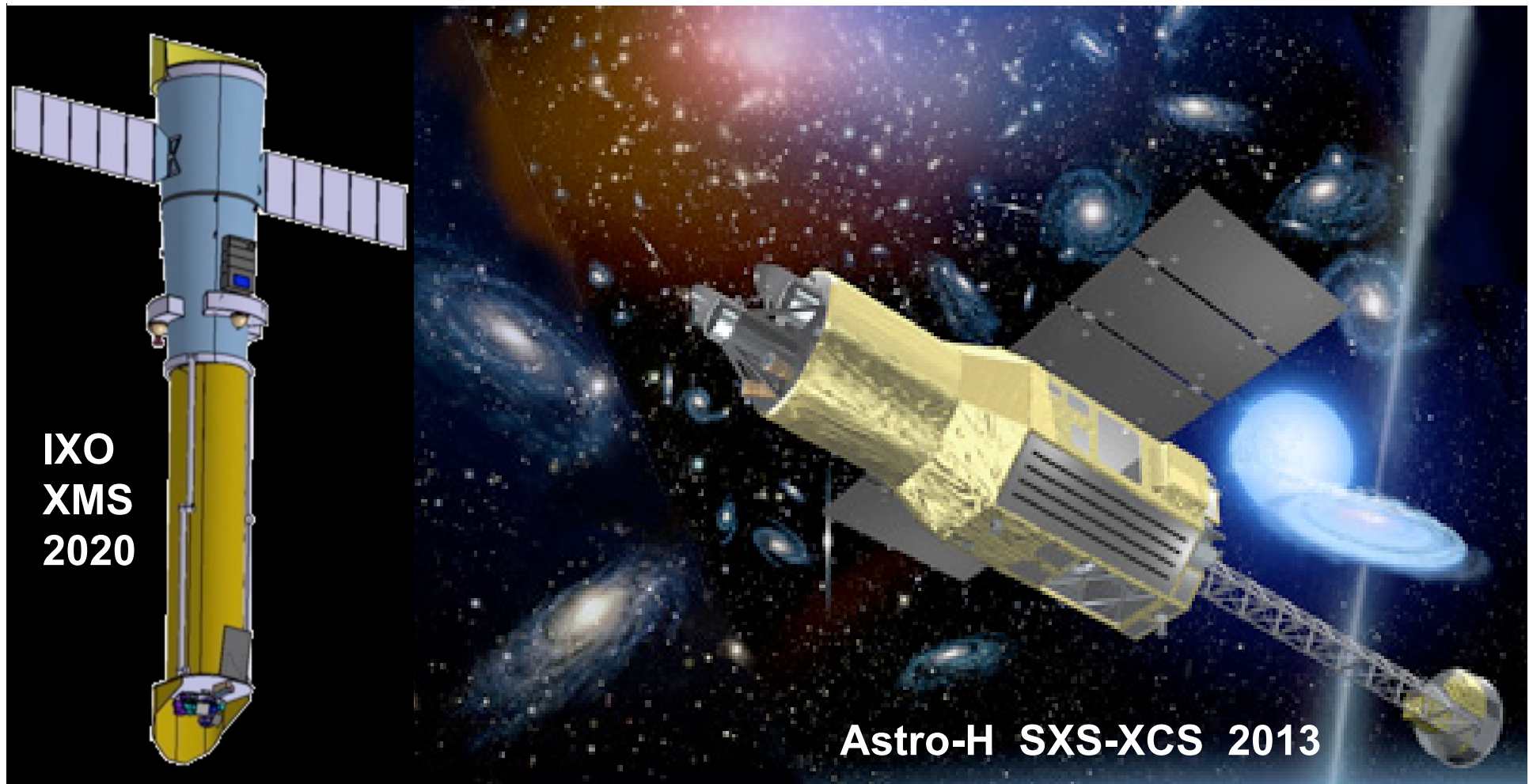
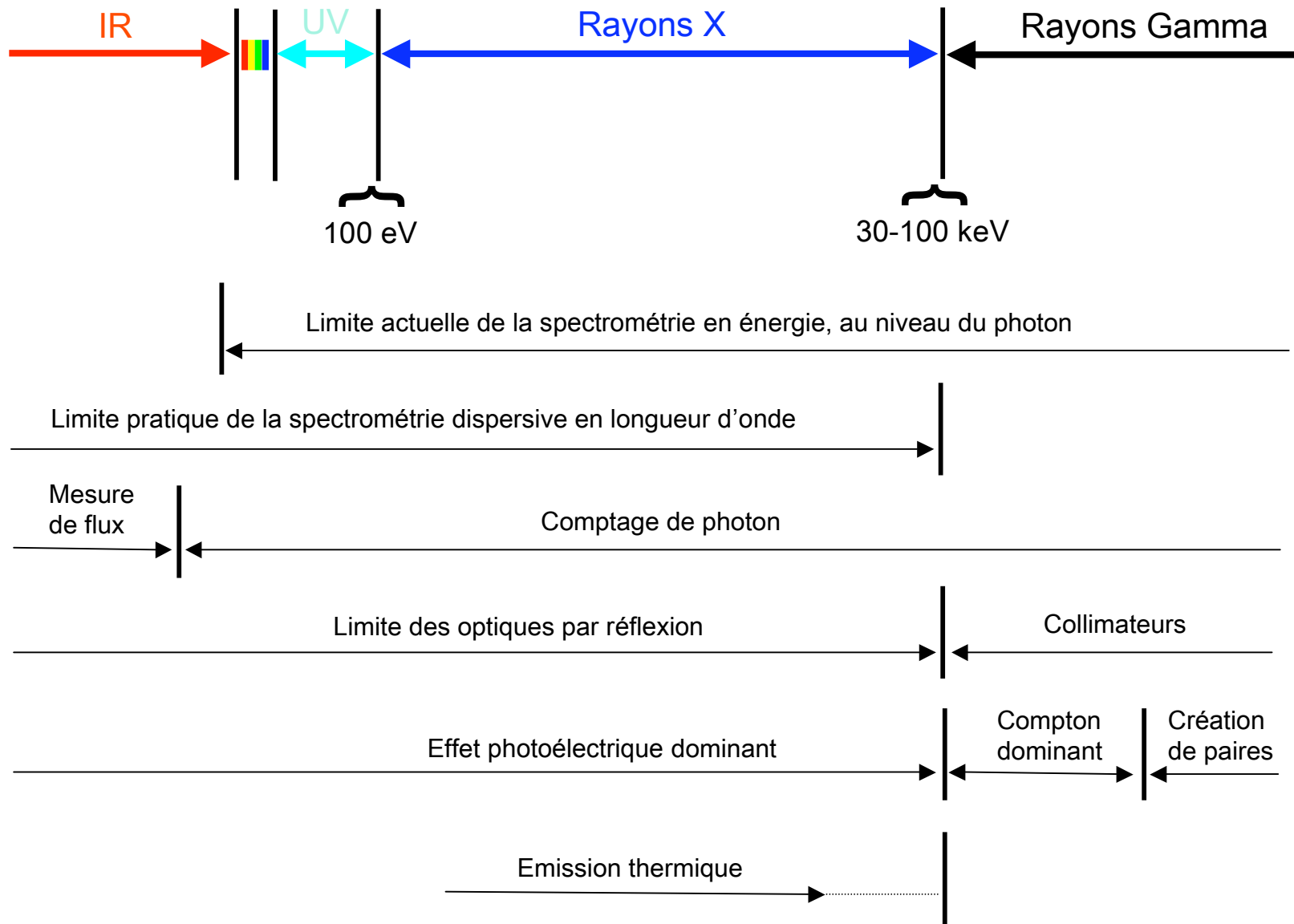


Microcalorimètres à senseurs Semiconducteur pour la détection du Rayonnement X

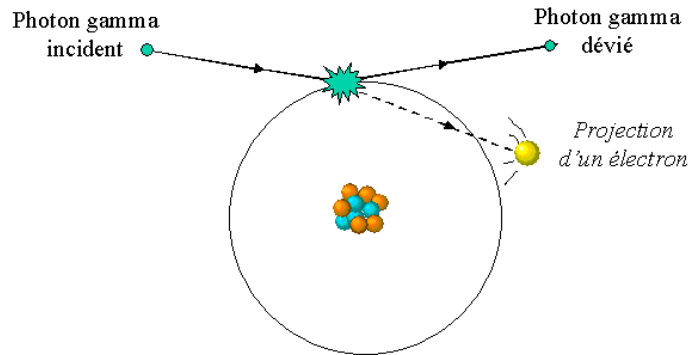
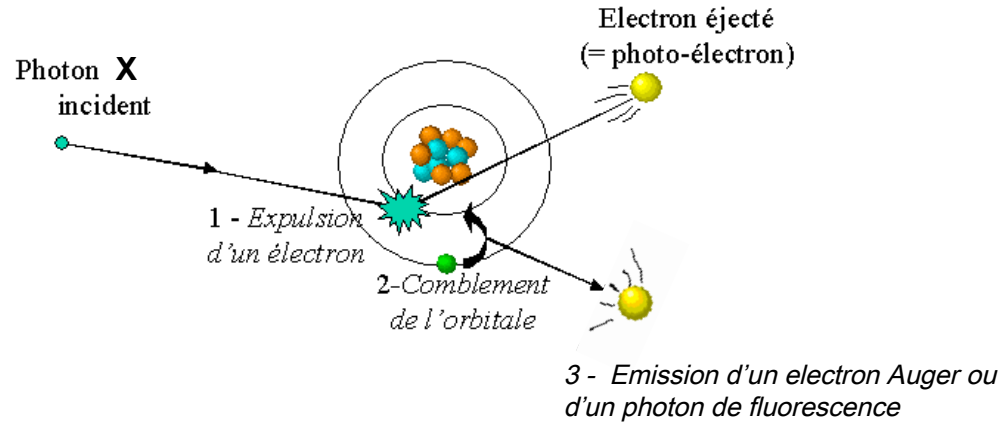
Claude Pigot
Service d'Astrophysique



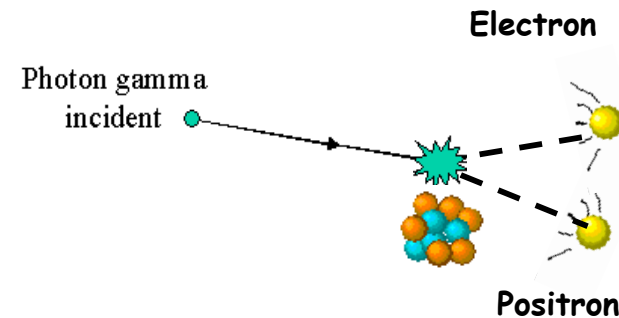


Les mécanismes d'interaction

Effet photoélectrique (Domaine des rayons X)



Diffusion Compton



Création de paires

Spécificités du rayonnement X

-Une interaction « ponctuelle »

Photon absorbé dans qqs mm de Silicium (qqs 10-100 μm de matériau à haut Z) pour qqs m de distance focale

L'effet photoélectrique \rightarrow 2 électrons contenus dans qqs μm de matériau détecteur solide (moins d'1 μm pour un e^- de 6 keV)

Pour les futurs spectroimageurs, on envisage une taille de pixels de 250x250 à 500x500 μm^2

-Une spectrométrie réalisable en énergie ou en longueur d'onde sur le photon

-Imagerie/concentration possible avec une vraie optique

-Mesure possible de tous les paramètres d'un photon

I-R

Rayons-X

Rayons-Gamma

**Spectrométrie
 dispersive
 en longueur
 d'onde**

**Spectrométrie
 en énergie ou
 en longueur
 d'onde**

**Spectrométrie
 dispersive
 en énergie**

**Mesure
 d'un flux**

**Mesure d'un
 evt (photon)**

**Mesure d'un
 evt (photon)**

**Niveau
 constant**

Impulsion

Impulsion

Miroirs

Miroirs

Collimateurs

**μ bolomètres
 G petit**

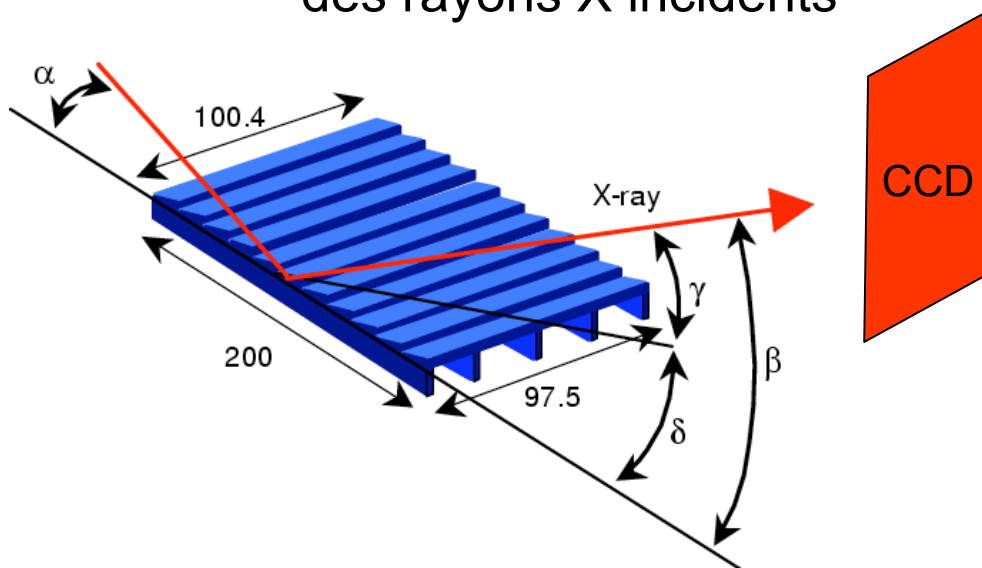
**μ calorimètres
 $C_{\text{therm.}}$ réduite**

Quelle Spectrométrie ?

Dispersive en longueur d'onde
réseaux, cristaux

En énergie
Intrinsèque au détecteur

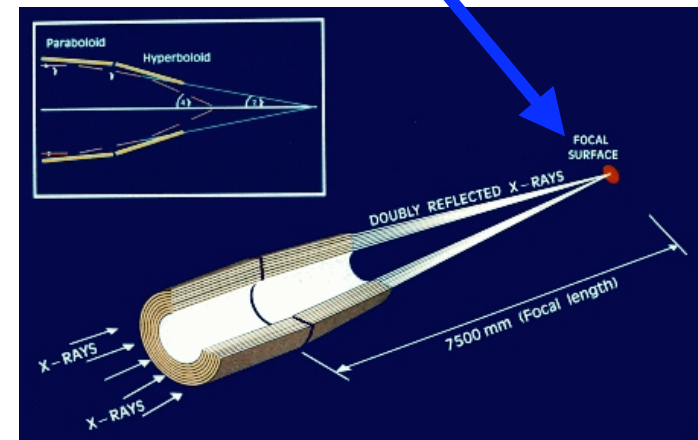
Nécessité d'associer un détecteur
au réseau pour mesurer la dispersion
des rayons X incidents



L'équation des réseaux : $m\lambda = d(\cos\beta - \cos\alpha)$

α l'angle d'incidence est imposé

β est mesuré par une caméra (CCD ?)



