

CAPACITÉ SPECTROSCOPIQUE DES DÉTECTEURS INFRAROUGES

- **Développements des photodiodes et photo-détecteurs infra-rouge au CEA/Leti vers Lynred**
 - Contexte
 - Activités R&D au CEA/Leti
 - Objectives et enjeux
- **Figures de mérites pour les détecteurs IR pour la spectroscopie**
 - Mise en perspectives des développements en cours au CEA pour la spectroscopie
- **Conclusion et perspectives**

Contexte du Développement des détecteurs IR au CEA/Leti et Lynred

L'objectif du développement au CEA/Leti des détecteurs est principalement technologique :

- Optimisation de la performance, format et fonctionnalité des détecteurs

Des imageurs opérationnelles sont commercialisés par Lynred

- Détecteurs (imageurs) standardisés pour les applications sécurité défense
- Détecteurs pour les applications spatiales
- Quelques détecteurs pour des applications scientifiques (détection large bande spectrale)

Le développement des détecteurs avec des nouvelles fonctionnalités ont motivés la mise en place d'une capacité de réalisation de prototype opérationnelle avec électronique de proximité au CEA/Leti (afin de favoriser leur industrialisation...)

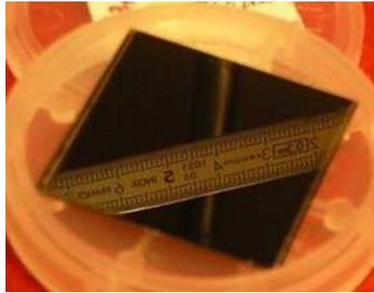
- Imageurs à grand format
- Imageurs actifs lasers (à base des APDs CdHgTe)
- Détecteurs à haute résolution temporelle et haute sensibilité à base des APDs CdHgTe
- ...

Développement des détecteurs IR (CdHgTe...) au CEA/Leti vers Lynred

Croissance substrat (CdZnTe)

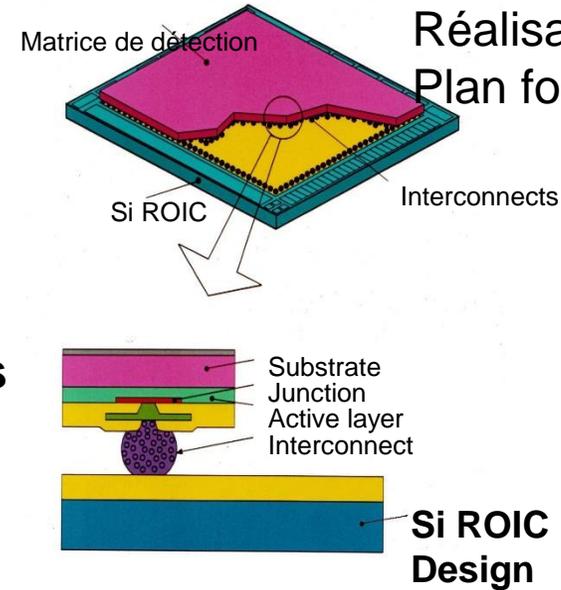


Croissance épitaxiale de la couche active (EPL/EJM-CdHgTe)



Procédés de fabrications diodes (en salle blanche)

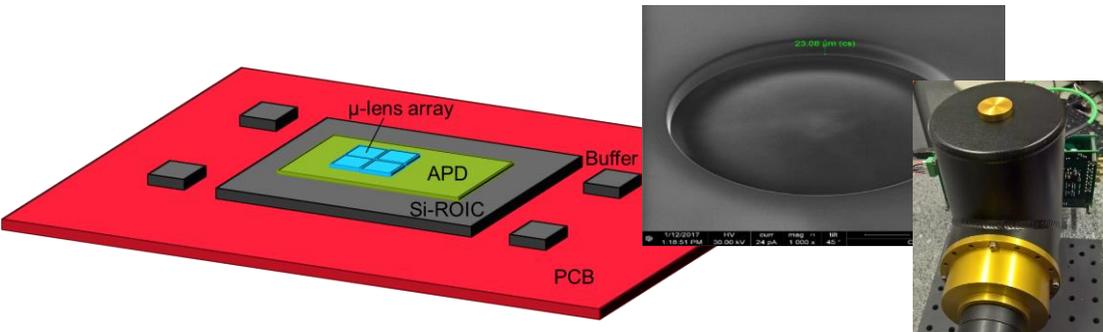
Détecteur à résolution spatiale : imageurs



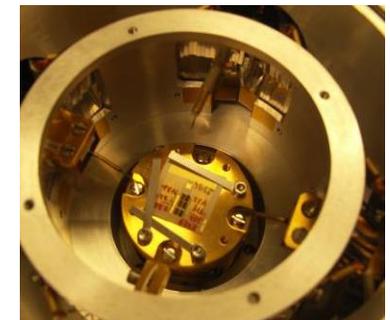
Hybridation diode avec CL CMOS
Ou réseau d'interconnexion

Détecteur à résolution temporelle

Fort bande passante > GHz
Surface optique active (μ -lens)
APD : Très haute sensibilité



