

Détecteurs et Électronique pour un télescope spatial à grand champ

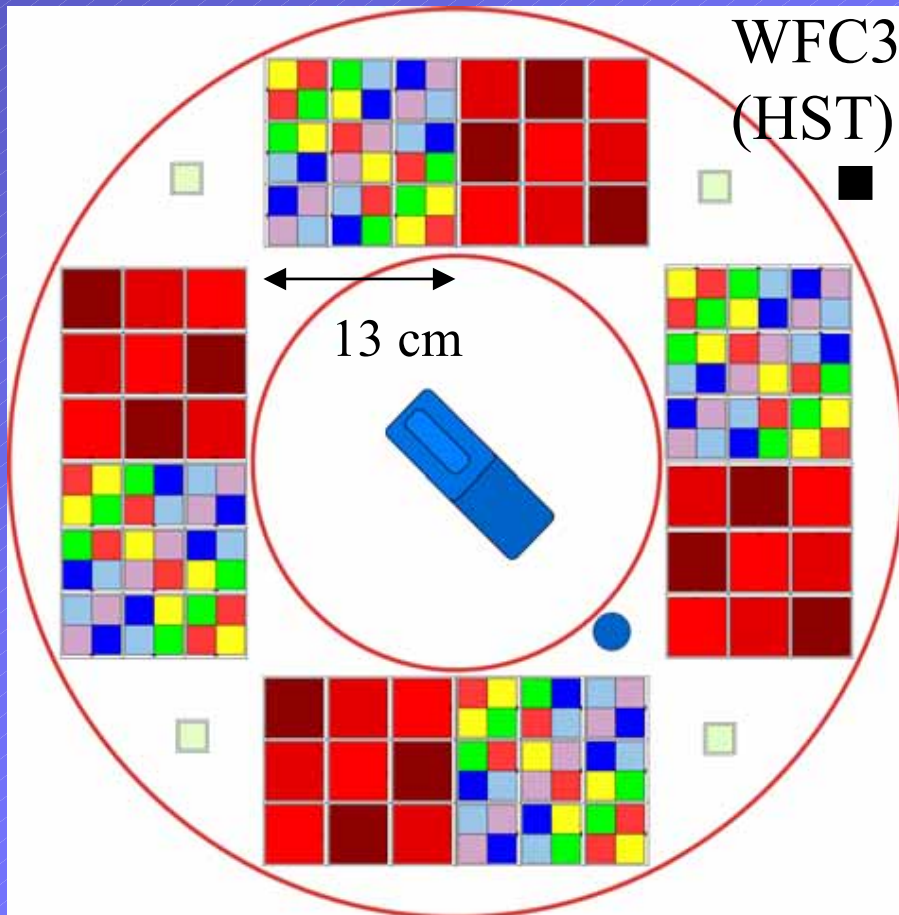
Introduction

- Cadre : projets d'imageurs spatiaux à grand champ (projet SNAP depuis 2001, appel d'offre JDEM, projet européen DUNE)
 - mesures de l'expansion de l'univers par les supernovae de type Ia
 - cisaillement gravitationnel ('weak lensing')
- Panorama : imagerie dans le visible et le proche infra-rouge pour l'astronomie
- Travail de R&D au LPNHE : détecteurs, circuits intégrés de lecture (ASIC), intégration des chaînes de lecture

Intérêt d'un projet spatial

- Besoin de mesures à décalage vers le rouge élevé
- Problèmes créés par l'atmosphère terrestre :
 - Résolution angulaire limitée par la dispersion atmosphérique terrestre
 - Réfraction différentielle
 - Variabilité et anisotropies de l'atmosphère terrestre
 - Spectroscopie IR affectée par les raies d'absorption
 - Photométrie IR très sensible à l'humidité
- Suivi des supernovae : problèmes de lunaisons, de météo
- Instrument dédié : homogénéité des données

Plan focal de SNAP



0.7 degrés carrés de champ,
600 millions de pixels :

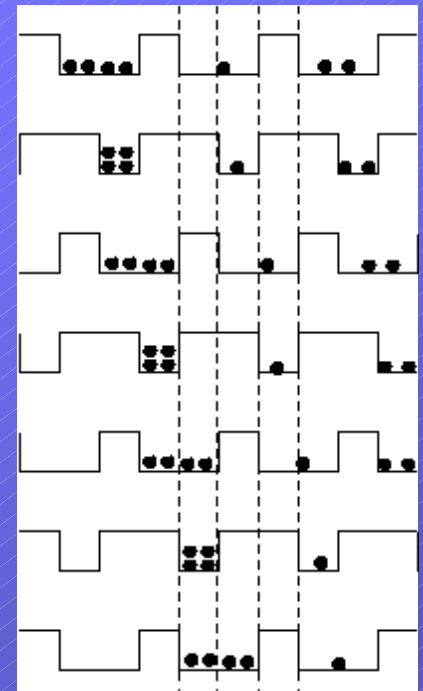
- Visible (0.35 à 1.0 μm) :
36 CCD 3.5k x 3.5k
- Proche Infra Rouge (0.9 à
1.7 μm) : 36 APS 2k x 2k