	CCD			Réseaux				
Observatory	XMM			Chandra				
Detector	EPIC MOS	EPIC PN	RGS	ACIS back	ACIS front	HRC	HETG	LETG
Energy Range (keV)	0.2-12	0.2-12	0.4-2.5	0.1-10	0.4-10	0.1-10	0.6-10	0.1-6

Les réseaux :

Surface effective réduite, 10% en moyenne à au mieux 20% de celle des CCDs

Domaine d'énergie réduit

Pas d'imagerie

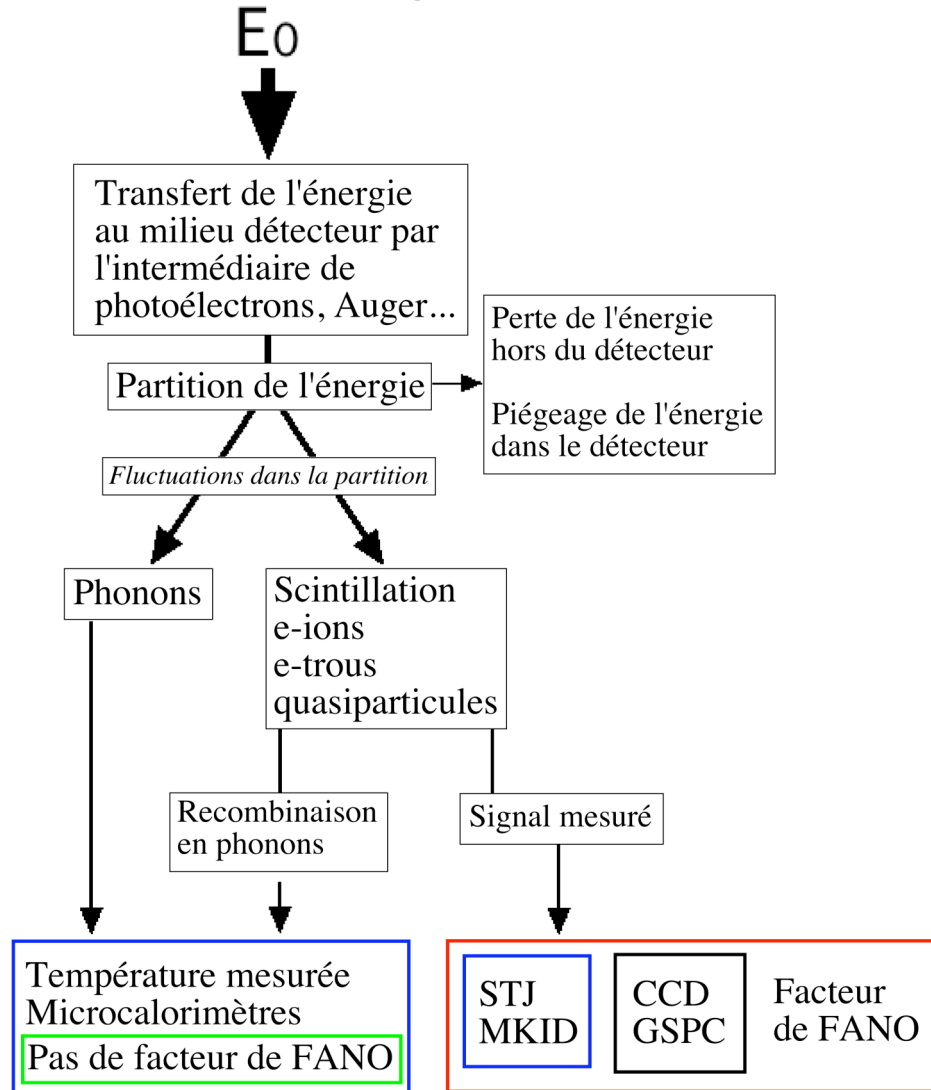
Bonne résolution spectrale

Robustesse

Effective Area (cm ²)	@0.25 keV	133	460	-	30	-	150	-	25
	@0.4 keV	360	771	44	120	35	50	-	12
	@0.6 keV	591	1061	94	345	70	65	-	25
	@1.0 keV	922	1227	185	615	385	215	10	55
	@1.5 keV	1180	1304	160	500	525	162	45	105
	@2.5 keV	696	779	-	320	320	65	20	50
	@6.0 keV	768	851	-	205	235	45	25	20
	@8.0 keV	390	557	-	45	60	10	7	4
	@12.0 keV	19	56	-	-	-	-	-	-
Energy Resolution (eV)	@0.25 keV	35	35	-	130	37	-	-	0.4
	@0.4 keV	45	45	0.5	120	42	-	-	0.8
	@1.0 keV	55	55	2.9	100	56	-	1.0	5.4
	@2.5 keV	85	85	17	120	82	-	5.2	34
	@6.0 keV	130	130	-	170	130	-	29	-
	@8.0 keV	150	150	-	190	150	-	50	-
	Angular Resolution (FWHM)	~6"	~6"	-	1"	1"	<0.5"	-	-

Les spectromètres intrinsèques, le facteur de Fano

Photon X incident d'énergie E_0



$$F = \frac{\text{variance observée}}{\text{variance de Poisson}}$$

$$E = n \varepsilon$$

$$\sigma_{\text{obs}}^2 = F \sigma_n^2 = F n$$

$$\sigma_E = \varepsilon \sigma_{\text{obs}} = \varepsilon \sqrt{F n}$$

$$\sigma_E = \sqrt{F \varepsilon E}$$

$$\Delta E = 2.35 \sqrt{F \varepsilon E}$$

$$F = .1 \text{ à } .2$$

Les microcalorimètres pour le rayonnement X

Une spectrométrie **non limitée par le facteur de Fano**

Une interaction ponctuelle -> **pixel de petit volume**

Une opération à basse température : **La capacité calorifique des matériaux diminue**

$$C = \gamma T + a(T/\theta D)^3$$

$$(\text{Supracond. } T < T_c) \quad C = a(T/\theta D)^3 + 8.5 \gamma T_c \exp(-1.44 T_c/T)$$

Existence de thermomètres pour ces basses températures

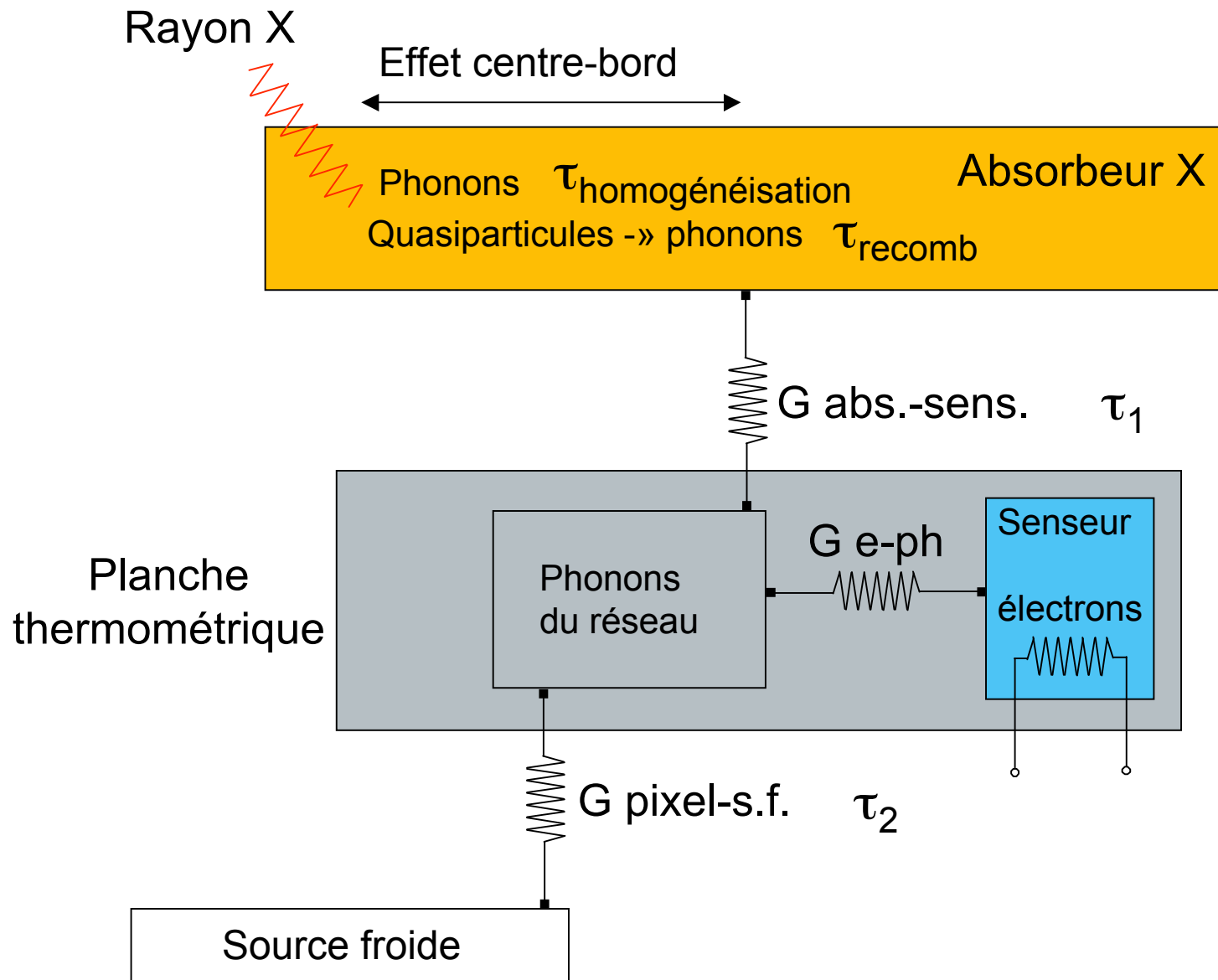
Thermomètres résistifs :

MIS senseur à transition métal-isolant (Si, NTD Ge)

TES senseur à transition supraconductrice (bicouche)

$$\Delta E_{FWHM} = 2.35 \xi \sqrt{KT^2 C}$$

Principe du microcalorimètre Silicium



Le thermomètre résistif

Le thermomètre doit avoir :

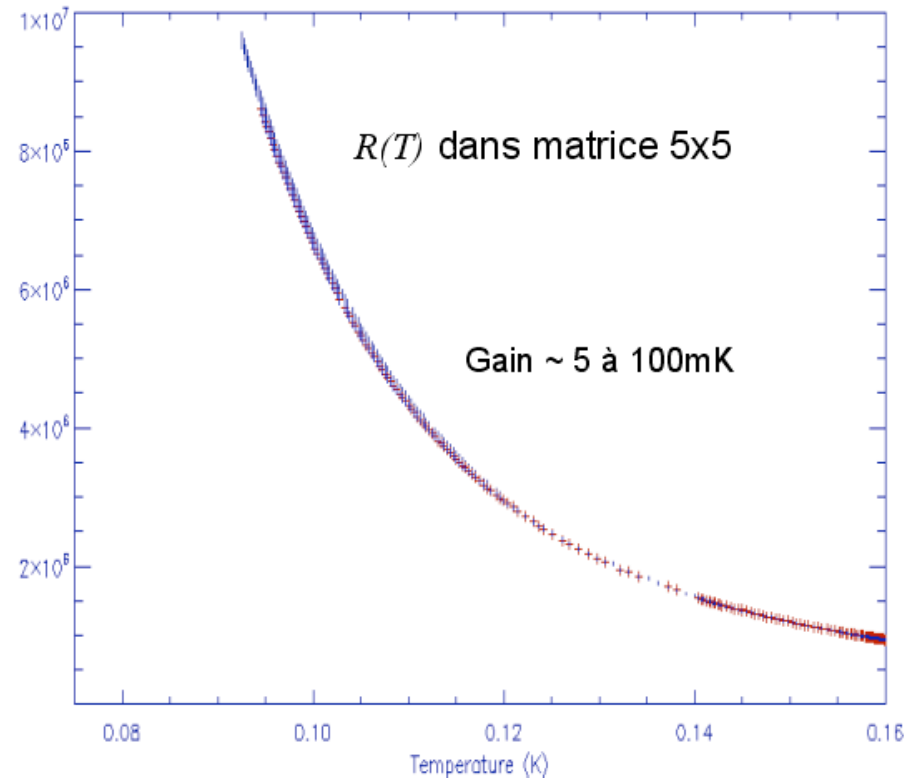
- La capacité calorifique la plus basse possible
- La sensibilité α la plus haute possible
$$\alpha = d(\ln R)/d(\ln T) = (dR/R)/(dT/T)$$
- Une résistance assez basse pour ne pas limiter la bande passante
- Le minimum de bruit, de bruit en $1/f$.

Le thermomètre résistif

A basse température la conduction par saut à portée variable (variable range hopping), est bien représentée par la loi d'Efros et Shklovskii avec un terme représentant l'effet de champ :

$$R(T,E) = R_0 \exp(T_0/T)^{1/2} \cdot \exp(-qL E/KT)$$

$$\alpha = \left| \frac{1}{2}(T_0/T)^{1/2} - qL E/KT \right|$$



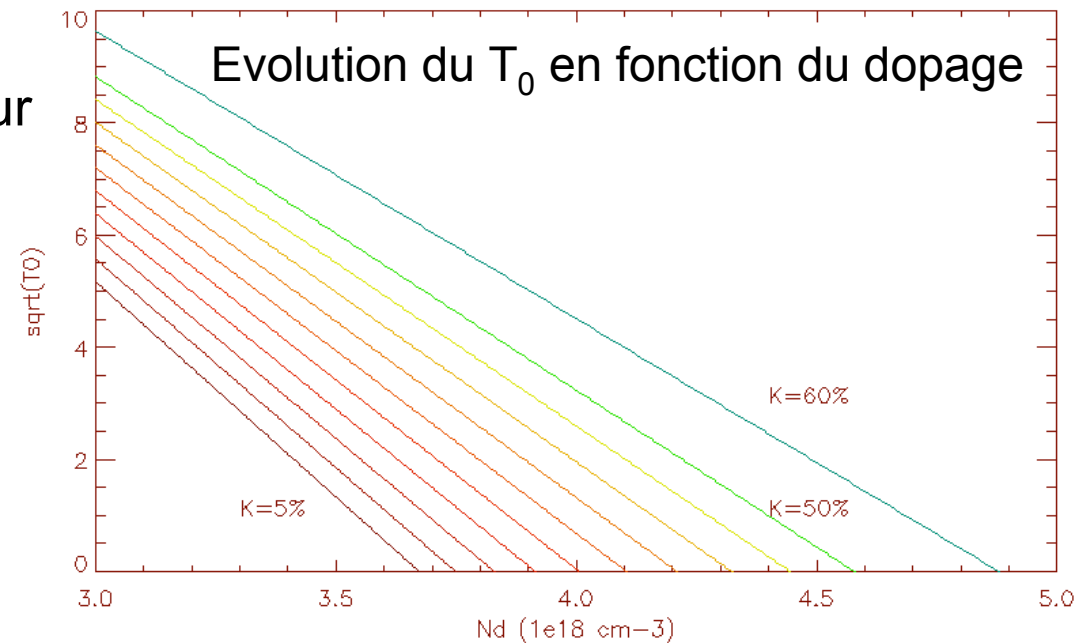
Contraintes sur le thermomètre

- Capa de ligne + Capa d'entrée (JFET) = qqs 10 picofarads
Bande passante électrique $\rightarrow R = 1 \text{ à } 10 \text{ Mohm}$
 - Eviter l'effet de champ : polarisation de l'ordre du mV
 - Obtenir la meilleure sensibilité $\alpha = 1/2(T_0/T)^{1/2}$
- 2 paramètres importants : R_0 et T_0
 R_0 dépend de la résistivité ρ_0 et de la géométrie du senseur

Le dopage doit être très élevé pour diminuer ρ_0 (objectif $R \sim \text{Mohm}$)

Il faut diminuer le dopage pour maximiser T_0

Nécessité d'un compromis
 α limité à 10



Technologie silicium du thermomètre

Technologie dérivée des bolomètres de PACS

Réalisation sur un wafer simple SOI :

Fine couche de Silicium ($1.5 \mu\text{m}$) séparée par une couche d'isolant (oxyde $1 \mu\text{m}$) d'un substrat massif ($750 \mu\text{m}$)

Le dopage se fait par implantation ionique

2 technologies ont été successivement utilisées :

La multi-implantation ionique --> abandonnée car trop inhomogène

La diffusion à haute température --> la règle actuellement

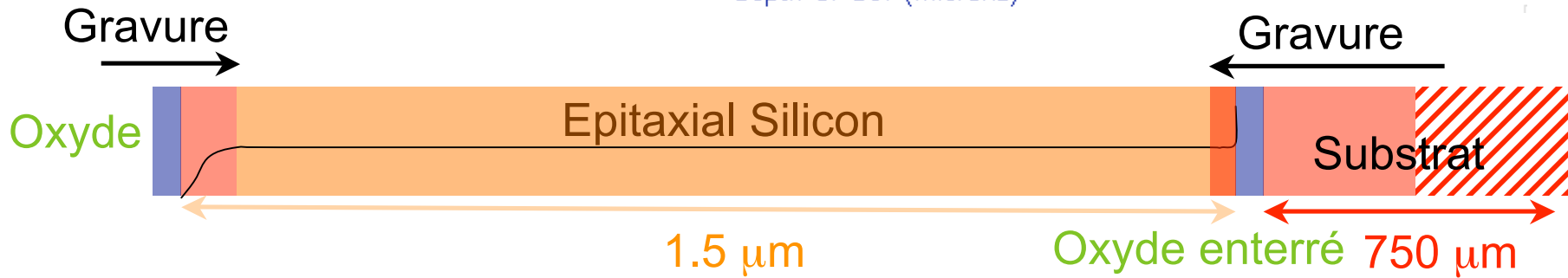
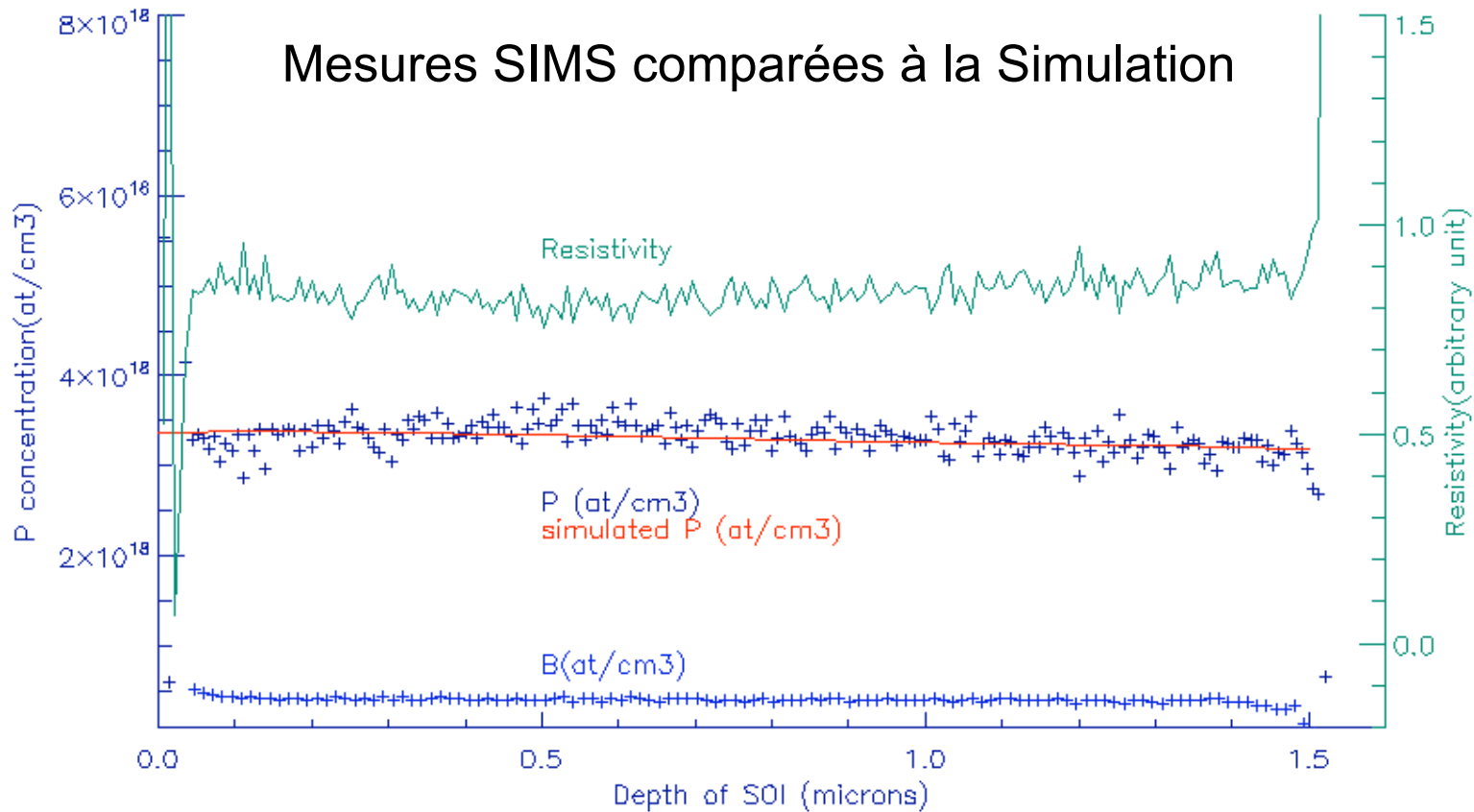
L'épaisseur est limitée (cas bien différent du germanium (NTD))
par la couche fine du SOI à qqs μm .

