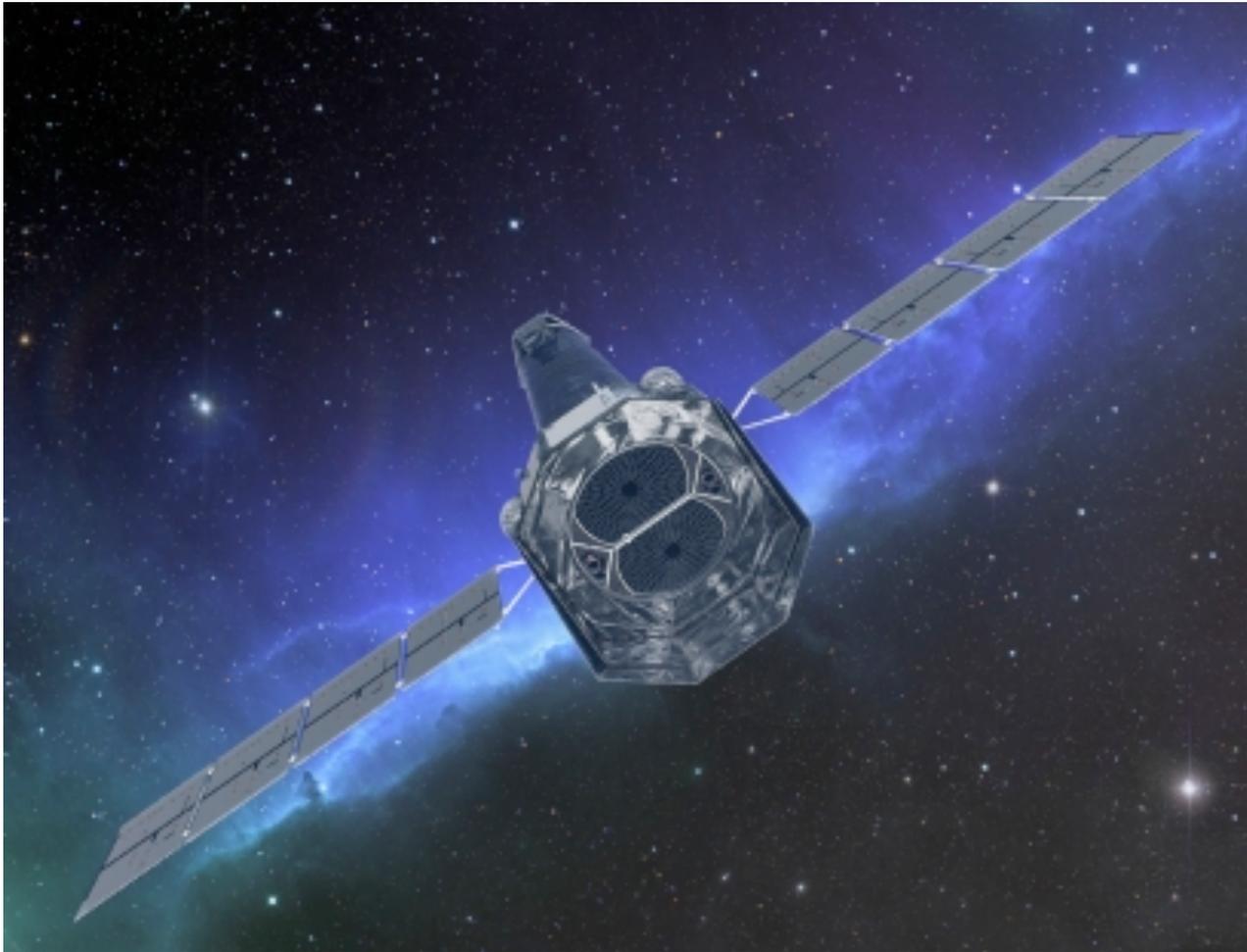
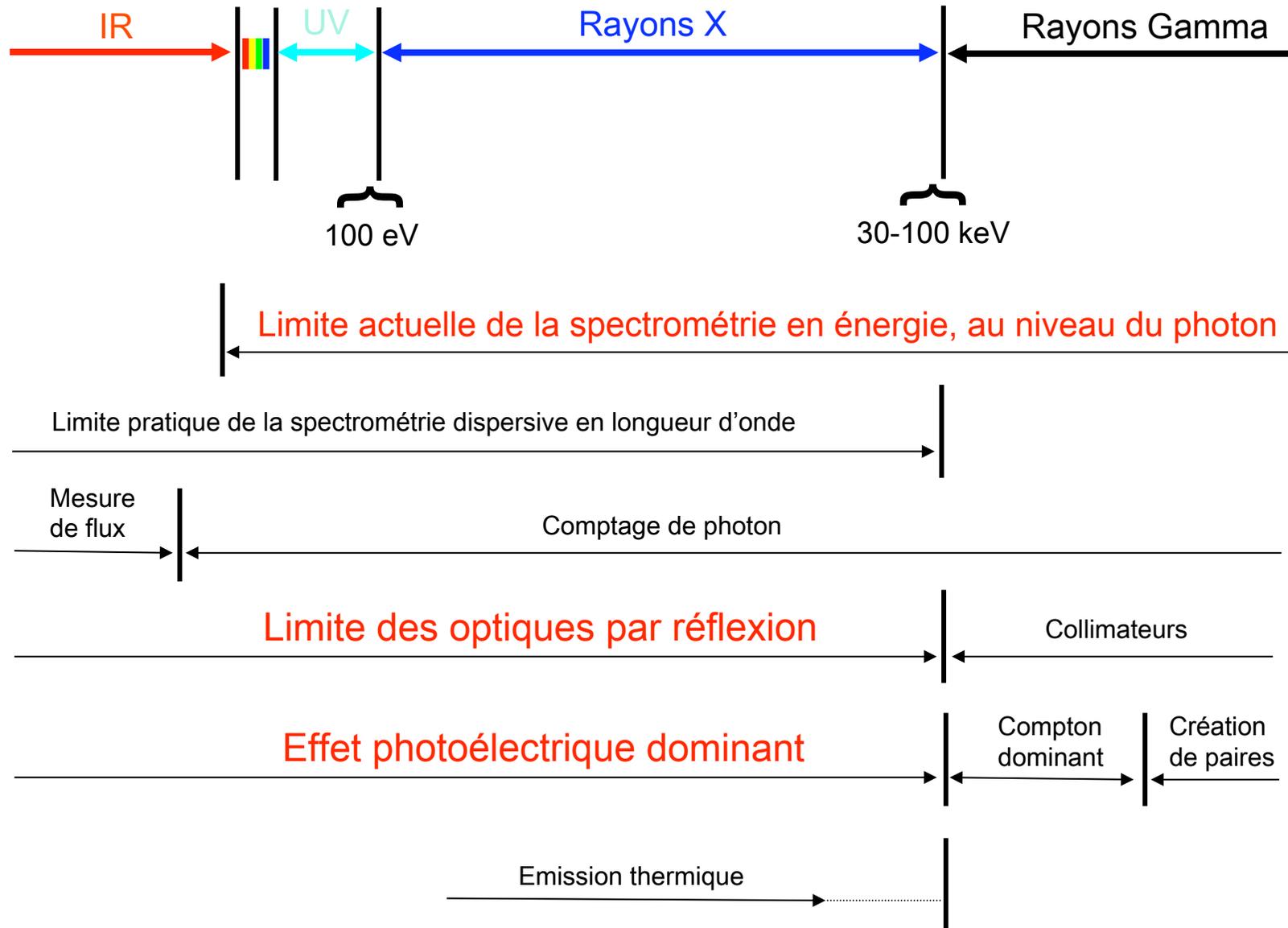


# Détection du Rayonnement X à très basse température



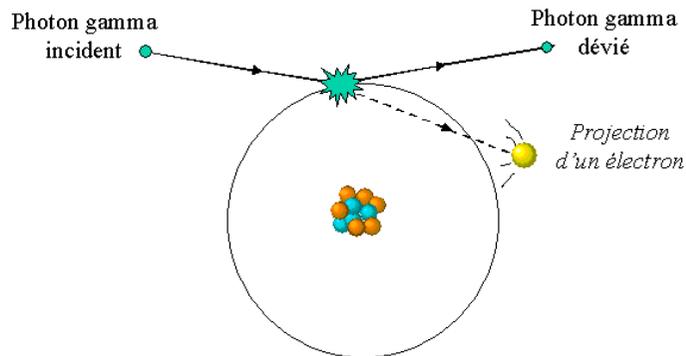
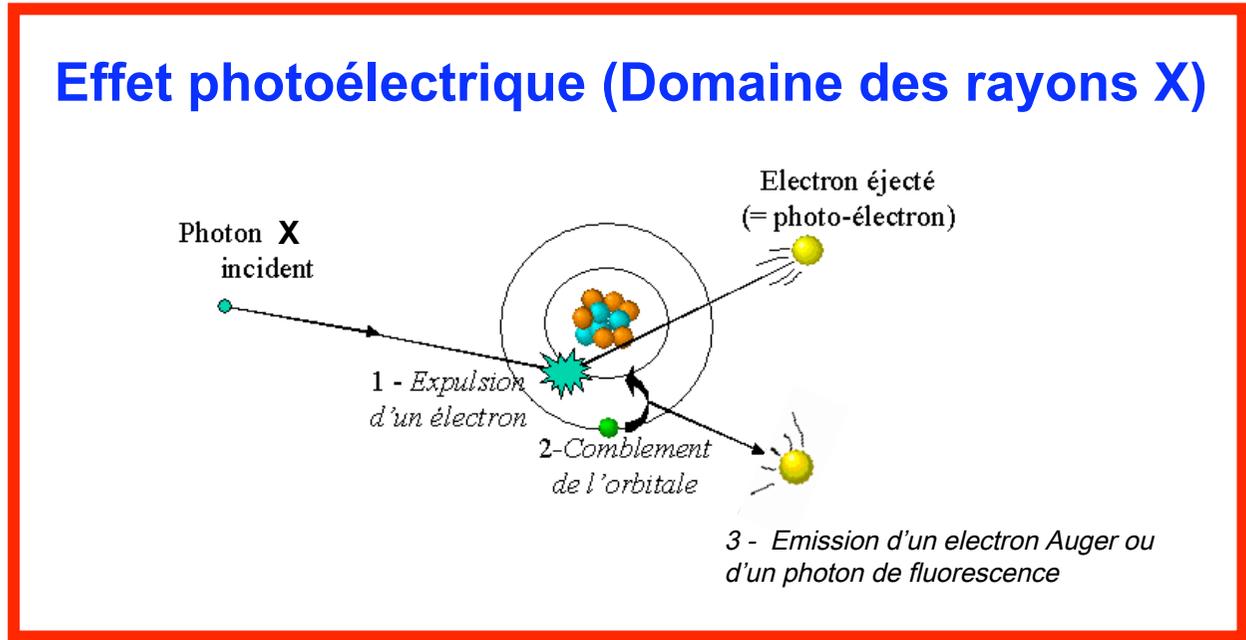
**Astronomie haute énergie, histoire et perspectives, défis technologiques**



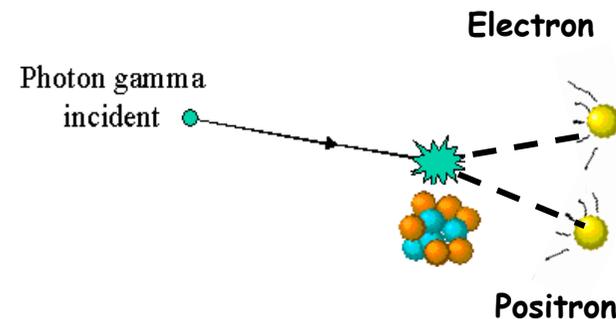


# Les mécanismes d'interaction

## Effet photoélectrique (Domaine des rayons X)

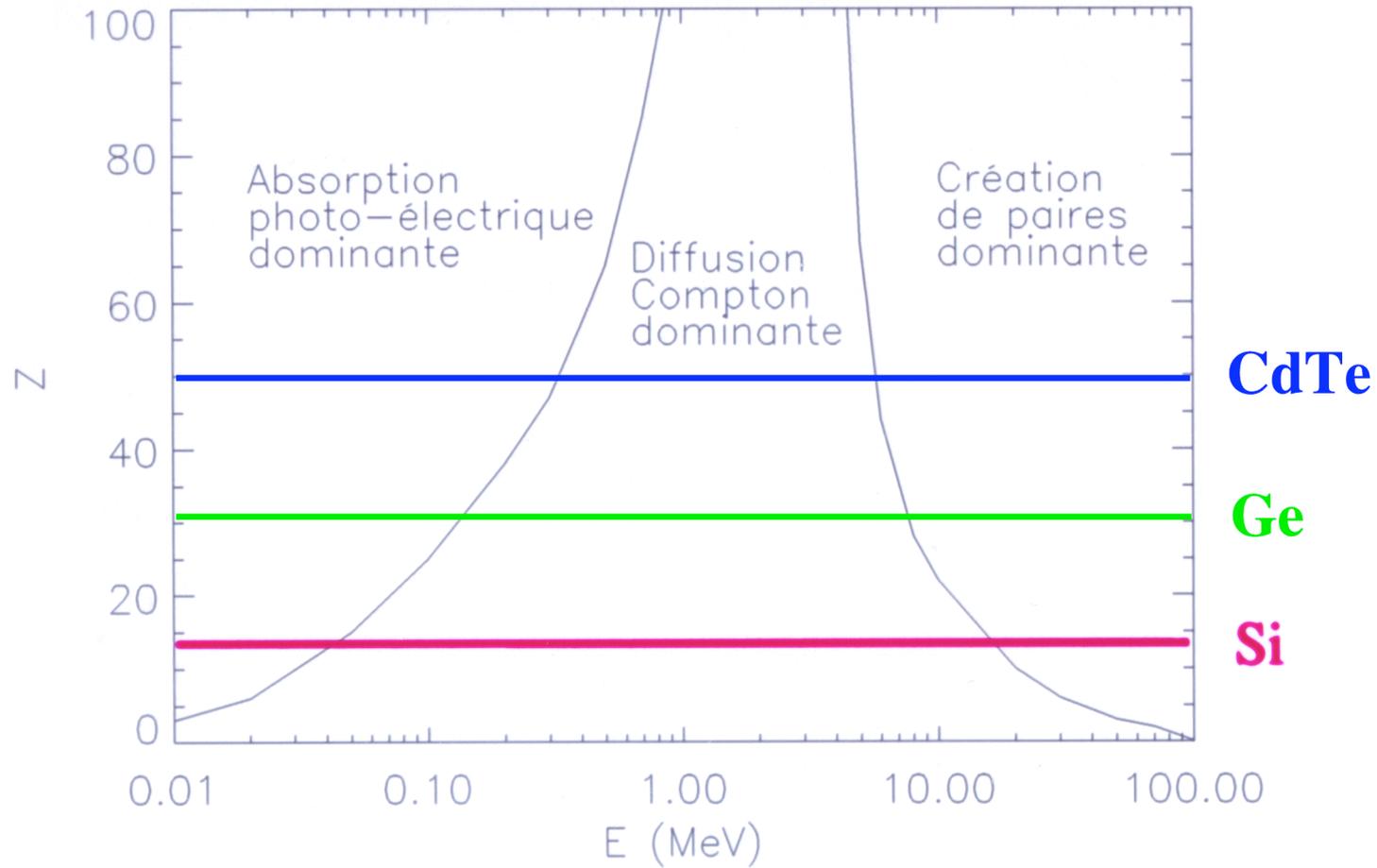


**Diffusion Compton**



**Création de paires**

## Interaction dominante en fonction du Z détecteur



## Spécificités du rayonnement X

**-Imagerie/concentration possible** avec une vraie optique

Le miroir de Wolter

**-Une interaction « ponctuelle »**

Photon absorbé dans qqs mm de Silicium (qqs 10-100  $\mu\text{m}$  de matériau à haut Z) pour  $\geq 10$  m de distance focale

L'effet photoélectrique  $\rightarrow$  2 électrons contenus dans qqs  $\mu\text{m}$  de matériau détecteur solide (moins d'1  $\mu\text{m}$  pour un  $e^-$  de 6 keV)

Pour les futurs spectroimageurs, on envisage une taille de pixels de 250x250 à 500x500  $\mu\text{m}^2$

**-Une spectrométrie réalisable** en longueur d'onde sur le photon ou dispersive en **ENERGIE**  $\rightarrow$  **Spectro-imageur**

## 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**

**$\mu$ bolomètres  
G petit**

**$\mu$ calorimètres  
C<sub>therm.</sub> réduite**

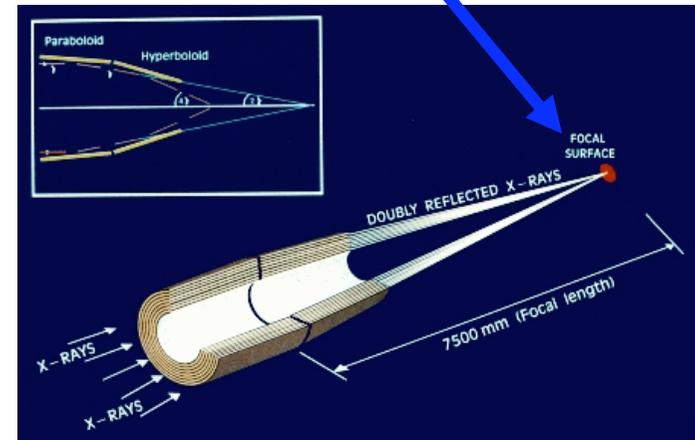
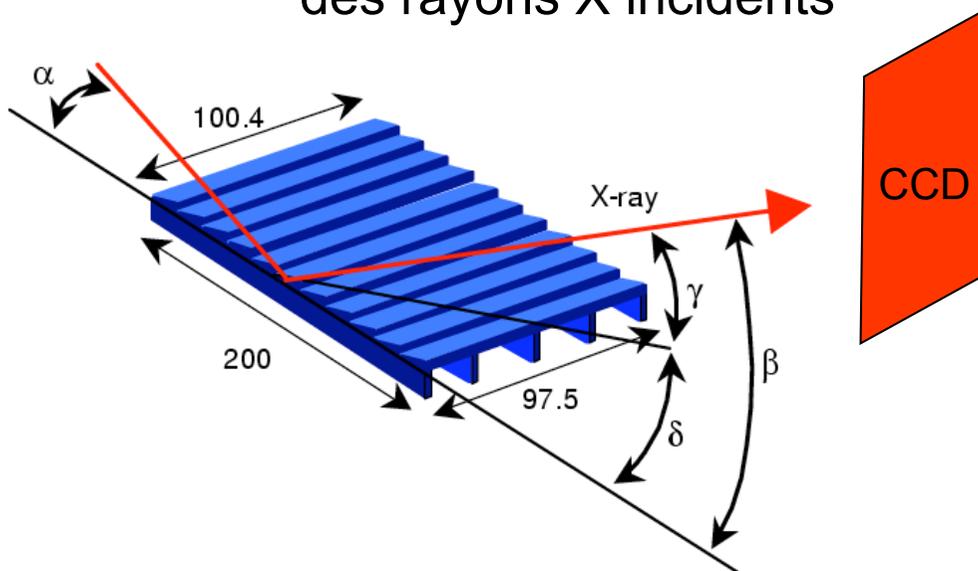
# Quelle Spectrométrie ?

