

# Compact Spectrometers for Astronomy: Coupling the Detector and the Photonic Integrated Circuit

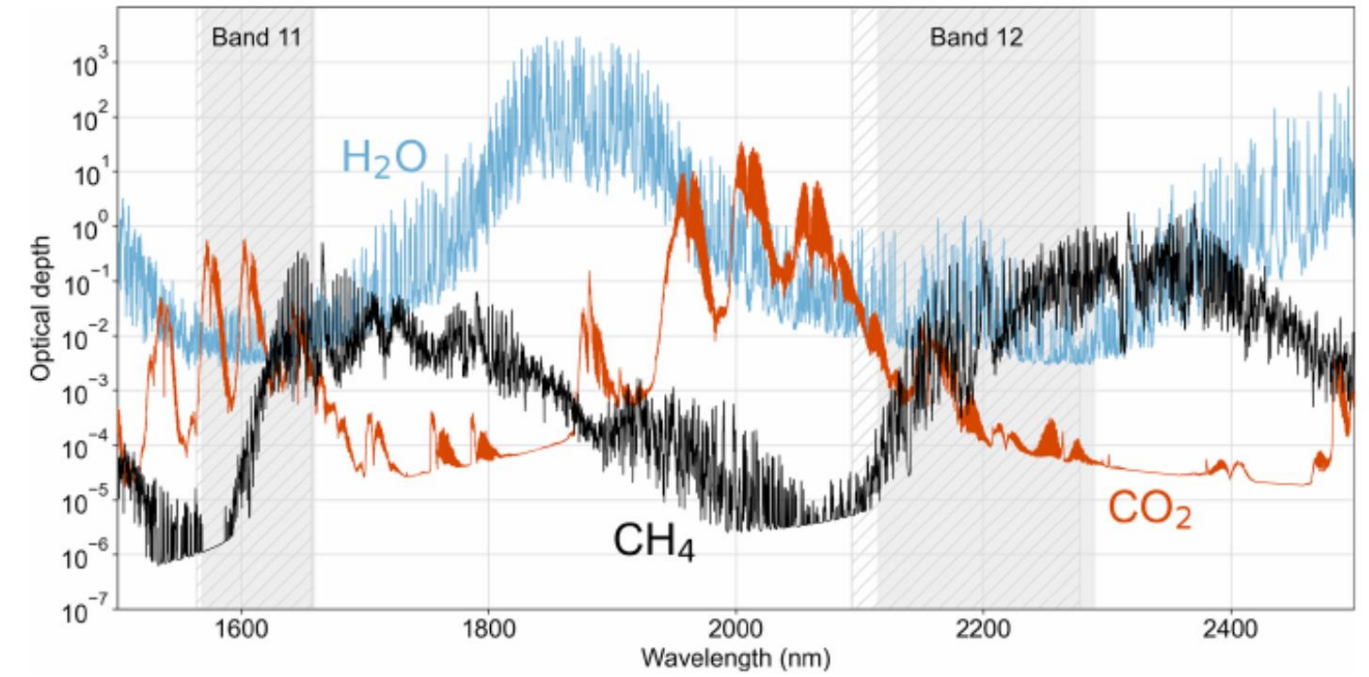
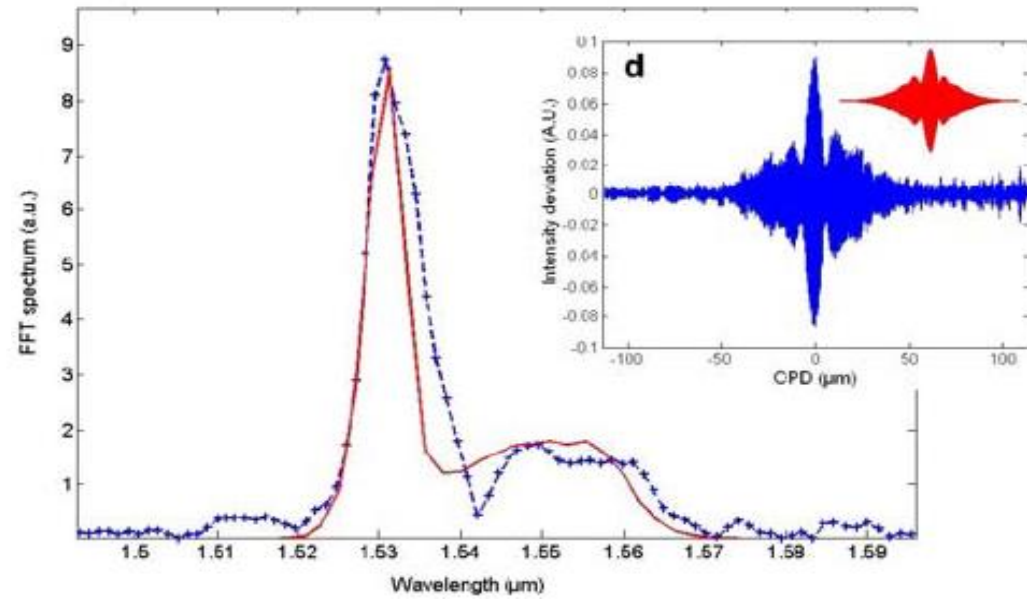
Guillermo Martin, Myriam Bonduelle, Noémie Mestre, Silvère Gousset, Roland Salut,  
Nadège Courjal, Grégory Grosa, Mohamed Irar and Alain Morand

# Motivation

-Caractérisation de Lasers Télécom (1.55 $\mu$ m)

-Monitoring Gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)

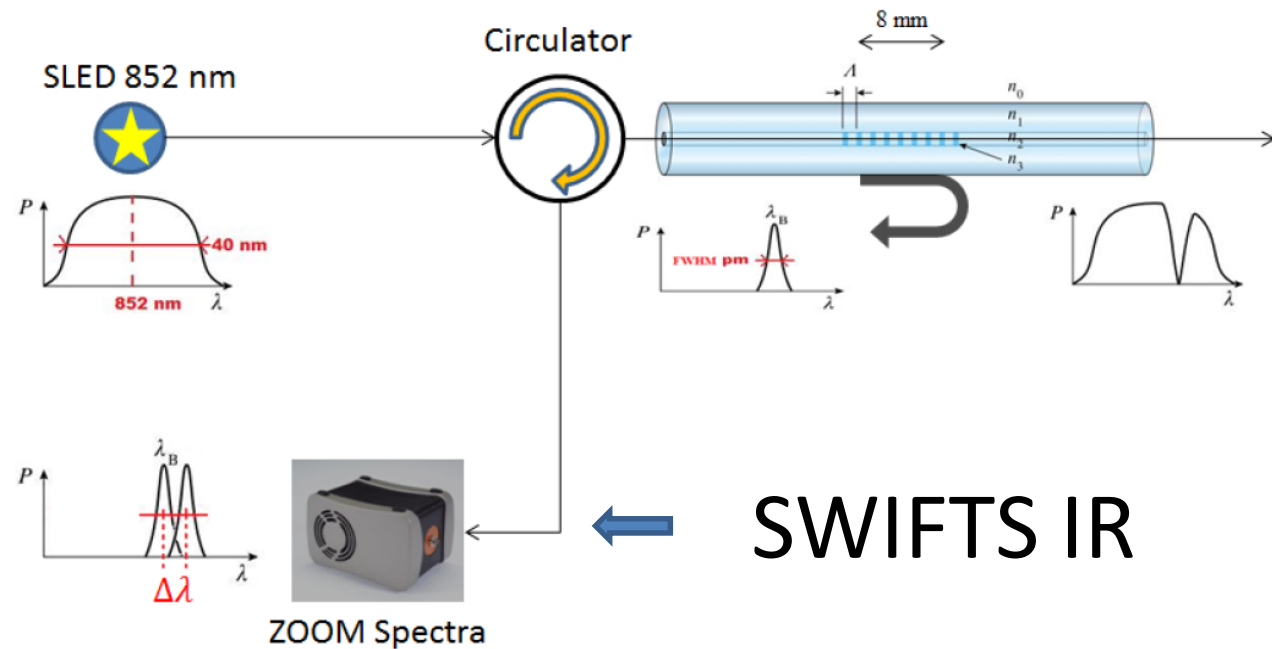
résolution demandée  
proche du pm.



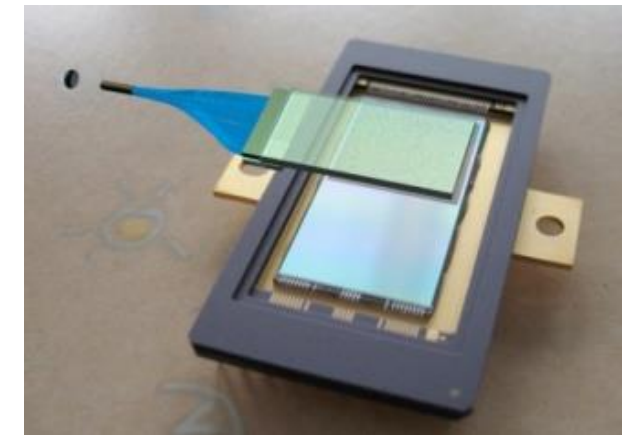
-Mesures de contraintes en genie civil:  
Réflectométrie sur Fibre de Bragg