On joue rarement sur la géométrie du senseur :

Senseur carré pour maximiser le volume et réduire le bruit en excès

Diffusion de l'implantation

Mesures SIMS comparées à la Simulation



La capacité calorifique du senseur

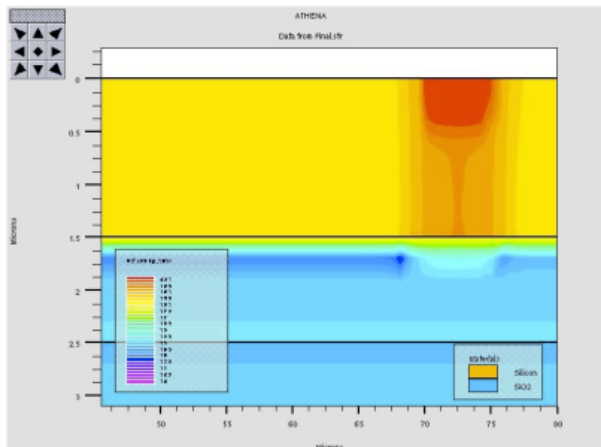
La capacité calorifique du senseur est négligeable devant celle des reprises de contact et éventuellement celle des électrodes :

Deux choix :

- Pistes obtenues par un dopage dégénéré (GSFC)

- Pistes supraconductrices (Al, TiN) avec contacts ohmiques dégénérés

Le dopage dégénéré domine le budget de la capacité calorifique



Contraintes sur l'absorbeur

Les compromis à arbitrer dans la réalisation du senseur limitent la sensibilité à $\alpha = 5$ et 10

$$\Delta E_{FWHM} = 2.35\xi\sqrt{KT^2C}$$

Pour conserver la résolution il faut limiter la capacité calorifique totale du pixel et donc celle de l'absorbeur.

Il faudra limiter les électrons libres

Pas de métal résistif mais des semiconducteurs à faible gap ou des supraconducteurs

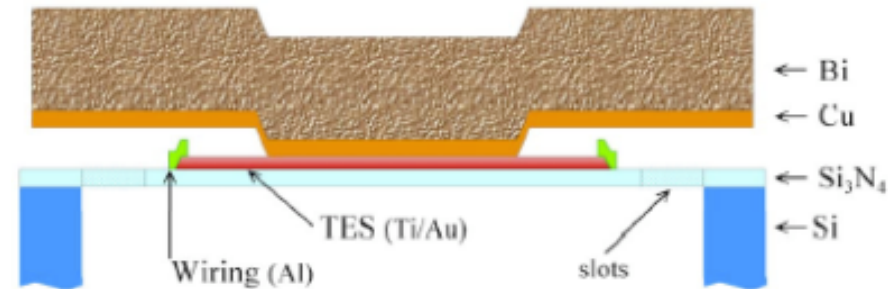
L'homogénéisation thermique à l'intérieur de l'absorbeur et le transfert de la chaleur se font par les phonons et sont plus lents

« Effet centre bord »

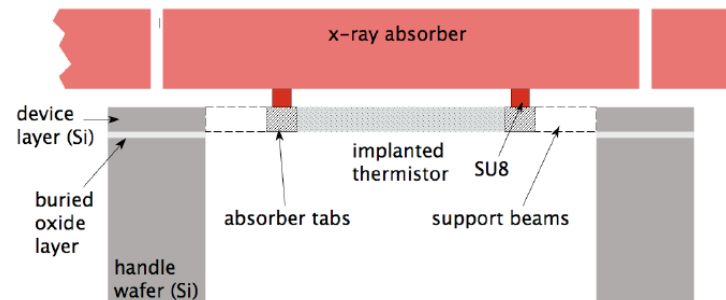
Présence d'excitations élémentaires (e-trou ou qp) qui prennent le temps de se recombiner

Choix de l'absorbeur

TES : Utilisation d'absorbeur composite Bi - Au, Bi - Cu
Le Cu/Au homogénéise thermiquement l'absorbeur déposé sur le senseur et couple la chaleur au senseur par les électrons



MIS : Utilisation d'absorbeur plus lent
L'absorbeur est découplé du senseur par un lien thermique
La chaleur est transférée au senseur par les phonons



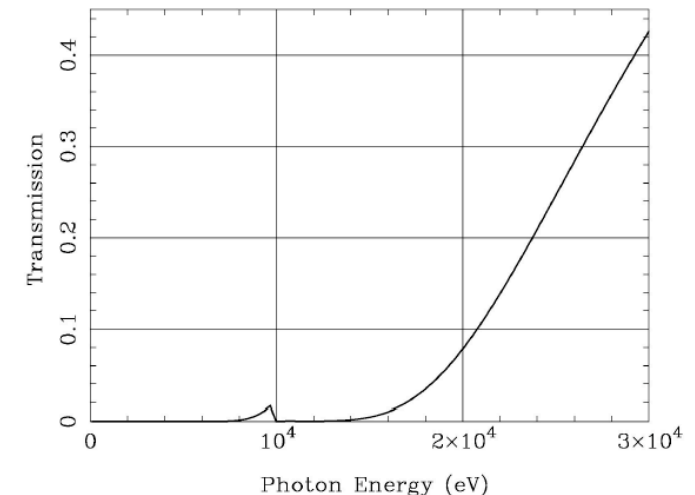
Un absorbeur du rayonnement X

La section efficace de l'effet photoélectrique décroît, avec l'énergie, approximativement en $\sim E^{-3}$ et croît, avec le Z, en $\sim Z^4$ à 5

Cela impose l'utilisation d'éléments lourds si l'on veut étendre la bande passante en énergie vers les hautes énergies au delà de la raie du fer à 6 keV.

21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96
39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc [98]	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60
57-71 La-Lu	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po [209]

Ta Density=16.654 Thickness=25. microns



Choix de l'absorbeur

MIS : HgTe, Sn traditionnels

HgTe Semi-conducteur à faible gap

Sn Supraconducteur

Présence, souvent, d'un terme linéaire en T :

Cas du HgTe, cas de nombreux supraconducteurs

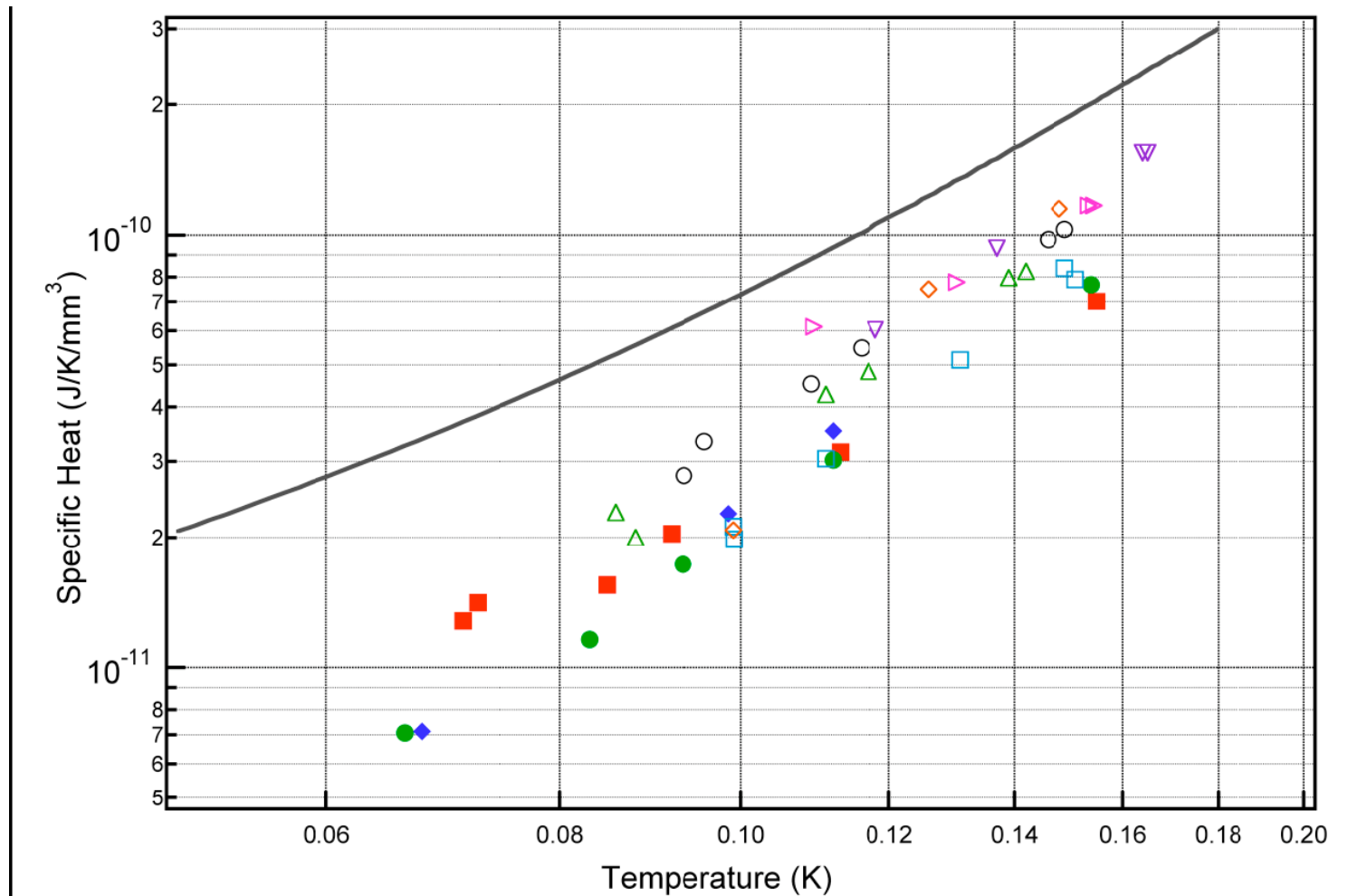
Problème des supraconducteurs de haute pureté :

Piégeage des quasiparticules : Le Tantale

Absorbeurs supraconducteurs composites

Alliages (Pb Bi)

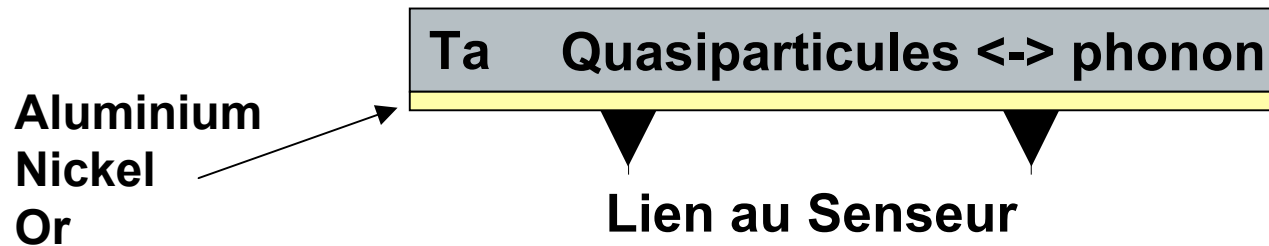
Absorbeurs HgTe



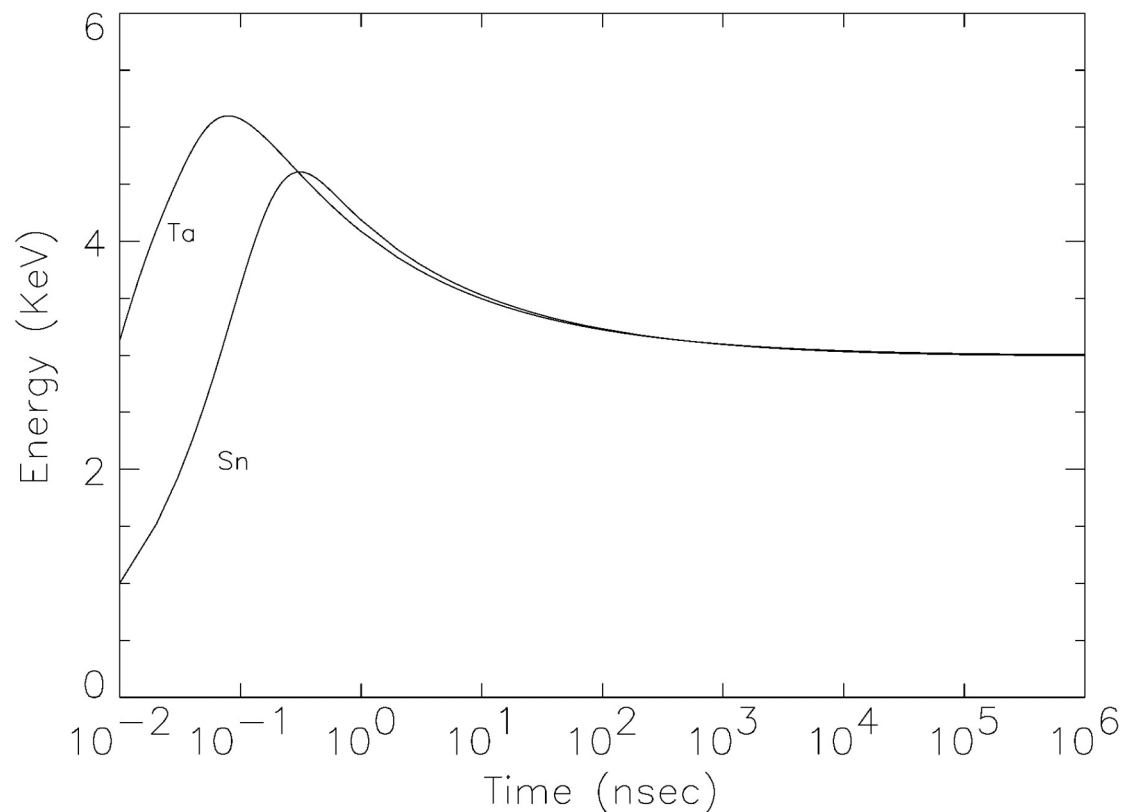
Courbe : Suzaku/XRS HgTe démontrant la présence d'un terme linéaire en T
 Cercles ouverts : HgTe recuit sous atmosphère Hg pour minimiser les défauts
 Cercles fermés : $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.166$)

Absorbeurs supraconducteurs

- a) Présence d'un terme linéaire ? : 1 % du volume
- b) Vitesse de thermalisation :
 Dans les supraconducteurs : 30 % de l'énergie est piégée sous la forme de quasiparticules.
 Comment accélérer la vitesse de leur recombinaison
- Impuretés
 - Absorbeurs composites avec piège à quasiparticules :
 - métal résistif : Au
 - supraconducteur à bas T_c : Al
 - métal ferromagnétique : qqs Å de Ni
 - Alliages supraconducteurs de type II :
 - PbBi,.....
- a) Conductivité thermique :
 Amélioration de la RRR, monocristaux



Absorbeurs supraconducteurs



Energie sous forme de quasiparticules après absorption d'un X de 6 keV. Simulations de E. Perinati (Observatoire Giuseppe Vaiana, Palerme)

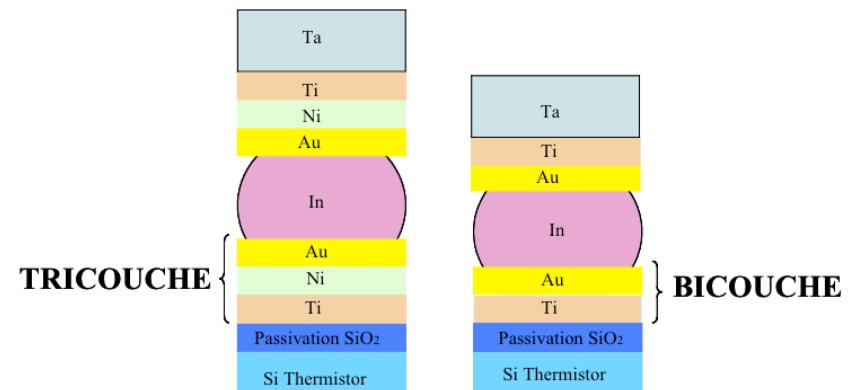
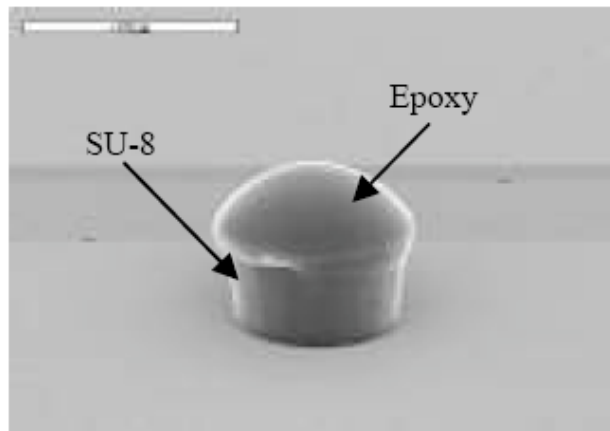
30% de l'énergie reste piégée dans les quasiparticules

Le lien thermique absorbeur-senseur et la réalisation de matrices de grande taille

2 solutions :

- La colle époxy
 Comment rendre reproductible le lien de colle ?
- L'hybridation thermomécanique
 Comment diminuer sa capacité calorifique ?