Test électro optique Semi-cond. au perf FPA : réponse spatiale, réponse spectrale, bruit

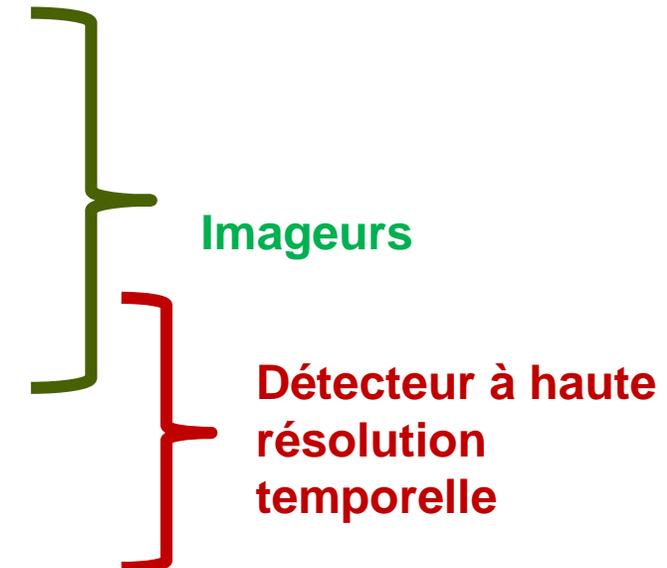


- **Objectives de l'activité**

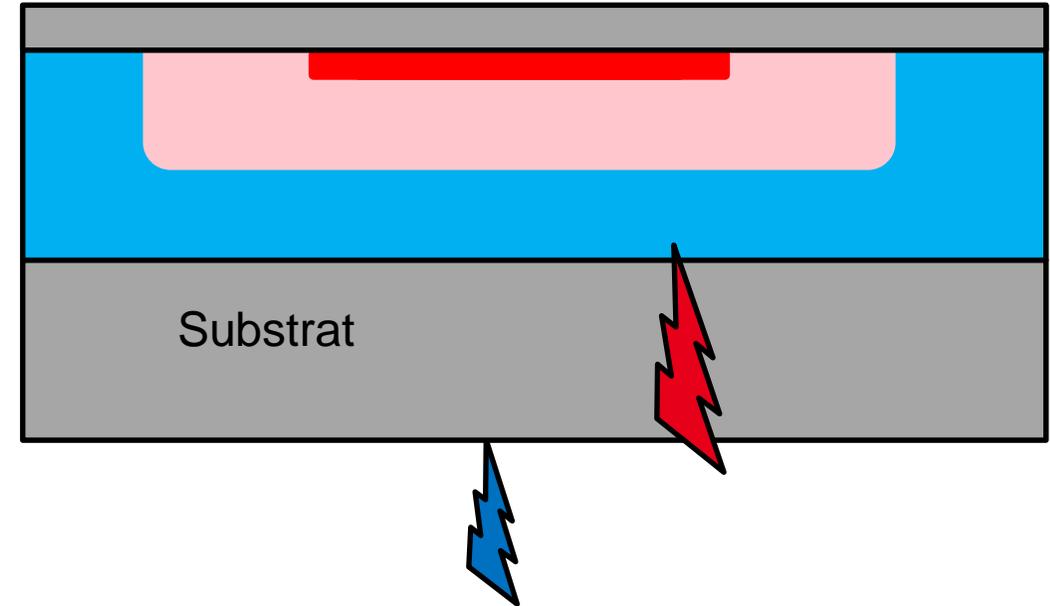
- Développer des imageurs infra-rouges afin de répondre aux besoins d'indépendance de la France pour les applications défenses et spatiales, en collaboration avec LYNRED
 - Partenariats/projets avec DGA, CNES, ESA, H2020
- Développer et/ou rendre les technologies nouvelles disponible pour répondre à d'autres enjeux sociétaux
 - Astrophysique : H2020 ALFA , FOCUS interferro
 - Environnement : H2020 HOLDON LiDAR atmosphérique (gaz d'effet de serre, LiDAR vent...)
 - Optique quantique : Carnot QPIC CEA
 - Santé : ...?