Défis technologiques : plan focal

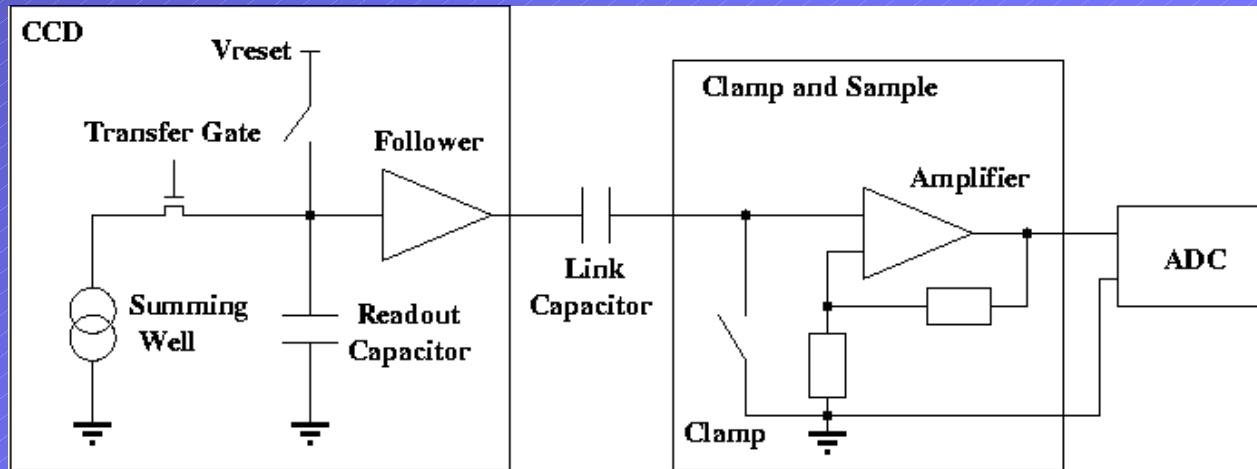
- Infra-rouge : technologie à développer
- Mécanique : précision sur le positionnement des éléments (5 μm)
- Électrique : alimentation disponible limitée
- Thermique : températures de fonctionnement préférées : 80 K pour l'IR, 200 K pour les CCD
- Électronique intégrée : compacité, faible consommation électrique, adaptation à la température du plan focal, tenue aux radiations
- Amélioration des procédés de fabrication des ASIC ('Application Specific Integrated Circuit') : diminution suffisante du bruit ?

Principe du CCD

- Révolution en astronomie
- Conversion linéaire
- Lecture séquentielle :
 - Système de décalage à trois horloges
 - Transfert de charges à haute efficacité nécessaire ($99,99\%^{4096} = 66\%$)
- Grande dynamique :
 - Limite basse : bruit de lecture
 - Limite haute : la capacité du ‘puits’
- Evolutions récentes : ‘back illuminated’, CCD épais à haute résistivité



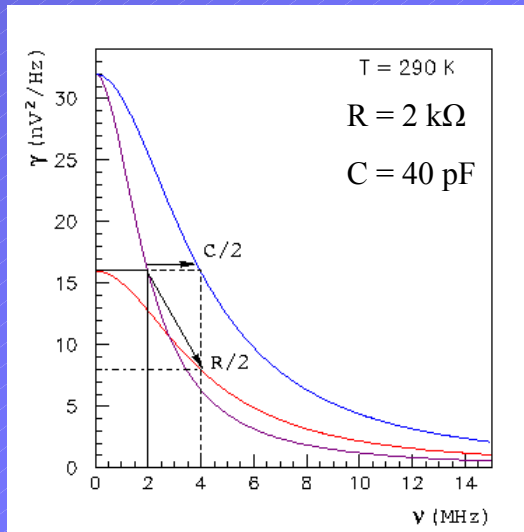
Lecture de CCD



- Capacité de lecture : $\sim 40 \text{ fF}$, $4 \mu\text{V} / \text{électron}$
- Remise à zéro : $\sigma_V = \sqrt{k_B T / C} \approx 320 \mu\text{V} \leftrightarrow 80 e^-$
- Amplificateur suiveur intégré au CCD
- Capacité de liaison pour l'adaptation en tension
- Systèmes de lecture : 'Correlated Double Sampling', 'Clamp and Sample' (MegaCam au CFHT)

Zoologie (non exhaustive) des bruits

- Bruit de Poisson ou bruit 'shot' : si on mesure N photons, il y a une incertitude de \sqrt{N}
- Bruit thermique (bruit blanc) : fluctuations dans une résistance R associée à une capacité C :



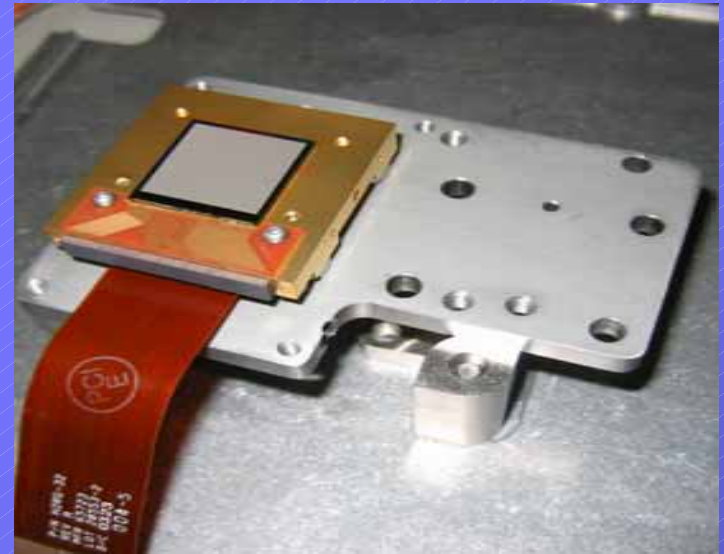
$$\gamma(\nu) = \frac{4k_B T R}{1 + \left(\frac{\nu}{\nu_C}\right)^2} \quad \nu_C = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\sigma_V^2 = \int \gamma(\nu) d\nu = \frac{k_B T}{C}$$

- Bruit en 1/f des transistors MOS : associé à des 'pièges' à l'interface oxyde/semi-conducteur

Principe de l'APS

- ‘Active Pixel Sensor’ : lecture intégrée à chaque pixel
- Monté sur un multiplexeur
- Problèmes de technologie de fabrication : courant d’obscurité (courant de fuite des photodiodes), bruit en $1/f$, ‘Fixed Pattern Noise’
- Utilisé en ‘Double lecture’, possibilité de ‘Multiple Non Destructive Reads’ (MNDR ou ‘multiread’)