La réalisation de grandes matrices nécessite de passer d'une réalisation manuelle à un processus automatique de report d'une matrice complète d'absorbeur sur une matrice senseur.



Les microcalorimètre de la NASA (GSFC)

SXS team : Peter Serlemitsos, Richard Kelley,
Peter Shirron, F. Scott Porter, Caroline Kilbourne
and Christine Jhabvala

Une histoire malheureuse :

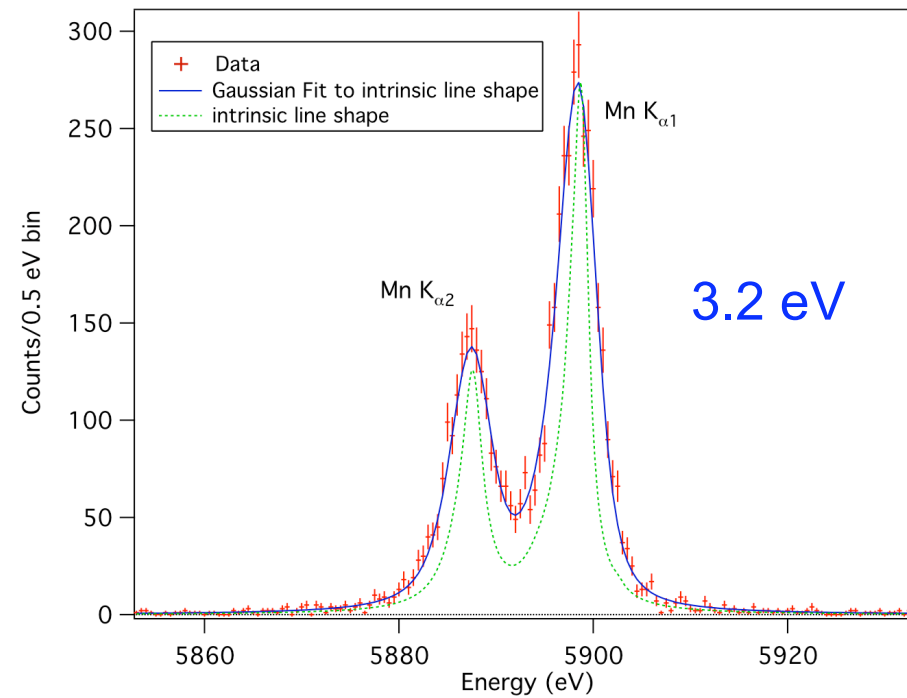
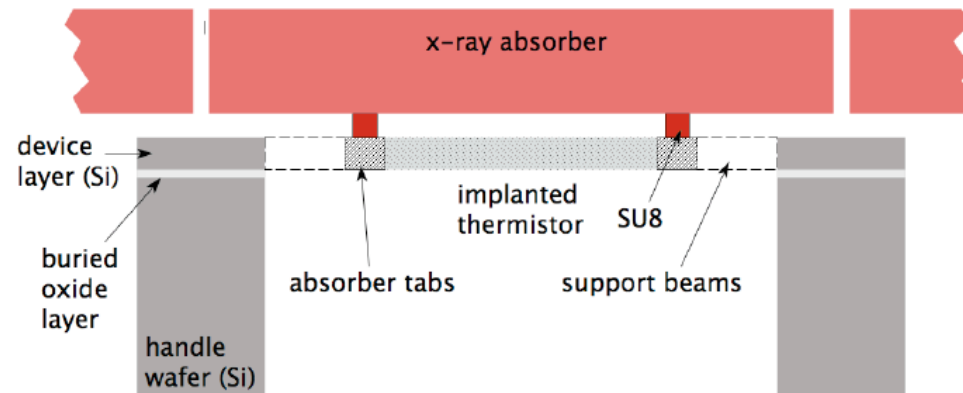
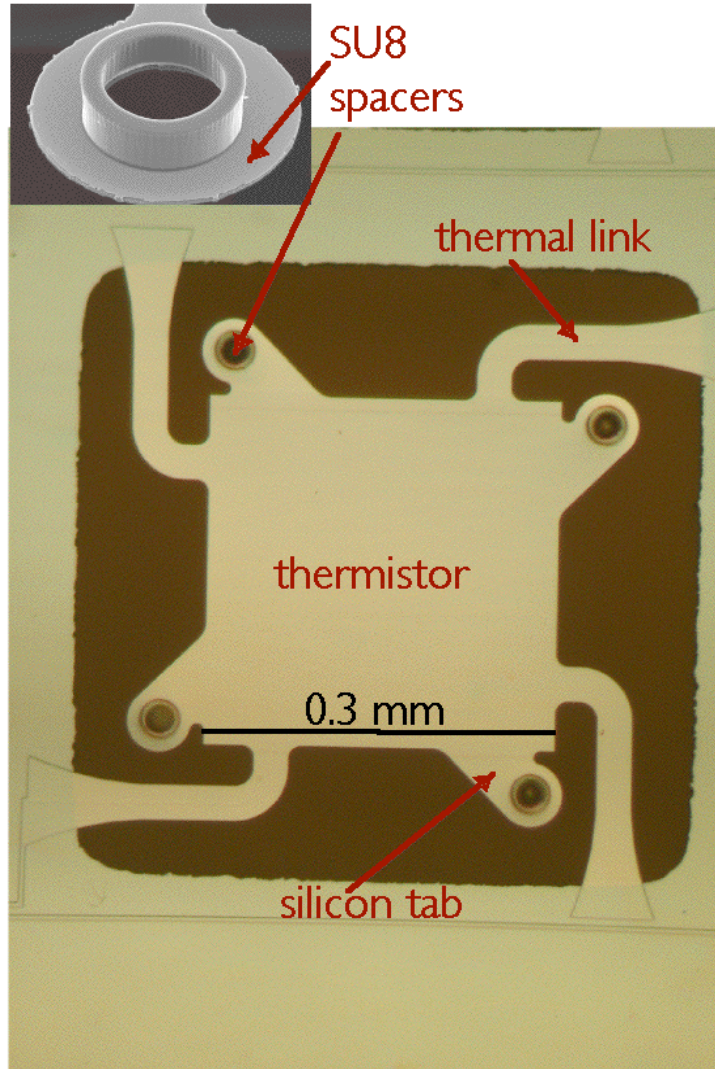
Un premier test sur fusée-sonde près d'échouer (La double barette de microcalorimètres entre en vibration)

1999 : perte de Astro-E 10 Février 2000

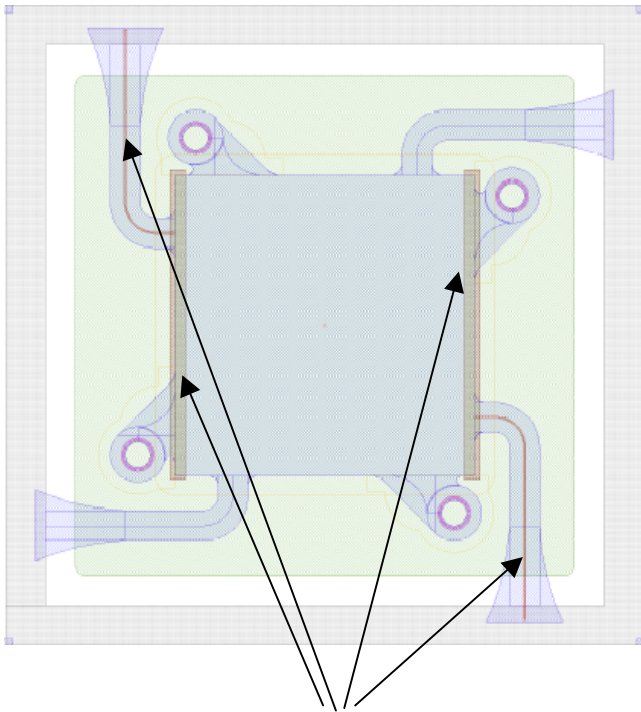
2005 : perte de la cryogénie de Astro-E2 10 Juillet 2005

2013 : Lancement de Astro-H SXS (Soft X-ray Spectrometer)-XCR
(X-ray Calorimeter Spectrometer)

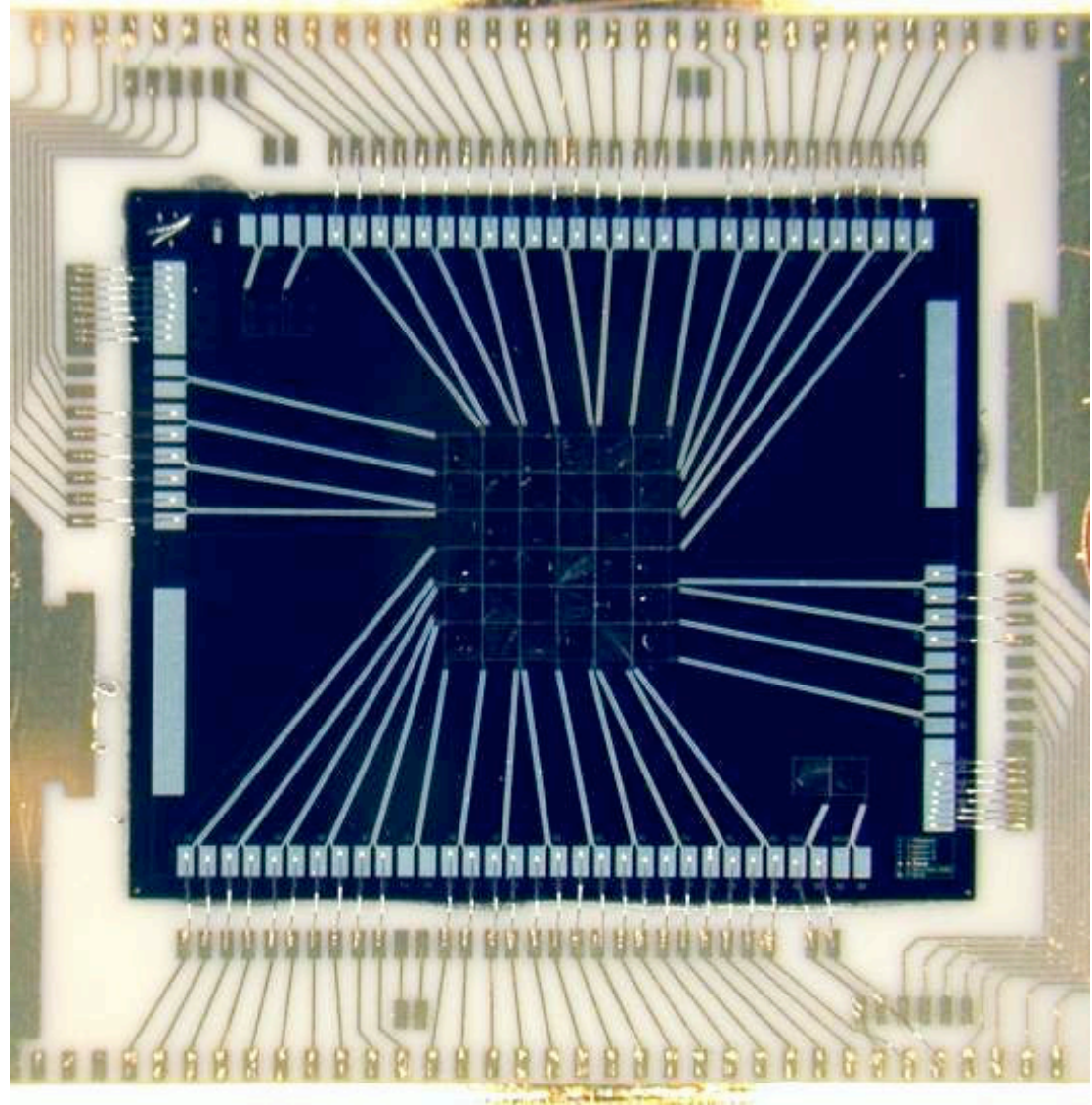
Microcalorimètre avec senseur MIS, XRS sur Astro-E2



XRS-2 Les électrodes

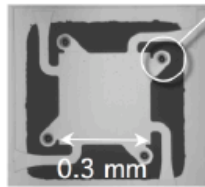


Implantations dégénérées

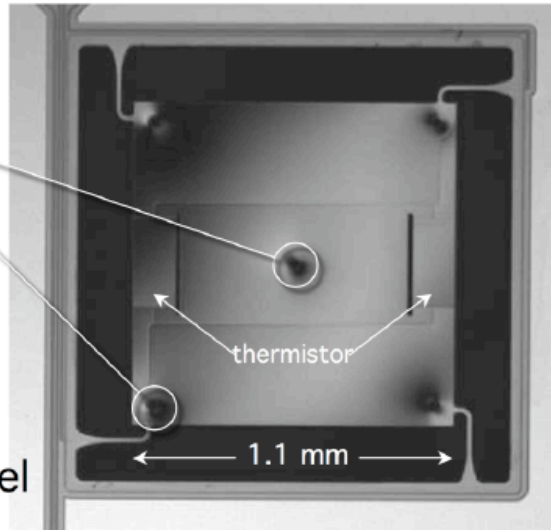


GSFC silicon microcalorimeter

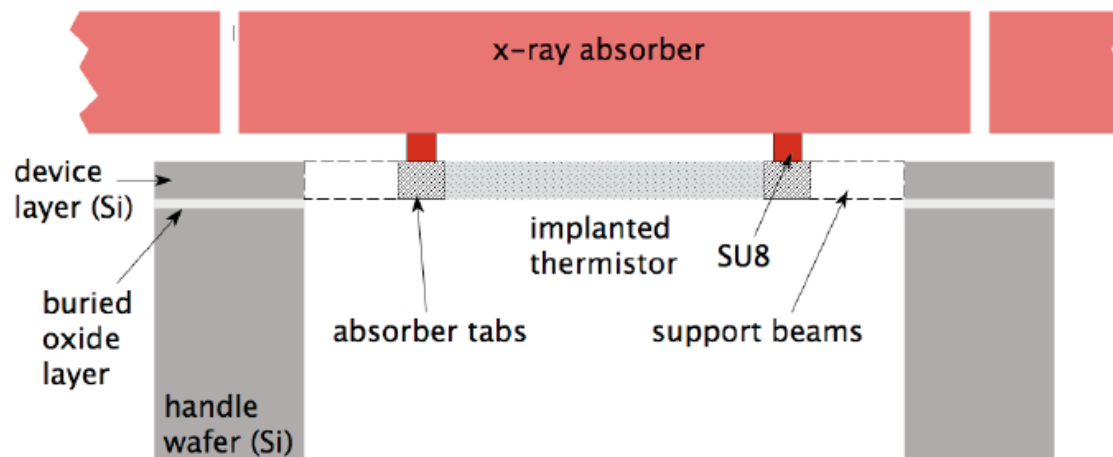
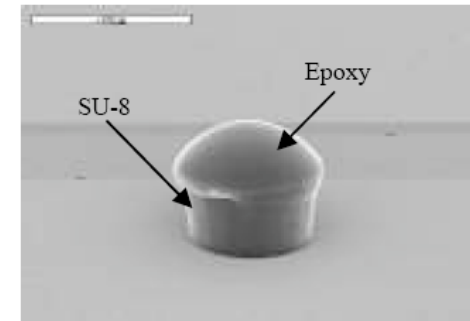
SU-8 epoxy posts for supporting absorbers



