

# Apport de l'optique-photonique dans l'observation de l'Univers. *Présentation du LabEx FOCUS*

Fabien Malbet, directeur du LabEx FOCUS

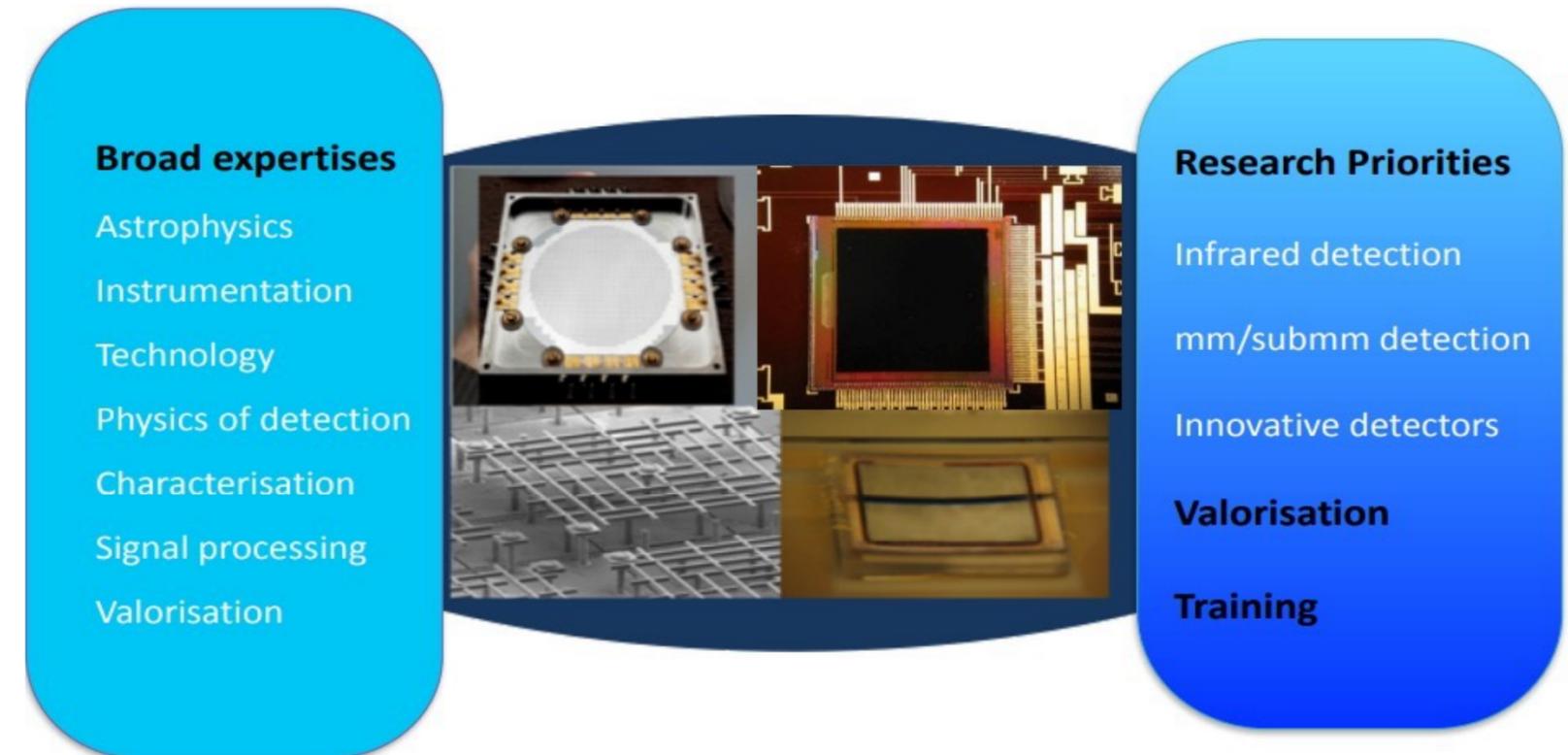
Journée thématique MINALOGIC « Optique-Photonique et spatial »  
Grenoble, jeudi 5 septembre 2024

**LabEx**  
**FOCUS**  
Focal Plane Array for Universe Sensing

## Systemes de détection avancés pour l'exploration de l'univers

Développer de nouvelles générations de détecteurs aux meilleures performances pour les observations astronomiques, à la limite de la sensibilité, plus rapides, sur de plus larges bandes spectrales, ou offrant de nouvelles fonctionnalités.