- **Les enjeux**

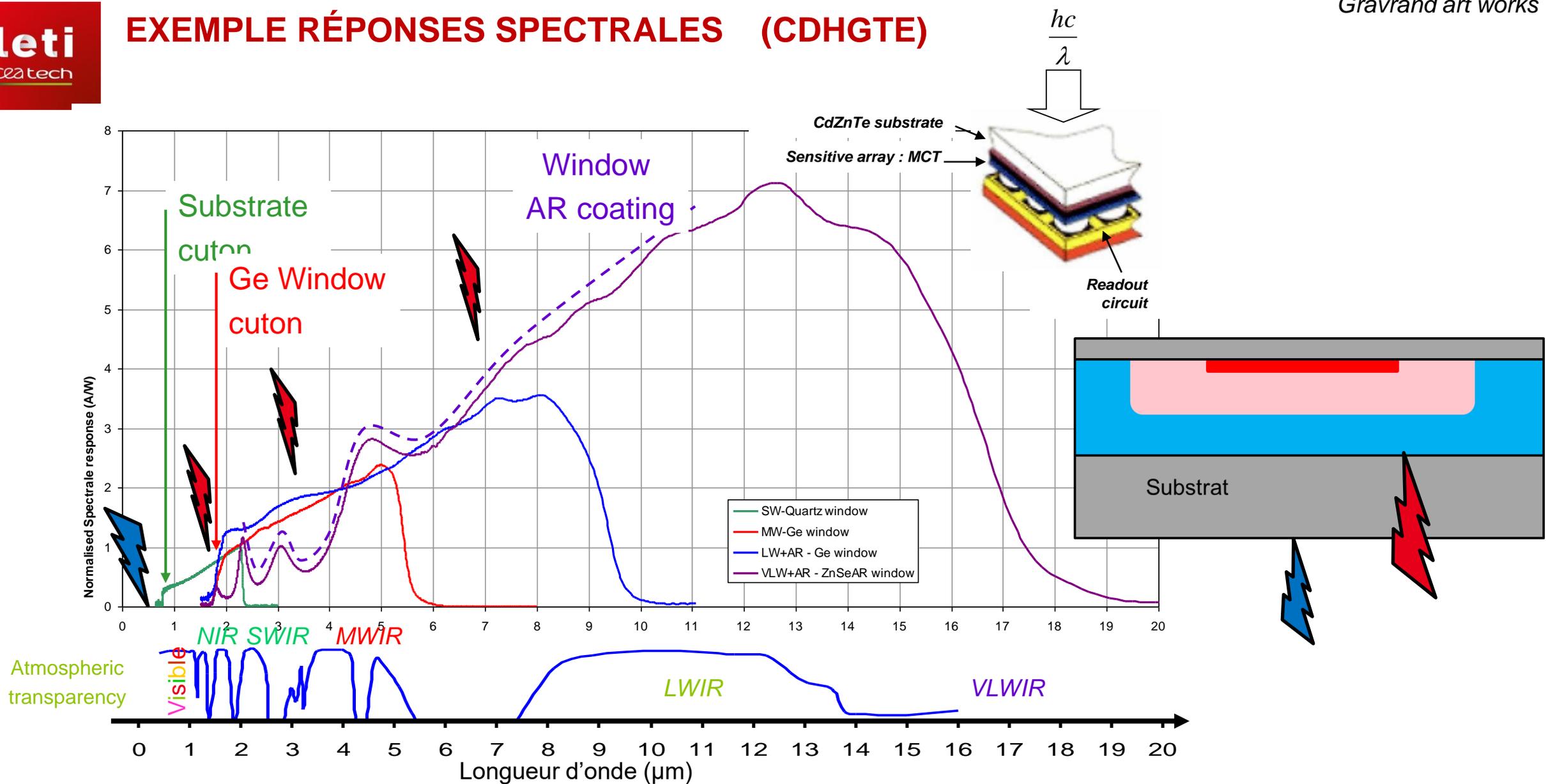
- Matériaux **II-VI (HgCdTe)** et III-V
- Format → 2000x2000
- Pas des pixels → 5 μm
- Température de fonctionnement → 100-150 K
- Qualité image → stabilité de la réponse et du bruit des diodes
- Réponse spectrale
- Fonctionnalisation optique
- Photodiode d'avalanche
 - Gain d'avalanche maximale avec excès de bruit minimale
 - Réponse temporelle → 10 GHz avec gain d'avalanche maximale



- **Réponse spectrale**
 - Réponse du détecteur en fonction de la longueur d'onde
- **Réponse spatiale**
 - Nombre et pas de pixel
 - Cross talk entre les pixels
- **Résolution temporelle**
 - Temps de réponse de la photo-diode
 - Bande passante de l'électronique de proximité
- **Dynamique**
 - Rapport entre la saturation et le signal minimale
 - Linéarité
- **Rapport signal à bruit (SNR)**
 - Rendement quantique
 - Bruit d'obscurité
 - courant d'obscurité de la diode
 - Bruit de l'électronique de proximité
 - Stabilité temporelle de la réponse/qualité image
- **Couplage optique**
 - Dispersion spatiale et/ou temporelle des λ vers les pixels

