

APD CdHgTe pour l'imagerie 3D: réalisation et perspectives

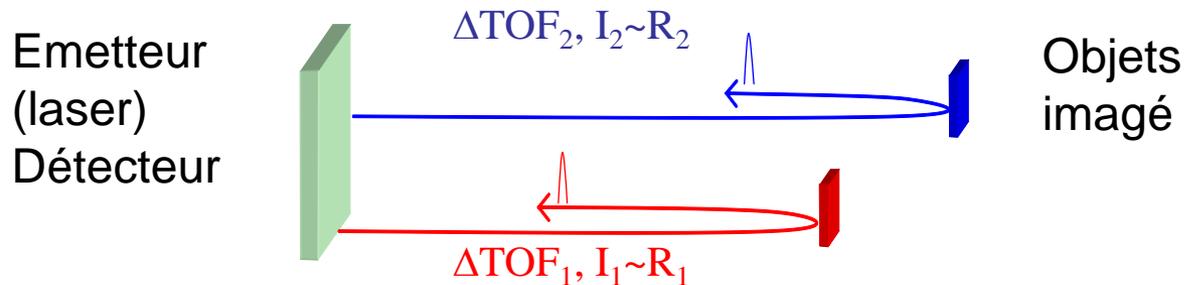
Johan Rothman

7/4/2014

Plan de l'exposé

- Imagerie 3D par la mesure du temps de vol d'une impulsion laser
- Photodiodes d'avalanche (APDs) CdHgTe pour l'imagerie 3D
- Réalisations
- Perspectives

Imagerie 3D par temps de vol (TOF)

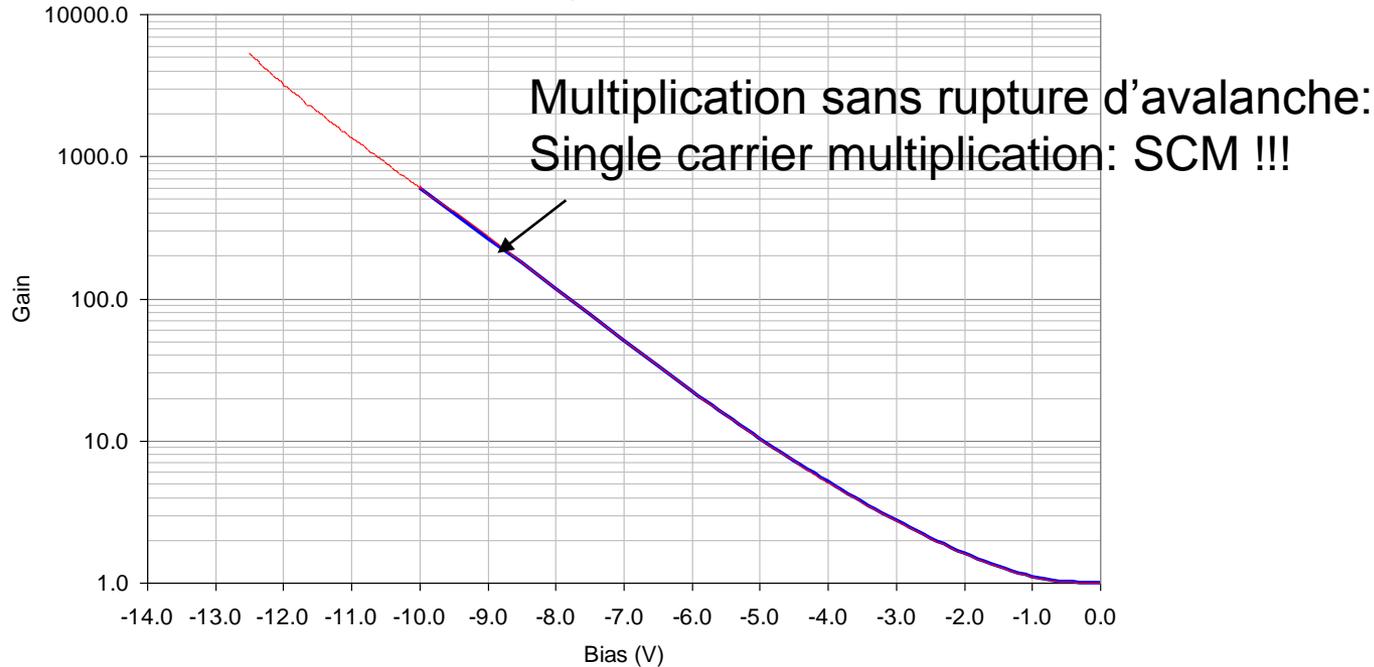


- Estimation de la distance des objets par la mesure du temps de vol:
 - $\Delta_d = \Delta_{\text{TOF}} / 2c : \Delta_{\text{TOF}} = 1 \text{ ns} \rightarrow \Delta_d = 16 \text{ cm}$
- Le signal de retour décroît avec le carré de la distance $\sim 1/d^2$
 - Peu de photons à détecter
- La résolution temporelle / spatiale dépend du bande passante du détecteur (BW), le signal (S) et le bruit (N)
 - $\Delta d \sim \frac{N}{S} \frac{1}{\text{BW}}$

Besoin de photo
détection amplifié
et rapide/
APD CdHgTe ?

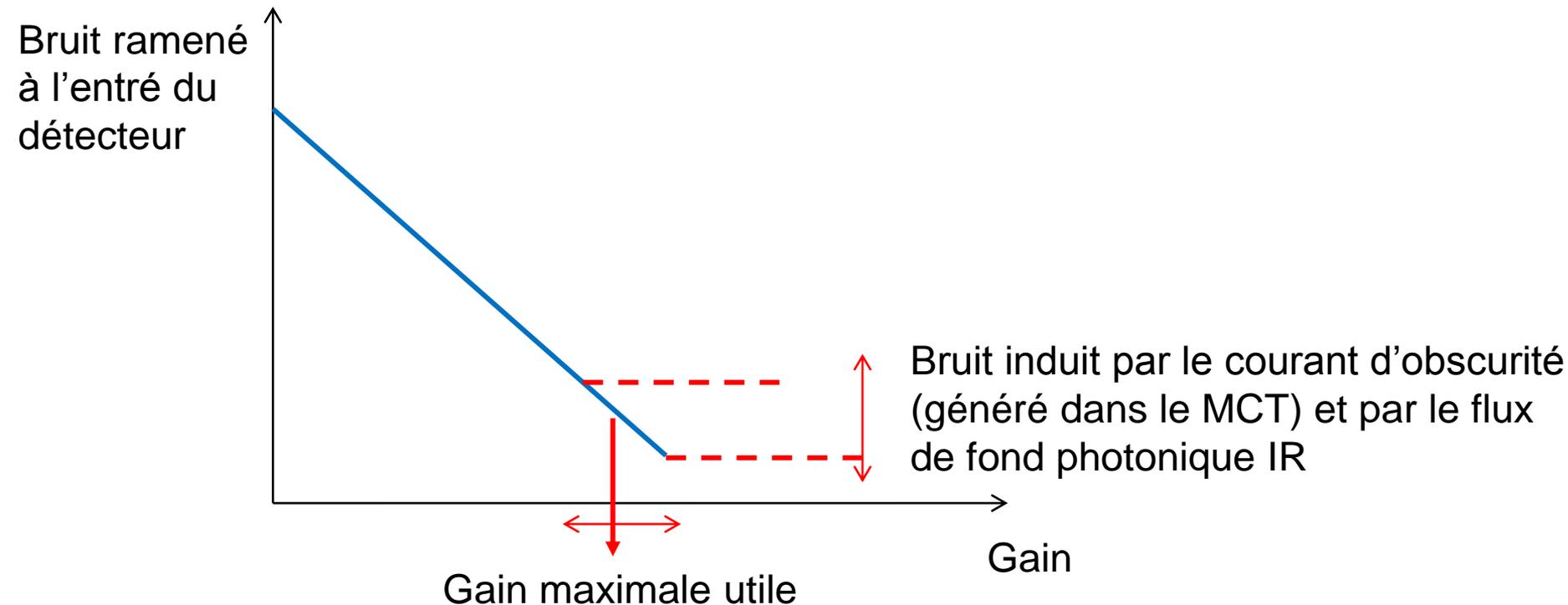
Photodétection amplifié avec APDs CdHgTe