- **Science fondamentale ↔ Technologie**  
Besoin critique de fortes collaborations interdisciplinaires
- **Recherche ↔ Industrie**  
Besoin d'une structure formelle et de financement pour assurer un lien fort avec l'industrie
- **Grands programmes internationaux**  
Incontournables pour la préparation des futurs grands instruments des agences nationales et internationale



**ASTROPHYSIQUE · INSTRUMENTATION · TECHNOLOGIES SPATIALES · TECHNOLOGIES DE LA DÉTECTION**

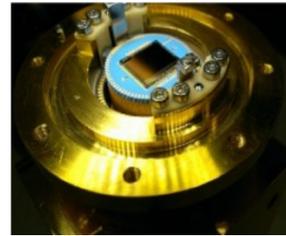


# LabEx FOCUS: un laboratoire hors les murs sur la détection

Détecteurs, électronique, caractérisation, traitement de signal, exploitation astrophysique

Une activité ancienne et basée sur la détection au sens large

2008



## Détecteurs RAPID

ONERA, IPAG, LAM, CEA-LETI & Lynred  
en lien avec ESO

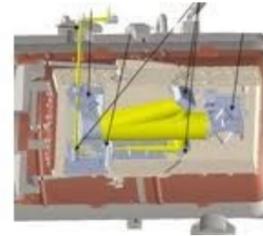
Matrice e-APD 320x255 pixels  
(30µm) avec son électronique

Application:

- analyseur de front d'onde (OA)
- suivi de franges (interférométrie)

FOCUS 1

2012



## INTRAPIX & NEAT/Theia

ONERA, CEA-Saclay, IPAG  
en lien avec ESA

Caractérisation de profils de pixels

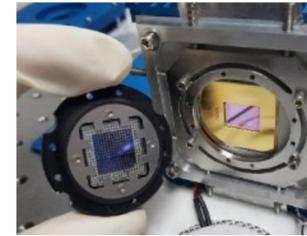
Application:

- caractérisation du détecteur d'ARIEL
- Astrométrie à très haute précision

FOCUS 2

2020

LabEx FOCUS



## Spectro miniaturisée

IPAG, ONERA, LTM  
en lien avec Airbus, ESA,...

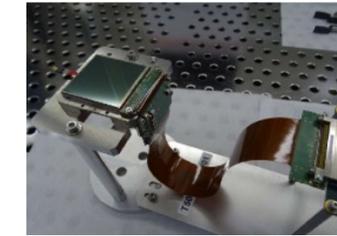
Spectroscopie sur le détecteur

Application:

- Caractérisation CO2 (Nanocarb)
- Spectroimagerie (ImSpoc)
- Spectroscopie de Fourier (SWIFTS)

FOCUS 3

2025



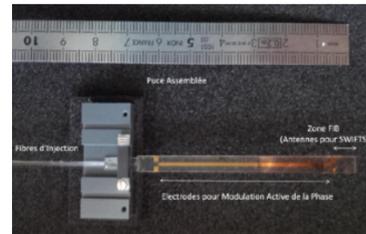
## ALFA

CEA-LETI, Lynred, CEA-Saclay, IPAG & ONERA  
en lien avec l'ESA

Matrice IR grand format 2k x 2k avec son électronique

Application:

- Suivi sol de la mission SVOM
- Détecteur spectro HR exoplanètes



## Couplage détecteurs optique guidée

IMEP-LAHC, IPAG

Spectro à très haute résolution

Application: Spectro MIR, interférométrie



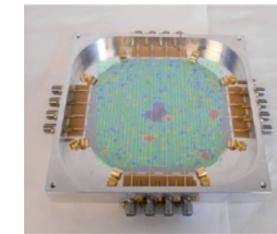
## Détecteurs submm

CEA-Irfu + CEA-LETI

Spectro-imagerie dans les plans focaux

Application:

- Observation milieu interstellaire
- Fonctionnalités dans le pixel



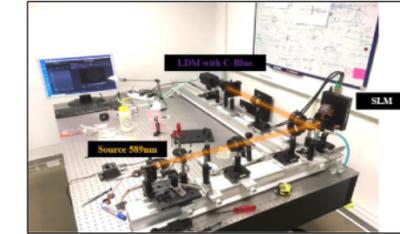
## KIDS et NIKA 2

Néel, LPSC, IRAM, IPAG & LAM

Matrice KIDS de 1000 pixels

Application:

- CONCERTO sur APEX
- Fond cosmologique et effet SZ



## Senseurs front d'onde

LAM, ONERA

Optique adaptative à très hauts ordre

Tech : Spatial Light Modulators mirror

Enseignement & formation



## Stages FOCUS à l'OHP

Stage master (novembre) et stage ingénieur & post-doc (juin)

3 organisateurs (ONERA, IPAG, CEA-Saclay); 10-12 intervenants (IPAG, LAM, ONERA, CEA-Irfu, Obs. Lyon, CEA-LETI)

