heure}/\text{pixel}$
  - Bruit de lecture:  $RN \sim 4-5 \text{ e}^-$
  - PRNU:  $\sim 1-2 \%$
  - Fond de ciel dans le visible: de quelques  $\text{e}^-/\text{s}/\text{pixel}$  au sol (CFHT/MegaCam) à quelques  $1/100 \text{ e}^-/\text{s}/\text{pixel}$  (HST/ACS)
- Au sol, chaque pose dure le temps juste nécessaire pour travailler dans un régime dominé par le bruit de photons: 5-20 minutes par pose, en fonction du domaine de longueur d'onde et de la largeur du filtre
- Dans l'espace, on arrive rarement à ce régime, et le bruit de lecture peut contribuer significativement au bruit total

# Plan du cours

---

i r f u



saclay

- 1er cours: généralités sur le détecteur CCD
  - Principes du CCD
  - Paramètres et performances
- 2ème cours: utilisation d'un détecteur CCD
  - Mesures des performances
  - Observations et traitement d'images
  - Développements récents
- 3ème cours: quelques problématiques particulières
  - CCDs et spatial
  - Utilisation des CCDs en astronomie X
  - Grands plans focaux à base de CCDs

---

i r f u



saclay

# Mesures des performances

# Banc de caractérisation des CCDs

irfu  
cea  
saclay

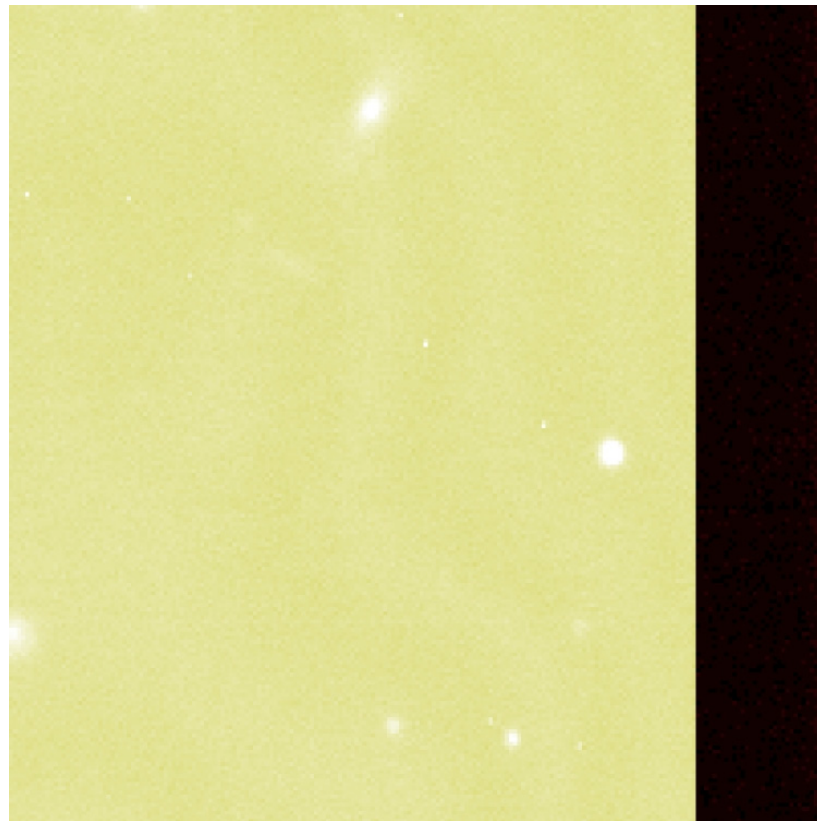
- Dark + cosmétique
- Linéarité +full well
- QE + PRNU
- Gain
- CTE
- RN



CEA-DAPNIA

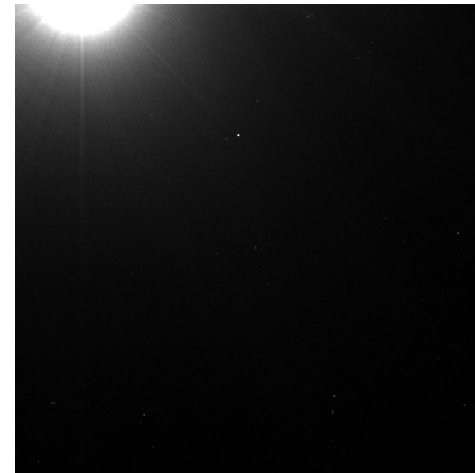
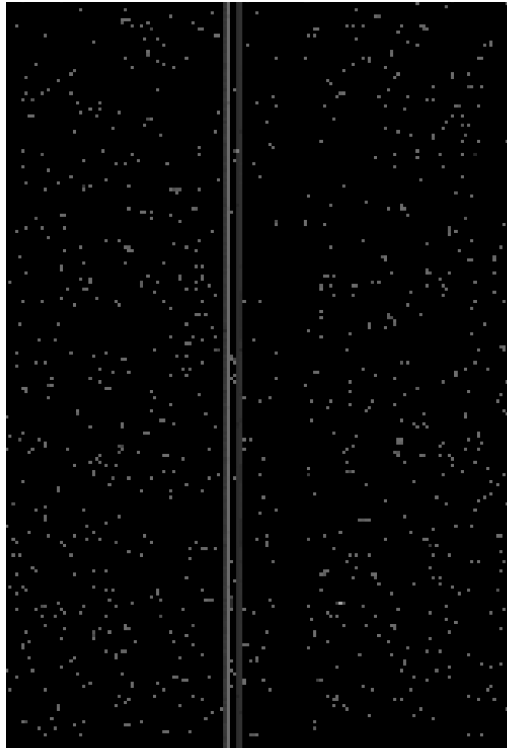
# Mesure du bruit de lecture

- On fait une série de bias (lecture immédiate du CCD à temps de pose 0s), et la dispersion des valeurs des pixels donne le bruit de lecture
- On peut mesurer le niveau de bias (zéro de l'électronique) et le bruit de lecture sur chaque image scientifique en continuant la lecture après avoir lu tous les pixels physiques (« overscan pixels »)



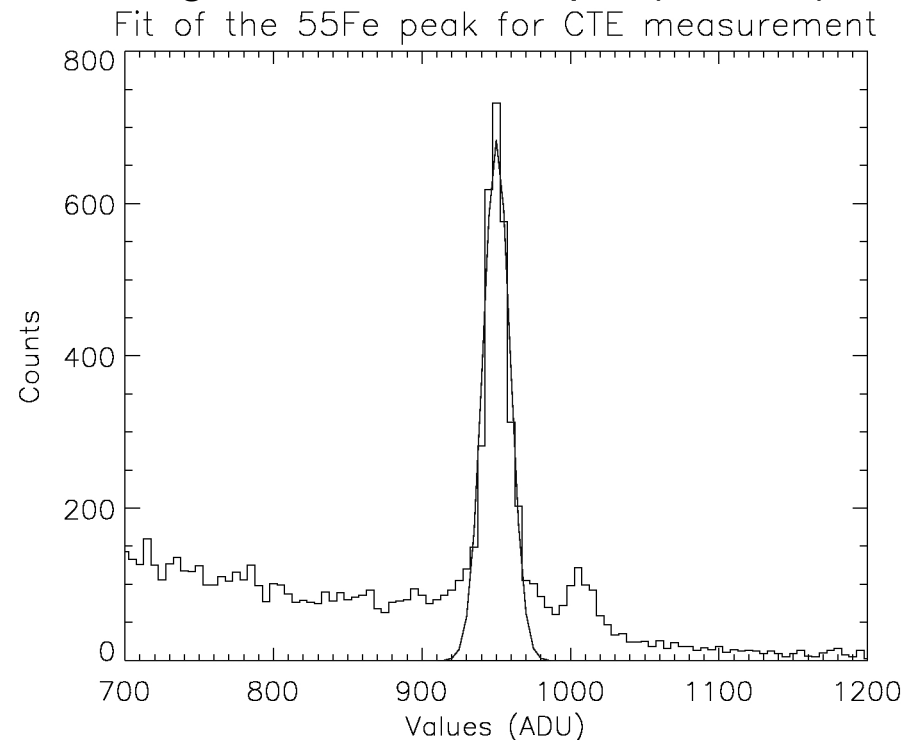
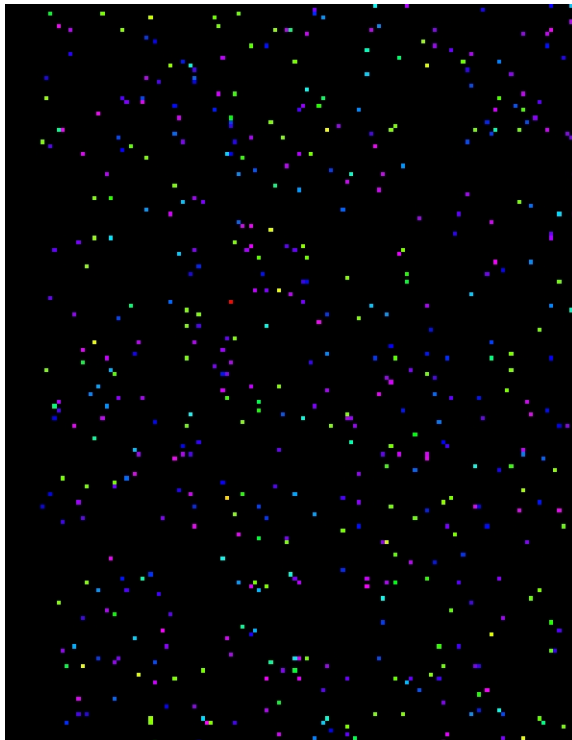
# Mesure du courant d'obscurité et cosmétique

- 2 possibilités:
- Poses courtes à température élevée et extrapolation en utilisant un modèle de dépendance en température
  - On gagne du temps mais mesures non précises (e2v)
- Poses longues (1 heure) à basse température
  - Permet de détecter des effets à faible niveau



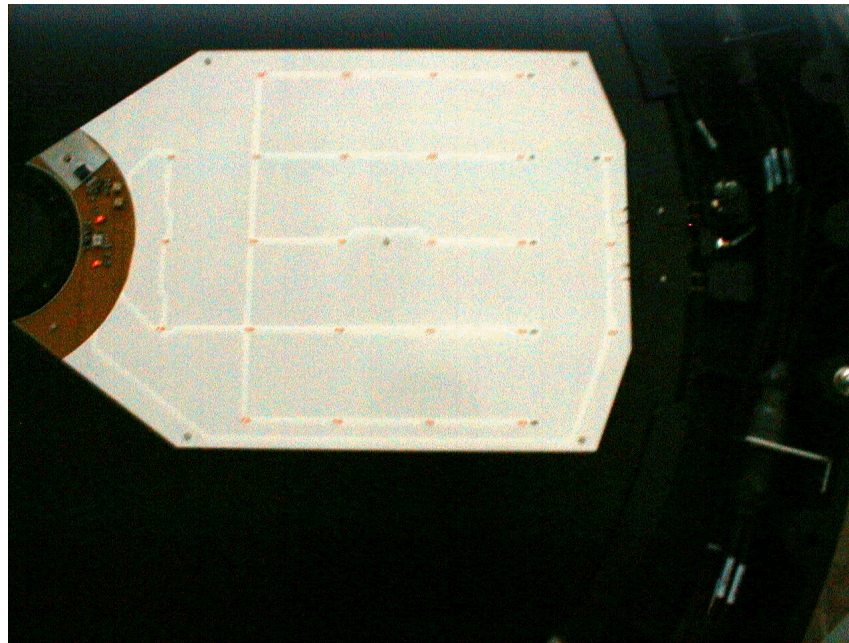
# Mesure de la CTE

- Plusieurs méthodes, la plus fiable est d'utiliser une source de  $\text{Fe}^{55}$ 
  - Emission de photons X à 5.9 keV: 1620  $e^-$  par photon
  - On illumine uniformément le CCD et on mesure la différence de signal dans une zone proche du circuit de sortie et dans les zones les plus éloignées
  - Permet également la mesure du gain de l'électronique ( $e^-/\text{ADU}$ )



# Mesure de la linéarité

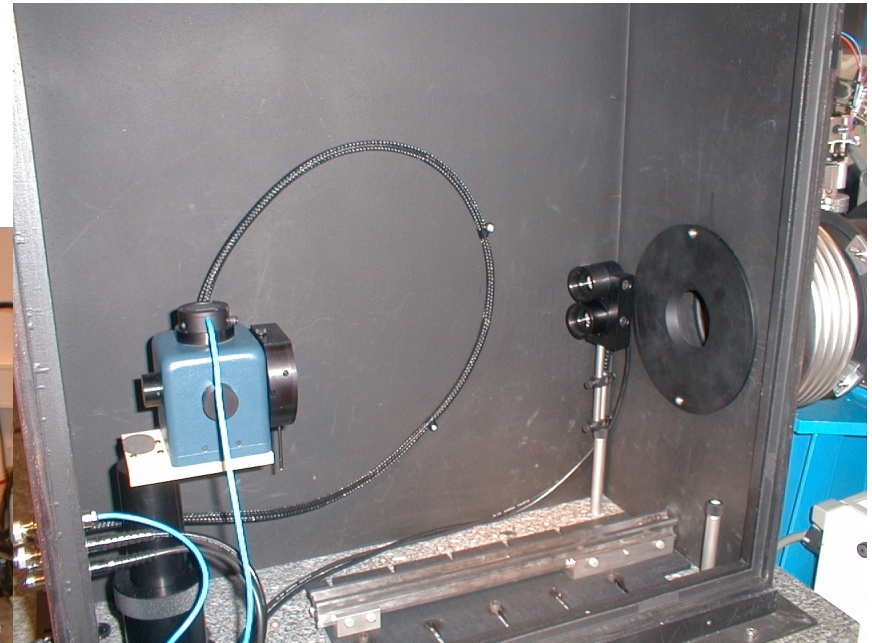
- Très simple: on mesure le signal donné par une source lumineuse stable, et on augmente le temps de pose, déterminé par un obturateur, pour explorer toute la dynamique
- On peut aussi travailler à temps de pose constant et augmenter le flux de la source
- MegaCam: matrice de LEDs rouges pulsées





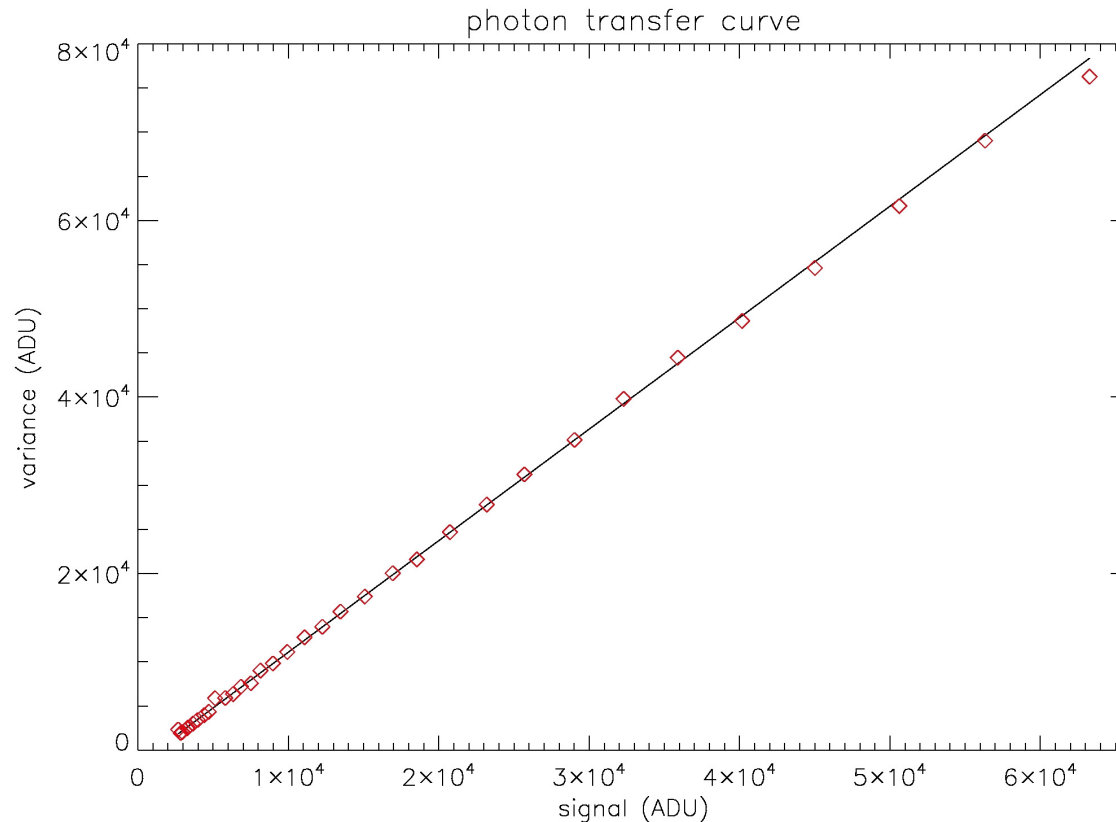
# Mesure du QE

- Rapport entre le flux émis mesuré par la photo-diode et le flux observé mesuré par le CCD
- Source de lumière monochromatique
- Photo-diode calibrée
- Sphère intégratrice



# Mesure du gain de la chaîne de lecture

- Photon transfer curve: courbe bruit en pas codeurs vs signal en pas codeurs (ou variance vs signal) à partir de la différence de 2 images de même niveau (permet de supprimer l'effet de la PRNU)
- Permet de déterminer le bruit de lecture et le gain (e-/ADU) de la chaîne électronique:  $\sigma_S^2(\text{ADU}) = (2/g) \times S(\text{ADU})$



---

i r f u



saclay

# Observations et traitement d'images

# Observations en mode pointé

---

i r f u



saclay

- Le télescope est pointé sur la zone à observer, et reste fixe par rapport à cette zone
- CCD full frame
  - CCD standard: toute la surface est photo-sensible
  - Un obturateur s'ouvre et se ferme pour définir le temps de pose, puis lecture de l'image, et nouvelle pose
  - Pour: simple et naturel
  - Contre: efficacité d'observation non optimale
- CCD frame transfer
  - CCD dont la moitié de la surface est masquée pour ne pas être photo-sensible
  - On fait une pose, puis on transfère très rapidement le contenu de la zone photo-sensible dans l'autre moitié du CCD, puis on lit tranquillement cette moitié pendant la pose suivante
  - Pour: pas besoin d'obturateur, pas de temps de télescope perdu pendant la lecture du CCD
  - Contre: champ de vue 2 fois plus petit

