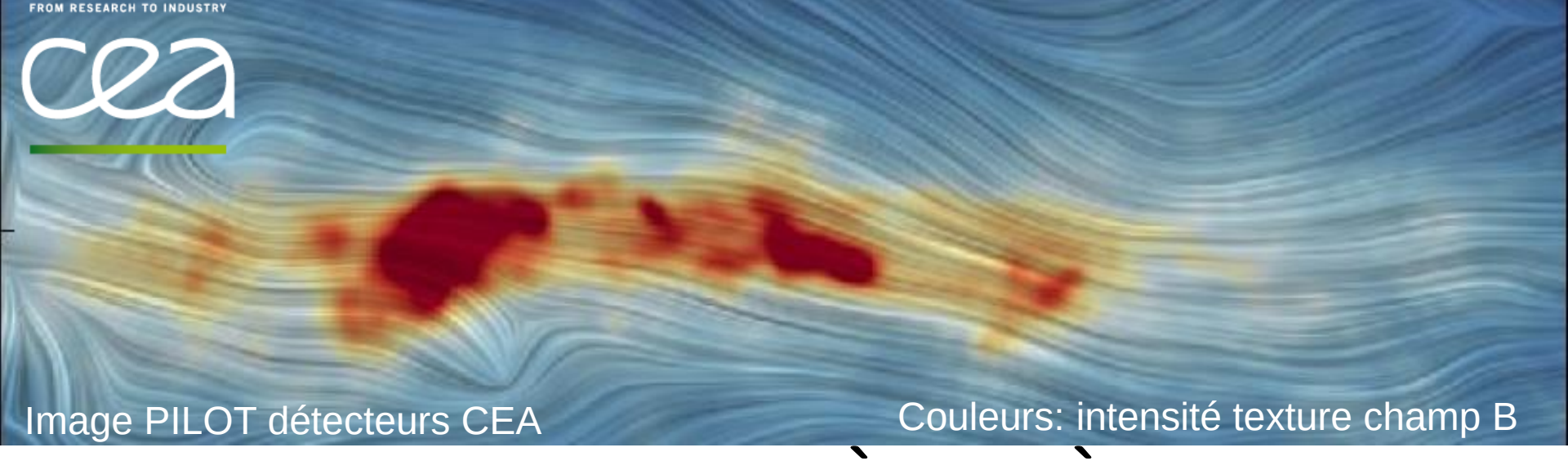
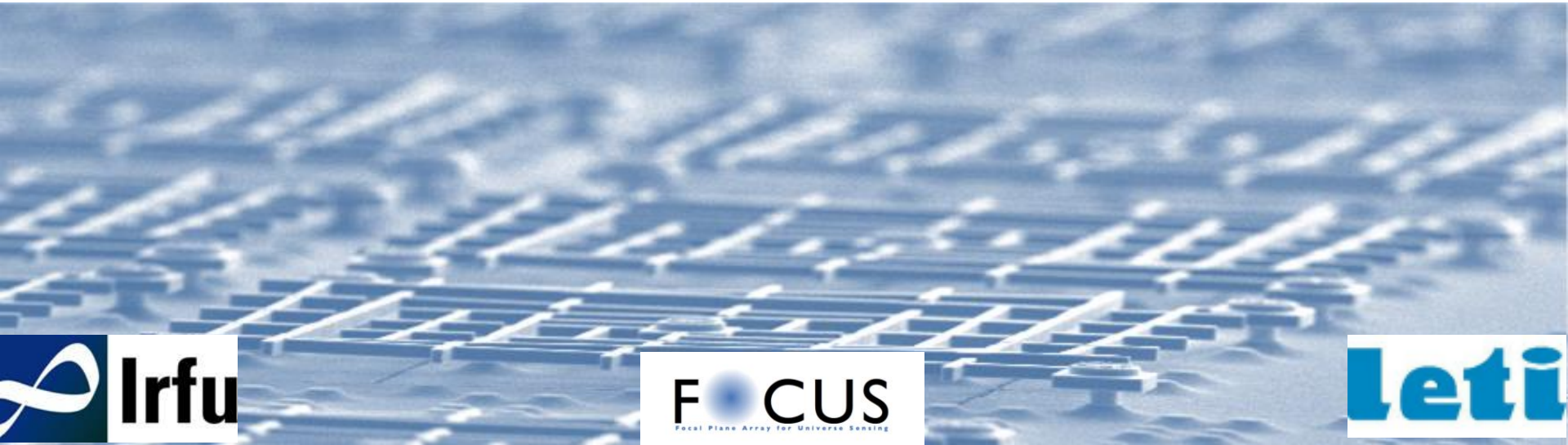


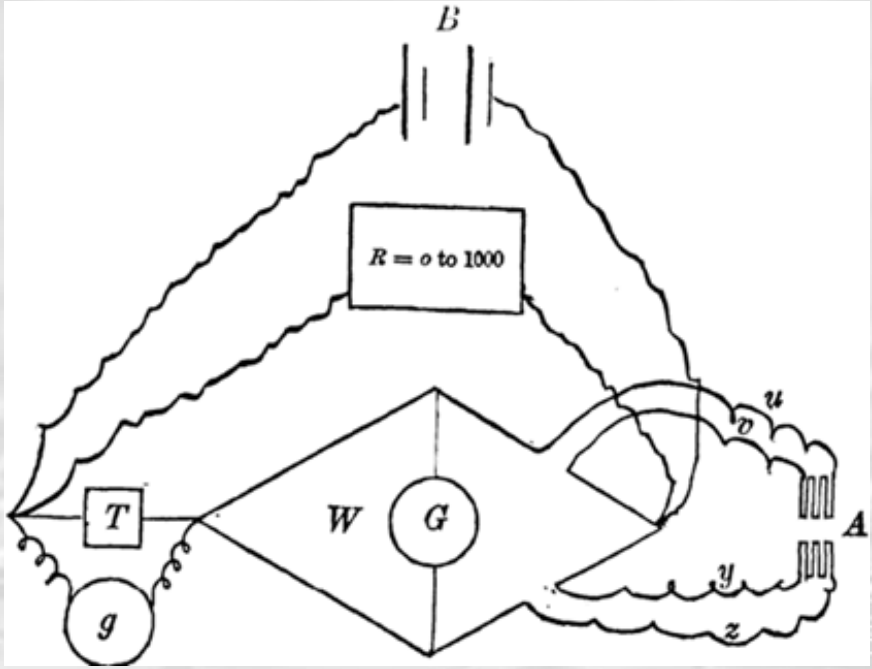
LES BOLOMÈTRES À SENSEURS MIS

Louis Rodriguez, UMR AIM/Département d'Astrophysique

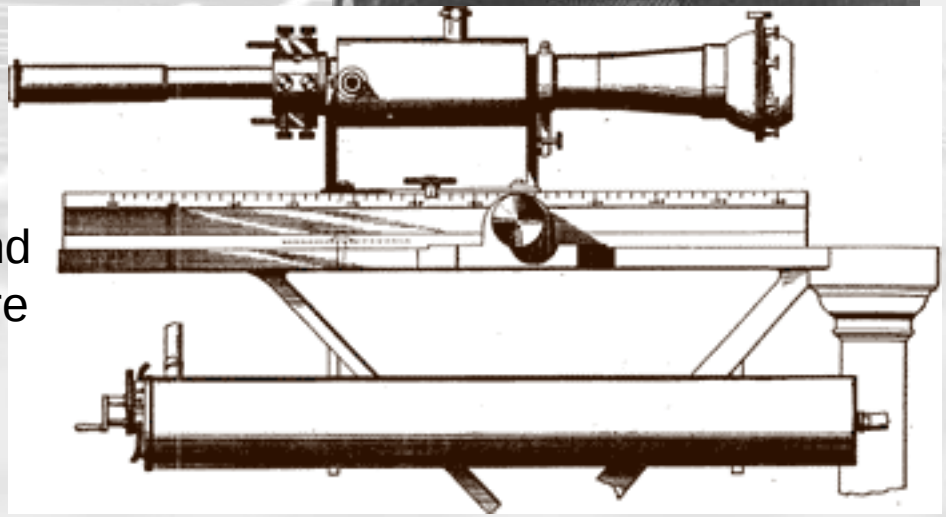


QU'EST-CE QU'UN BOLOMÈTRE

UNE VIEILLE HISTOIRE

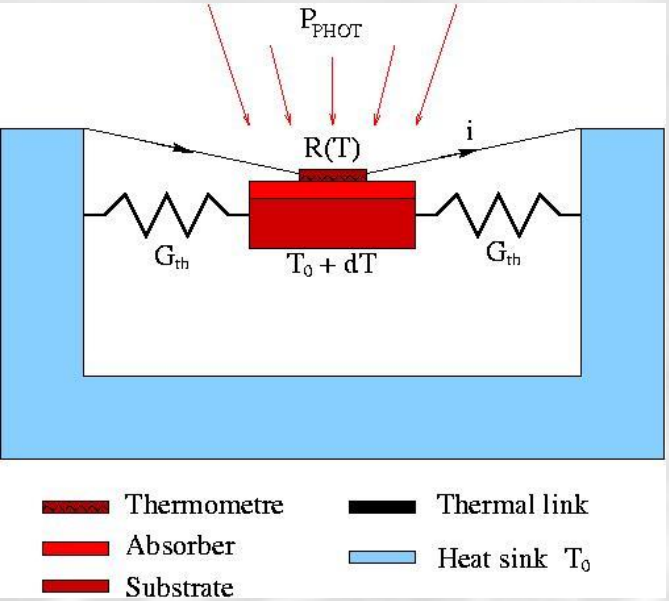


Samuel Pierpont Langley



It had the capability to detect radiation from a cow standing 400 meters away, and was sensitive to differences in temperature of 0.001K (Langley 1881).

COMMENT ÇA MARCHE ?



$$C_{th}\, dT/dt = P_{PHOT} + P_{JOULES} - G_{th}\,(T-T_0)$$

- Le paradoxe: il faut dissiper de la puissance électrique pour mesurer la puissance photonique.

- Quelle puissance ?

- La plus basse possible: $P_{joule} << P_{phot}$ => signal !

Le niveau de signal est trop faible: le bruit thermique domine.

- La plus haute possible: $P_{joule} >> P_{phot}$ => signal !

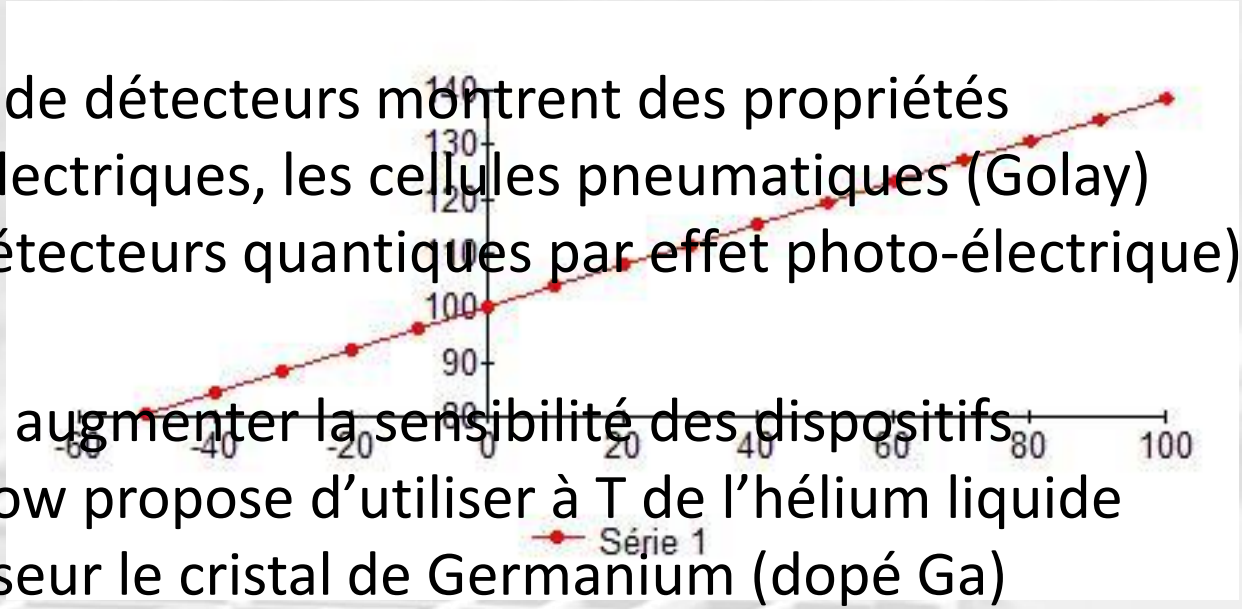
La température du bolomètre est dominée par la "chaleur Joule".