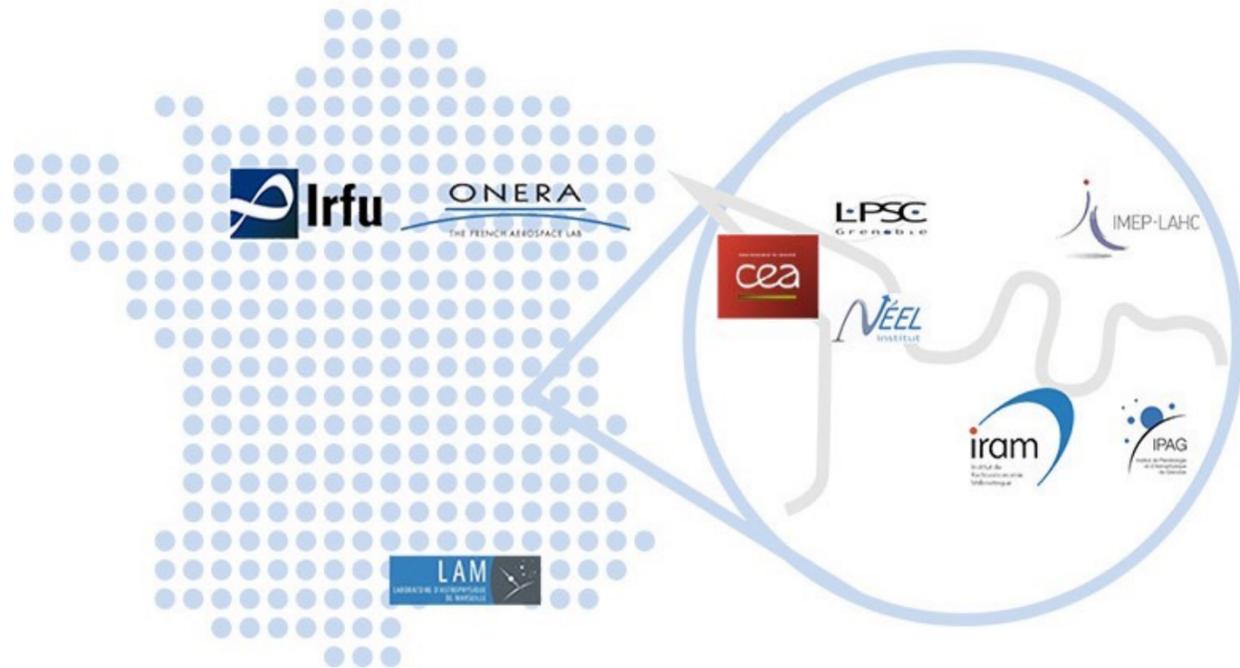
230 personnes formées en 16 stages depuis 2013;