(DRS: 2001, Selex: 2003, Leti: 2006...)



- $M > 100$, $F = 1.1 - 1.3$, Faible I_{obs} et dispersion
 - Record de conservation d'information (SNR) : QEFR $\sim 60 - 90$ %
 - APD III-V QEFR $< 10 - 30$ % $\rightarrow \Delta d$ plus important pour le même signal
 - Détection ultra sensible de l'uv/visible jusqu'au $\lambda_c = 2.2 - 10 \mu m$, $I_{obs} > 10$ e/s !
 - Compatible avec application matricielle
- Gap étroite \rightarrow Bruit du détecteur (I_{obs} + flux IR résiduel)
 - Limitation en température de fonctionnement et taille des diodes

Limitation de la sensibilité pour la photodétection amplifiée dans l'IR



- Le bruit généré par le détecteur limite le gain maximale utile (sensibilité) dans les APDs MCT
 - Il faut limiter la surface sensible, la température de fonctionnement et le temps d'observation (applications à BW max sont favorables)

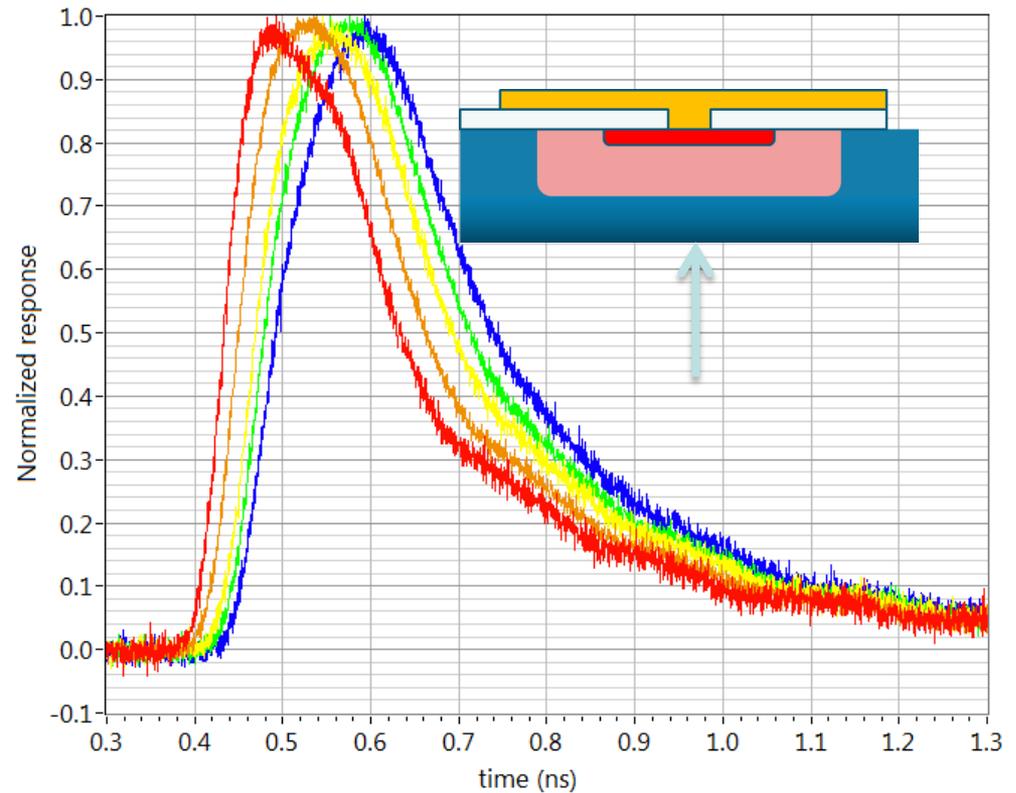
Temps de réponse des APDs CdHgTe au CEA/Leti

Sample	1		2	
N+ to Sub (μm)	2.4		4.1	
Diode geometry	x_j (μm)	x_{grad} (μm)	x_j (μm)	x_{grad} (μm)
Type A	2	0.4	1.3	2.0
Type B	3.5	-1.1	2.3	1.8

APD 1A

Localized injection (APD center)
T= 80 K

- M= 1. (6 V)
- M=5 (10 V)
- M= 35 (14 V)
- M= 70 (16 V)
- M= 130 (18 V)



- Delayed response at high gain with constant **RC =270 ps (BW=600 MHz)**
 - Reduction of electron and holes velocities
 - Increased gain \rightarrow larger hole contribution over the total junction thickness
 - Temps de réponse limité par le couplage électrique : FWHM < 300 ps (BW~600 MHz)
- BW grande diode (200 μm) 40-220 MHz (limité par diffusion)