- **En pratique $P_{joule} \sim P_{phot}$!**

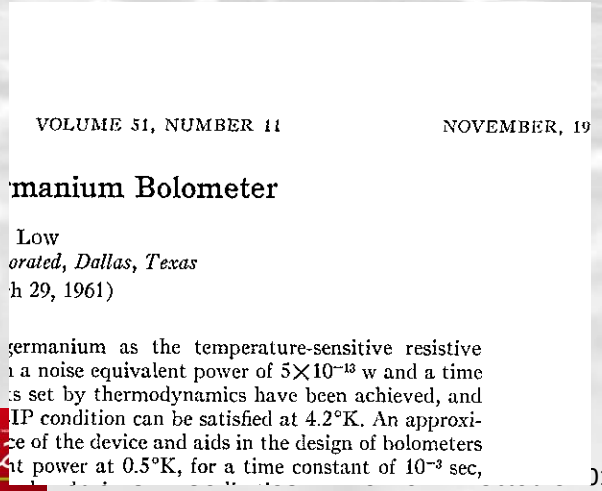
QUEL THERMOMÈTRE

Dans le cas du bolomètre de Langlay un métal: du platine

Plus tard, d'autres types de détecteurs montrent des propriétés Intéressantes : les Pyroélectriques, les cellules pneumatiques (Golay) les semi-conducteurs (détecteurs quantiques par effet photo-électrique)



Dans les années 60 pour augmenter la sensibilité des dispositifs Astronomiques Franck Low propose d'utiliser à T de l'hélium liquide un nouveau type de senseur le cristal de Germanium (dopé Ga)



VOLUME 51, NUMBER 11 NOVEMBER, 19

manium Bolometer

Low
orated, Dallas, Texas
h 29, 1961)

germanium as the temperature-sensitive resistive
a noise equivalent power of 5×10^{-13} w and a time
s set by thermodynamics have been achieved, and
IP condition can be satisfied at 4.2°K. An approxi-
ce of the device and aids in the design of bolometers
t power at 0.5°K, for a time constant of 10^{-3} sec,

$$R(T)=R_0(T_0/T)^A$$

$$\alpha(T)=1/R(dR/dT)=-A/T$$

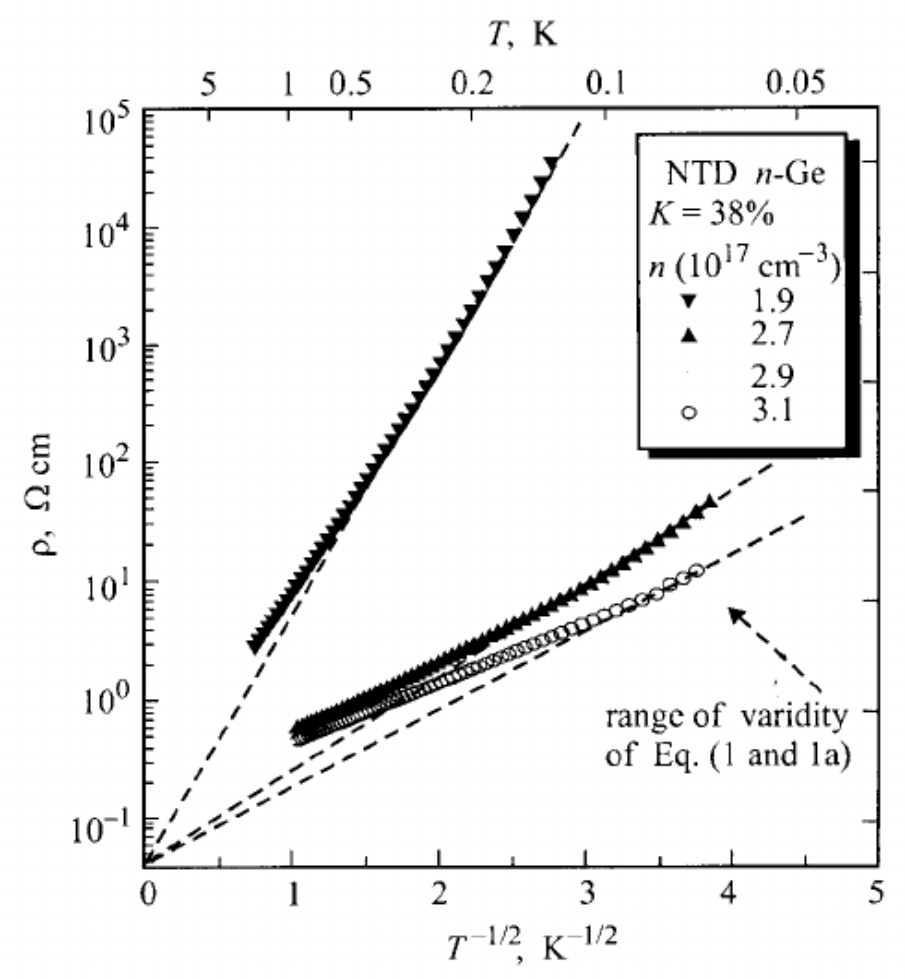
LES ISOLANTS D'ANDERSON

À la fin des années 50 et jusque dans les années 80 un intense travail théorique est mené en physique du solide à très basse température pour comprendre le comportement des semi-conducteurs et conducteurs à très basse T.
Anderson a montré (58) que le désordre introduit par des dopants dans un semi conducteur peut augmenter considérablement les propriétés isolantes des matériaux.
Mott 10 ans plus tard étudie le comportement près de la transition métal-isolant des semi-conducteurs et établit une loi décrite par une transition par sauts à distance variable (VRH):

$$R(T)=R_0(T_M/T)^A$$

Avec A=1/4

LA CONDUCTION PAR SAUT EFROS-SHKLOVSKII



On constate expérimentalement pour le germanium transmuté (NTD) qu'autour de 500 mK on assiste à un changement de régime

$$R(T)=R_0(T_{ES}/T)^A$$

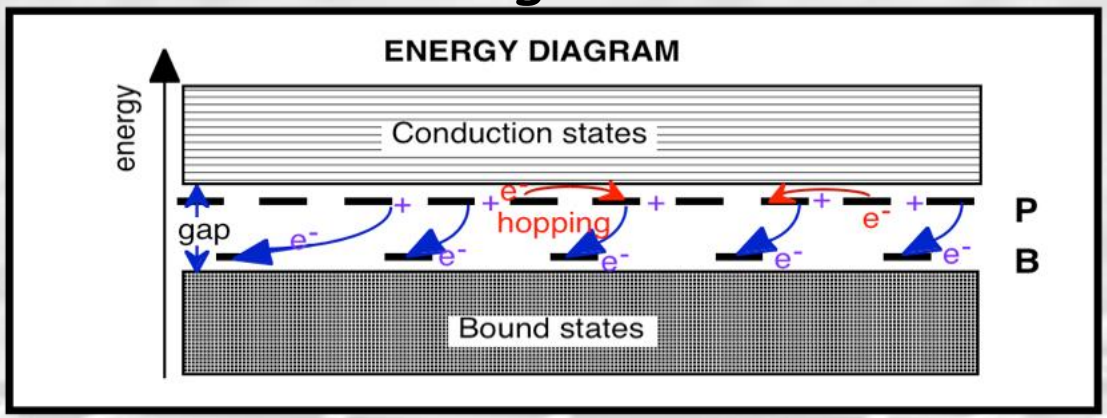
Ici avec A=1/2

Le **Ge** permet depuis longtemps de faire des bolomètres composites, mais peut on avoir une technologie tout intégrée ?

=> **Silicium ?**

La conduction par saut (hyper-simplifiée)

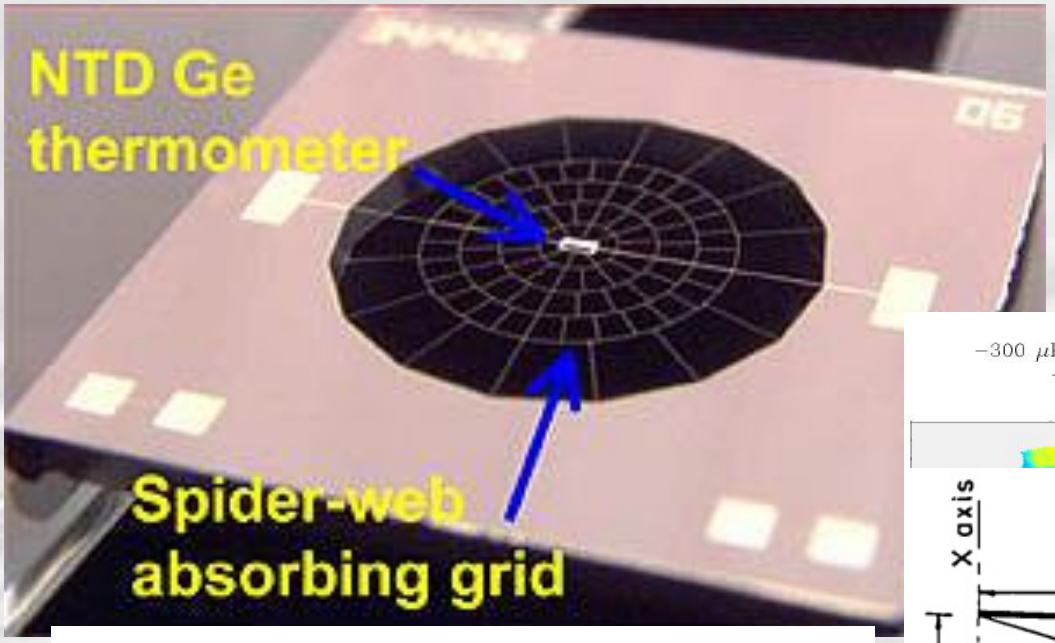
- A (très) basse température les semi conducteurs habituels sont "gelés": pas de charges mobiles.
- Par le processus de compensation on peut "redonner" de la mobilité aux charges.

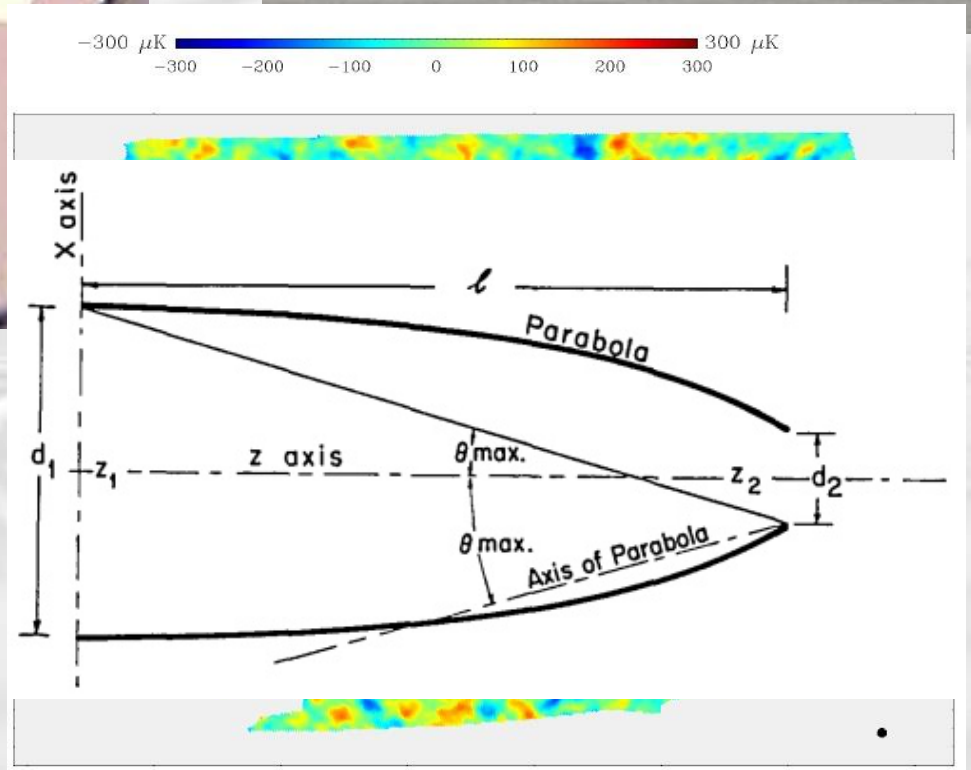


Conduction par saut aléatoire activée thermiquement. Petite asymétrie dans la direction du saut due au champ électrique de polarisation. Les états d'énergie de chacun de ces sites se combinent pour créer une "bande de conduction" et les interactions électron-élctron à grande distance développer le pseudo gap de Coulomb.

Les Spider web et la détection moderne

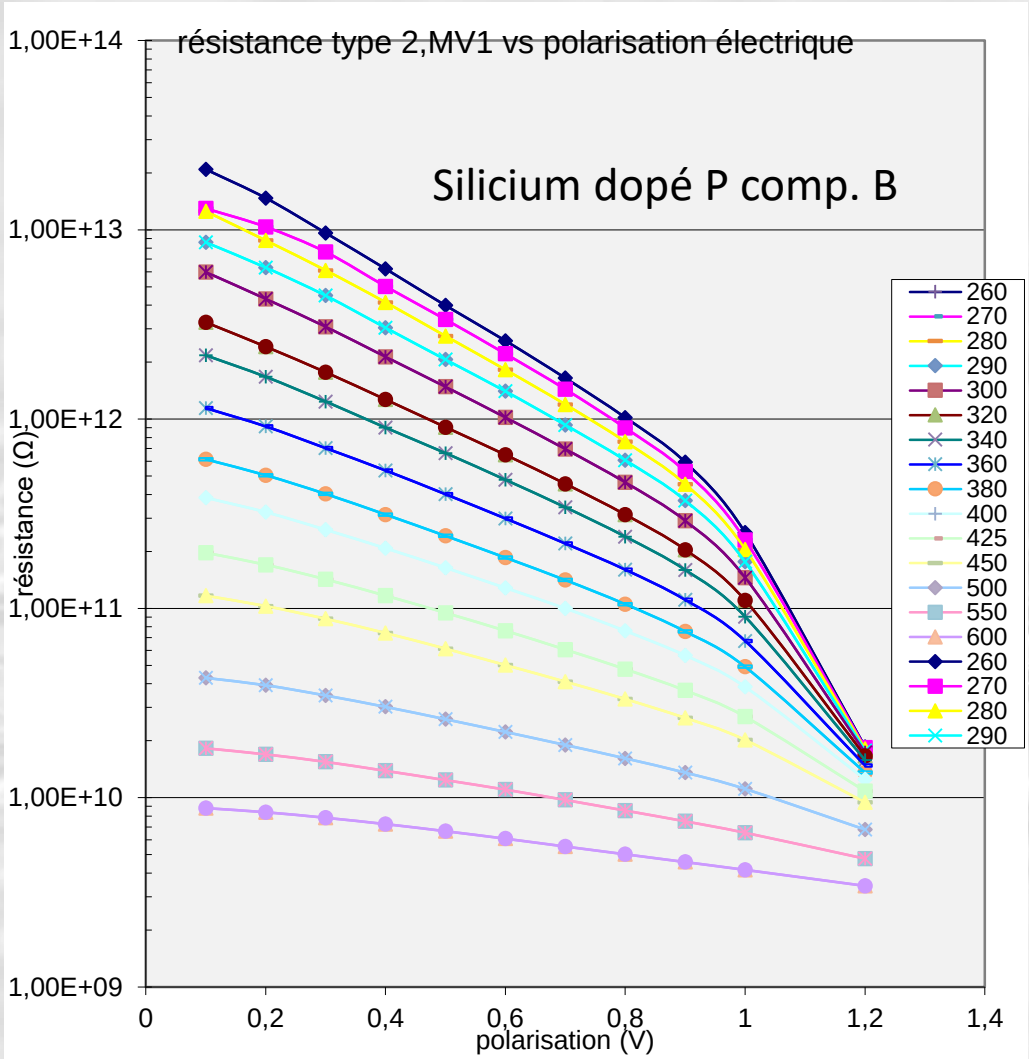
Dans les années 80-90 le JPL propose le concept de spider Web => microfabrication





Détecteurs des années 2000

- Loi de Efros –Shklovskii en régime de champ fort.