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

Le détecteur est placé  
au foyer du télescope



L'équation des réseaux :  $m\lambda = d(\cos\beta - \cos\alpha)$   
 $\alpha$  l'angle d'incidence est imposé  
 $\beta$  est mesuré par une caméra (CCD ?)

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**

Effective Area (cm <sup>2</sup> )	@0.25 keV	@0.4 keV	@0.6 keV	@1.0 keV	@1.5 keV	@2.5 keV	@6.0 keV	@8.0 keV	@12.0 keV
	133	360	591	922	1180	696	768	390	19
	460	771	1061	1227	1304	779	851	557	56
	-	44	94	185	160	-	-	-	-
	30	120	345	615	500	320	205	45	-
	-	35	70	385	525	320	235	60	-
	150	50	65	215	162	65	45	10	-
	-	-	-	10	45	20	25	7	-
	25	12	25	55	105	50	20	4	-

**Domaine d'énergie réduit**

Energy Resolution (eV)	@0.25 keV	@0.4 keV	@1.0 keV	@2.5 keV	@6.0 keV	@8.0 keV	Angular Resolution (FWHM)
	35	45	55	85	130	150	~6"
	35	45	55	85	130	150	~6"
	-	0.5	2.9	17	-	-	-
	130	120	100	120	170	190	1"
	37	42	56	82	130	150	1"
	-	-	-	-	-	-	<0.5"
	-	-	1.0	5.2	29	50	-
	0.4	0.8	5.4	34	-	-	-

**Pas d'imagerie**

**Bonne résolution spectrale**

**Robustesse**

# 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**

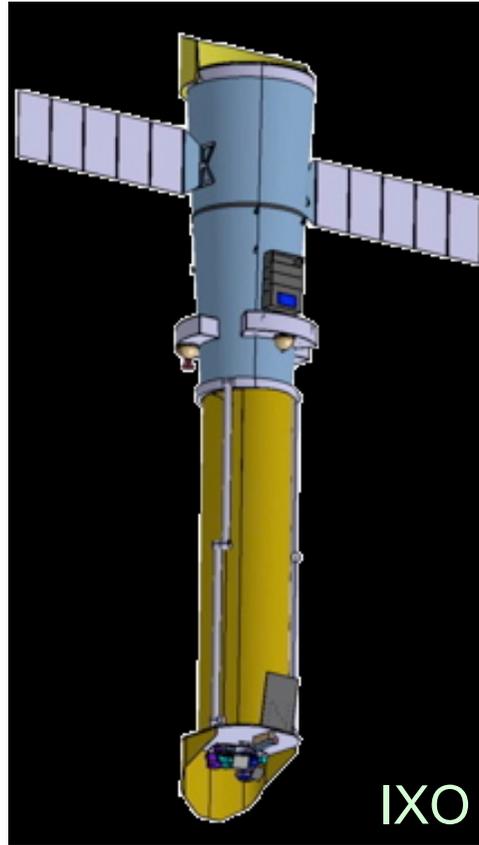
CHANDRA (AXAF) 1999----- angular resolution

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

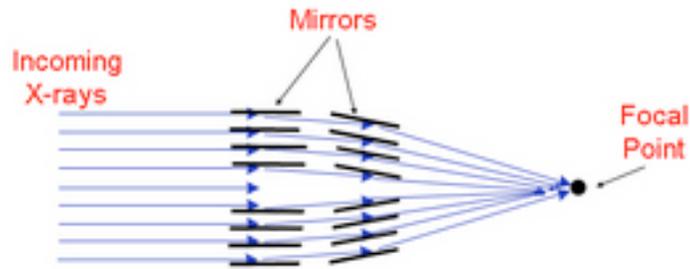
SUZAKU (Astro-E2) 2005-----

~~Symbol-X~~ Astro- H/NeXT (2014)

XEUS/IXO/ATHENA ( $\mu$ Cal.) (2022)  
Large focal length



# Quelle Imagerie ?



Configuration de Wolter I  
 $\approx 12$  m de distance focale

Surface effective :

XEUS / IXO / ATHENA : 50 / 3 / 1 m<sup>2</sup>  
 XMM/Newton (.3 m<sup>2</sup>)

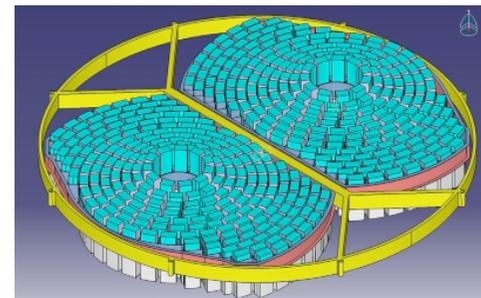
PSF : 1 à 5 arcsec au centre

FOV : quelques dizaines d'arcmin

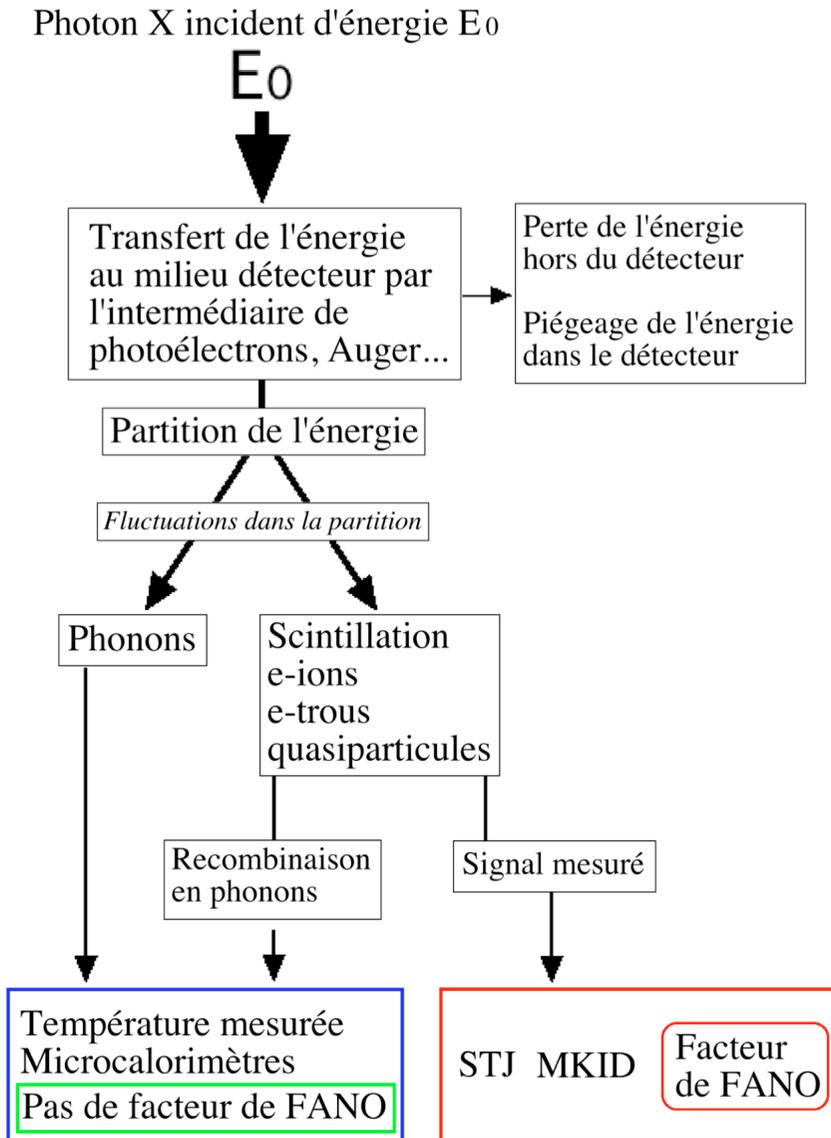
Conséquences :

- a) La taille des pixels peut être assez grande tout en échantillonnant correctement la PSF : **quelques centaines de microns**
- b) **Pixels lents** acceptables compte tenu du taux de comptage attendu
- c) La couverture du plan focal peut demander quelques  **$10^4$  à  $10^5$  pixels**
- d) Dans l'état actuel la **couverture du plan focal** ne peut être obtenu qu'avec des **détecteurs silicium**.

Deux plans focaux : WFI / XMS



# Les spectromètres intrinsèques, le facteur de Fano



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

$$E = n \varepsilon$$

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

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

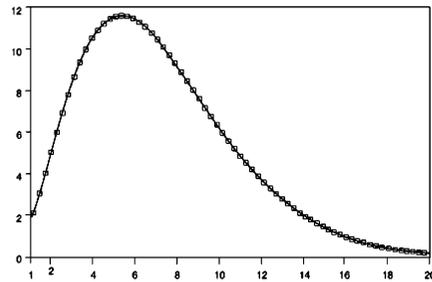
$$\sigma_E = \sqrt{(F \varepsilon E)}$$

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

$$F = .1 \text{ à } .2$$

# Fano / Pas Fano

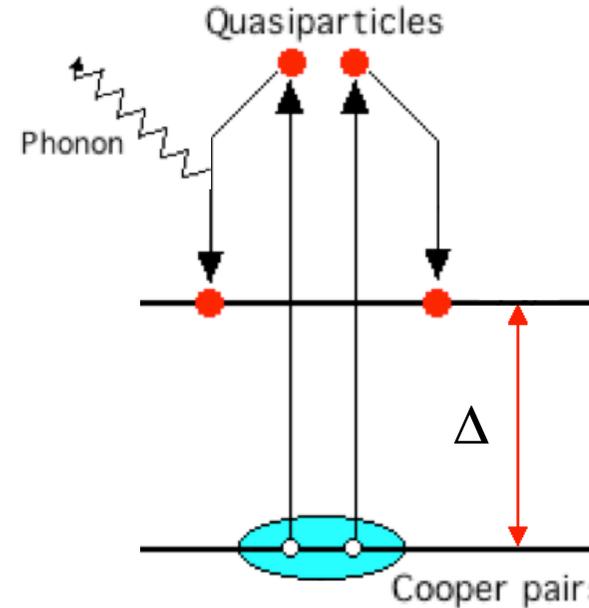
## Les Microcalorimètres



Des phonons avec une énergie distribuée suivant une loi de Planck  
On mesure une température

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

## Les KIDs et STJs



Des quanta d'information, les quasiparticules que l'on dénombre

$$\varepsilon = q qes \text{ meV}$$

$$\Delta E_{FWHM} = 2.35 \sqrt{(F \varepsilon E)}$$

## Quel détecteur cryogénique ?

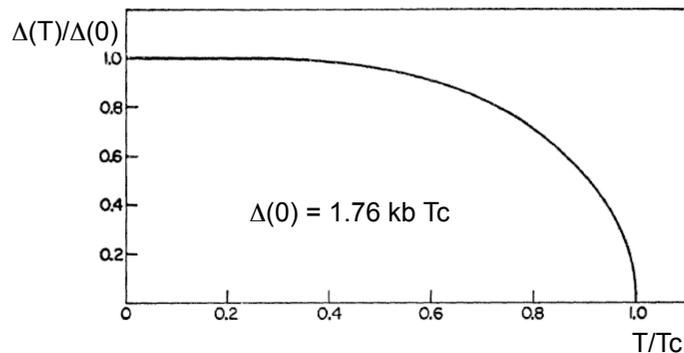
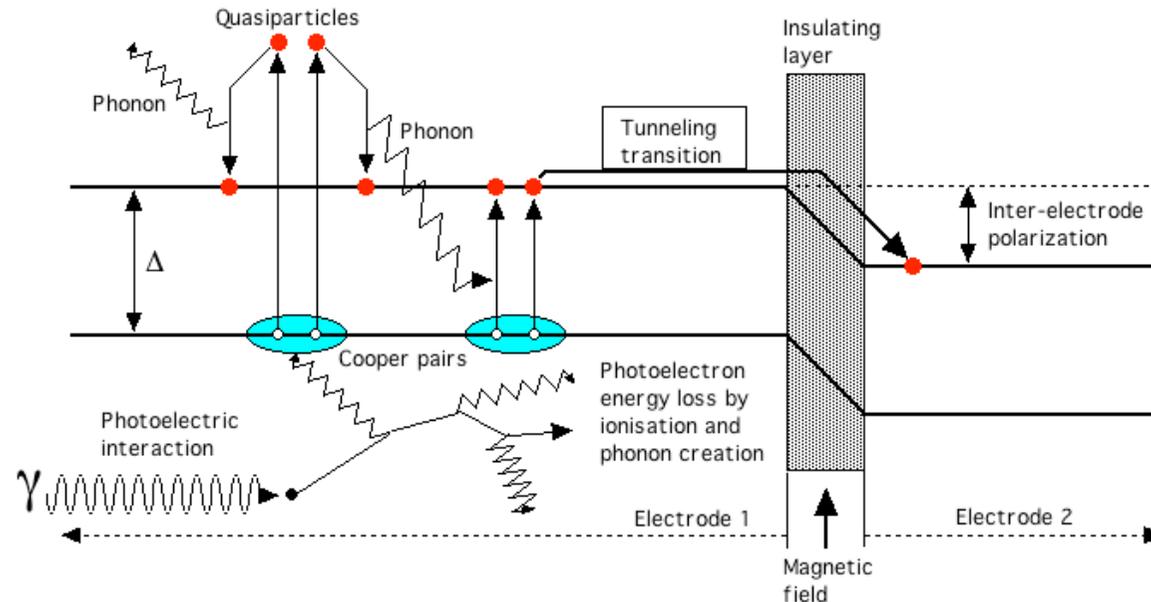
Des quanta d'information de faible énergie/faible  $\varepsilon$  peuvent exister à basse température : Les quasiparticules  
 $\varepsilon$  varie comme la  $T_c$ , d'où les faibles températures  
Exemple les STJs

Un prix à payer : ils sont instables (recombinaisons)  
( $\neq$  paires  $e^-$  trou des détecteurs Si)

## Les microcalorimètres

# Jonctions supraconductrices à effet tunnel (STJ)

Développements de STJ pour la détection X à l'ESTEC, sans suite  
Rayonnement synchrotron ?