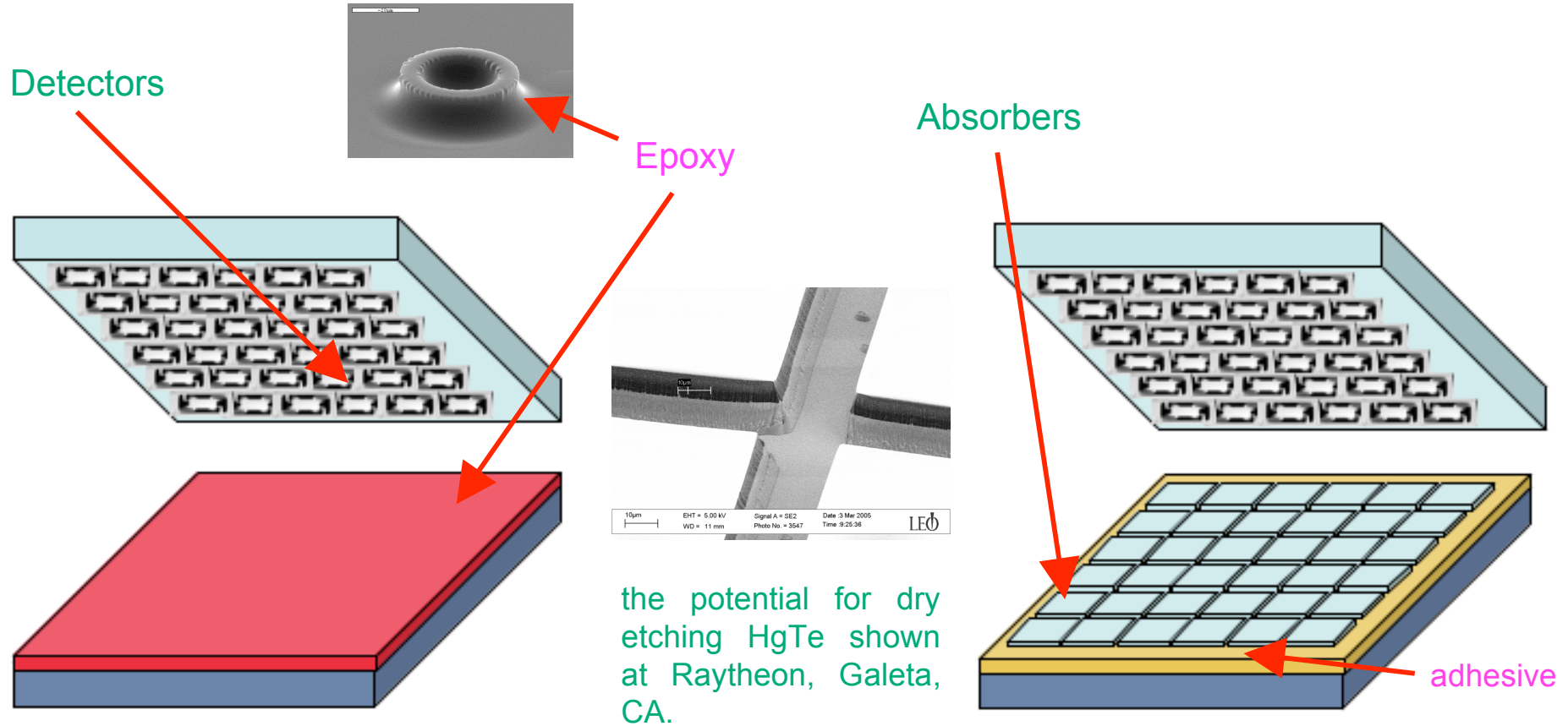
XRS pixel



XQC pixel



Absorber attachment

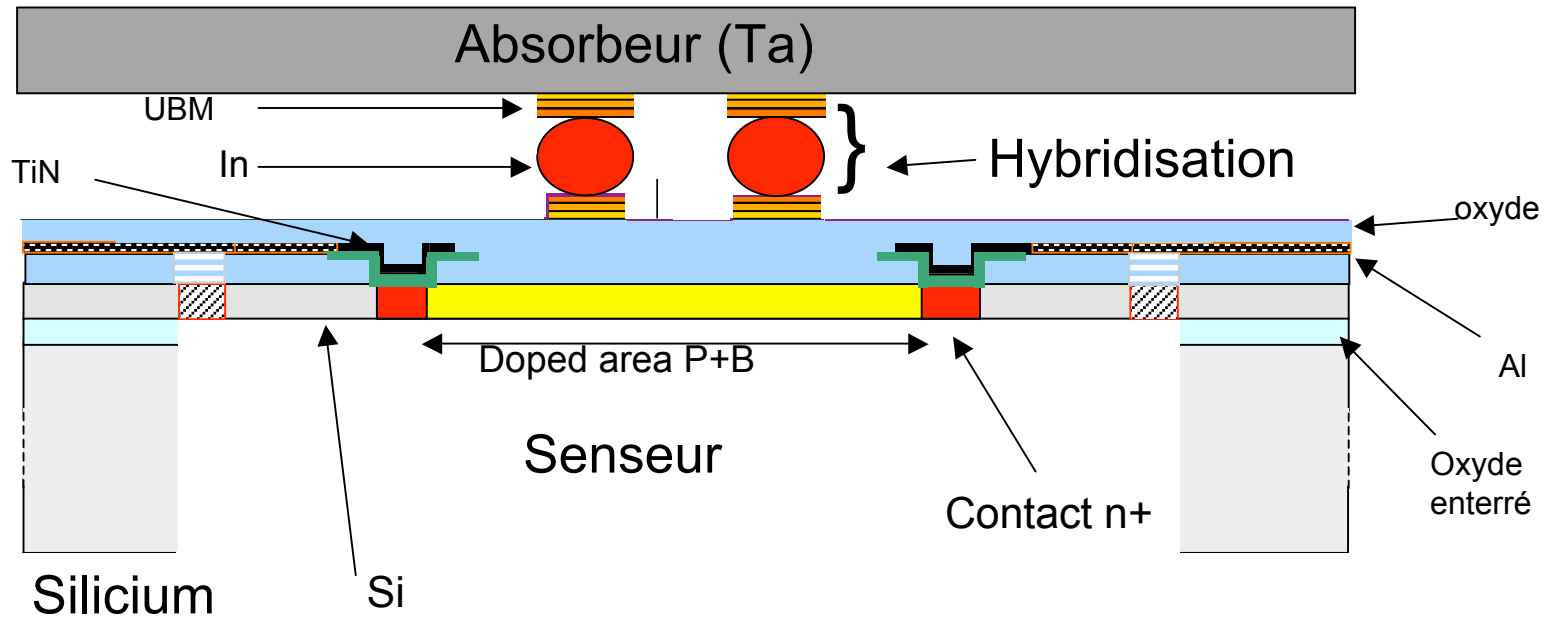


Using flip-chip bonder, pick up epoxy on SU8

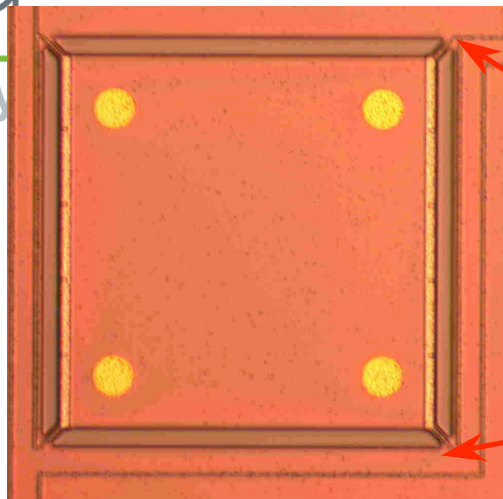
the potential for dry etching HgTe shown at Raytheon, Galeta, CA.

Using the flip-chip bonder, attach absorbers to detectors. Absorbers are held by temporary adhesive.

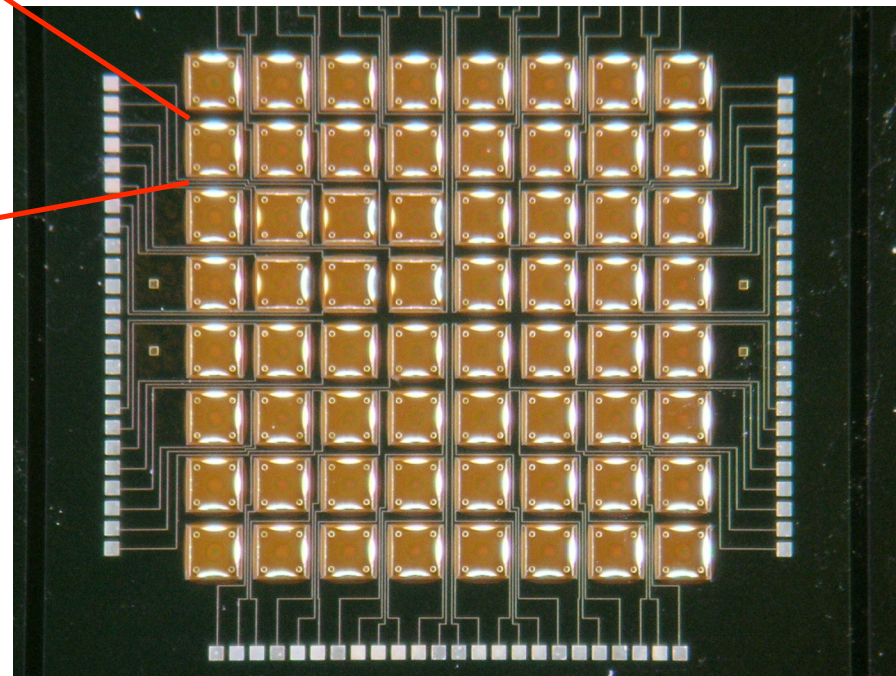
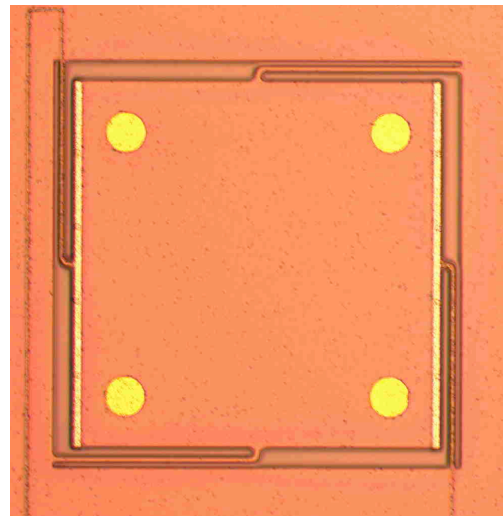
Structure du pixel CEA LETI/SAp



First LETI Batch

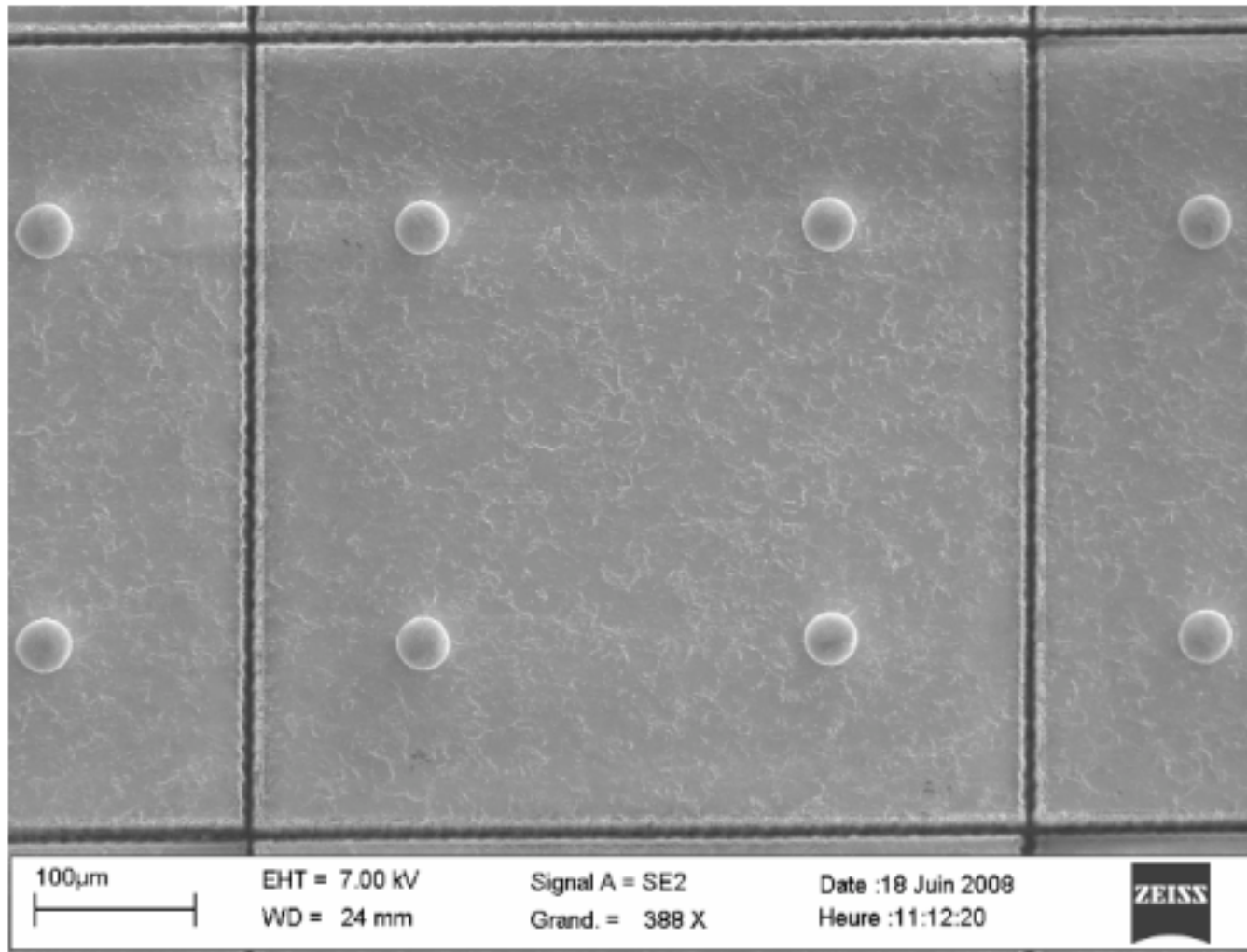


Pixel size: 500 μm

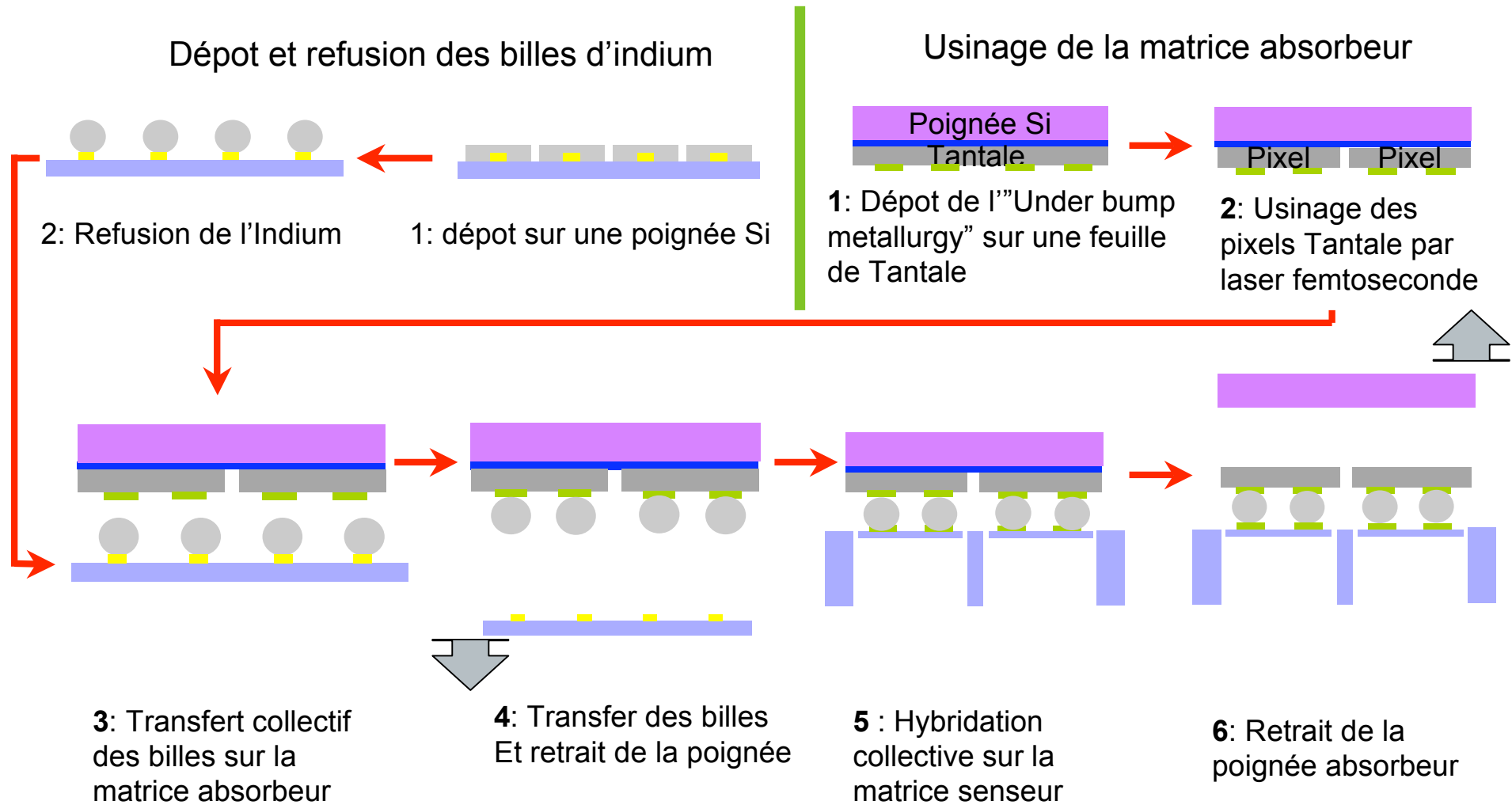


8x8 freed sensors, ready to be hybridized

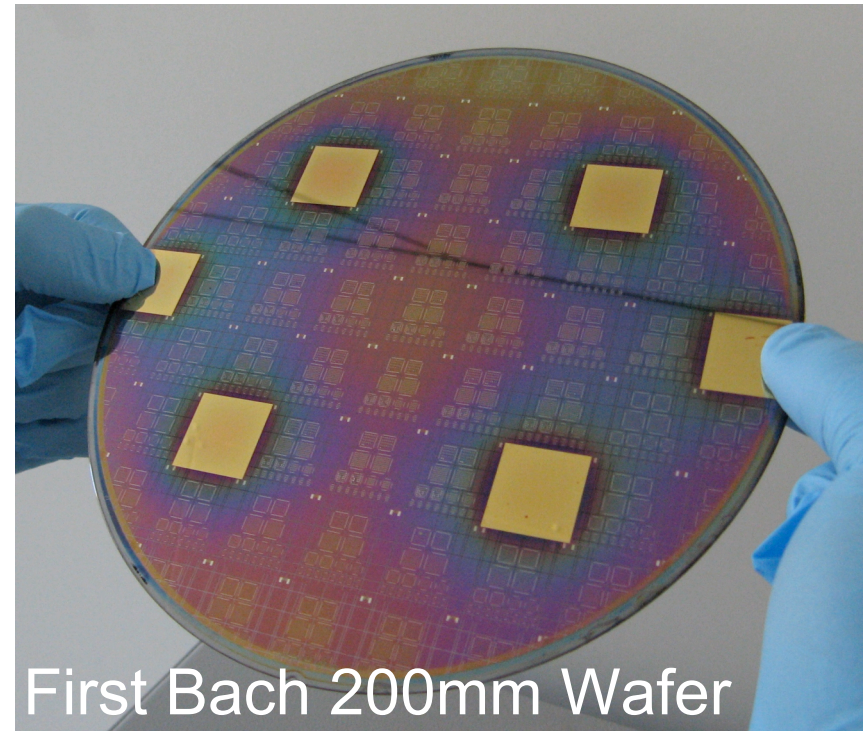
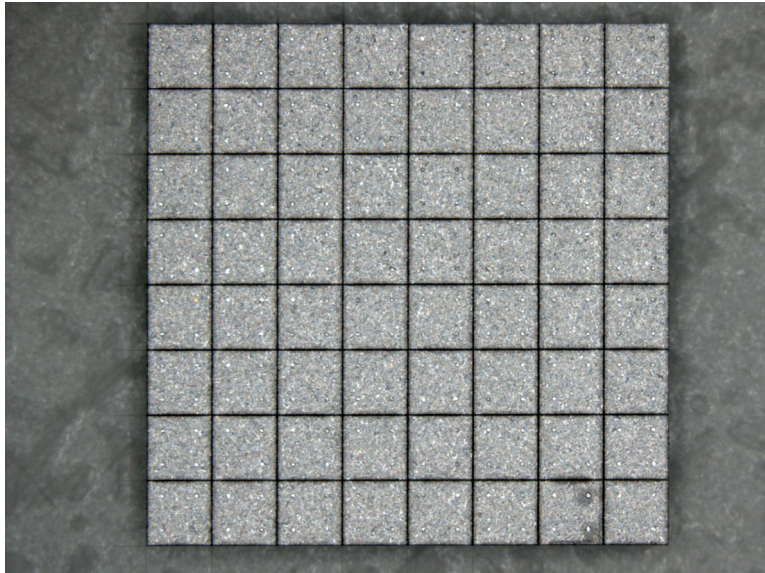
Usinage de la matrice d'absorbeur