# Observations en mode TDI (time delayed integration)

---

i r f u



saclay

- On laisse défiler le ciel devant le télescope, avec un mouvement parallèle aux colonnes du CCD
- Le CCD est en lecture permanente, avec une vitesse de transfert des lignes égale à la vitesse de défilement du ciel
  - Les  $e^-$  générés par les photons issus de la source restent dans le même paquet de charges
  - Le temps de pose est égal au temps de traversée d'un CCD
- Pour: pas besoin d'obturateur, pas de temps de télescope perdu pendant la lecture du CCD, très peu de manœuvres du télescope
- Contre: il faut asservir le mouvement du télescope sur l'électronique de contrôle du CCD, et il faut assurer un mouvement du télescope parallèle aux colonnes du CCD
- Mode d'observation peu utilisé en astronomie (SDSS, Gaia) mais beaucoup utilisé en observation de la Terre, et très bien adapté à de très grands surveys

# Images et calibrations nécessaires

---

i r f u



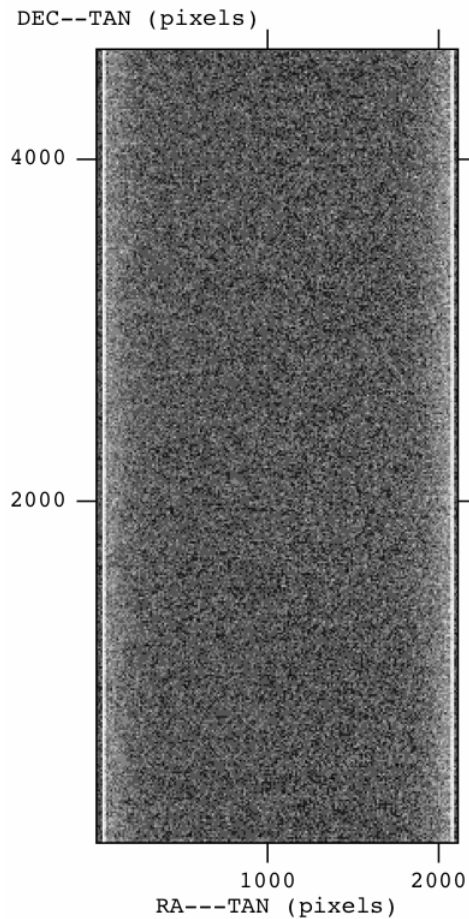
saclay

- N images d'un même champ, en dépointant légèrement le télescope (mode pointé) ou en décalant les CCDs (mode TDI)
  - Elimination des impacts du rayonnement cosmique
  - Minimisation des effets des pixels défectueux
- Bias: poses à temps de pose 0s
  - Soustraction du niveau zéro donné par l'électronique
- Dark: poses à l'obscurité de durées égales aux poses scientifiques
  - Soustraction du courant d'obscurité
- Flat fields et superflats: cartes de PRNU à travers les filtres utilisés pour les poses scientifiques
  - Correction de la dispersion de QE des pixels
- Standards photométriques: mesures d'étoiles de magnitudes connues
  - Conversion du signal mesuré en unités physiques
- Standards astrométriques: mesures d'étoiles de positions connues
  - Conversion coordonnées pixel (x,y) en coordonnées ciel ( $\alpha, \delta$ )
  - Correction de la distorsion optique

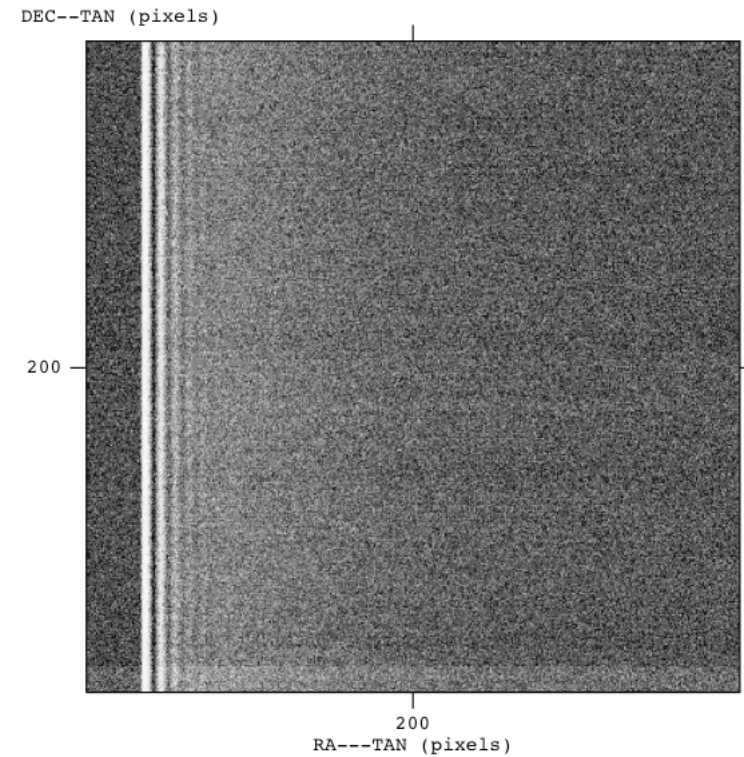
# Correction du bias

- A priori même niveau pour tous les pixels
- Soustraction pixel à pixel nécessaire pour corriger d'éventuels défauts de l'électronique de lecture

03Am06.bias.0.36.00\_ccd03



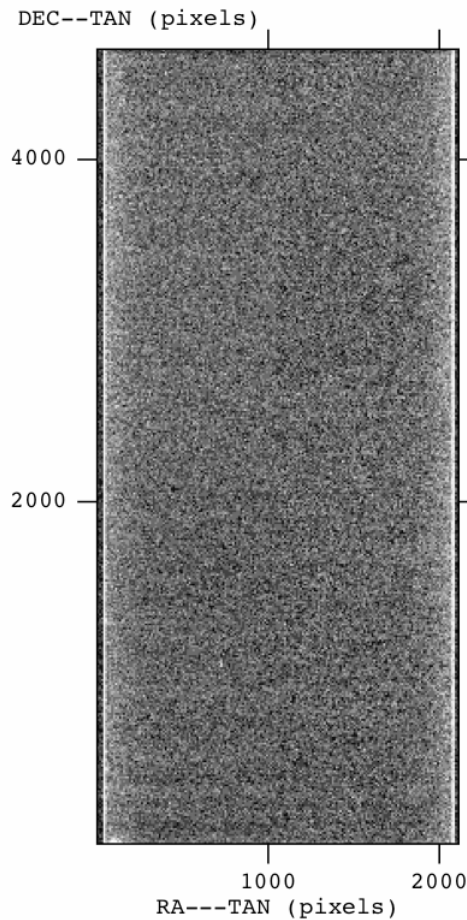
03Am06.bias.0.36.00\_ccd03



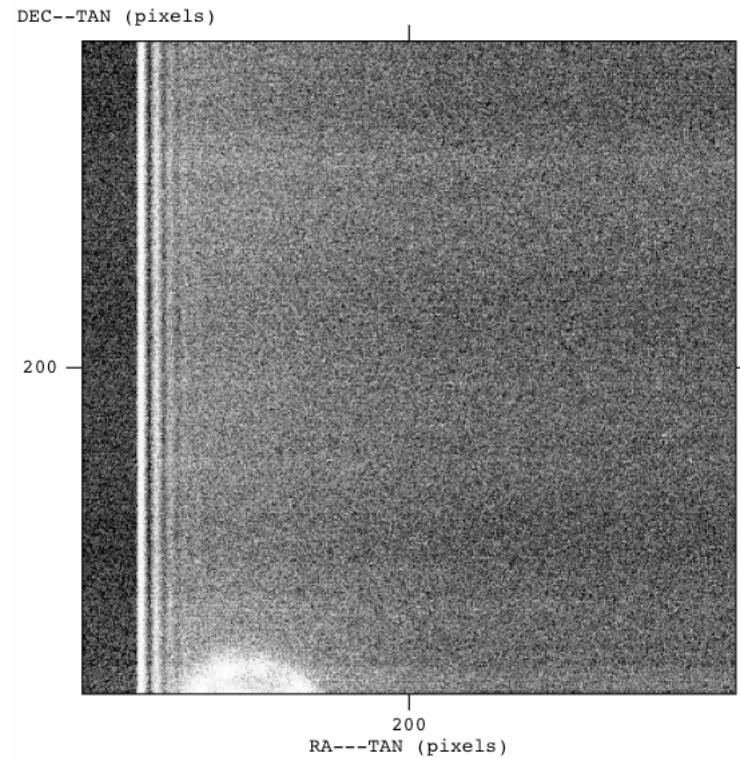
# Correction du dark

- Soustraction pixel par pixel car les images de courant d'obscurité peuvent avoir de la structure

03Am06.dark.1800.36.00\_ccd03



03Am06.dark.1800.36.00\_ccd03



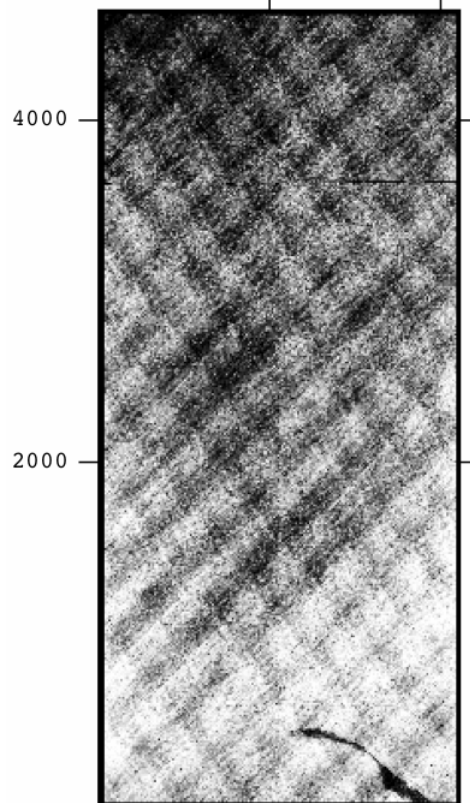


# Correction du flat field et des franges

- Division par l'image de flat field et soustraction d'une image de franges. Les cartes de franges sont obtenues par « superflat » en combinant les images du ciel, elles varient avec l'atmosphère

03Am06.flat.u.36.02\_ccd03

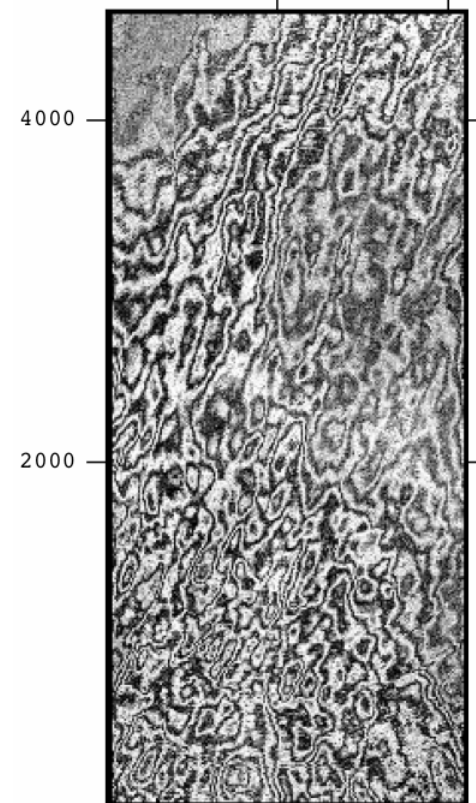
DEC--TAN (pixels)



RA---TAN (pixels)

03Am06.fringe.i.36.01\_ccd03

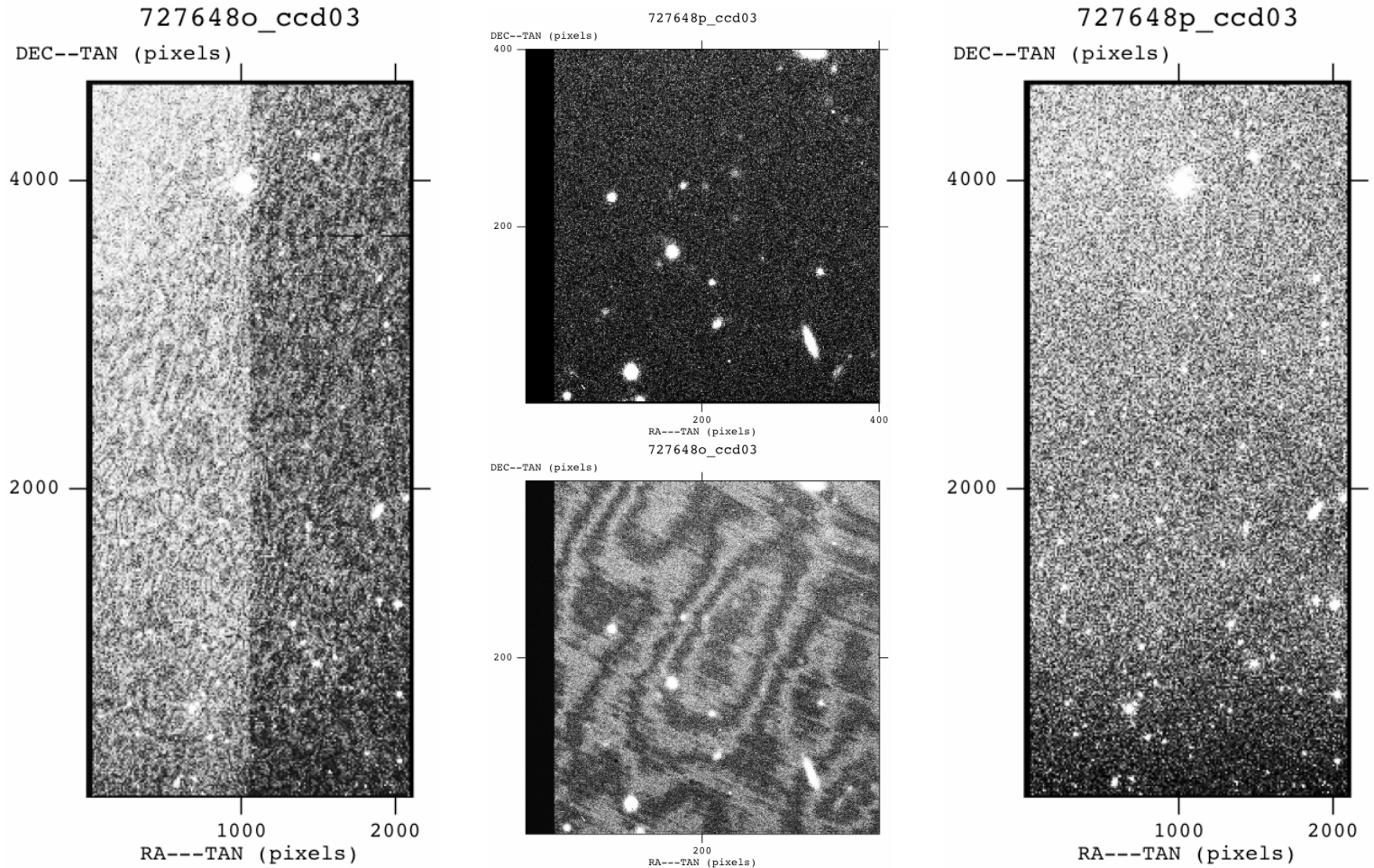
DEC--TAN (pixels)



RA---TAN (pixels)

# Preprocessing

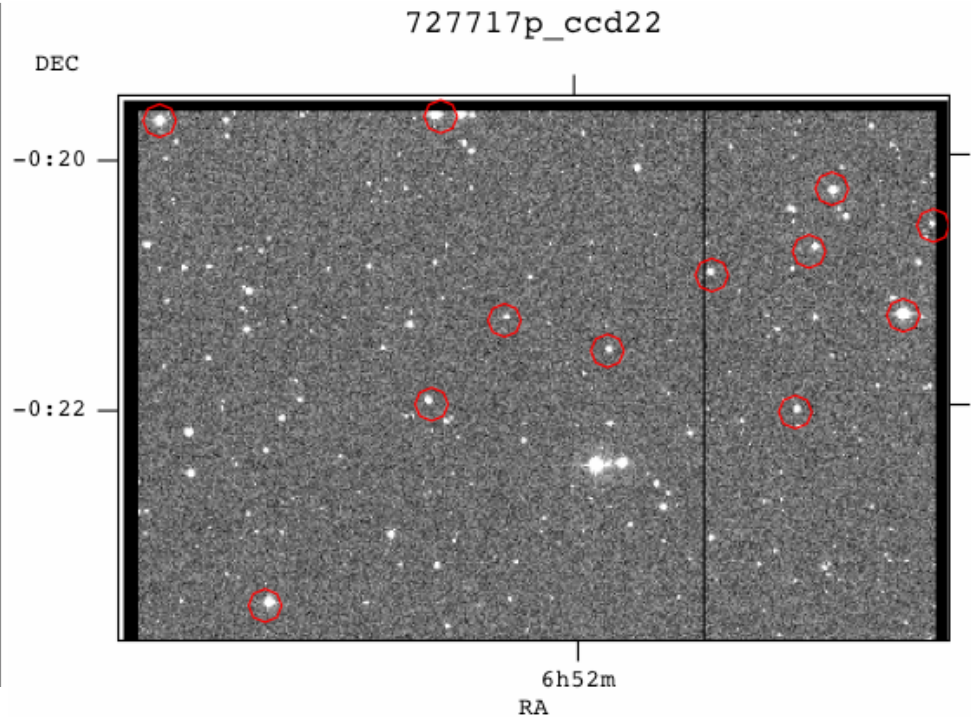
- Les opérations précédentes constituent le « preprocessing » des données, c'est-à-dire la correction des effets instrumentaux