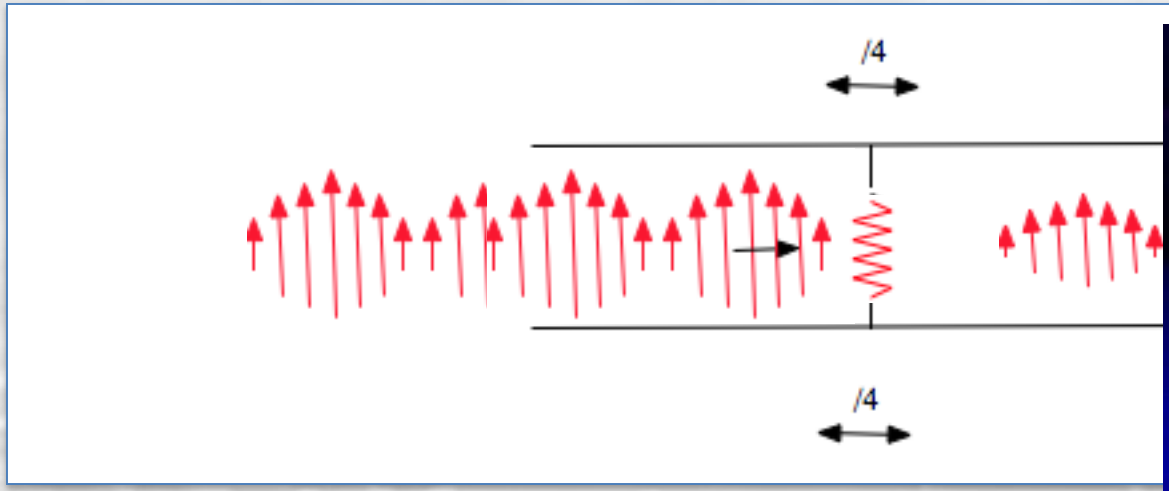


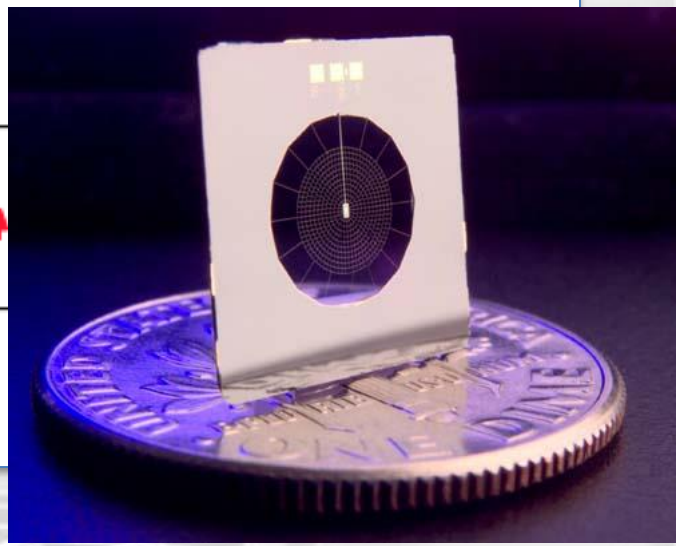
$$R_{bolo} = R_0 \exp\left(\sqrt{\frac{T_0}{T_b}}\right) \exp\left(-\frac{qL_{(T)}E}{kT_b}\right)$$

Quand on "pousse" encore le champ électrique, on entre dans un nouveau régime: le découplage électrons-phonons

L'absorption de l'onde

- Une couche résistive optimisée (mince).





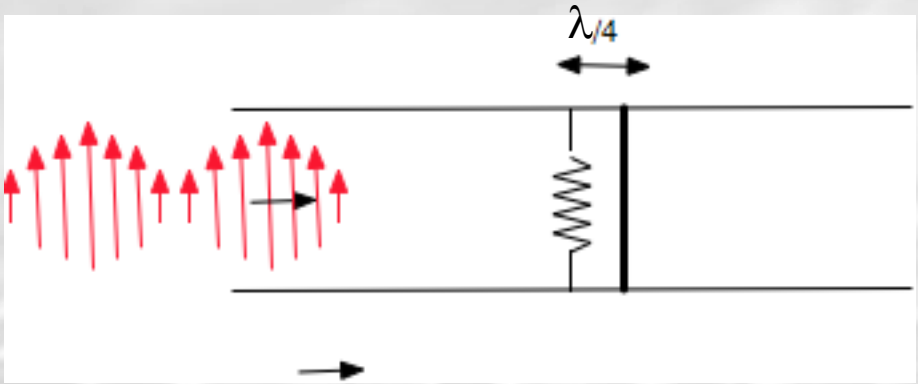
Absorption 50% pour un passage si R□ =188Ω/□

Multiplier les passages pour épuiser l'onde:

=>l'absorbeur est au centre d'une cavité intégrante.

L'absorption de l'onde

- Éliminer la composante B de l'onde.
  - Méthode exposée vers 1940 par Denisson & Hadley



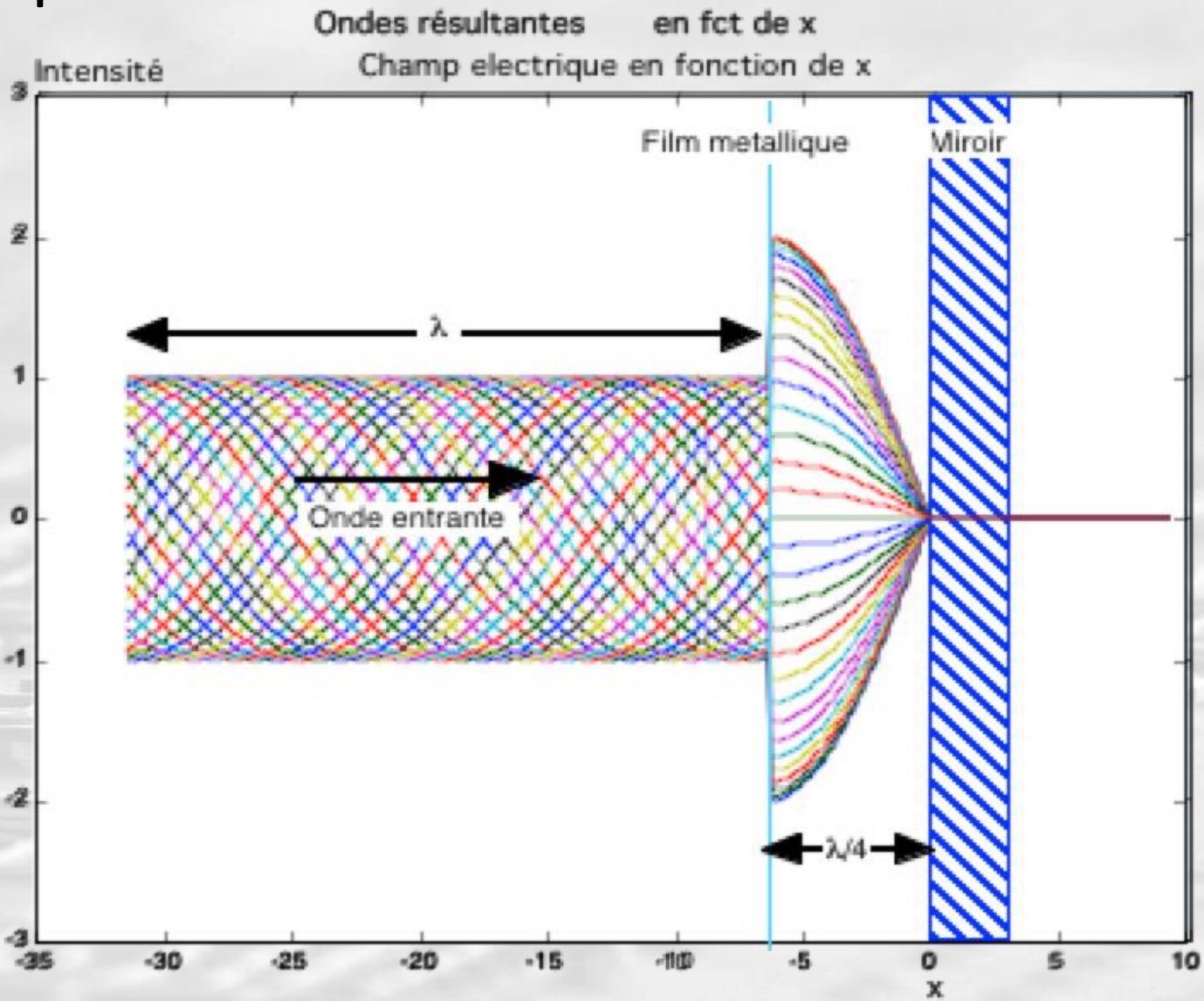
On crée une onde stationnaire dont les ventres de champ E sont à $\lambda/4$, $3\lambda/4$ etc…

Et une onde stationnaire B dont les ventres sont à $\lambda/2$, λ, $3\lambda/2$…

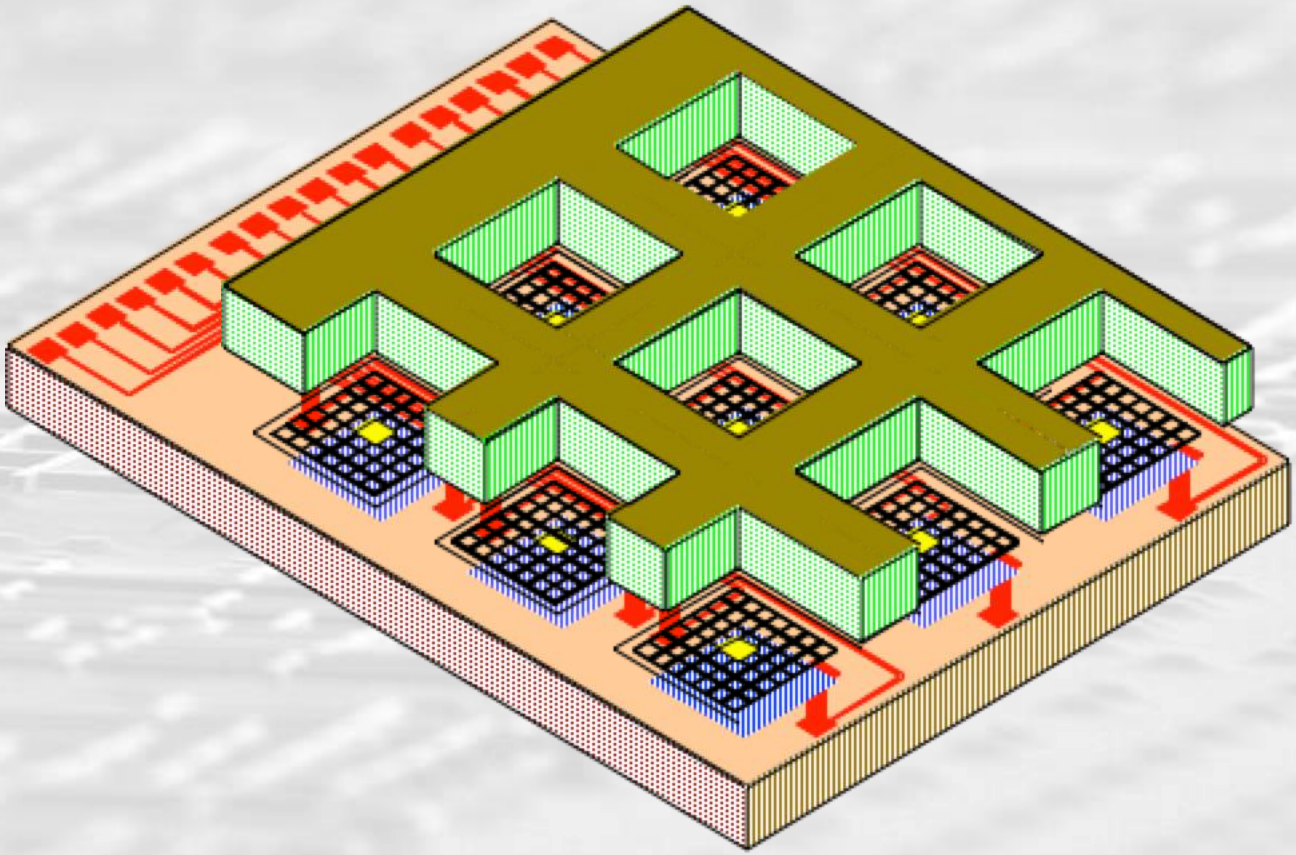
- Si on place l'absorbeur à $\lambda/4$ et que son impédance de surface est de $377\Omega/\square$.

On peut absorber 100% de l'onde incidente en 1 passage !!!