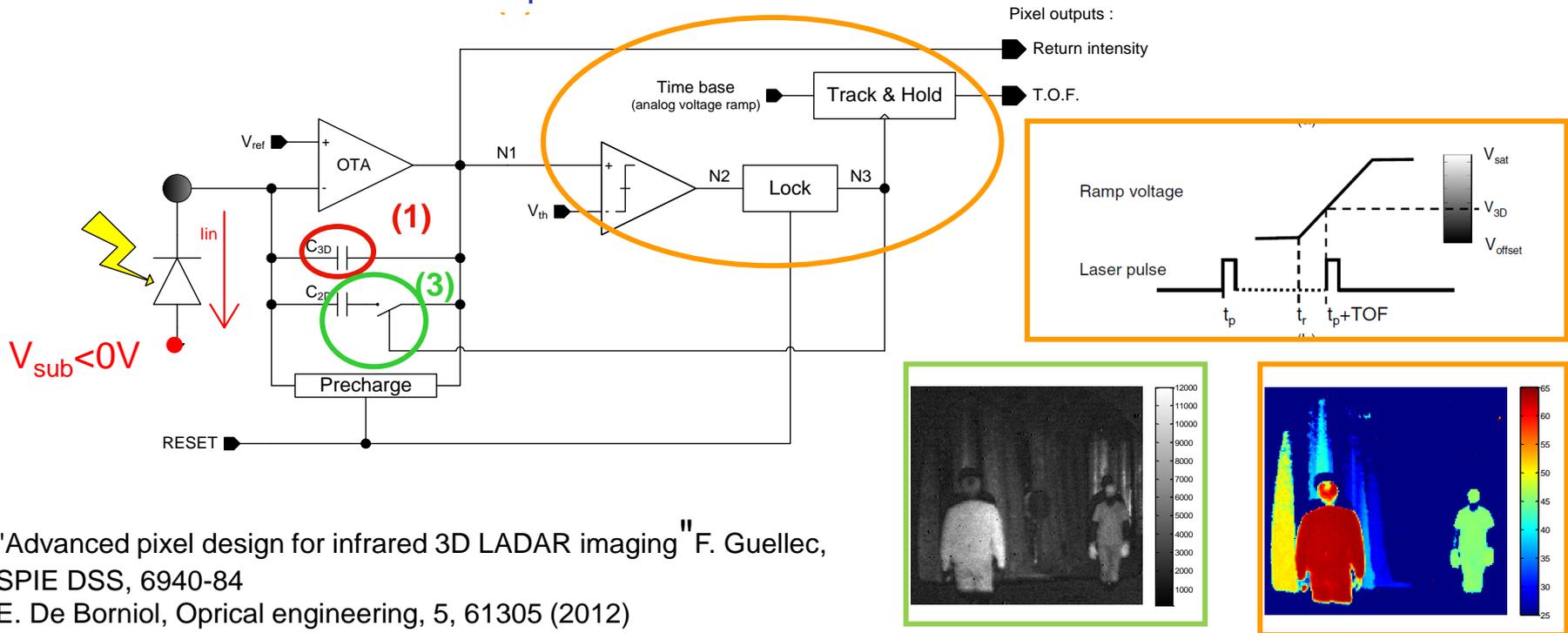
APDs CdHgTe pour imagerie active

- Le gain, la bande passante et le courant d'obscurité sont compatibles avec l'imagerie active
 - MWIR @ 80 K
 - SWIR => 200 K
- 4 démonstrateurs permettant l'imagerie 3D ont été développés
 - Imagerie 3D en temps réel: Imageur multi-fonction 2D/3D 320x256 pas 30 μm
 - Imagerie 3D tomographique : Imageur 2D (gating) 385x288 au pas de 15 μm (en collaboration avec Sofradir)
 - Imagerie 3D en mode balayage: Mono-élément grande diamètre > 100 μm , refroidissement TEC
 - Imagerie 3D en comptage de photon: mono-élément ultrasensible
- Perspectives

Imageur multi-mode 2D/3D et thermique

- CTIA coupled one-shot TOF+R imaging (3D)
 - Pulse detection in C_{10} (1)
 - Sample time sweep \rightarrow TOF (2)
 - Switch to integrate the total light pulse in C_{20} (3)

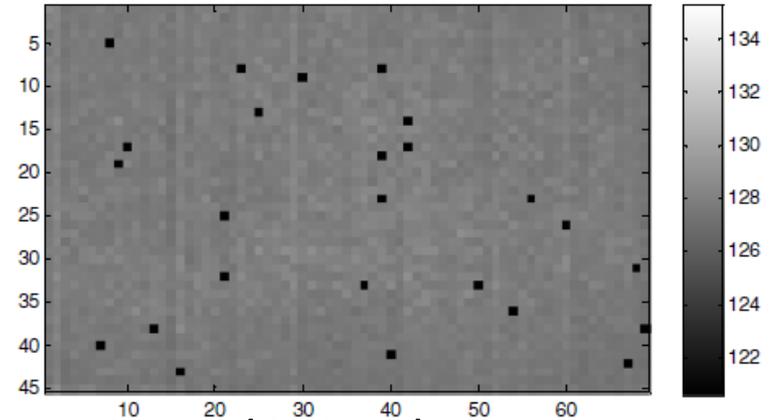
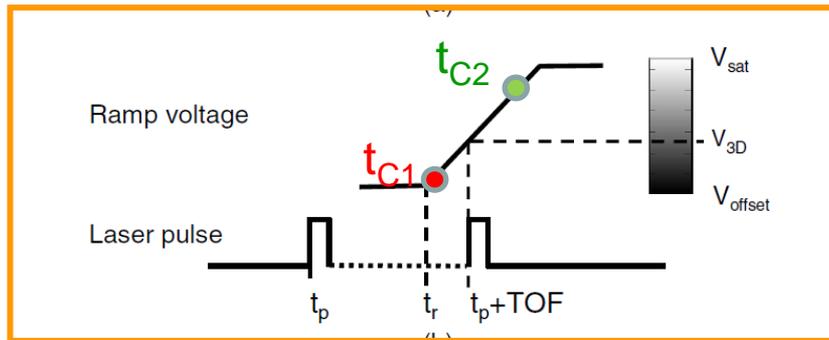
First 3D event driven pixel



"Advanced pixel design for infrared 3D LADAR imaging" F. Guellec,
 SPIE DSS, 6940-84
 E. De Borniol, Optical engineering, 5, 61305 (2012)