# Calibration photométrique

- Observations de champs spécifiques d'étoiles de luminosités connues
- Calcul du signal mesuré sur chacune de ces étoiles
- Transformation des flux instruments (ADUs) en flux de photons (mag)
- Précision photométrique sur données CFHTLS  $\sim 0.05\text{mag}$  (2%)

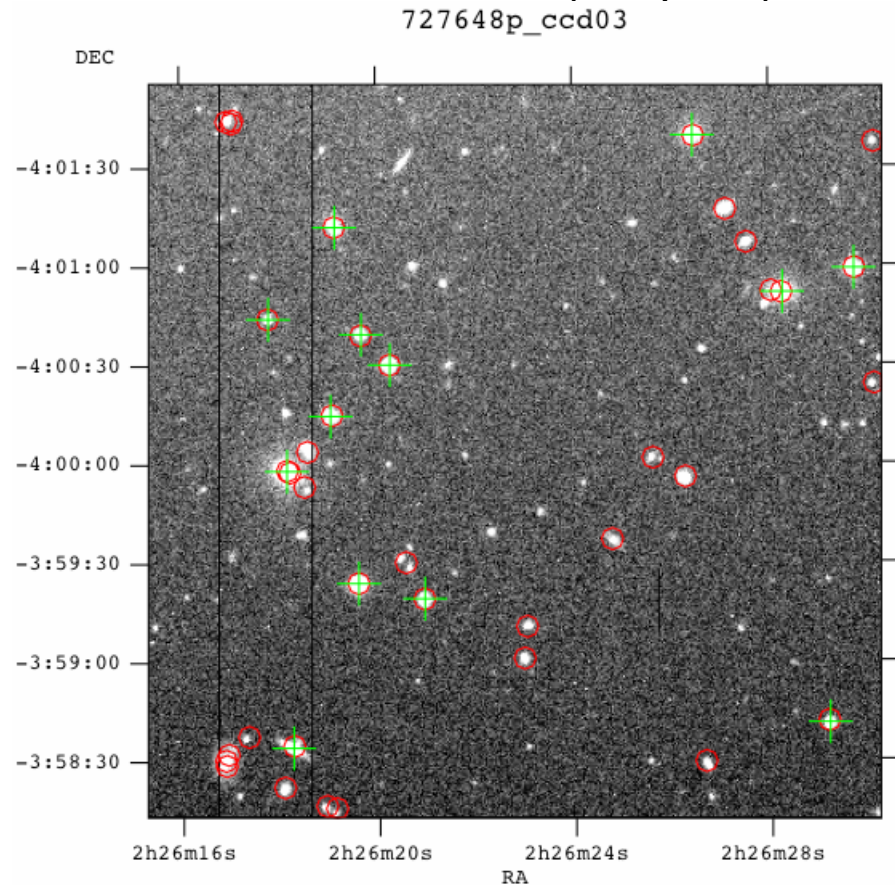
<u>Full</u>	<u>Star</u>	<u>RA2000</u>	<u>DE2000</u>	<u>Vmag</u>	<u>B-V</u>	<u>U-B</u>	<u>V-R</u>	<u>R-I</u>
		"h:m:s"	"d:m:s"	mag	mag	mag	mag	mag
<u>1</u>	98 666	06 52 10	-00 23 34	12.732	0.164	-0.004	0.091	0.108
<u>2</u>	98 652	06 52 05	-00 21 58	14.817	0.611	0.126	0.276	0.339
<u>3</u>	98 646	06 52 03	-00 21 18	15.839	1.060	1.426	0.583	0.504
<u>4</u>	98 642	06 51 59	-00 21 33	15.290	0.571	0.318	0.302	0.393
<u>5</u>	98 193	06 52 04	-00 27 18	10.030	1.180	1.152	0.615	0.537
<u>6</u>	98 627	06 51 53	-00 22 03	14.900	0.689	0.078	0.428	0.387
<u>7</u>	98 185	06 52 02	-00 27 21	10.536	0.202	0.113	0.109	0.124
<u>8</u>	98 634	06 51 56	-00 20 57	14.608	0.647	0.123	0.382	0.372
<u>9</u>	98 688	06 52 19	-00 23 34	12.754	0.293	0.245	0.158	0.180
<u>10</u>	98 626	06 51 53	-00 20 46	14.758	1.406	1.067	0.806	0.816
<u>11</u>	98 650	06 52 05	-00 19 40	12.271	0.157	0.110	0.080	0.086
<u>12</u>	98 618	06 51 50	-00 21 17	12.723	2.192	2.144	1.254	1.151
<u>13</u>	98 624	06 51 52	-00 20 16	13.811	0.791	0.394	0.417	0.404
<u>14</u>	98 675	06 52 14	-00 19 41	13.398	1.909	1.936	1.082	1.002
<u>15</u>	98 614	06 51 49	-00 20 34	15.674	1.063	0.399	0.834	0.645
<u>16</u>	98 670	06 52 12	-00 19 17	11.930	1.356	1.313	0.723	0.653
<u>17</u>	98 685	06 52 19	-00 20 19	11.954	0.463	0.096	0.290	0.280
<u>18</u>	98 676	06 52 14	-00 19 21	13.068	1.146	0.666	0.683	0.673
<u>19</u>	98 L5	06 52 16	-00 19 39	17.800	1.900	-0.100	3.100	2.600
<u>20</u>	98 682	06 52 17	-00 19 42	13.749	0.632	0.098	0.366	0.352



# Calibration astrométrique

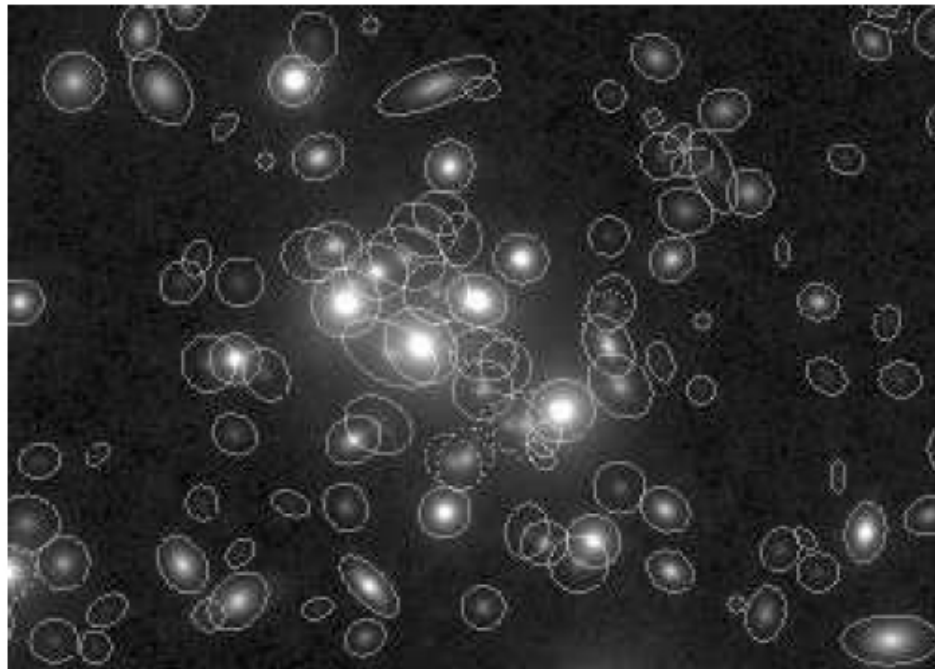
- Extraction dans chaque image d'une liste d'objets brillants
- Comparaison avec un catalogue d'étoiles de coordonnées connues
- Transformation des coordonnées pixels (x,y) en coordonnées ciel ( $\alpha, \delta$ )
- Précision astrométrique sur données CFHTLS ~ 50mas (1/4 pixel)

<u>Full</u>	<u>USNO-B1.0</u>	<u>RAJ2000</u>	<u>DEJ2000</u>	<u>Bmag</u>	<u>Rmag</u>
		<u>deg</u>	<u>deg</u>	<u>mag</u>	<u>mag</u>
<u>1</u>	0860-0022504	036.603214	-03.993614		
<u>2</u>	0859-0022973	036.606706	-04.000450	21.00	
<u>3</u>	0860-0022494	036.585689	-03.991700		
<u>4</u>	0860-0022508	036.609456	-03.998848	20.85	19.75
<u>5</u>	0860-0022502	036.595948	-03.986273		
<u>6</u>	0859-0022963	036.584395	-04.008348	19.58	16.87
<u>7</u>	0860-0022495	036.587245	-03.988631	18.95	17.08
<u>8</u>	0860-0022501	036.595717	-03.983603		19.92
<u>9</u>	0859-0022956	036.579481	-04.004120	20.71	19.08
<u>10</u>	0860-0022492	036.581653	-03.989970	16.42	15.01
<u>11</u>	0859-0022958	036.581964	-04.010831	20.45	18.46
<u>12</u>	0859-0022955	036.577378	-04.001053	20.42	19.73
<u>13</u>	0860-0022488	036.577114	-03.998103		20.37
<u>14</u>	0860-0022486	036.575878	-03.999312	20.59	
<u>15</u>	0860-0022485	036.575662	-03.999478	19.36	17.17
<u>16</u>	0859-0022952	036.574073	-04.012231		20.03
<u>17</u>	0859-0022984	036.616825	-04.014487		19.55
<u>18</u>	0859-0022957	036.579764	-04.019962	20.67	18.91
<u>19</u>	0859-0022988	036.617698	-04.014348	19.80	17.86
<u>20</u>	0859-0022979	036.614734	-04.018581		20.33



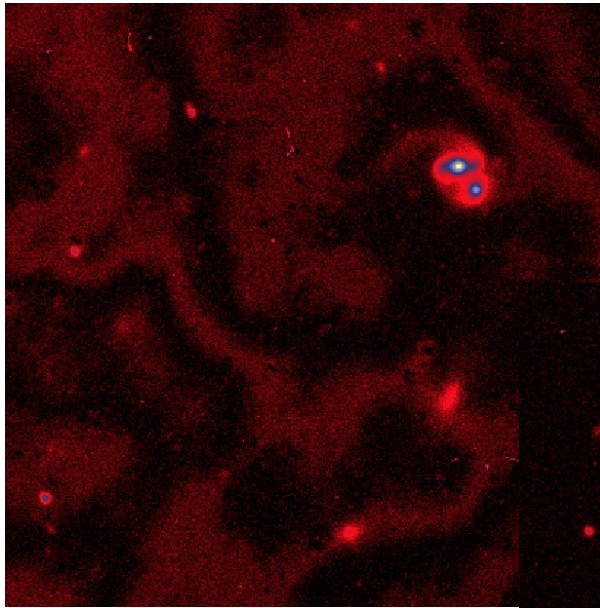
# Coaddition et Cataloguage

- Une fois les  $N$  images d'un même champ « astrométrées », on peut les coadditionner pour obtenir la sensibilité voulue
- Enfin on extrait toutes les sources contenues dans les images (logiciel SExtractor, Bertin et Arnouts, A&A 117, 393, 1996)
  - Calcul de position, magnitudes, formes, ...
  - Génération de catalogues d'objets



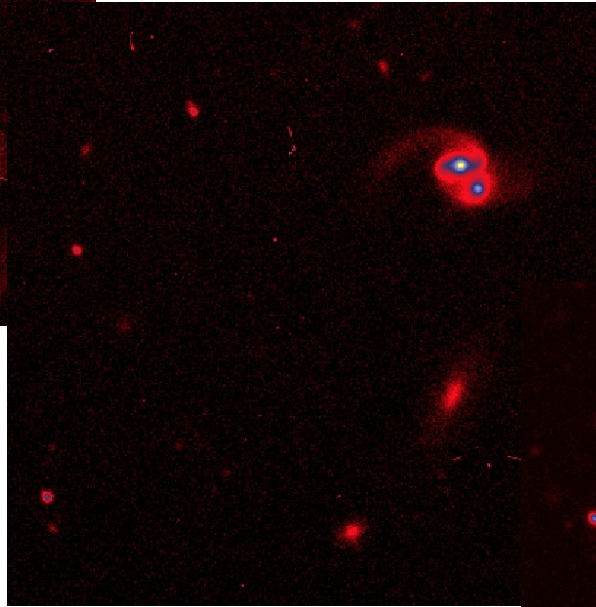
Bertin, Gretschi 2005, pp299-302

# Exemple de traitement d'un champ

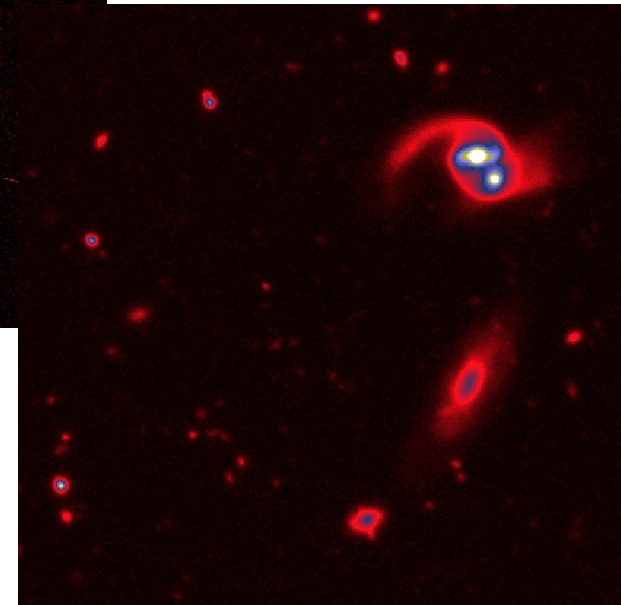


⇐ Image brute pose 520s, filtre i'

Image processée ⇒



100 images coadditionnées, total 52000s ⇒



---

i r f u



saclay

# Développements récents

# Récapitulatif des performances des CCDs actuels

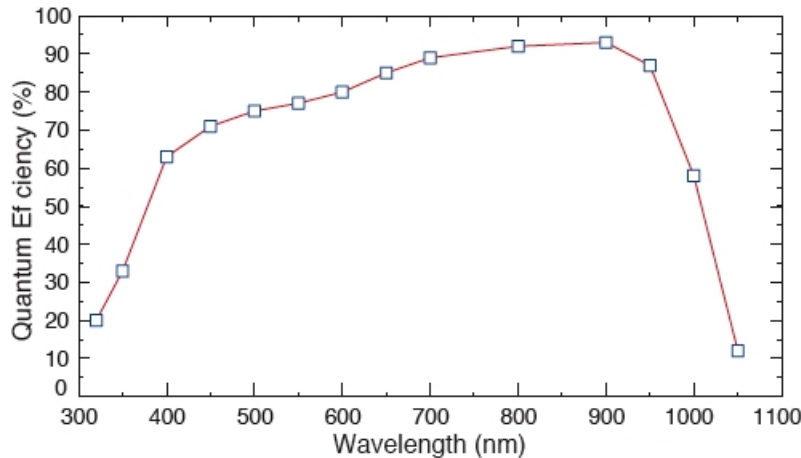
- Détecteurs quasi parfaits!
  - QE élevé
  - Linéaire
  - Grande dynamique
  - Faible bruit
  - Grande taille

Détecteur	Plaque photo Kodak	Kodak 5 Mpixels	e2v 42-90
Nombre pixels		2600x1970	2048x4608
Taille pixels ( $\mu\text{m}$ )	4x4	6.8x6.8	13.5x13.5
Taille détecteur (mm)	350x350	18x13	28x62xMxN
QE (BGR)	0.02 0.03	0.32 0.40 0.32	0.85 0.80 0.75
Linéarité (%)	Non (log)	16	0.5
Full well ( $\text{ke}^-$ )		30	250
PRNU (%)		15	2
Dark ( $\text{e}^-/\text{s}$ )		200	0.003
Colonnes chaudes		0	2
CTE		0.999995	0.999995
Bruit ( $\text{e}^-$ )		30	5
Data rate (MHz)		25	0.166
Prix (€)	100 par plaque	< 900	22 k

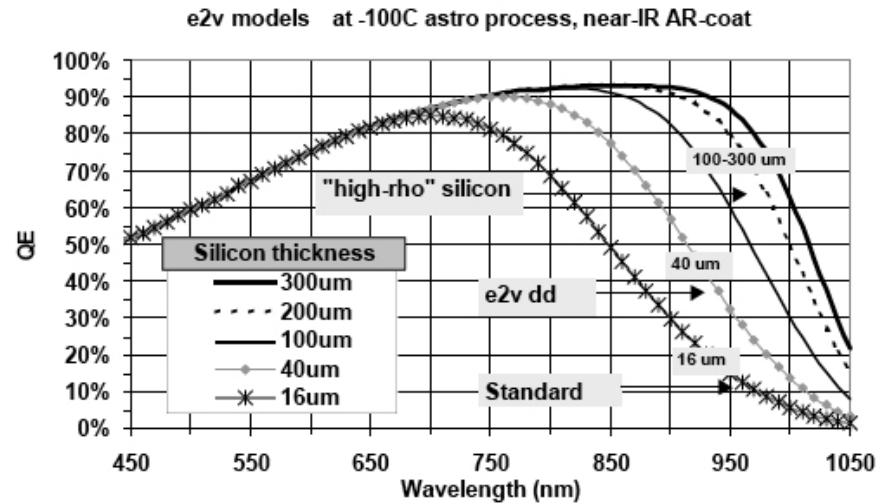


# CCDs « fully depleted »

- Même idée que les CCD à deep depletion mais sur une plus grande épaisseur pour avoir un grand QE dans le rouge et le bleu
- Développement au LBNL dans le cadre du projet SNAP
  - CCD épais (100 - 300  $\mu\text{m}$ ), Si dopé n avec canal enterré p
  - Résistivité 10  $\text{k}\Omega\text{-cm}$  au lieu de 20 - 40  $\Omega\text{-cm}$
  - Tension de substrat 20 - 70 V au lieu de 10 V
- Développement similaire chez e2v