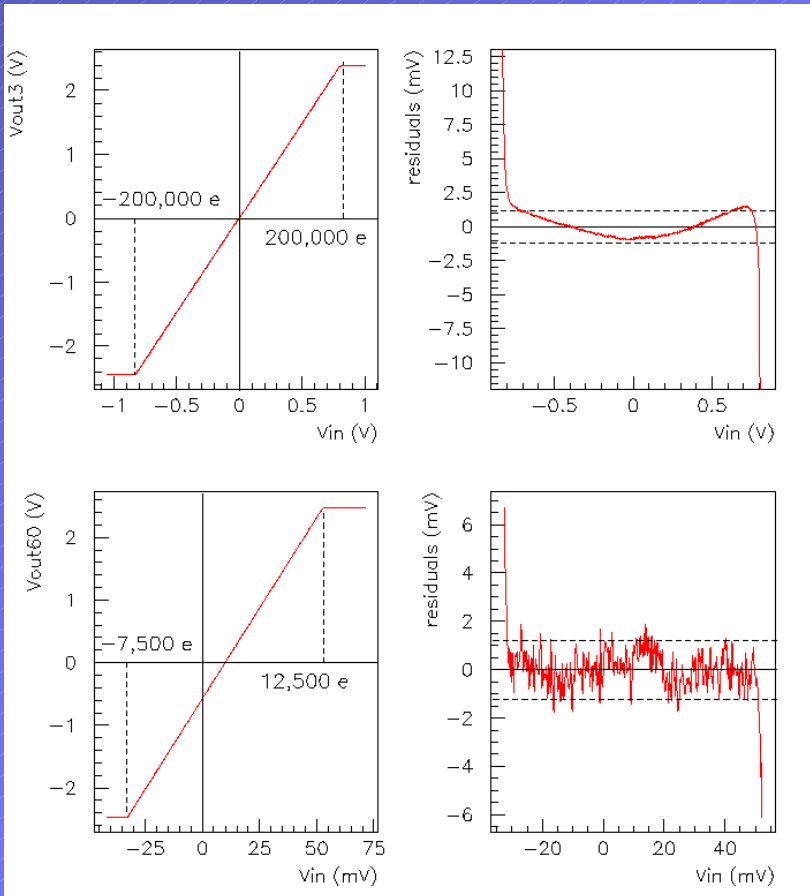
R&D ASIC au LPNHE

- Premier circuit : Double Intégrateur (DMILL)
- Deuxième circuit : Double Gain, ‘Clamp and Sample’ (DGCS), technologie AMS 0.35 μ
 - ASIC limité en tension (5V)
 - Fonctionnement bipolaire (- 3,5V à +1,5V ou $\pm 2,5$ V)
 - Double gain : dynamique totale de 17 bits (de 2 e- à 250 000 e-) avec des ADC de 12 bits :
 - Gain maximum pour pouvoir lire un pixel saturé : x 3
 - Haut gain : x 96 (LSB = 2 e-, saturé à ~ 8 000 e-)
- Conception en cours : 2^{ème} ASIC DGCS intégrant un ADC par gain, adapté à la fois aux capteurs CCD et IR

Étude de l'ASIC 'DGCS'

- Vérifier le bon fonctionnement de l'ASIC dans des situations reproduisant une chaîne de lecture : gains et linéarité sur toute la gamme dynamique
- Quantifier le bruit de lecture produit par l'ASIC (objectif : moins de 2 e-), le comparer avec la simulation
- Comparer le mode 'Clamp and Sample' et le 'Correlated Double Sampling' en termes de bruit de lecture
- Caractériser le comportement aux basses températures (objectif : fonctionnement jusqu'à 140 K)
- Tester la résistance aux radiations (fonctionnement après une irradiation de 100 krad)

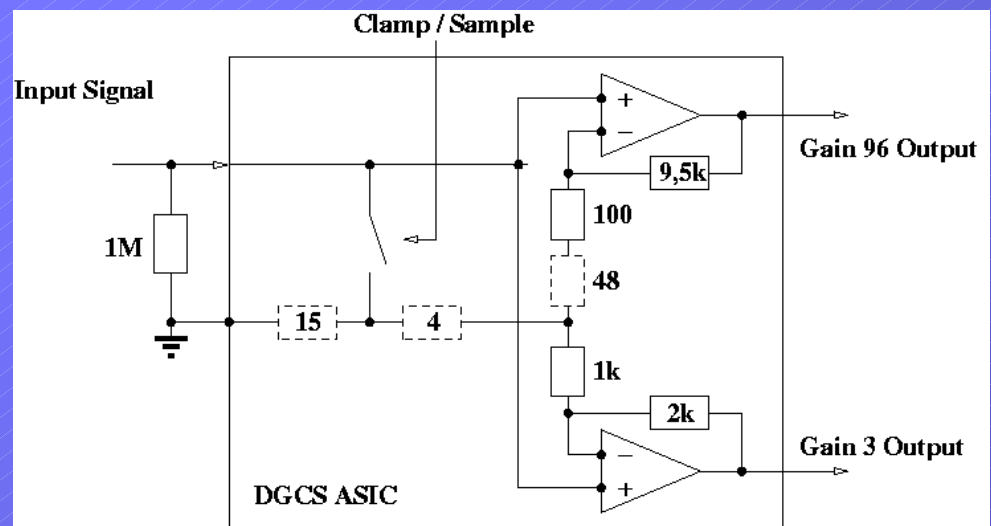
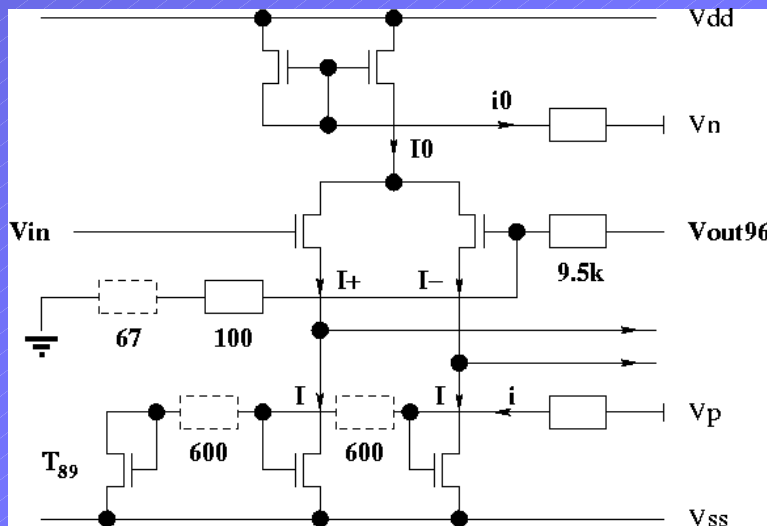
Linéarité et gains



