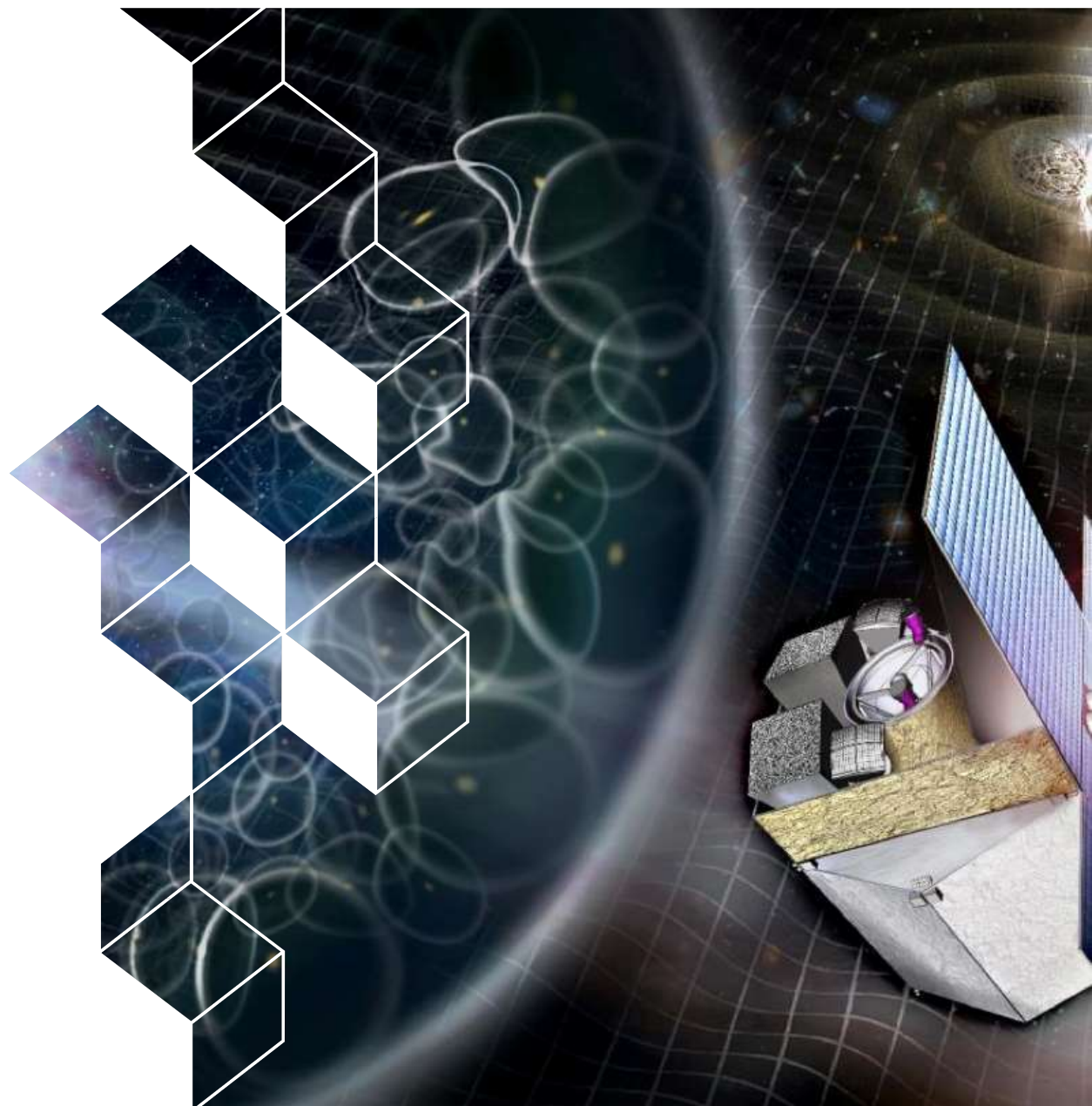




Position du Département d'Astrophysique du CEA en R&D détecteurs

Equipe CEA-Dap

Atelier détection CNES



Plan

1. Détecteurs X

2. Besoins en détecteurs IR

1. Les photodiodes à avalanche
2. Circuit de lecture bas flux
3. Développements connexes
4. Electronique de lecture et packaging