-On veut de la résolution:  
 $R > 10000$

-et de la bande spectrale:  
 $\Delta\lambda > 100\text{nm}$



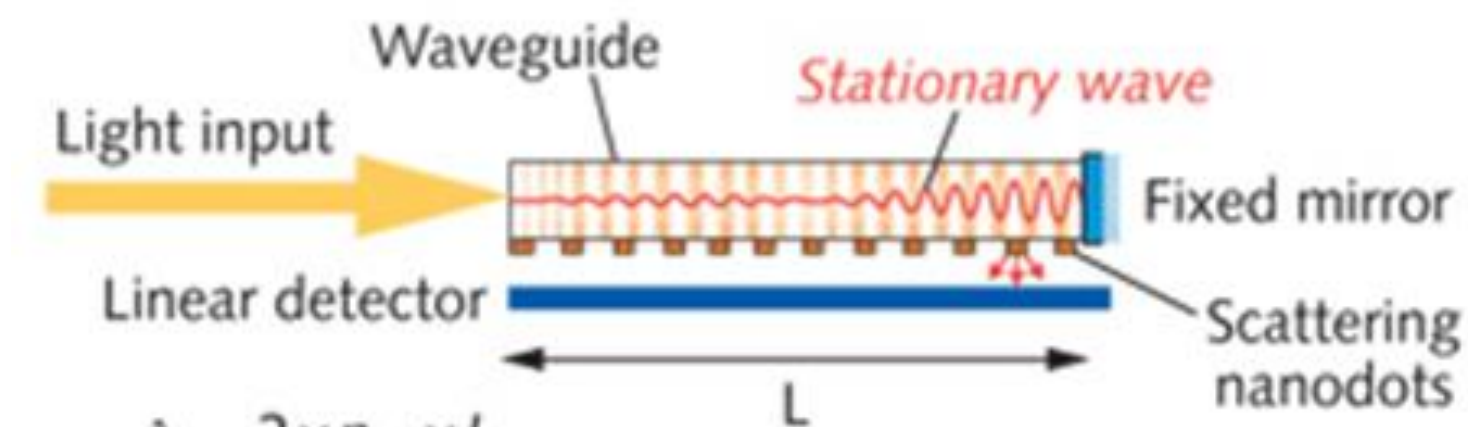
Dans un système  
compact, collé au  
détecteur



# Principe du SWIFTS

## ■ Integrated version principle

### SWIFTS spectrometer



$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2 \times n_{\text{eff}} \times L}{\lambda}$$

Période des franges:  $\lambda/(2n_{\text{eff}}) = 0,4\mu\text{m}$  pour  $n_{\text{eff}}=2$

Taille d'un pixel:  $\Lambda = 20\mu\text{m}$  soit  $\sigma_e = 0,05\mu\text{m}^{-1}$

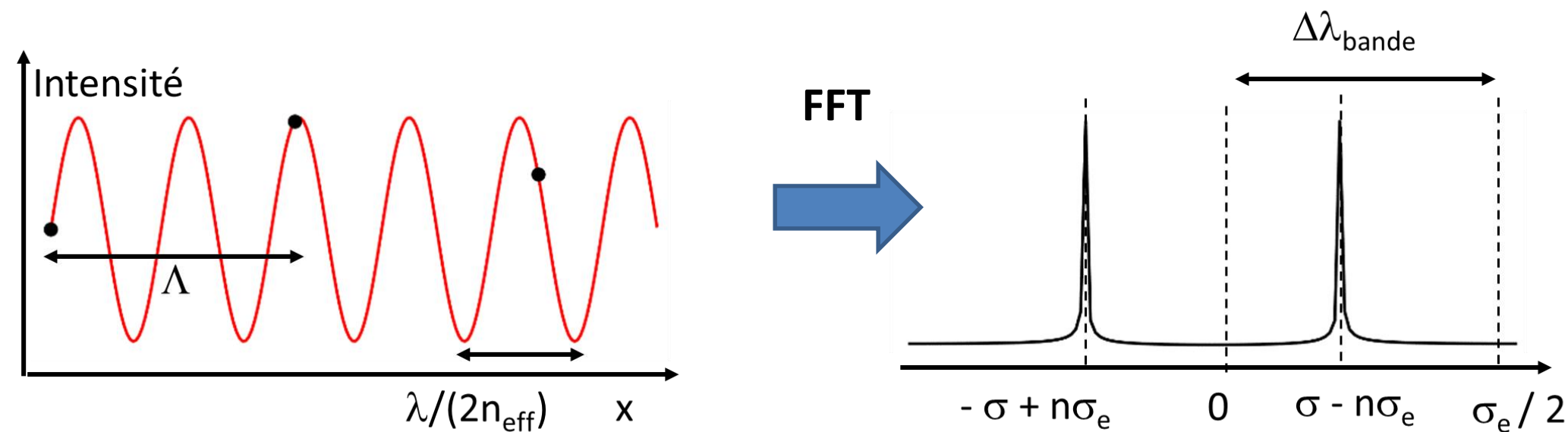
-> Shannon-Nyquist:  $\lambda/(4n_{\text{eff}}) \ll \Lambda$  -> **Sous-Echantillonnage!!!**

Pour une longueur de guide  $L = 10\text{mm}$ :

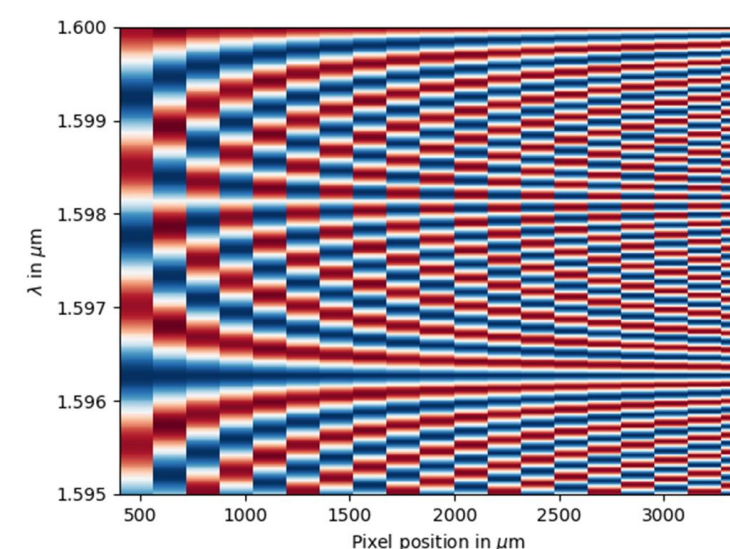
Résolution:  $R = (2n_{\text{eff}} L) / \lambda = 28000$  ou  $\Delta\lambda = 60\text{pm}$

Bande spectrale:  $\Delta\lambda_{\text{bande}} = \lambda^2 / (4 n_{\text{eff}} \Lambda) = 14\text{nm}$

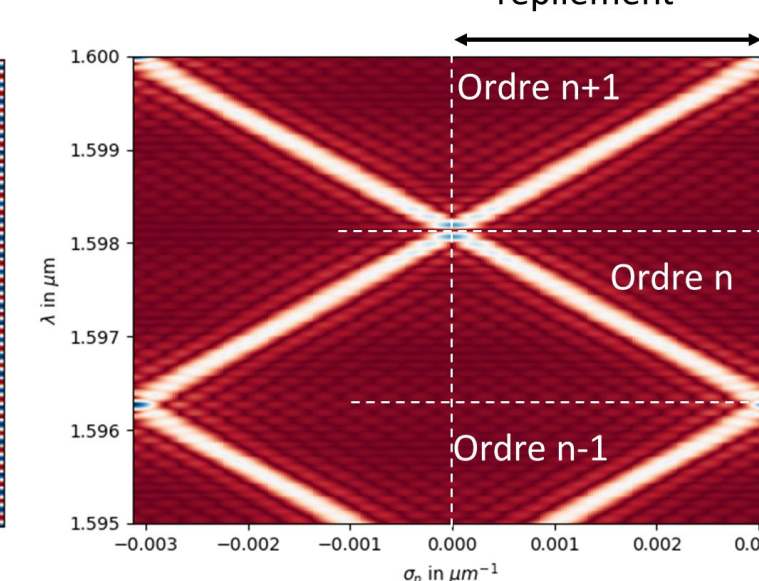
## ■ Pitch pixel $\Lambda \gg$ Période des franges $\lambda/(2n_{\text{eff}})$



$$I(\lambda_0, z) = \left[ 1 + R - 2\sqrt{R} \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_0} n_{\text{eff}}(\lambda_0) 2 \cdot \underbrace{\Delta z \cdot N_b}_{\text{position}} \right] \right]$$

