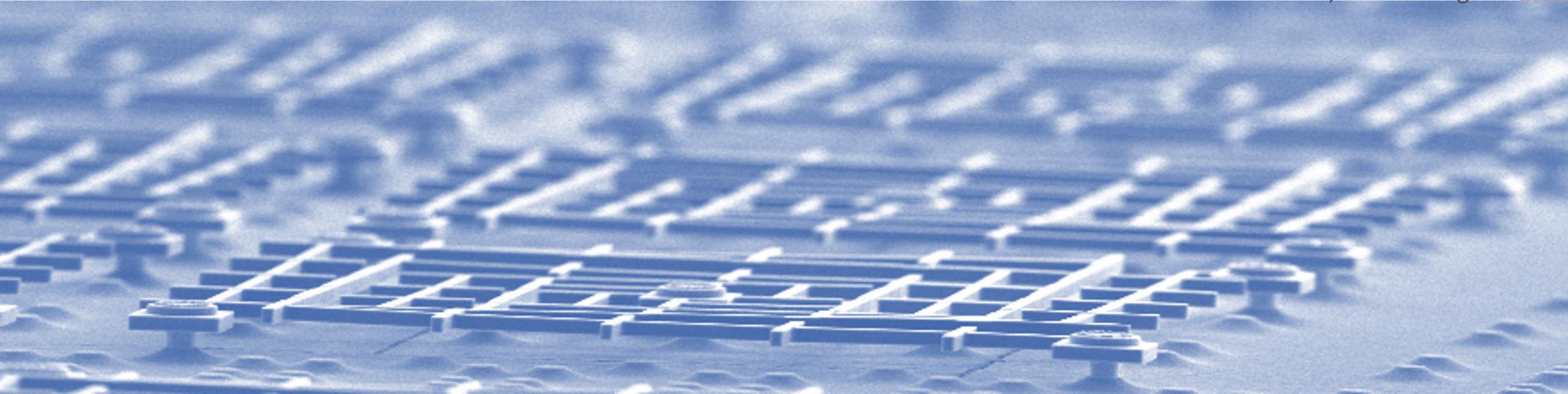


# Les spectromètres à base de bolomètres résistifs sur silicium

Vincent Revéret, Louis Rodriguez



---

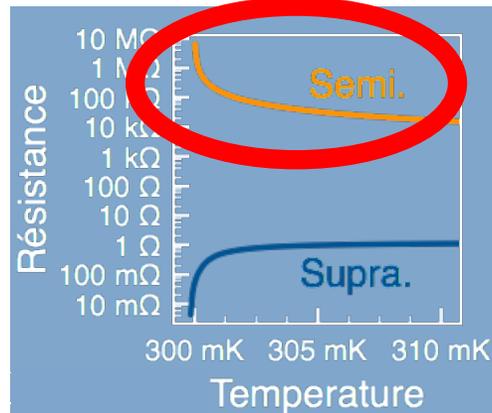
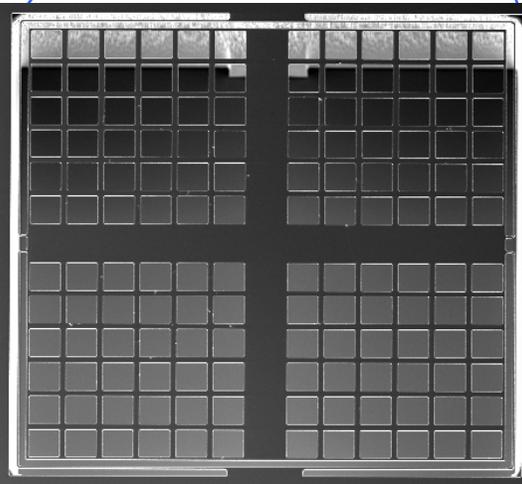
**1** V. Revéret : Les bolomètres résistifs et l'ajout de capacités spectroscopiques

L. Rodriguez : les développements spectroscopiques futurs **2**

# Les bolomètres d'Herschel / PACS



CEA-LETI



- « All Silicon » design
- **Très Haute Impédance (~ GOhm)**

$$R = R_0 \exp\left(\sqrt{\frac{T_0}{T}}\right) \exp\left(-\frac{qL(T)E}{kT}\right)$$

- **Réponse très élevée**  
->  $2 \cdot 10^{10} \text{ V/W}$
- **Multiplexage cryo (MOS) : 16 -> 1**
- **NEP ~  $2 \cdot 10^{-16} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$  à 300 mK**

Herschel/PACS



APEX/ARTEMIS



PILOT

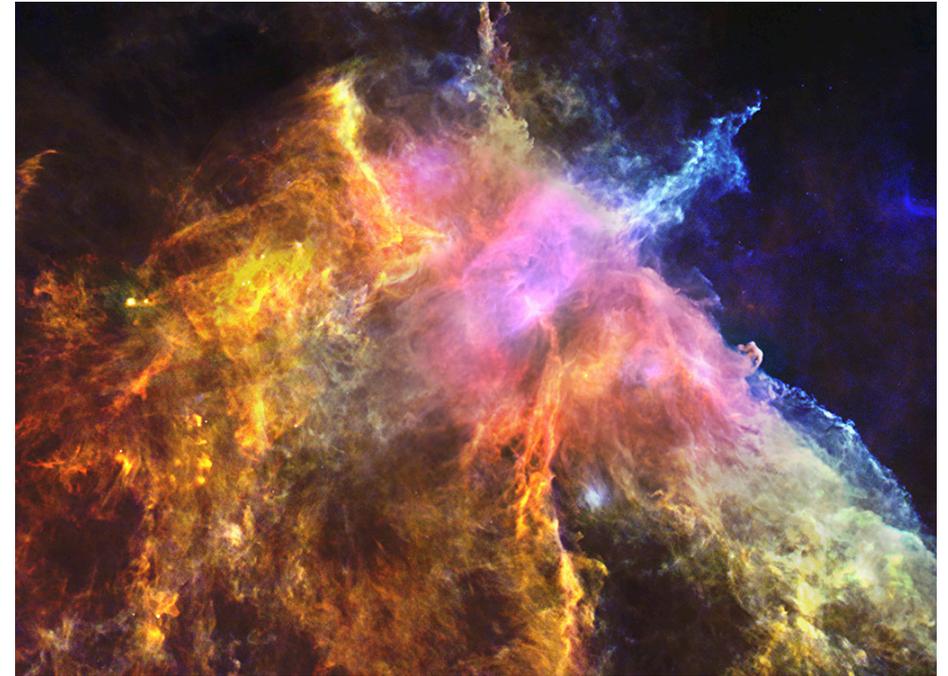
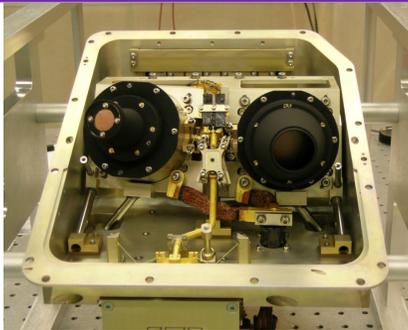


# Herschel / PACS Legacy (2009– 2013)



## Photomètre PACS

- 30% du temps d'observation, Instrument le plus utilisé
- 40 % en mode parallèle

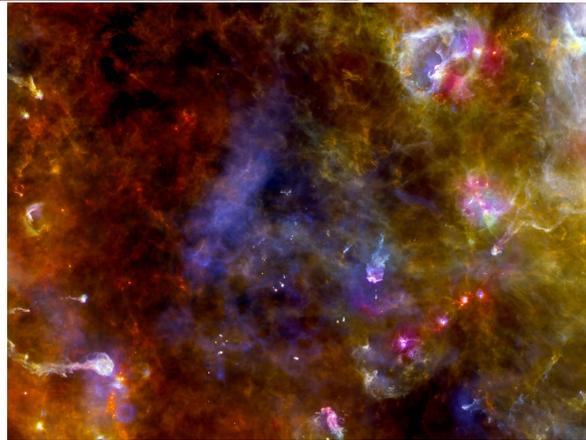
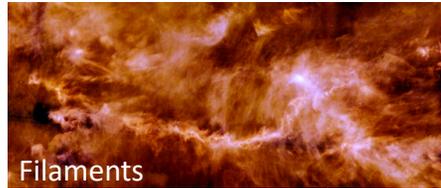
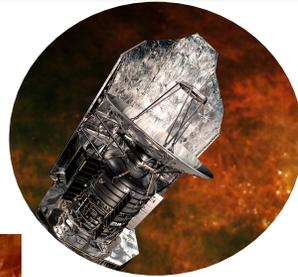