Formation Institut d'Optique Graduate School



# Positionnement national et international

Partenaires privilégiés

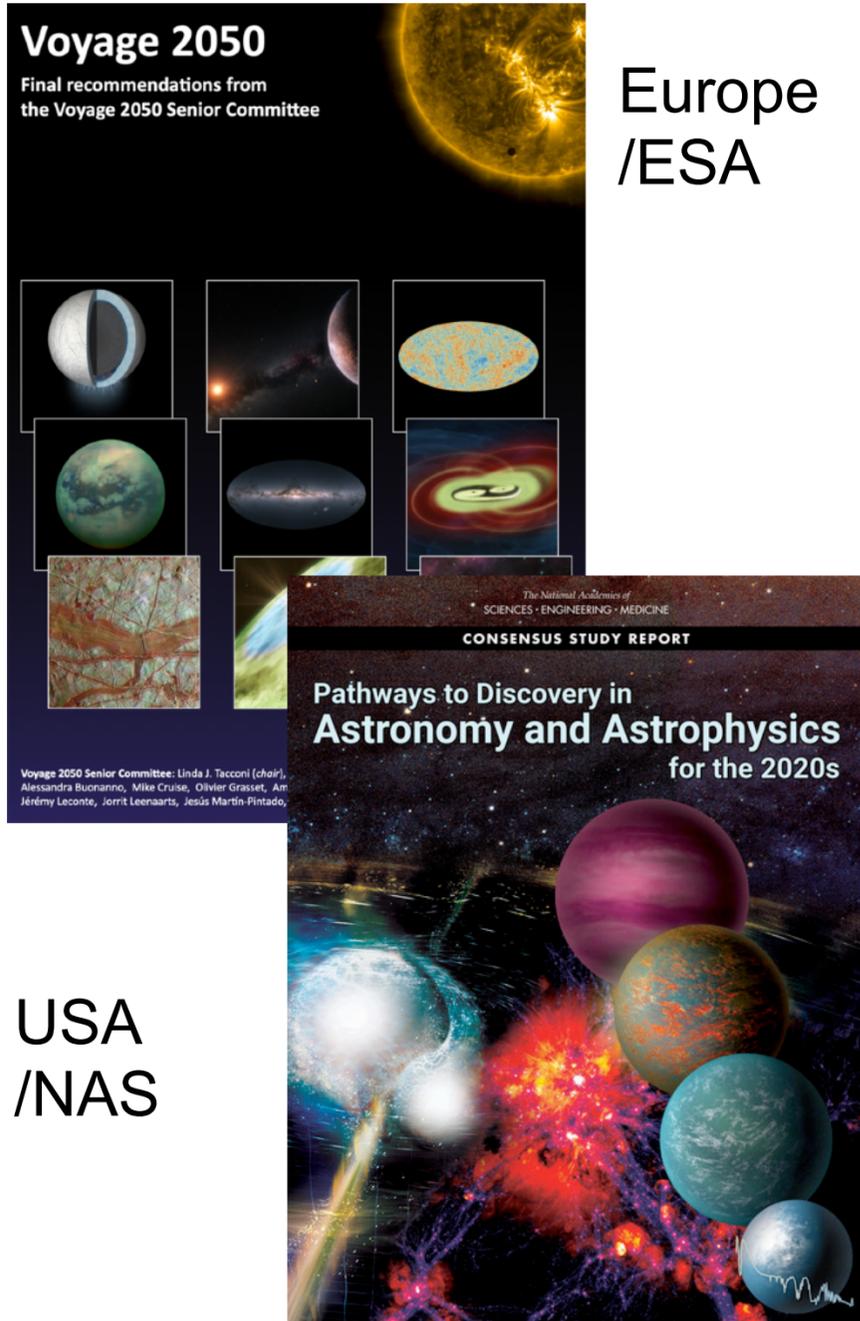


↕ Idex UGA ↕



# Objectifs FOCUS 3 (2025-2032) : thématiques astrophysiques

*Basés sur les prospectives des agences spatiales*



Europe  
/ESA

L'ESA a identifié des domaines scientifiques :  
(1) les lunes des planètes géantes,  
(2) **des exoplanètes tempérées à la Voie lactée** et  
(3) **de nouvelles sondes physiques de l'Univers primitif**.

Ces deux derniers thèmes suscitent des exigences scientifiques et des développements technologiques intéressant la communauté FOCUS.

## Caractérisation d'exoplanètes

imagerie/interférométrie/astrométrie,  
haut contraste, extrême précision

- ➔ capacités d'imagerie directe,
- ➔ bruit extrêmement faible
- ➔ dynamique très élevée
- ➔ visible, NIR, 8-18 $\mu$ m

## Distorsions du fond diffus cosmologique

mesure précise de la polarisation ;  
spectroscopie  $R \sim 1000$  précise pour mesurer  
les distorsions spectrales

- ➔ contrôle des systématiques
- ➔ mesure de la polarisation au niveau pixel
- ➔ capacités spectroscopiques au niveau pixel
- ➔ refroidissement

*Et aussi : planétologie avec par extension les études environnementales et la formation des étoiles et des planètes.*

# Enjeux technologiques ouverts que souhaite aborder FOCUS 3

*Et organisation*

## Les enjeux identifiés par la communauté FOCUS pour FOCUS 3 :

1. Comment augmenter la capacité en pixels pour atteindre une compacité d'instrument compatible avec les opérations spatiales et/ou la production de masse ?
2. Comment traiter le signal photonique au mieux avant qu'il n'atteigne le détecteur ?
3. Comment améliorer l'environnement thermique du système de détection en terme de stabilité et l'autonomie ?
4. Comment pouvons-nous optimiser nos systèmes de lecture, à la haute fréquence requise, de sorte que le bruit associé soit minimal, que le budget de puissance reste gérable et que les capacités du détecteur soient exploitées au mieux ?
5. Comment packager la puce du capteur et le circuit de lecture pour permettre l'intégration de la fonction optique aussi près que possible du pixel ?

## Organisation en 4 axes

Axe 1 : détecteurs à courte longueur d'onde (SWD)

Axe 2 : détecteurs à grandes longueurs d'onde (LWD)

Axe 3 : mise en forme du signal et environnements des capteurs (S3E)

Axe 4 : Ruptures fondamentales et concepts novateurs (FBIC)

# Axe 1 : détecteurs à courte longueur d'onde (SWD) 1/2

Le domaine visible et infrarouge contient une mine d'informations astronomiques. Dans ce domaine, notre objectif vise à fournir :

- des matrices de détecteur avec un grand nombre de pixels,
- sur une gamme de longueurs d'onde, limités uniquement par le bruit des photons,
- en utilisant si nécessaire des cryostats pour minimiser le signal de fond provenant du rayonnement thermique indésirable ou pour atteindre leurs conditions de fonctionnement optimales.

## Détecteurs MCT à pixel unique :

- [applications LIDAR](#) : de nouveaux dispositifs peuvent être créés en assemblant et en conditionnant des composants existants (APD et amplificateurs).
- [applications quantiques](#) : les dispositifs de comptage de photons utilisant des APD offrent des voies prometteuses.
- [application en interférométrie](#) : mise en phase rapide et sensible des télescopes et l'extinction de la lumière des étoiles pour la détection des exoplanètes.