L'absorption de l'onde

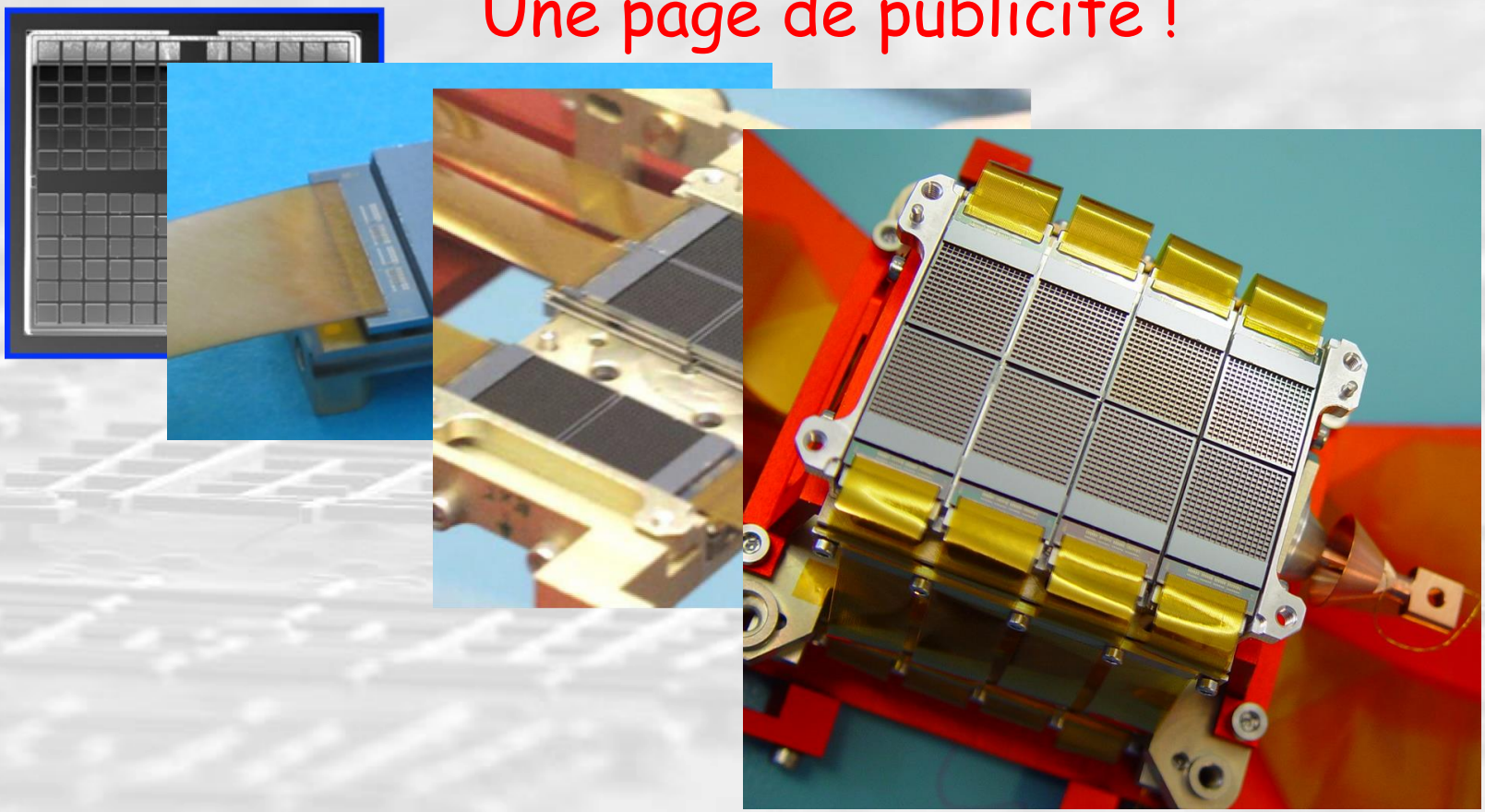


Les Matrices de PACS sur l'observatoire Herschel



Détecteurs des années 2000

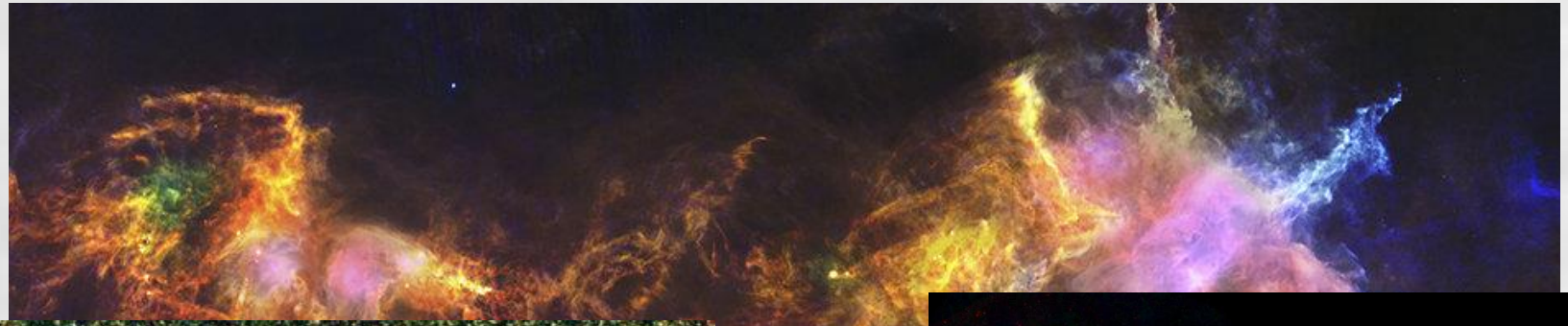
Une page de publicité !

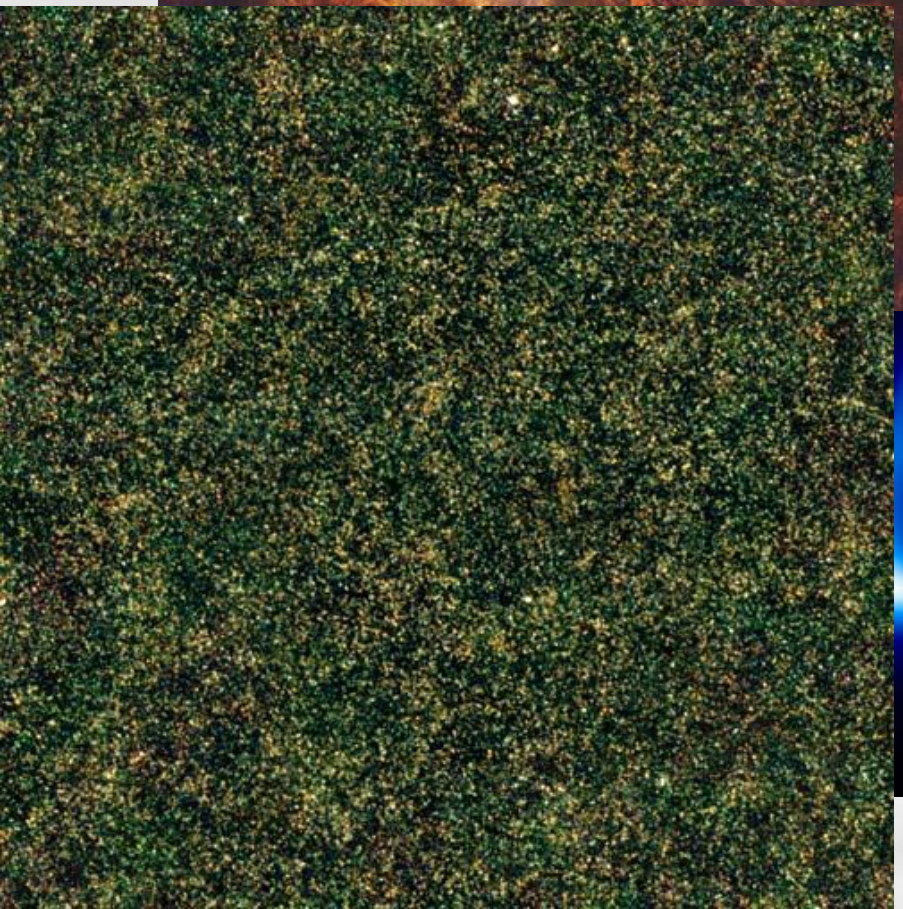


Première lumière

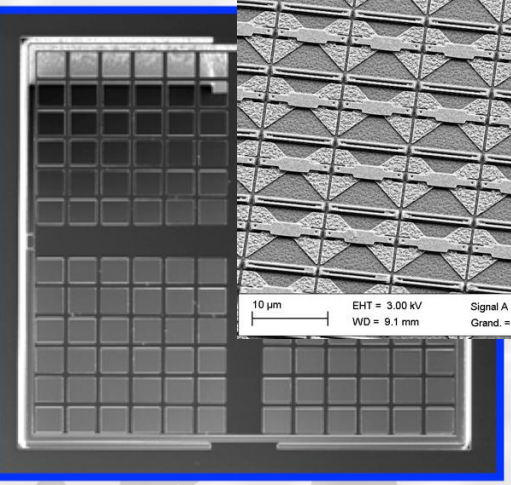
1ere image de Herschel
Sortie directe quelques heures après la mise en route de la partie observatoire (aucun traitement)

Le retour scientifique…

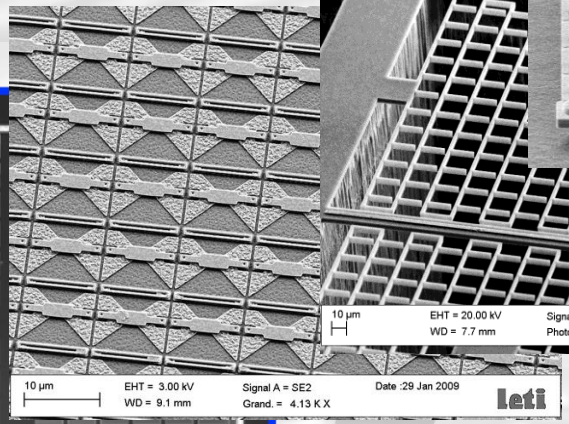




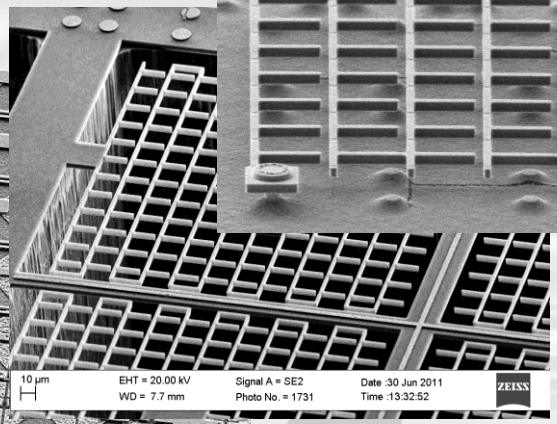
ÉVOLUTION DES DÉTECTEURS Si DEPUIS HERSCHEL