Bebek et al., SPIE vol 5167, 2003



Jorden et al., SPIE vol 6276, 2006

# CCDs « Low light level (L3) »

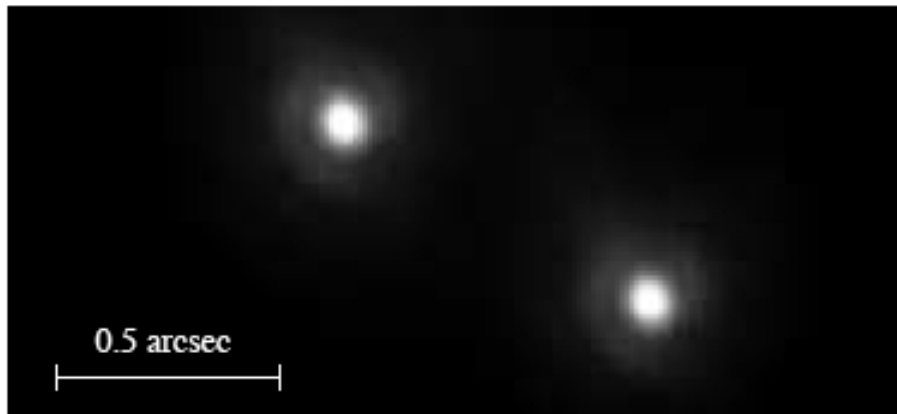


- EMCCDs: electron multiplying CCDs
- Problème: la turbulence atmosphérique varie à l'échelle de quelques dizaines de milli-secondes, et défléchit les rayons lumineux
  - ⇒ Une image résultant d'une pose de plusieurs secondes est donc dégradée par rapport à la limite théorique (diffraction)
- But: on veut augmenter la qualité image en réduisant l'effet de la turbulence atmosphérique (alternative à envoyer un télescope dans l'espace)
  - ⇒ Il faut donc faire des poses ultra-courtes et lire le CCD à cadence très élevée (quelques MHz)
  - ⇒ Or le bruit de lecture augmente très vite avec la cadence: 4-5 e<sup>-</sup> vers 100 kHz, quelques dizaines d'e<sup>-</sup> vers 10 MHz
- Solution: un registre de gain entre le registre série et le circuit de lecture
  - C'est un registre série où une des tensions appliquées pour le transfert des charges est très élevée (40-50 V au lieu de 10 V) pour accélérer les e<sup>-</sup> et déclencher un phénomène d'avalanche
  - Le signal multiplié est ensuite converti par un circuit de lecture standard

# CCDs « Low light level (L3) »

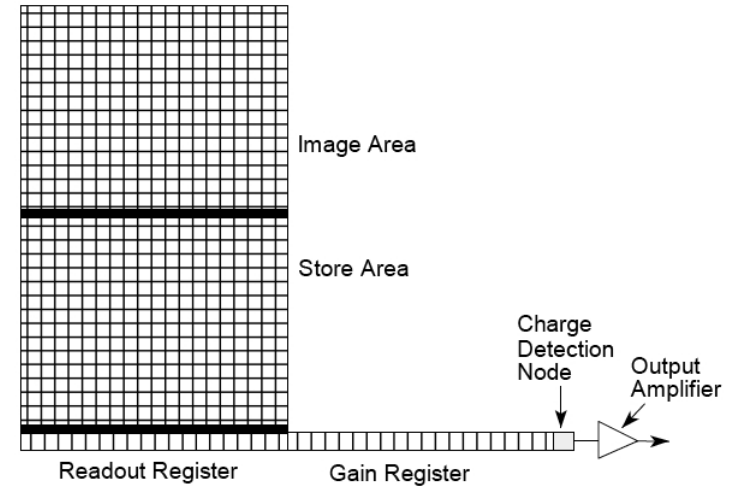
- Collaboration e2v - université Cambridge
- CCD e2v 201: 1Kx1K pixels plus un registre gain de 604 éléments
- Multiplication du signal: x250 - x1000  
⇒ Cadence lecture 15 MHz

⇒ Haute résolution spatiale  
⇒ Comptage de photons

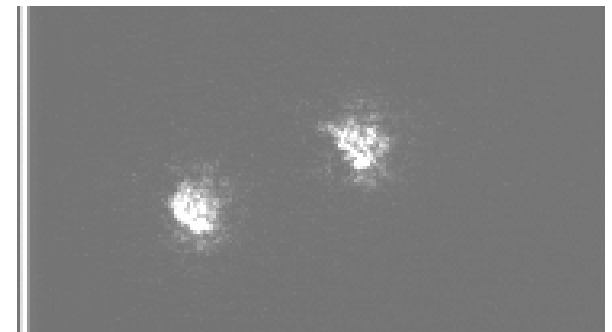


**Fig. 5.** A 1% selected image of  $\zeta$  Boötis with a Strehl ratio of 0.26 and a FWHM of  $\sim 0.1''$ , taken in  $0.42''$  seeing.

Law et al., A&A 446, 739, 2006



Jerram et al., SPIE vol 4306, 2001

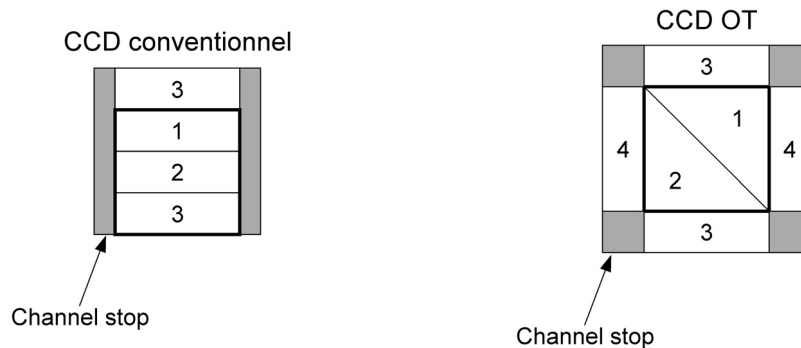


© Craig Mackay and the Lucky Imaging Team 2005-2009

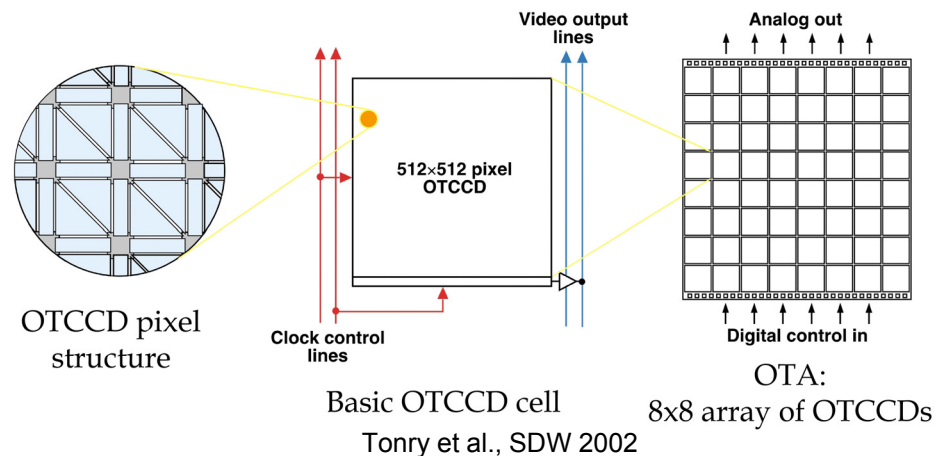
# OTCCDs

- CCDs à transfert orthogonal, i.e. dans les 2 directions lignes et colonnes

- Les channel stops sont remplacés par une 4ème électrode permettant de transférer horizontalement les charges

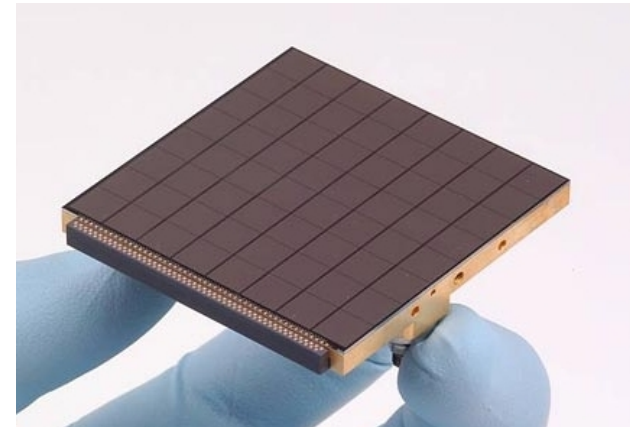
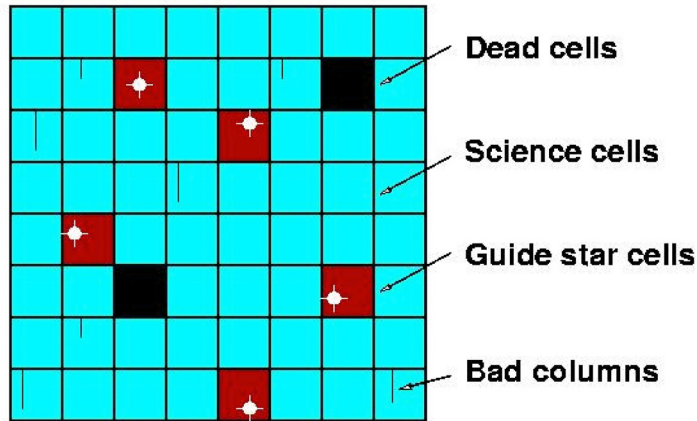


- Les petits OTCCDs (512x512) sont assemblés en mosaïque de 8x8 (OTA)



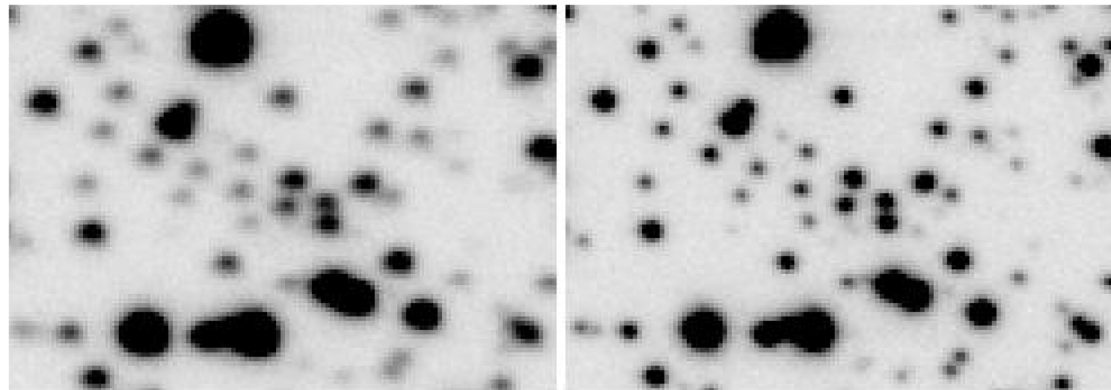
# OTCCDs

- Les étoiles brillantes servent à décaler les charges en temps réel et corriger du « tip-tilt » (mouvements du télescope générés par le vent)
- Projet Pan-STARRS Lincoln Lab MIT - université Hawaii



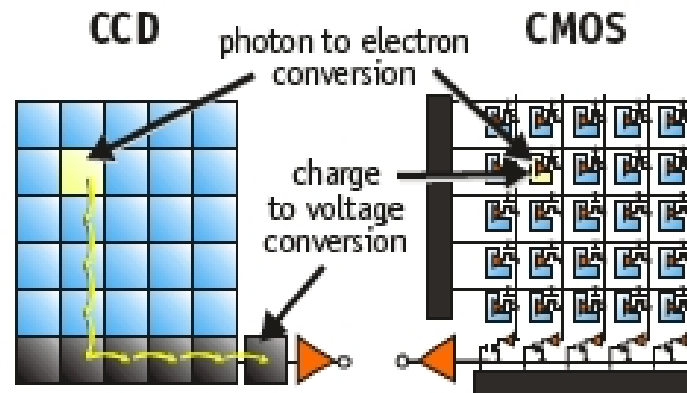
Normal guiding (0.73")

OT tracking (0.50")



Tonry et al., SDW 2002

- La principale limitation d'un CCD tient à son principe: la lecture par transfert des charges de proche en proche
  - Génération de colonnes chaudes à cause de pixels ayant un fort courant d'obscurité
  - Dégradation de la qualité image à cause d'une plus ou moins bonne efficacité de transfert
- Pour y remédier on a développé les APS (active pixel sensor) ou CMOS (complementary metal oxide semiconductor)
  - Chaque pixel contient sa propre électronique de lecture
  - Plus de problèmes de transfert
  - Possibilités d'adresser chaque pixel individuellement



Litwiller, Photonics Spectra, 2005

# APS monolithiques

---

i r f u

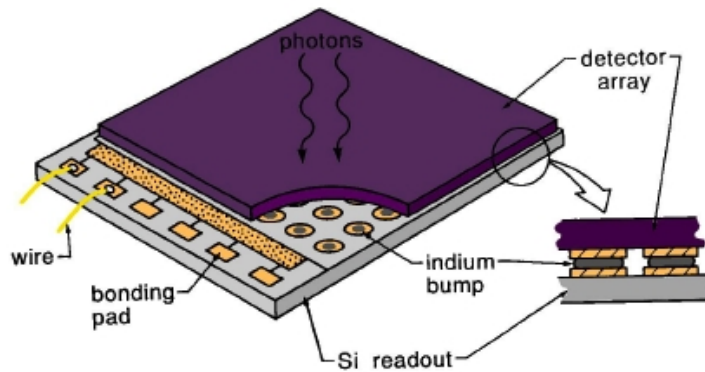


saclay

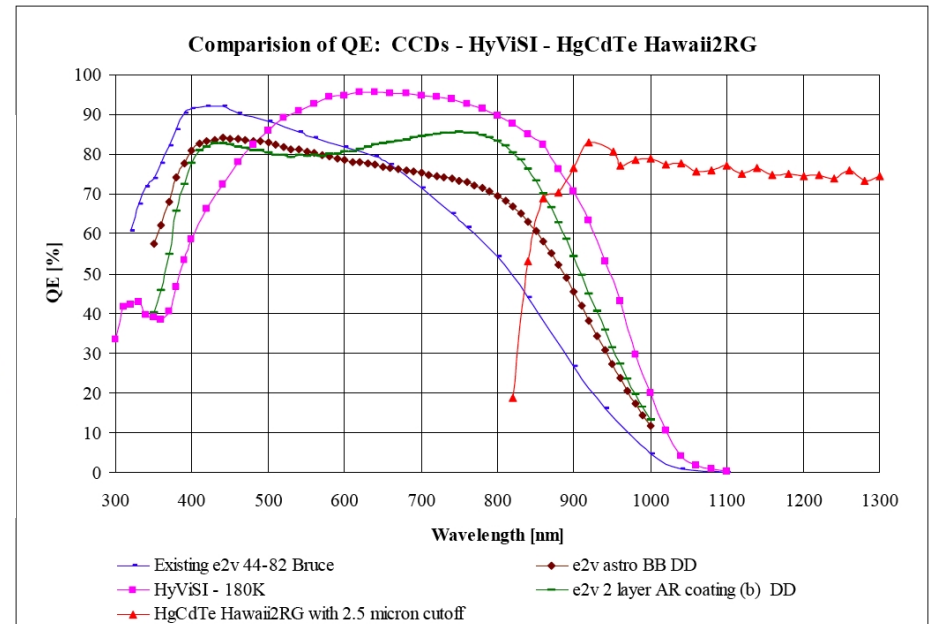
- Technologie récente
  - Difficultés dans l'amincissement
  - Faible QE (la partie active n'est pas photosensible)
  - Pas de CMOS sur substrat haute résistivité
  - Circuits de lecture plus bruyants que pour les CCDs
- L'idée de départ était d'utiliser les technologies CMOS en cours chez les fabricants de composants électroniques pour réduire les coûts
- Or un APS performant coûte aussi cher à développer qu'un CCD
  - ⇒ Peu utilisés pour l'instant en astronomie
  - ⇒ Pointage et guidage des satellites (« star trackers »)
- Développements en cours au CNES et à l'ESA

# CMOS hybrides

- Hybridation d'un plan de détection en Si type CCD avec un plan de lecture CMOS
  - A priori on a les avantages des CCDs et des APS sans les inconvénients
  - Rockwell « Hyvisi » 2Kx2K en cours d'évaluation



Figer et al., AAS 205, 2005

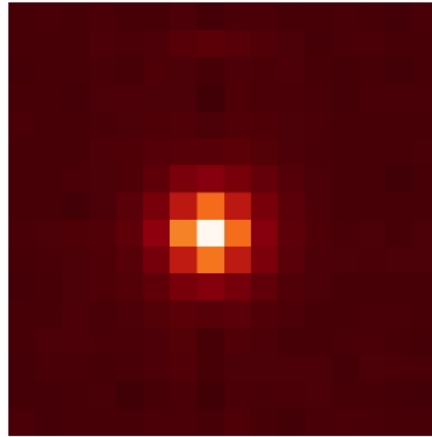


Dorn et al., SPIE vol 6276, 2006



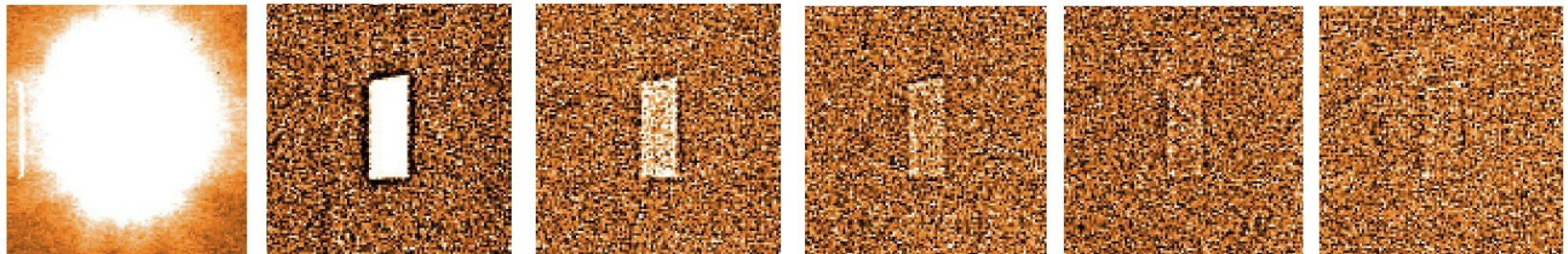
# CMOS hybrides

- Nouveaux problèmes: diaphonie et rémanence
  - Diaphonie Hyvisi: 42% dont 8 à 10% dans chacun des 4 pixels les plus proches