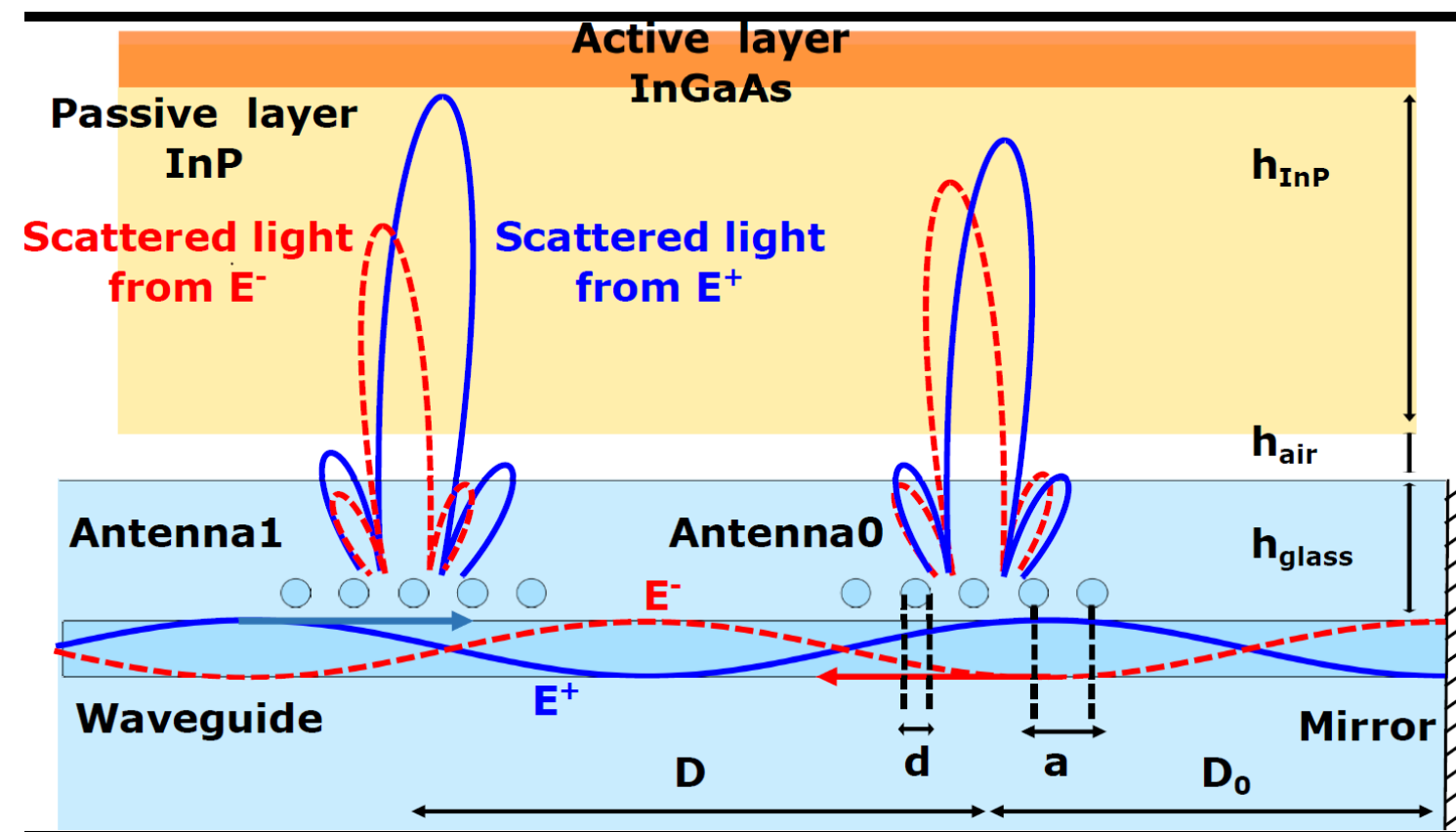


OPD = 0



# Contraintes Technologiques au niveau détecteur

- SWIFTS SWIR ou IR:
  - Zone active éloignée de la surface
  - > Détecteur au plus proche des antennes pour réduire crosstalk
  - > réseau de trous sub-longueurs d'ondes
  - Choix limité de détecteurs possibles (désencapsulation + bondings sous la surface)

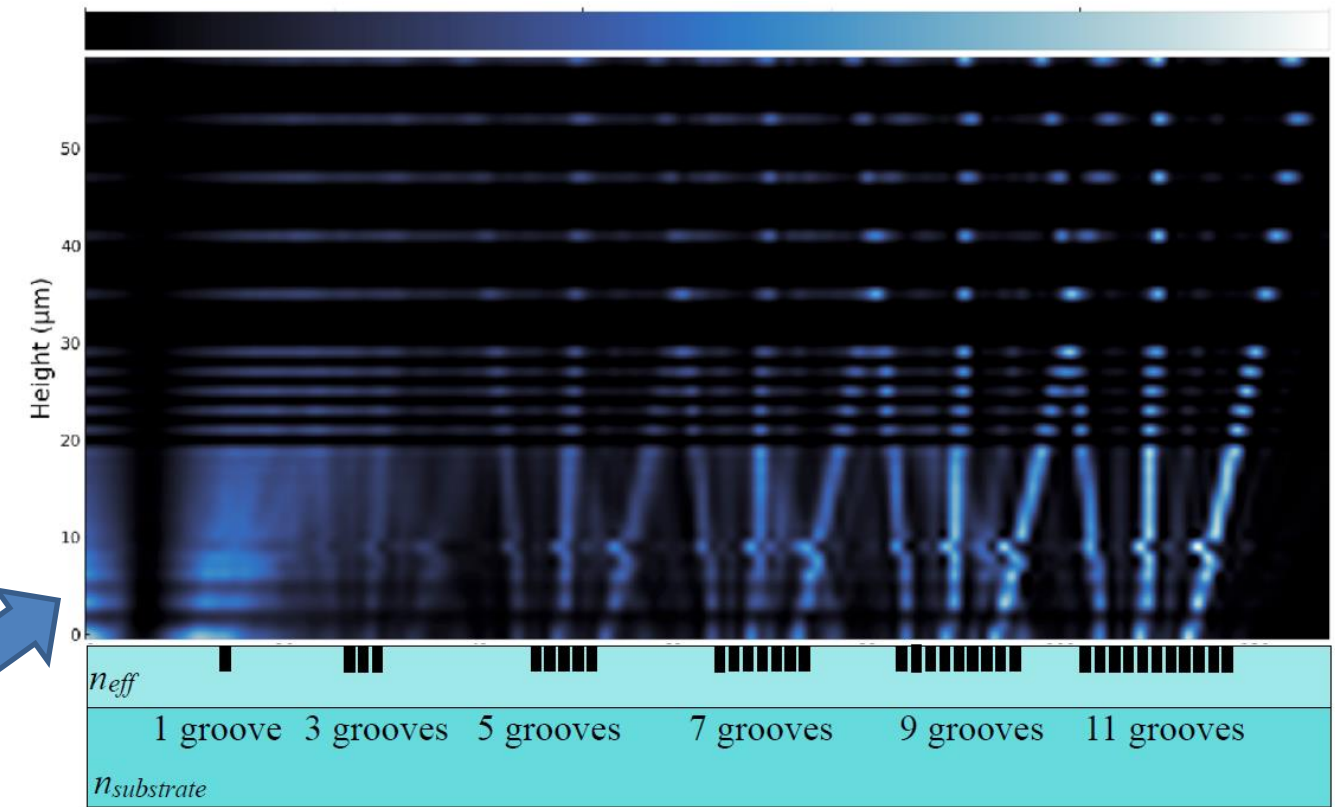
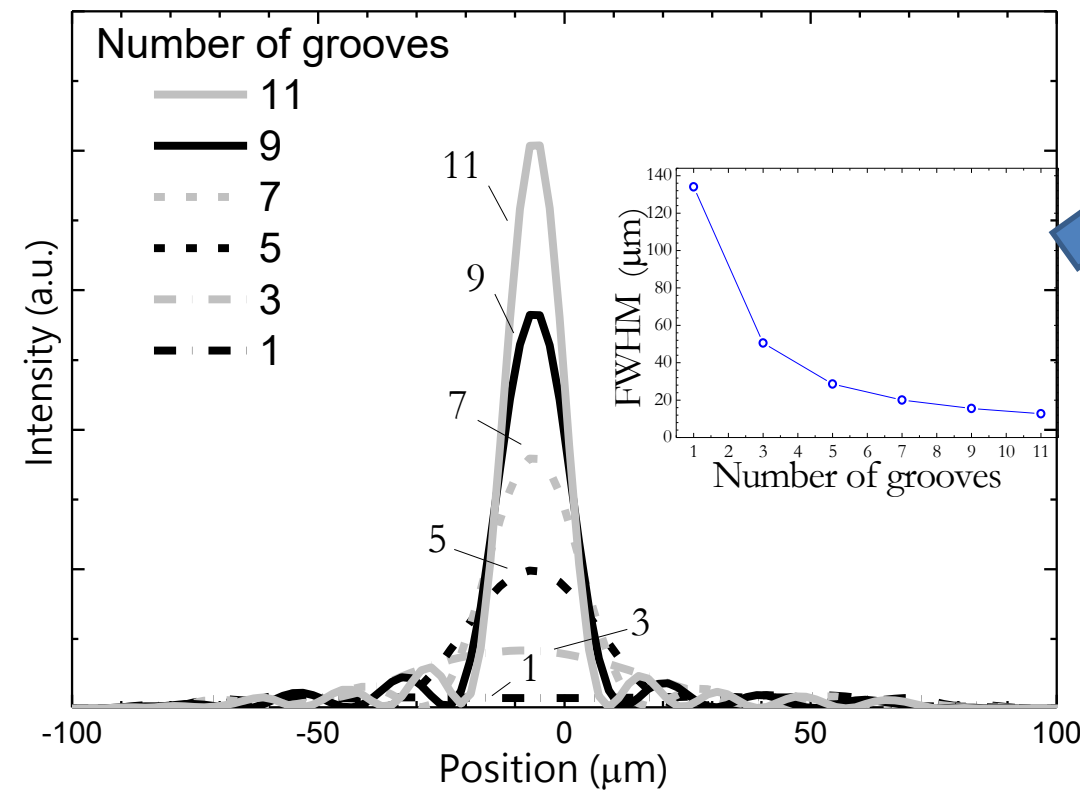
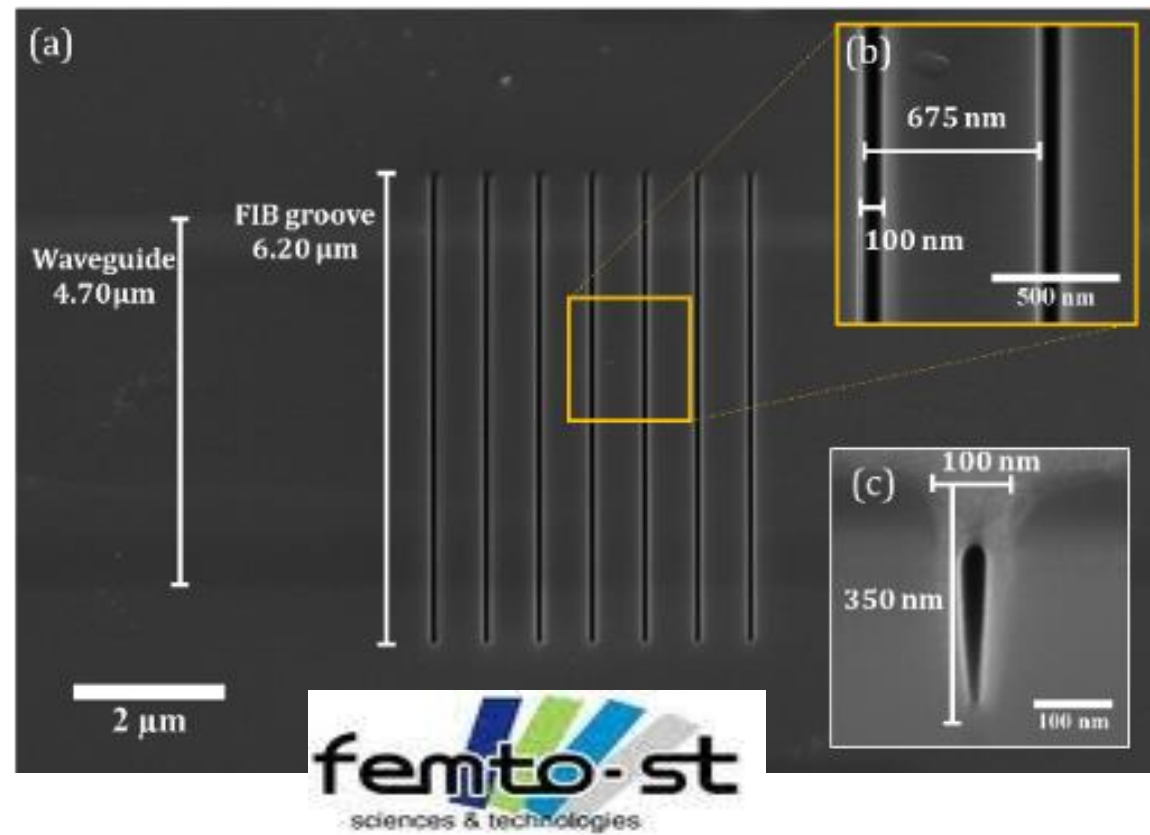