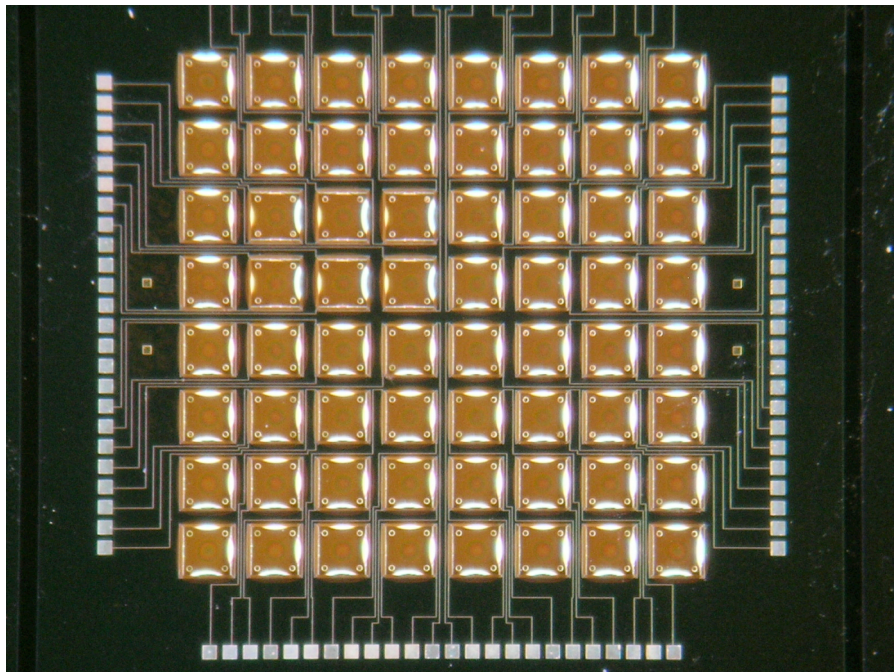
Hybridation collective de la matrice d'absorbeur sur la matrice senseur



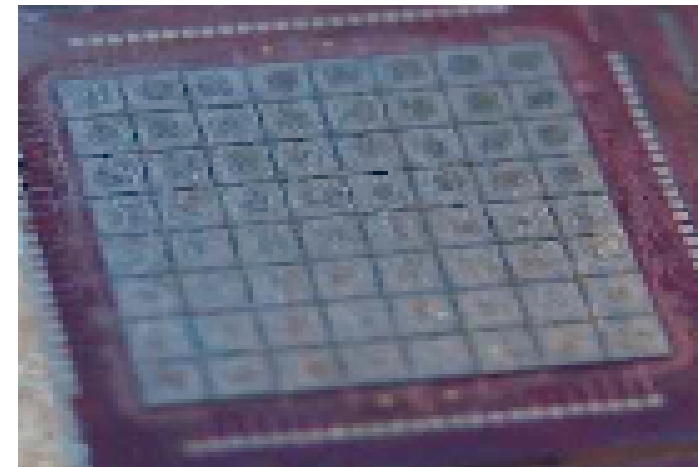
Ta Absorbers Array



First Bach 200mm Wafer



Sensors Matrix



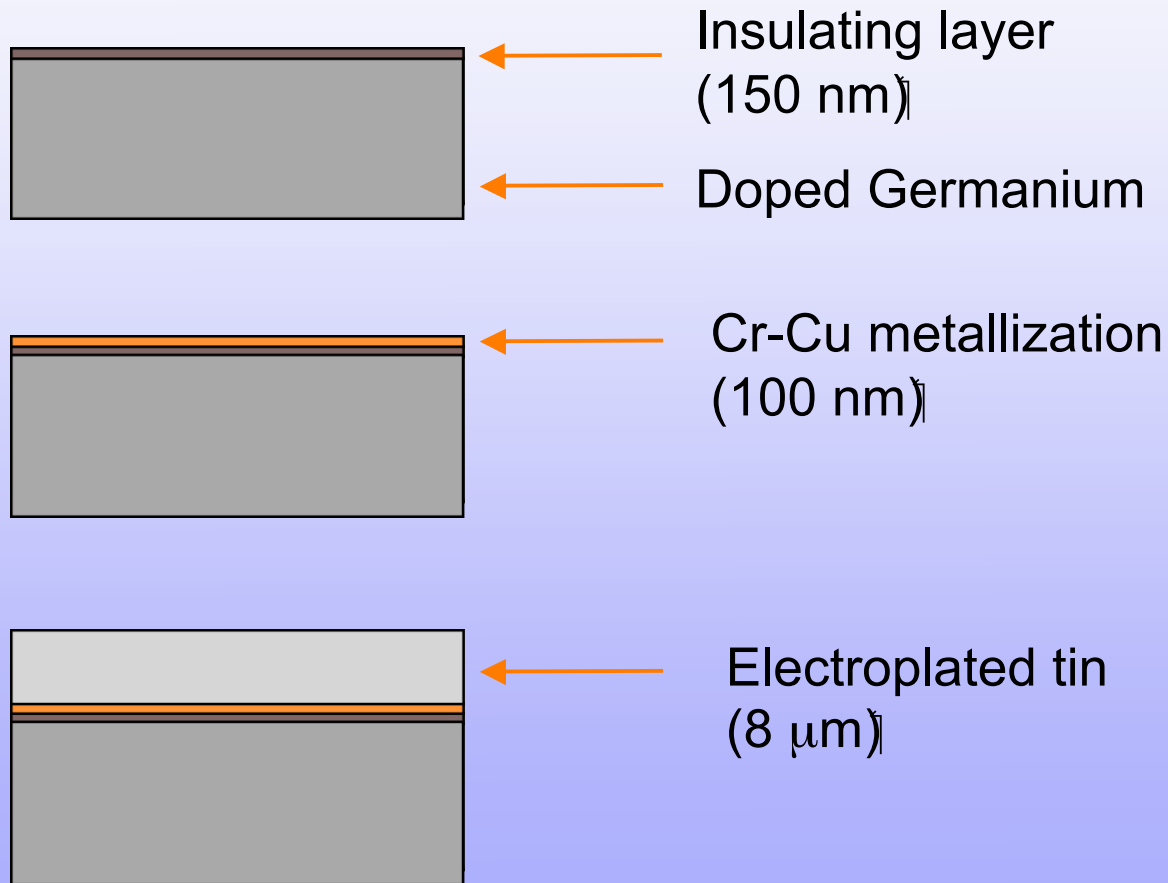
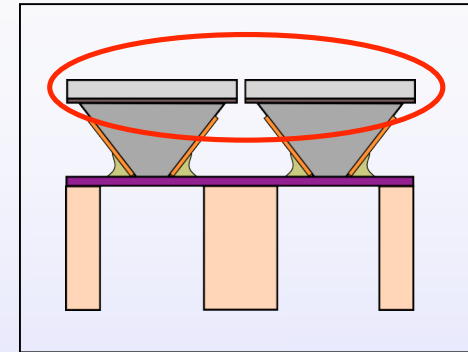
First complete hybridization
onto 8x8 freed Matrix



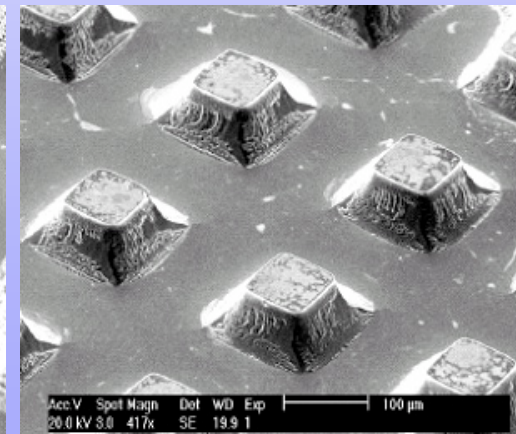
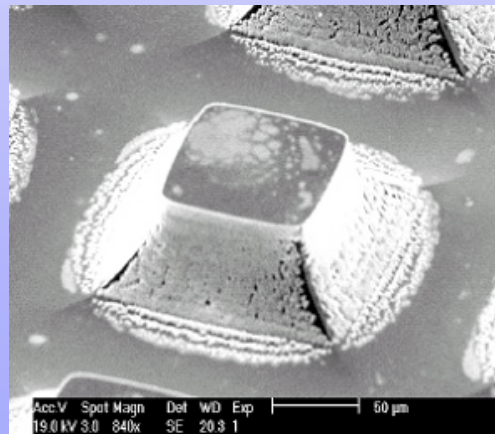
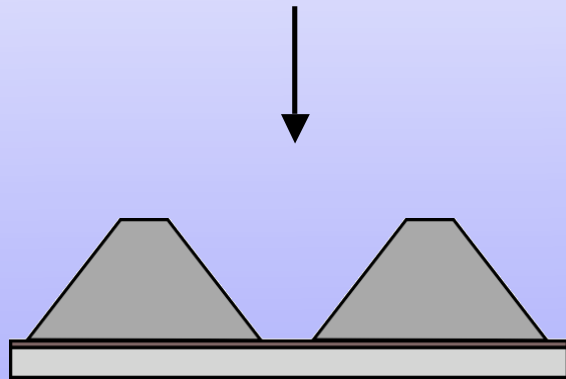
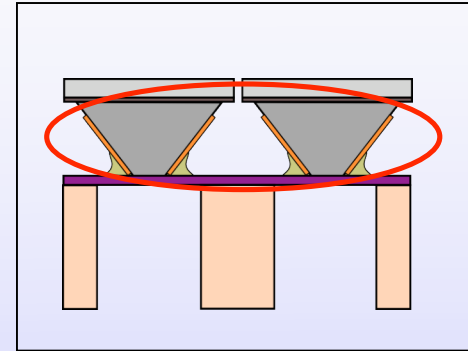
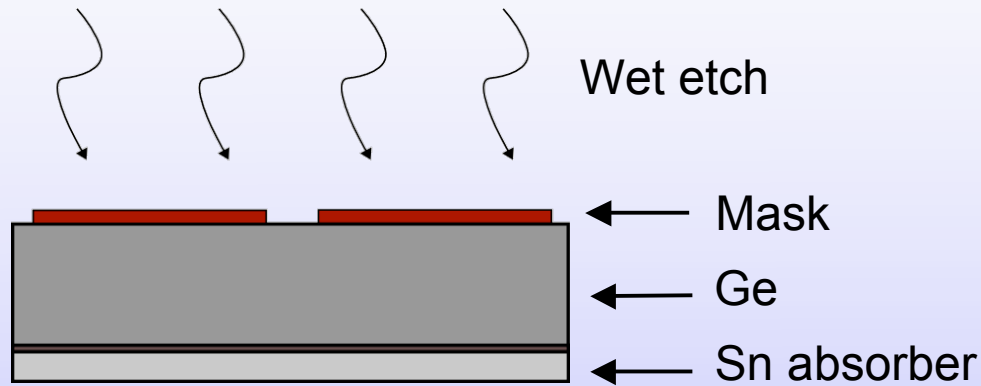
G. Chianetta, C. Arnone, M. Barbera, J. Beeman,
A. Collura, G. Lullo, E. Perinati, E. Silver
Palermo University, G. Vaiana Observatory, LBNL, CFA

Saclay

Absorber

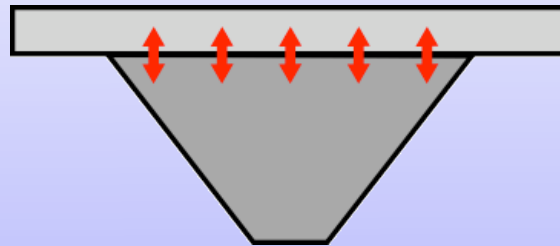


Thermistor shaping

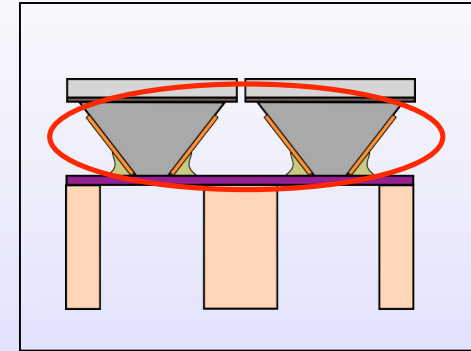
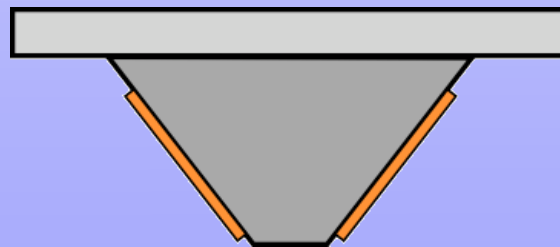


Advantages of the pyramidal shape

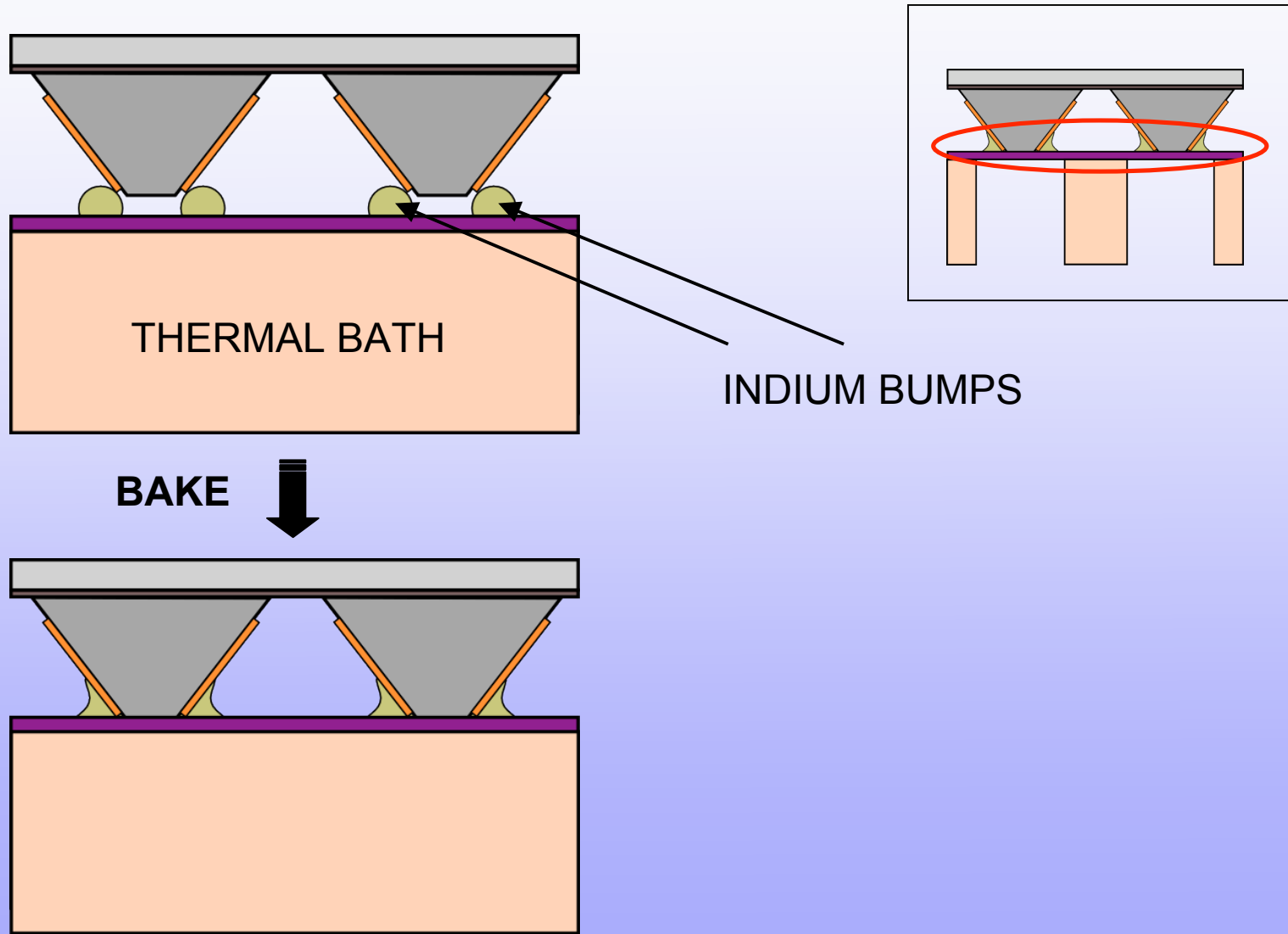
- Good thermal exchange with small thermometer volume