Dorn et al., SPIE vol 6276, 2006

- Rémanence Hyvisi: très importante avec des objets surexposés



25s

75s

150s

225s

475s

Dorn et al., SPIE vol 6276, 2006

# Plan du cours

---

i r f u



saclay

- 1er cours: généralités sur le détecteur CCD
  - Principes du CCD
  - Paramètres et performances
- 2ème cours: utilisation d'un détecteur CCD
  - Mesures des performances
  - Observations et traitement d'images
  - Développements récents
- 3ème cours: quelques problématiques particulières
  - CCDs et spatial
  - Utilisation des CCDs en astronomie X
  - Grands plans focaux à base de CCDs

---

i r f u

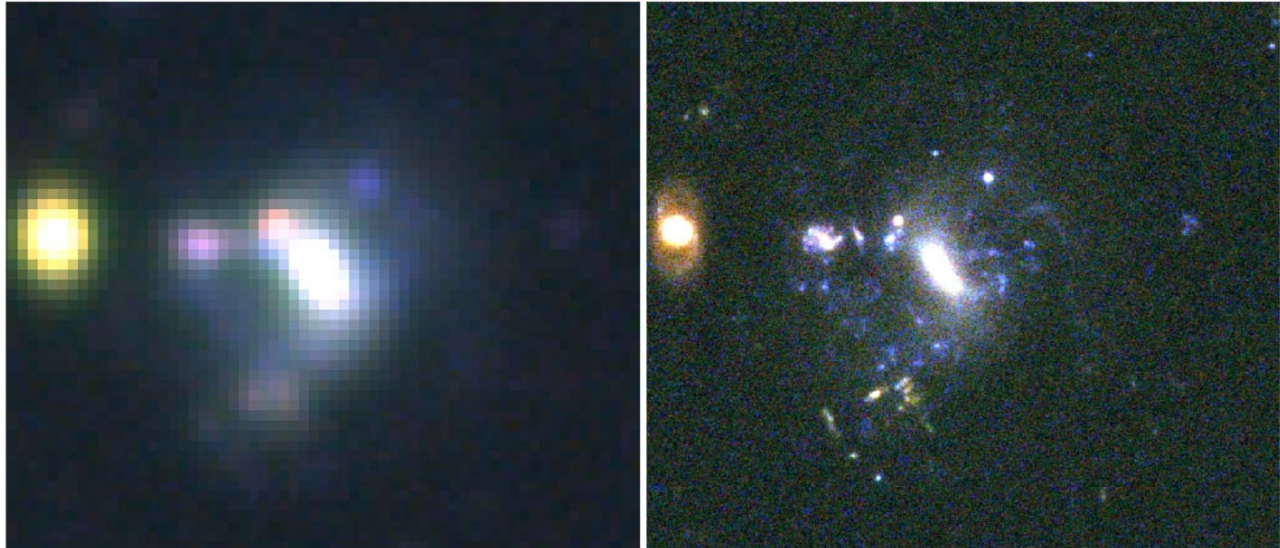


saclay

# CCDs et spatial

# Pourquoi observer dans le spatial?

- L'atmosphère terrestre limite les observations
  - Qualité image dégradée par la turbulence atmosphérique
  - PSF 0.5" - 1.0" au sol, 0.1" dans l'espace: HST



SUBARU

HST

- L'atmosphère terrestre absorbe la majeure partie du rayonnement électromagnétique
  - $\gamma$ , X, UV, IR, sub-mm: Integral, XMM, IUE, ISO, Herschel

- Environnement beaucoup plus contraignant qu'au sol
  - Tenue aux radiations
  - Tenue aux vibrations
  - Fiabilité
  - Budgets (masse, volume, puissance électrique, ...) limités
  
- Fond de ciel plus faible
  - ⇒ Très peu de flux
  
- Niveau de radiations élevé
  - Dépôt d'énergie dans le détecteur
    - Création de paires e-trou
    - Déplacement des atomes dans la structure du silicium
  - ⇒ Pollution des images par les impacts de particules
  - ⇒ Vieillissement accéléré des détecteurs

- Au sol
  - CFHT/MegaCam
  - Miroir 3.6m + pixels 0.19"
  - $\sim 10$  e<sup>-</sup>/s/pixel dans la bande i'
  
- Dans l'espace
  - HST/ACS/WFC
  - Miroir 2.4m + pixels 0.05"
  - $\sim 0.03 - 0.1$  e<sup>-</sup>/s/pixel dans la bande i'
  - Quelques centaines d'e<sup>-</sup> au plus à la fin de la pose
  - ⇒ Problèmes de non linéarité, efficacité de transfert, pièges

# Rayonnement cosmique et images

- Ionisation du silicium par les protons et ions lourds
- Fonction de l'orbite, de l'énergie des particules, de la géométrie des pixels
- Très gênant avec des détecteurs épais, moins avec des CCDs amincis
- Les « cosmiques » ou « glitches » sont transitoires et s'éliminent par comparaison d'images successives (« deglitching »)
  - ⇒ Blindage des détecteurs
  - ⇒ Limitation du temps de pose



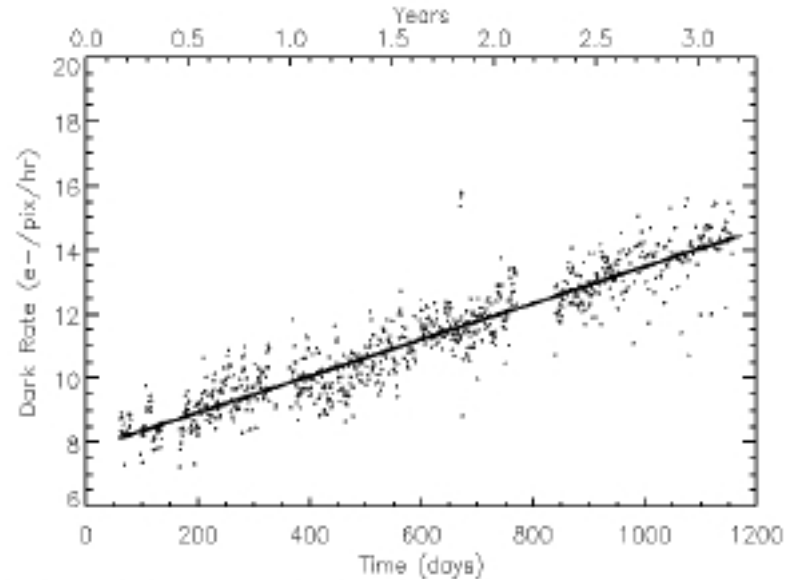
NASA HST/ACS

QuickTime™ et un décompresseur codec YUV420 sont requis pour visionner cette image.

ESA ISO/ISOCAM

# Courant d'obscurité et pixels chauds

- Déplacement des atomes dans la structure du silicium
- Augmentation du courant d'obscurité et du nombre de pixels chauds



From left to right: before launch, and after 1, 2 and 3 years on orbit.

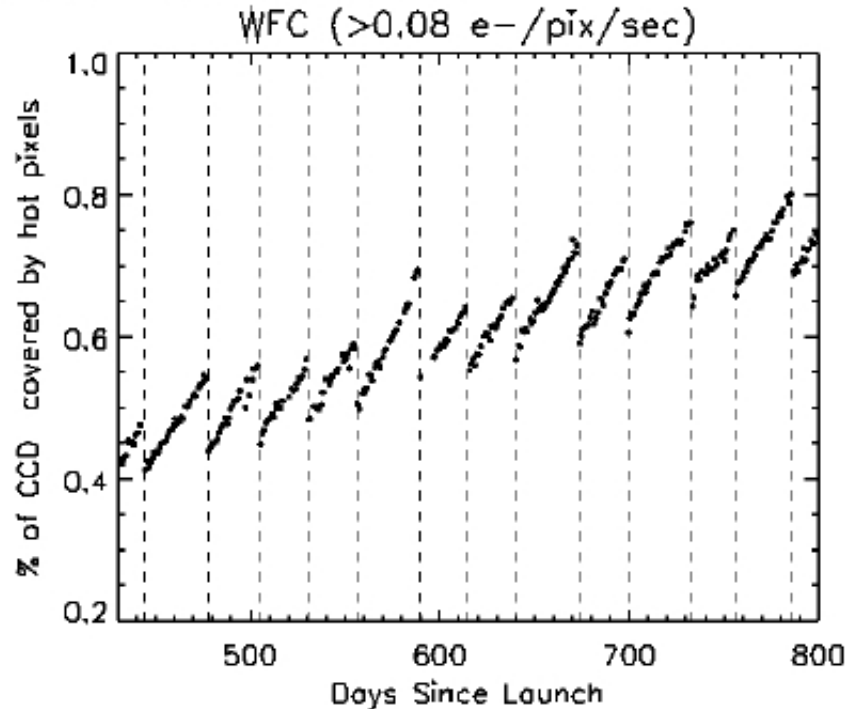
Pavlovsky, C. et al., Advanced Camera for Surveys Instrument Handbook for Cycle 16, STScI 2006.



# Récupération des pixels chauds

- Technique de l'« annealing »: on chauffe les CCDs à intervalle régulier pour permettre à la structure cristalline de se remettre en place
- Caméra WFC de l'instrument ACS du Hubble Space Telescope: un recuit par mois à +19°C pendant 6h
  - Permet de récupérer ~60% des pixels chauds

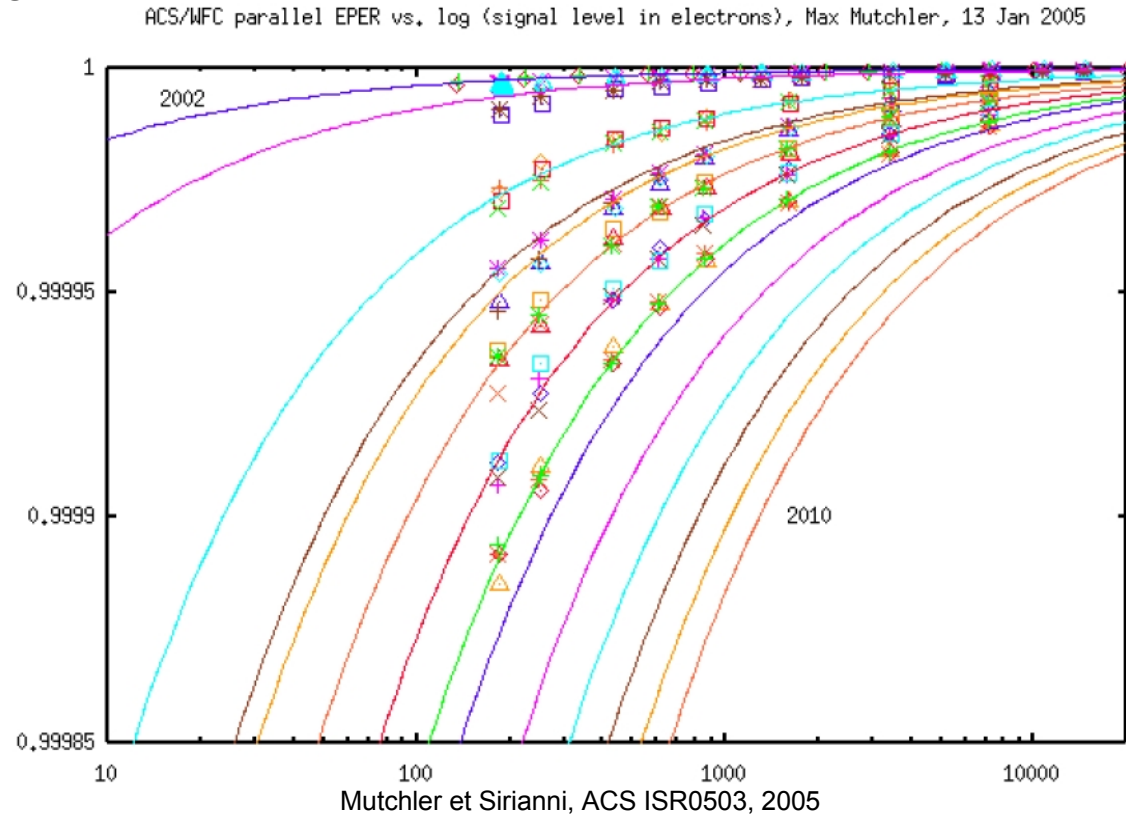
Figure 4.6: Hot pixel growth in the WFC CCDs.



Pavlovsky, C. et al., Advanced Camera for Surveys Instrument Handbook for Cycle 16, STScI 2006.

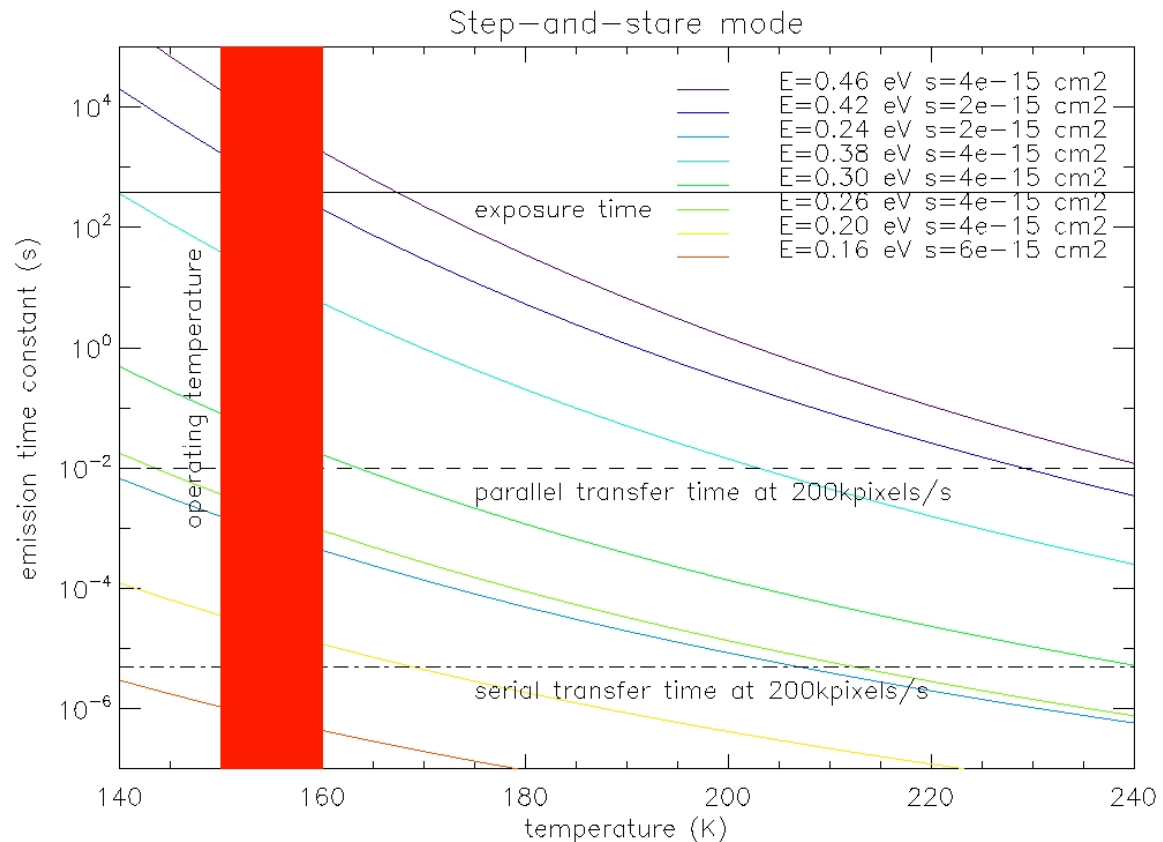
# Dose cumulée et dégradation du CCD

- Déplacement des atomes dans la structure du silicium  
⇒ Création de « pièges » (niveaux d'énergie dans le gap du Si)
- Les charges sont piégées et relâchées après un certain délai
- La dose cumulée augmente le nombre de pièges  
⇒ Dégradation de la CTE



# Constantes de temps des pièges

- Il faut comparer les constantes de temps d'émission des pièges avec les temps caractéristiques des observations
- Pb: ces constantes de temps d'émission s'étalent sur 10 décades!
- Seul paramètre libre: la température de fonctionnement du CCD



# Comparaison CCD sol - espace

---

i r f u



saclay

- MegaCam
  - e2v 42-90 2048x4608 13.5 $\mu$ m $\times$ 13.5 $\mu$ m
  - CCD aminci grand format 3 phases: produit standard
  - Sur catalogue
  - 22 k€ pièce (2,30k€ le Mpixel)
- Euclid
  - e2v 203-82 4096x4096 12 $\mu$ m $\times$ 12 $\mu$ m
  - Développement spécifique par le fabricant pour SDO
  - 4 phases (pour le mode TDI)
  - 250 k€ pièce (14,90k€ le Mpixel)
  - $\Delta$ -développement à prévoir
    - Injection de charges (pour remplir les pièges)
    - Modification de l'architecture (4 4Kx1K)
  - $\Rightarrow$   $\Delta$ -qualification à prévoir
  - $\Rightarrow$  Prix final  $\uparrow$