Top <  $T_c / 10$ ,  
champ magnétique  
pour bloquer le courant Josephson,  
 $V < 2\Delta/e$ , SsIsS, Ta/Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al/Ta,  
Gain par effet tunnel multiple

## Quelle résolution, quelle QE, nb de pixels ?

La résolution est limitée par FANO

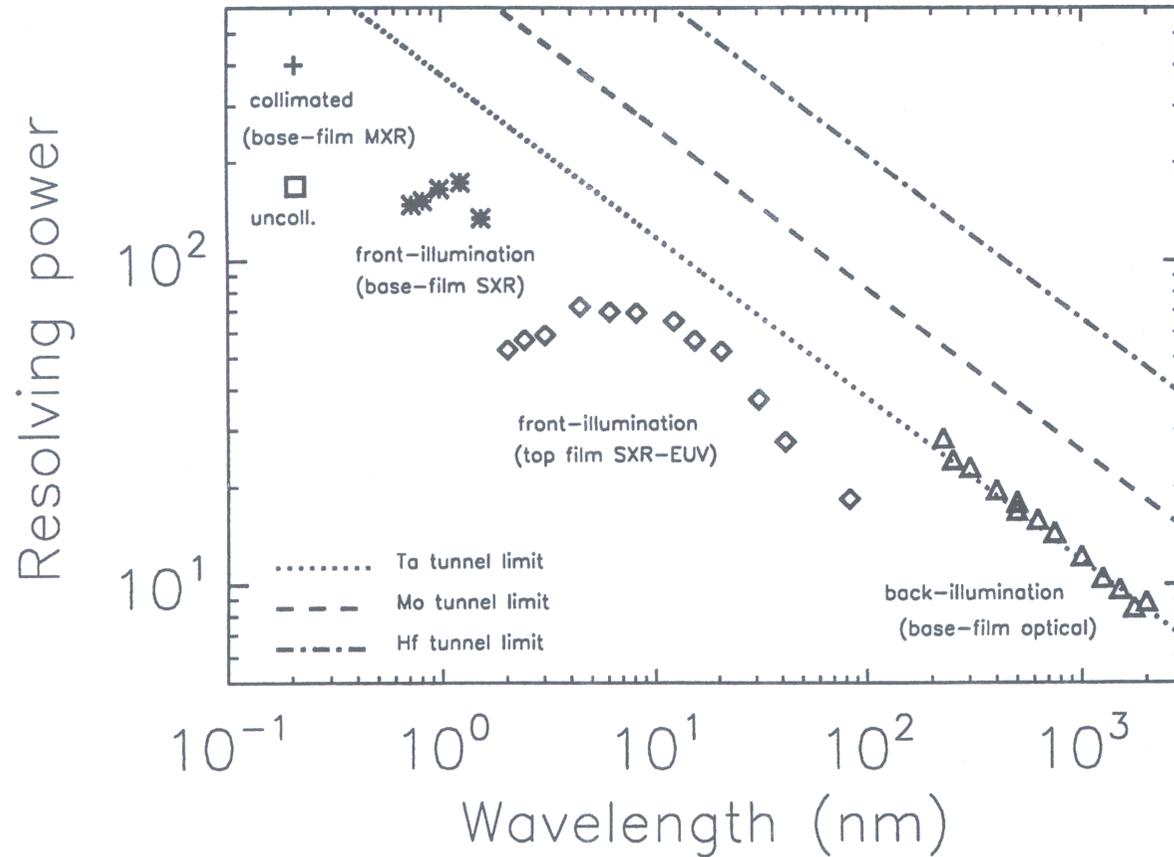
D'autres phénomènes interviennent pour dégrader la résolution

- fuite des phonons
  - $\epsilon$ collection des qps (limite en épaisseur de l'absorbeur)
  - recombinaison des qps
  - variabilité du gain par effet tunnel multiple
  - double réponse (killed electrode)
- 10 - 20 eV @ 6 keV

QE insuffisante à 6 keV (300 nm Ta)

Détecteur rapide qqes 10  $\mu$ s, taux de comptage important

Pas d'électronique multiplexée



Supra	Tc(mK)	T.op(mK)	Absorp. de 300 nm à 1 keV 6 keV	
Ta	4470	300-440	85 %	15 %
Mo	915	61-92	80 %	10 %
Hf	128-205	8.5-20	76 %	12 %

# Détecteurs à inductance cinétique KIDs

Les KIDs ont été traités par S. Doyle Mercredi matin

Le signal exploité est une variation d'inductance cinétique qui est reliée au nombre de paires de Cooper brisées/paires de quasiparticules créées par le rayonnement X incident.

Le quantum d'information est bien le même que pour les STJs.

Les raisons qui limiteront la résolution des KIDs seront fondamentalement les mêmes que dans le cas des STJs (excepté la variabilité sur le gain).

La résolution est limitée par FANO

Dans le cas des KIDs les films minces (40 nm) sont favorisés

QE insuffisante

Le multiplexage par résonateur pourrait permettre la réalisation de matrices couvrant le plan focal

# 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

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

# Les Thermomètres

- a) Les thermomètres exploitant une variation de résistance en fonction de la température :

**MIS : thermomètres semi-conducteurs**

Si implantés et diffusés à haute température / NTD Ge

**TES : thermomètres à transition supraconductrice**

- b) Les thermomètres exploitant une variation de champ magnétique en fonction de la température :

**MPT : thermomètres à transition supraconductrice**

(Magnetic Penetration Thermometer)

**MMC : thermomètres magnétiques métalliques**

- c) Les thermomètres exploitant une variation de la constante diélectrique en fonction de la température :

**DMC : Dielectric MicroCalorimeter**

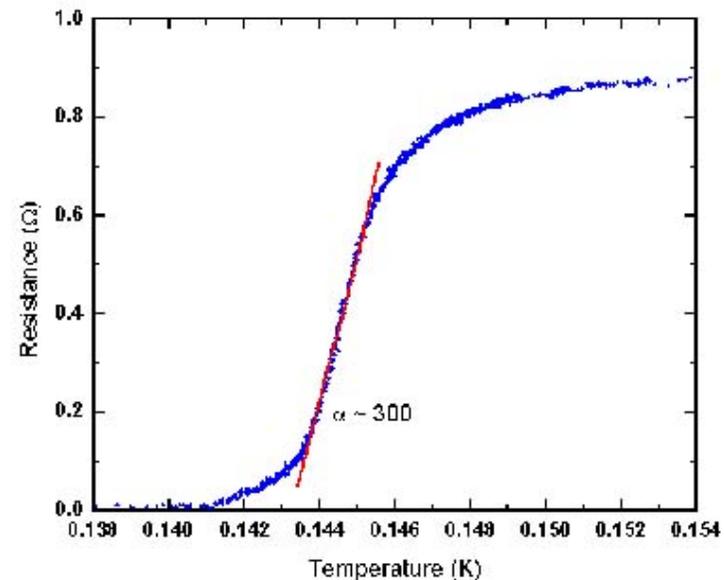
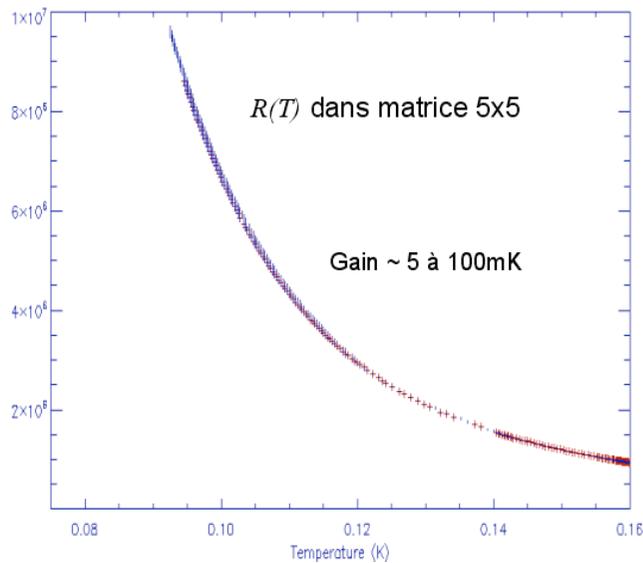
Les thermomètres b) et c) sont à lecture non dissipative

# Le thermomètre résistif

Le thermomètre doit avoir :

- La capacité calorifique la plus basse possible
- La sensibilité  $\alpha$  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  $1/f$ .



Traité par D. Prêle Mercredi

Semiconducteurs :  $dR/dT < 0$

polarisation à I constant

Lecture en tension

$T \nearrow R \searrow W = RI^2 \searrow T \searrow$

TES :  $dR/dT > 0$

polarisation à U constant

Lecture en courant

$T \nearrow R \nearrow W = U^2/R \searrow T \searrow$

Avantages :

Stabilisation de la température du pixel au dessus de la température de la source froide à un point choisi de la courbe de transition (TES).

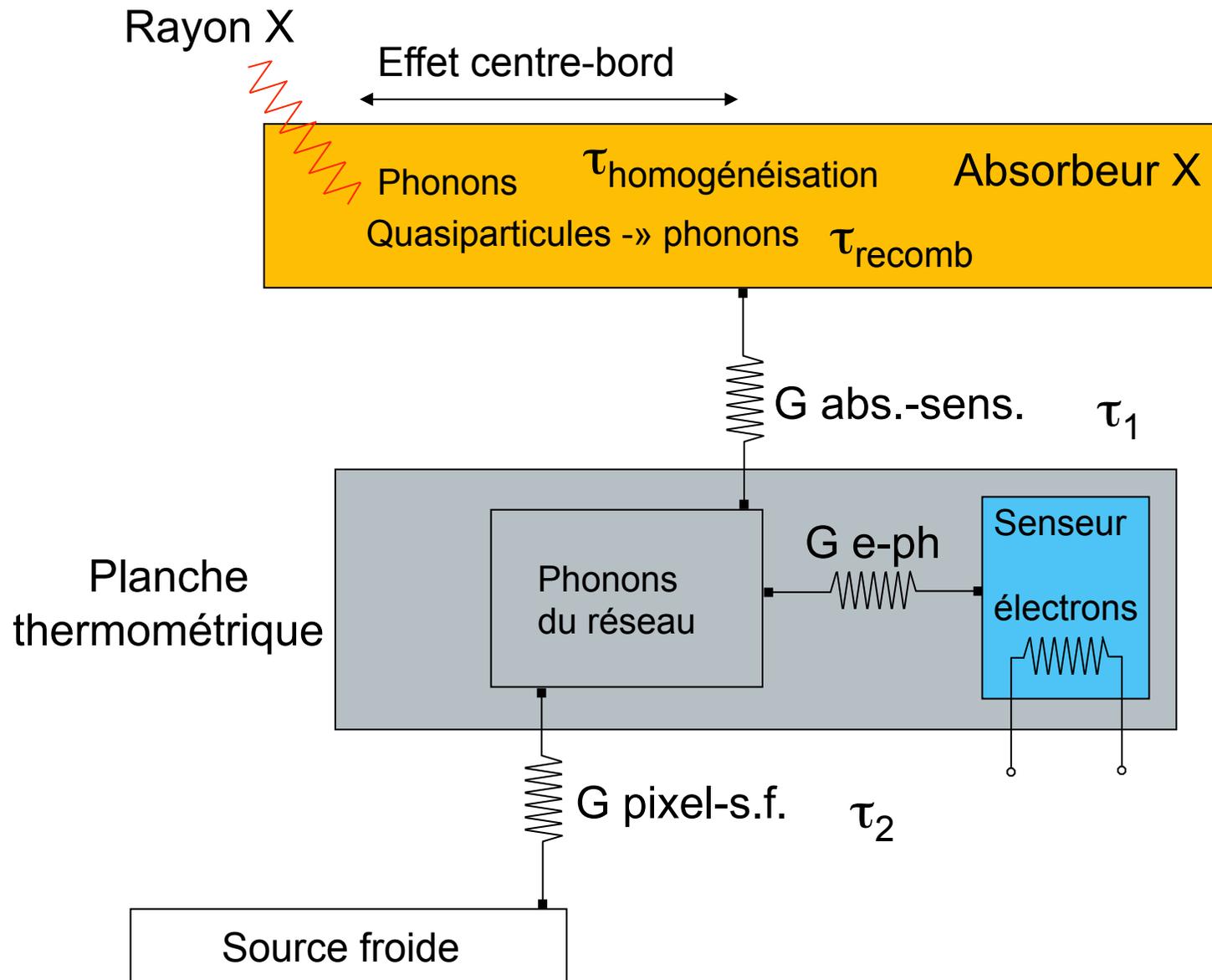
Compensation des variations de la valeur de la  $T_c$  entre pixels d'une même matrice.

Compensation d'une variation de la température de la source froide

Courbe thermique plus rapide → Taux de comptage amélioré

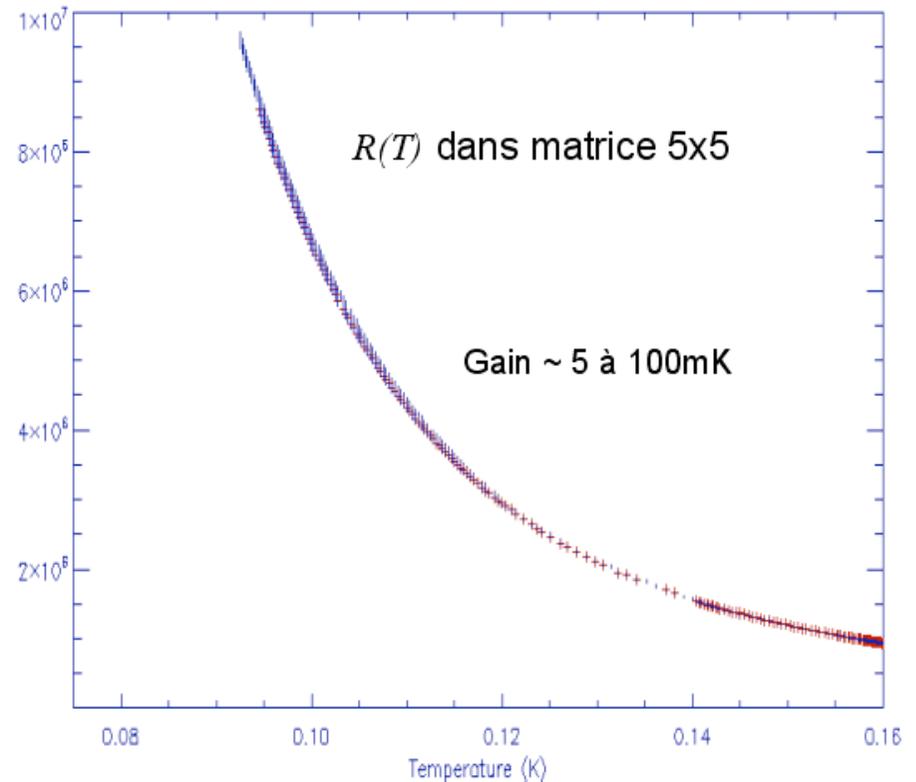
Augmentation de la dynamique avant saturation (TES)

# Principe du microcalorimètre Silicium



# Le thermomètre résistif semiconducteur

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 :



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

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

Traité par L. Rodriguez Jeudi matin

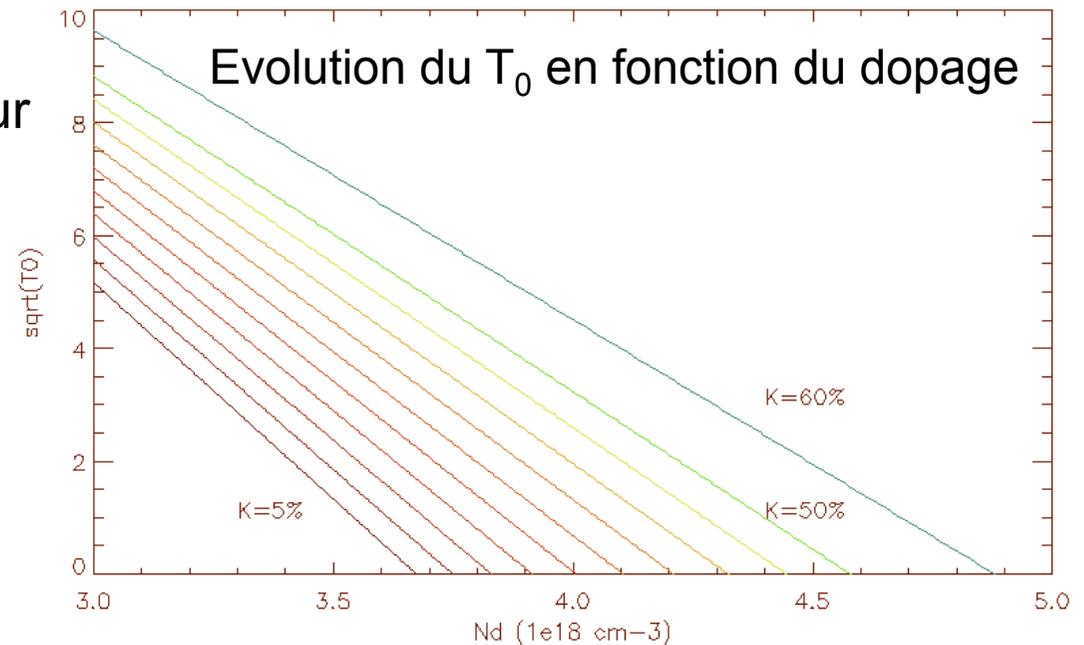
## Contraintes sur le thermomètre

- 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  $\text{mV}$
  - 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  $\rho_0$  et de la géométrie du senseur

Le dopage doit être très élevé pour diminuer  $\rho_0$  (objectif  $R \sim \text{Mohm}$ )