Précision sur le temps de vol

Fluctuation spatiale après calibration sur deux points

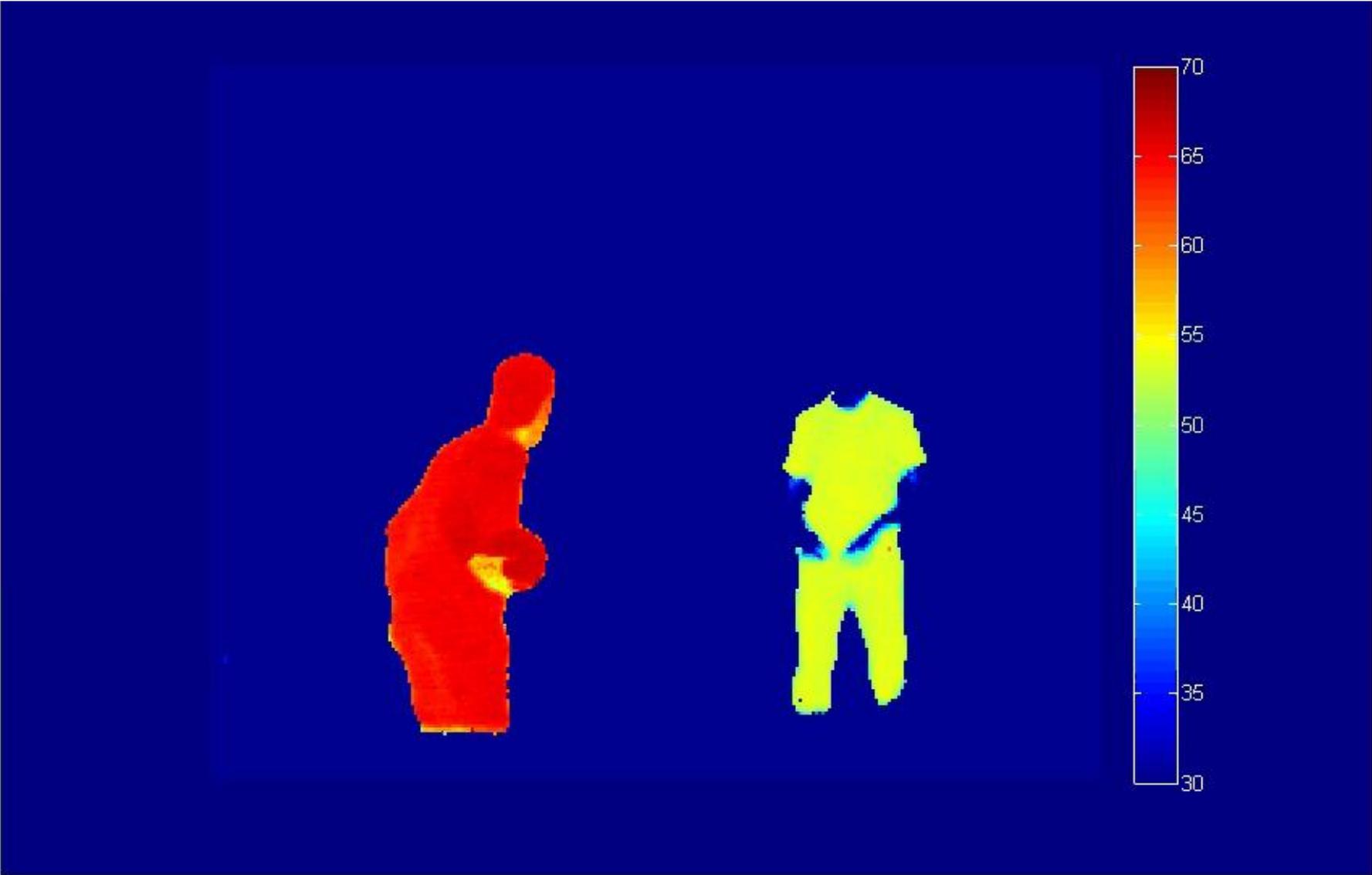


- High signal (4300 photons, $M=23$): $\sigma_d=9$ cm (0.6^(b)ns)
- Low signal (100 photons, $M=124$): $\sigma_d=45$ cm (3.0 ns)

Fluctuations temporelles

- High signal (4300 photons, $M=23$): $\sigma_d=11$ cm (0.75 ns)
- Low signal (100 photons, $M=124$): $\sigma_d=40$ cm (2.7 ns)
 - Lower signal introduces a level dependent delay
 - The delay can be corrected for in presence of simultaneous 2D/3D detection
 - Need good SNR on the 2D signal: design error in the present detector (C_3 too big)

Lancer un ballon sur 10 m



Imageur active 2D à haute résolution

384x288, pas 15 μm , développé en collaboration avec SFD

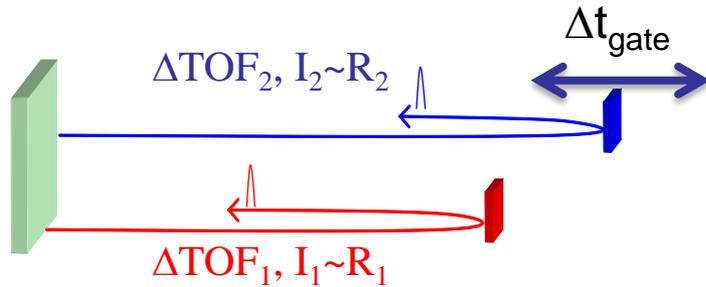
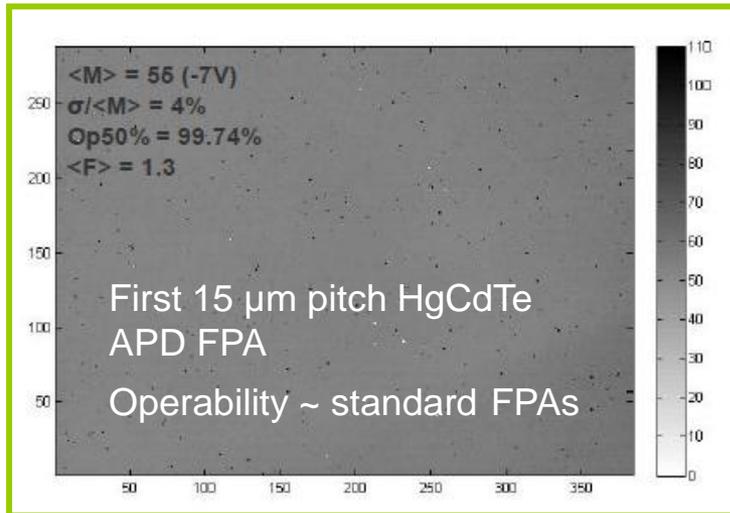


Image reflective du scene dans Δt_{gate}
Imagerie 3D en balayant Δt_{gate}
Résolution lié à temps de
monté/descente et la durée du gate



- $\Delta t_{\text{gate_min}} = 35$ ns
- Temps de montée/descente ~ 3 -5 ns
- Résolution : test réalisé à l'ISL 1/4/2014 ...