## ■ Choix technologique: Faire des guides, des antennes et des phase shifters dans le même matériau

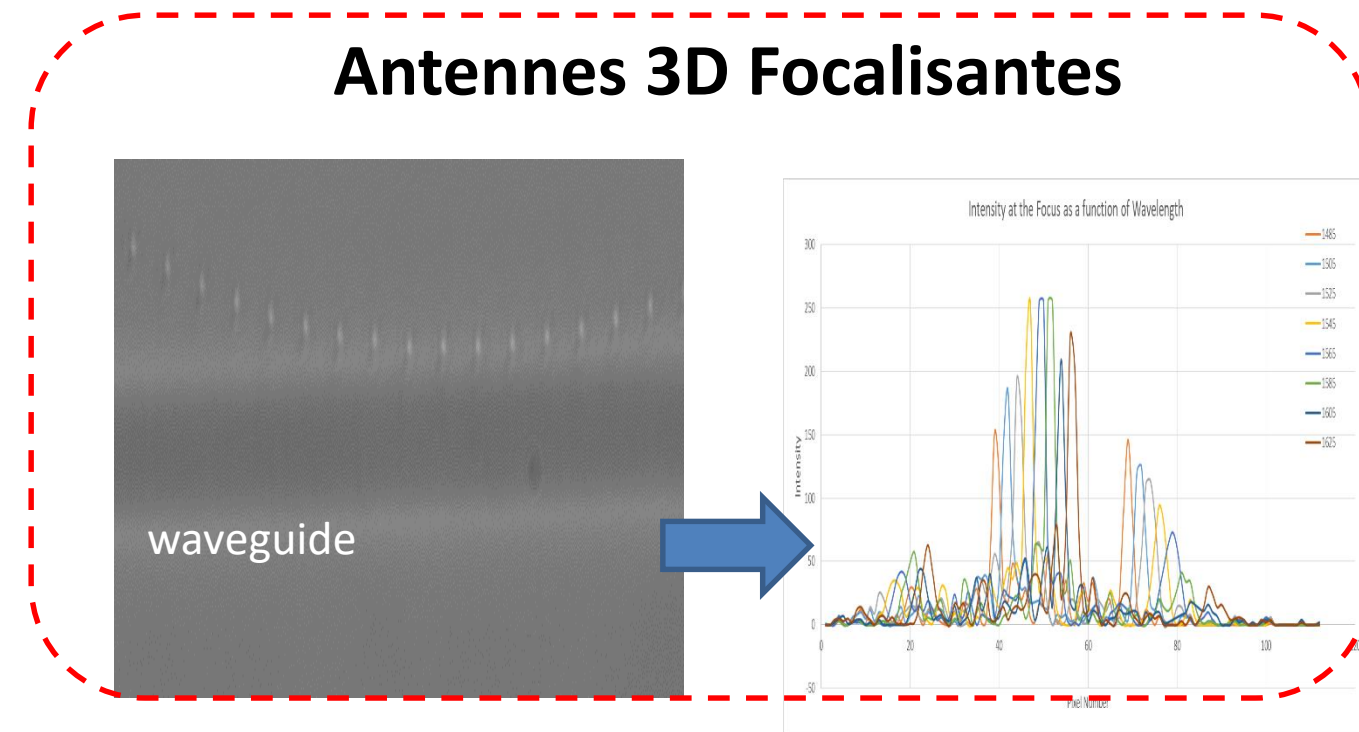
- Niobate de Lithium (Effet EO, SWIR et MWIR, Antennes FIB)
- Verre (Effet Thermo-Optique, SWIR, Antennes Métalliques)

# Validation 1: Démonstration de la directivité

- Réseau de fentes:
  - Mise en évidence du phénomène de réduction du cône angulaire
  - Contrôle du flux et réduction du cross-talk



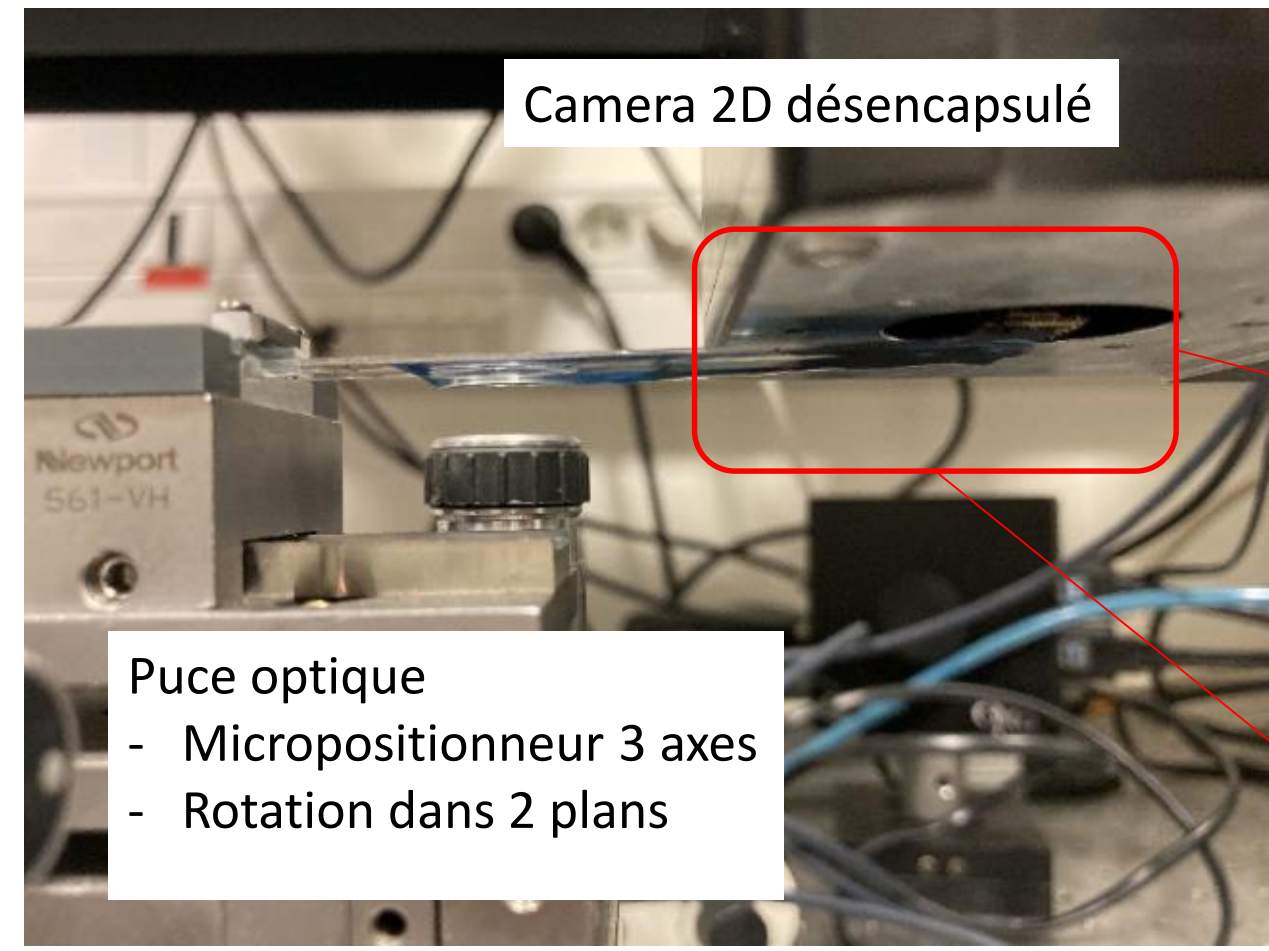
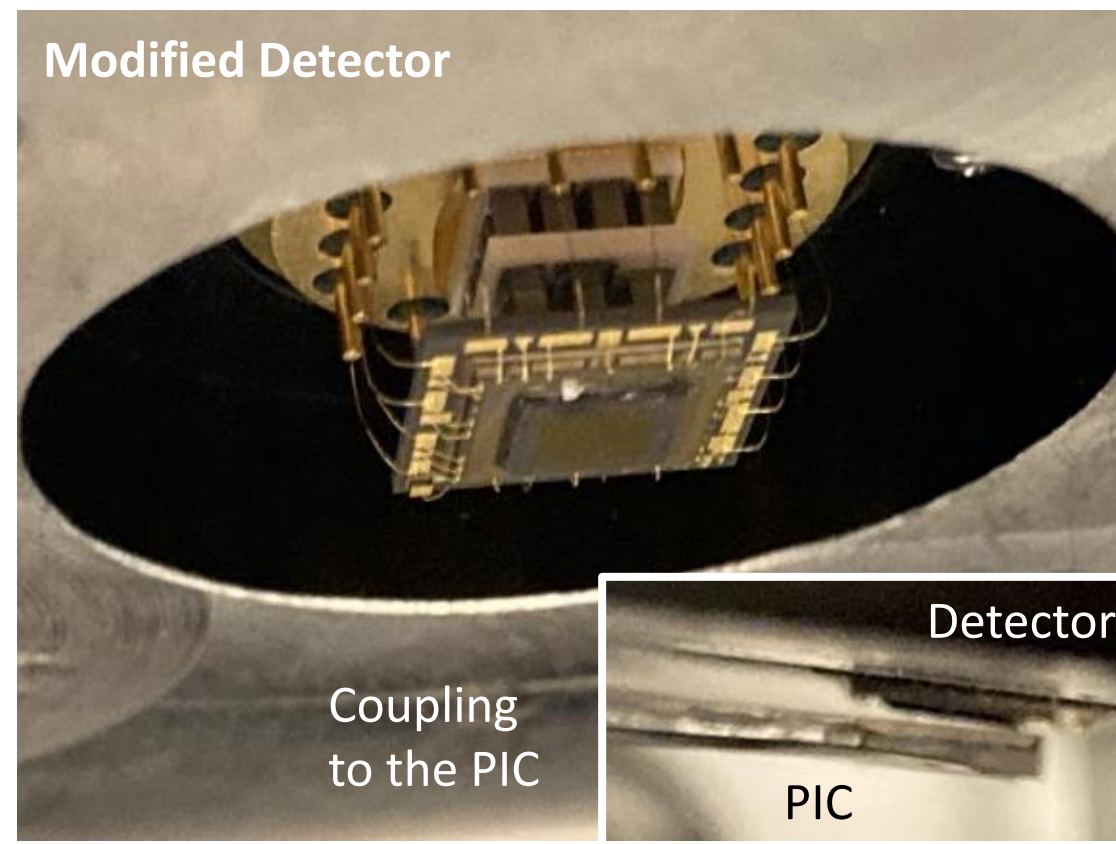
-Exploration de différentes méthodes: FIB (FEMTO-ST), Laser Ablation (LIPHY), Bessel Voids (St. Etienne)...