Il faut diminuer le dopage pour maximiser  $T_0$

Nécessité d'un compromis  
 $\alpha$  limité à 10



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

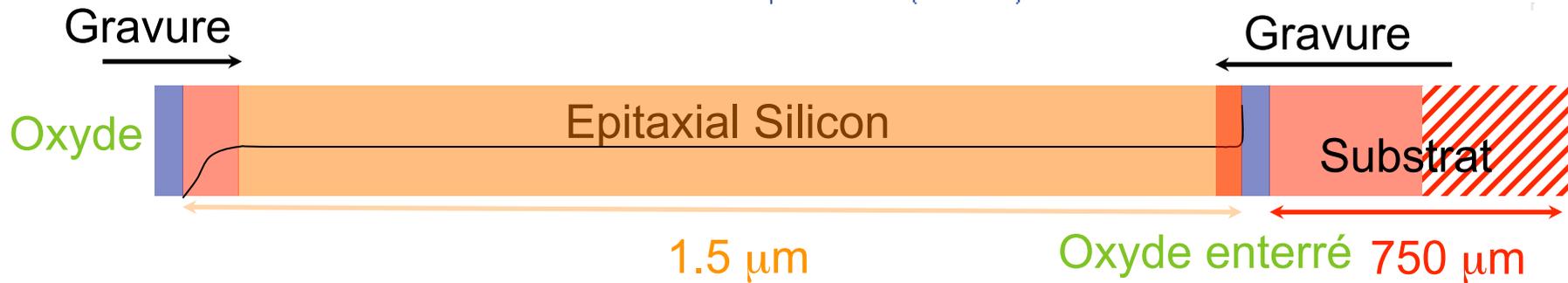
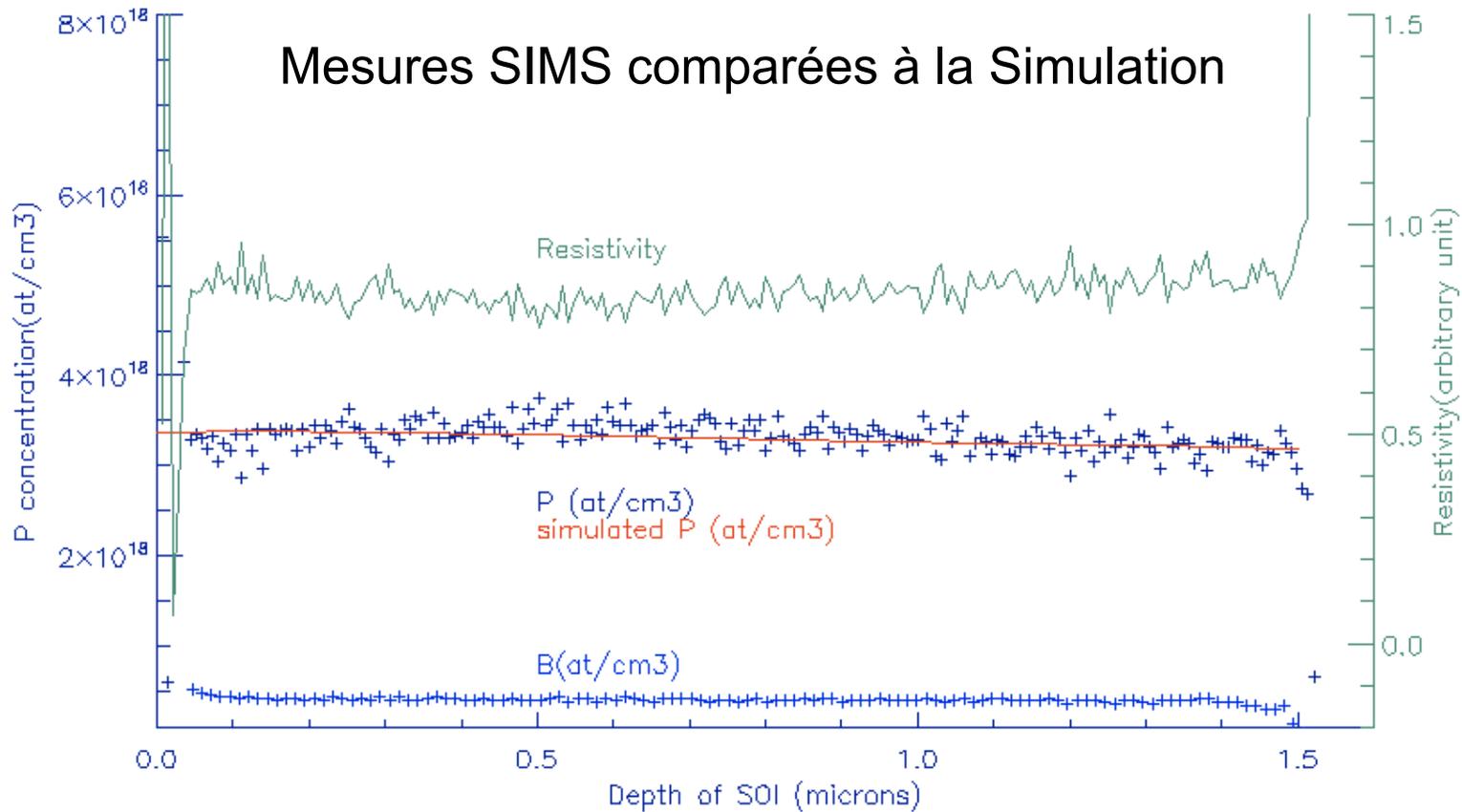
La diffusion à haute température --> la règle actuellement

L'épaisseur est limitée (cas bien différent du germanium (NTD))  
par la couche fine du SOI à qqs  $\mu\text{m}$ .

On joue rarement sur la géométrie du senseur :

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

# Diffusion de l'implantation



# La capacité calorifique du senseur

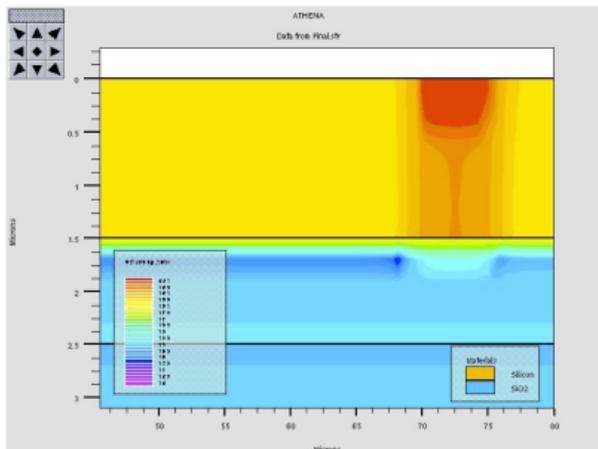
La capacité calorifique du senseur est négligeable devant celle des reprises de contact et éventuellement celle des électrodes :

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



## 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 :

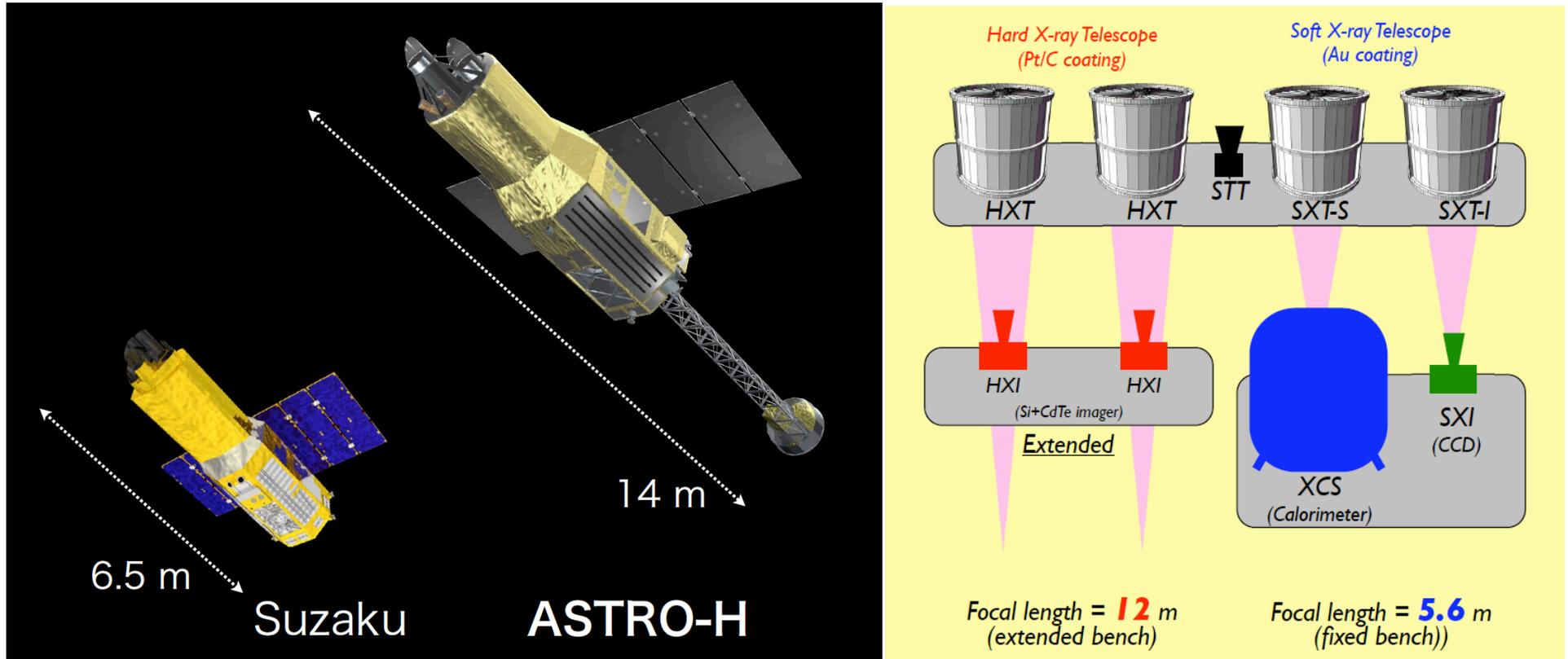
Un premier test sur fusée-sonde près d'échouer (La double barette de microcalorimètres entre en vibration)

1999 : perte de Astro-E 10 Février 2000

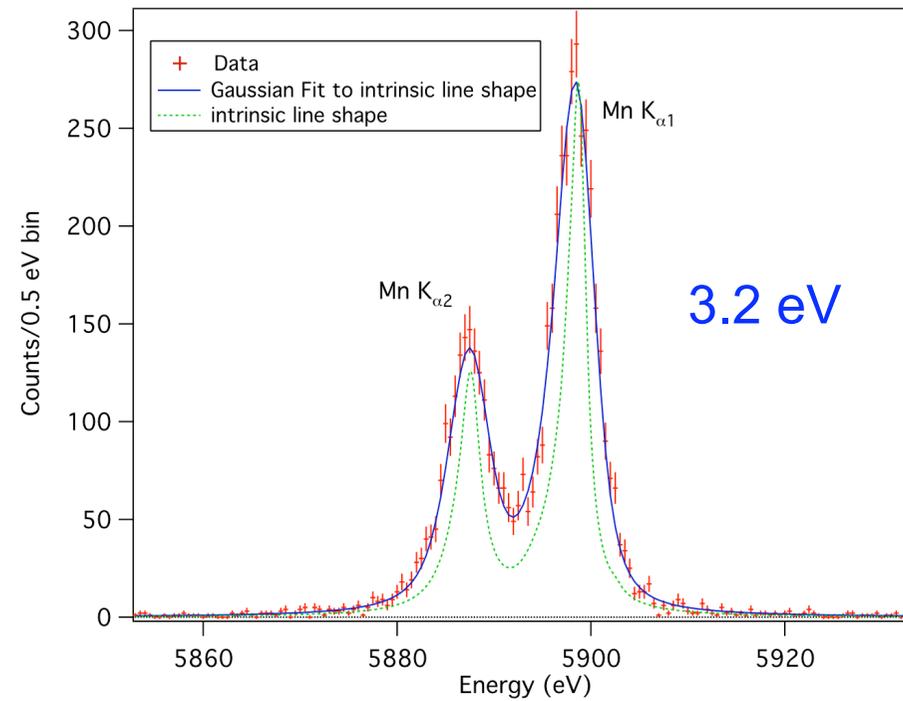
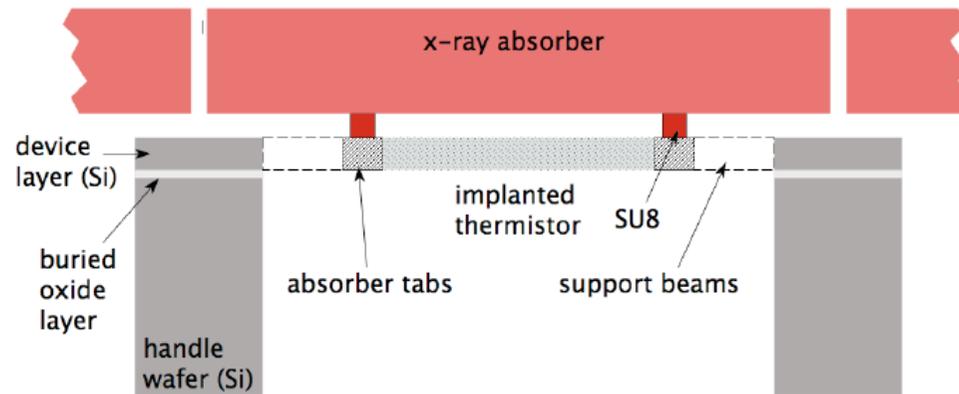
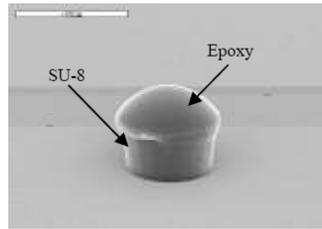
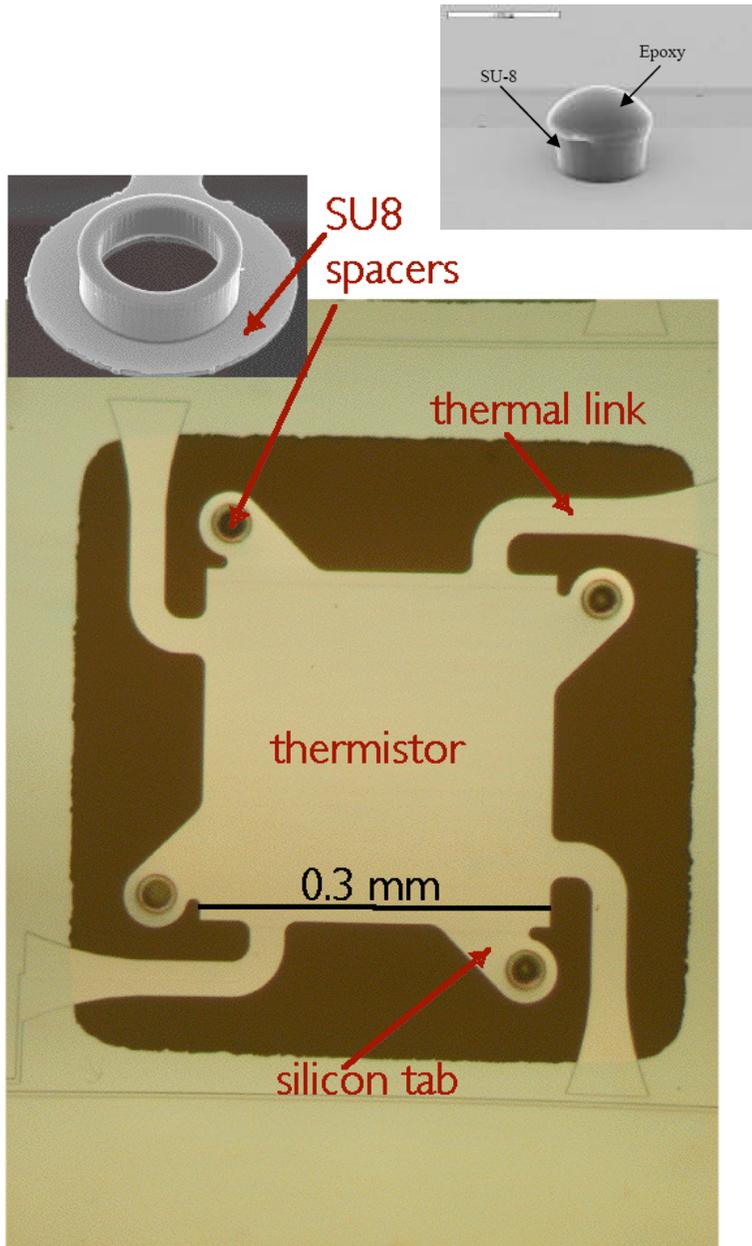
2005 : perte de la cryogénie de Astro-E2 10 Juillet 2005

2014 : Lancement de Astro-H SXS (Soft X-ray Spectrometer)-XCR (X-ray Calorimeter Spectrometer)