3. Conclusions



Plan

1. Détecteurs X

2. Besoins en détecteurs IR

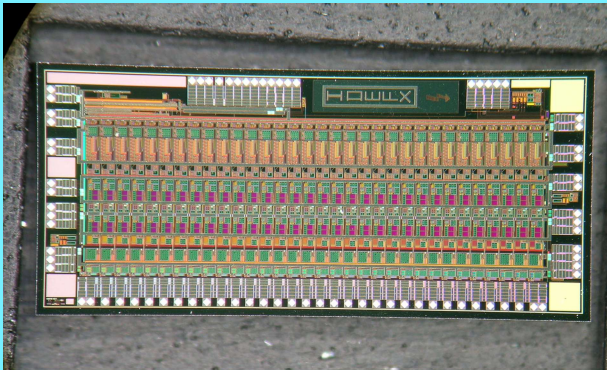
1. Les photodiodes à avalanche
2. Circuit de lecture bas flux
3. Développements connexes
4. Electronique de lecture et packaging

3. Conclusions



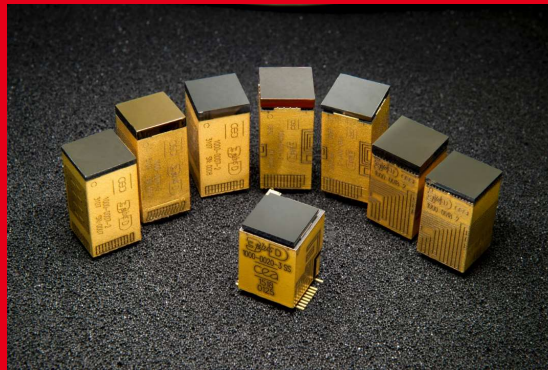
R&D X et gamma : détecteurs CdTe à pixels

Développement d'électronique de lecture bas bruit durcie



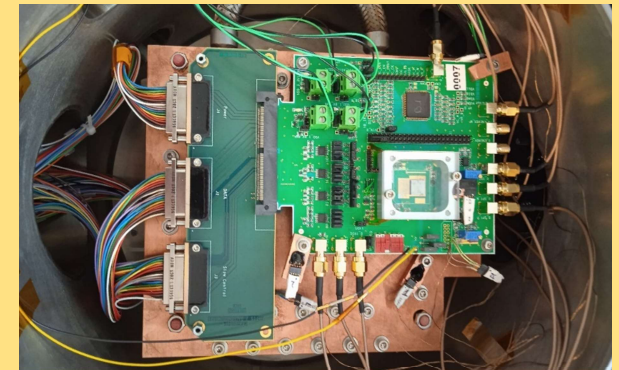
ASIC rad-hard IDeF-X
Mission SVOM

Développement de technologies d'intégration 3D



Détecteur hybride Caliste
Mission Solar Orbiter

Caractérisation de détecteurs et qualification spatiale



Plan

1. Détecteurs X

2. Besoins en détecteurs IR

1. Les photodiodes à avalanche
2. Circuits de lecture bas flux
3. Développements connexes
4. Electronique de lecture et packaging

3. Conclusions



2.1 Les photodiodes à avalanche

Missions spatiales actuelles

Dans l'infrarouge, le CEA-DAP est impliqué dans deux missions:

- **ARIEL** (ESA-M4, lancement prévu en 2029)

CEA est en charge de l'instrument AIRS: **ARIEL Infrared Spectrometer**.