---

i r f u



saclay

# Utilisation des CCDs en astronomie X

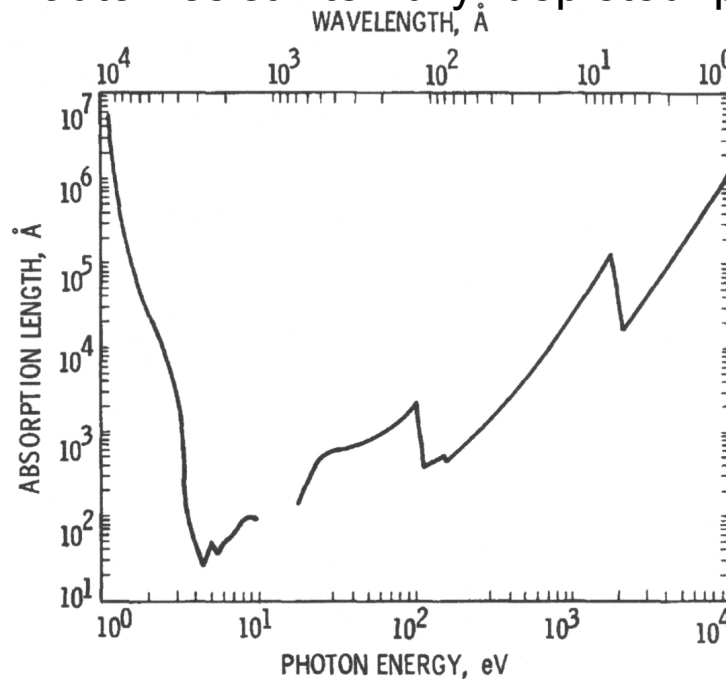
# CCDs et photons X

irfu



saclay

- Les photons X « mous » ont une longueur d'absorption dans le Si comparable à celle des photons visibles
  - Un CCD ne détecte pas en UV (1000-2500Å) car la longueur d'absorption est trop petite
- Même problématique que dans le visible: il faut adapter la profondeur de la zone déplétée à la longueur d'absorption des photons
  - Substrat haute résistivité fully depleted pour détecter jusqu'à 10keV

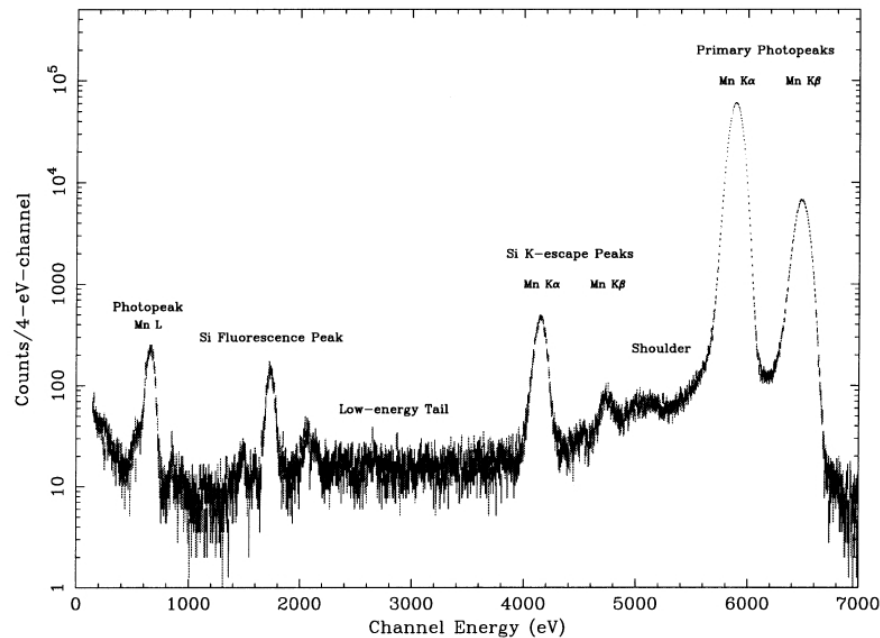


Janesick p.171

# Fonction de redistribution

- Un photon X expulse un électron d'une couche profonde de l'atome Si. Cet électron ionise les atomes voisins, et l'atome Si se désexcite par fluorescence ou émission Auger
- Une source de  $\text{Fe}^{55}$  (photons à 5.9 et 6.5keV) génère au moins 5 raies: Mn  $K\alpha$  (5.9keV) et  $K\beta$  (6.5keV), pics d'échappement Mn  $K\alpha$  (4.1keV) et  $K\beta$  (4.7keV), et fluorescence Si (1.7keV). La fraction de signal en dehors des raies Mn  $K\alpha$  et  $K\beta$  est de quelques %

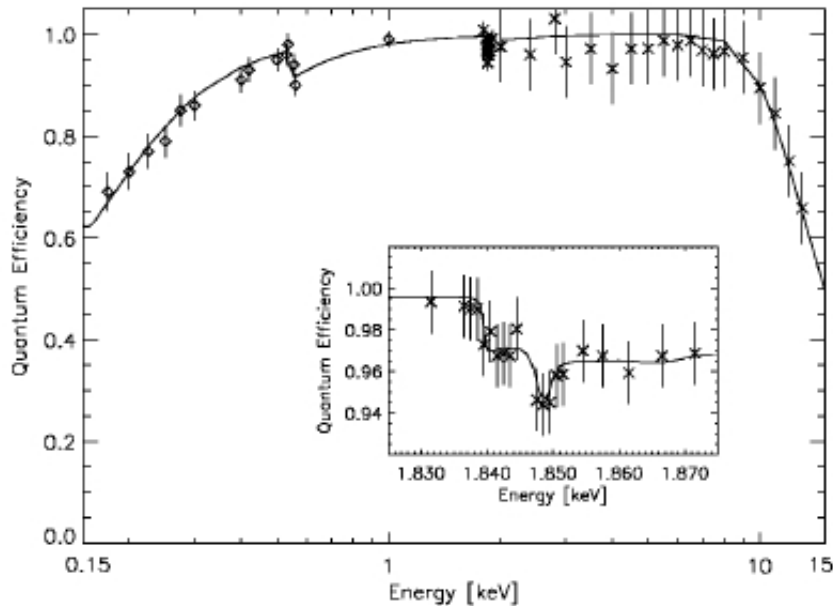
X-ray CCD Spectral Response Function Components



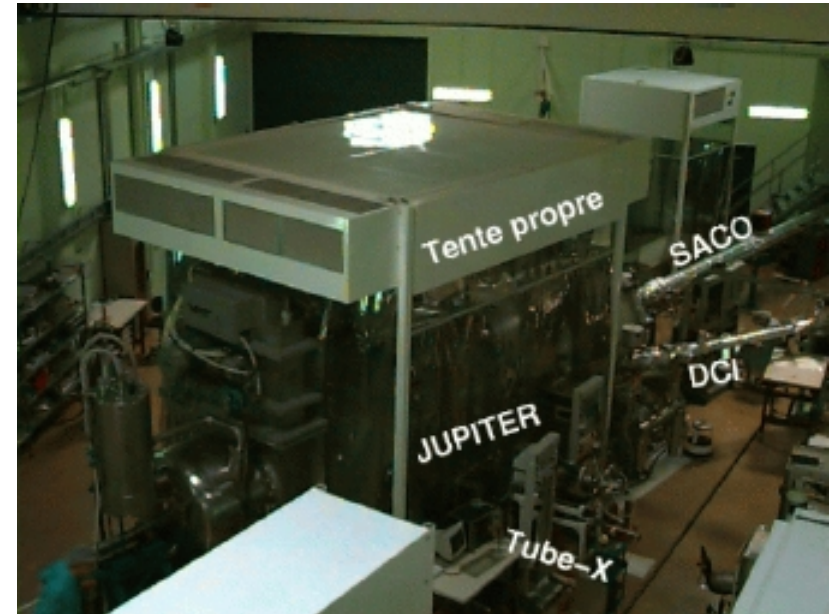
Bautz et al., NIMA 436, 40, 1999

# QE des CCDs X

- On obtient des QE très élevés avec des CCDs très épais:
  - CCD PN XMM/EPIC 300 $\mu$ m fully depleted BI
- La calibration nécessite l'accès à un synchrotron
  - LURE (SACO et DCI), Orsay et BESSY, Berlin pour la caméra EPIC



XMM-SOC-CAL-TN-0018, 2006

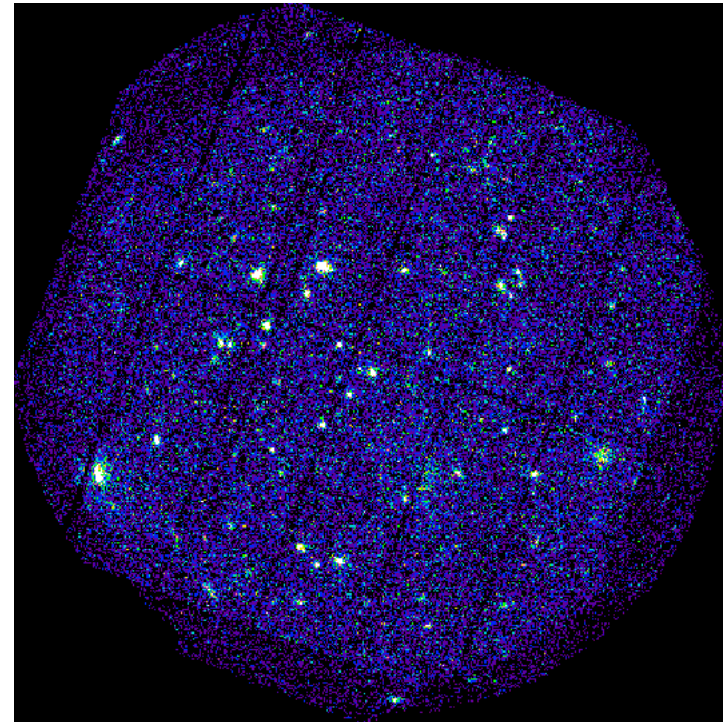
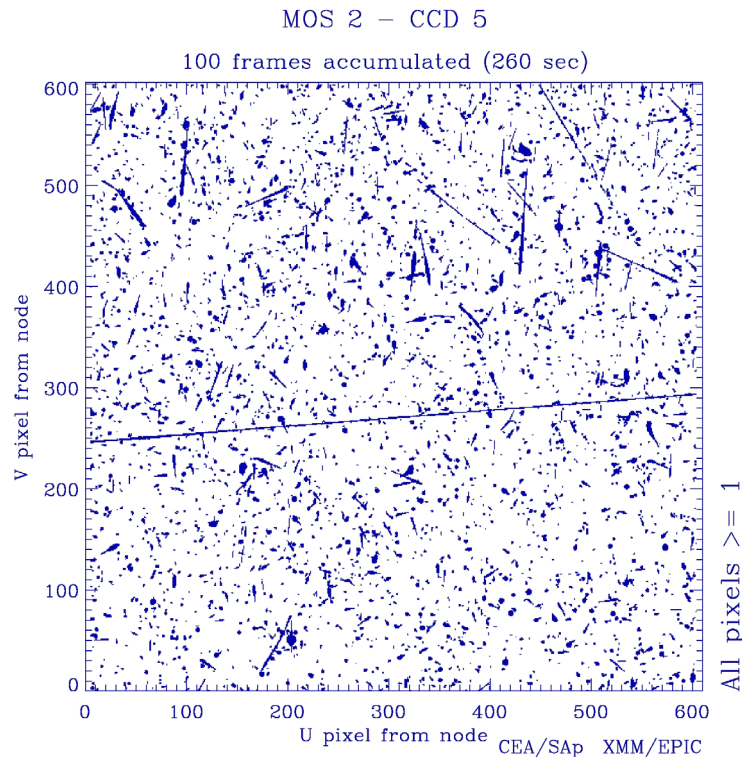


Marty, thèse Paris XI, 2003



# Observations en X

- Les flux sont très faibles ( $\sim 1$  photon/pixel/min pour un amas de galaxies observé avec XMM): on peut travailler en comptage de photon
  - Dans le visible on mesure le flux de photons, en X on mesure directement l'énergie de chaque photon
- Pour obtenir suffisamment de sensibilité, on coadditionne des milliers d'images (poses 10 à 20ks), très polluées par les impacts de cosmiques



ESA XMM-Newton

---

i r f u



saclay

# Grands plans focaux à base de CCDs

# Imagerie grand champ

---

- Constat
  - Temps de télescope fini et rare
  - Temps de télescope = temps de pose moyen x nombre de poses
    - ⇒ Si on veut observer des objets très faibles, le temps de pose est long donc on ne peut pas faire beaucoup d'images et couvrir une grande surface du ciel
    - ⇒ Si on veut couvrir une grande surface du ciel, il faut beaucoup d'images et on ne peut pas observer d'objets très faibles
    - ⇒ Pour couvrir un grand champ et y observer des objets faibles, il faut un grand détecteur
- Une solution consiste en la fabrication de mosaïques de CCDs, avec plusieurs dizaines (voire centaines) de détecteur dans un même plan focal

# Evolution des caméras CCDs à l'observatoire CFHT



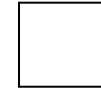
RCA1 1981-1986  
1 CCD, 320x512  
champ 2'x3.5'



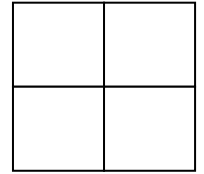
RCA2 1986-1995  
1 CCD, 640x1024  
champ 2'x3.5'



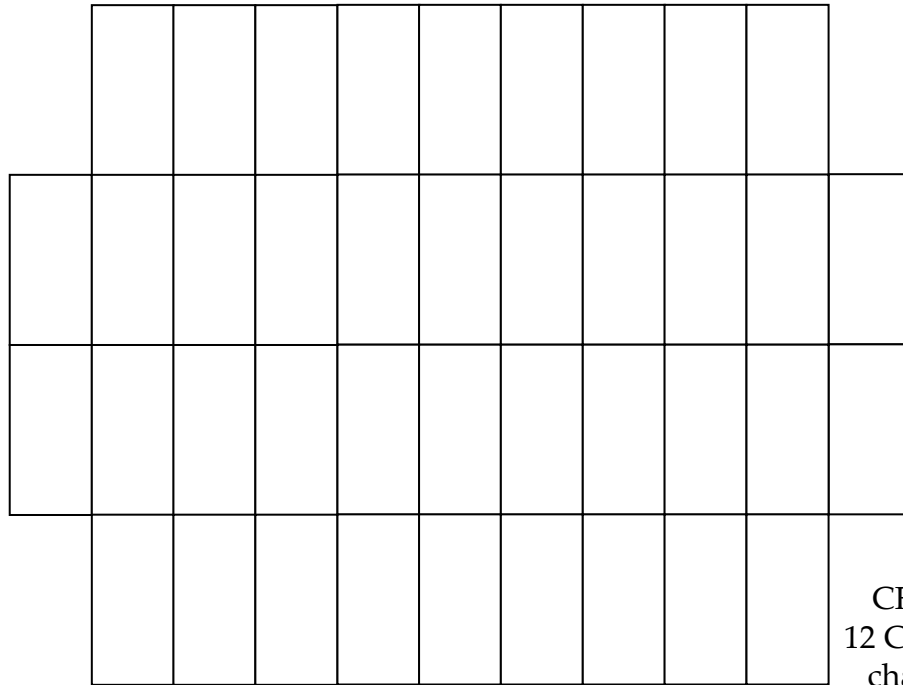
SAIC1 1990  
1 CCD, 1Kx1K  
champ 4.2'x4.2'



Lick2 1992  
1 CCD, 2Kx2K  
champ 7'x7'

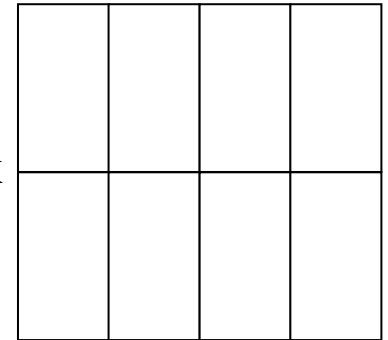


MOCAM 1994  
4 CCDs, 4Kx4K  
champ 14'x14'

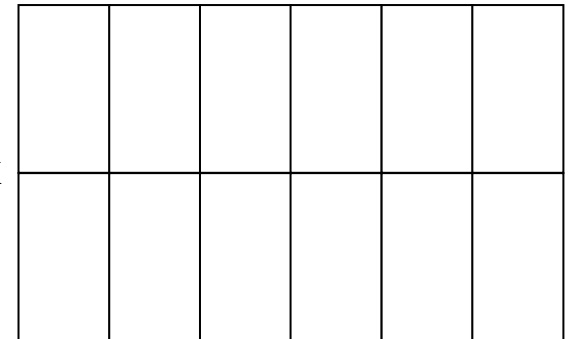


MegaCam 2002  
40 CCDs, 20Kx18K  
champ 1°x1°

UH8K 1996  
8 CCDs, 8Kx8K  
champ 28'x28'

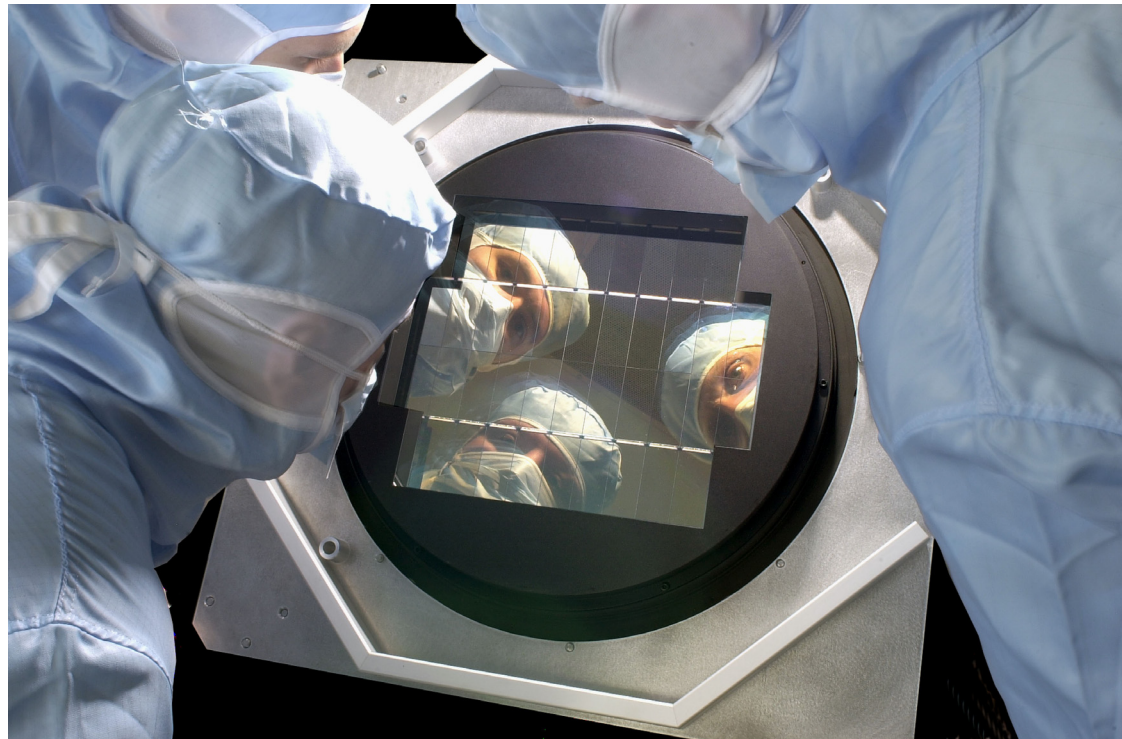


CFH12K 1999  
12 CCDs, 12Kx8K  
champ 42'x28'