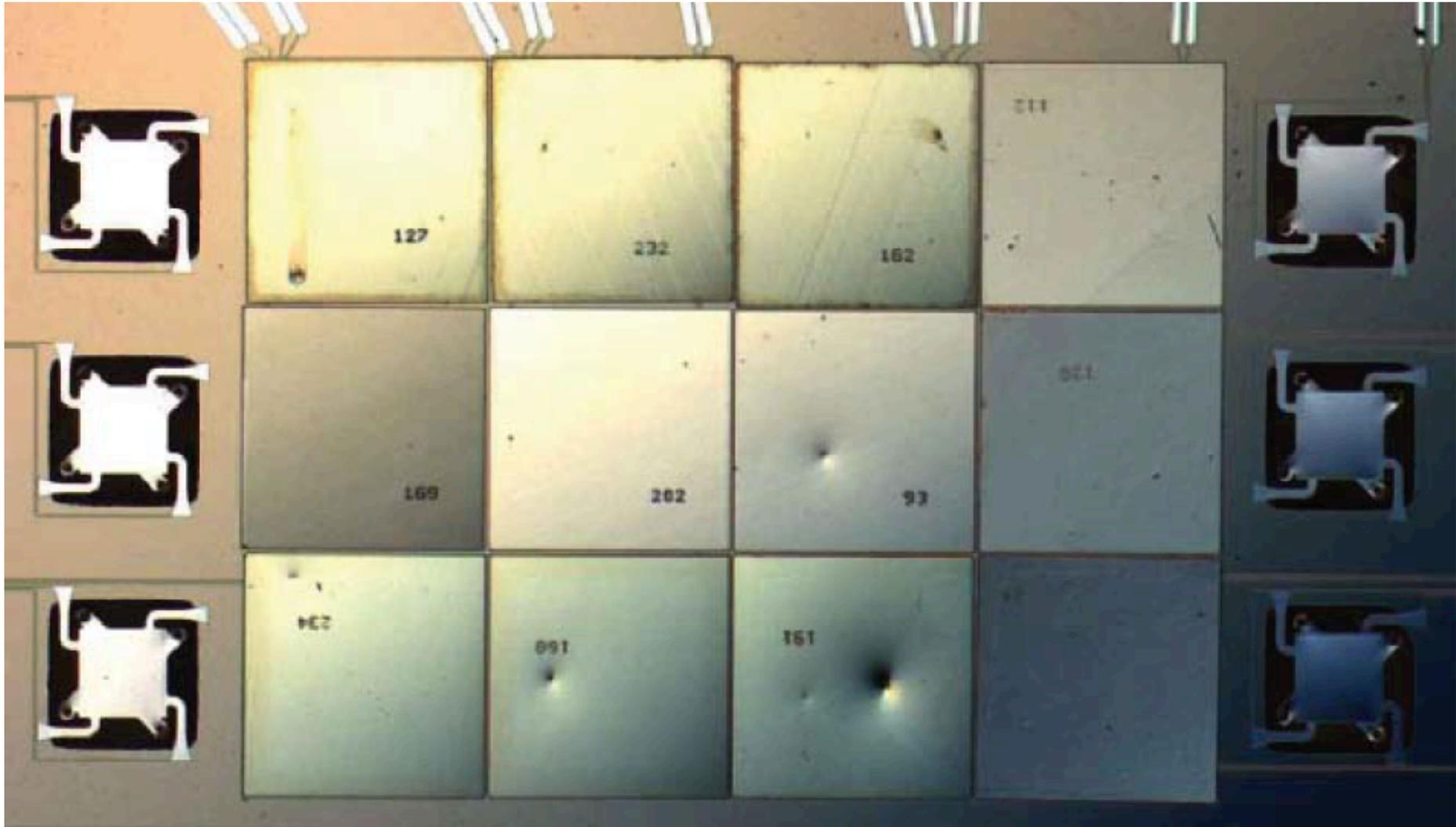
# Lancement d'ASTRO-H en 2014



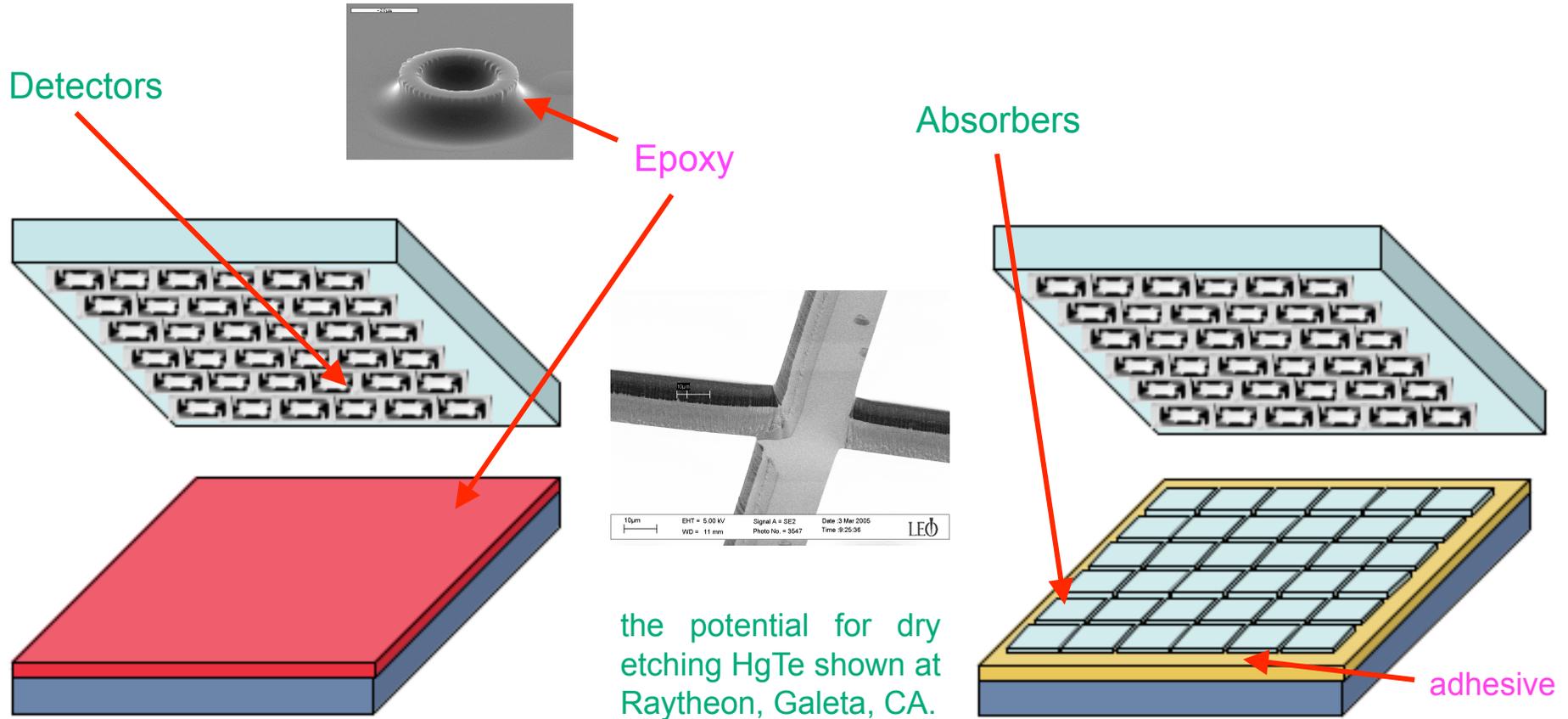
# Microcalorimètre avec senseur MIS, XRS sur Astro-E2



# L'expertise de Caroline Kilbourne



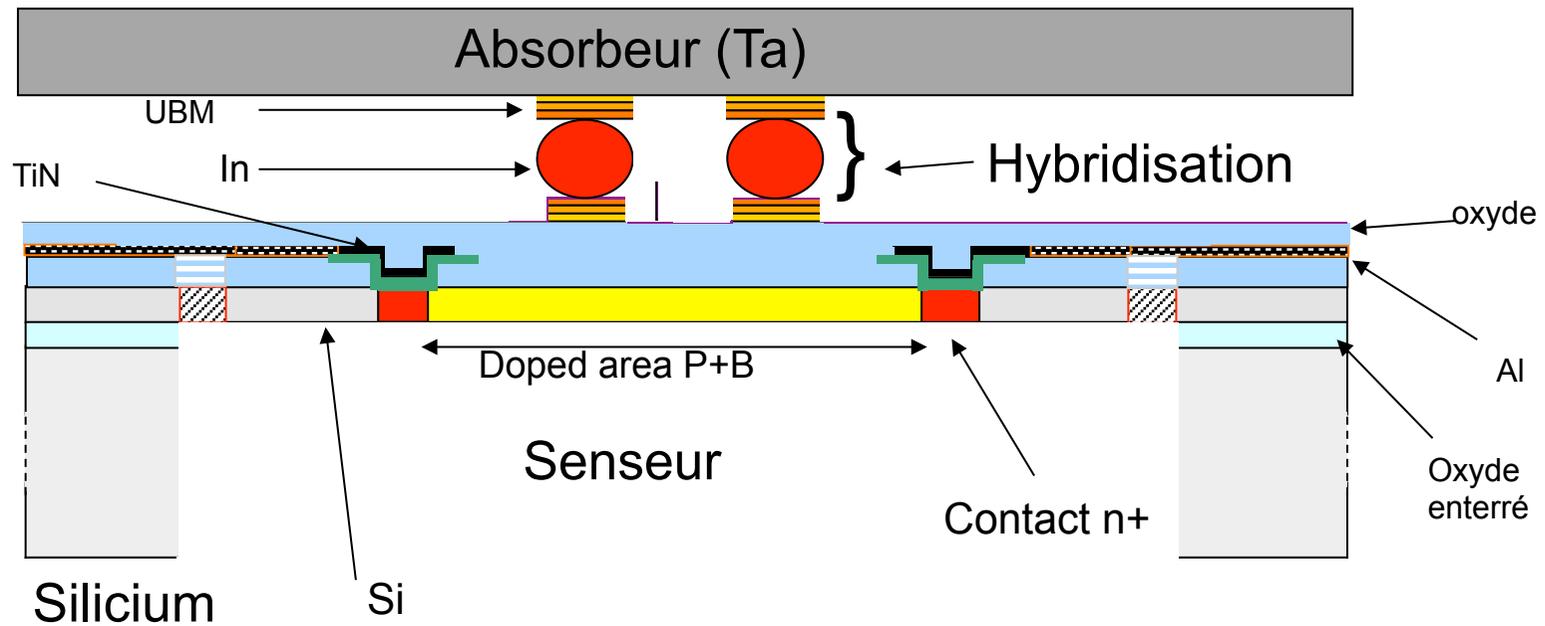
# Absorber attachment



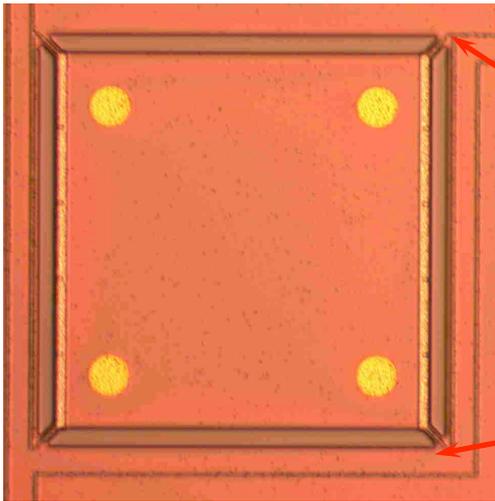
Using flip-chip bonder, pick up epoxy on SU8

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

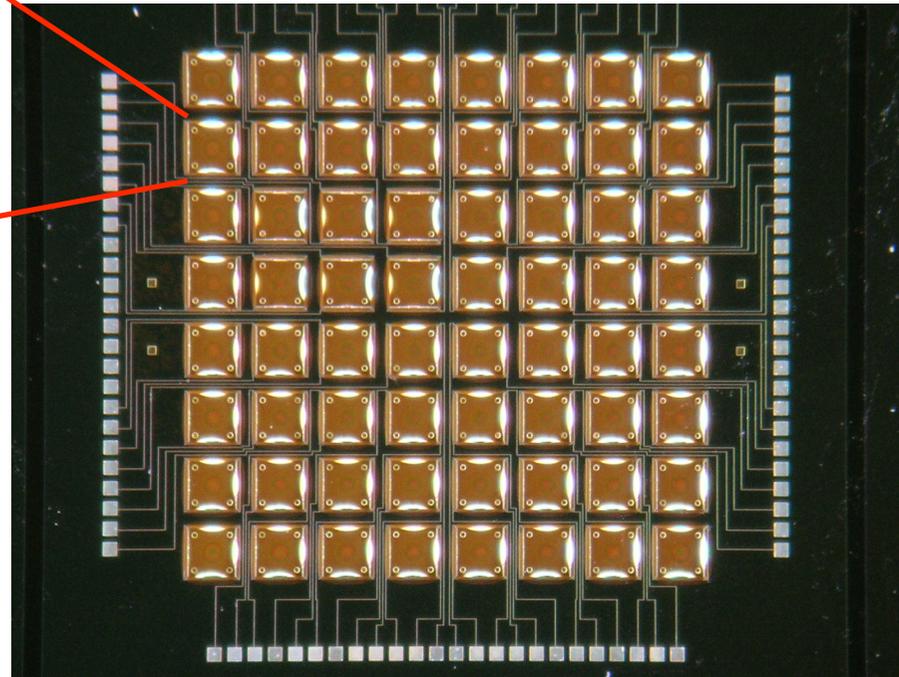
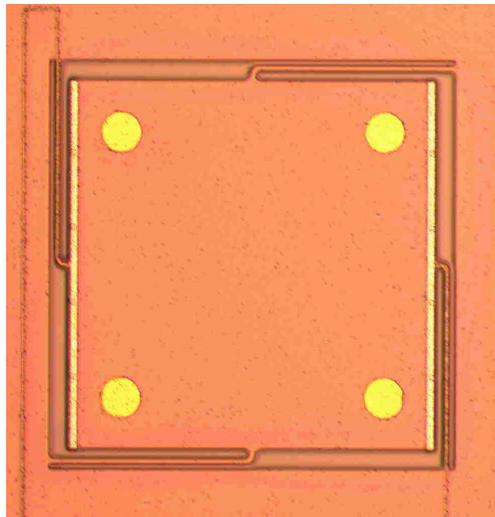
# Structure du pixel CEA LETI/PTA/SAp