Cygnus X  
Herschel PACS & SPIRE

Credits: ESA/PACS/SPIRE/Martin Hennemann & Frédérique Motte

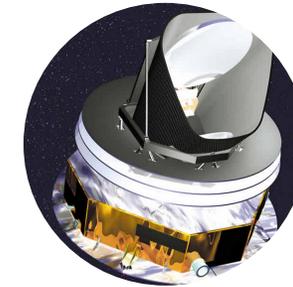
# Le ciel en submm et mm après Herschel & Planck (60 $\mu$ m -> quelques mm)

Herschel

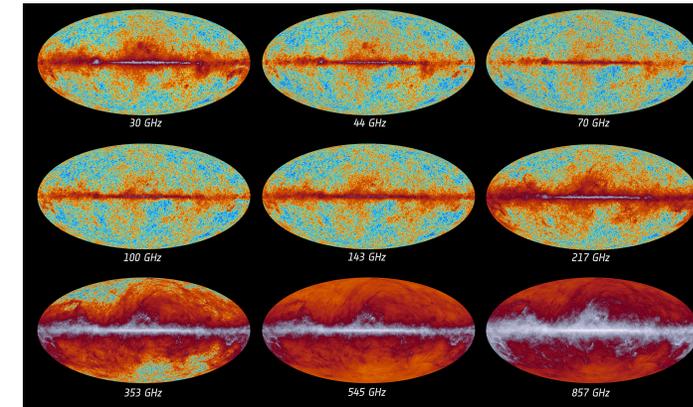
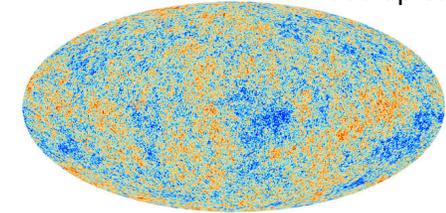


*Quelle physique pour les filaments?  
Etude du MIS*

Planck



CMB anisotropies



*Détection des Modes B, distorsions spectrales?*

**-> Besoins pour la prochaine génération de missions spatiales:**

- Capacités spectroscopiques et/ou polarimétriques
- Détecteurs ultra-sensibles

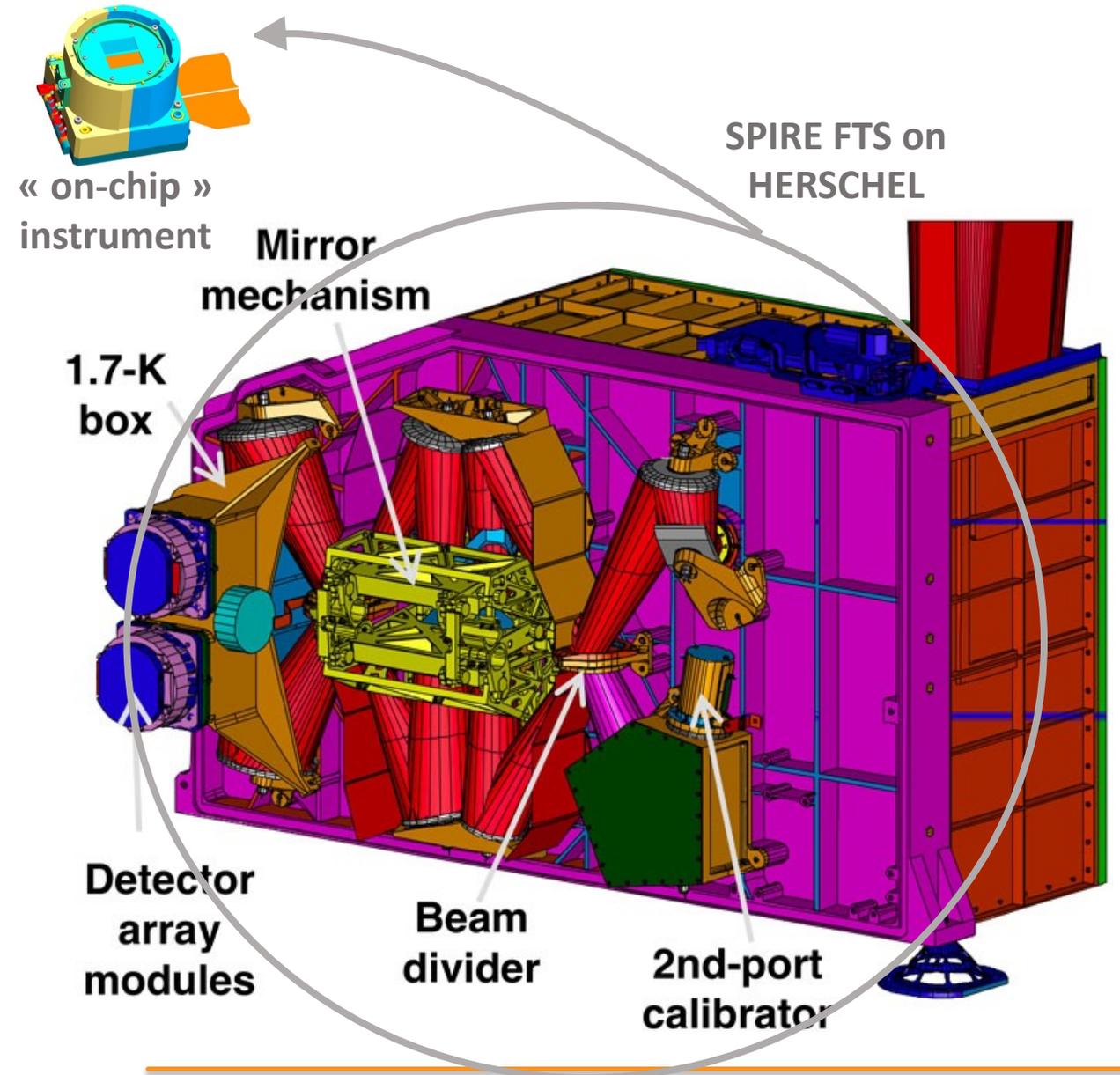
# Vers de l'instrumentation spatiale compacte

- La concurrence des autres développements détecteurs nous a « forcés » à développer une nouvelle *attractivité* pour nos solutions: aller vers **l'intégration de fonctions instrumentales dans le détecteur**, simplifiant ainsi la conception d'un instrument (atout majeur pour le spatial).
- La très grande **adaptabilité de la technologie du silicium** et les développements dans la *grande industrie* du semi-conducteur, nous ont permis d'identifier des solutions innovantes.
- Nous avons donc privilégié pour nos développements la fonction **d'imagerie** associée à une **autre fonction** (spectroscopie, polarimétrie,...).
- Le gain est évident :