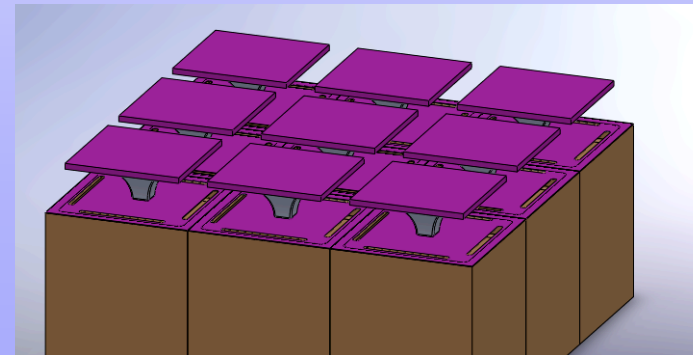
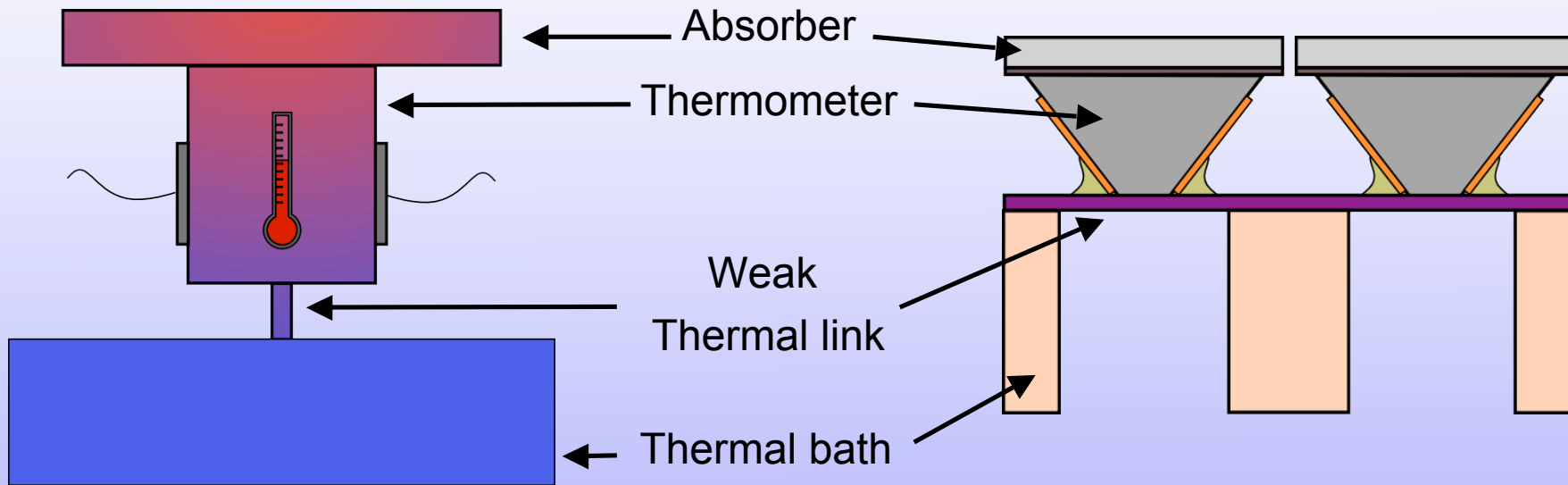
- Contacts suitable for soldering



Soldering to the thermal bath



Microcalorimeters Implementation- Planar approach



L'électronique de lecture-multiplexage

Les MOSFET Silicium sont bien adaptés à la lecture de senseurs de haute impédance : 100 G Ω

**Pour les senseurs d'impédance intermédiaire (1-10 M Ω) :
Les HEMTs GaAs/GaAlAs peuvent être une solution**

**L'électronique bipolaire SiGe fonctionne à 4 K
SiGe bipolar electronics demonstrated at 2- 4 K**

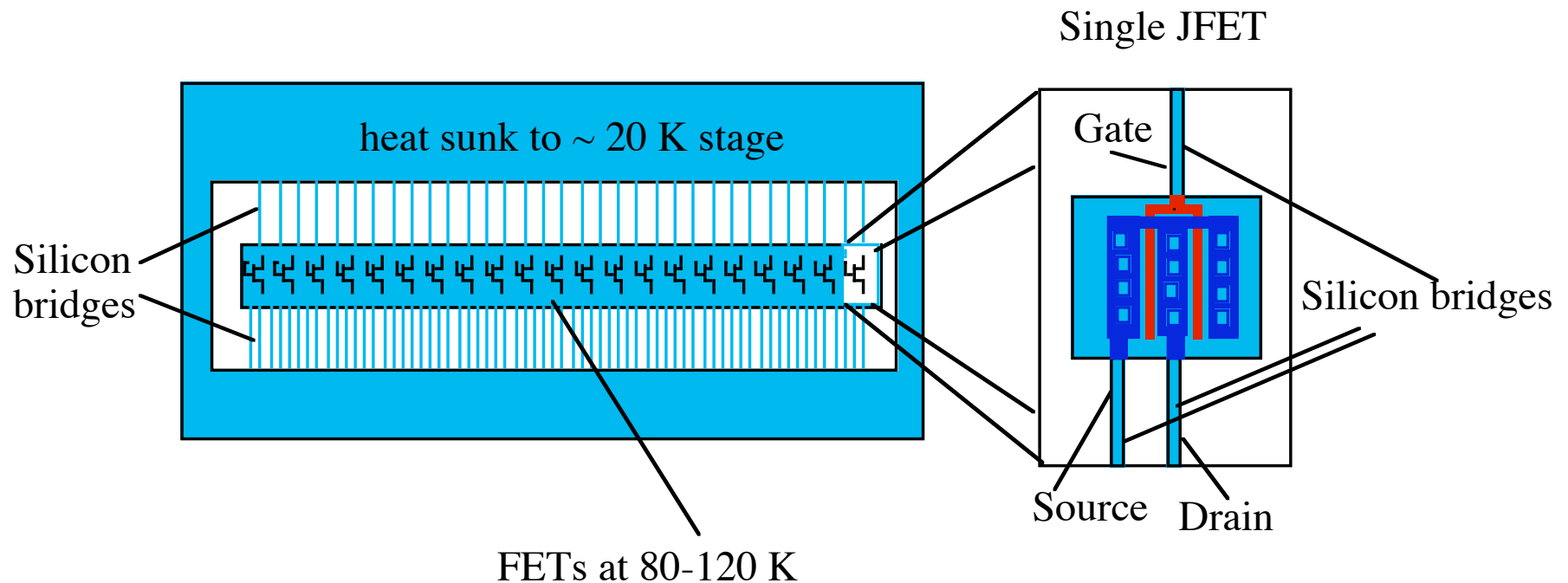
On peut remplacer les JFETs Silicium par une électronique cryogénique plus intégrée

**Diminuer le nombre de connexions entre le 50 mK et les étages
À plus haute température du cryostat**

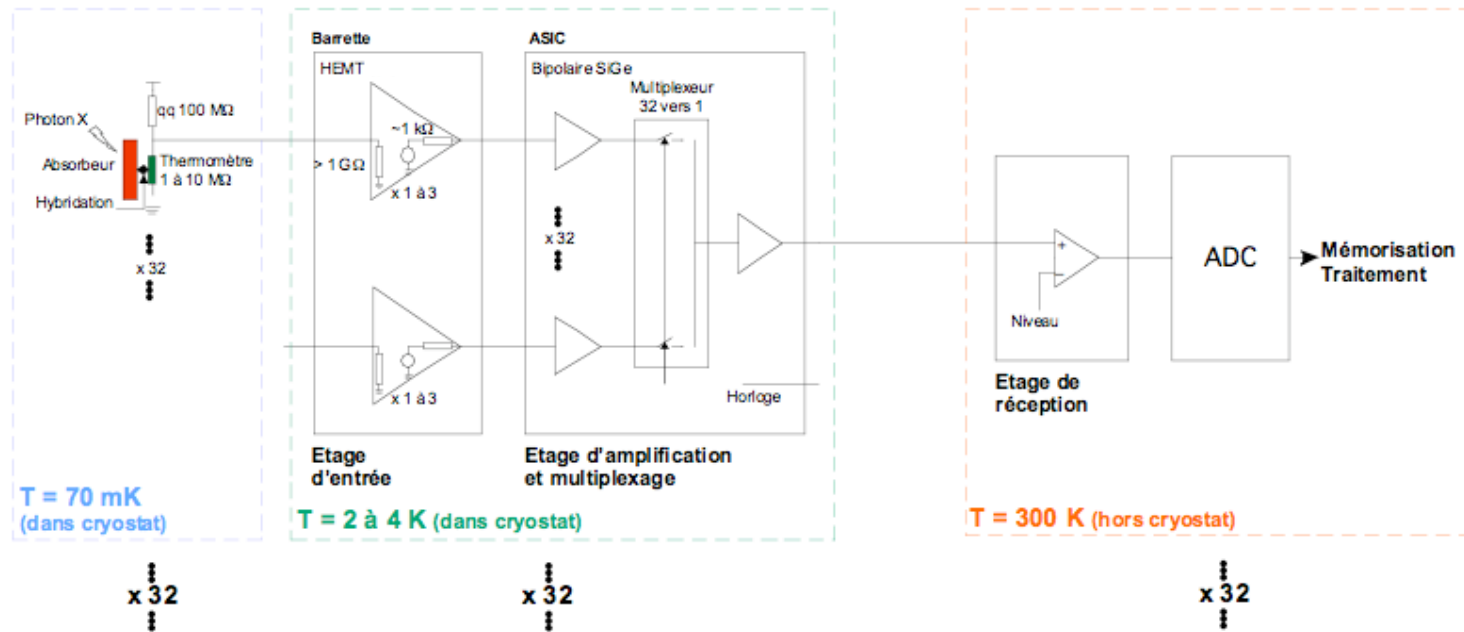
GSFC MIS arrays

If absorber attachment automated, read-out, rather than physical design of the array, likely sets the limit on number of pixels

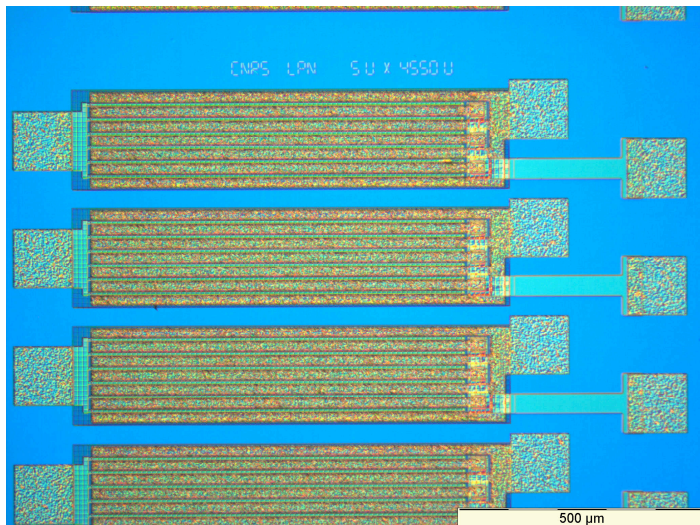
- 60 μW per JFET dumped to 20 K temperature stage or higher
- JFET's operate with lowest noise at 130 K
- 100 JFET's not hard
- 1000 JFET's possible with monolithic JFET's and connections
 - Careful thermal design required to manage the 60 mW



Electronique cryogénique



Grille



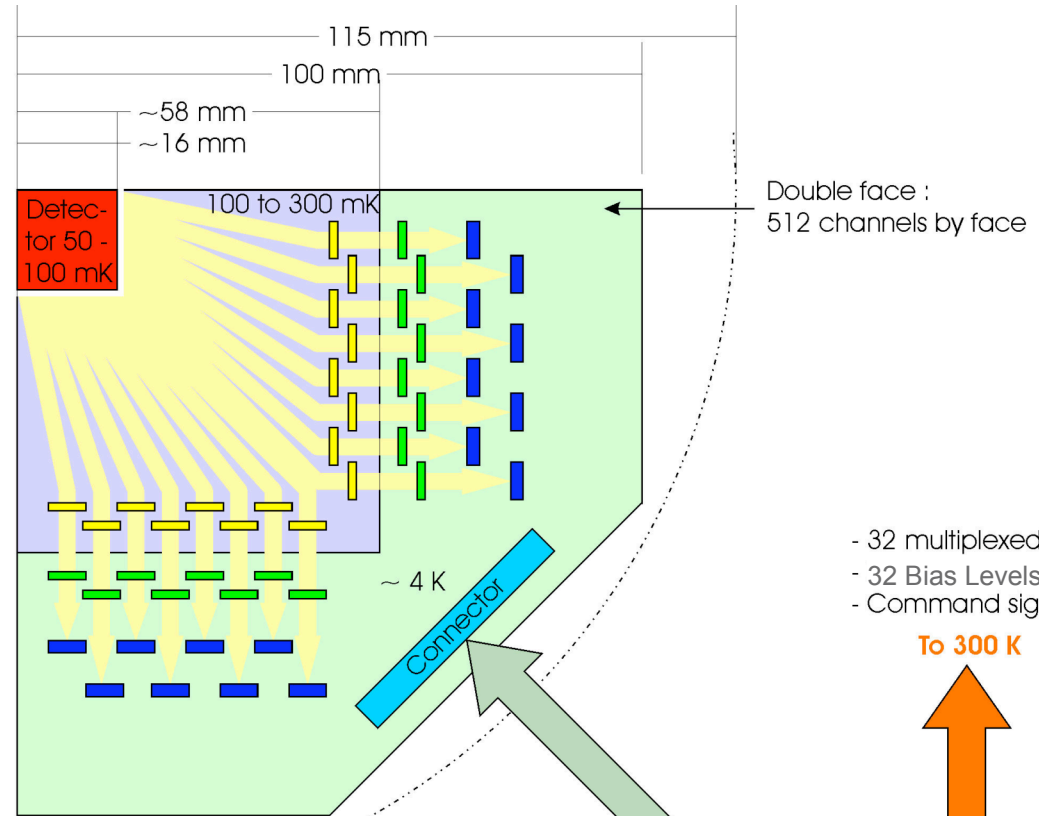
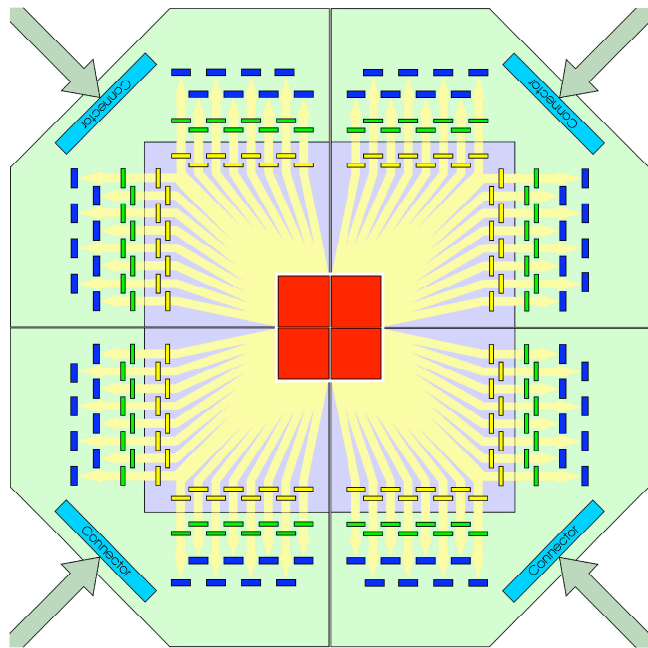
Drain
Source

16x1 HEMT Design

Concept de la Motherboard

Design optimisé pour réduire et égaliser les impédances de ligne, les capacités parasites et les diaphonies entre pixels

Matrices aboutables sur 2 cotés



- 32 multiplexed signals
- 32 Bias Levels
- Command signals

To 300 K

- Bias Resistors 32 channels
- Input stage - 32 channels (6 x 1.3 mm)
- ASIC - 32 channels (6 x 2 mm)

Chips pads pitch : minimum 100 μ m
Strips pitch on silcion : until less than 1 μ m