# La caméra MegaCam

- Développée au CEA/DAPNIA
- Installée au foyer primaire du télescope de 3.60m Canada-France-Hawaii depuis Décembre 2002
- Mosaïque de 40 CCDs e2v 42-90 2Kx4.5K
- Champ de vue de  $1^\circ \times 1^\circ$



© CEA-DAPNIA/J.J Bigot

# Cohabitation des détecteurs

---

i r f u



saclay

- Tous les points du champ de vue doivent être imagés avec la même sensibilité

⇒ Performances identiques pour tous les détecteurs: à prendre en compte dans le cahier des charges

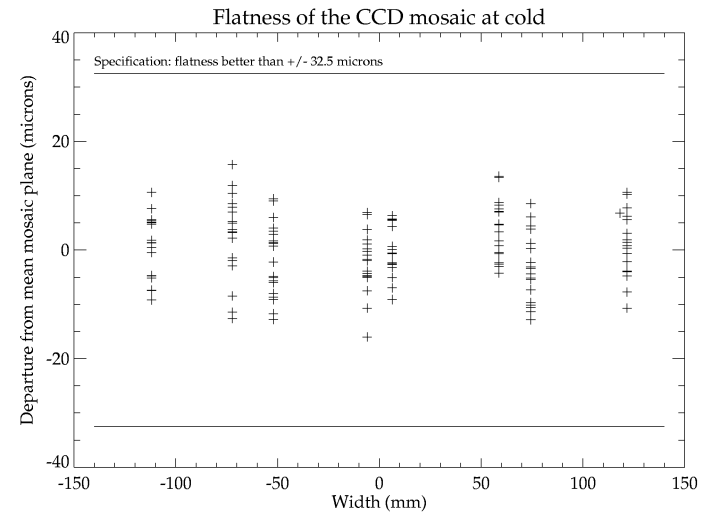
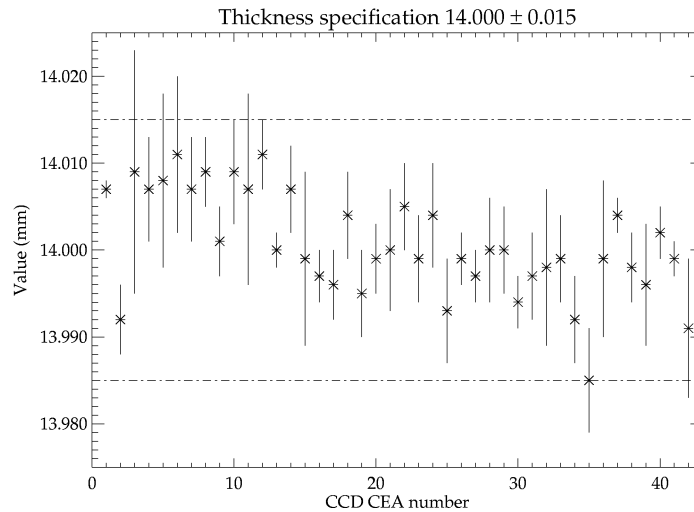
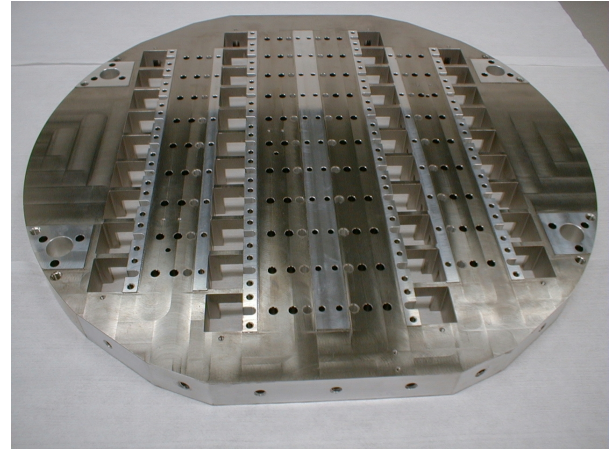
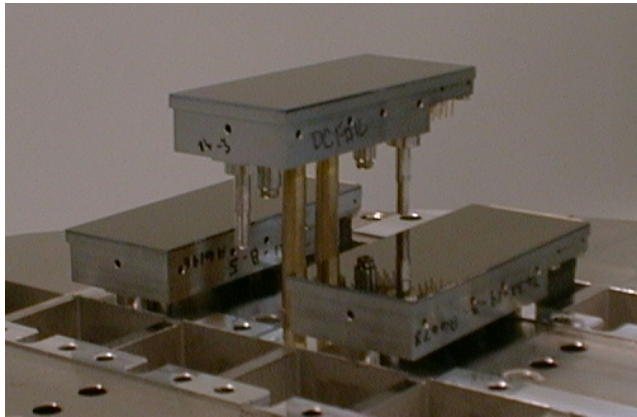
- MegaCam: spécification de dispersion des 40 CCDs de 10% sur chaque paramètre

⇒ Une fois intégrés dans le plan focal, tous les détecteurs doivent avoir le même point de fonctionnement

- Tous les pixels au foyer du télescope: contraintes sur la planéité de la mosaïque
- Tous les détecteurs doivent être à la même température: contraintes d'homogénéité spatiale et de stabilité temporelle de la température plan focal

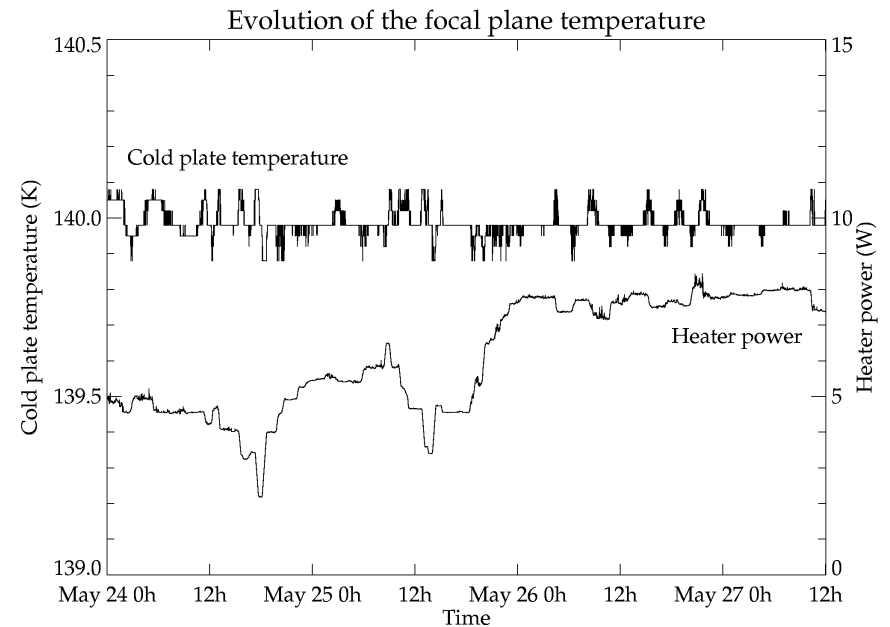
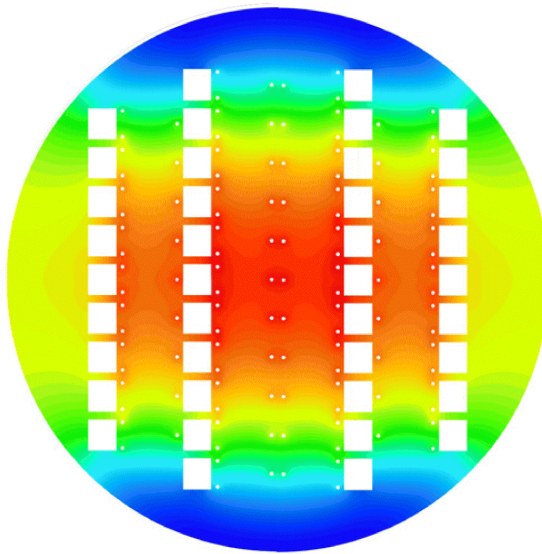
# Planéité de la mosaïque CCD

- Obtenue par « design »: spécification sur l'épaisseur des boîtiers CCDs et sur la planéité de la plaque support des CCDs



# Homogénéité et stabilité de température

- Choix du matériau (Cu, Al, SiC, AlN, Be, Invar, ...) et modélisation thermique pour obtenir un gradient maximum de 3K sur toute la surface de la mosaïque
- Réseau de chaufferettes pour réguler la température en fonction des variations de l'environnement (température extérieure, orientation du télescope)

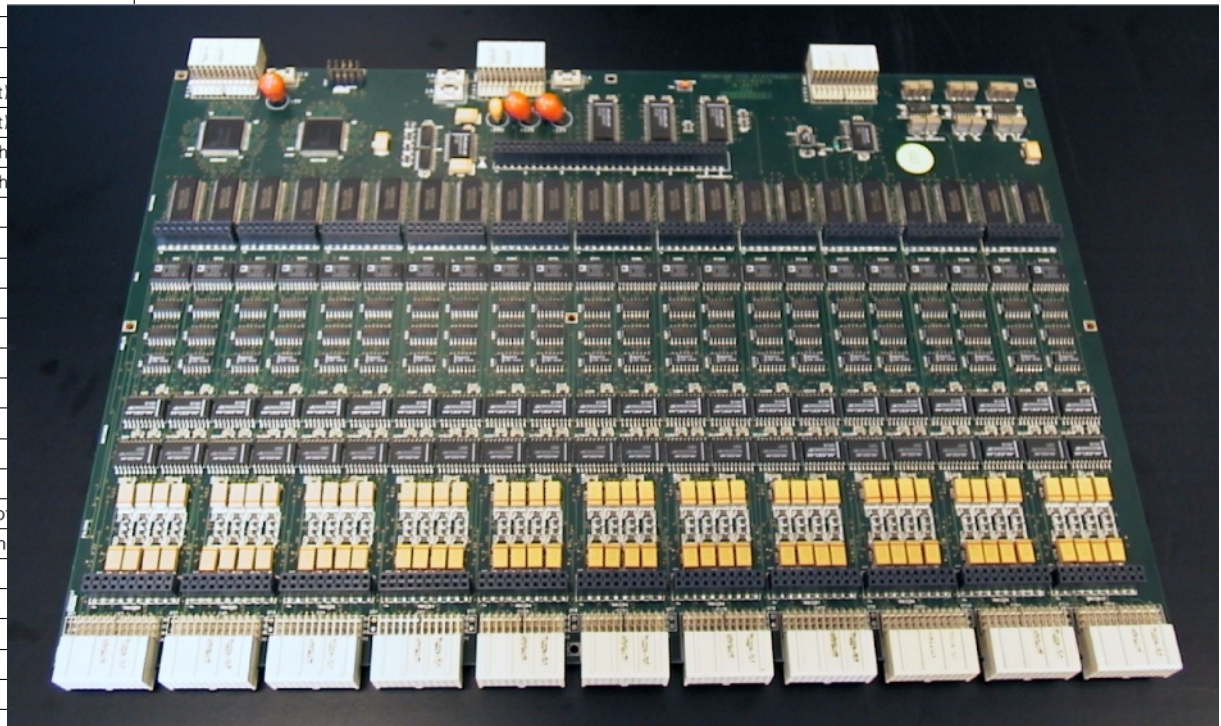




# Le contrôleur CCD MegaCam: carte de pilotage

- 26 bias et horloges par détecteur, 40 détecteurs
- 1 carte pour piloter 1 rangée de détecteurs (de 9 à 11 CCDs)

PGA PIN	REF	DESCRIPTION
A1, A8, C1, C8, F2, F7	V <sub>SS</sub>	Substrate
D8	IØ1	Image area clock, phase 1
E8	IØ2	Image area clock, phase 2
F8	IØ3	Image area clock, phase 3
D4	RØ1(L)	Register clock phase 1 (left)
E4	RØ2(L)	Register clock phase 2 (left)
D5	RØ1(R)	Register clock phase 1 (right)
E5	RØ2(R)	Register clock phase 2 (right)
F6	RØ3	Register clock phase 3
E3	ØR(L)	Reset gate (left)
E6	ØR(R)	Reset gate (right)
E2	ØSW(L)	Summing well gate (left)
E7	ØSW(R)	Summing well gate (right)
F3	DG	Dump gate (see note 8)
D3	OG1(L)	Output gate 1 (left)
D6	OG1(R)	Output gate 1 (right)
B2	DD(L)	Dump drain (left)
B7	DD(R)	Dump drain (right)
D2	OG2(L)	Output gate 2 (left) (see note 8)
D7	OG2(R)	Output gate 2 (right) (see note 8)
B1	OD(L)	Output drain (left)
B8	OD(R)	Output drain (right)
A2	OS(L)	Output source (left)
A7	OS(R)	Output source (right)
C2	RD(L)	Reset drain (left)
C7	RD(R)	Reset drain (right)



© e2v technologies 2004

CEA-DAPNIA

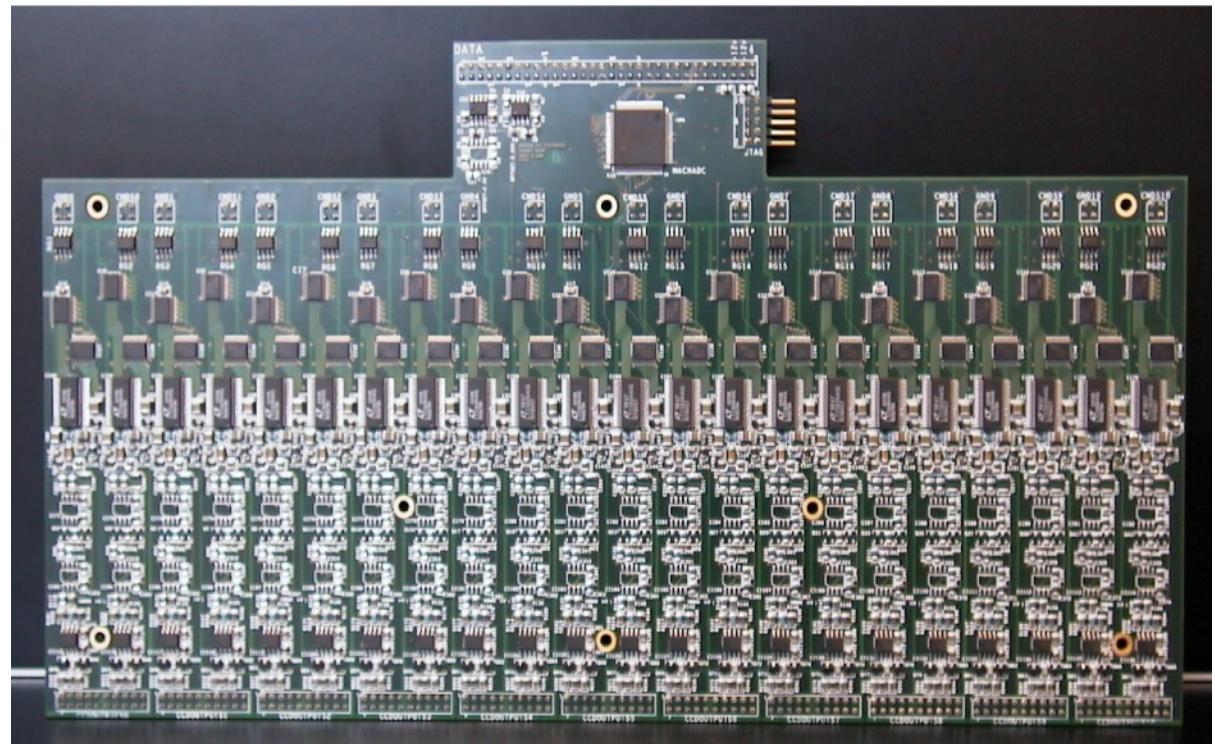
# Le contrôleur CCD MegaCam: carte de lecture

i r f u

cea

saclay

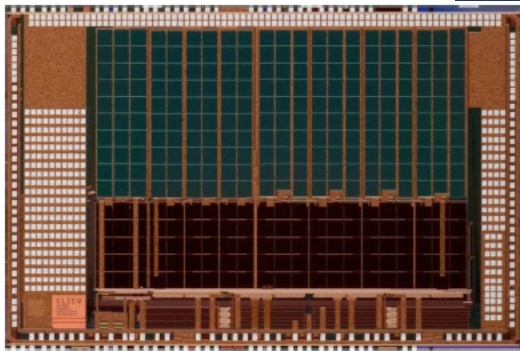
- Spécifications: 30 secondes pour lire toute la mosaïque avec moins de 10 e<sup>-</sup> de bruit
- Solution: 30 secondes pour lire un demi-CCD et 80 chaînes d'acquisition fonctionnant en parallèle
- 1 carte pour lire 1 rangée de détecteurs (de 18 à 22 sorties)