**Simplification de l'instrument**

**Cryogénie « simplifiée »**  
(pour les éléments optiques notamment)

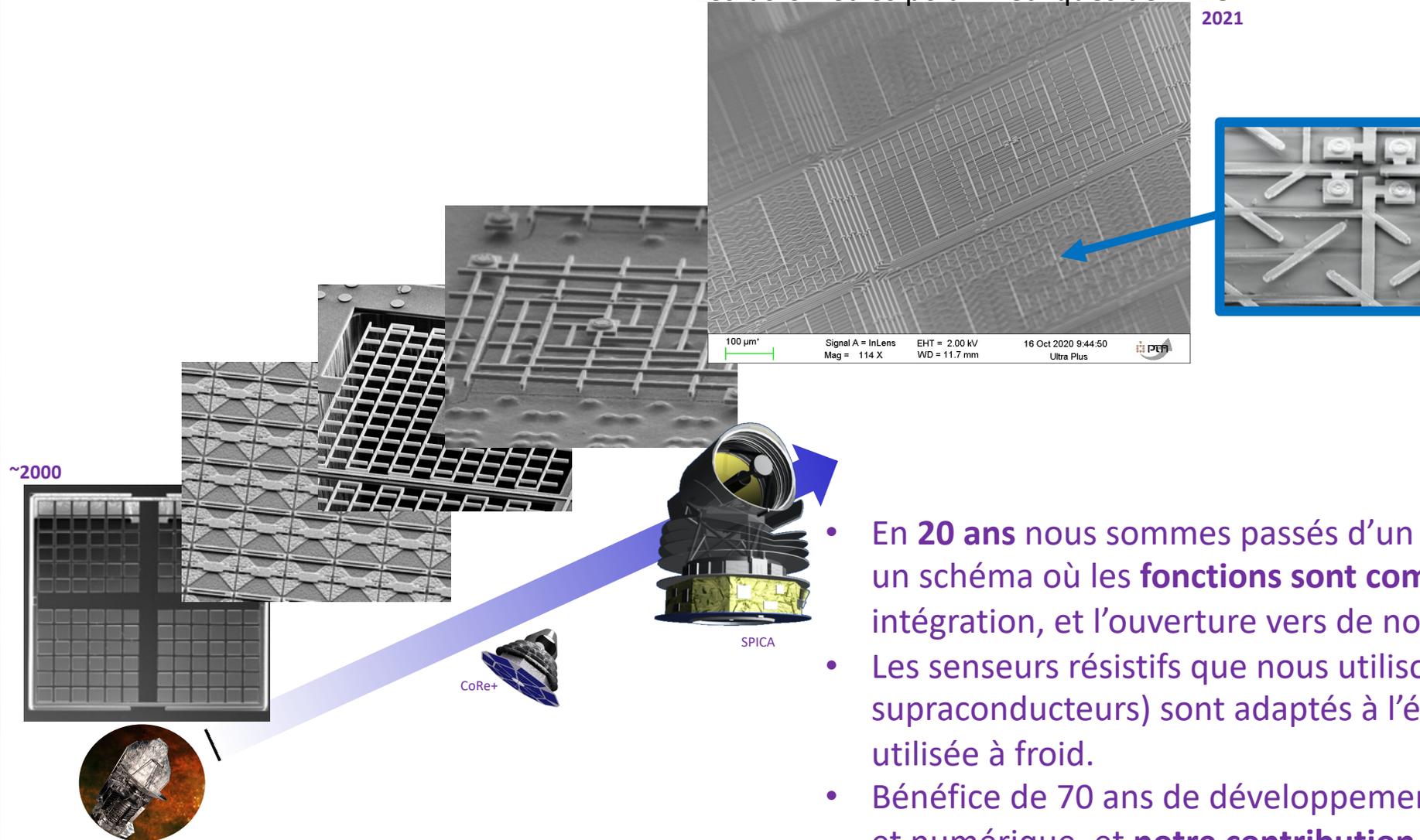
**Budgets Volume et Masse optimisés**



# « 20 ans d'expérience »

## Les bolomètres polarimétriques de B-BOP

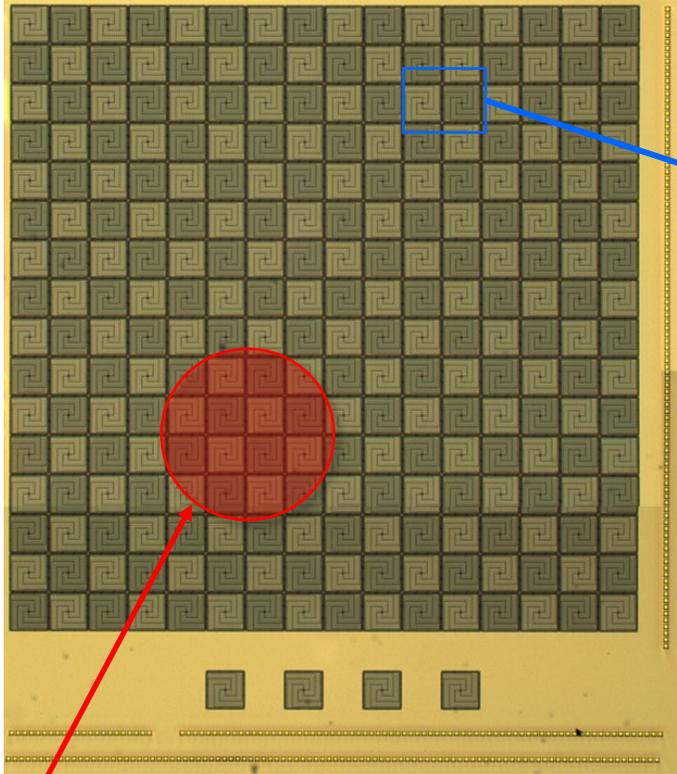
2021



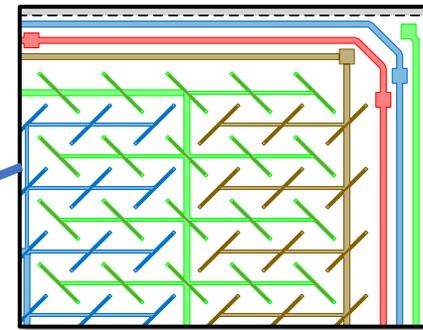
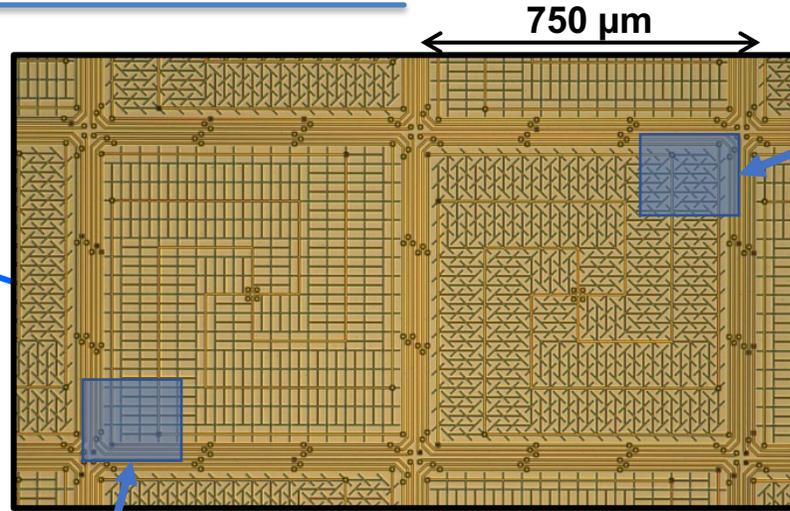
- En **20 ans** nous sommes passés d'un schéma à **fonctions séparées** à un schéma où les **fonctions sont combinées** pour une plus grande intégration, et l'ouverture vers de nouvelles fonctionnalités.
- Les senseurs résistifs que nous utilisons (y compris les supraconducteurs) sont adaptés à l'électronique classique, mais utilisée à froid.
- Bénéfice de 70 ans de développements en électronique analogique et numérique, et **notre contribution à très basse T (FP7 CESAR)**.