Cet instrument utilise deux détecteurs H1RG (1024x1024, pas pixel de 18 μ m) detectors:

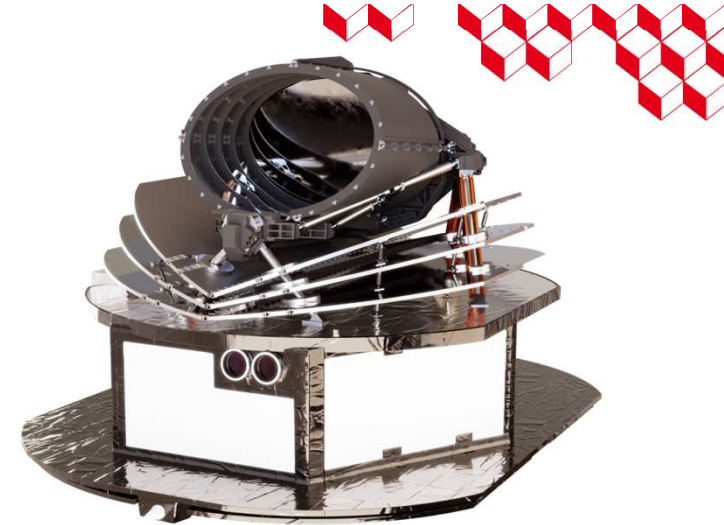
- 1 avec une longueur d'onde de coupure de 5 μ m
- 1 avec une longueur d'onde de coupure de 8 μ m

- **THESEUS** (phase A, mission candidate ESA-M7, lancement prévu en ~2035)

CEA est en charge de l'instrument IRT: **Infrared Telescope**

Par défaut l'instrument s'appuie sur un détecteur H2RG (2048x2048, pas pixel de 18 μ m) :

- 1 détecteur avec une longueur d'onde de coupure à 2.3 μ m



Vue d'artiste du satellite ARIEL. Credit Airbus

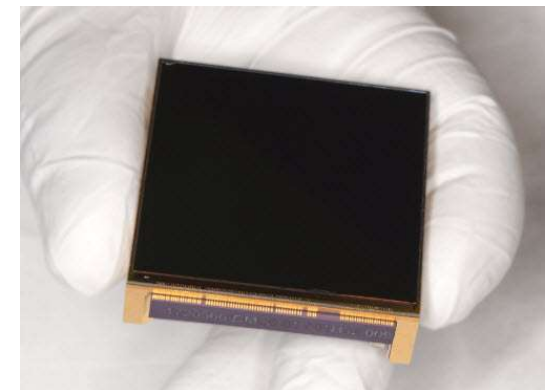


Photo d'un H2RG. Source: site web Teledyne



2.1 Les photodiodes à avalanche

Vers une augmentation de la sensibilité

Les détecteurs HxRG sont largement utilisés mais leur bruit **stagne depuis plusieurs dizaines d'années autour de 10 électrons(*)**.

Si on veut augmenter la sensibilité des détecteurs il faut réduire le bruit de lecture et descendre sous l'électron:

1. Lire plusieurs fois le signal de chaque pixel
2. Amplifier le signal utile → Photodiode à avalanche.

Cela s'inscrit dans une philosophie plus large, il ne suffit pas de faire comme les H2RG si on veut convaincre les astronomes: il faut faire mieux.

Caractéristique	Valeur
Taille du détecteur	2048x2048, 4096x4096
Pas pixel	18 μm
Longueur d'onde de coupure	1.7 μm -13 μm
Température d'opération	35K-130K
Performance	
Courant noir	$< 0.001 \text{ e-}/\text{s}/\text{pix}$ $\lambda_c = 2.1\mu\text{m}$ à 100 K $< 0.07 \text{ e-}/\text{s}/\text{pix}$, $\lambda_c = 8.1\mu\text{m}$ à 42 K
Bruit de lecture	$< 10 \text{ e-}$
Capacité de puits	$\sim 100\,000 \text{ e-}$
Efficacité quantique	$\sim 90\%$

Quelques chiffres sur les détecteurs HxRG

(*) Ce bruit de lecture peut néanmoins être réduit jusqu'à quelques électrons avec différentes stratégies de lecture (type FUR, MACC)

2.1 Les photodiodes à avalanche

De manière similaire aux photodiodes classiques, les photodiodes à avalanche, ou APDs, convertissent le signal en courant. Dans le cas des APDs le signal photo-généré est amplifié grâce au **processus d'ionisation par impact**.