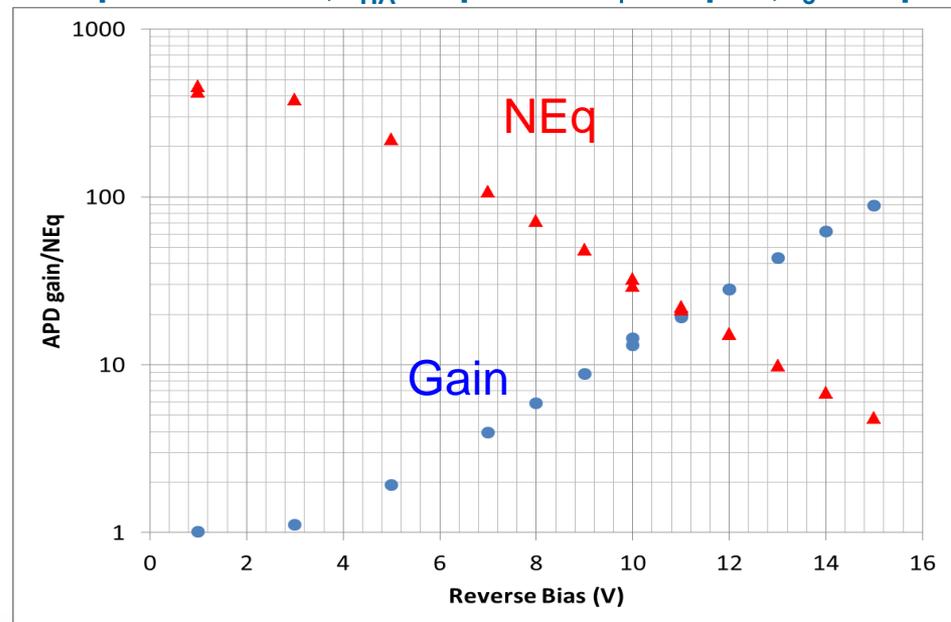
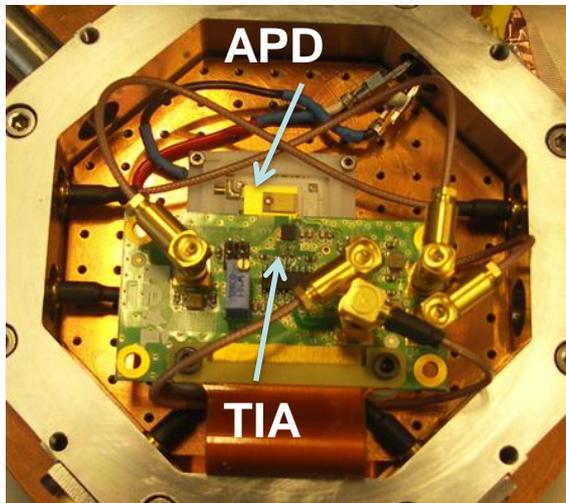
APDs CdHgTe pour la mesures de l'information temporelle ($T_{op}=180-200$ K, $\phi=100-200$ μm)

- System optimization/ Operating temperature (high/low) :

Signal \leftrightarrow BW \leftrightarrow TIA noise \leftrightarrow Surface \leftrightarrow gain $\leftrightarrow \lambda_c(x_{Cd})$

	TIA-1 : Range finder, FSO	TIA-2 : Atmospheric LIDAR
Gain (kV/A)	40	350
BW (MHz)	400	20
Output Noise (mV)	1.5	2.0
i_n (pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	1.8	1.3
I_n (nA)	36.3	5.7

Measured performance, $i_{TIA} = 2$ pA/Hz^{0.5} $\phi=30$ μm , $\lambda_c=2.9$ μm , T=190



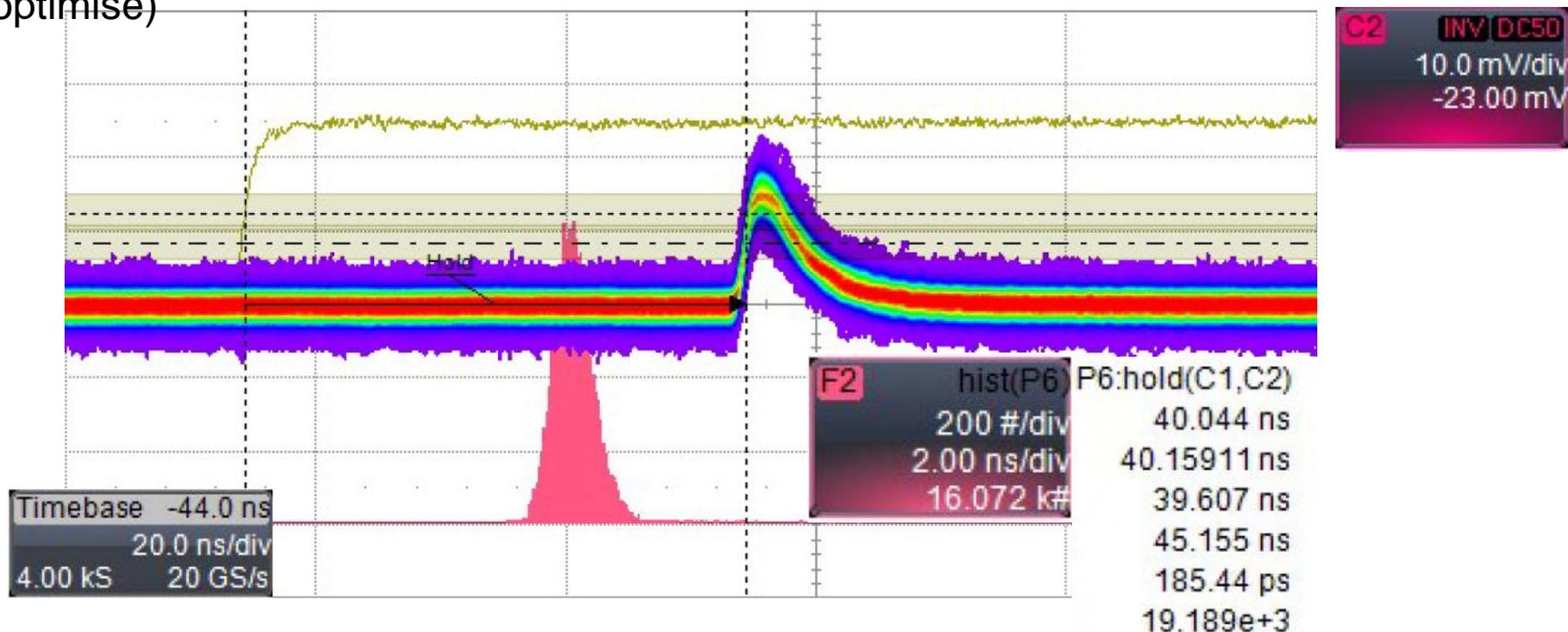
Single element HgCdTe APDs Detector assembly characteristics

Parameter	APD3_TIA-1	APD1-TIA-2
BW TIA/APD (MHz)	350/60	20/NA
λ_c (μm)	3.14	2.9
ϕ_{detector} (μm)	160	200
Bias (V)	14.8	16
Gain (MV/W)	4.45	23
External QE (%)	57%	67
APD Gain	95	80
Output Noise (mV)	2.2	2.6
NEP (nW)	0.76	0.11
NEP (fW/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	43	25.3
NEPh/TC (photons)	7.9	22.1

APD pour
LIDAR
CO2
développé
dans le cadre
d'un R&T
CNES avec
LMD

Performance DTOF APD_TIA-1 (Top=180 K, of=160 μm)