# Les « bolomètres Silicium 2.0 » pour SPICA / B-BOP

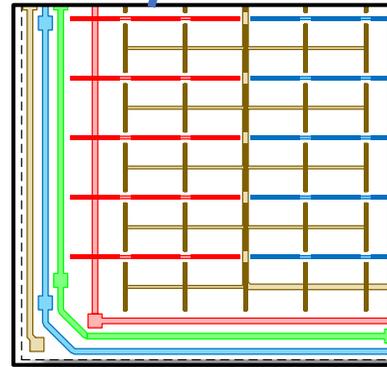
Matrice de 16x16 bolomètres polarimétriques



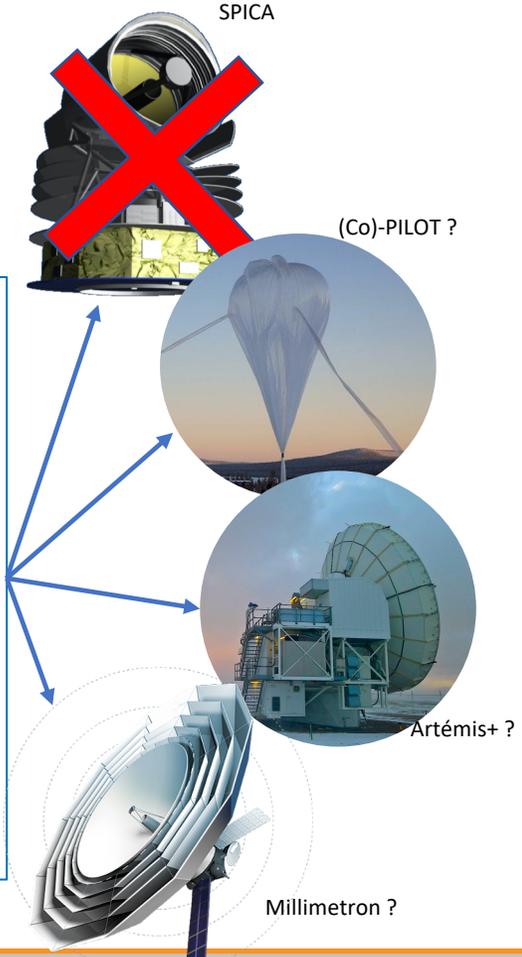
Disque d'Airy @ 70 μm



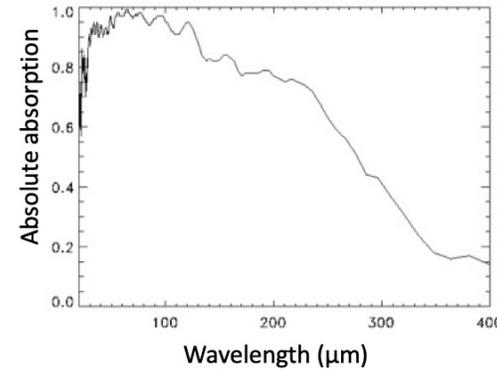
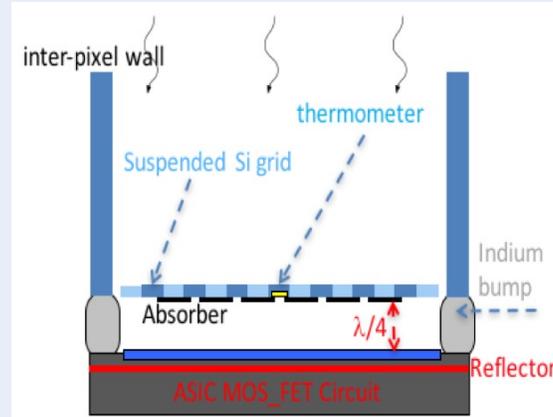
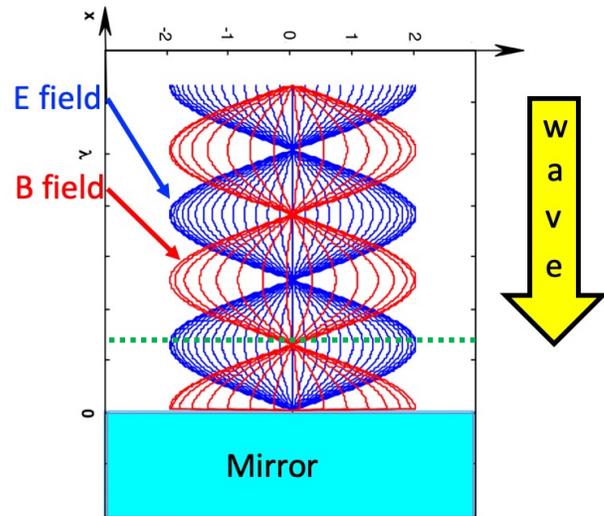
Réseaux de dipôles orthogonaux



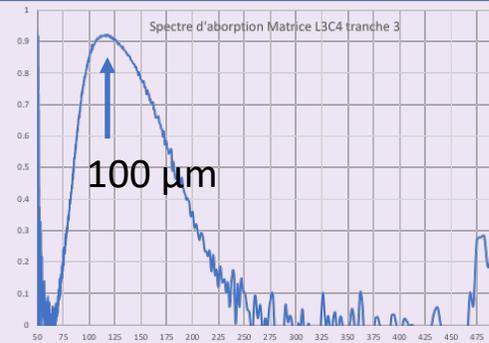
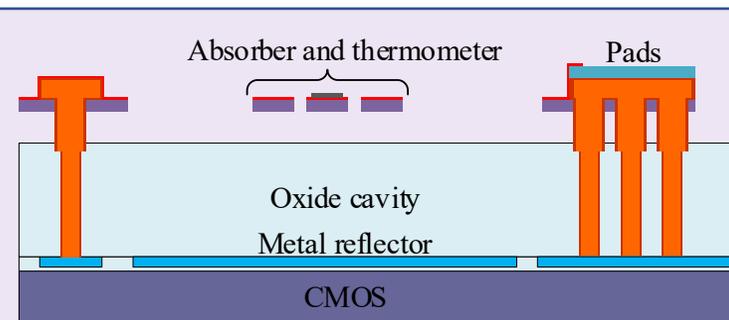
- Technologie Silicium semblable à la techno Herschel / PACS
- Température de fonctionnement = 50 mK  
⇒ NEP ~ 10<sup>-19</sup> W/√Hz
- Pixels Intrinsèquement sensibles à la polarisation
- Lecture différentielle des signaux polarimétriques
- Matrices actuellement en test



# L'absorption par cavité $\frac{1}{4}$ d'onde



PACS

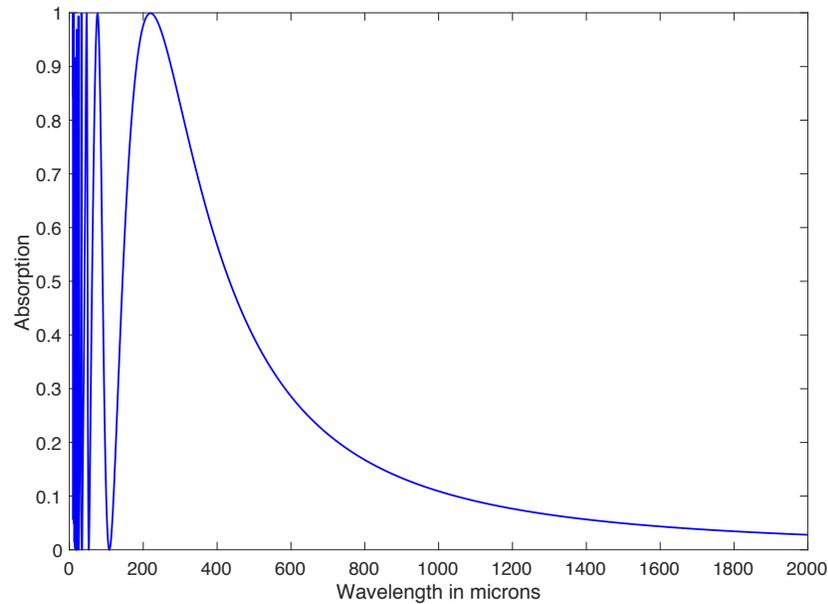


SPICA

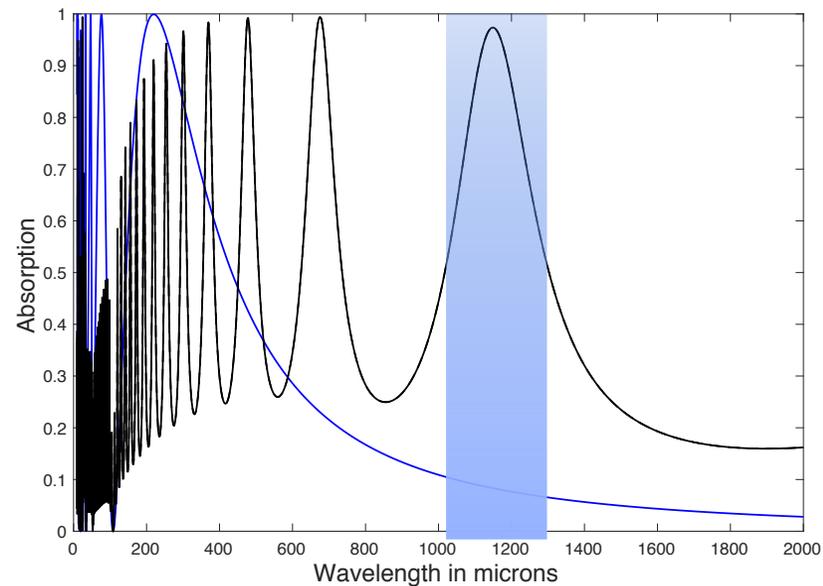
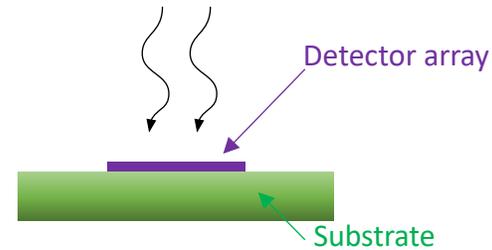
**Principle of the quarter-wave cavity:**  
**Free-space impedance ( $Z_0=377\Omega$ )**  
**matched absorber located at  $\lambda/4$  of the**  
**mirror can lead to 100 % absorption**