Il y a du bruit associé à ce processus de multiplication : le nombre de porteurs générés varie. Le facteur d'excès de bruit, F , traduit cette amplification du bruit de photons. Il peut être écrit comme suit [2]:

$$F = 1 + \frac{\sigma_M^2}{\langle M \rangle^2}$$

Pourquoi le HgCdTe est un bon matériau pour faire des APDs ? [2]

1. C'est dû à la structure de bande du HgCdTe. **Seuls les électrons sont multipliés**. Les trous sont trop lourds et perdent principalement leur énergie en interagissant avec les phonons
2. Le matériau HgCdTe présente un courant d'obscurité faible

L'état de l'art fait mention d'APD avec un gain d'avalanche proche de 100, avec un facteur d'excès de bruit entre 1.1 et 1.4 avec un des tensions de polarisations modérées (une dizaine de volt).

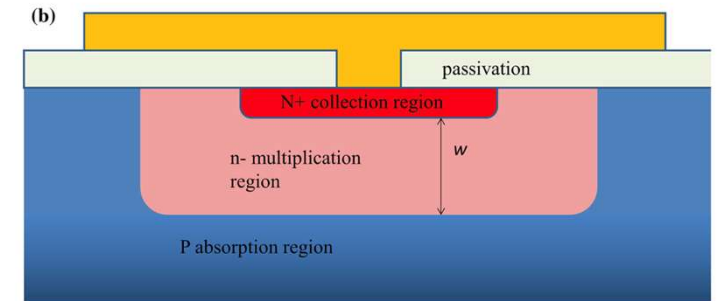
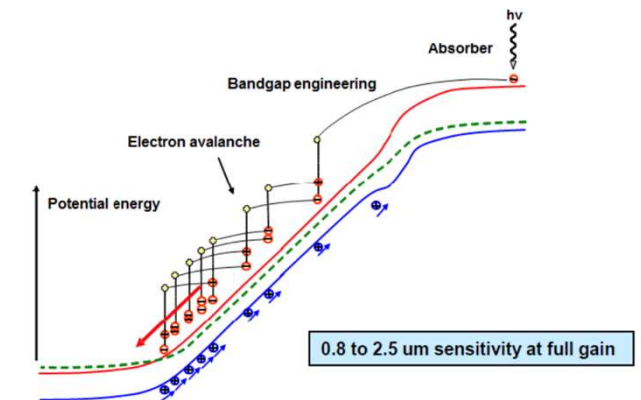


Schéma d'une photodiode à avalanche. Tiré de [2]



Band diagram of an avalanche photodiode. Taken from [1]

[1] CLAVEAU, Charles-Antoine, BOTTOM, Michael, JACOBSON, Shane, *et al.* First tests of a 1 megapixel near-infrared avalanche photodiode array for ultra-low background space astronomy. In : *X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy X*. SPIE, 2022. p. 330-346.
[2] ROTHMAN, Johan. Physics and limitations of HgCdTe APDs: A review. *Journal of Electronic Materials*, 2018, vol. 47, no 10, p. 5657-5665.



2.1 Les photodiodes à avalanche

Ce que l'on souhaite pousser au CEA-DAP avec le CEA-Leti concernant les photodiodes à avalanche:

Faire des photodiodes à avalanche à faible excès de bruit, voire sans excès de bruit $F=1$ (pour le comptage de photon IR). Cette caractéristique représente un véritable changement de paradigme dans la détection, en permettant la détection de photons uniques sans perte de l'information sur le signal, tout en réduisant le bruit induit par l'électronique de lecture (ReadOut Integrated Circuit (ROIC) et l'électronique de proximité).

Il y a plusieurs enjeux/inconnus notamment:

- Maîtrise de nouvelles briques technologiques qui permettent de minimiser F
- Maintenir un courant d'obscurité faible avec une tension de polarisation élevée
- Développer un circuit de lecture à comptage de photon IR compatible avec les problématiques d'électro-luminescence du circuit de lecture.

2.1 Les photodiodes à avalanche

Développements actuels dans le monde

Il y a deux programmes de développement d'APD pour les applications scientifiques bas flux:

- IkePono

- Financé par la NASA et l'Université d'Hawaii
- Fabriqués par LEONARDO
- 1024x1024, pas pixel de 15 μ m
- Résultat détecteur d'ingénierie présenté au SPIE 2022
- Détecteur *Science Grade* attendu en 2023. Nouveaux résultats au SPIE 2024 ?