## Imageurs MCT :

- [Détecteurs APD à faible flux](#) (avec une coupure à  $2,5\mu\text{m}$ ) pour des applications spatiales et astrophysiques.
- [Matrices TDI à base d'APD](#) avec de nouvelles fonctionnalités ajoutées au circuit intégré de lecture (ROIC).
- [Spectromètre intégré](#) grâce à une double hybridation de détecteurs IR (circuits intégrés photoniques et puces optiques, MCT et circuit intégré de lecture CMOS).
- [Vers le grand format:](#)
  - travailler sur le packaging des détecteurs 'petit format' 512x640 (qui ont des performances de pointe) afin qu'ils puissent être aboutés sur chacune de leurs 4 faces,
  - ou en ajoutant à ces détecteurs de nouvelles fonctionnalités indisponibles dans les lignes de produits concurrentes.

# Axe 1 : détecteurs à courte longueur d'onde (SWD) 2/2

## Autres enjeux identifiés :

1. Le collage/décollage du détecteur MCT pour pouvoir traiter les deux côtés et fournir des fonctionnalités nouvelles et innovantes
2. le maintien d'une ligne de recherche sur d'autres matériaux que le MCT qui pourraient être moins chers ou plus simples à obtenir pourrait ouvrir des perspectives intéressantes. Des détecteurs utilisant le silicium comme substrat et non le CdZnTe sont déjà en cours de développement par d'autres laboratoires.
3. l'avènement des technologies de détecteurs à cascade quantique à très grande largeur de bande (QWIP/QCD) ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine de l'interférométrie hétérodyne astronomique pour l'imagerie des régions de formation de planètes. Cela nécessite le développement d'emballages cryogéniques ainsi que l'amélioration des performances des détecteurs.
4. un manque significatif d'alternatives en dehors des détecteurs Aquarius (Si:As Impurity Band Conduction) lorsque l'on recherche un détecteur avec  $\lambda_c \geq 12 \mu\text{m}$ . L'exploration de solutions technologiques permettant d'étendre cette longueur d'onde de coupure pourrait avoir un impact significatif sur les choix d'instrumentation

# Axe 1 : détecteurs à grandes longueurs d'onde (LWD)

A Grenoble, nous disposons de deux familles de systèmes qui tirent parti des techniques de micro-fabrication maîtrisées par les partenaires de FOCUS

- 1. Microbolomètres entièrement en silicium** qui convertissent l'échauffement d'une fine membrane induit par le rayonnement en une variation de la résistance électrique.  
CEA-LETI
- 2. Assemblage de circuits supraconducteurs micro-résonant** pour lesquels les photons incidents modifie leur impédance et leur fréquence de résonance.  
GIS KIDS (Néel-LPSC-IRAM)

## Objectifs communs

- Augmenter du nombre de pixels pour augmenter le champ de vue et l'efficacité
- Intégrer des mesures polarimétriques et spectroscopiques dans ou près des pixels
- Développer des installations de mesure pour les matériaux et les dispositifs dans la gamme THz, en particulier à très basse température (K ou sub-K).

## Objectif spécifique à la technologie des micro-bolomètres sur silicium

- Optimisation pour la bande 350  $\mu\text{m}$  et opérations au sol.
- Développement de systèmes "spectro sur puce".
- Expansion vers la gamme millimétrique et création de plans focaux plus grands.
- Découplage du capteur des circuits électroniques pour des raisons thermiques.
- Refroidissement actif localisé.

## Objectif spécifique à la technologie KID

- Conception de grandes matrices LEKID (8000 pixels).
- Polarimétrie hors puce pour le CMB.
- Extension de la spectroscopie sur puce pour couvrir jusqu'à 300 GHz.
- Développement de plans focaux hyperspectraux (HYPKID) pour la cosmologie.

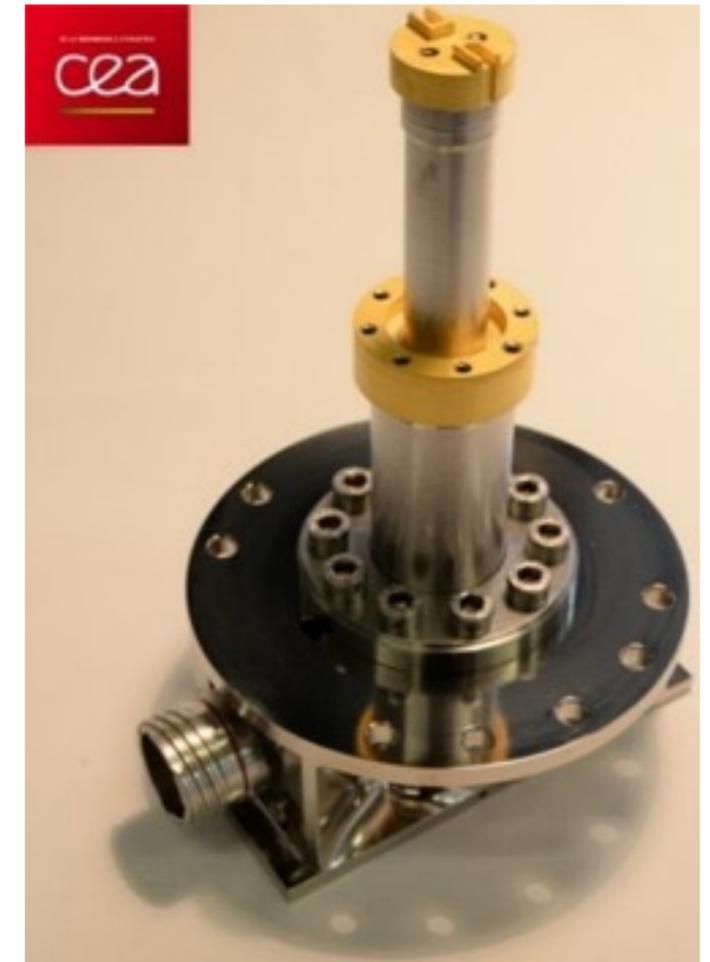
## Exploration des applications du domaine spectral THz :