*Lippmann 1891, Hadley & Dennison 1947*

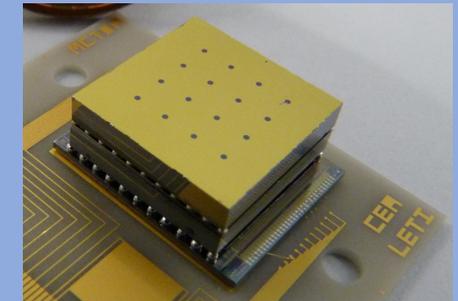
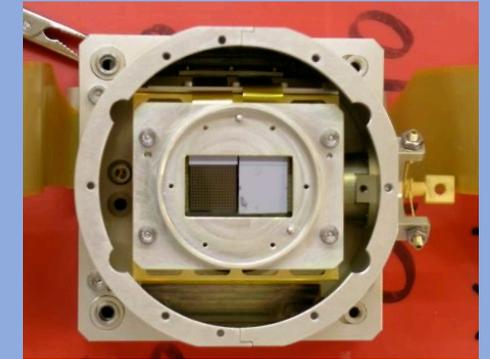
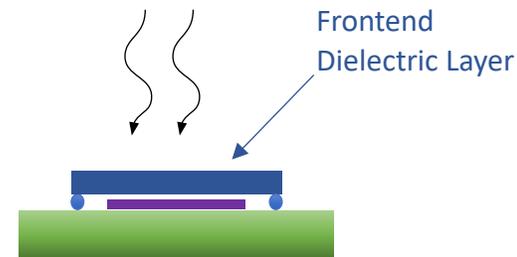
# Le point de départ : aller vers les grandes longueurs d'onde (jusqu'à $\lambda = 2\text{mm}$ )



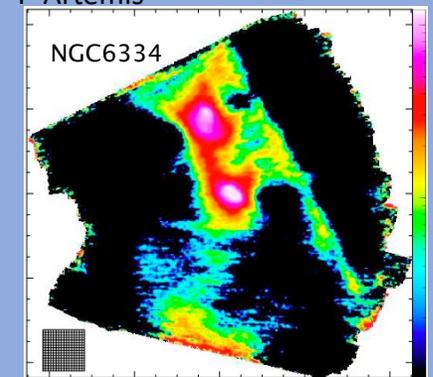
Réponse spectrale d'un bolomètre de type SPICA (simulation) (optimisé pour  $200\ \mu\text{m}$ )



Réponse spectrale d'un bolomètre SPICA + diélectrique (silicium) en face avant -> décalage du pic d'absorption



Scientific demonstration at  $450\ \mu\text{m}$  P-Artémis

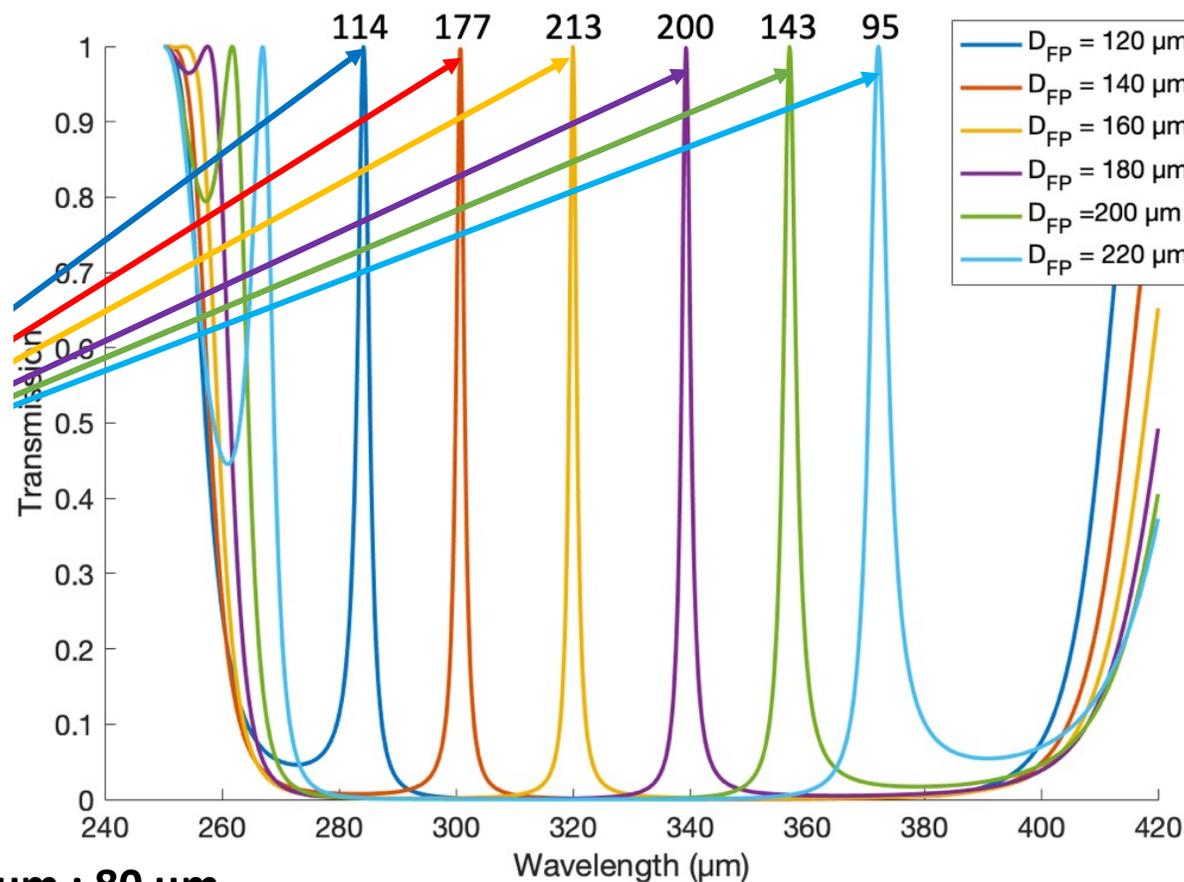
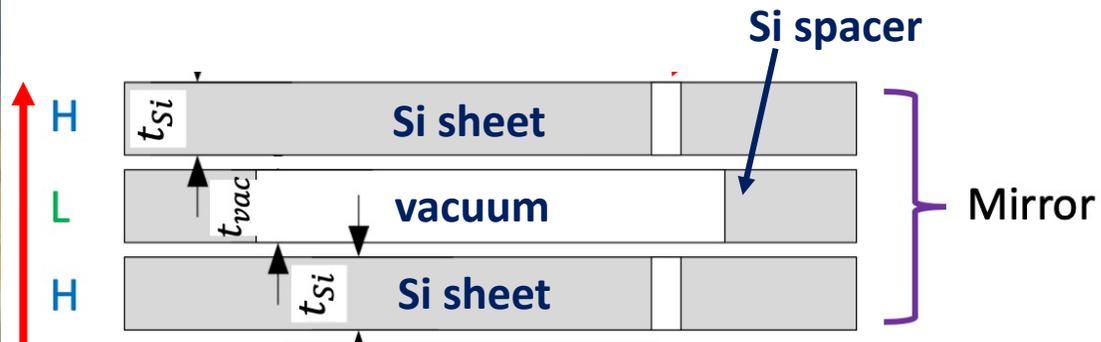