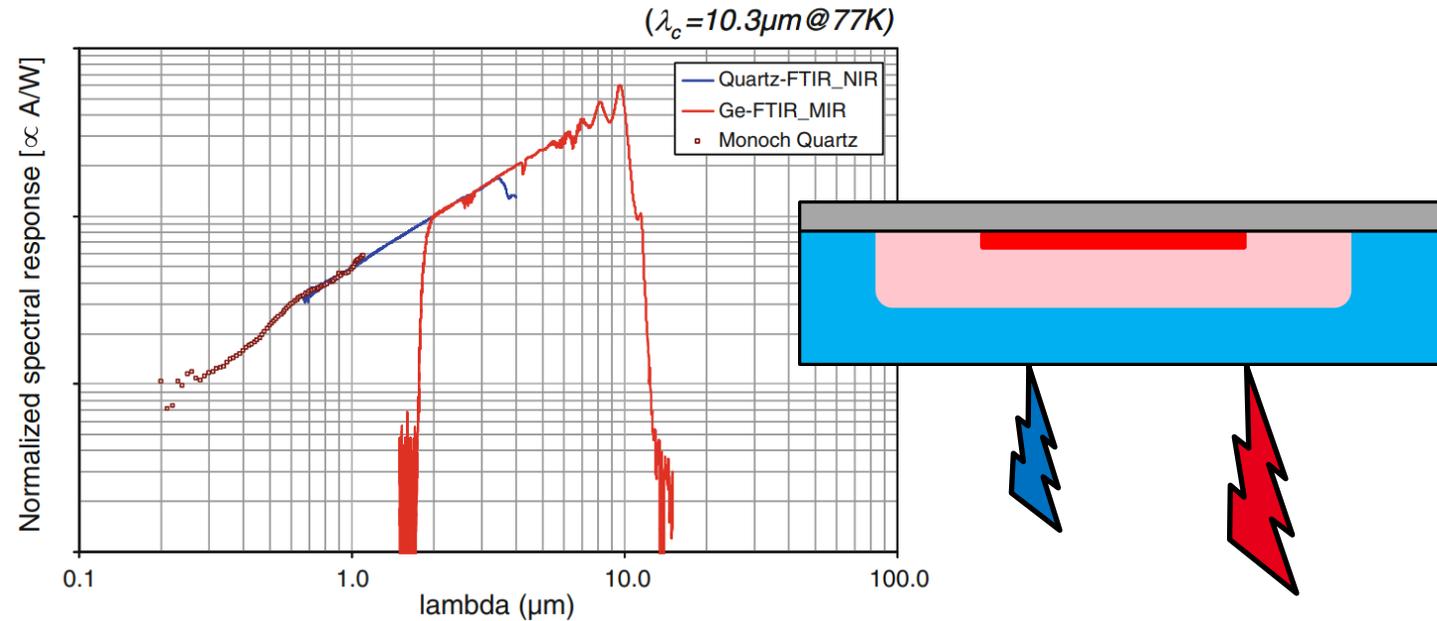
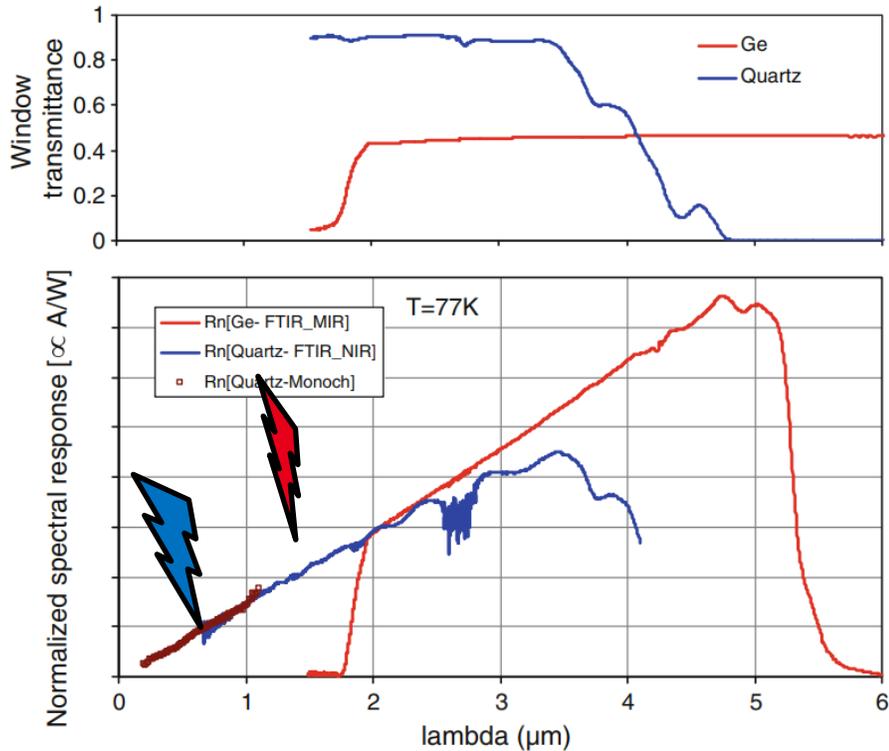


EXEMPLE RÉPONSES SPECTRALES (CDHGTE)



Le substrat ou le fenêtre peut limiter le cut-on du détecteur
Le gap du semi-conducteur limite la longueur d'onde de coupure λ_c