- Détection de gaz;
- Application à la géophysique
- Développement d'un système d'imagerie dans les longueurs d'onde THz basé sur la rectification optique (ORTI).

# Axe 3 : Mise en forme du signal et environnements des capteurs (S3E)

## Développements en cours ou potentiels en cryogénie du CEA-SBT pour des détecteurs

1. À une température intermédiaire (2K-20K), développements en cryogénie au CEA-SBT pour des détecteurs de petits refroidisseurs à 2K (tube à gaz pulsé + Joule Thomson) pour des détecteurs à comptage de photons pour des applications potentielles à la spectroscopie infrarouge résolue dans le temps.
2. Dans la gamme 30K-150K,
  - des cryostats spéciaux ou personnalisés avec la disponibilité de refroidisseurs à deux étages qui peuvent atteindre de basses températures (environ 30 K)
  - de très petits refroidisseurs avec une très faible consommation pour cubesat (150K-250K) avec des performances et coût compétitifs en tenant compte des problèmes d'intégration spécifiques.



## Héritage de la microélectronique

Dans le domaine visible, il est possible de développer des fonctions optiques près du plan focal : filtres ou des métasurfaces, en adaptant les technologies de la microélectronique (gravure RIE, lithographie en échelle de gris, sub-micro structuration de la surface) afin de fournir un ensemble de composants micro-optiques intégrés à base de silicium.

L'objectif est d'intégrer plusieurs fonctions optiques (filtrage, interféromètre, lentille, masque de blocage) dans le même composant en silicium, afin de couvrir l'ensemble de la puce avec des motifs à l'échelle du pixel avec une précision nanométrique.

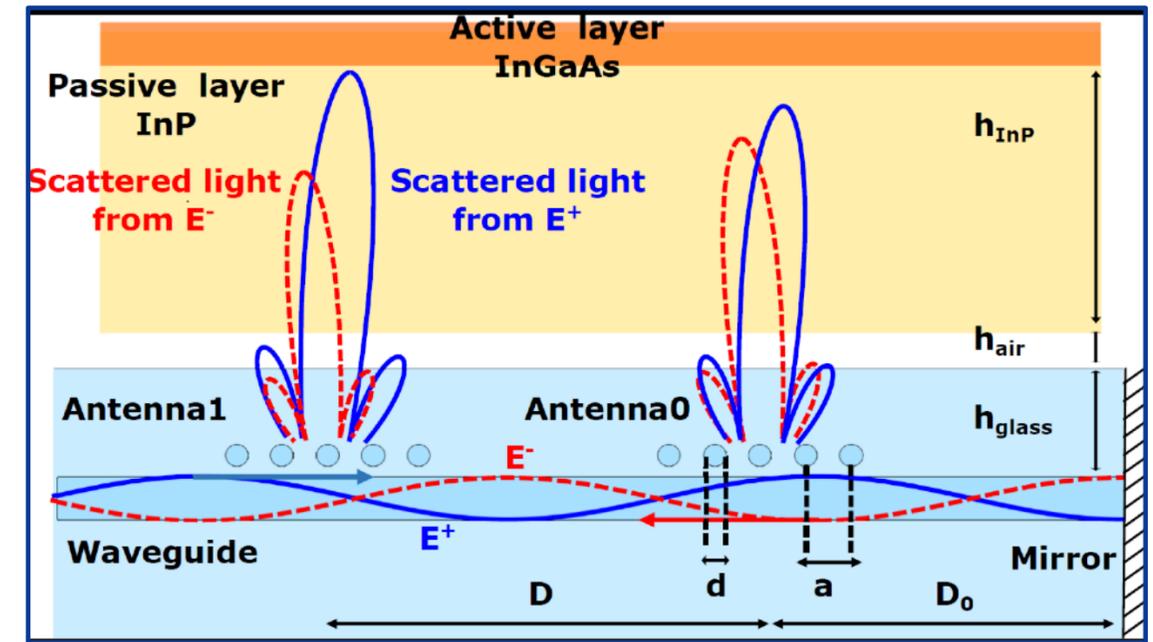
## Caractérisation des systèmes de détection