First LETI Batch

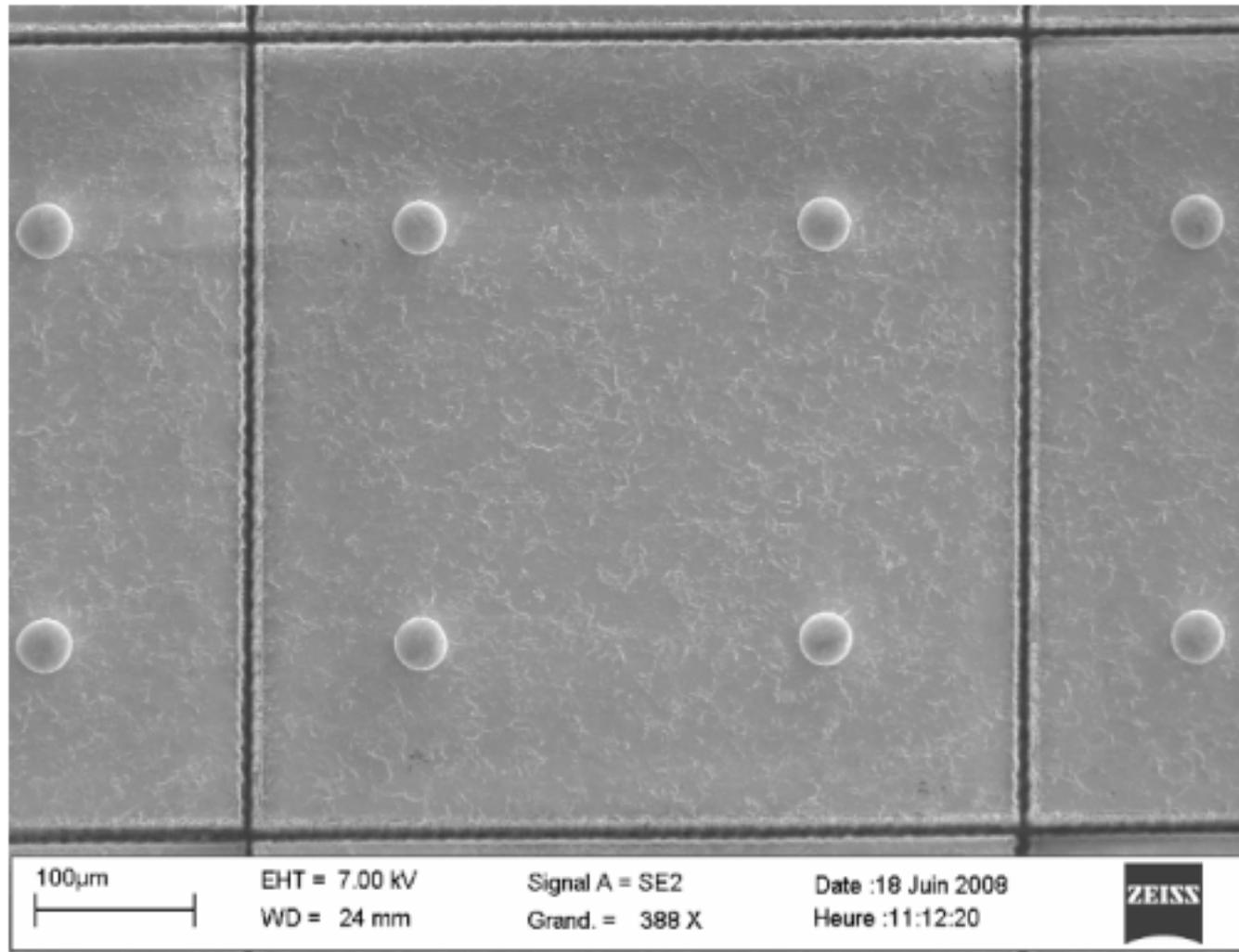


Pixel size: 500  $\mu\text{m}$

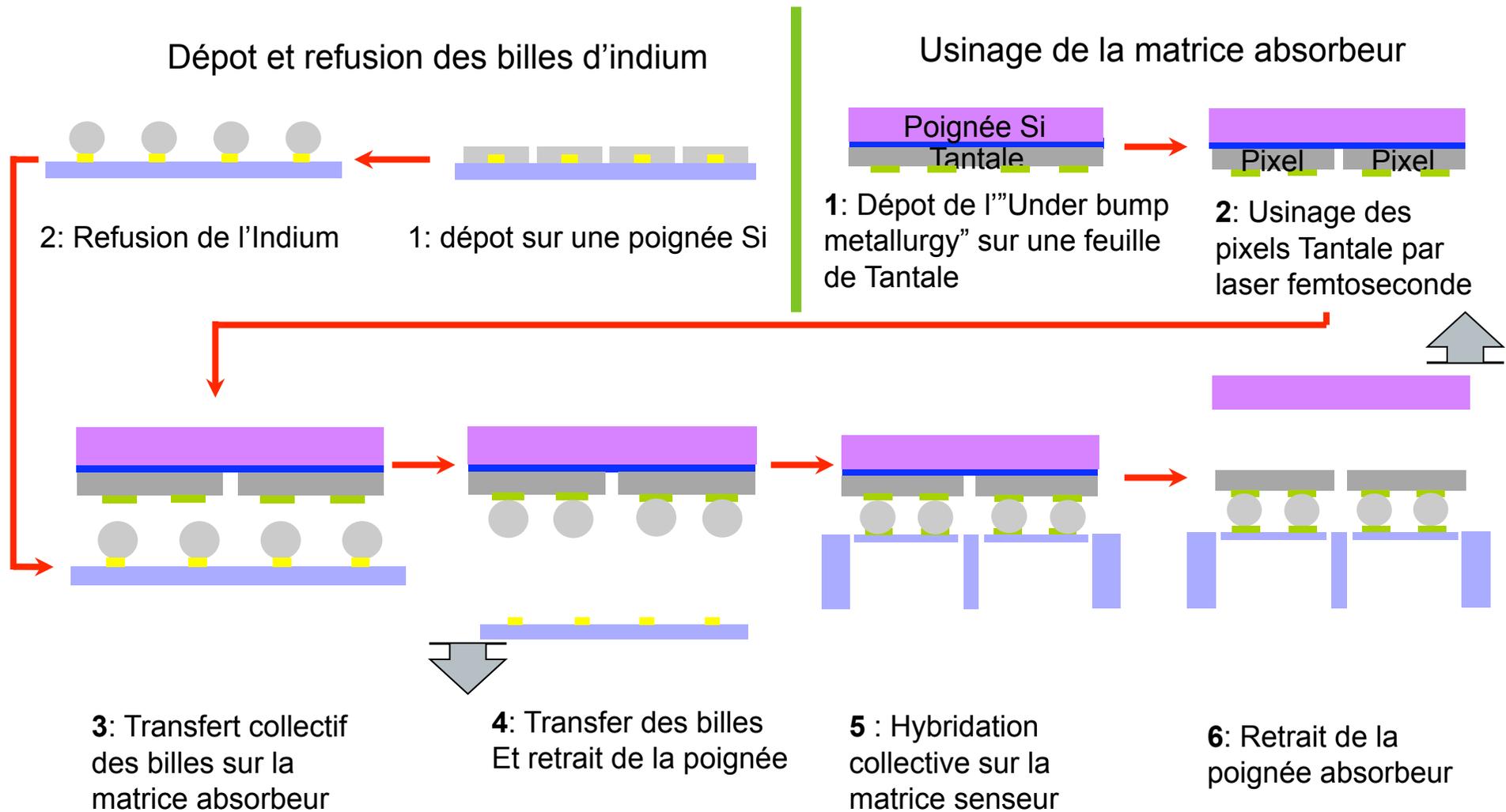


8x8 freed sensors, ready to be hybridized

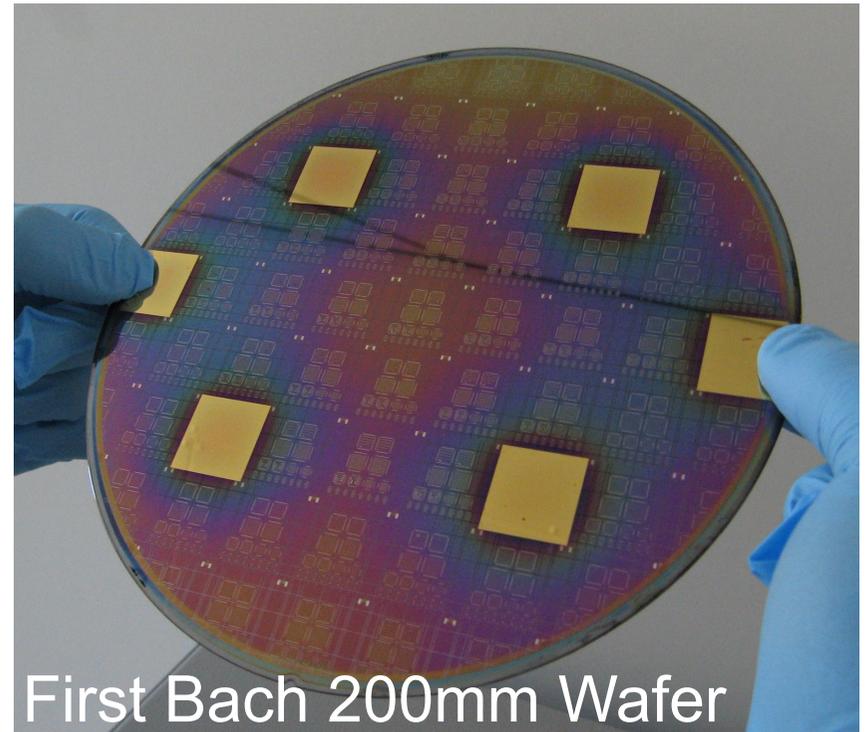
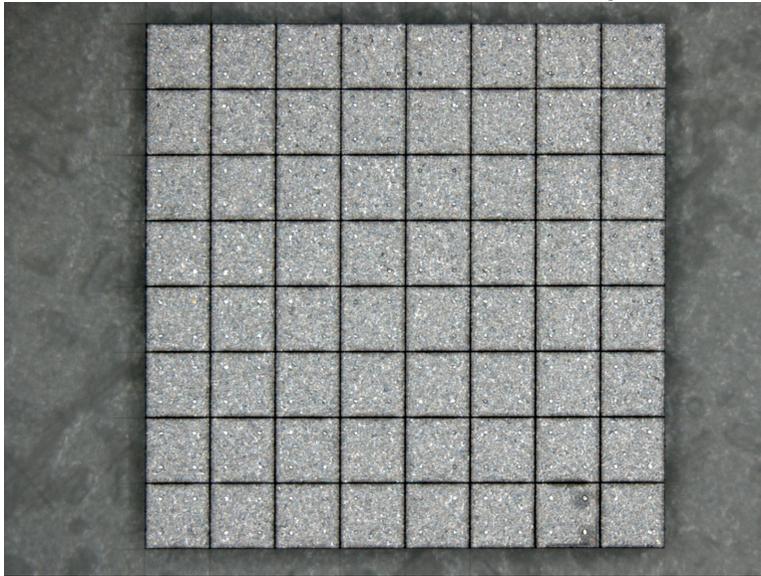
# Usinage de la matrice d'absorbeur



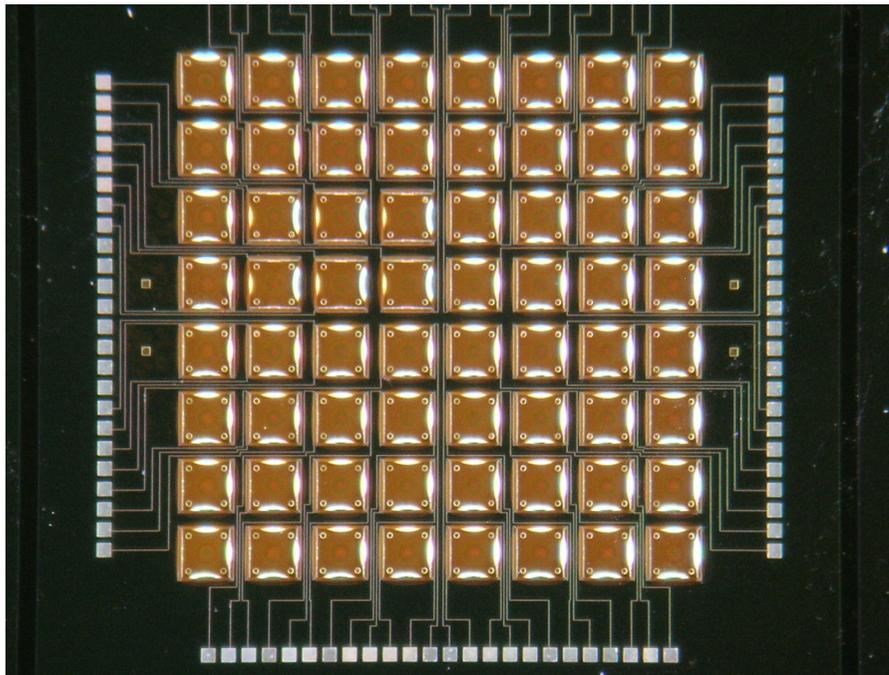
## Hybridation collective de la matrice d'absorbeur sur la matrice senseur



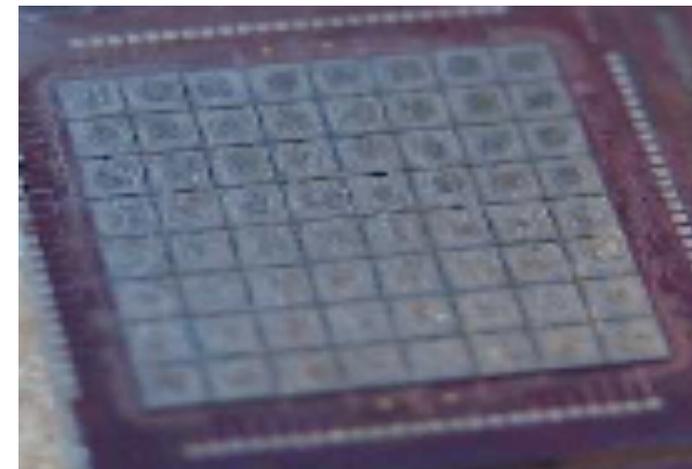
# Ta Absorbers Array



First Bach 200mm Wafer



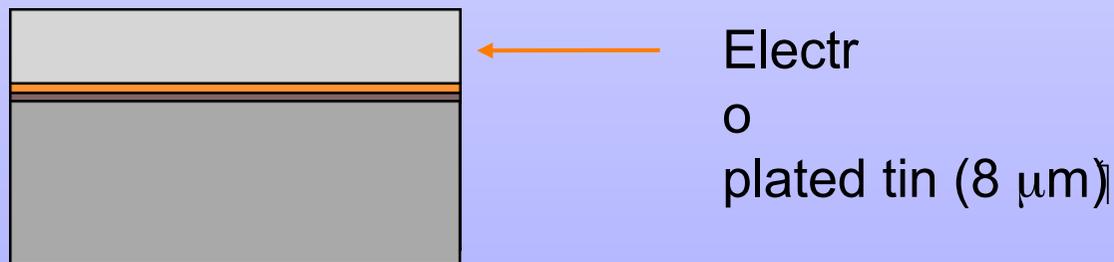
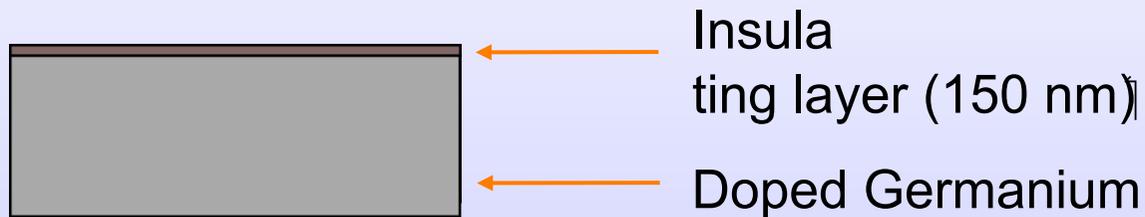
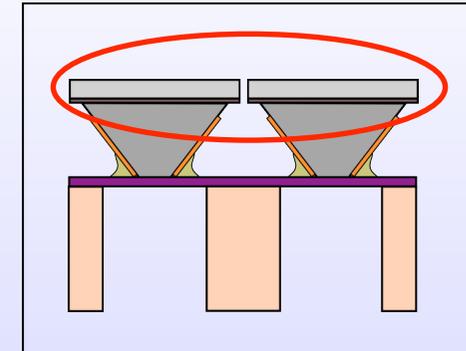
Sensors Matrix



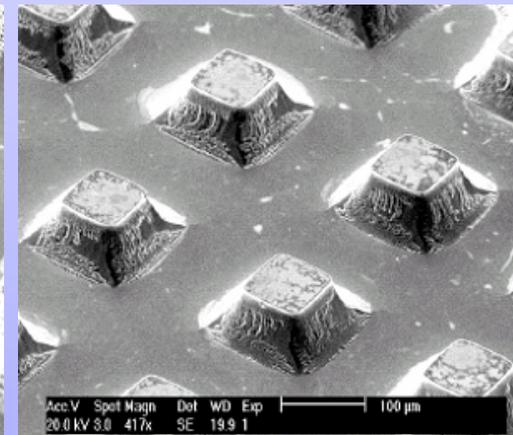
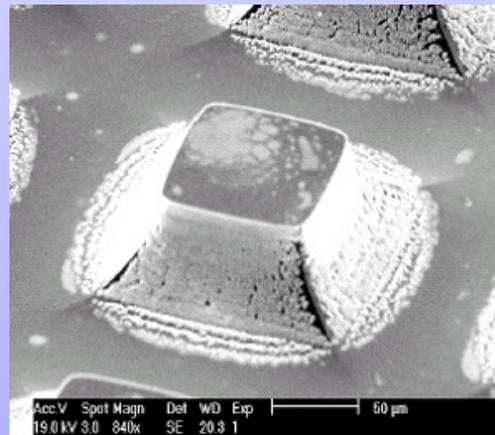
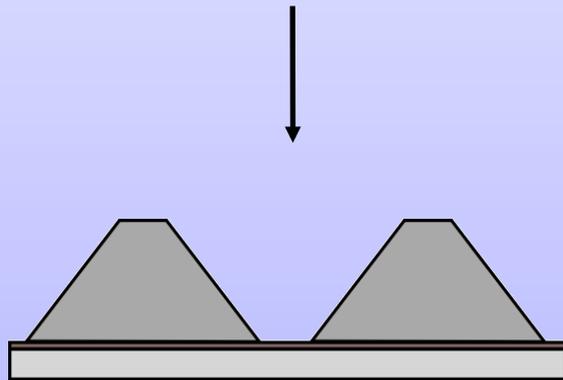
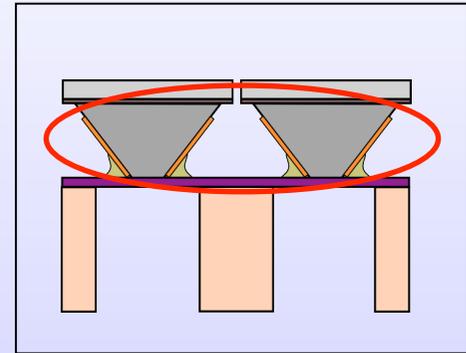
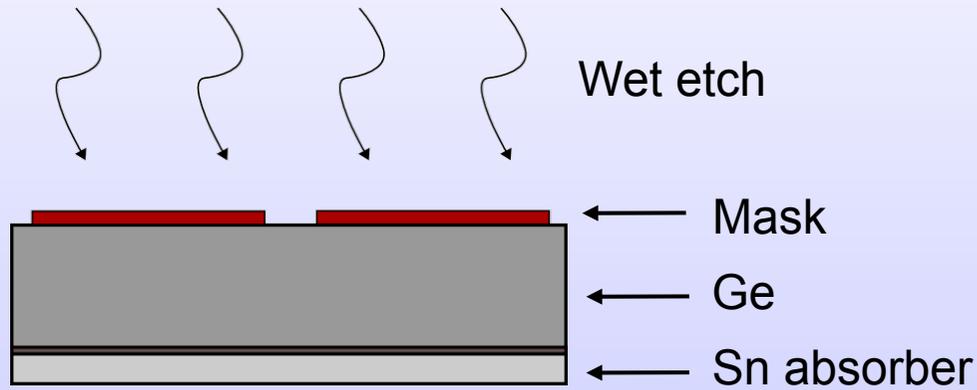
First complete hybridization  
onto 8x8 freed Matrix