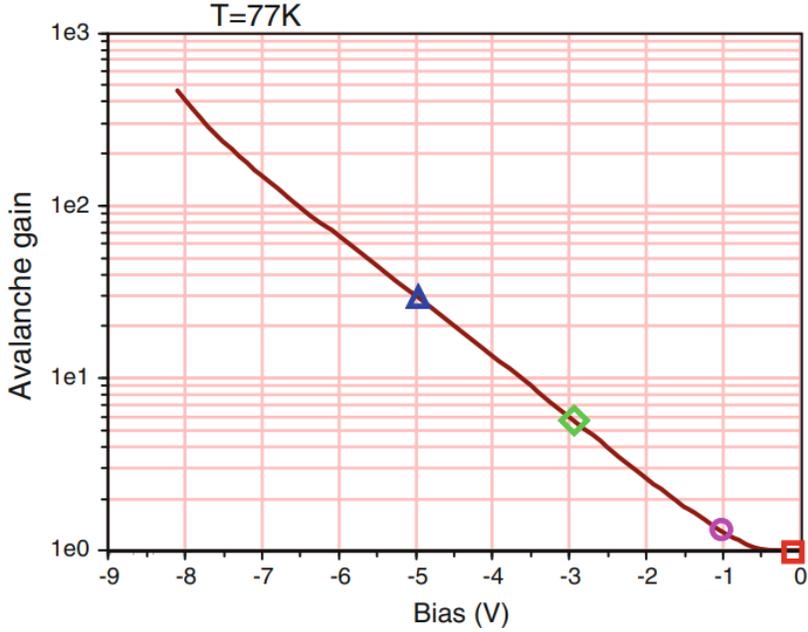
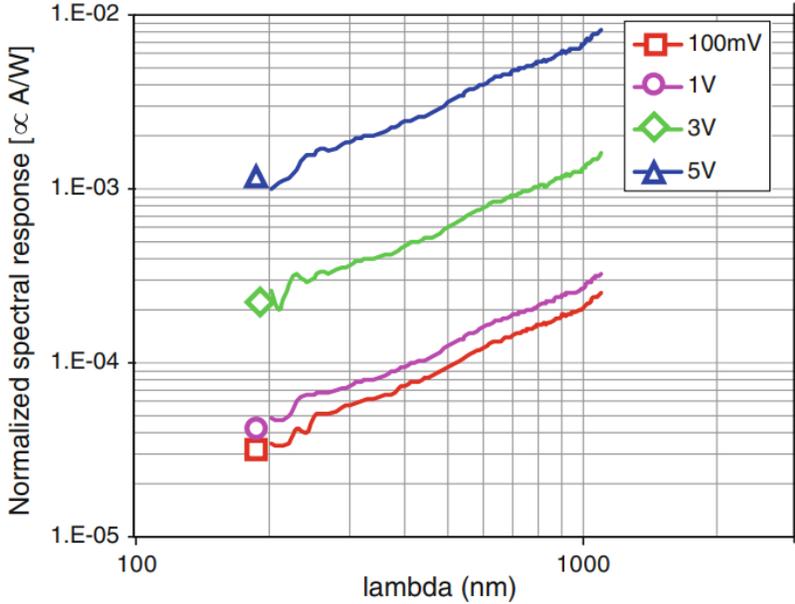
Réponse spectrale sans substrat avec les diodes CdHgTe



- Le retrait du substrat permet la détection dans l'uv : 200 nm démontré pour CdHgTe
- Le rendement quantique semble conservé
 - Besoin d'une quantification
 - la dynamique temporelle de la collection des porteurs n'a pas encore été étudiée

Perspectives : Projet H2020 HOLDON : LiDAR atmosphérique entre uv (lidar vent) et proche IR (2 μm)

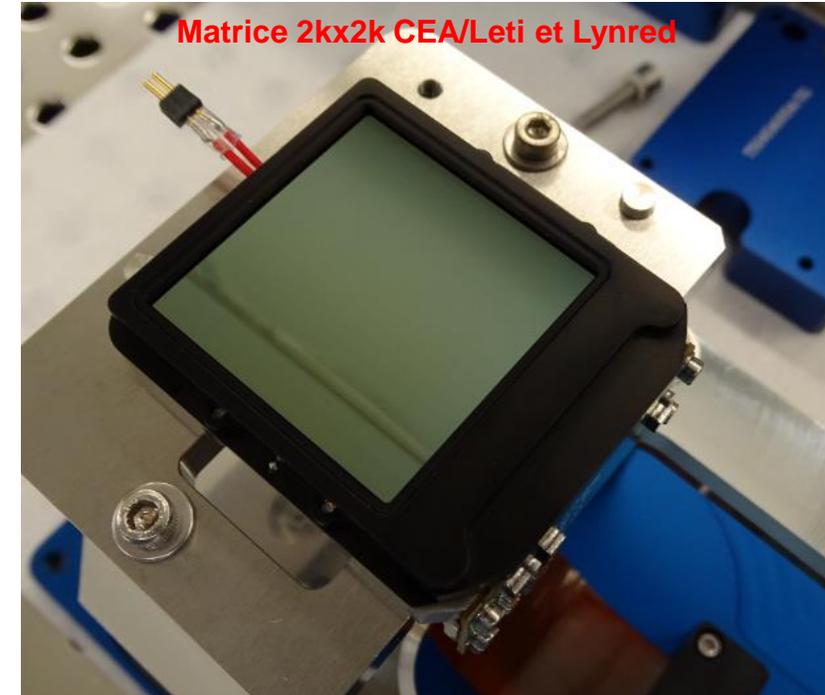
Detection dans le visible uv avec gain d'avalanche dans les APDs CdHgTe