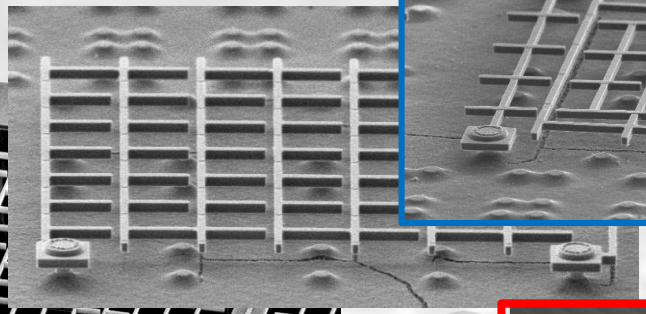
2000-2010



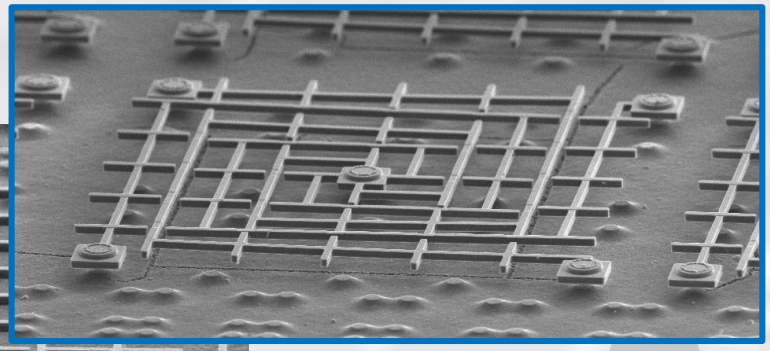
2009



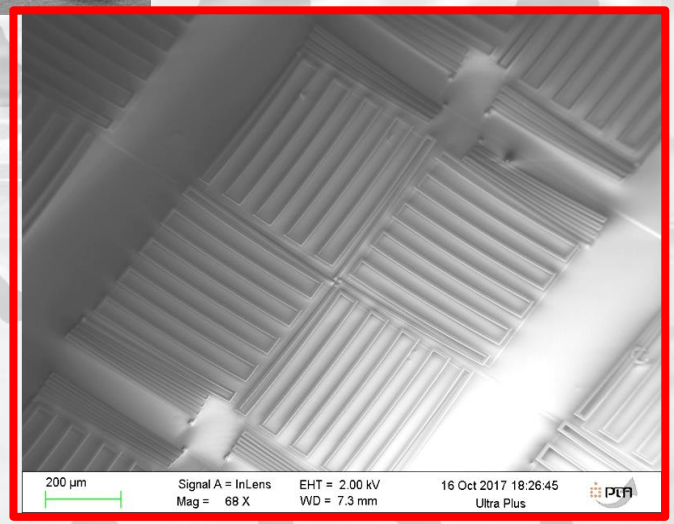
2011



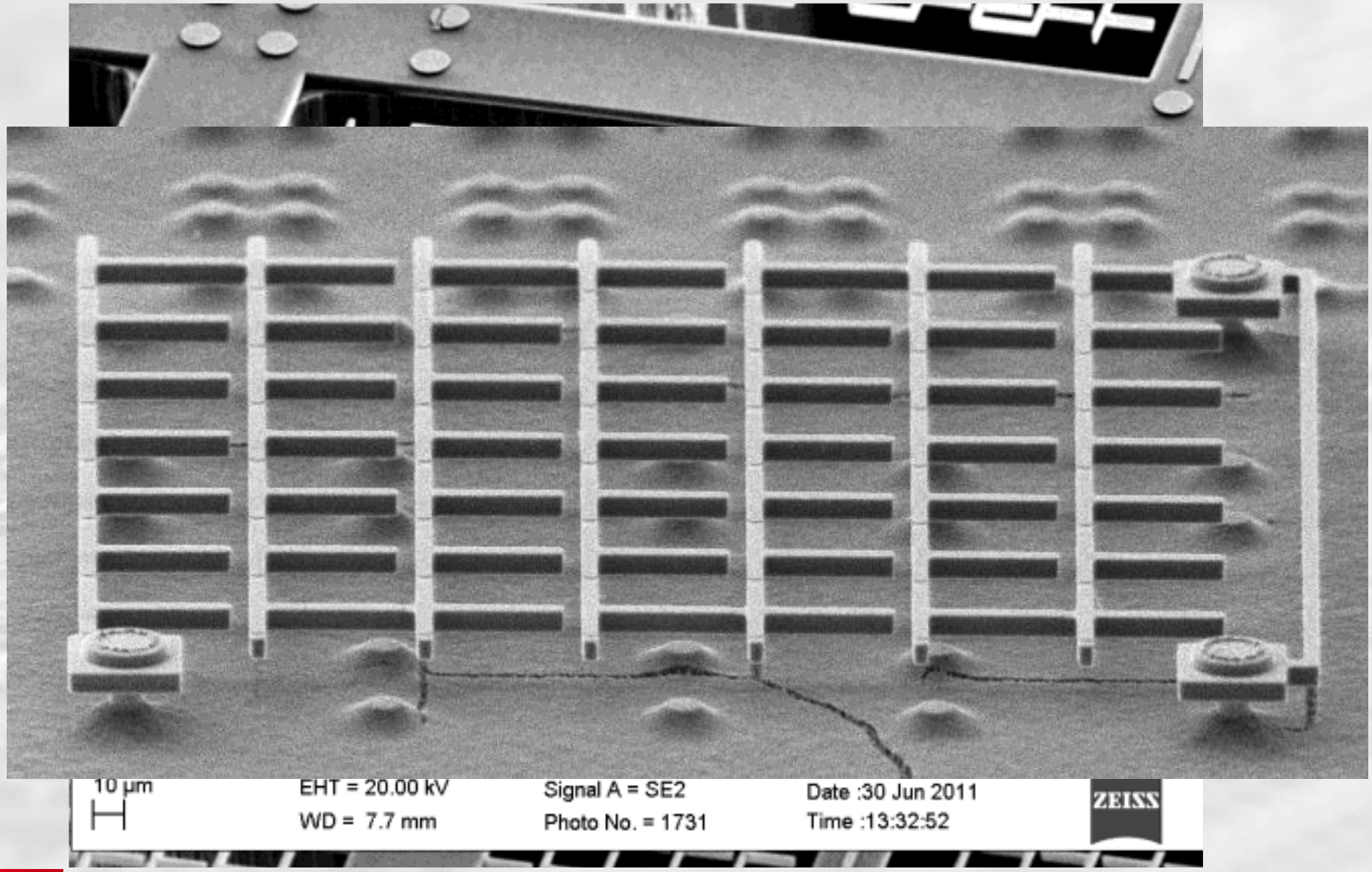
2013



2014-2017



INTÉGRATION DES FONCTIONS DANS LE PIXEL

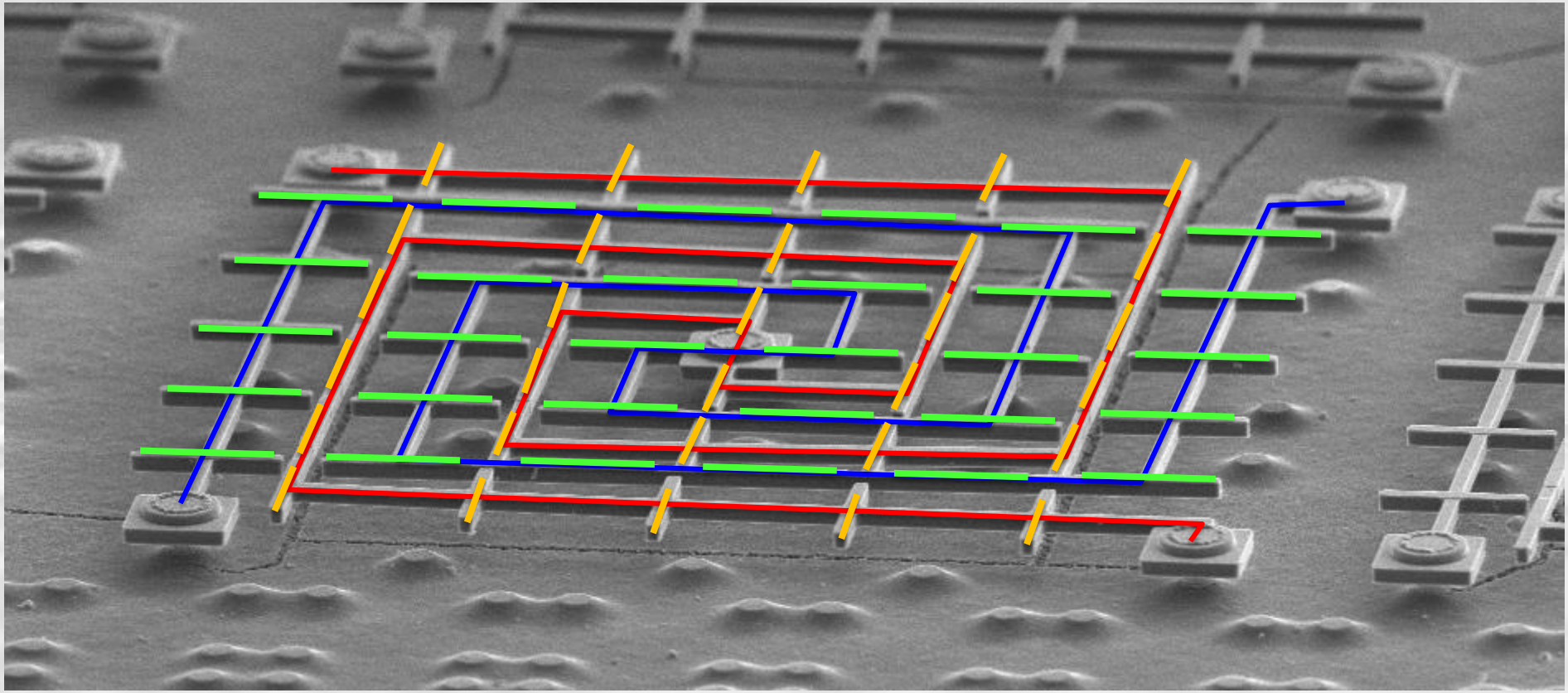


2011

DES FONCTIONS AVANCÉES POUR…
… DES DÉTECTEURS ULTRASENSIBLES

DES DÉTECTEURS SENSIBLES À LA POLARISATION

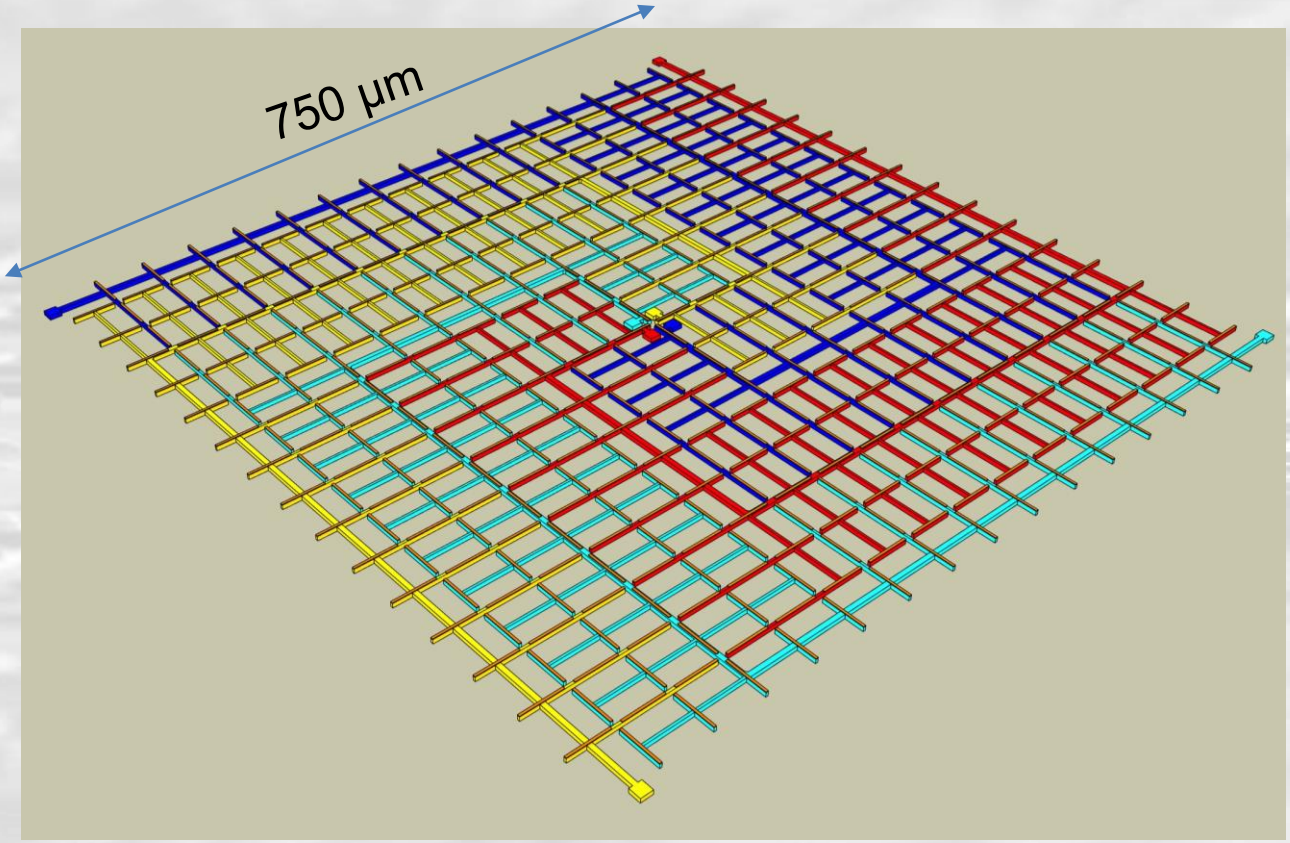
Imaginée en 2012 →réalisée en 2014



ON RAFFINE LE MODÈLE POUR UNE OPTIQUE SPATIALE

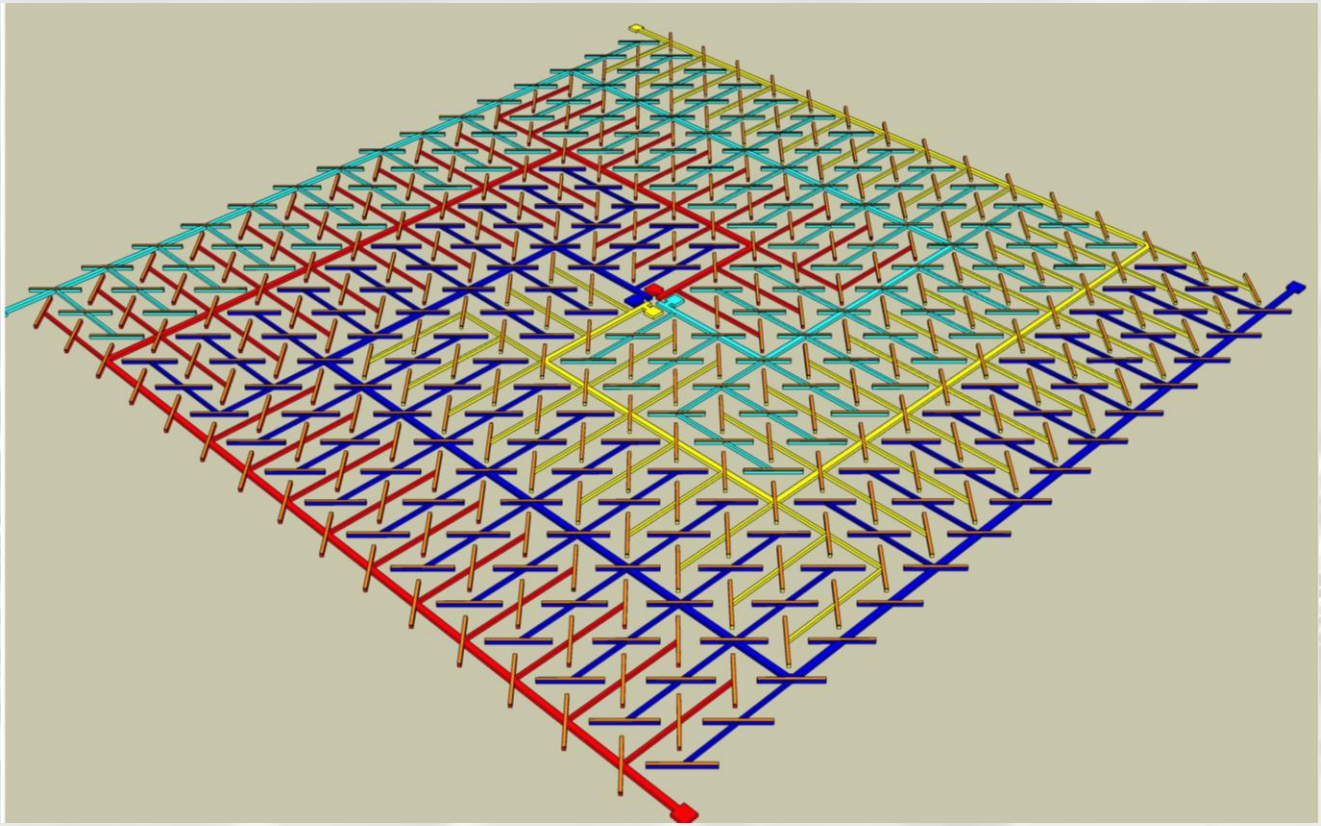
Étude réalisée par S Bounissou (Doc), O Adami (Post Doc), A Poglitsch (Coll. Etranger)

→ Optimisation des dipôles absorbeurs, du X talk, du design des spirales, des pixels Stokes, optique de l'instrument et évaluation des performances finales.