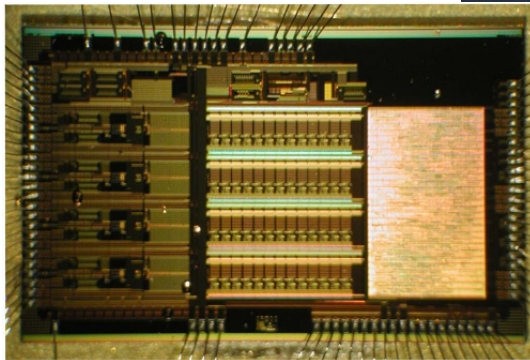
CEA-DAPNIA

# Le contrôleur CCD MegaCam

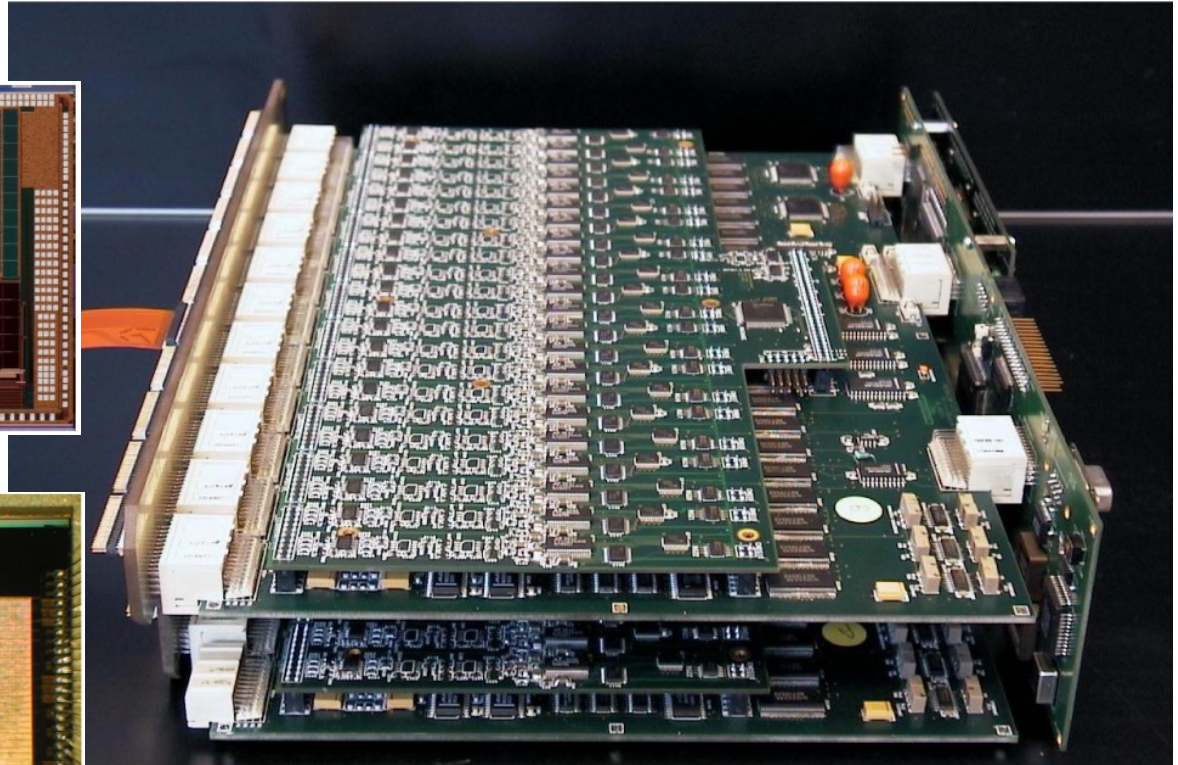
- 2 cartes pilotage, 2 cartes lecture et 1 carte DSP pour contrôler une demi-mosaïque
- Faut-il passer à des ASIC? (eg CLIC/CRIC pour SNAP)



Walderer et al., 2007



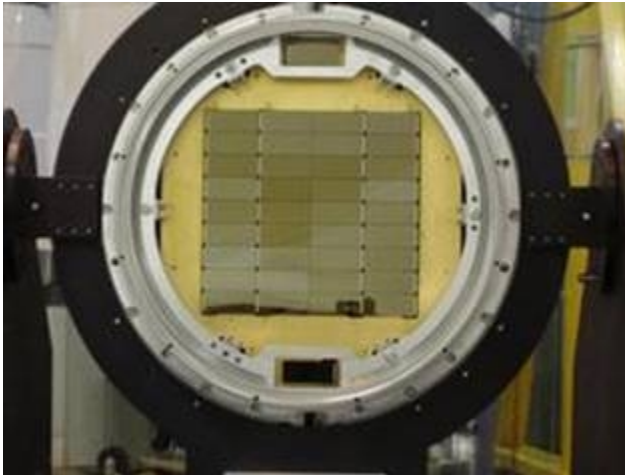
Karcher et al., 2007



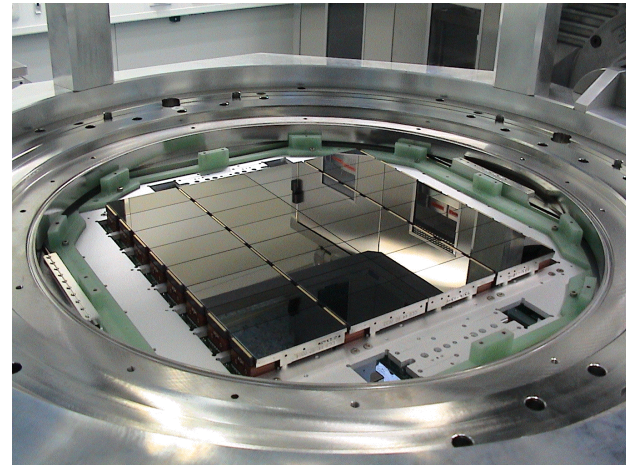
CEA-DAPNIA

# Autres caméra grands champs en développement

- MMT/Megacam: 36 CCDs e2v 42-90 2Kx4.5K, Novembre 2003
- ESO/Omegacam: 32 CCDs e2v 42-80 2Kx4K, 2009?
- LAMOST: 32 CCDs e2v 4Kx4K, 2009?
- WIYN/ODI: 64 OTA 4Kx4K OTCCDs, 20010?
- DES: 62 CCDs LBNL 2Kx4K, 2012?
- DCT: 40 CCDs e2v 44-82 2Kx4K, 2010?
- Pan-STARRS: 4x64 OTA 4Kx4K OTCCDs, PS1 2007, PS4 2010?
- Subaru/HyperSuprimeCam: 100 CCDs 2Kx4K Hamamatsu, 2012?
- LSST: 189 détecteurs 4Kx4K CCDs (e2v?), 2017?



© MMT/B. McLeod



© ESO

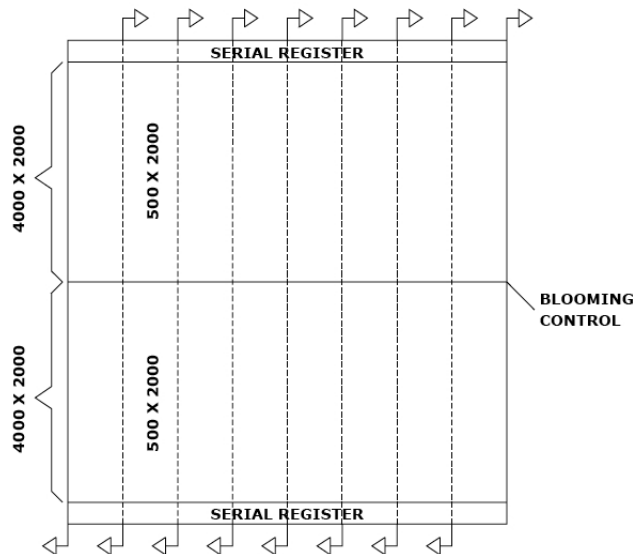
# Plan focal LSST

i r f u

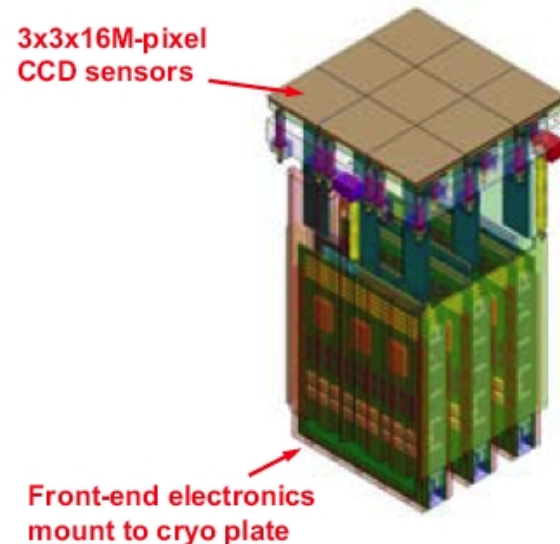


saclay

- Besoin dérivé de la science:  $3.2 \cdot 10^9$  pixels à lire en 2s avec un bruit de  $6e^-$  rms...
  - Bruit  $6e^- \Rightarrow$  cadence de lecture max  $\sim 500\text{kHz}$
  - Temps de lecture 2s  $\Rightarrow$  1Mpixels par sortie
  - Taille de la mosaïque  $3.2 \cdot 10^9$  pixels  $\Rightarrow$  3200 sorties
- $\Rightarrow$  Brique de base: 1 CCD  $4\text{K} \times 4\text{K}$  organisé en 8 « sous » CCDs  $4000 \times 500$  à 2 sorties chacun
- $\Rightarrow$  189 CCDs pour une mosaïque de  $3.2 \cdot 10^9$  pixels et 3200 sorties



Geary et al., SPIE vol 6276, 2006



Kahn AAS 209, 2007

# Caméras grand champ spatiales

---

i r f u

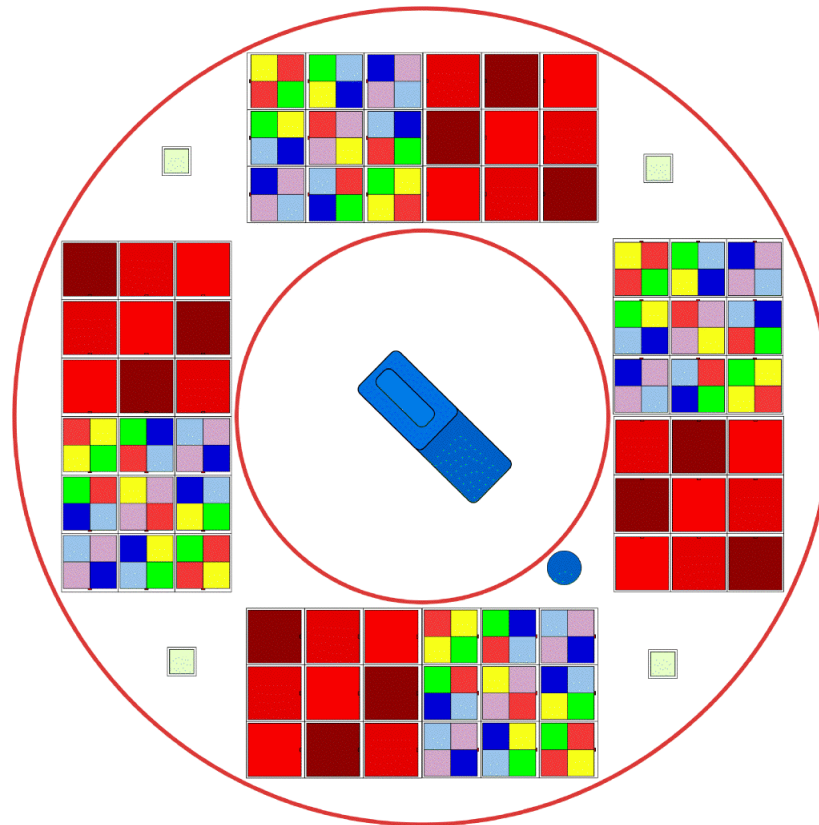


saclay

- Contraintes encore plus grandes que pour un CCD spatial:
  - Puissance électrique pour piloter des dizaines de détecteurs
  - Masse et volume de l'instrument
  - Le moins possible de mécanique (obturateur, changement de filtres)
  - Quantité de mémoire embarquée (stockage des images)
  - Débit de télémétrie (réception des données à terre)
- NASA/Kepler: 42 CCDs e2v 2Kx1K, 2009
- DoE/SNAP: 36 CCDs LBNL 3.5Kx3.5K, 2014?
- ESA/Euclid: 36 CCDs e2v 4Kx4K, 2017?
- ESA/Gaia: 106 CCDs e2v 4500x1966, 2011?

# DoE/SNAP

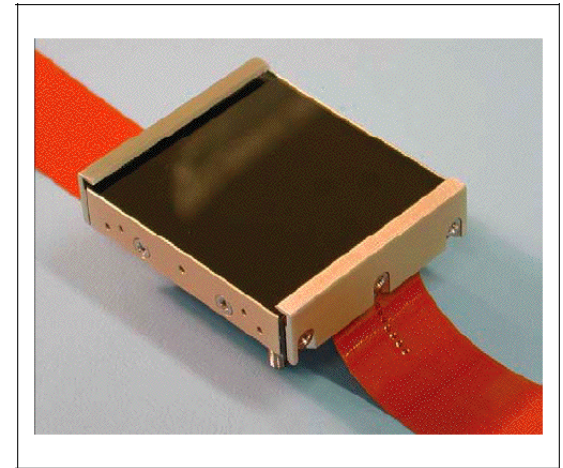
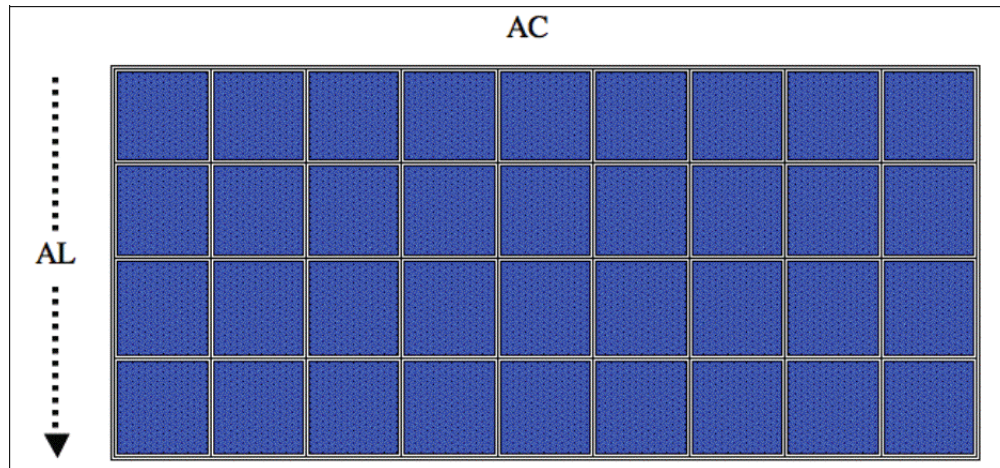
- Champ de vue  $0.7 \text{ deg}^2$
- 36 CCDs custom LBNL/DALSA (3.5Kx3.5K pixels  $10.5\mu\text{m} \times 10.5\mu\text{m}$ )
- CCD épais (200 - 300  $\mu\text{m}$ ), back side illuminated, high resistivity, full depletion, full frame



ROE, SNAP technical review, 2003

# ESA/Euclid

- Champ de vue  $0.5 \text{ deg}^2$
- 36 CCDs e2v CCD203-82 (4Kx4K pixels  $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ )
- CCD aminci back side illuminated, high resistivity, deep depletion, full frame

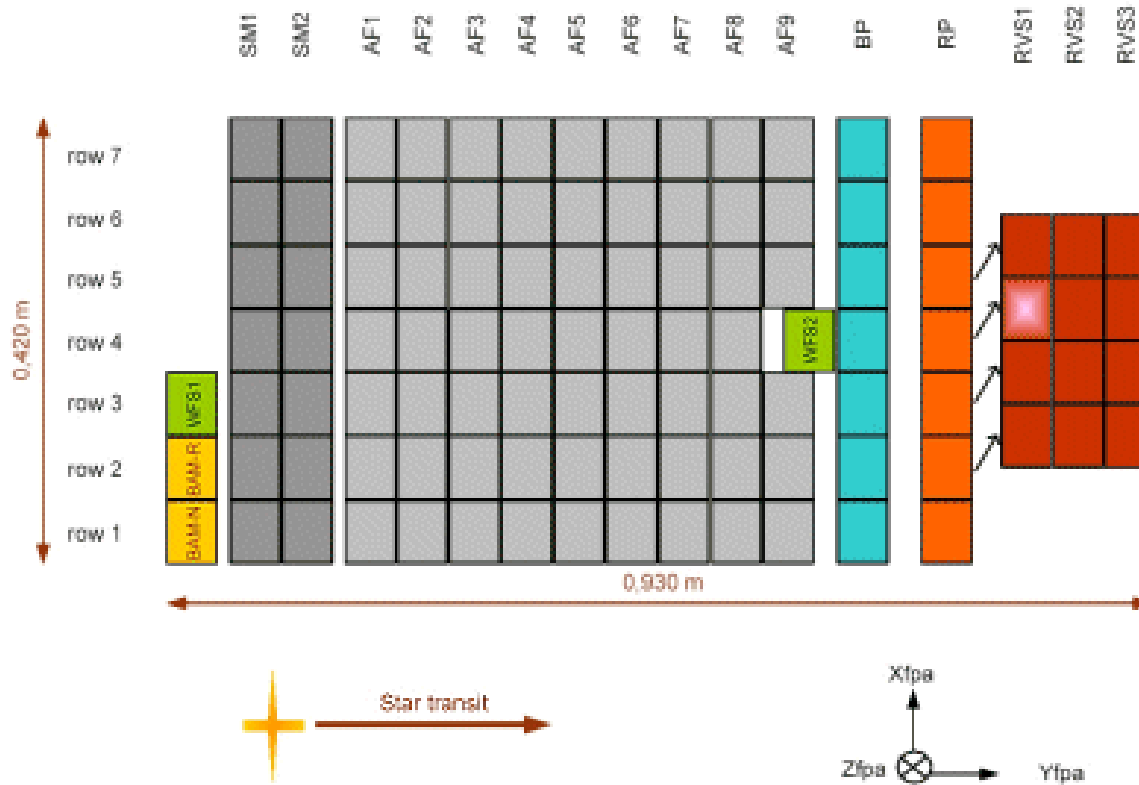


© e2v technologies



# ESA/Gaia

- Champ de vue 0.45 deg<sup>2</sup>
- 106 CCDs custom e2v 4500x1966 pixels 10μm x 30μm
- CCD aminci back side illuminated, full frame, TDI



EADS Astrium, 2006