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

**Absorber**

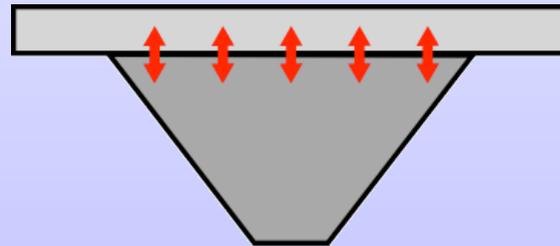


### Thermistor shaping

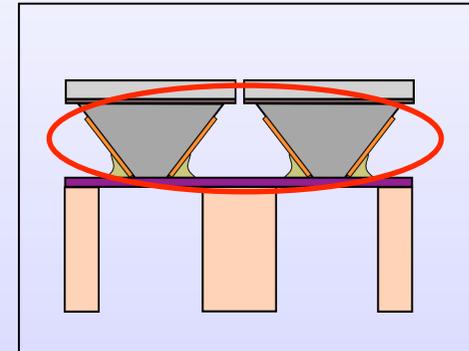
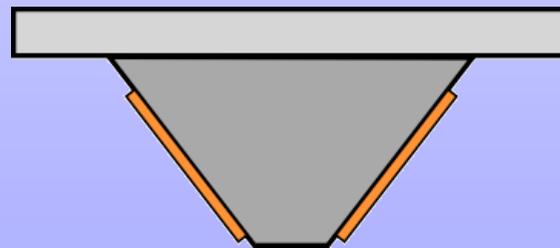


## Advantages of the pyramidal shape

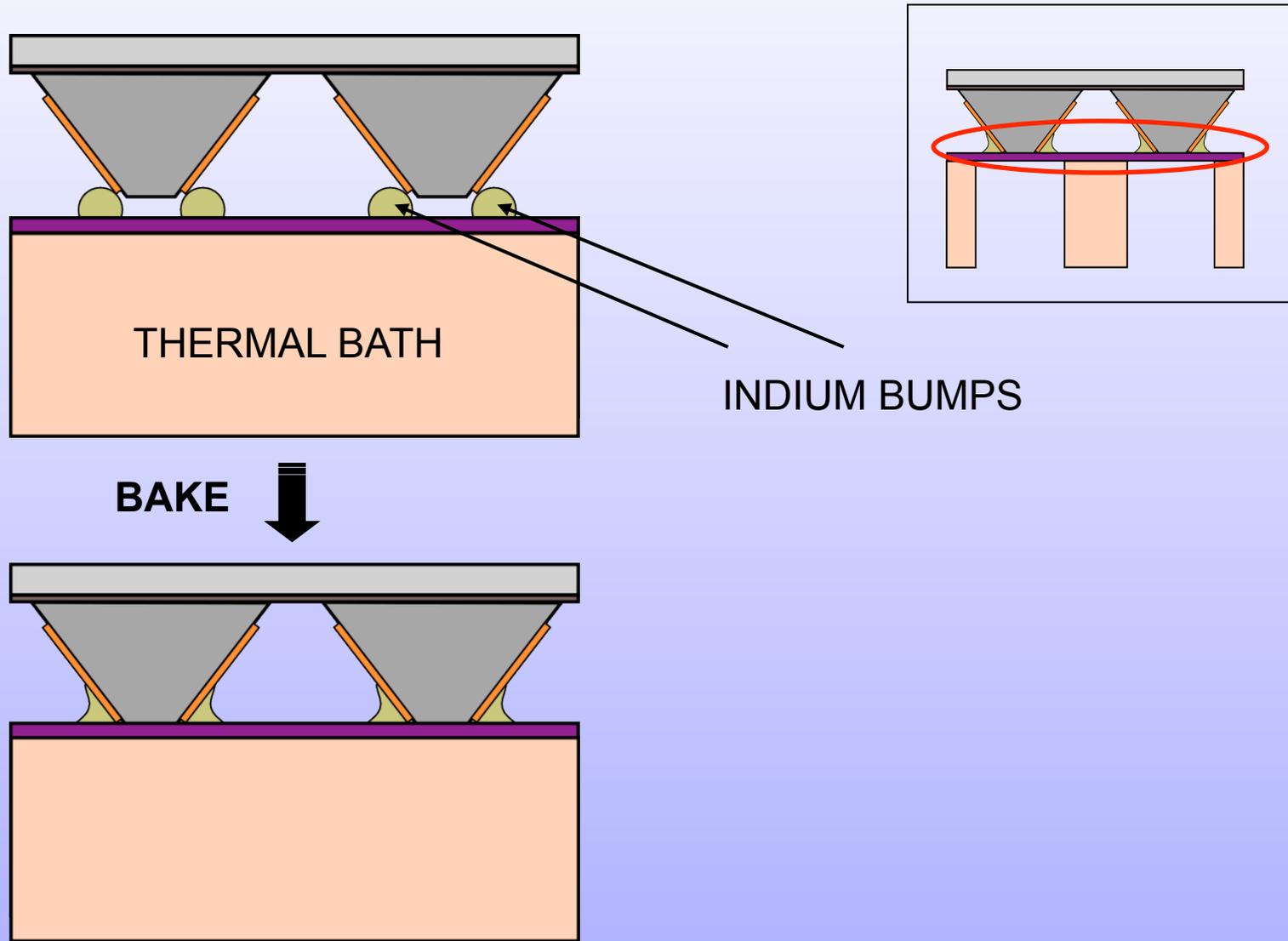
- Good thermal exchange with small thermometer volume



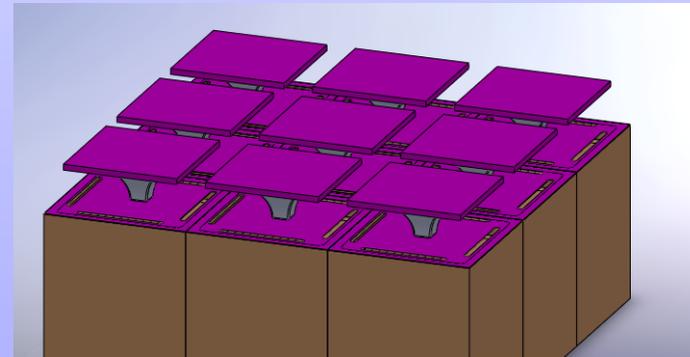
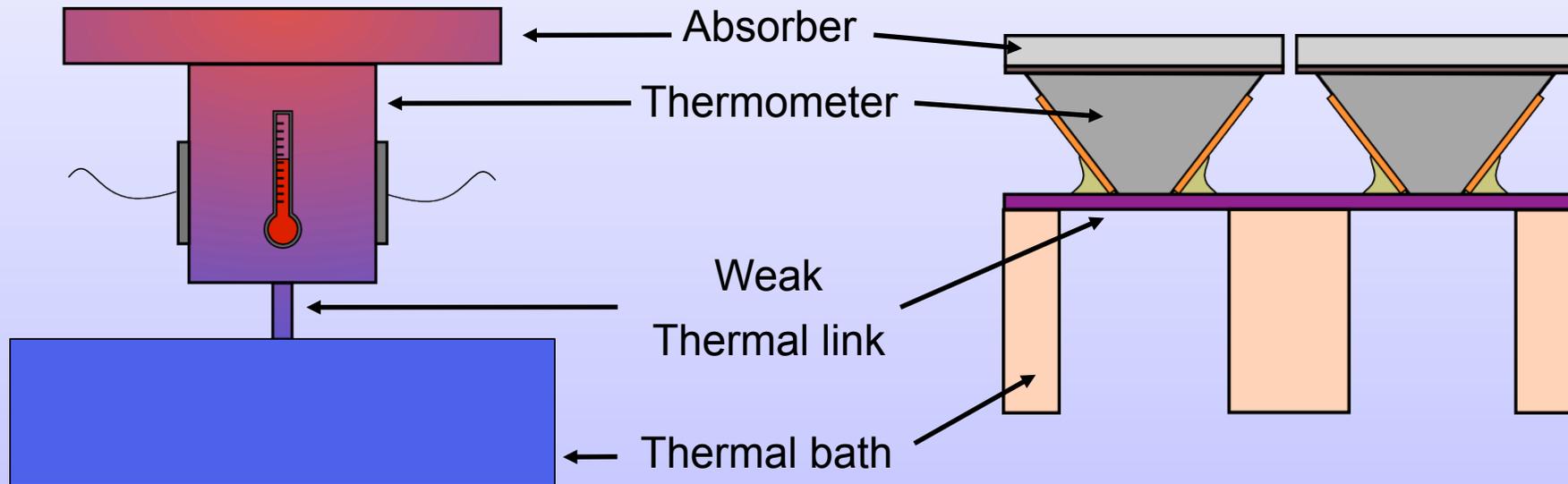
- Contacts suitable for soldering



### Soldering to the thermal bath



### Microcalorimeters Implementation- Planar approach



D'autres développements utilisant le NTD Ge et les technologies de microfabrication Si sont en cours aux USA/Canada.

La filière GSFC pourrait être reprise s'il existait une électronique cryogénique adaptée alternative aux JFETs.

# Les Thermomètres à transition supraconductrice polarisés en tension

Présentation de D. Prêle Mercredi

- Les bicouches exploitant l'effet de proximité :

$\alpha$  possible : 100

Mo-Au (GSFC) Ti-Au (SRON)

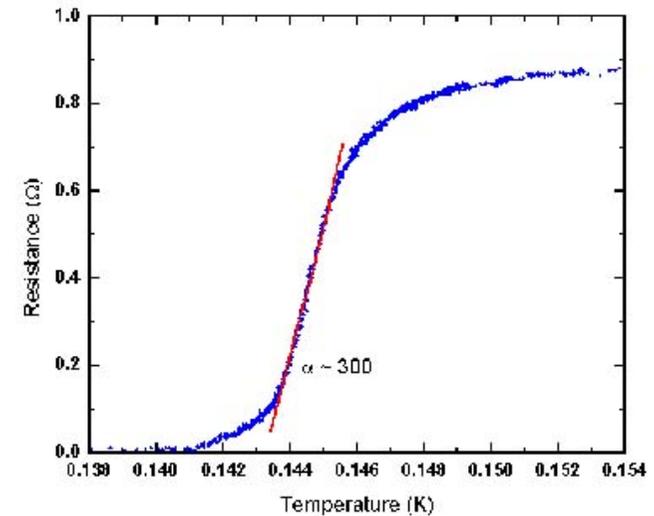
Utilisation d'absorbeurs en métal résistif

La solution nominale pour les prochaines missions (XMS)

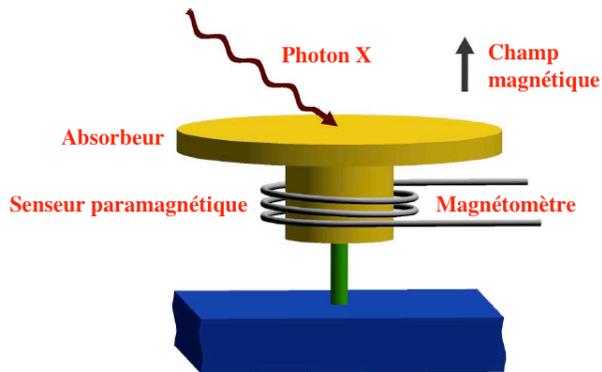
- Les TES très résistifs à l'état normal : Le Niobium-Silicium (CSNSM)

Pas de difficultés pour la source de tension

Existence d'une électronique cryogénique (AsGa + SiGe) adaptée à la lecture de détecteurs à haute impédance



Les ~~bolomètres~~ microcalorimètres métalliques magnétiques ont été présentés, Jeudi Matin, par M. Rodrigues



## Le thermomètre :

Un matériau paramagnétique (Au : Er) dont la susceptibilité magnétique est inversement proportionnelle à la température (loi de Curie)

Senseurs non dissipatifs

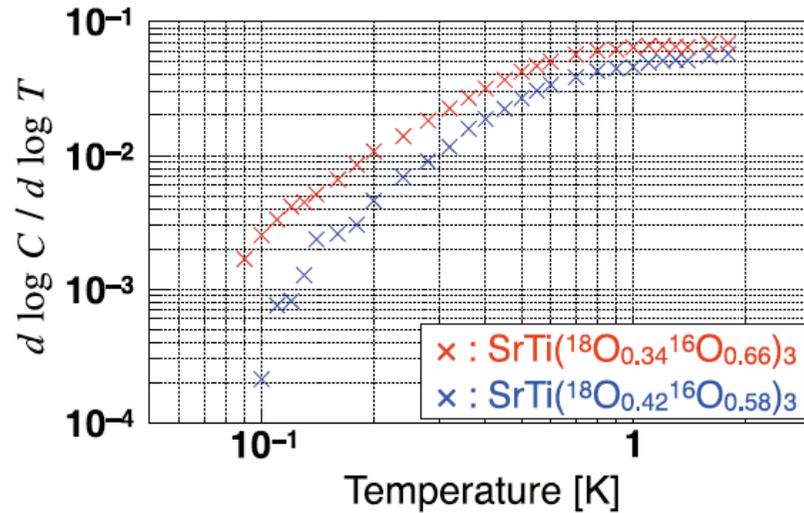
Physique bien comprise (Technique complexe)

Réalisation de senseurs avec des paramètres reproductibles

Electronique froide de lecture à SQUID comparable aux TES.

C. Pies et al. (Heidelberg 2012)  $2\text{eV}_{\text{FWHM}}$  @ 6 keV

# MicroCalorimètre Diélectrique DMC

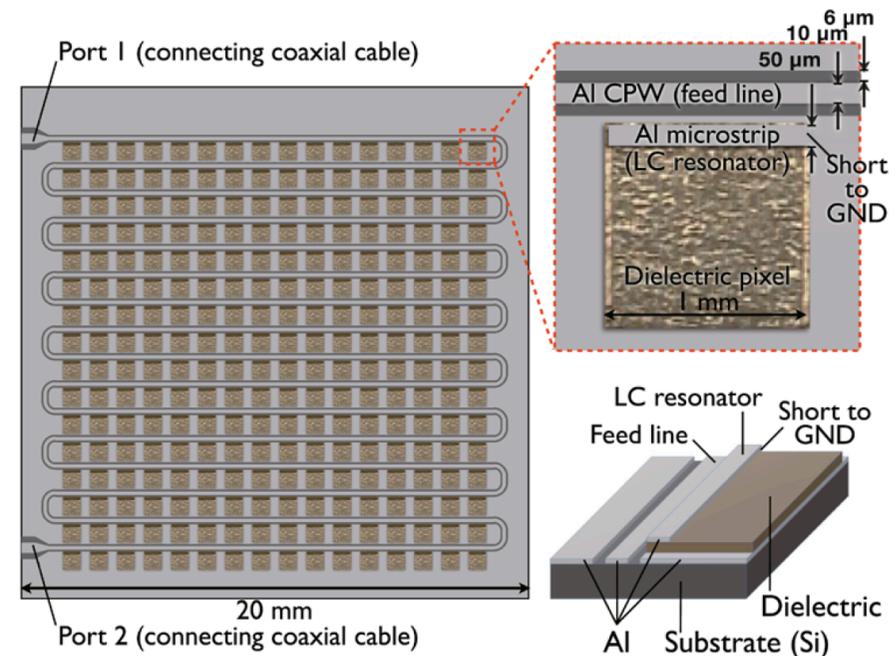
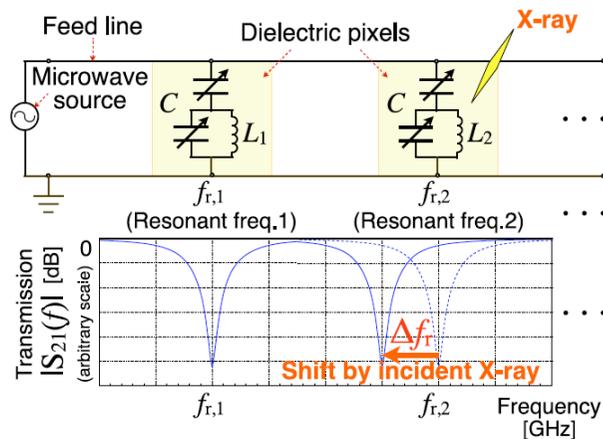


Utilisation d'un matériau dont la permittivité relative varie fortement en fonction de la température.

Un candidat :

$\text{Sr Ti O}_3$  strontium titanate (STO)

$\epsilon_r \approx 2 \cdot 10^4$  en dessous de 2 K



N. Sekiya, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, S. Kawasaki, Y. Takei, H. Yoshitake, K. Sakai, K. Sato, K. Maehata, H. Takashima  
 Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)  
 Proceeding LTD14

## Le microcalorimètre diélectrique, une solution d'avenir ?

Le titanate de strontium est le premier des matériaux de cette catégorie à être envisagé.

Une étude plus exhaustive d'autres candidats diélectriques doit être menée.

Le bruit dans ce type de thermomètre doit être mesuré.

Une lecture par résonateur permettrait le multiplexage de grandes matrices pour couvrir le plan focal de microcalorimètres.