- Ibex

- Financé par l'ESA
- Fabriqués par LEONARDO
- 2048x2048, pas pixel de 15 μ m
- Caractérisation des ROICs nus en cours
- Les premières matrices doivent arriver en septembre à l'ESA.

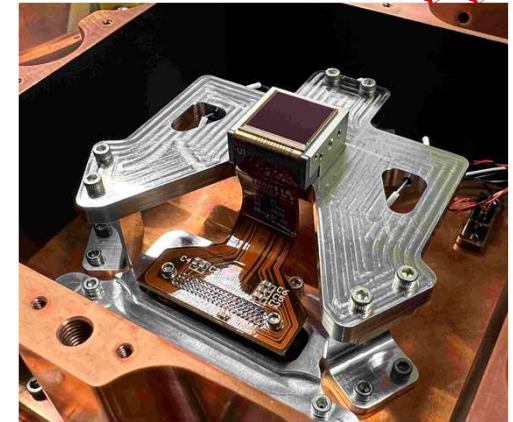
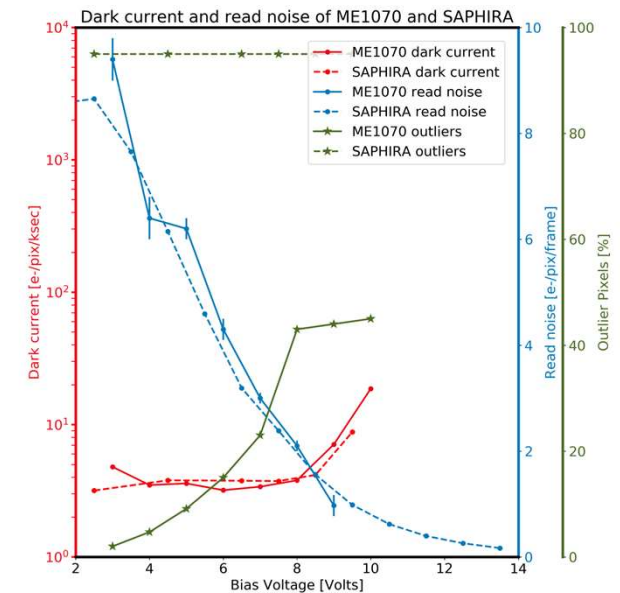


Photo du détecteur IkePono [1]



Tiré de [1]

[1] CLAVEAU, Charles-Antoine, BOTTOM, Michael, JACOBSON, Shane, *et al.* First tests of a 1 megapixel near-infrared avalanche photodiode array for ultra-low background space astronomy. In : *X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy X*. SPIE, 2022. p. 330-346.



2.1 Les photodiodes à avalanche

Applications visées en astronomie:

- Survey (GaiaNIR, grand plan focal IR, 60 H2RG [1])
- Imagerie d'exoplanètes (mission HWO de la NASA)
- Spectroscopie haute résolution
- Galaxies faibles à haut *redshift*
- APDs permettent d'avoir une lecture rapide et un bruit de lecture faible et trouvent des applications sols pour figer les turbulences atmosphériques par exemple (observation du soleil)

Avec des applications en astronomie mais pas seulement, il y a aussi des applications en optique quantique, et en observation de la Terre.

2.2 Circuits de lecture bas flux

Les circuits de lecture SFD pour les applications bas flux en IR actuels ne sont pas parfaits:

- Bruit de lecture plancher de 10 e-
- Les détecteurs sont non-linéaires (les charges s'intègrent sur la capacité de la jonction)
- Les détecteurs sont sensibles à la persistance