Impulsion laser court \sim FWHM \sim 50 ps, signal équivalent à 100 photons (détecteur optimisé)



- $\sigma_{\text{TOF}}=0.2$ ns ($\sigma_d=3$ cm) pour une détection de seuil simple
- σ_{TOF} augmente pour des impulsion plus longue et avec moins de photons
 - Limite de détection d'impulsion \sim 40 photons $\sigma_{\text{TOF}}\sim$ 1-2 ns

Application demonstration with APD2-TIA-1 (160 μ) Laboratory test for Lunar Laser Com. Demo. (LLCD)

LADEE
Lunar Atmospheric and Dust Environment Explorer
NASA Ames Research Center NASA
Goddard Space Flight Center

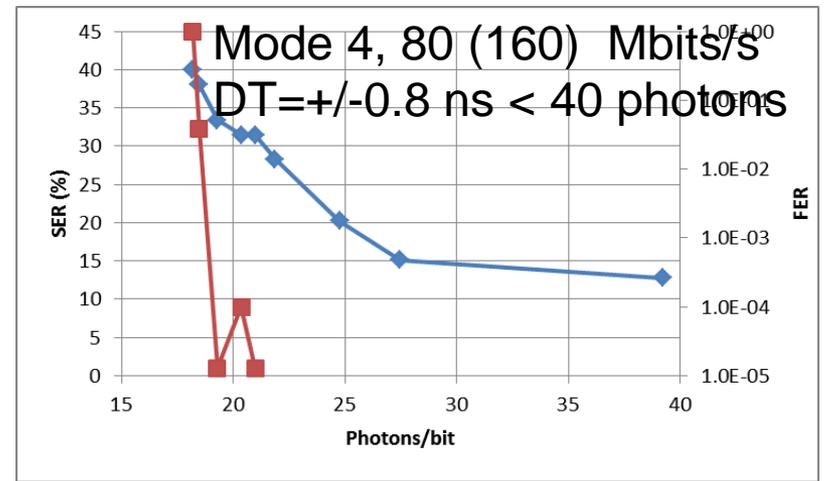
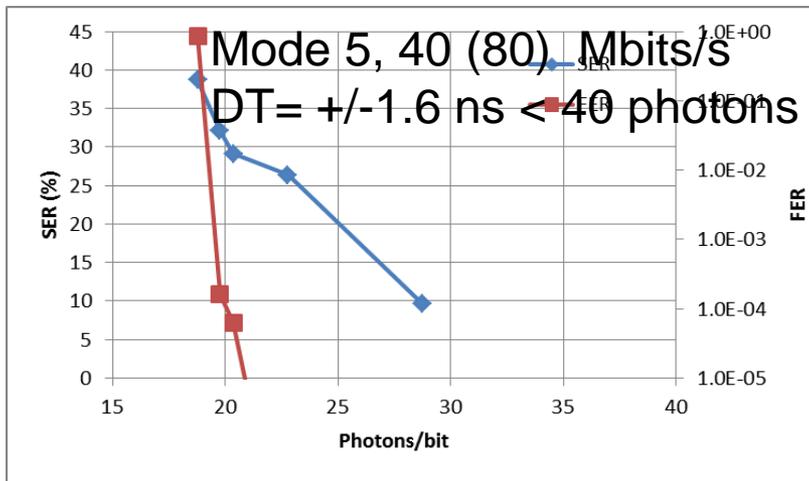
Pulse position modulated (PPM) light at $\lambda=1.55 \mu\text{m}$

LADEE satellite on orbit around the moon

Optical ground station (OGS) Tenerife

esa

Uncorrected and corrected error rates measured at OGS at Tenerife

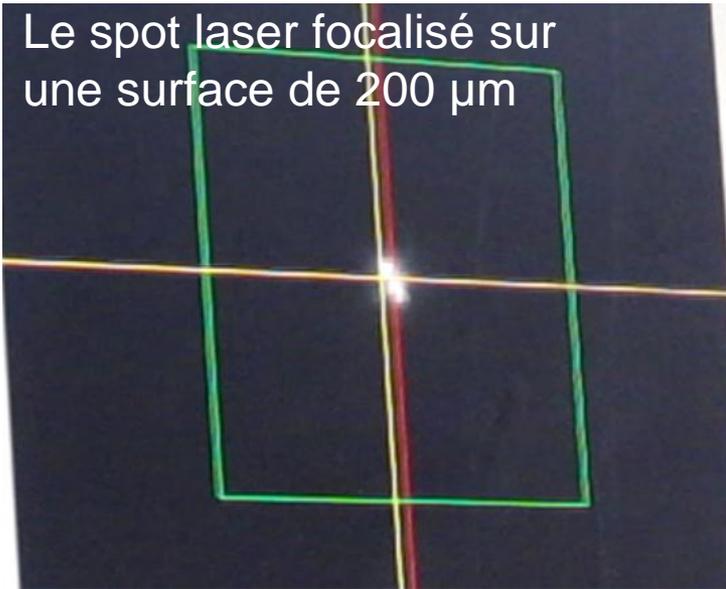


Premier Connexion lune – APD CdHgTe établie le 2/4/2014 (mode 5)