PIXELS DE STOKES

Les absorbeurs ont été tournés de 45 de façon à effectuer une mesure selon au moins 3 angles et accéder aux paramètres de Stokes I,Q,U

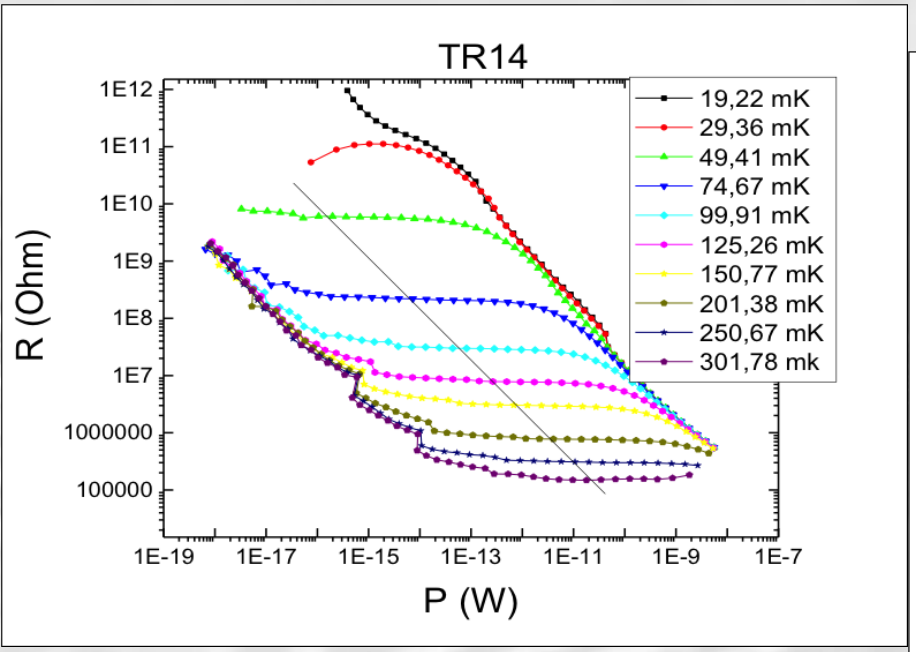


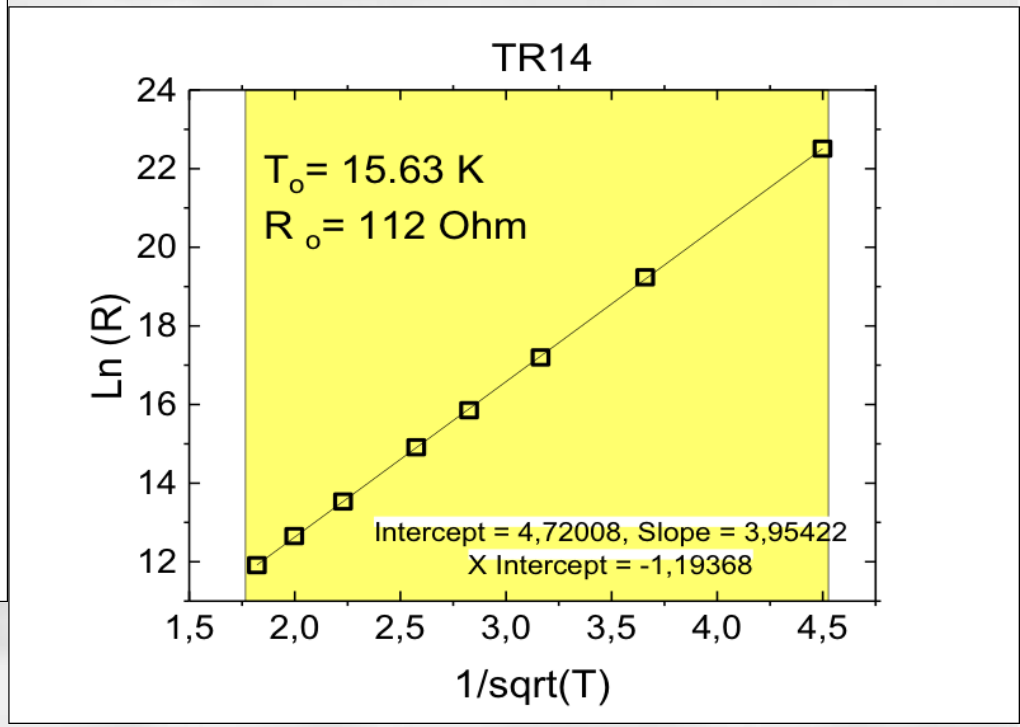
Et en même temps augmenter la sensibilité

Selon le paramètre alpha décrit plus haut pour ce qui est du senseur thermique descendre en température 300 mK -> 50 mK

Étapes :

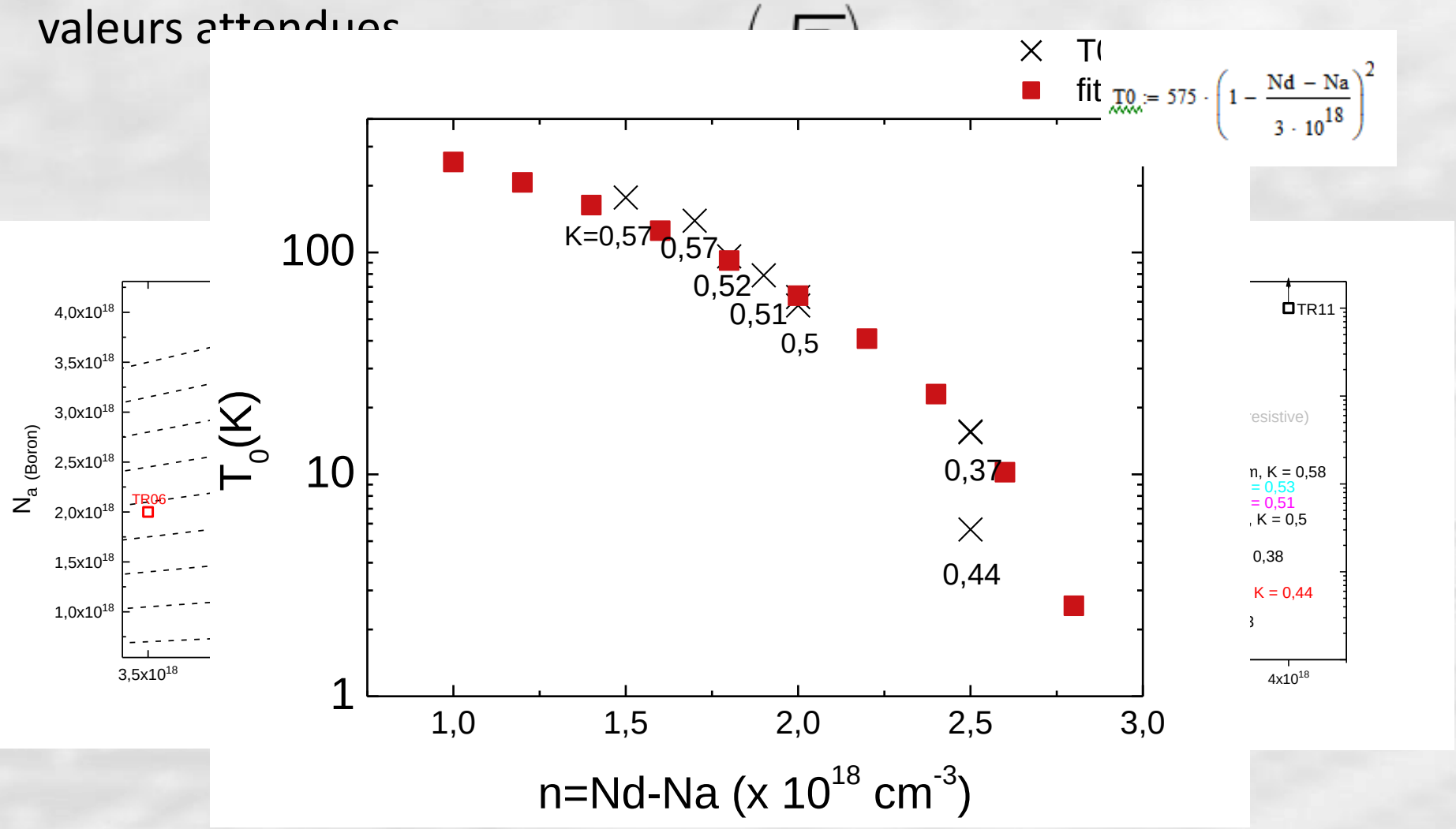
I(V) → R(P) → R0 & T0 → T0 (dopages P et B)



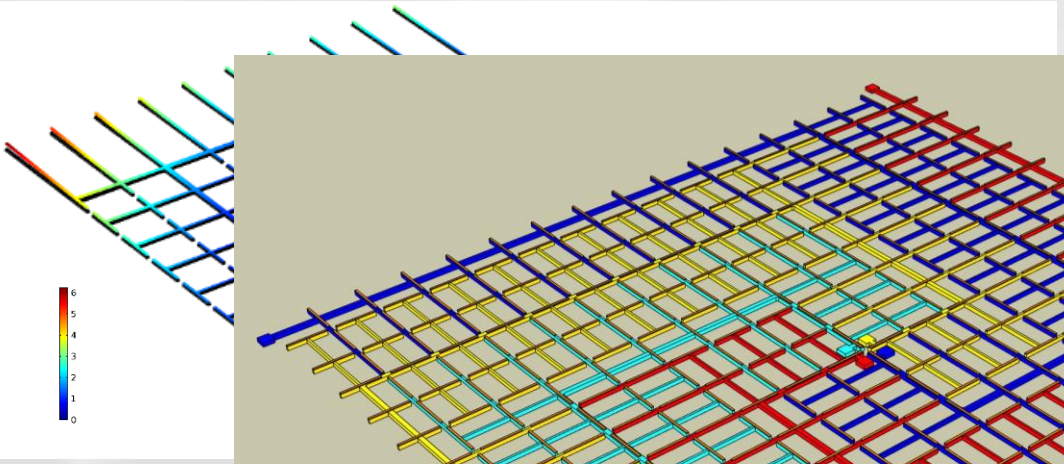


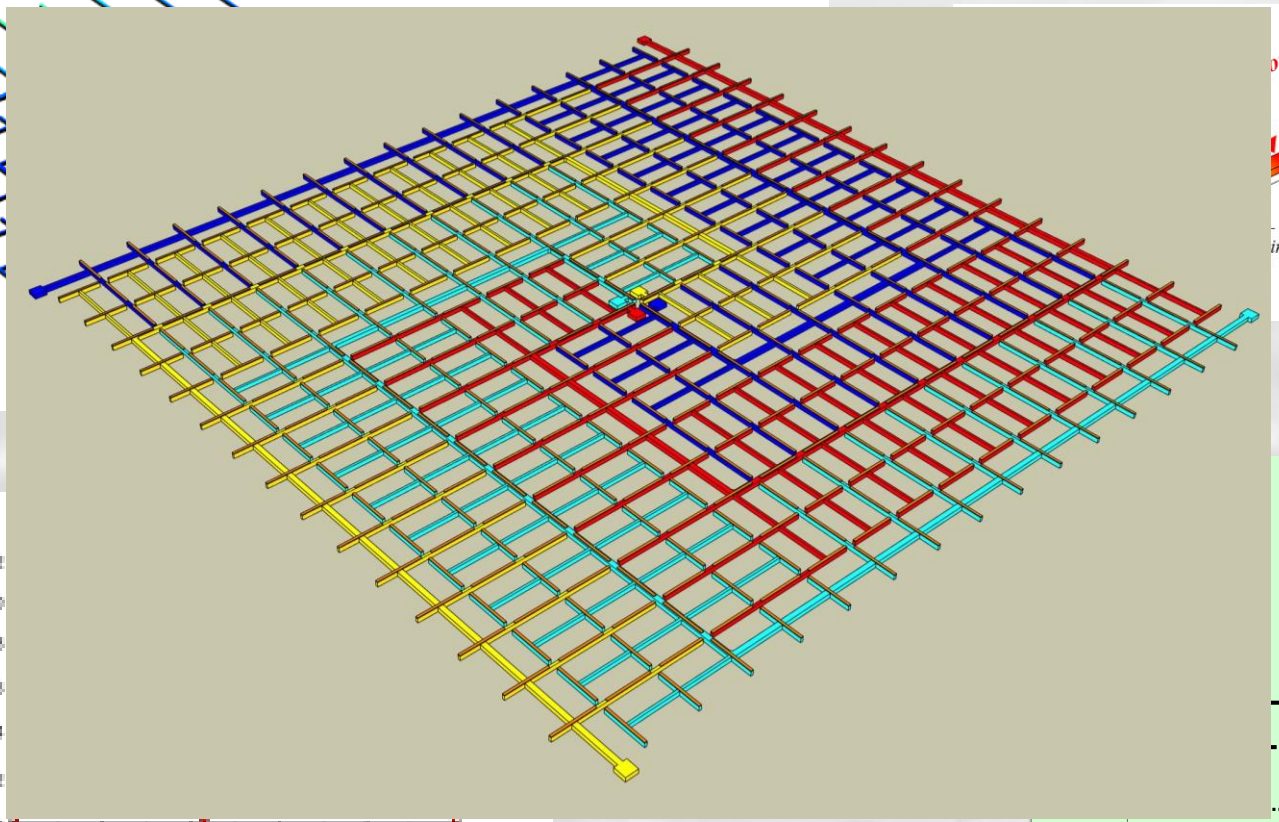
DOPAGES

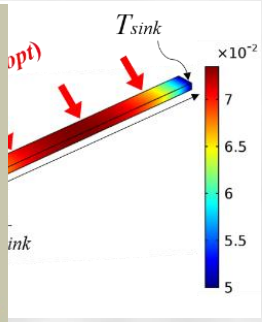
Et en explorant une gamme exhaustive de dopages autour des valeurs attendues