# Axe 4 : Ruptures fondamentales et concepts novateurs (FBIC) 1/3

Deux domaines déjà actifs ou prévus dans FOCUS 2 que nous considérons comme importants à poursuivre dans FOCUS 3 :

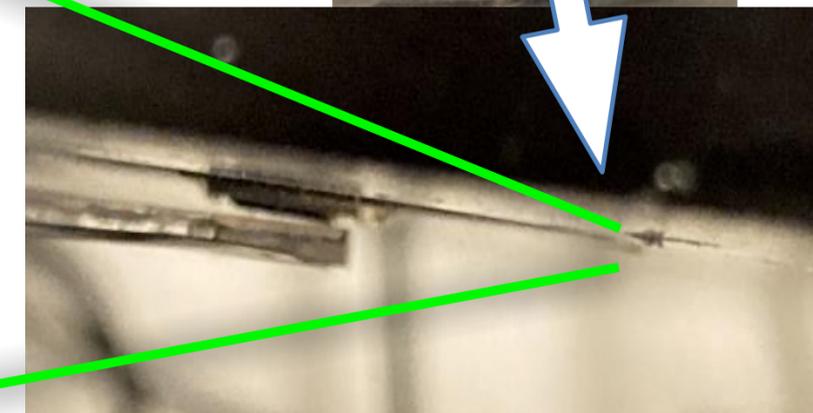
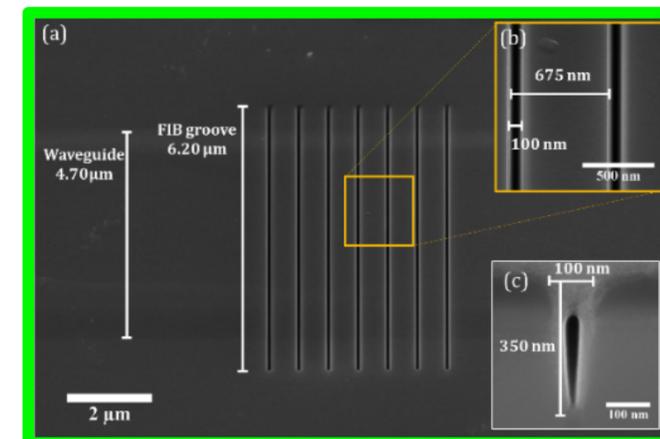
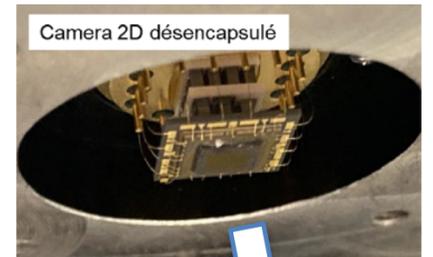
## - la détection autour du composant SWIFTS

- Pour les détecteurs SWIFTS, en installant des réseaux de nano-antennes là où elles sont nécessaires, afin d'extraire efficacement le signal à échantillonner de manière directive, nous pouvons augmenter l'intelligence du détecteur.
- Nous pouvons également réduire **le volume du spectromètre, assembler le détecteur avec le guide dans une seule unité compacte, sans optique relais**, et nous appuyer davantage sur les technologies d'optique intégrée (CROMA, TEEM photonics, PTA...).
- En développant les premiers composants de spectromètre à très haute résolution spectrale et à forte valeur ajoutée, nous pensons pouvoir proposer une instrumentation légère pour des applications embarquées (drones, satellites).



*Besoin de pouvoir approcher de la zone active pour assurer la superposition des faisceaux diffractés par le réseau de nano-antennes  
→ Eviter les bondings en face avant, les fenêtres, ou zones passives trop épaisses*