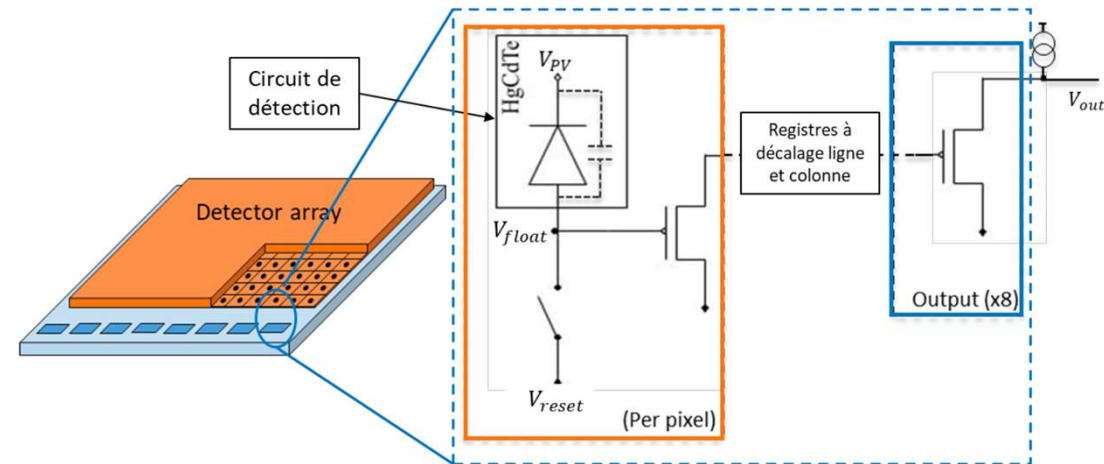


Schéma d'un circuit de lecture type SFD. Tiré de [1]

1. La non-linéarité et la persistance sont difficiles à calibrer et deviennent critiques pour des missions de photométries précises (exemple Euclid)
2. Le LETI a montré via le programme ALFA notamment qu'il était capable de fabriquer des couches détection hautes performances pour les applications bas flux (équivalentes à Teledyne)

Développement d'un circuit de lecture bas flux type CTIA ou avec du TDI

2.3 Développements connexes: photodiodes calibrées

Photodiodes calibrées

La calibration de détecteurs lors des phases de développement d'instrument ou dans le cadre des programmes R&D requiert aussi le développement de banc de test. L'efficacité quantique est un paramètre difficile à mesurer.

Au CEA-DAP nous sommes intéressés par le développement de photodiodes calibrées IR adaptées aux applications bas flux dans l'IR jusqu'à 10 μ m.

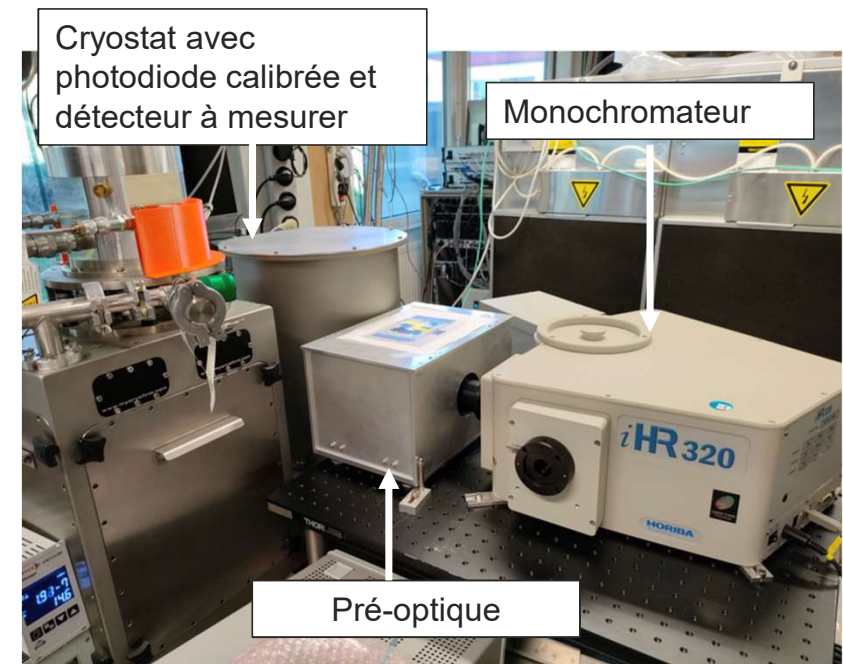


Photo du banc de caractérisation utilisé pour mesurer l'efficacité quantique au CEA-DAP