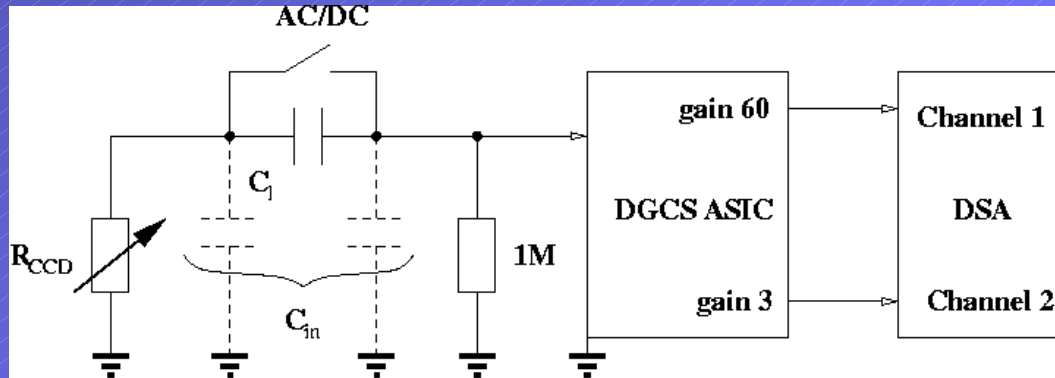
- Fonctionnement bipolaire
- Problème de gain (60 au lieu de 96) et d'offset (-575 mV) sur la voie de haut gain
- Non linéarité < 1%
- À confirmer par tests avec CCD

Résistances parasites

- Cause : résistances parasites sur des connections clés
- Mise en évidence expérimentale sur un transistor et simulation du fonctionnement de l'ASIC réel
- Origine : la version utilisée du logiciel de conception ne prend pas en compte les résistances parasites

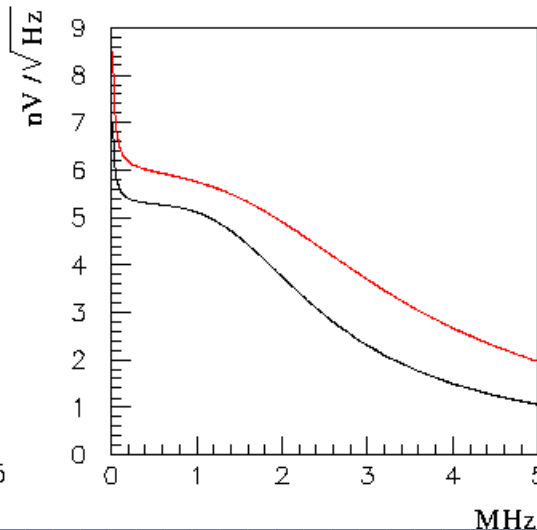
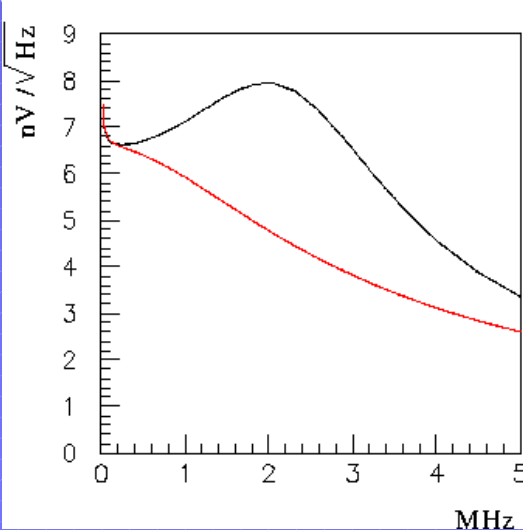
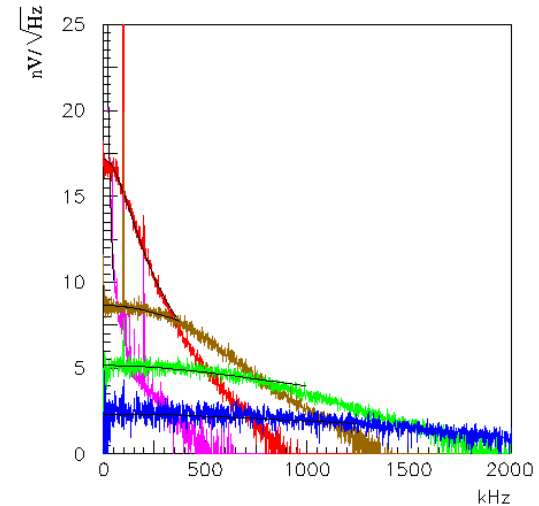
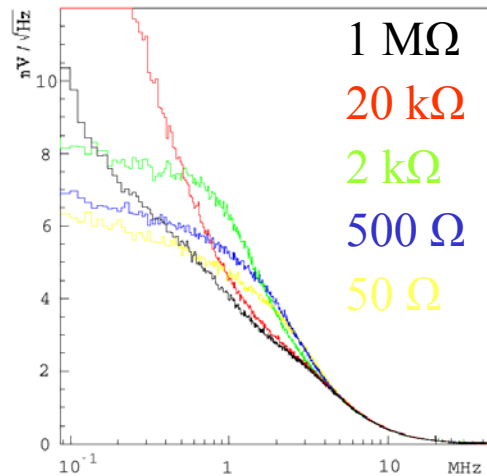
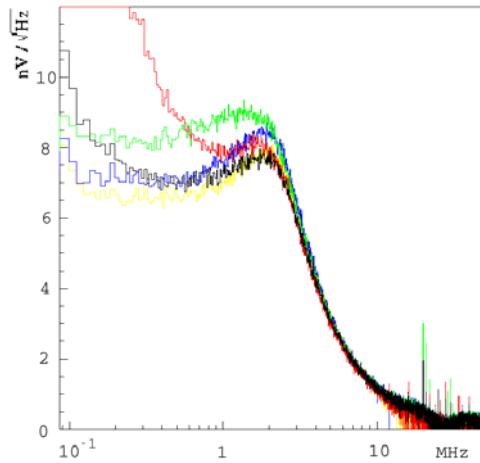