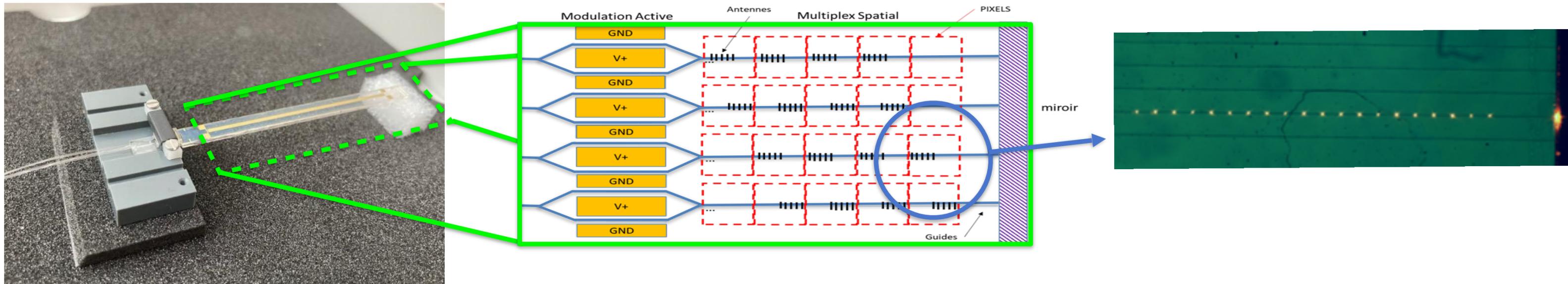
Détecteur à assembler avec le guide



Réseaux de nano-antennes

## Axe 4 : Ruptures fondamentales et concepts novateurs (FBIC) 2/3

- Nous pouvons envisager des applications à grande vitesse en augmentant les capacités de modulation de phase avec des composants actifs pour balayer les franges à très haute fréquence en parallèle avec le développement de détecteurs rapides.
- Nous favorisons l'utilisation de l'optique intégrée sur niobate de lithium en maintenant un partenariat avec FEMTO ST et en mettant en place une hybridation des détecteurs APD du CEA avec des puces optiques.



Capacités de modulation de phase avec des composants actifs (électro-optique)  
→ Optique intégrée sur niobate de lithium (partenariat avec FEMTO ST)

# Axe 4 : technologie de ruptures et concepts novateurs (FBIC) 3/3

## Hybridation des détecteurs APD du CEA avec des puces optiques.

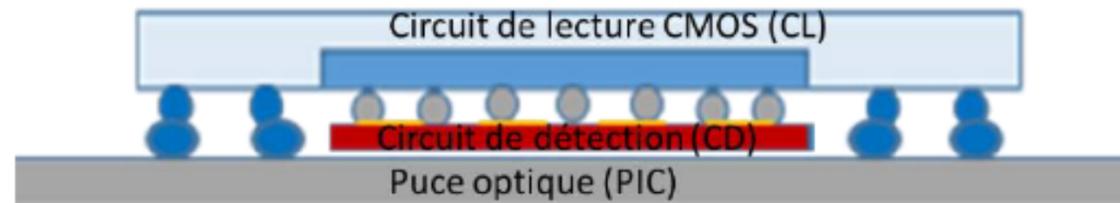
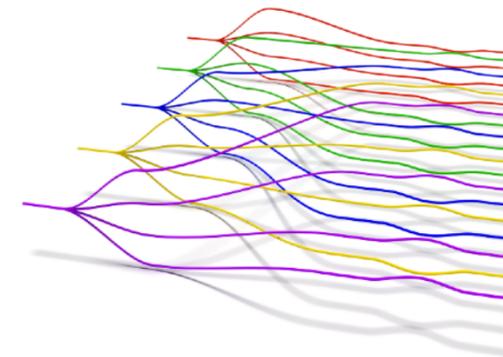
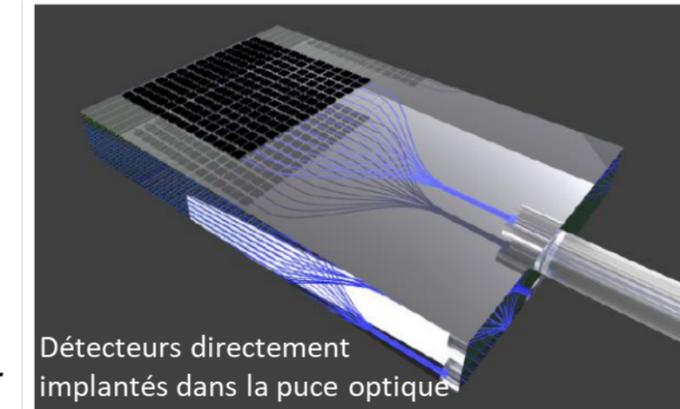


Illustration d'un assemblage d'un détecteur CdHgTe, constitué d'un circuit de détection (CD) hybridé à la fois sur un circuit de lecture en CMOS (CL) et sur une puce optique (PIC)

## Les circuits intégrés 3D photoniques (3D PIC).



Fabrication par photo-inscription laser



- Les systèmes d'imagerie interférométrique basés sur des circuits intégrés 3D photoniques (3D PIC) devraient réduire la taille des systèmes d'imagerie à haute résolution angulaire embarqués.
- L'utilisation de PIC 3D pour les systèmes d'imagerie hyperspectrale a débuté dans le cadre de FOCUS 2. L'objectif de FOCUS 3 est de développer un réseau de guides d'ondes 3D structuré par un laser ultrarapide à l'intérieur d'un échantillon de verre afin de réaliser les interférences optiques entre les flux de lumière provenant d'un réseau 2D de lentilles couvrant le plan de la pupille.
- Le premier concept de démonstration du système d'imagerie interférométrique sera dans le SWIR ( $\sim 1,5 \mu\text{m}$ ) et sera étendu aux bandes visibles. Ce travail pourrait s'inscrire dans le cadre d'une collaboration entre l'ONERA et l'IPAG-UGA et faire suite aux travaux qui ont été menés conjointement, d'une part sur les PICs 2D en niobate de lithium pour les communications optiques, et d'autre part sur la reconstruction d'images à partir de données interférométriques.