# Validation 2: Détecteur au plus proche du guide: CAMERA DESENCAPSULÉE

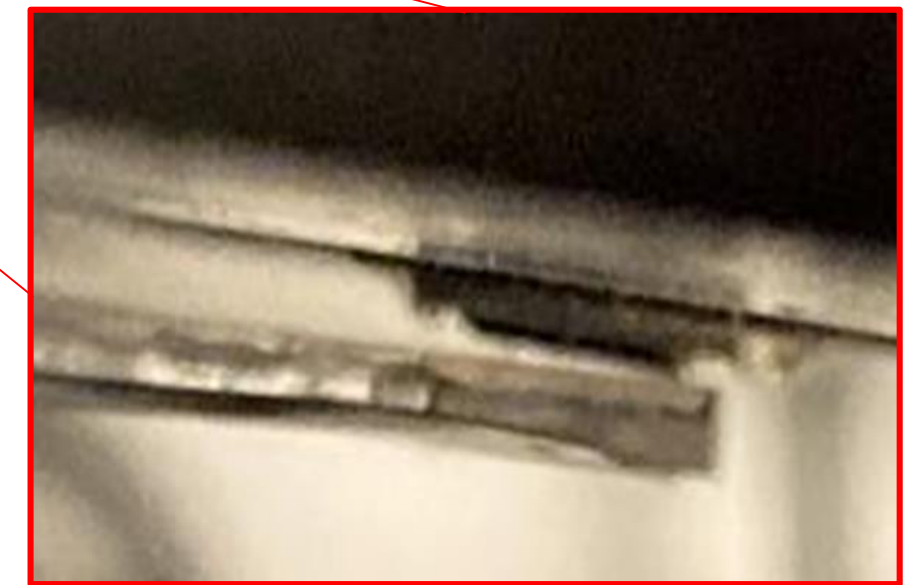
## ■ Caméra InGaAs Hamamatsu désencapsulée:

- 128 x 128 pixels
- 20 $\mu$ m de pitch

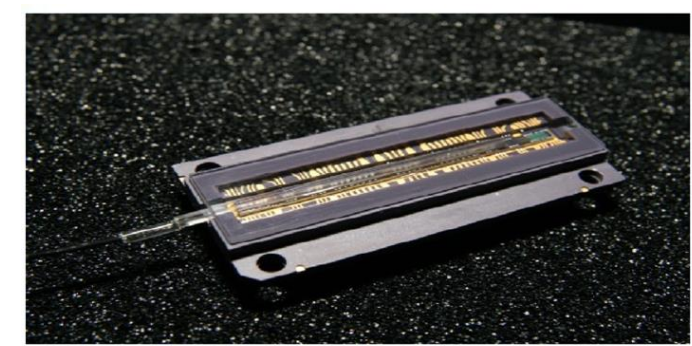


Couplage PIC-Détecteur

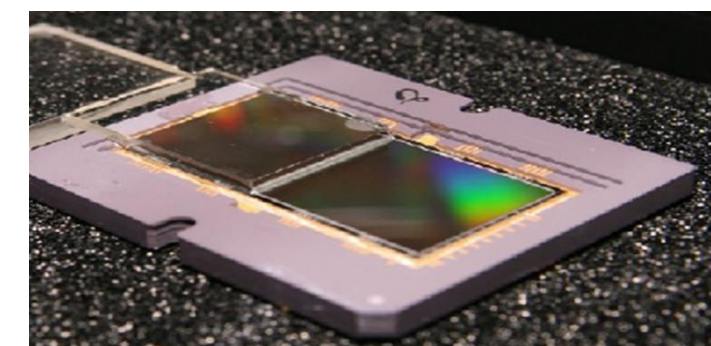
Contacts avec Industriels (Hamamatsu, FLI, Sony, E2V-Teledyne, NewImagingTechnologies...)



Démontrer que c'est faisable dans l'IR:



SWIFTS Linéaire



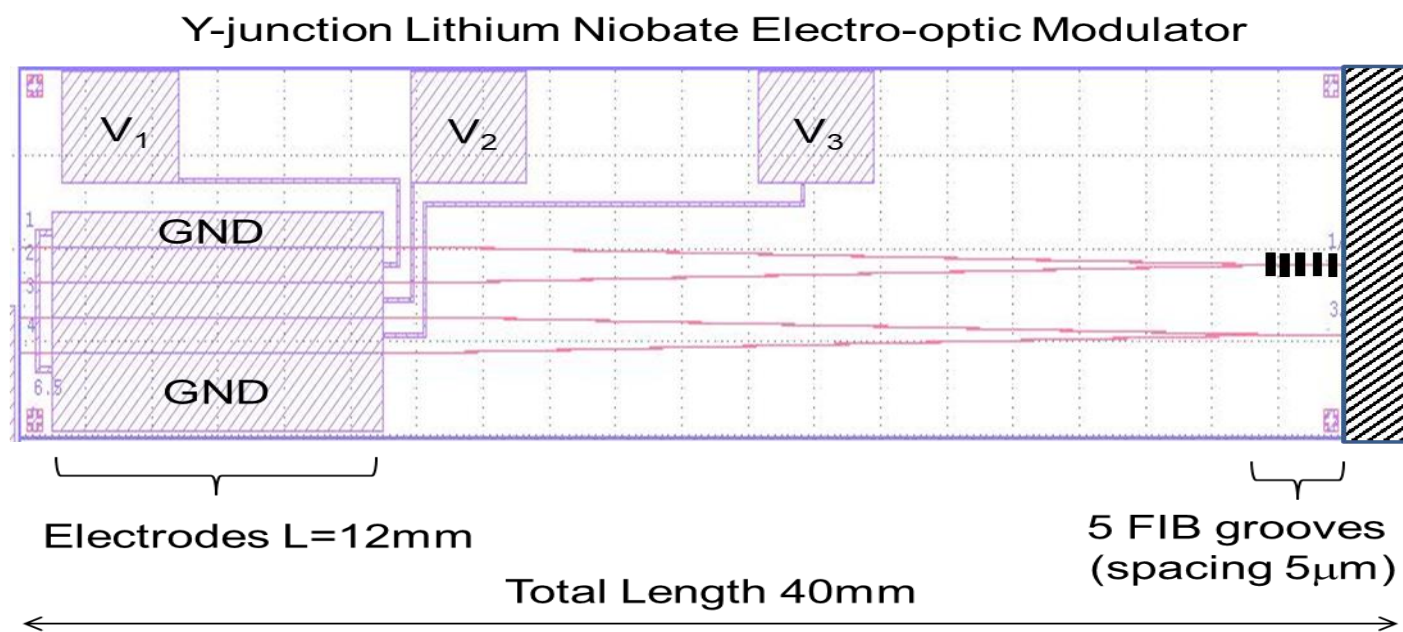
SWIFTS Matriciel

Exemples d'assemblages SWIFTS commerciaux

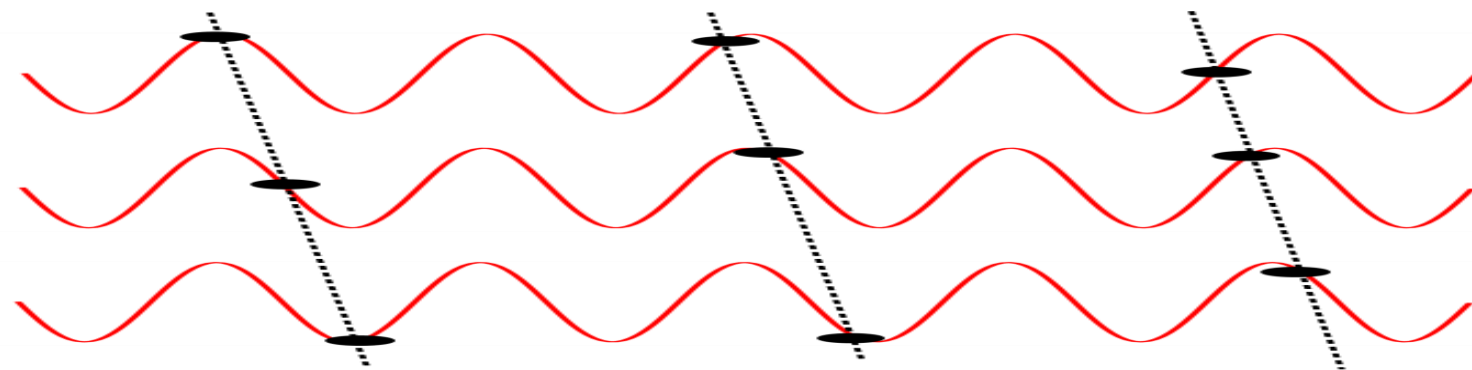
# Validation 3: Augmenter l'Etendue Spectrale: Time&Spatial Multiplexing

Modulation active de la phase (Effet Electro-Optique)

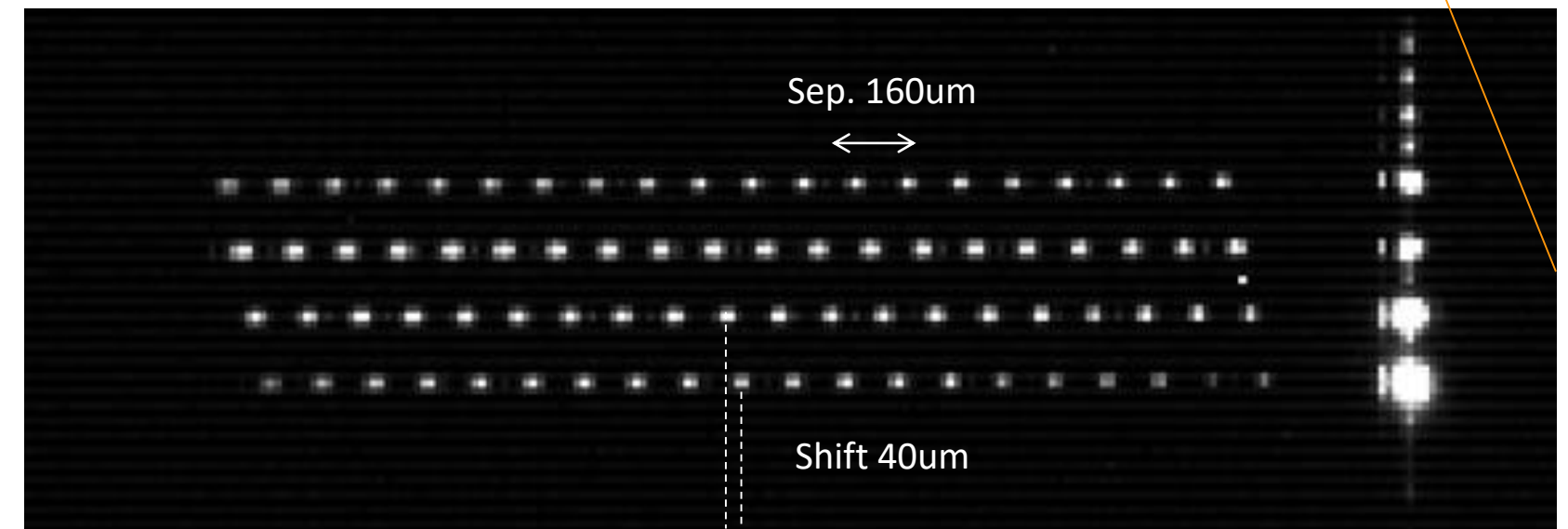
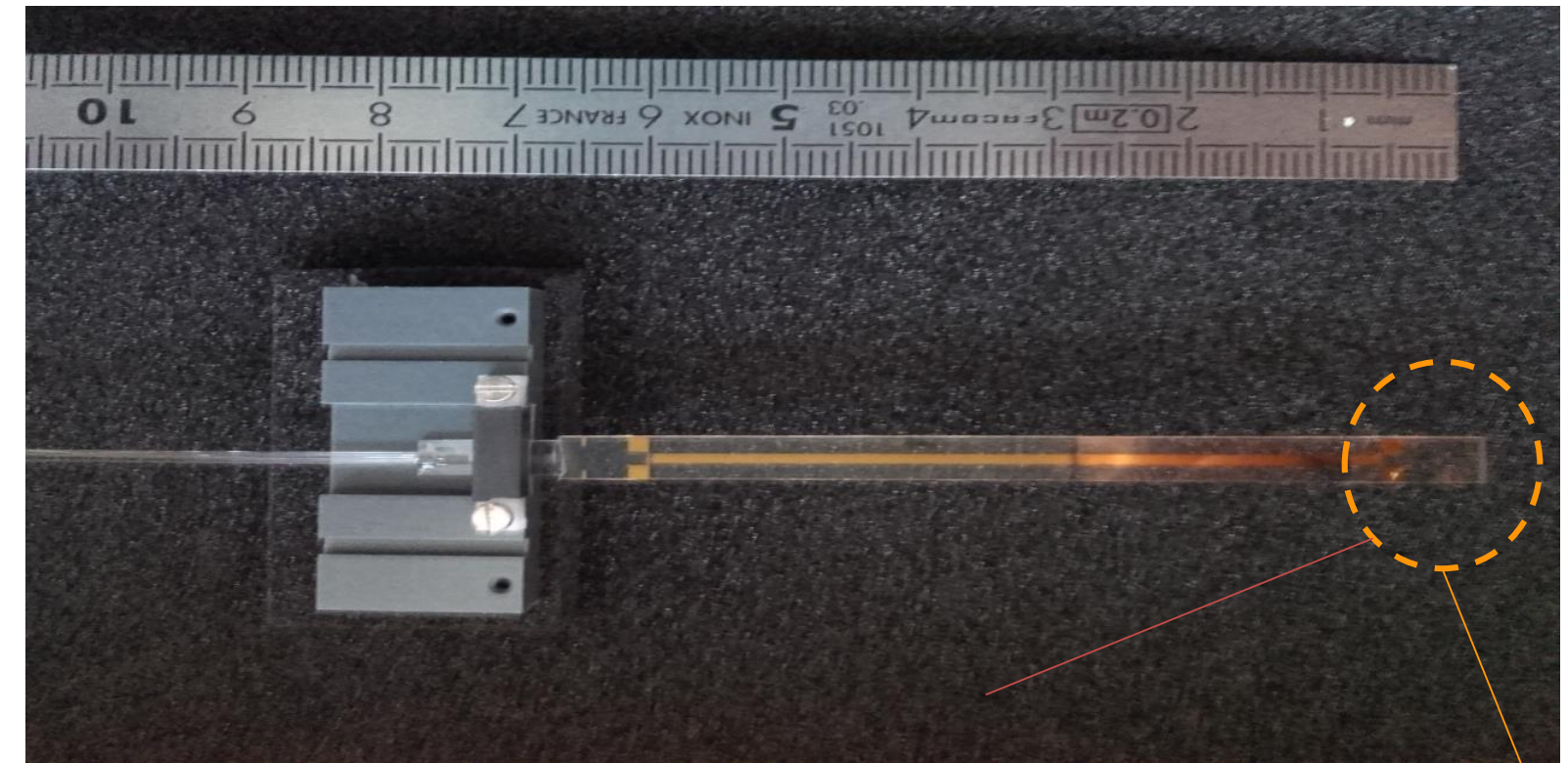
Réduction virtuelle du pixel pitch  $\Lambda$