Mesures de bruit



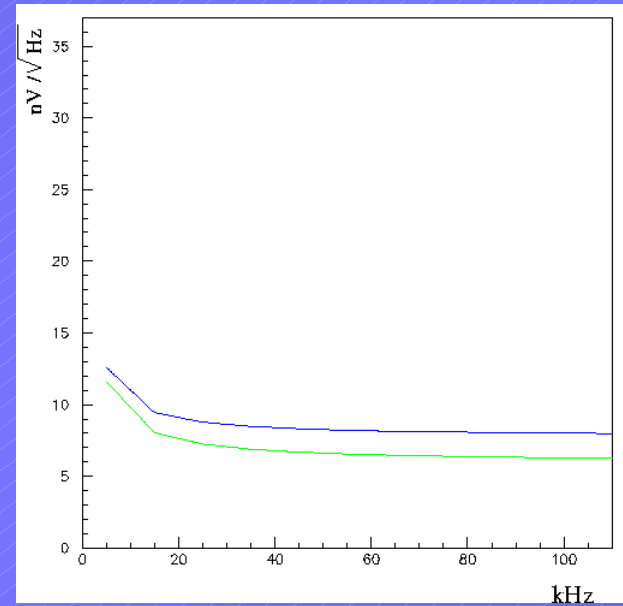
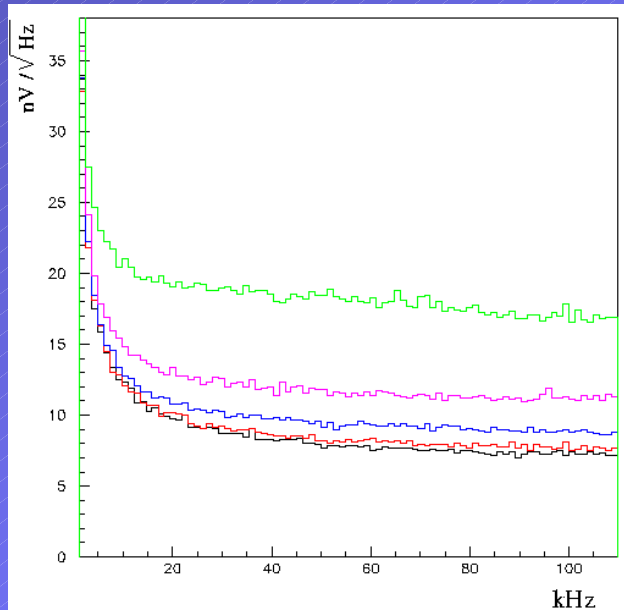
- Acquisition de 1000 runs successifs pour chaque configuration avec le DSA (Digital Signal Analyzer)
- Résistance R_{CCD} variable en entrée pour simuler le CCD
- Stratégies d'élimination des sources de bruit extérieures
- Traitements numériques : transformée de Fourier, moyennes, soustraction du spectre du DSA

Spectres de bruit



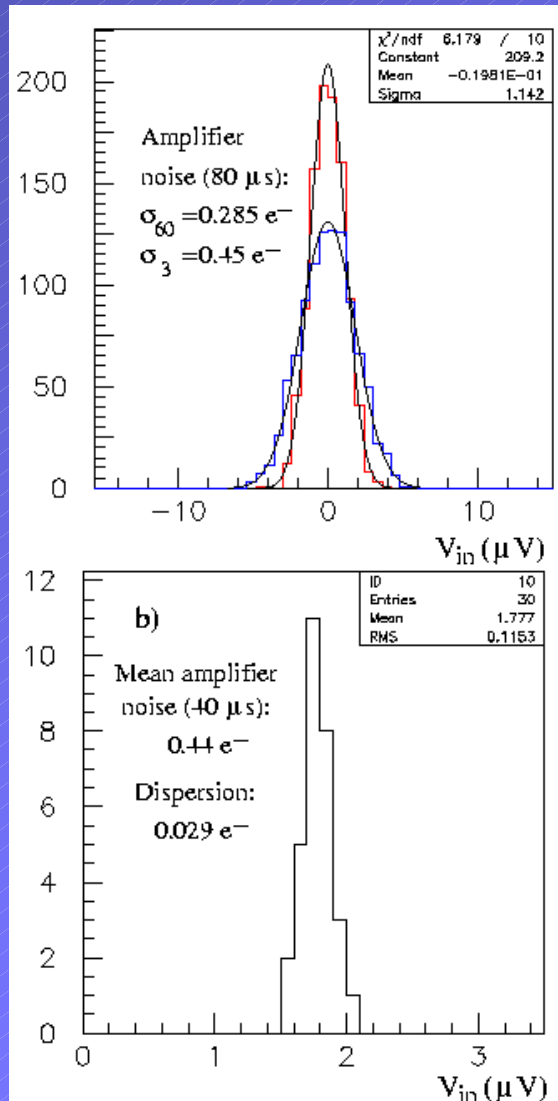
- ↑ Fits des soustractions pour différentes R_{CCD} : mesure T et C_{in}
- ← Simulations (avec **résistances** et **capacités parasites**)

Bruit en 1/f



- Bruit en 1/f devient significatif à basse fréquence (<20 kHz), en accord avec la simulation
- Apparition d'un 'coin de bruit': détermine le temps de mesure optimal

Bruit intrinsèque de l'ASIC



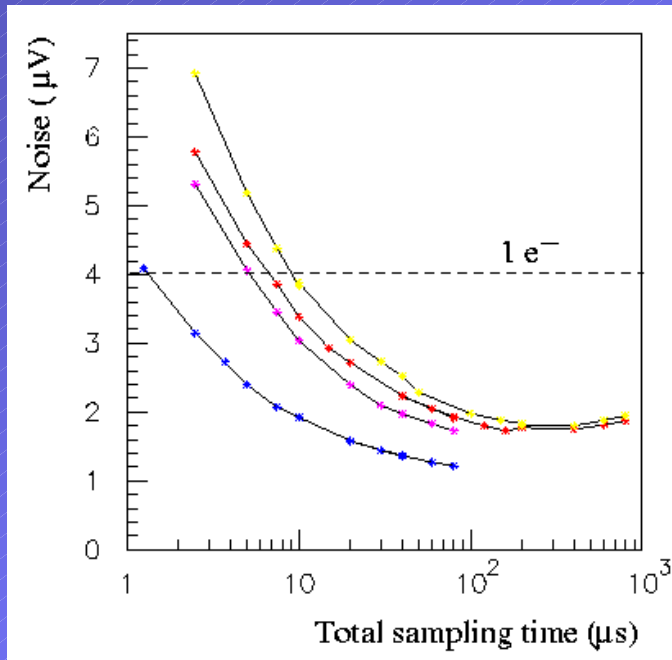
- Modèle de bruit (ramené à l'entrée) :

$$\sigma_{total,3}^2 = \sigma_{R_{CCD}}^2 + \sigma_{clamp}^2 + \sigma_3^2 + \varepsilon \sigma_{60}^2$$