Perspectives : Projet H2020 HOLDON : LiDAR atmosphérique entre uv (lidar vent) et proche IR (2 μ m)

Réponse spatiale

- **Nombre de pixels**
 - Production Lynred : jusqu'au 1000x1000 pixels
 - En développement : 2000x2000 (projet H2020/FOCUS)
- **Pas de pixel (CdHgTe et III-V)**
 - Production Lynred : pas de 10 μm
 - Développement en cours : 7.5 et 5 μm
 - Résolution spatiale
 - Résolution spectrale en spectroscopie dispersif
 - Réduction de cout par la réalisation de mini-matrice
- **Fonction de Transfert des Modulations (FTM)**
 - Les photodiodes CdHgTe permet de réaliser des photodiodes dans le volume (3D) à fort valeur de FTM et faible cross talk entre les pixels → avantage pour les petits pas de pixels



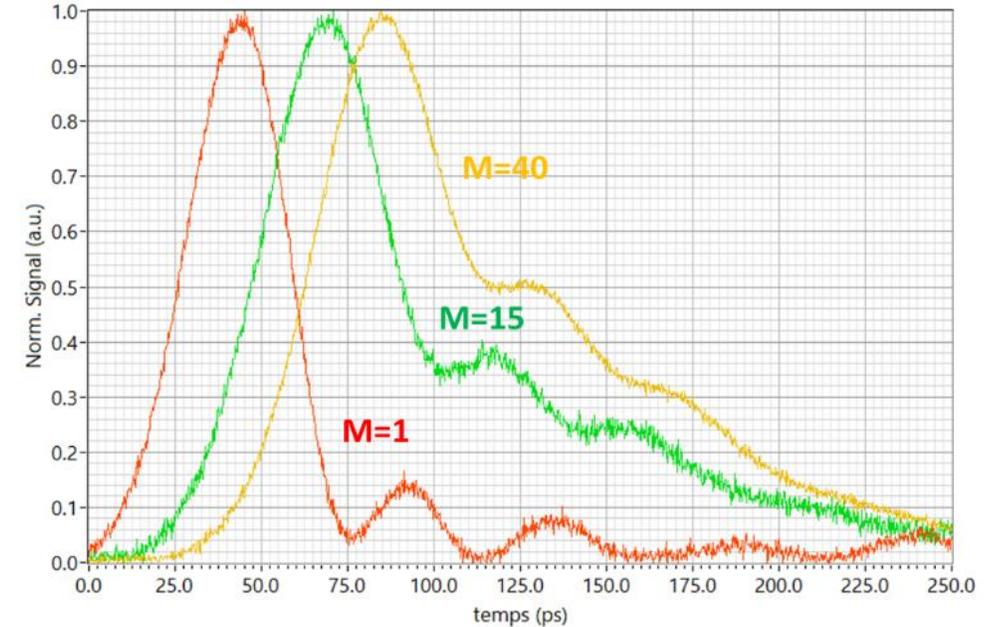
Perspectives :

- Projet Alfa/FOCUS → industrialisation des imageurs à très grand format > 1k x 1k
- Détecteur à très faible pas
 - Imageurs à grand format ~Mpixels
 - Très grand format > 2kx2k
 - Imageurs à très faible taille et cout → spectroscopie multi spectral à imagerie active

Résolution temporelle

- **L'augmentation de la résolution temporelle permet d'augmenter la capacité de résoudre un variation temporelle de l'information**
 - Télécommunication dans l'espace libre
 - LiDAR à haute résolution spatiale
 - Interférométrie directe
 - Traitement d'information quantique
 - Relaxations des excitations pour des applications matériaux, chimique et biomédical...

Bande passante dans un APD CdHgTe à T=300 K



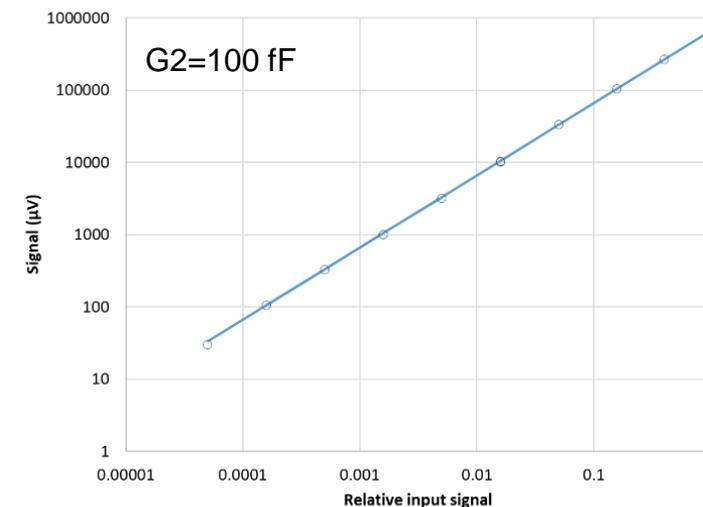
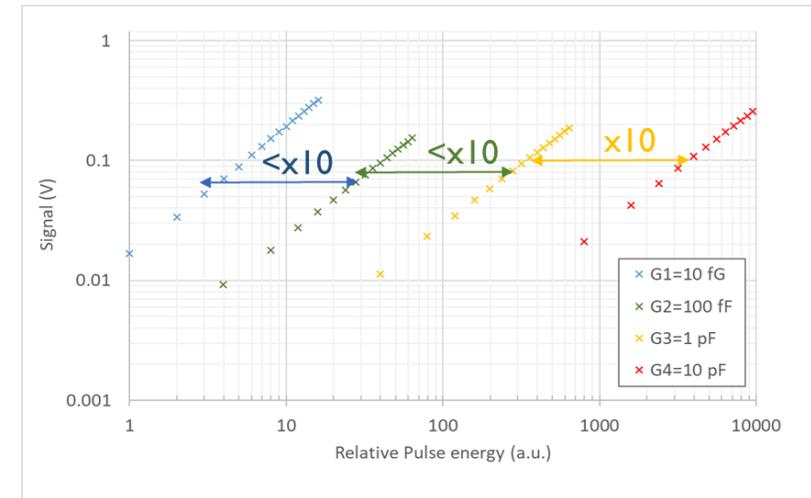
Perspectives :