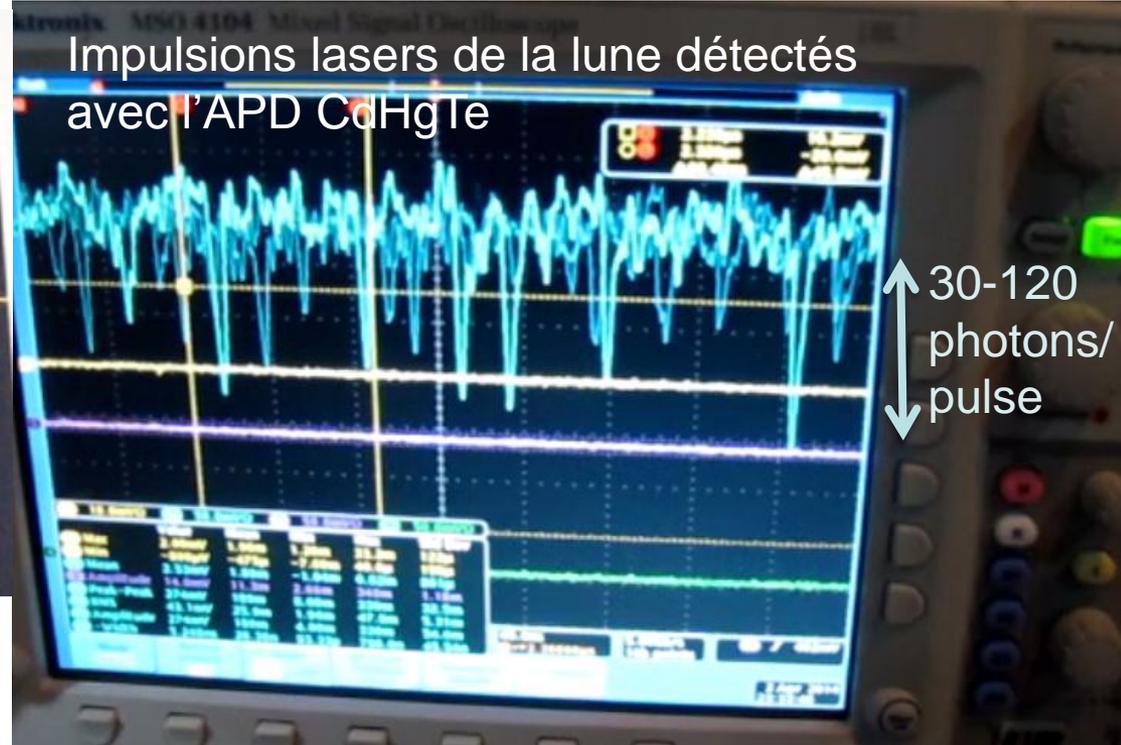
Mode 4 démontré le 3/4/2014

Receiving 80 Mbit/s (40 Mbit/s decoded error free) data from the moon 2-3 Avril 2014

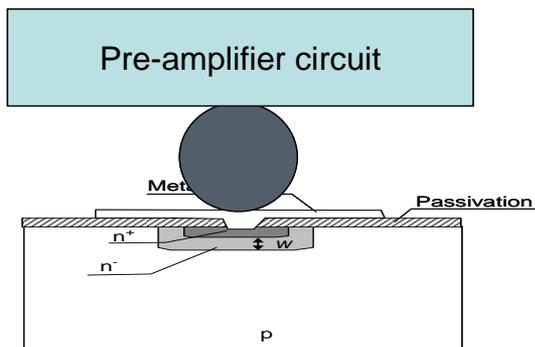
Le spot laser focalisé sur une surface de $200\ \mu\text{m}$



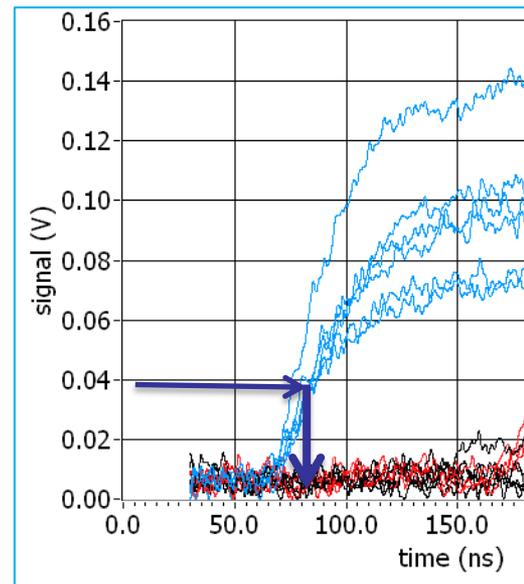
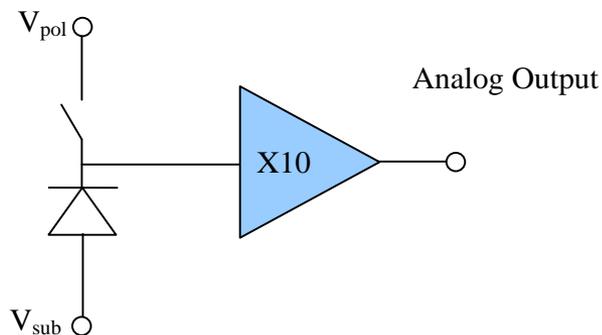
Impulsions lasers de la lune détectés avec l'APD CdHgTe



Imagerie 3D en mode comptage de photon avec APD CdHgTe



Amplified source follower:
Integration on APD capa.



Ampli faible bruit hybridé directement sur l'APD

(Design LETI)

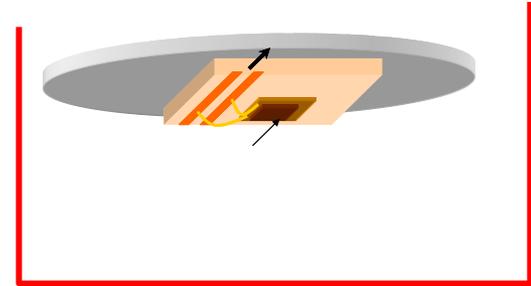
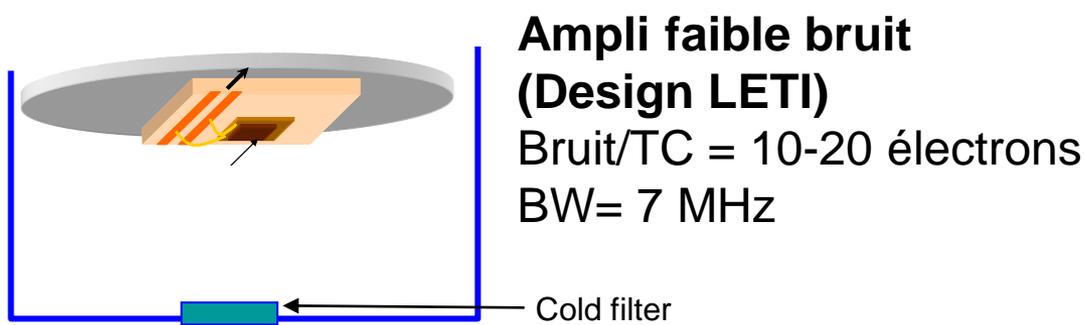
Bruit/TC = 10-20 électrons

BW= 7 MHz

Datation par seuillage ou
Ajustement de front d'onde
(FPGA)