André et al, A&A 2008

# Vers un spectromètre tout silicium intégré à la matrice

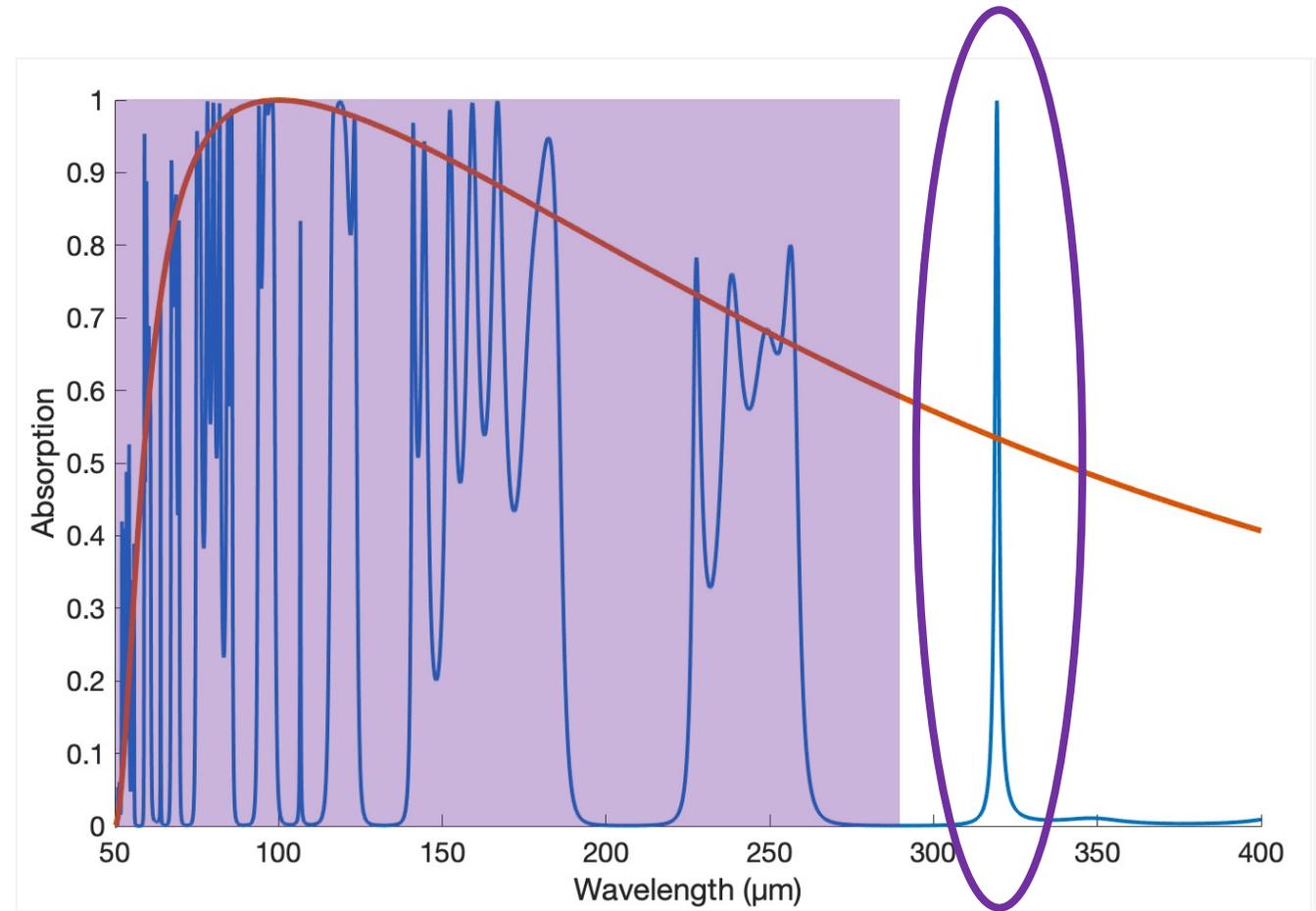
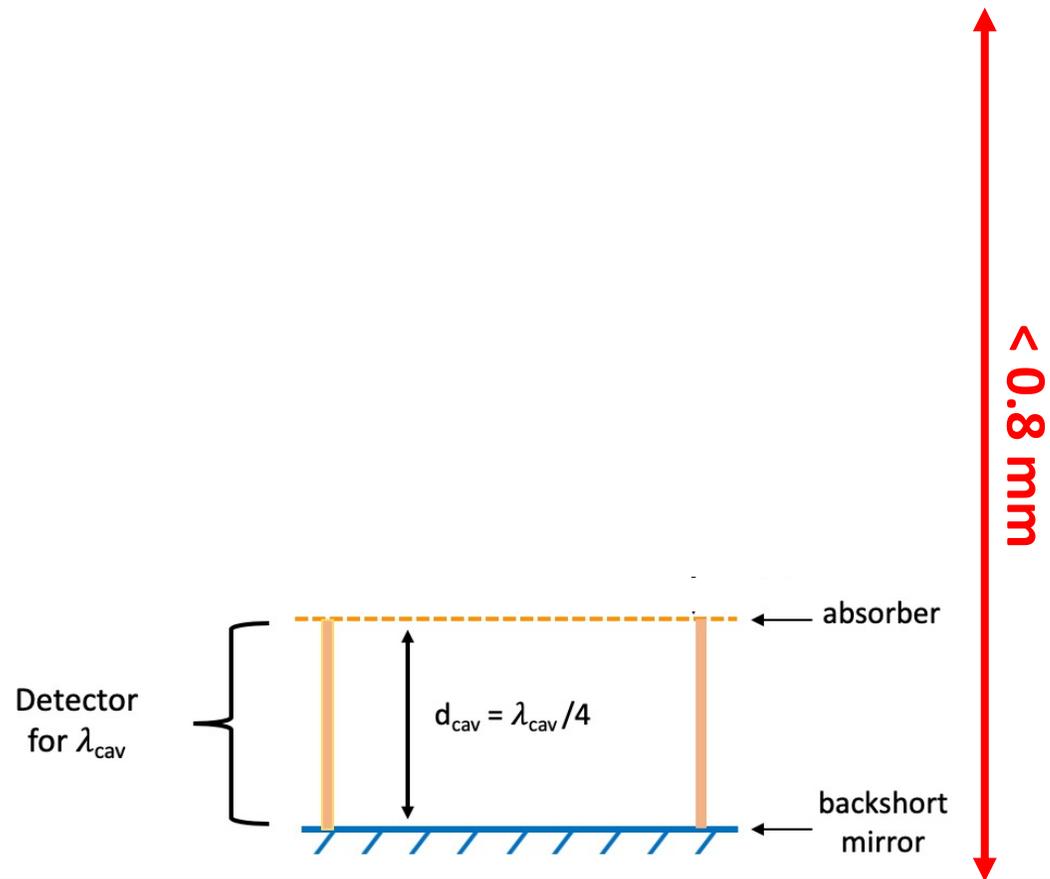
L'interféromètre est un Fabry Perot utilisant des miroirs de Bragg faits d'empilements de couches de silicium. L'avantage : faible absorption du rayonnement.

Simulations « couches minces » pour déterminer les épaisseurs optimum de diélectriques.