- Mynaric → 10 GHz avec un gain APD M=100
- ESA, Focus interféro → Comptage de photons à 1 GHz sur plusieurs pixels
- QPIC → Comptage de photons avec une couplage directe entre l'APD et un PIC
- Photoluminescence IR avec résolution temporelle
 - Durée de de vie des porteurs dans les semi-conducteurs (carto-graphie)
 - Relaxation d'excitations thermique pour la chimie et les application biomédicale

Dynamique de détection

- Un grand nombre des méthodes de mesures requièrent une réponse linéaire sur une grande amplitude de signal d'entrée →
 - Une réponse très linéaire des photodiodes et l'électronique de proximité
 - Les photodiodes tendent à être très linéaire sauf pour des très forts flux : limitation due à la résistance série dans le substrat
 - L'électronique de proximité présente des non-linéarités pour les faibles et les forts signaux et est souvent limitant
 - Un grand rapport entre la saturation et le signal minimale (limité par le bruit du détecteur)

Linéarité du détecteur HOLDON

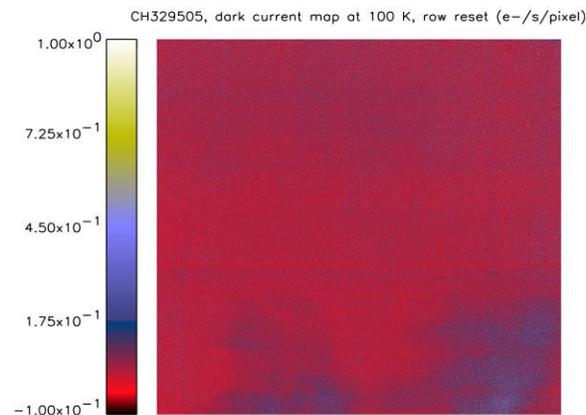


Perspectives :

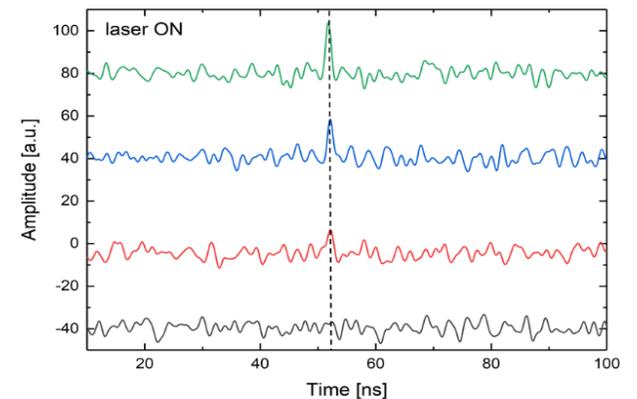
- Projet H2020 HOLDON : LiDAR atmosphérique entre UV (lidar vent) et proche IR ($2 \mu\text{m}$) à très haute dynamique > Linéarité sur au moins 6 ordres de grandeurs

- Rendement quantique → 80-99 % en CdHgTe (plus faible en III-V)
- Bruit d'obscurité
 - Courant d'obscurité de la diode
 - Dépend de λ_c et la température. Est très faible à basse température et faible λ_c
 - Développement des technologie à haute température de fonctionnement afin de réduire le cout du packaging
 - Réduction du temps d'observation/intégration → détecteurs à haute résolution temporelle
 - Bruit de l'électronique de proximité
 - Dépend de l'architecture et de la bande passante de l'amplificateur connecté à la photodiode
 - Les photodiodes d'avalanche (APDs) permet de réduire l'influence de ce bruit par la pré-amplification du signal avant d'être dégradé par le bruit de l'amplificateur
 - Les APDs CdHgTe permet d'amplifier avec une perte très faible de l'information d'amplitude (nombre de photons) et temporelle (instant de détection)
 - Stabilité temporelle de la réponse : globalement meilleure pour les détecteurs III-V

Cartographie du courant d'obscurité sur une matrice CEA/Leti 2k x 2k* :
 Idark(peak)=0.002 e/s !