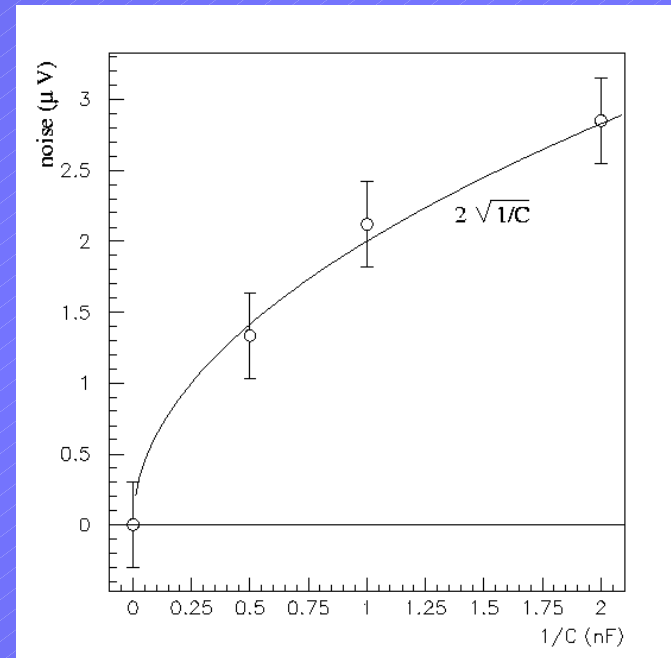
$$\sigma_{total,60}^2 = \sigma_{R_{CCD}}^2 + \sigma_{clamp}^2 + \sigma_{60}^2 + \varepsilon \sigma_3^2$$

- Estimation du bruit intrinsèque de l'ASIC (à $R_{CCD} \sim 0$, sans clamp) : σ_3 et σ_{60}
- Stabilité de l'estimation (bruit 'moyen') quand R_{CCD} et C_1 varient

Comparaison C&S / CDS



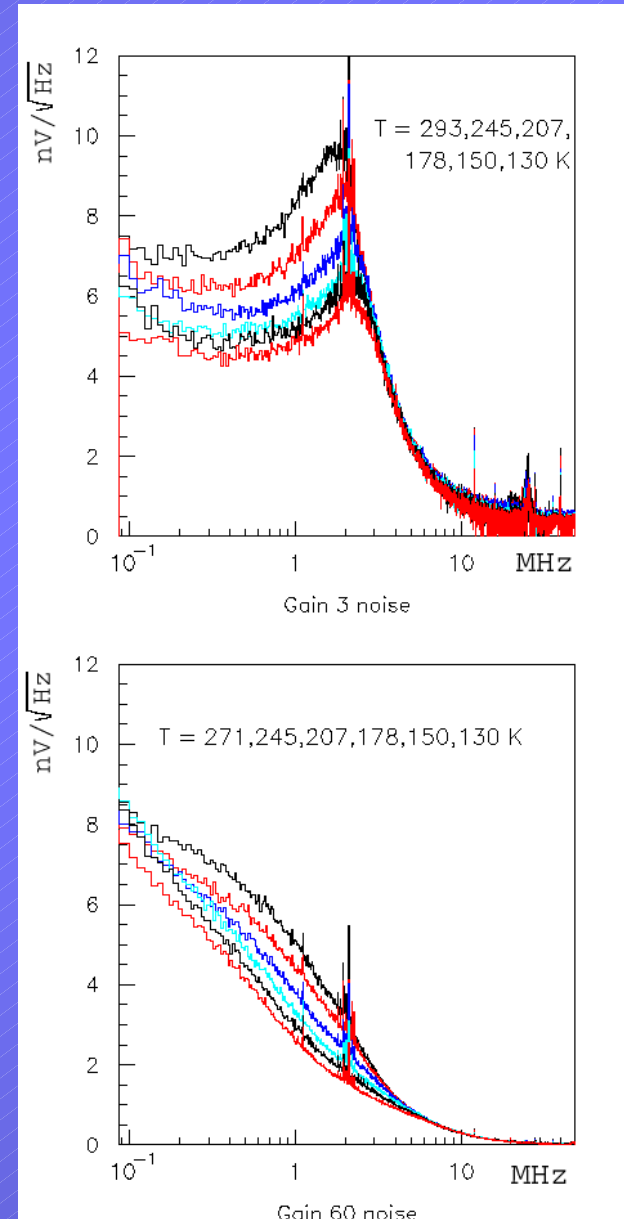
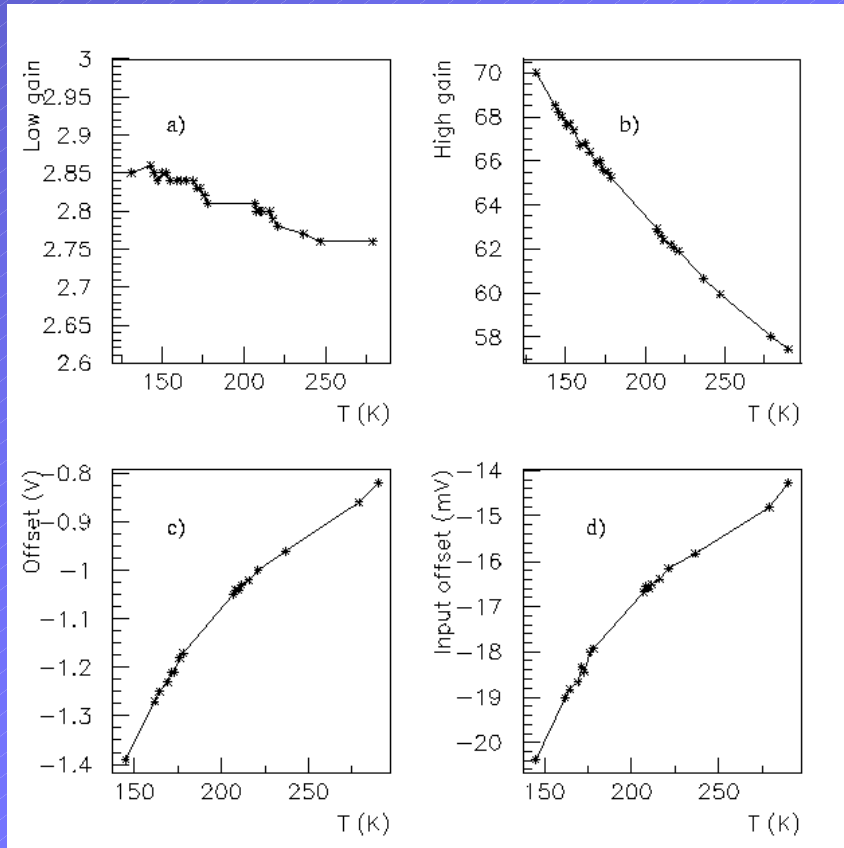
CDS 2 kΩ
CDS 500 Ω
CDS 500 Ω
(sans aliasing)
C&S 500 Ω