Si : 71  $\mu\text{m}$ ; vacuum : 80  $\mu\text{m}$

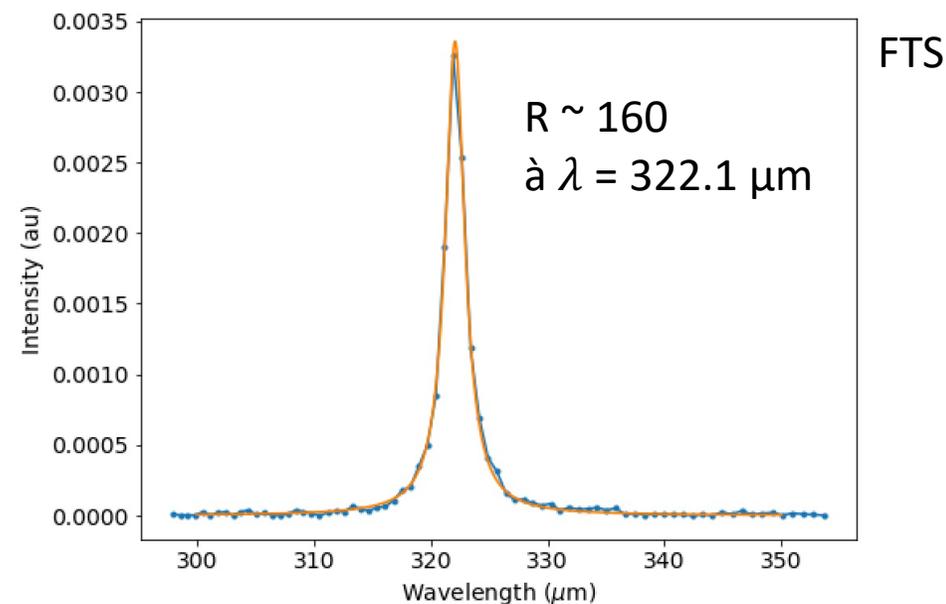
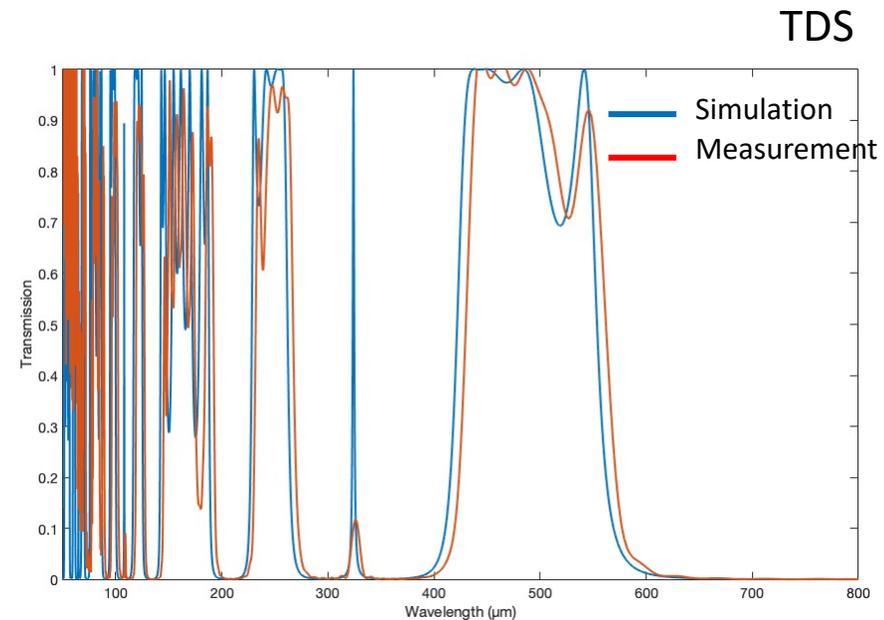
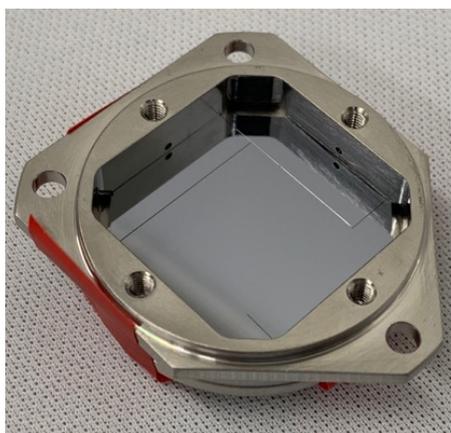
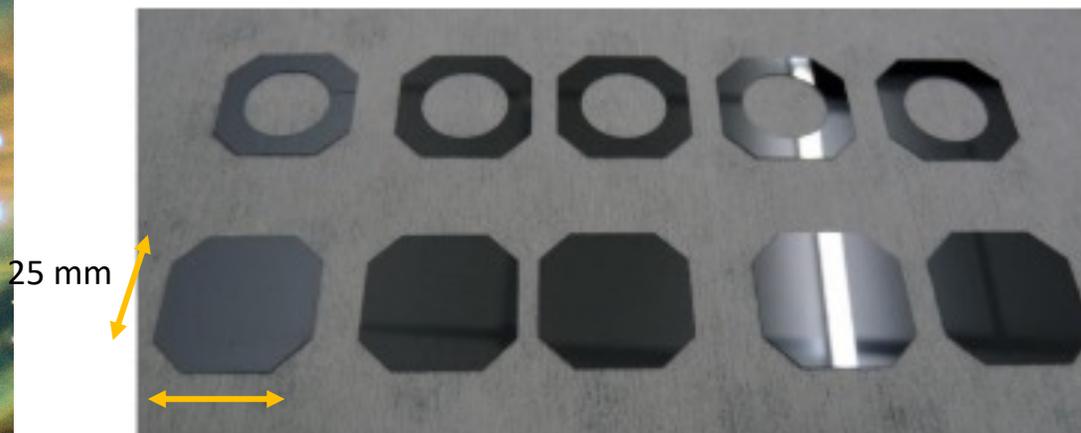
# Couplage Détecteur - FP



**La combinaison du FP avec le détecteur permet d'obtenir des efficacités très élevées dans certaines bandes => le rendement du spectromètre est important !**

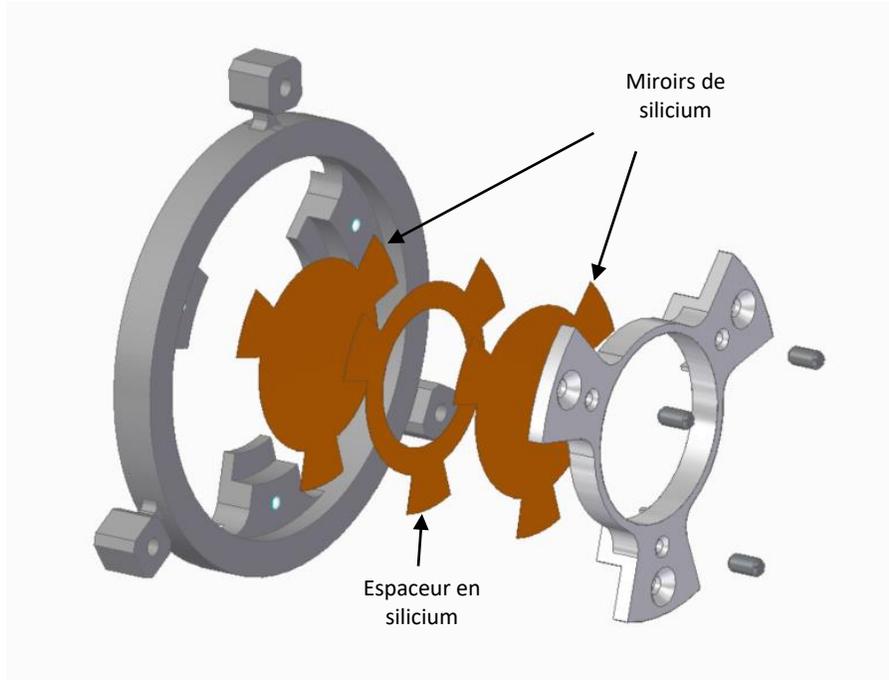
# Mesures d'un FP Etalon à 320 $\mu\text{m}$

Grinding of the silicon wafer:  
→ Thicknesses: 80  $\mu\text{m}$  (spacer) / 71  $\mu\text{m}$  (sheets)