Performance comptage de photons CdHgTe

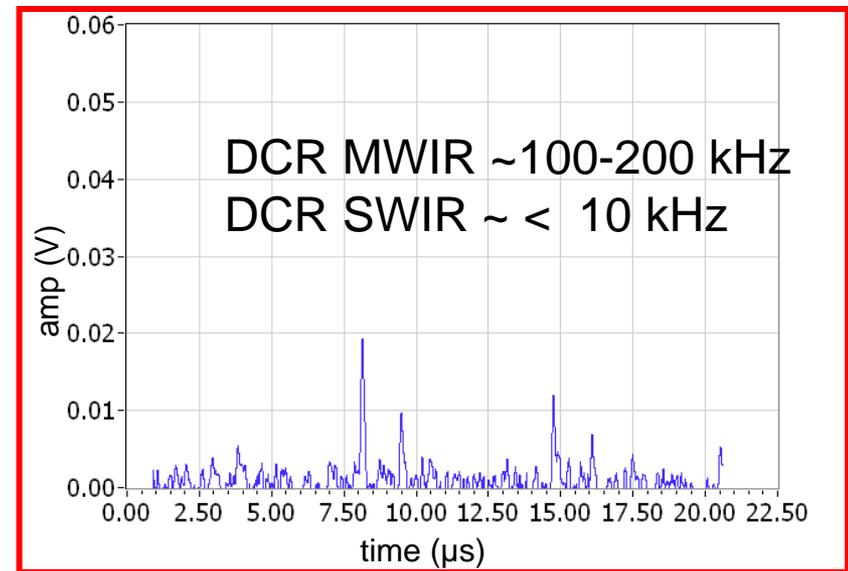
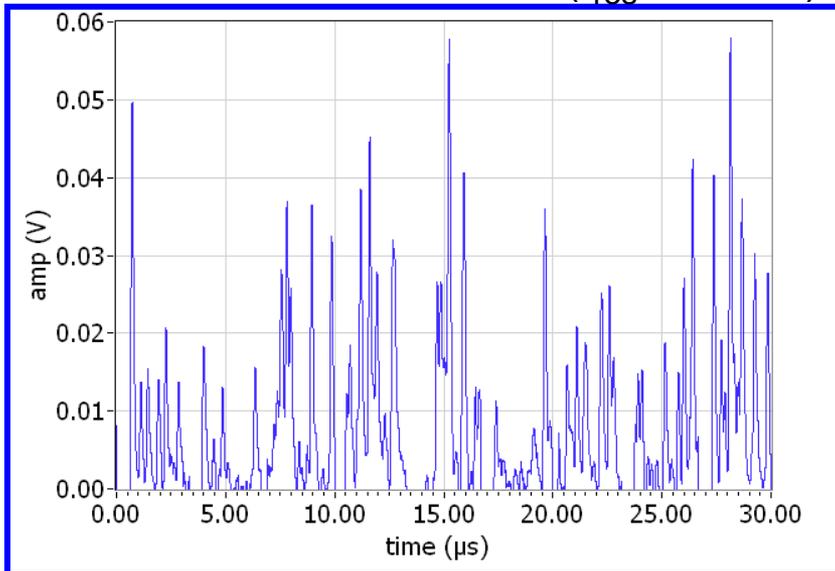
APDs



Résiduel thermal flux avec APD MWIR (et SWIR) ADV=0 (flux zéro)

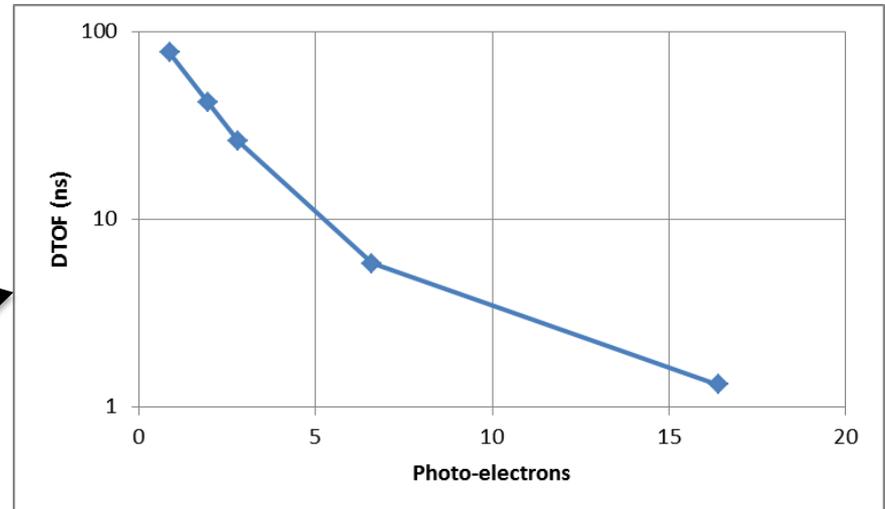
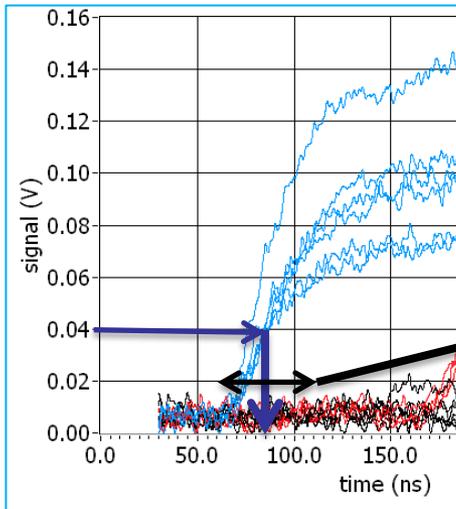
→ Taux résiduels 1.6MHz ($I_{res}=230$ fA)

Coups d'obscurité avec APD MWIR



Datation mode comptage de photons BW < 7MHz (sans préamplificateur)

Résolution en seuillage à 50% d'amplitude
(BW limité < 7 MHz)



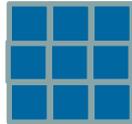
- Δ_{TOF} proche de 1 ns pour moins de 20 photons
- BW > 100 MHz avec une sensibilité similaire a été designé
 - $\Delta_{\text{TOF}} \rightarrow 100$ ps
- Architecture compatible plan focaux faible pas

Perspectives imagerie 3D APD CdHgTe

Mono-élément



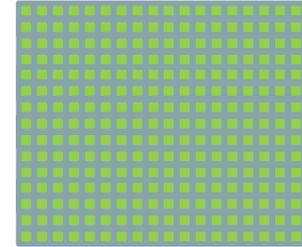
Mini-arrays



Barrette linéaire



Plan focaux



■ Mode linéaire

- Full wave form
- $T_{op}=180-200$ K compatible TEC
- Bruit < 1 photons /TC possible (surface/ Top/flux résiduel)
- BW peut excéder GHz $\rightarrow \Delta_{TOF} < 100$ ps

■ Mode comptage de photon

- $T_{op}=80-150$ K
- BW > 100 MHz, $D_{TOF} < 1$ ns
- Multi-écho (en fonction du format)

■ 2D/3D

- Pas 15 μ m, grand format
- Deux échos max (en fonction du pas)
- Seul de déclenchement 1 – 10 photons \rightarrow comptage de photon
- BW < GHz $\rightarrow \Delta_{TOF}$ min 100 ps
 - En fonction de la sensibilité

■ Compatible $T_{op} \sim 200$ K !

■ Multi-mode thermique/2D/3D

leti

LABORATOIRE D'ÉLECTRONIQUE
ET DE TECHNOLOGIES
DE L'INFORMATION

CEA- Leti
MINATEC Campus, 17 rue des Martyrs
38054 GRENOBLE Cedex 9
Tel. +33 4 38 78 36 25

www.leti.fr



Merci de votre attention