- Mesure du coin de bruit pour le simple échantillonnage (C&S) et le double échantillonnage (CDS)
- Mesure du bruit en kT/C_1 ajouté par le 'clamp' en fonction de la capacité de liaison C_1

Température

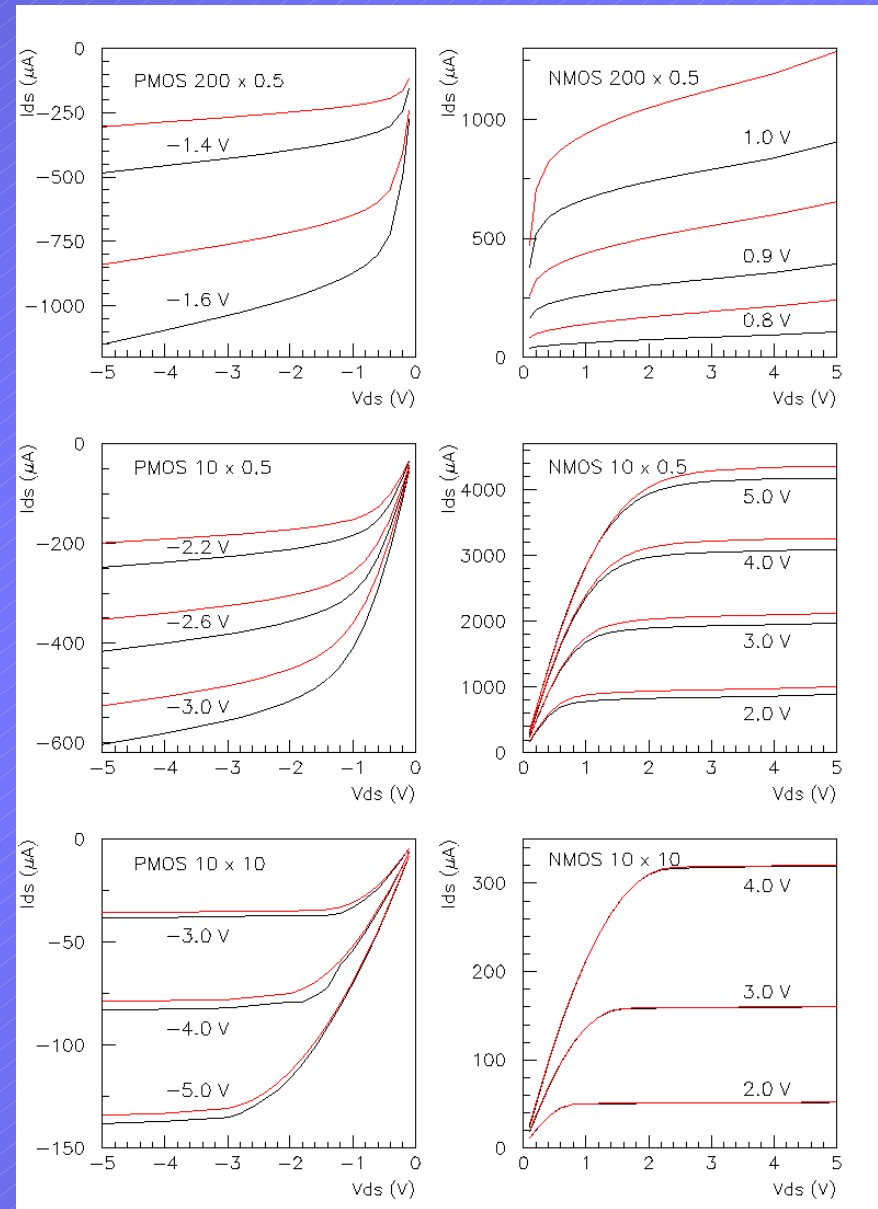
- Tests réalisés sur le banc destiné au capteur IR



Irradiation

- Irradiation au CEA
- Mesures sur les transistors de contrôle : modifications des caractéristiques des transistors dépendant de leurs dimensions
- Les performances d'ensemble de l'ASIC ne sont pas affectées