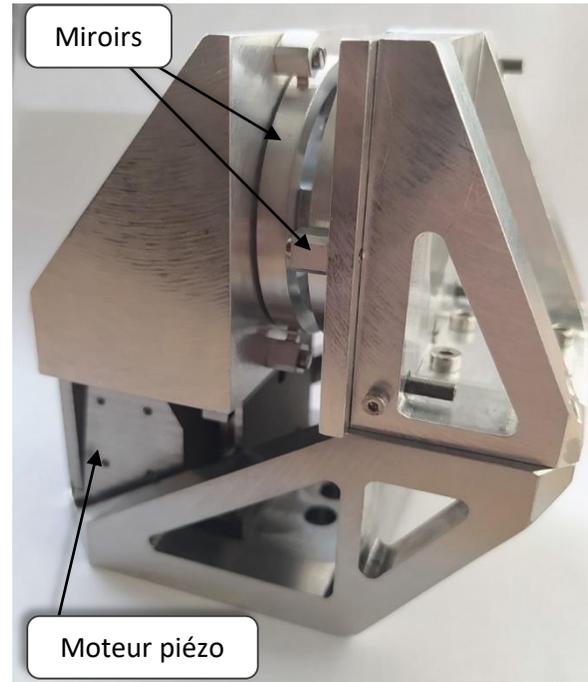


# Travail en cours : tests cryos complets

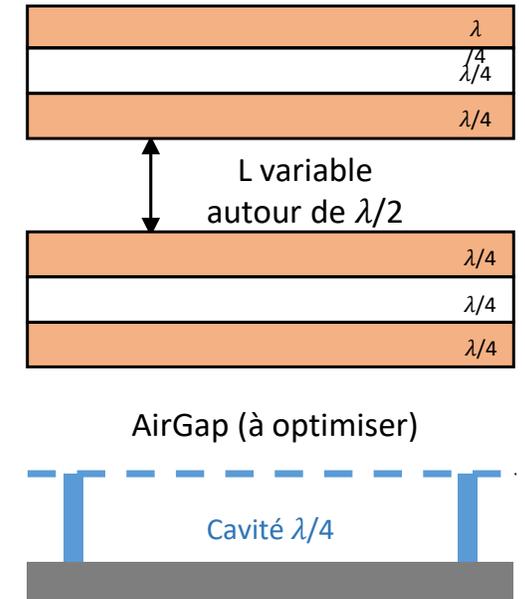
Un moteur piézoélectrique cryogénique sera utilisé dans ce montage pour tester les performances du FP à balayage.



Montage d'un des miroirs de Bragg du Fabry-Perot



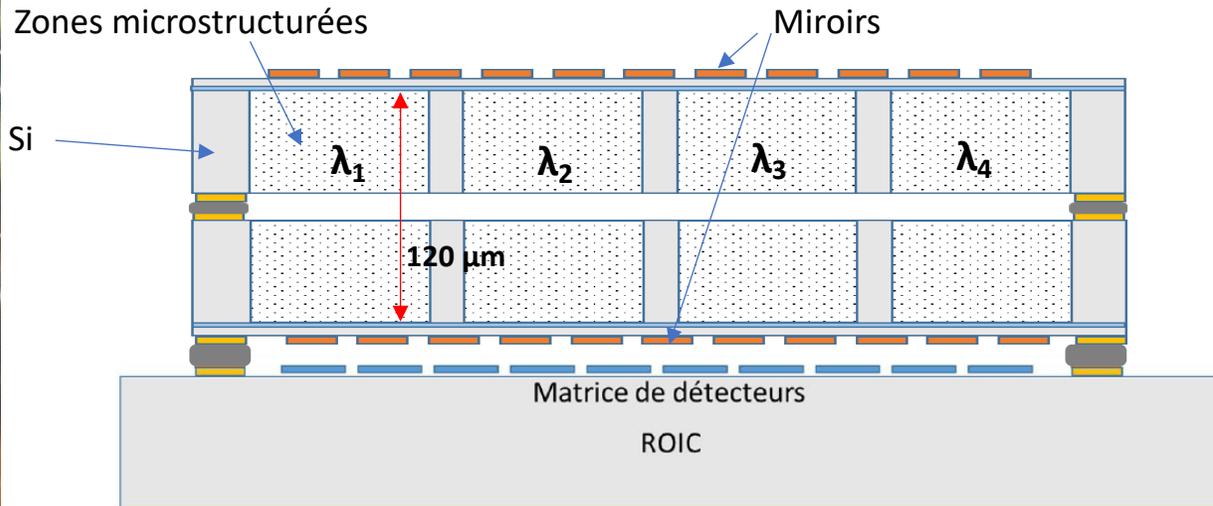
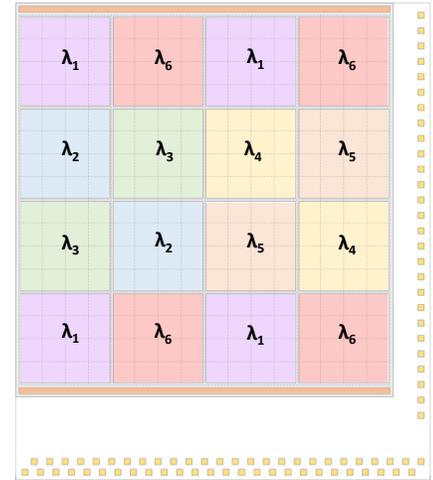
Prototype de test du Fabry-Perot à balayage



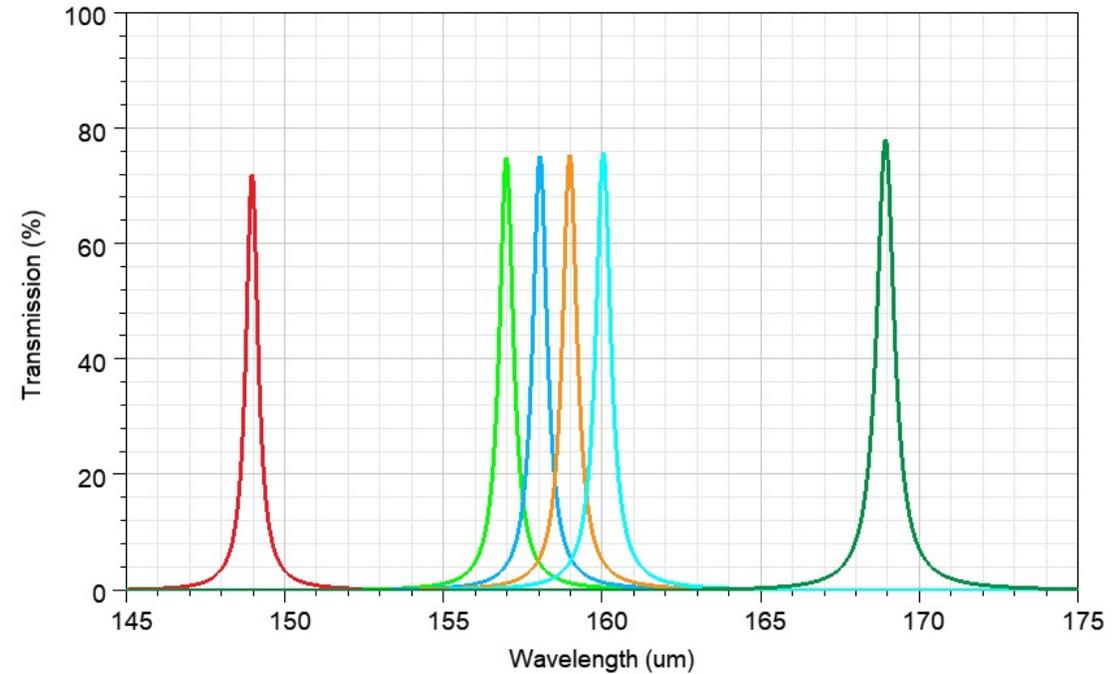
Thèse Timothée Tollet débutée en octobre 2021

# Système de type matrice de Bayer

- Plan focal de 12x12 mm (16x16 pixels de 750  $\mu\text{m}$ ) divisé en 4x4 zones de 3x3 mm.
- Chaque zone résonne a une longueur d'onde parmi 6 valeurs:
  - 4 valeurs décalées de 1  $\mu\text{m}$  autour de  $\lambda = 158 \mu\text{m}$
  - 2 valeurs décalées de  $\pm 10 \mu\text{m}$  autour de  $\lambda = 158 \mu\text{m}$



=> Financement FOCUS - LETI, sera testé dans le cadre de la thèse de Timothée.



---

# L. Rodriguez : les développements spectroscopiques futurs 2