Placement des antennes à différents endroits de l'interférogramme



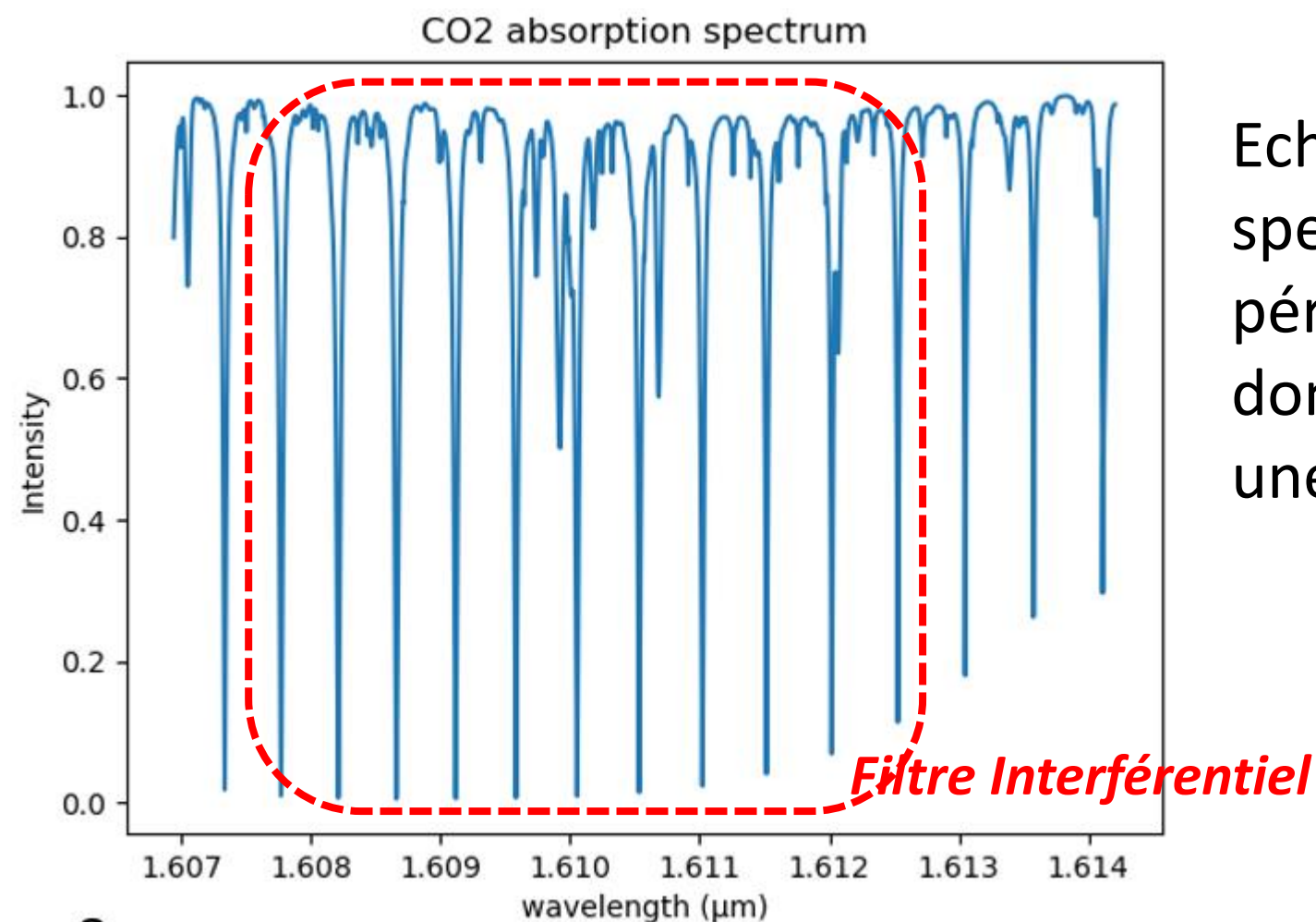
- Chip with mirror pigtailed with 4 PM fibers



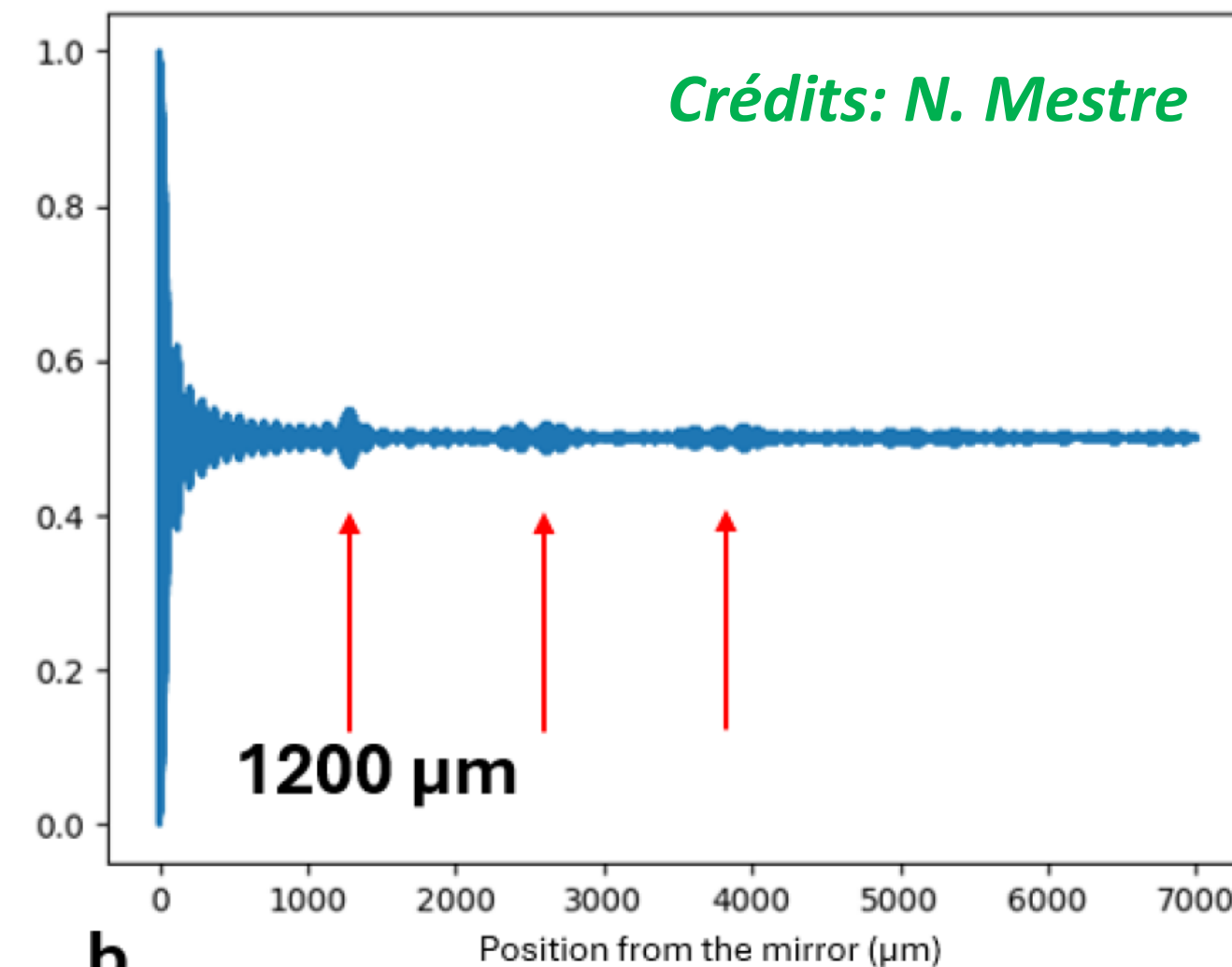
# Derniers Résultats: Echantillonner la Zone Utile

Coll. S. Gousset, A. Carlotti

Sur certaines zones du spectre, les raies d'absorption sont périodiques:



Echantillonner sur une fenêtre spectralement limitée des raies périodiquement espacées, donne dans l'interférogramme une signature caractéristique:



On peut donc détecter la présence du gaz, par la mesure des "rebonds"



*Work in Progress:*  
*Tests sur Cuves à Gaz Fibrées*

Institut de Planétologie et  
d'Astrophysique de Grenoble



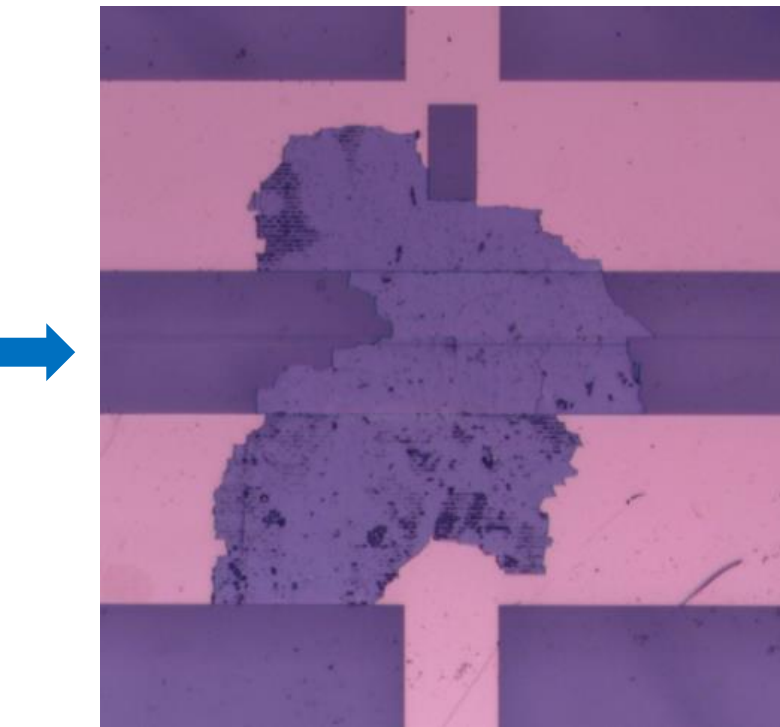
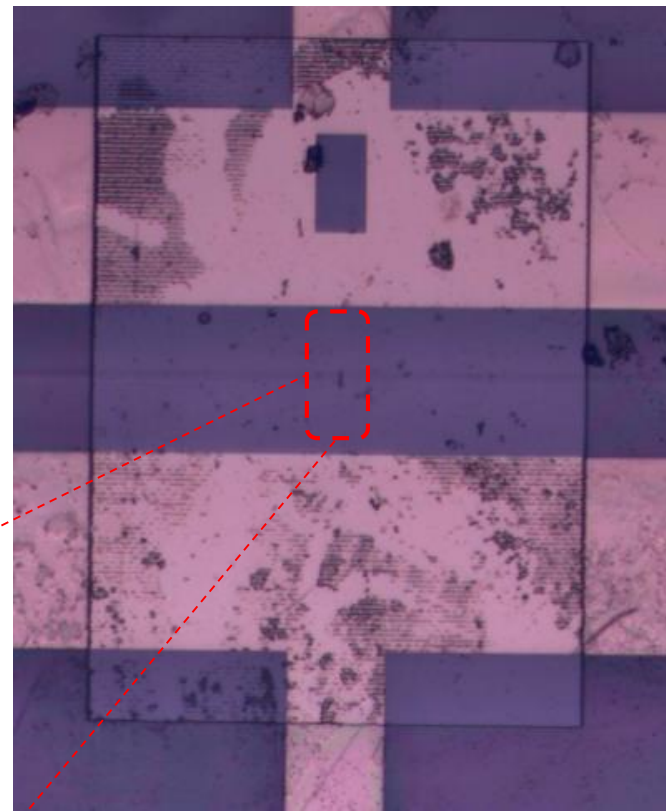
# Derniers Résultats: Pixel on Chip