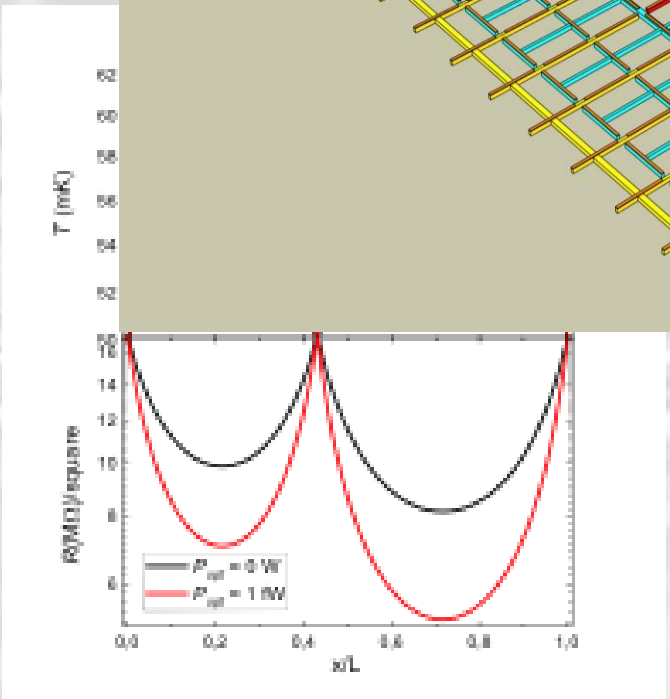


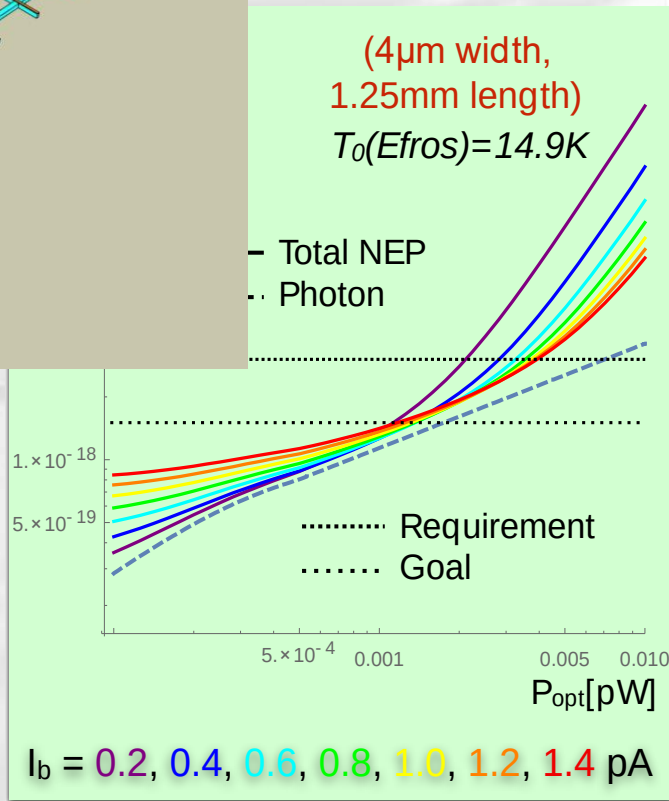
Démarche de modélisation





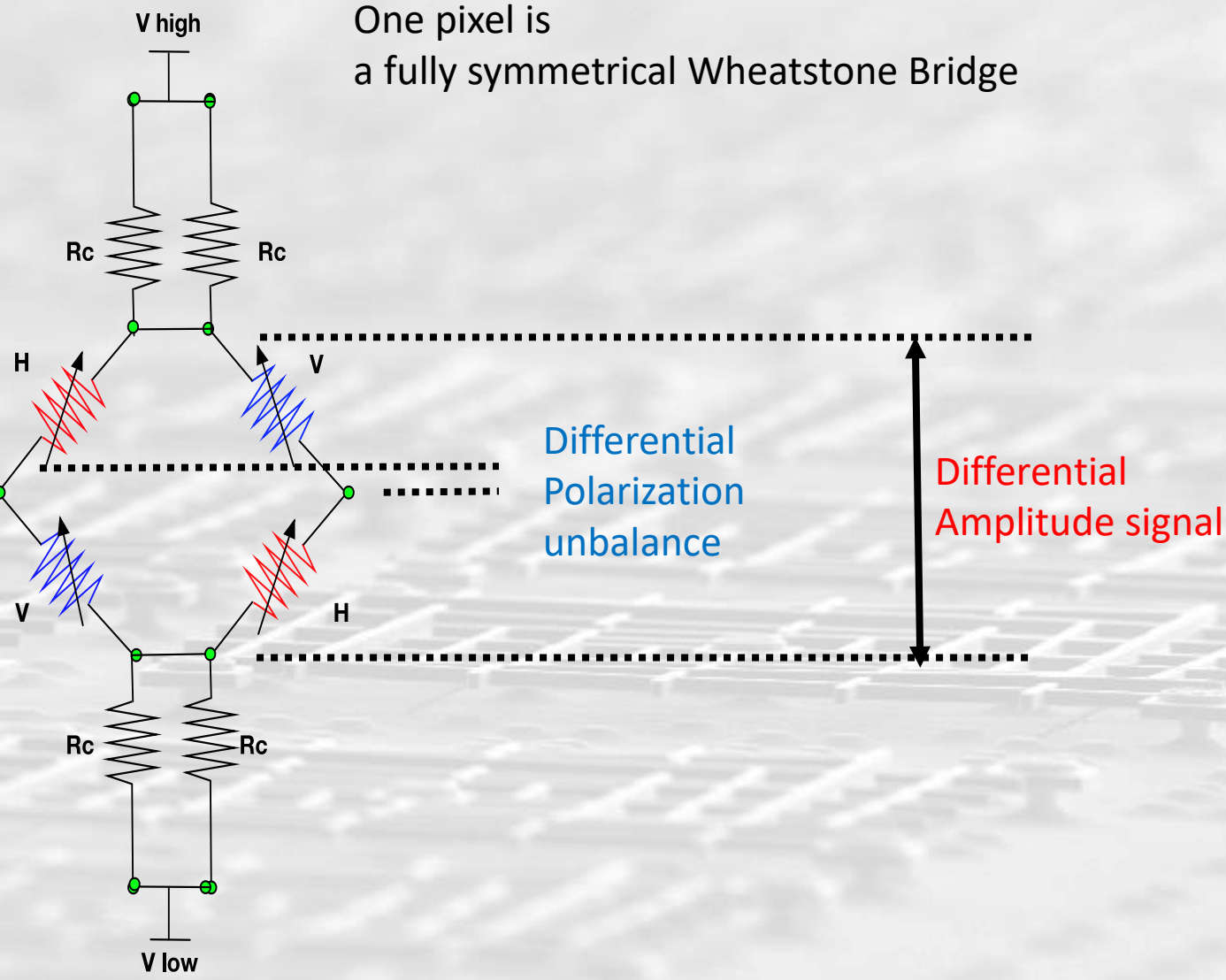






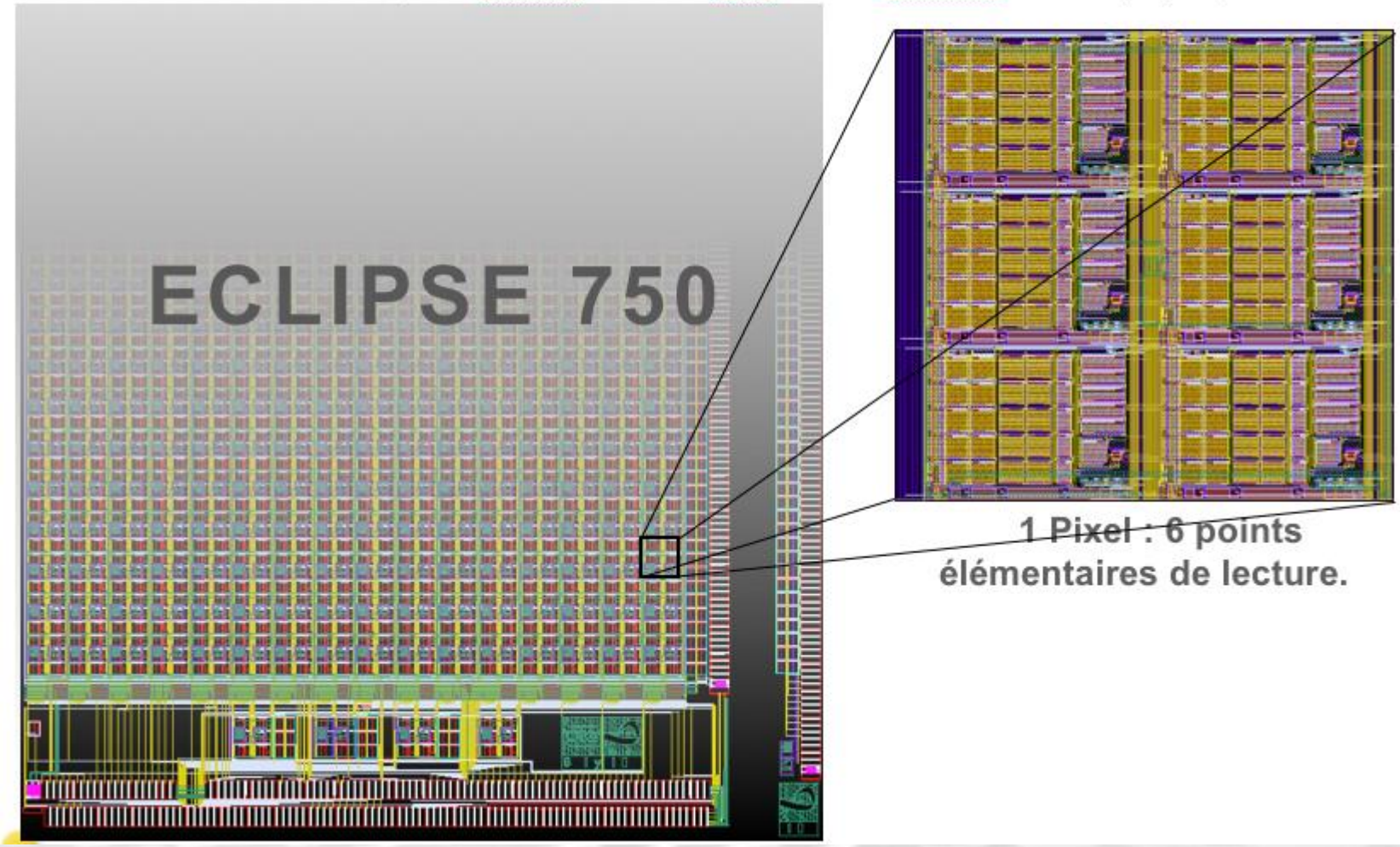
Techno « above IC »

One pixel is
a fully symmetrical Wheatstone Bridge



ECLIPSE 750:

CMOS AMS 350nm, 300 PADs. 50-100 mK, 1536 readout circuits, 1µW, 1.7 cm²



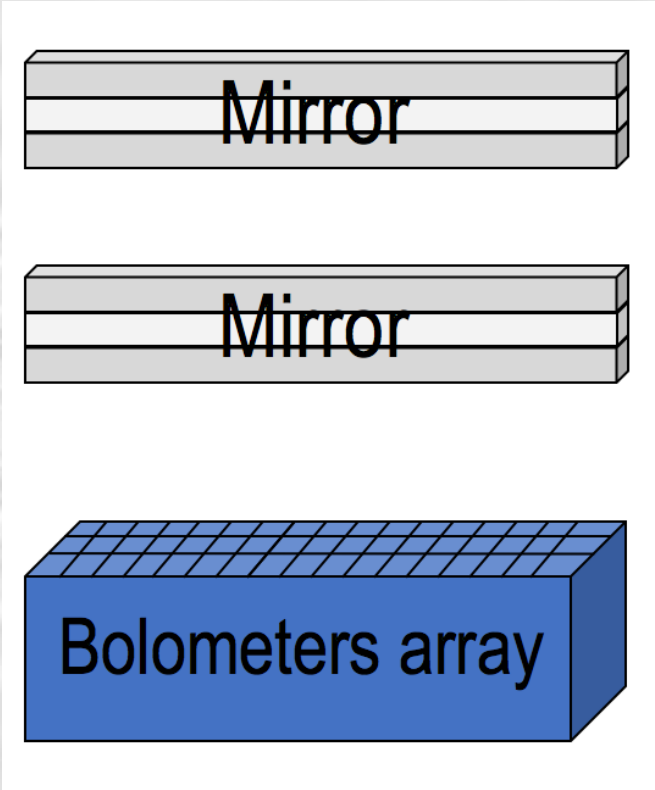
Ouvertures (i)

Peut on introduire de nouvelles fonctions dans le PIXEL ?