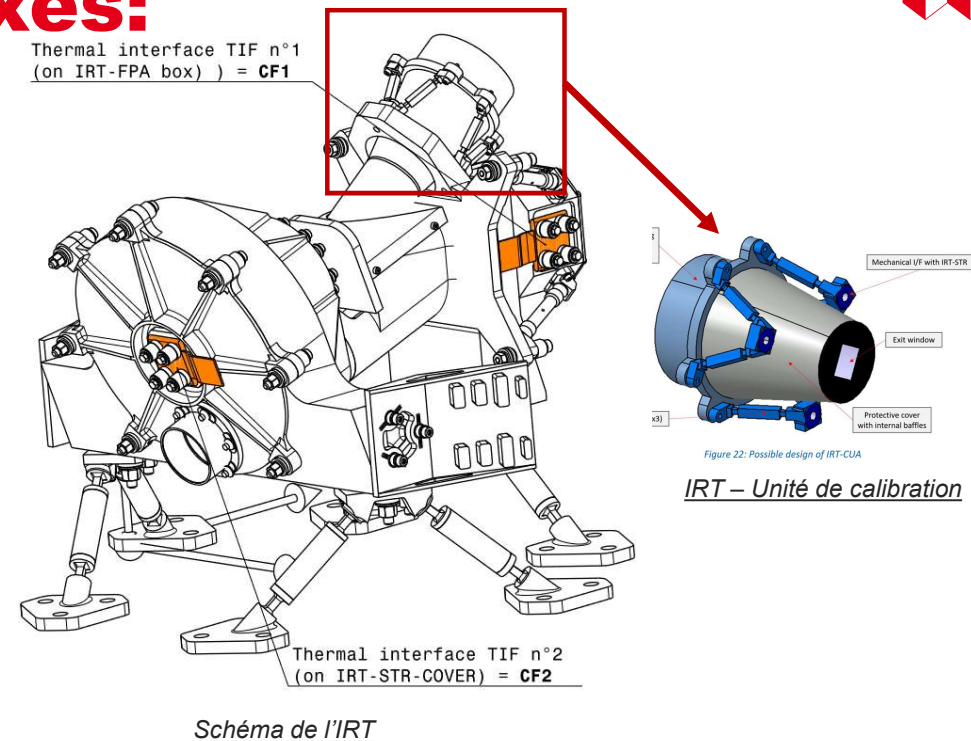
2.3 Développements connexes: source de calibrations

Source de calibration vol

Dans l'instrument IRT de la mission THESEUS, il est prévu de mettre une source de calibration IR (domaine 700nm -1.8µm):

1. Approche: utiliser une unité de calibration similaire à celle du NISP d'Euclid basées sur des LEDs.
2. Mais il y a peu (voire pas) d'options actuellement, au-delà de 1.55µm les LEDs utilisées sur EUCLID sont de fabrications russes.
3. Or, à la différence des filaments tungstènes qui sont aussi utilisés, les LEDs permettent d'avoir une plus grande versatilité.

Au CEA-Dap nous sommes intéressés par le développement de LEDs pour la calibration des détecteurs en vol dans les instruments IR.



	LEDs	Filament Tungstène
Rapide power on/off	Oui	Oui avec l'ajout d'un mécanisme
Différents fluxs	Oui	Difficile sans décalage spectral

2.4 Electronique de lecture et packaging

Electronique de lecture:

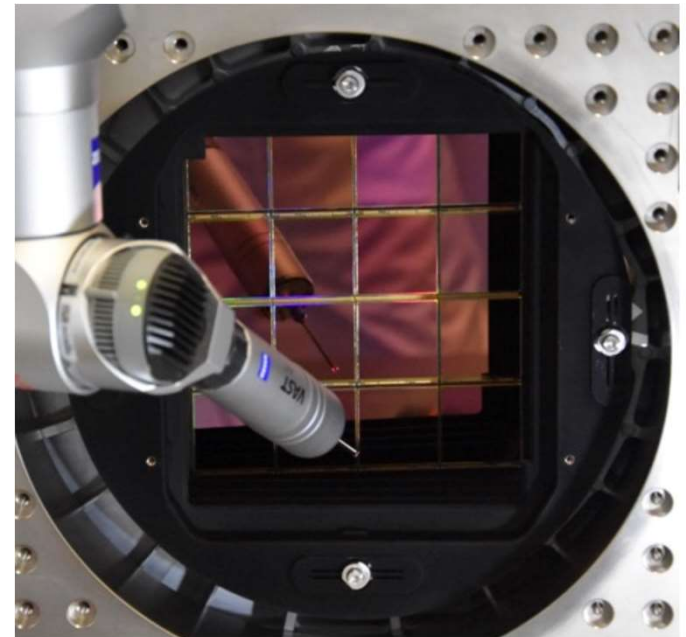
Le SIDECAR, est l'ASIC classiquement utilisé pour contrôler les détecteurs HxRG → C'est une boîte noire très versatile avec laquelle il est difficile de travailler dans la mesure où l'accès au code est limité.