En attendant d'avoir des détecteurs adaptés (ou de nous adapter au détecteur), on dépose directement les pixels sur la puce optique:



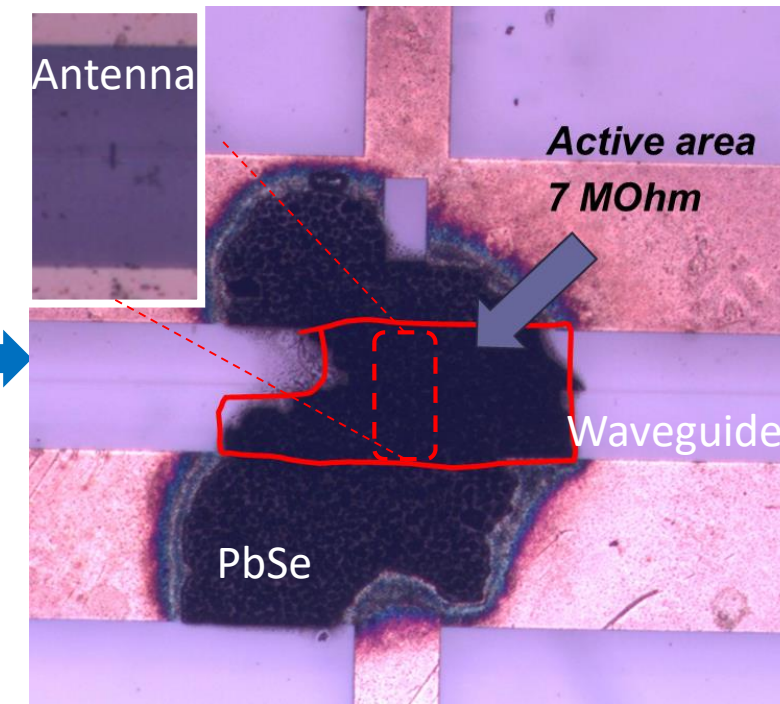
femto-st  
sciences & technologies

Préparation du Contact



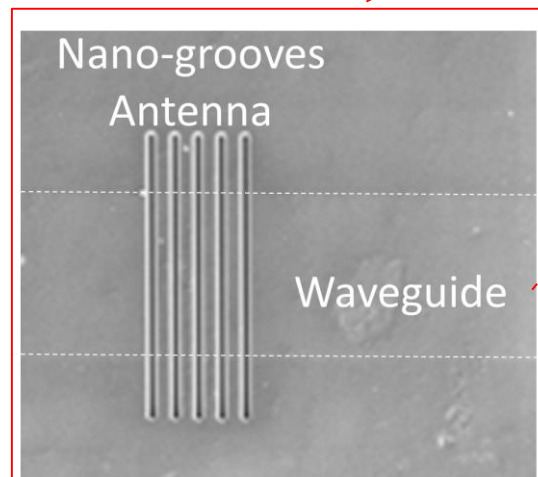
PbSe deposition and Stripping

PbSe Activation



9

Guide d'onde, entouré d'électrodes



*Coll. N. Courjal (FEMTO-ST), G. Coupier (LIPHY)*

# MESSAGES À EMPORTER

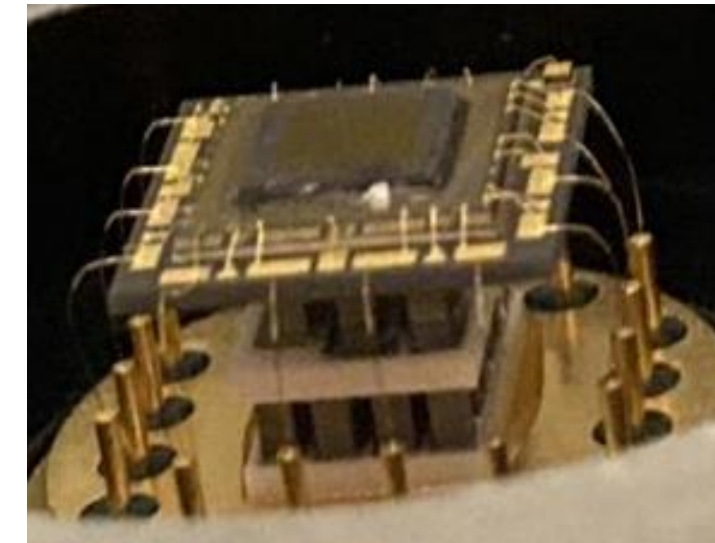
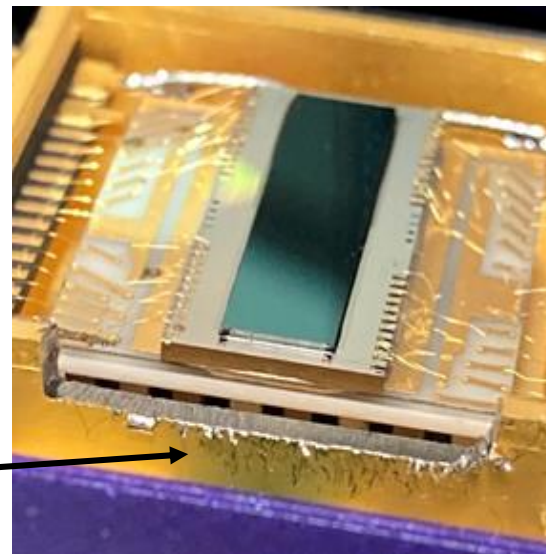
SWIFTS IR est un spectromètre compact dont la résolution et la bande spectrale sont contraintes par le détecteur (Taille des Pixels, Nombre de Pixels):

Résolution:  $R = (2n_{\text{eff}} L) / \lambda \rightarrow$  Longueur  $L = N_{\text{pixels}} \cdot$  Taille des Pixels

Bande spectrale:  $\Delta\lambda_{\text{bande}} = \lambda^2 / (4 n_{\text{eff}} \Lambda) \rightarrow \Lambda =$  Taille du Pixel = Période d'Echantillonnage

L'assemblage au détecteur (ou la réalisation des pixels on-chip) permet d'envisager des applications embarquées  $\rightarrow$  Customisation du détecteur?

Usinage du cadre



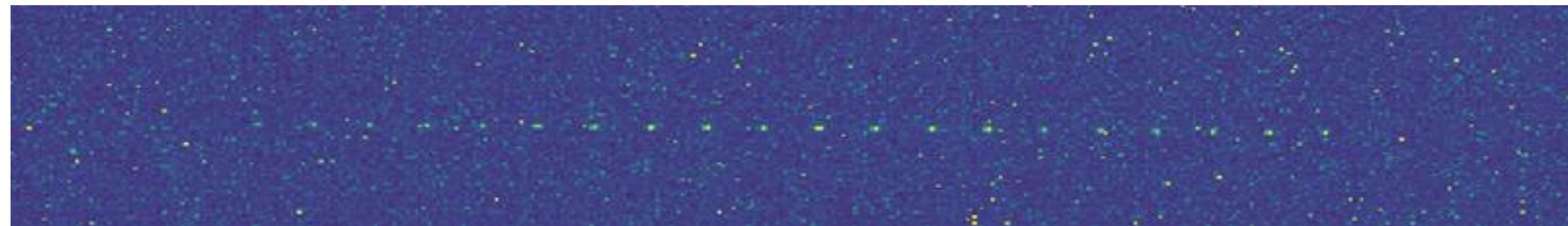
Pixels accessibles à la puce optique

Bonding loin et/ou en dessous de la surface utile

# SWIFTS at OHP: ON-SKY RESULTS



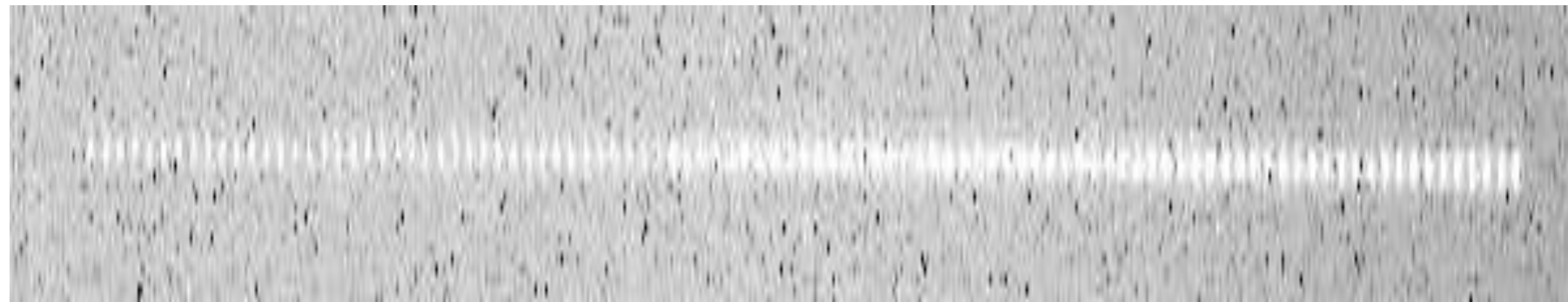
Betelgeuse as seen by the C-RED2, using 20 antenna of SWIFTS Lippmann FIB Niobate



Single shot image

$$T_{int} = 50 \text{ ms} ; T = -40^{\circ}\text{C} ; SR_{max} = 10$$

Arcturus on SWIFTS Lippmann, FIB antenna, Niobate, 10sec IT



Betelgeuse on SWIFTS Lippmann, FIB antenna, Niobate, 40sec IT, avec filtre CH4 (Silvère)



THANK YOU!!