Détection des photons unique avec module APD CdHgTe* :
 BW=400 MHz
 Pin=1.5 photons/pulse
 Jitter <200 ps



- Rendement quantique → 80-99 % en CdHgTe (plus faible en III-V)
- Bruit d'obscurité
 - Courant d'obscurité de la diode
 - Dépend de I_c et la température. Est très faible à basse température et faible I_c
 - Développement des technologie à haute température de fonctionnement afin de réduire le cout du packaging
 - Réduction du temps d'observation/intégration → détecteurs à haute résolution temporelle
 - Bruit de l'électronique de proximité
 - Dépend de l'architecture et de la bande passante de l'amplificateur connecté à la photodiode

Perspectives :

- Imageur à haute température de fonctionnement et faible couts
 - Nouvelle technologie HOT (Objective de la collaboration avec Lynred)
 - Réduction du temps d'observation → Imagerie active multi spectrale
- Imageur pour l'astrophysique à grand format
- Filière de détecteur APD CdHgTe
 - Projet H2020 HOLDON : LiDAR atmosphérique entre uv (lidar vent) et proche IR (2 μm)
 - Projet ESA pour le comptage de photon
 - Carnot QPIC pour le comptage de photon avec couplage directe avec un PIC
 - Collaboration avec Mynaric

-1.00x10

20

40

60

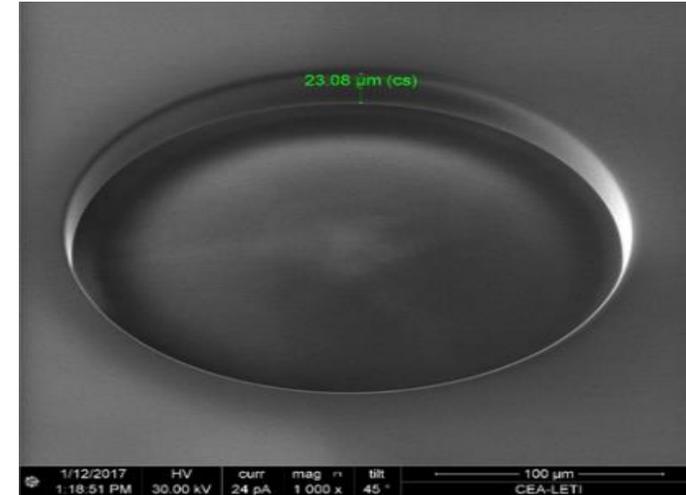
80

100

Time [ns]

- La maîtrise du couplage optique est un enjeu majeur pour optimiser la performance des diodes
 - Réponse spectrale
 - Rendement quantique
 - FTM
 - Courant d'obscurité

Microlentille pour augmenter la surface optique des détecteurs



Perspectives :

- Microlentille et matrices des microlentilles dans le substrat CZT
- Optiques free form et meta-surface optiques dans le substrat (CZT) : réseau dispersive...
- Couplage directe avec des circuits photonique intégré (PIC)
 - Projet QPIC pour l'optique quantique
 - Projet FOUCS : interférométrie et spectroscopies au niveau d'un photon unique, avec résolution temporelle (~100 ps)
-

Detection IR pour les mesures spectroscopiques

- Les photodiodes à base de CdHgTe permettent une détection efficace sur une bande spectrale très large : uv à λ_c avec $\lambda_c=2-16 \mu\text{m}$
- Ces détecteurs sont développés à Grenoble (CEA et Lynred) pour répondre à une objective d'indépendance de la France pour des applications stratégiques (la défense, observation spatiale)
 - Technologie performant mais à fort cout qui limite l'usage de cette technologie pour certains applications
- **Des développements sont cependant en cours pour mettre à disposition cette technologie pour des applications scientifiques**
 - Détecteur standard Lynred à plus haute température , faible pas($\rightarrow 5\mu\text{m}$) et/ou grand format ($\rightarrow 2\text{kx}2\text{k}$)
 - Nouvelles opportunités pour la spectroscopie
 - Imageur de très grand format (2kx2k) et/ou très faible courant d'obscurité
 - Détecteur APDs pour faire de la spectroscopie au niveau d'un photon unique
 - LiDAR
 - PLD, Spectroscopie IR résolue en temps...
 - **Détecteur à faible taille et cout pour les applications d'imagerie active laser type QCL**
 - Faible temps d'observation afin d'augmenter la température de fonctionnement et réduire aussi le couts de packaging et l'encombrement des détecteurs
 - **Fonctionnalisation optique des détecteurs**
 - Microlentilles, optique free form...
 - **Couplage directe avec PIC** pour les applications quantique, astro et..spectroscopique



This work has been made with
the support from

ANR FOUCS



CNES

**The European Union's Horizon
2020 research and innovation
programme**

Mynaric Lasercom GmbH



DGA (French MOD)

Leti, technology research institute
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Minatec Campus | 17 avenue des Martyrs | 38054 Grenoble Cedex | France
www.leti-cea.com