Stabilité de la source froide

**Il faut augmenter la stabilité en température
de la source froide**

Augmentation de la capacité calorifique

Diminution de la réponse aux rayons cosmiques

Diminution de la diaphonie

**Utilisation d'un dépôt de métal résistif sur le Si
Cu (GSFC), Pd**

X-ray Astronomy satellites and missions

UHURU (SAS-1) 1970-1973 GPC

EINSTEIN (HEAO-2) 1978-1981 (WOLTER type I) First mirror optics

ROSAT (Roentgen Sat.) 1990-1999

ASCA (Astro-D) 1993-2000 (CCD) Standard configuration

CHANDRA (AXAF) 1999----- angular resolution

NEWTON (XMM) 1999----- high throughput

SUZAKU (Astro-E2) 2005-----

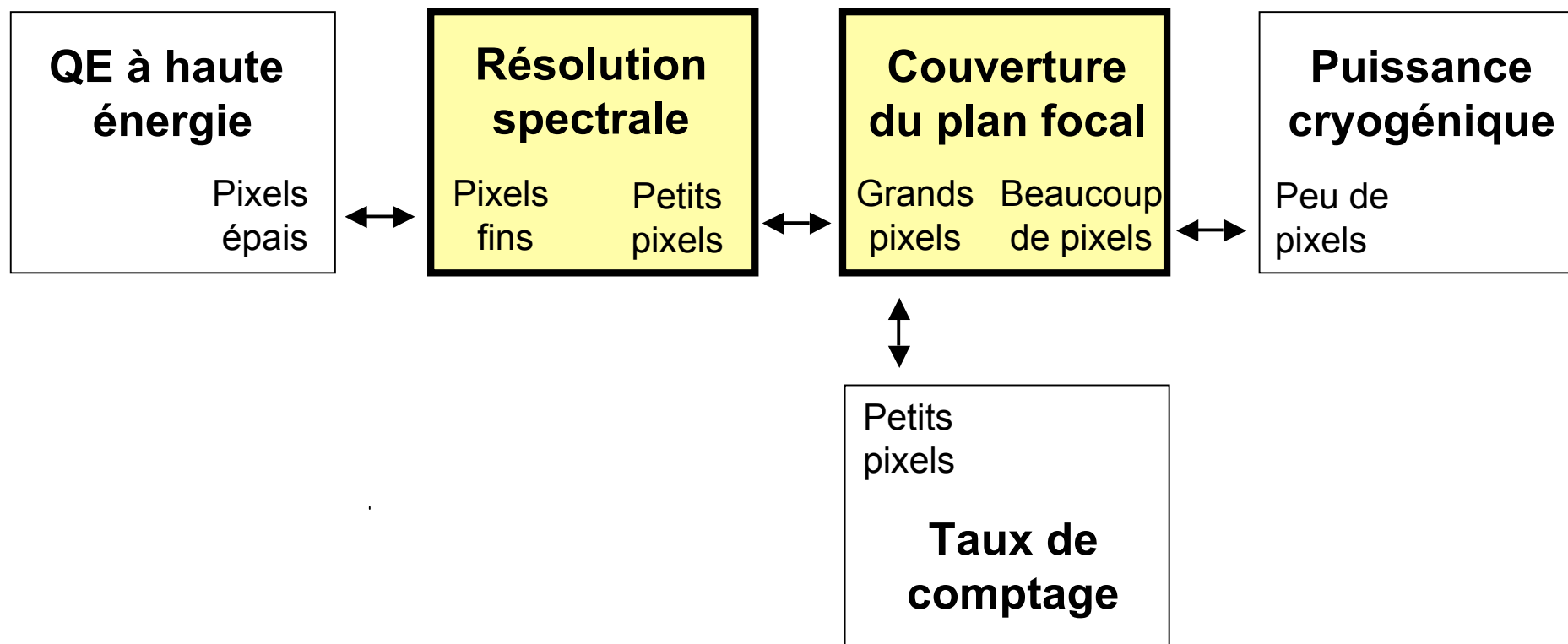
~~Symbol-X~~ Astro- H/NeXT (2013)

XEUS / IXO (μ Cal.) (2020)
Large focal length

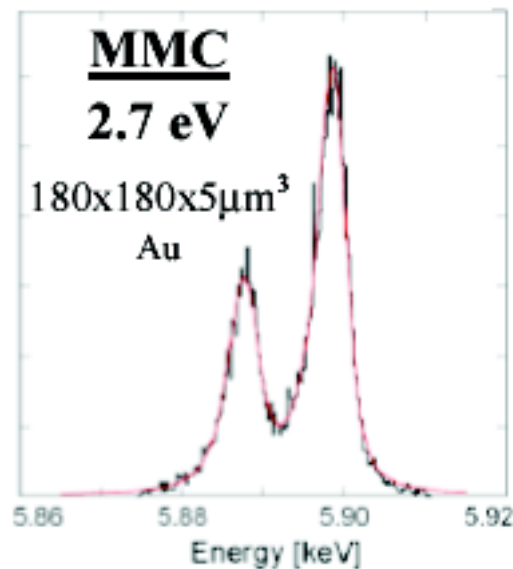
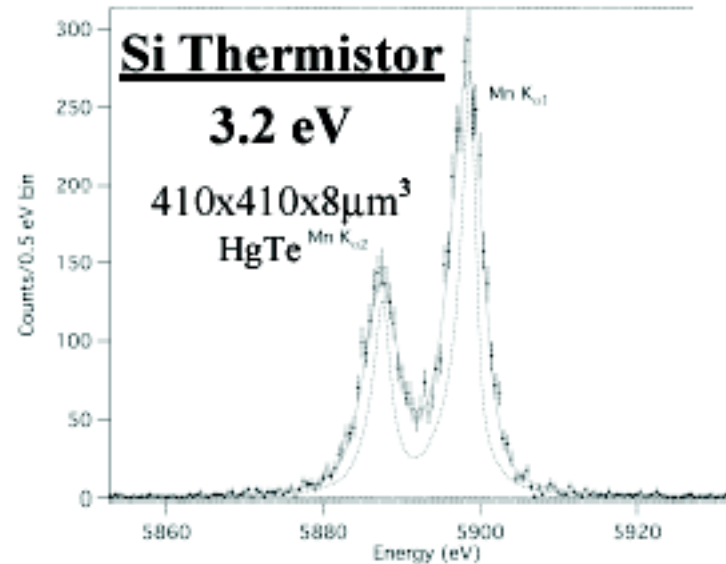
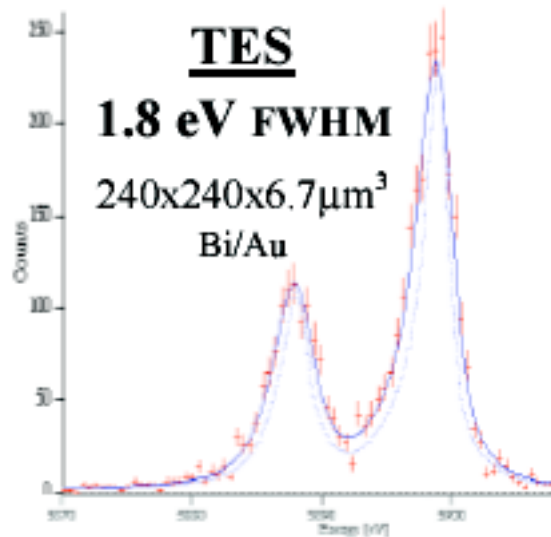
μ calorimètres

Les compromis

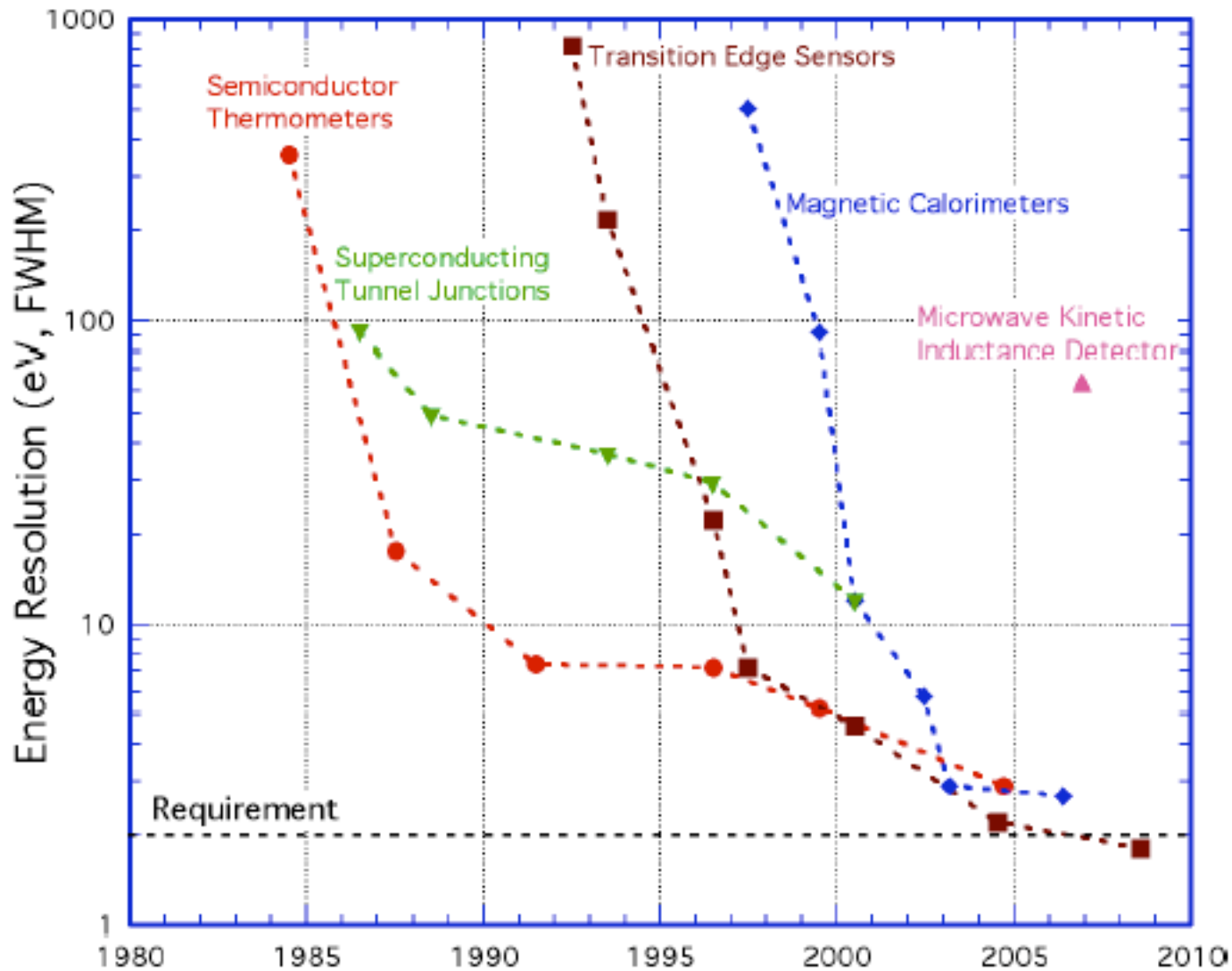
Géométrie du pixel et du plan focal



Résolution spectrale



Spécifications de la mission
XEUS / IXO (2020) :
5 eV @ 6 keV (objectif : 2 eV)
2.5 eV @ 6 keV



Evolution en fonction du temps de la résolution en énergie (à 6 keV) pour trois technologies de microcalorimètres

L'après-IXO, un exemple : Gen-X

Design Parameter	Requirement	Goal	Assumption or Comments
Pixel Pitch	0.1''	0.03''	For 60 m focal length, 0.1'' pixels are 30 μm in size.
Field of View	3'x3'	3'x3'	3'x3' => 1800x1800 array of 0.1'' pixels => <u>3.24 x 10⁶ pixels.</u>
Energy resolution	2 eV FWHM	1 eV FWHM	This is the requirement for energies up to 6 keV.
Count Rate	1 cps/pixel	10 cps/pixel	
Quantum efficiency	0.60 @ 6 keV	0.80 @ 6 keV	Factoring in filter transmittivity, this drops at lower energies.
Energy Range	200 eV – 10 keV	100 eV – 10 keV	
Timing resolution	50 μs	10 μs	
Calibration	0.5 eV – absolute	0.1 eV – absolute	
Background rate	0.004 cts/ksec/arcsec ²		This is the desired residual background after anticoincidence vetoing in the 0.5-2 keV energy range.

Conclusion

La résolution spectrale des futures missions d'astronomie X pourra être atteinte quel que soit le type de senseur utilisé au niveau du monopixel.

Le challenge : La couverture du plan focal

La mise en œuvre de matrices de grande taille sera conditionnée par la disponibilité d'une électronique de lecture-multiplexage convenable; une électronique cryogénique.

Quelle électronique permettra l'exploitation d'un grand nombre de pixel dans les limites du budget cryogénique, électrique et en volume ?

Un point sont les performances d'un monopixel avec une chaîne électronique dédiée

Les performances d'une matrice intégrée, c'est une autre histoire

Chaque pixel est un détecteur différent (\neq cas des CCDs)

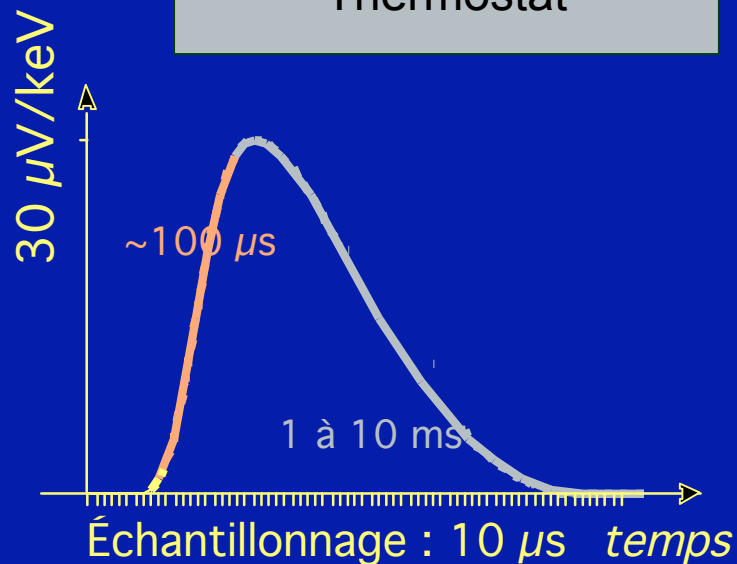
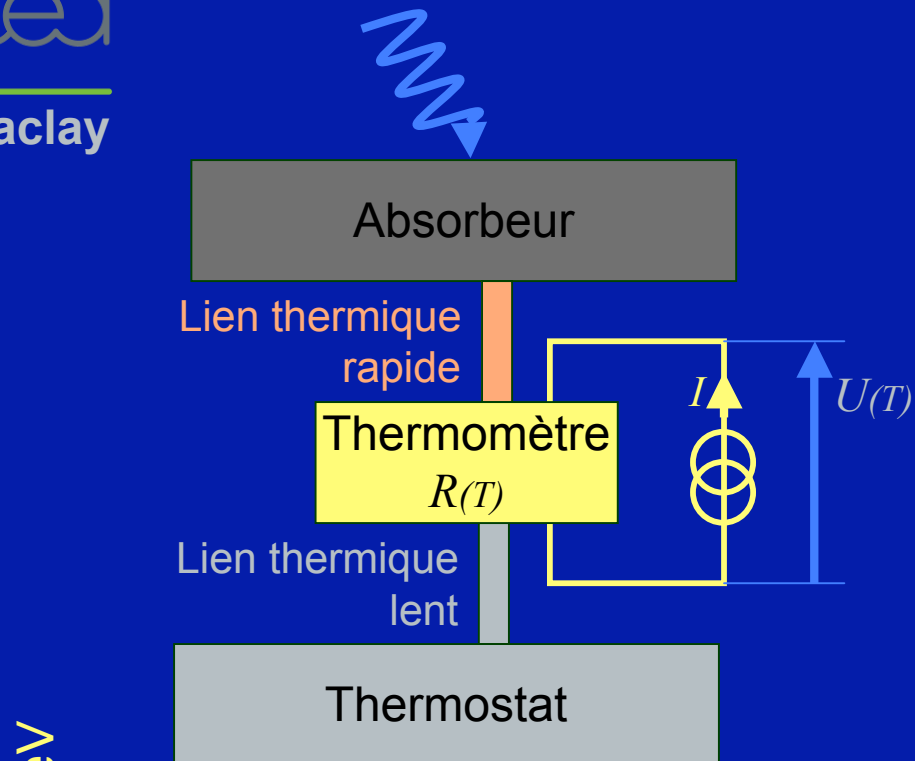
Nécessité d'une calibration + Stabilité en temps après calibration :
Vieillessement d'un pixel \rightarrow change des paramètres du pixel

Stabilité par rapport à l'environnement de la mission :

Environnement magnétique (cryogénérateur ADR), électromagnétique
Rayons cosmiques

Annexes

Microcalorimètre X silicium : Principe



Absorbeur froid (~ 60 mK)

capacité calorifique réduite au maximum

- Un photon X d'énergie E_0 touche l'absorbeur *phonons, ionisation, quasiparticules à recombinaison*
- Conversion en chaleur Q
- élévation de la température $\Delta T = Q / C$ *capacité calorifique C faible $\rightarrow \Delta T$ élevé*
- Transfert de chaleur Q (lien rapide ~ 100 μ s) *rapide mais pas trop (permettre la thermalisation)*

Thermomètre

- Variation de la résistance $R(T)$ *polarisée par une source de courant*
- Mesure de la tension $U(T) = R(T).I$ *échantillonnage rapide des valeurs de $U(T)$*

Thermostat

- Source froide (~ 50 mK)
- Evacuation de la chaleur Q (lien lent 1-10 ms) *fonctionne en mode comptage jusqu'à ~ 10 -100 cnt/s*
- Restauration de la température initiale