→ Développer une électronique de lecture de détecteurs IR scientifiques est stratégique pour les futures missions dans la mesure où on gagne en maîtrise de l'instrument et en contrôle de la programmation du détecteur

Packaging:

En astronomie, on est intéressé par des grands plan focaux (60 H2RG pour Gaia NIR, 16 H2RG détecteurs pour Euclid).

→ Travailler sur un packaging aboutable est important pour former des grands plan focal. C'est stratégique pour se positionner sur les futures missions.



Plan focal euclid NISP pendant une phase de métrologie

Plan

1. Détecteur X (TBC)

2. Besoins en détecteurs IR

1. Les photodiodes à avalanche
2. Circuit de lecture bas flux
3. Développements connexes
4. Electronique de lecture et packaging

3. Conclusions



Conclusions

Dans le domaine IR , pour les futures missions:

1. Développement de matrices APD à faible excès de bruit
2. Développement de photodiodes calibrées pour la caractérisation/calibration des détecteurs
3. Développement de LEDs pour les unités de calibrations des instruments IR
4. Développer des packagings aboutable pour réaliser des grands plan focaux
5. Développement de circuit de lecture type CTIA ou avec TDI
6. Electronique de lecture

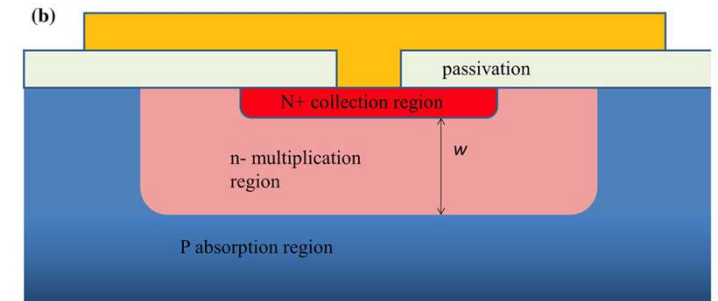
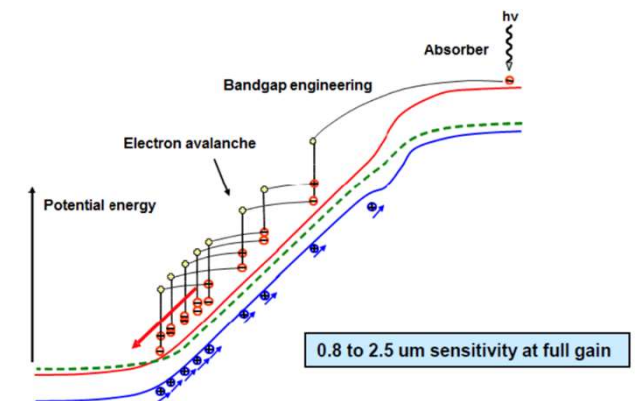


Schéma d'une photodiode à avalanche. Tiré de [2]



Band diagram of an avalanche photodiode. Taken from [1]

[1] CLAVEAU, Charles-Antoine, BOTTOM, Michael, JACOBSON, Shane, *et al.* First tests of a 1 megapixel near-infrared avalanche photodiode array for ultra-low background space astronomy. In : *X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy X*. SPIE, 2022. p. 330-346.

[2] ROTHMAN, Johan. Physics and limitations of HgCdTe APDs: A review. *Journal of Electronic Materials*, 2018, vol. 47, no 10, p. 5657-5665.