SPECTROSCOPIE (Sophie Bounissou)

→ Introduce the spectrometer inside the detection module (combine spectroscopy and imaging in a single device)

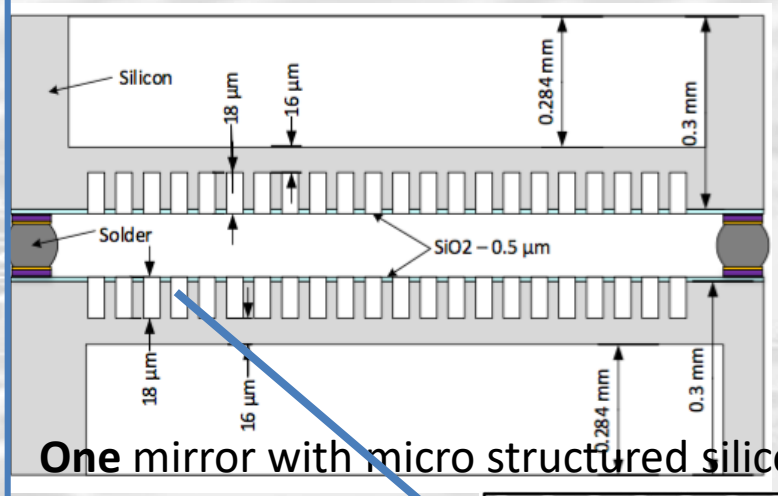
→ Add a Fabry Perot just above the detector (distance ~ λ between the Fabry Perot (FP) and the detector)



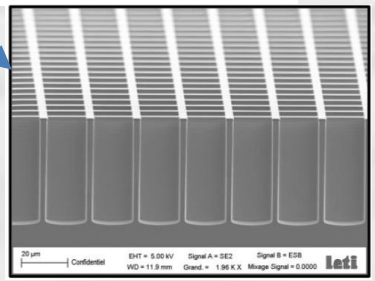
Mirrors:

We want to use silicon mirrors to prevent any loss

Layout : Bragg mirrors H/L/H (or more complex)

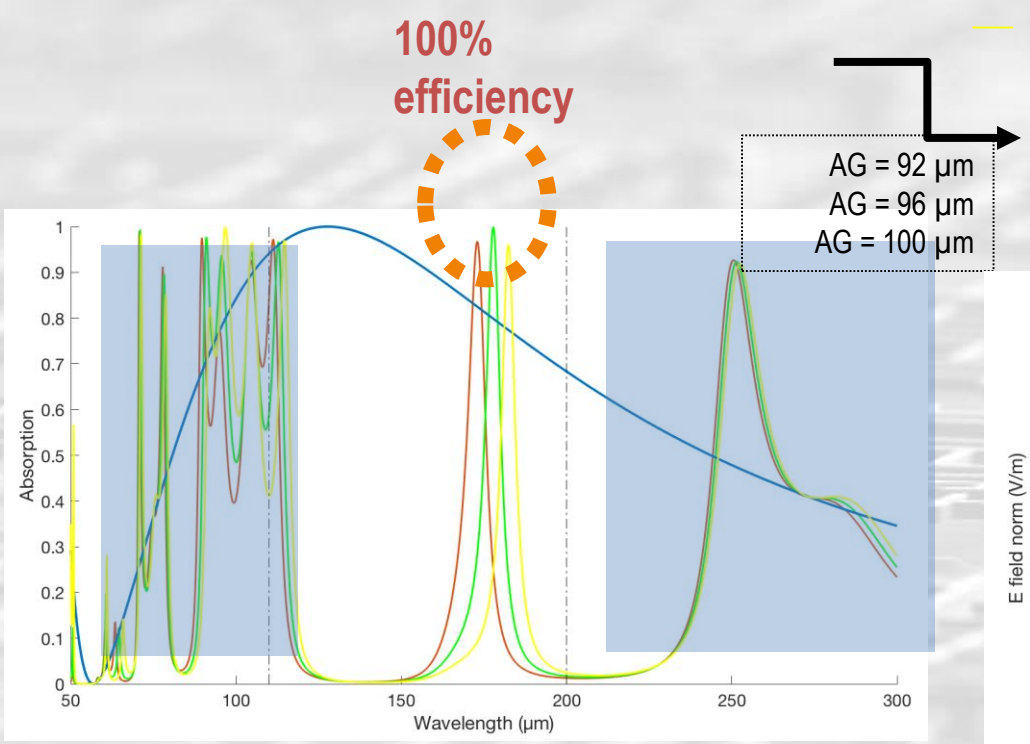


One mirror with micro structured silicon

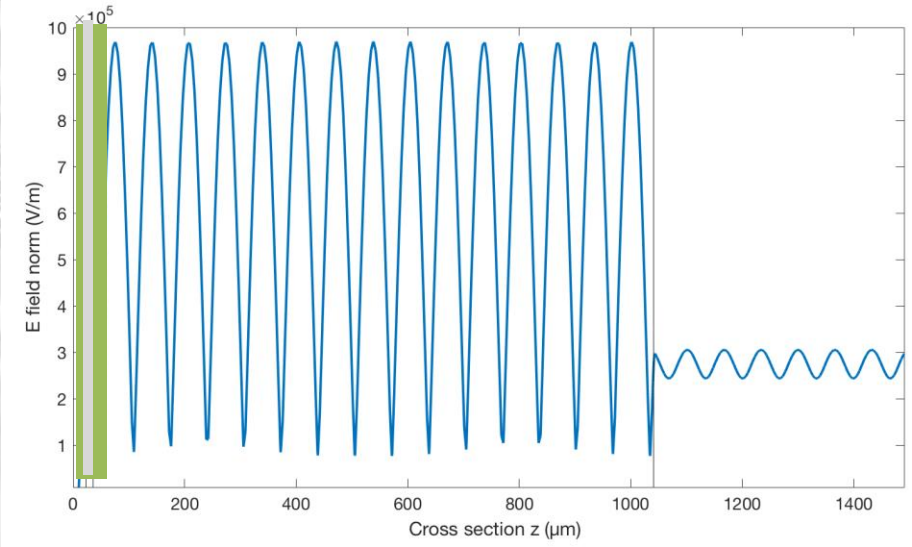


Spectro ON chip

- Scan the spectral band by tuning the Fabry Perot Interferometer

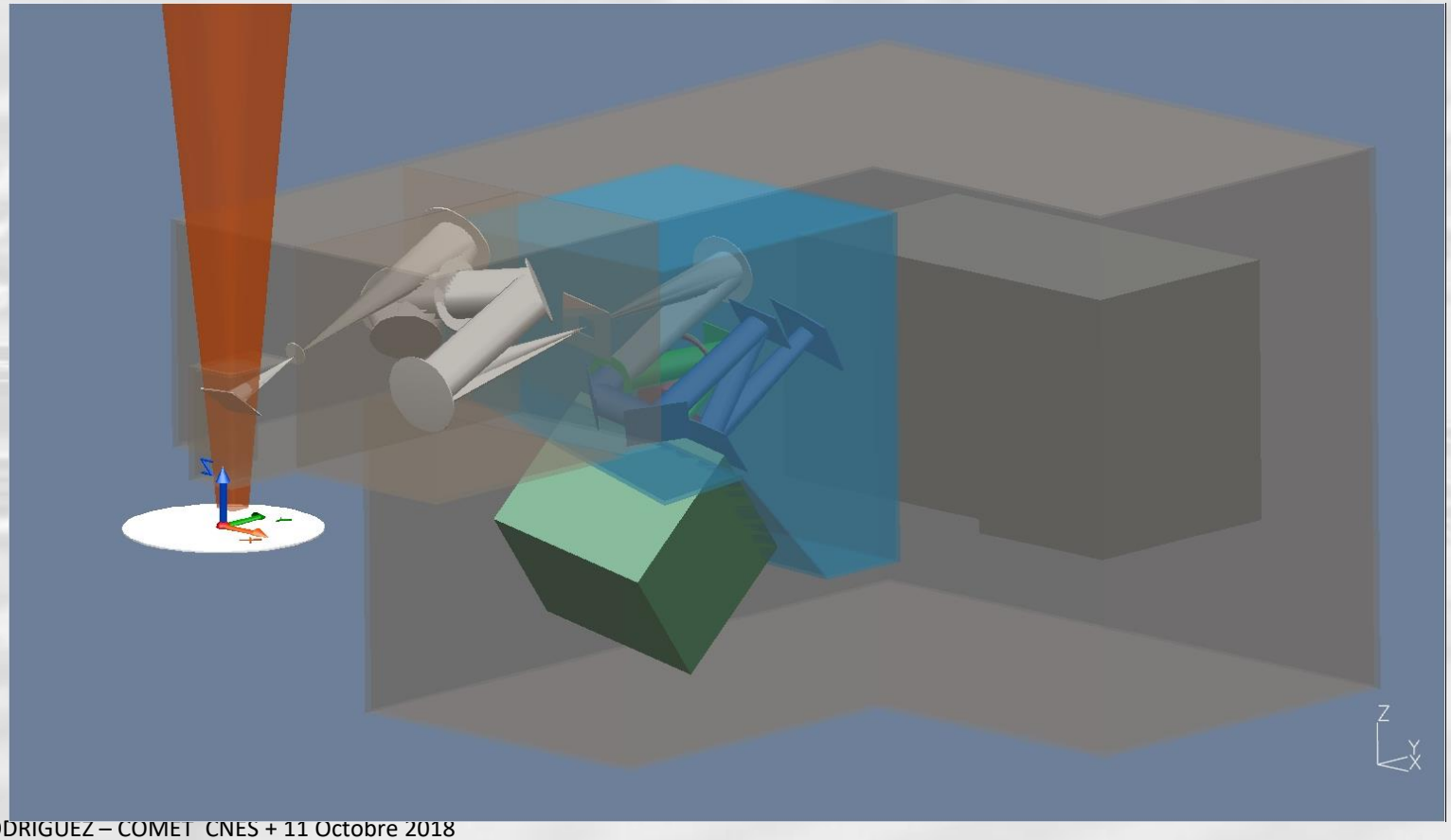


Explanation: High Q factor in the cavity (just above the detector) allows great absorption efficiency



Ouvertures (II)

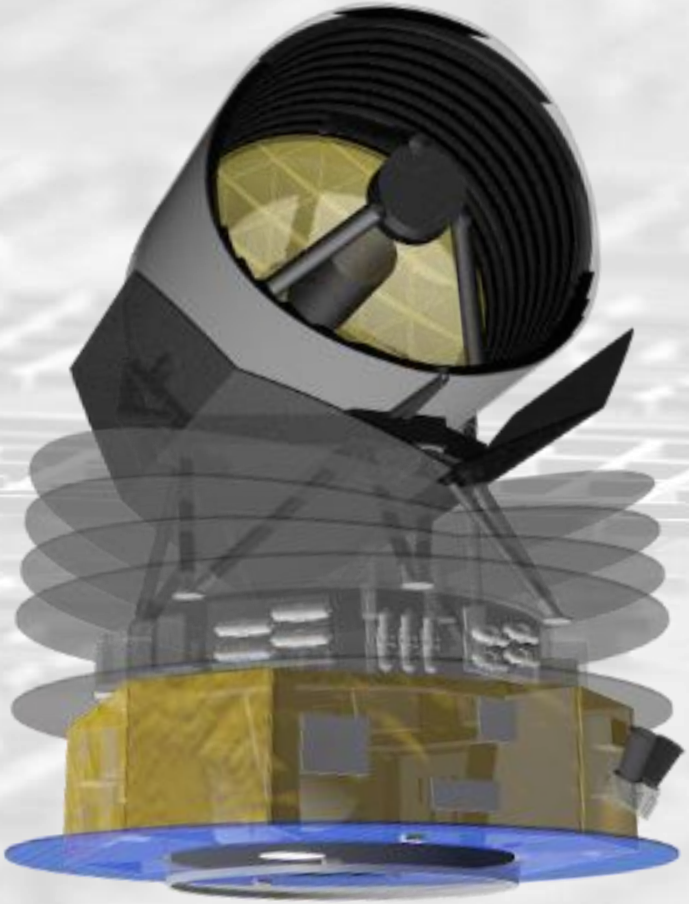
Sur la base de ces détecteurs (polarisation) nous avons proposé un instrument nouveau pour le Projet SPICA, qui accepté avec enthousiasme par les consortia.
SPICA avec le photomètre polarimètre est maintenant sélectionné comme un des 3 candidats en phase A pour la mission ESA M5 et JAXA L1



SPICA

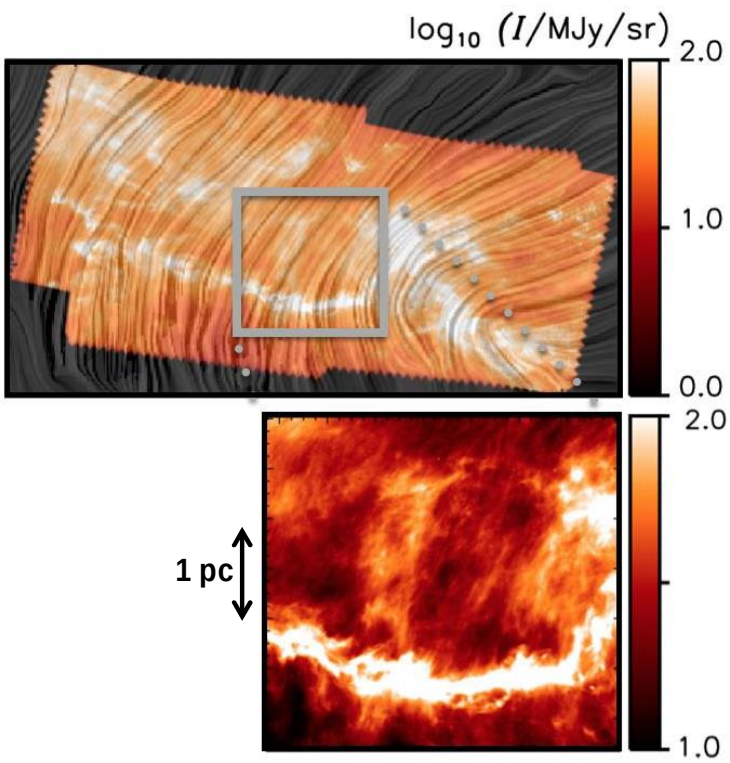
Mission destinée à l'imagerie, la polarimétrie et la spectroscopie dans l'infrarouge lointain et le submm dans les conditions ultimes grâce à un télescope de 2,5 m refroidi à 8K.

Ici l'instrument n'est plus la limite à la sensibilité du détecteur, c'est la lumière zodiacale.



PERFORMANCES

	100µm	200µm	350µm
Band edges	75—125µm	150—250µm	280—420µm
# of pixels	32 x 32 (x 2)	16 x 16 (x 2)	8 x 8 (x 2)
Pixel size	5" x 5"	10" x 10"	20" x 20"
Band centre beam FWHM	9"	18"	32"
PS sensitivity 5σ/1h/FOV (unpolarised)	21µJy	42µJy	85µJy
PS sensitivity in Stokes (Q,U) 5σ/1h/FOV (polarised)	30µJy	60µJy	120µJy
PS sensitivity 5σ/10h/1deg² (unpolarised)	0.16 mJy	0.32 mJy	0.65 mJy
PS sensitivity in Stokes (Q,U) 5σ/10h/1deg² (polarised)	0.23 mJy	0.46 mJy	0.92 mJy
Surface brightness sensitivity 5σ/10h/1deg² (unpolarised)	0.09 MJy/sr	0.045 MJy/sr	0.025 MJy/sr
Sensitivity to map Stokes parameters (Q,U) at 5% level 5σ/10h/1deg²	2.5 MJy/sr	1.25 MJy/sr	0.7 MJy/sr



The filamentary structure of Star forming regions: Combined images from Herschel SPIRE @ 250 µm and Planck polarisation @ 850µm

THE END