Avant / Après



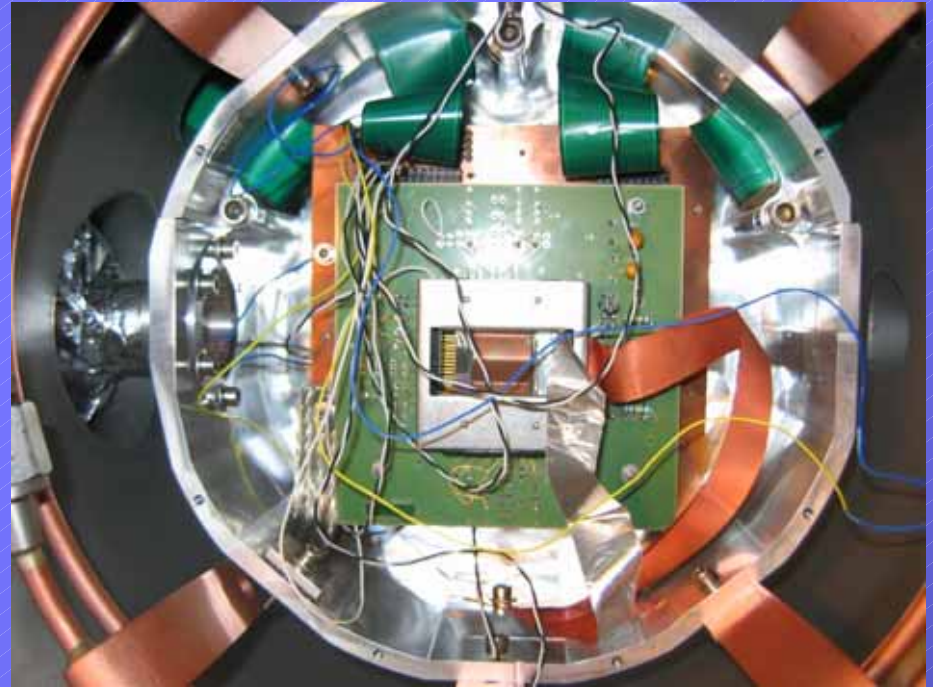
Bancs de test pour détecteurs

Deux bancs de test cryogéniques : pour CCD (LBL et EEV) et pour capteur IR (HgCdTe de Rockwell)



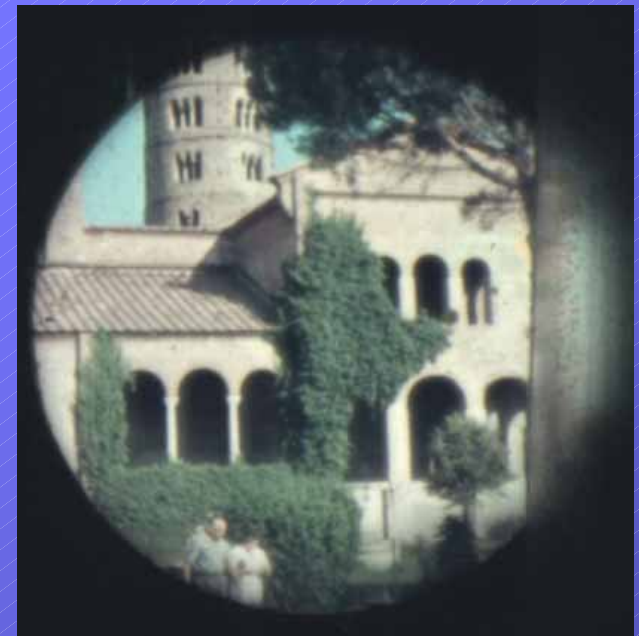
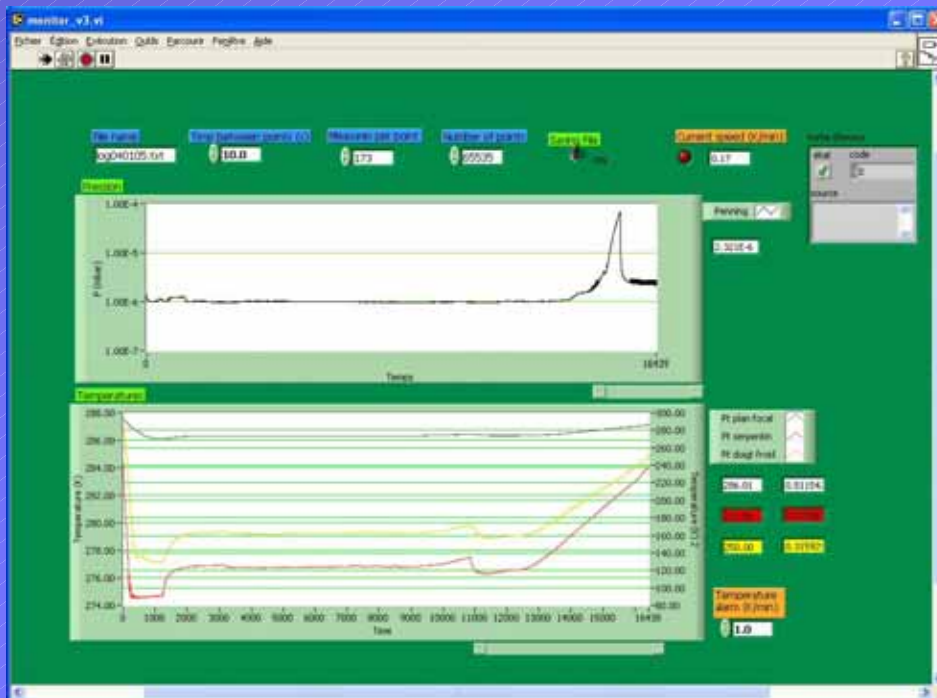
Bancs de test pour détecteurs

- ✓ Refroidissement à l'azote liquide, pompe à vide à deux étages, écran froid et Cryotiger pour le banc IR
- ✓ Suivi de température et de pression
- ✓ Boîtiers de connexion électrique
- ✓ Banc optique
- ✓ Contrôle du détecteur



R&D Détecteurs

- Comportement cryogénique bien connu
- Lecture d'images avec le CCD LBL + contrôleur SDSU
- Chaîne de lecture CCD intégrant l'ASIC DGCS et le dispositif pour mesures à bas bruit



Conclusions

- Travail effectué :
 - Étude détaillée de l'ASIC DGCS
 - Compréhension par la pratique des bruits présents dans la chaîne de lecture CCD
 - Mise en place des bancs de test CCD et IR
- Nouveaux objectifs pour la R&D détecteurs :
 - Insérer l'ASIC dans la chaîne de lecture du CCD LBL
 - Finir la conception de la génération suivante d'ASIC, le faire fondre et le tester
 - Étude du bruit dans la chaîne infra-rouge (au niveau du capteur, du multiplexeur, efficacité du 'multiread')