## Contraintes sur l'absorbeur

Les compromis à arbitrer dans la réalisation du senseur Silicium 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 »

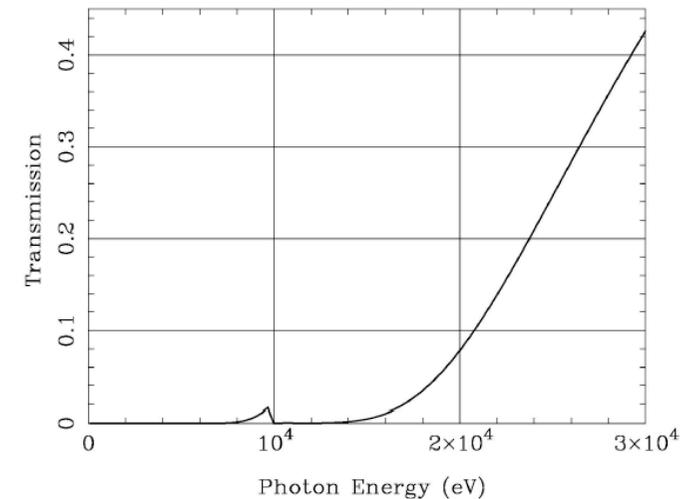
Présence d'excitations élémentaires (e-trou ou qp) qui prennent le temps de se recombiner

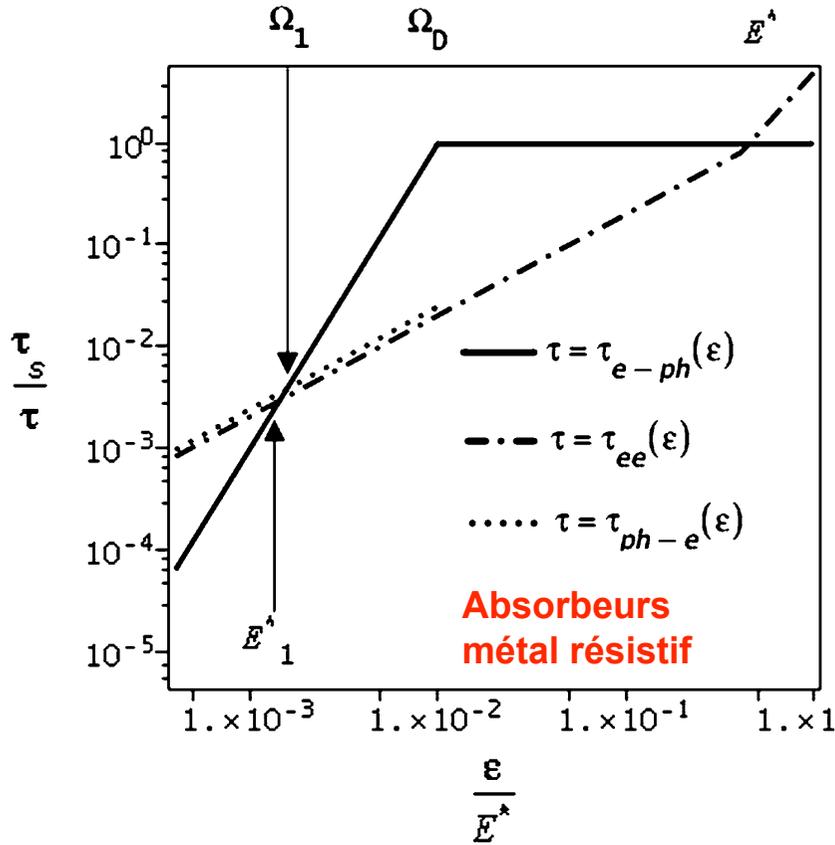
# Un absorbeur du rayonnement X

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.

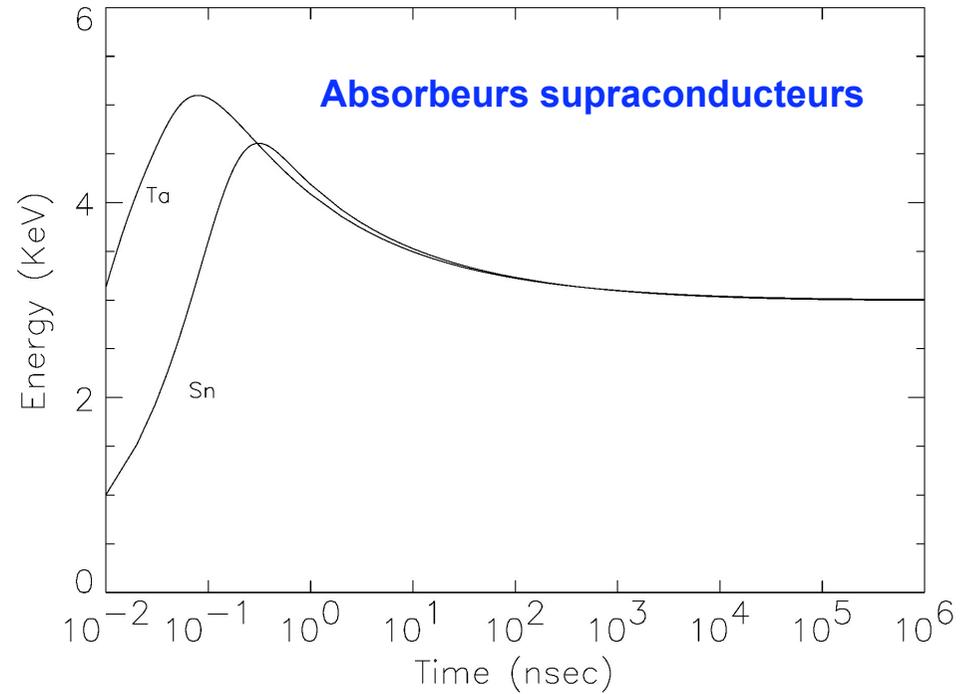
21 <b>Sc</b> 44.956	22 <b>Ti</b> 47.867	23 <b>V</b> 50.942	24 <b>Cr</b> 51.996	25 <b>Mn</b> 54.938	26 <b>Fe</b> 55.845	27 <b>Co</b> 58.933	28 <b>Ni</b> 58.693	29 <b>Cu</b> 63.546	30 <b>Zn</b> 65.409	31 <b>Ga</b> 69.723	32 <b>Ge</b> 72.64	33 <b>As</b> 74.922	34 <b>Se</b> 78.96
39 <b>Y</b> 88.906	40 <b>Zr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

Ta Density=16.654 Thickness=25. microns





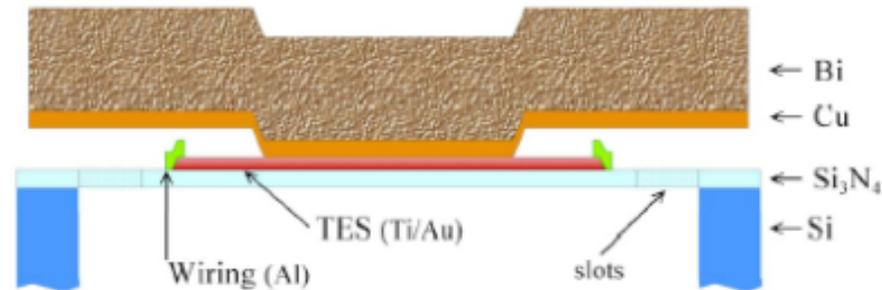
Energy Down-Conversion and Thermalization in Metal Absorbers  
 A. Kozorezov Proceedings LTD14 (Heidelberg 2011)  
 J Low Temp Phys (2012) 167:473–484



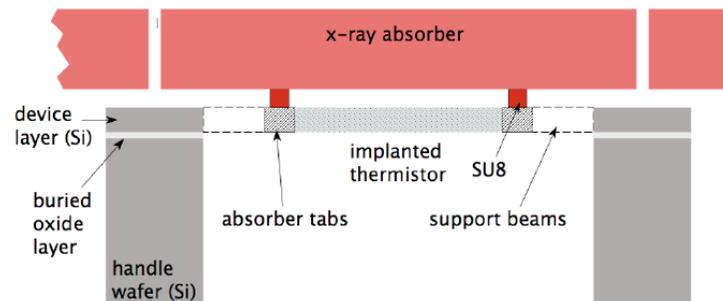
**Energie sous forme de quasiparticules après absorption d'un X de 6 keV.**  
**Simulations de E. Perinati (Observatoire Giuseppe Vaiana, Palerme)**  
**30% de l'énergie reste piégée dans les quasiparticules**

## 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**



## Choix de l'absorbeur

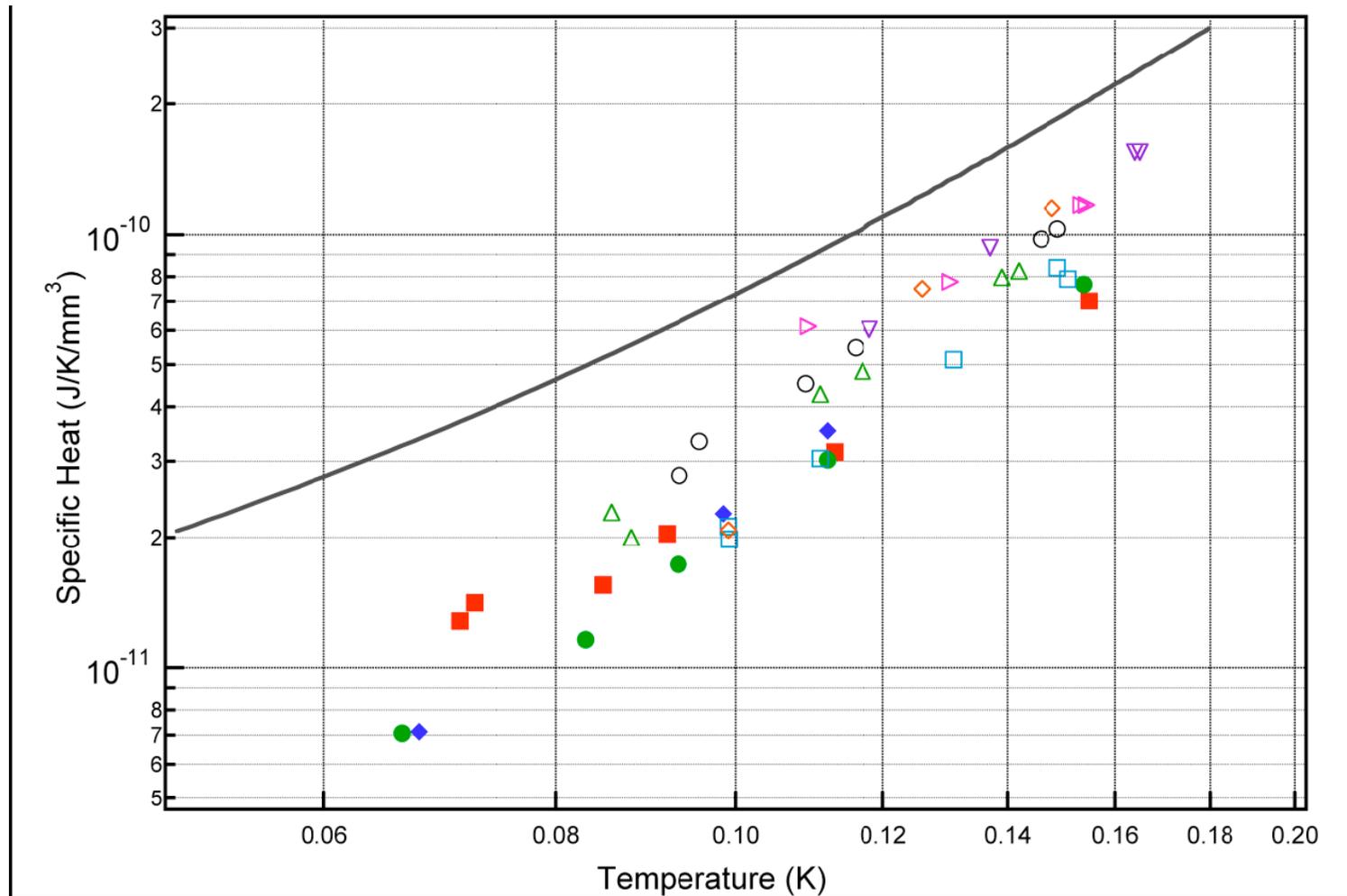
**Thermomètres semiconducteurs : HgTe, Sn traditionnels**  
**HgTe Semi-conducteur à faible gap**  
**Sn Supraconducteur**

**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)**

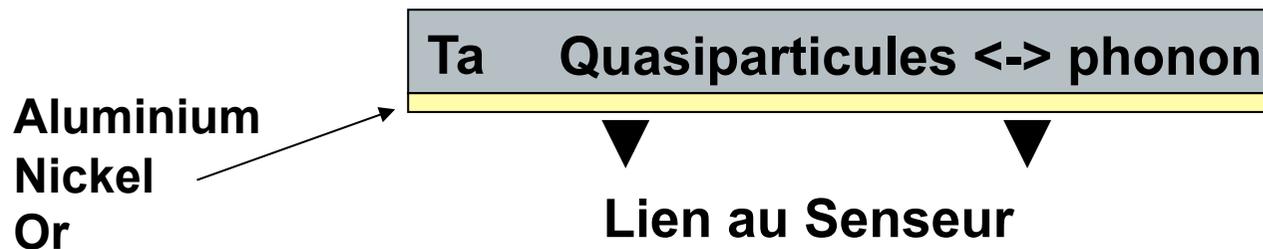
# Absorbeurs HgTe



**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

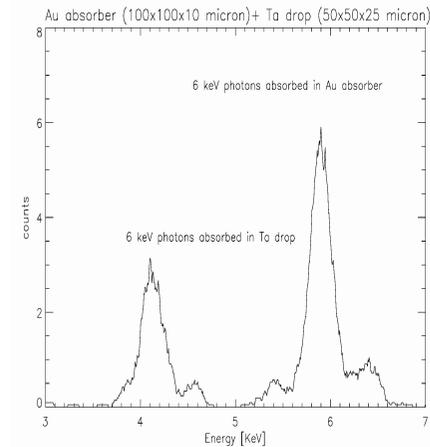
- a) Présence d'un terme linéaire ? : 1 % du volume
- b) Vitesse de thermalisation :  
 Dans les supraconducteurs : 30 % de l'énergie est piégée sous la forme de quasiparticules.  
 Comment accélérer la vitesse de leur recombinaison
  - Impuretés
  - Absorbeurs composites avec piège à quasiparticules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



# Absorbeur Tantale composite

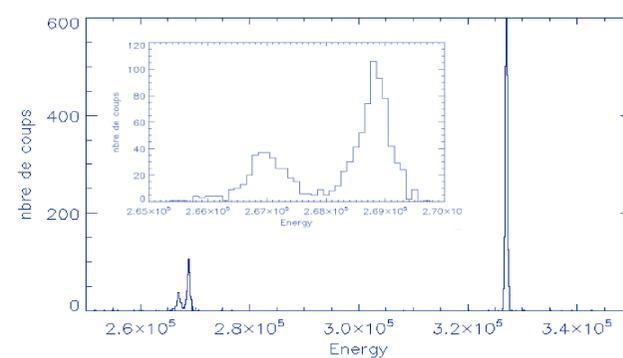
Test à Palerme de Tantale haute pureté (99.995 %)  
 traité thermiquement et passivé (repiégeage de l'hydrogène):

30 % de l'énergie piégée  
 sous forme de quasiparticules  
 Sur le long terme (ms)



Test à l'IAS de Tantale traité thermiquement, recouvert de films minces  
 d'aluminium et passivé :

Bons résultats sur des alphas  
 Lidia Torres, LTD 14  
 (J Low Temp Phys (2012) 167:961–966)



Passage au Tantale monocristallin  
 Laminé recuit

## La sortie du signal / Le multiplexage

Sortie de toutes les voies (tous les pixels) :

Facile pour les petites matrices (XRS-2)

Plus ou moins difficile pour les matrices kilopixels :

Lecture en courant (pas de problème de diaphonie)

Sortie sur les 4 cotés de la matrice : Faisable (prototype TES IXO)

Lecture en tension (haute impédance, attention à la diaphonie)

Multiplexage/Adaptation d'impédance au plan focal : Faisable (PACS)

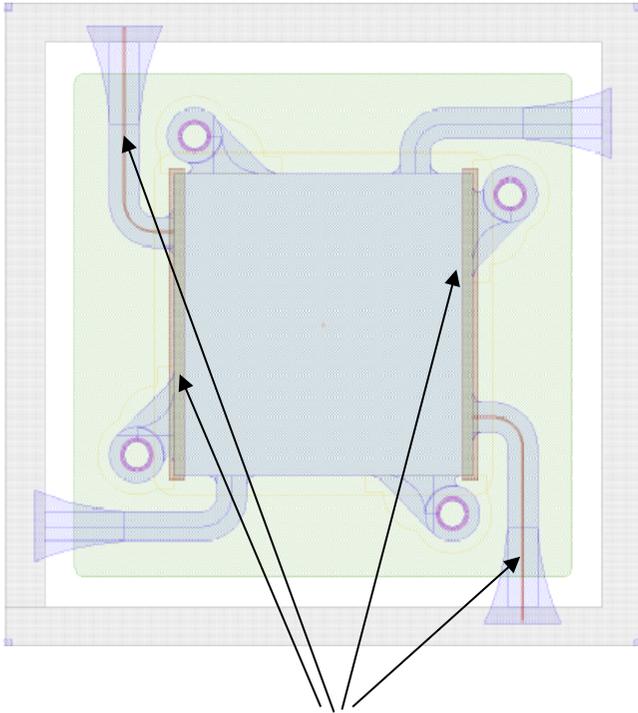
Pas de Multiplexage/Adaptation d'impédance au plan focal  
pour des raisons de dissipation, sortie par deux cotés pour

La réalisation de mosaïques : Faisable mais difficile (Saclay)

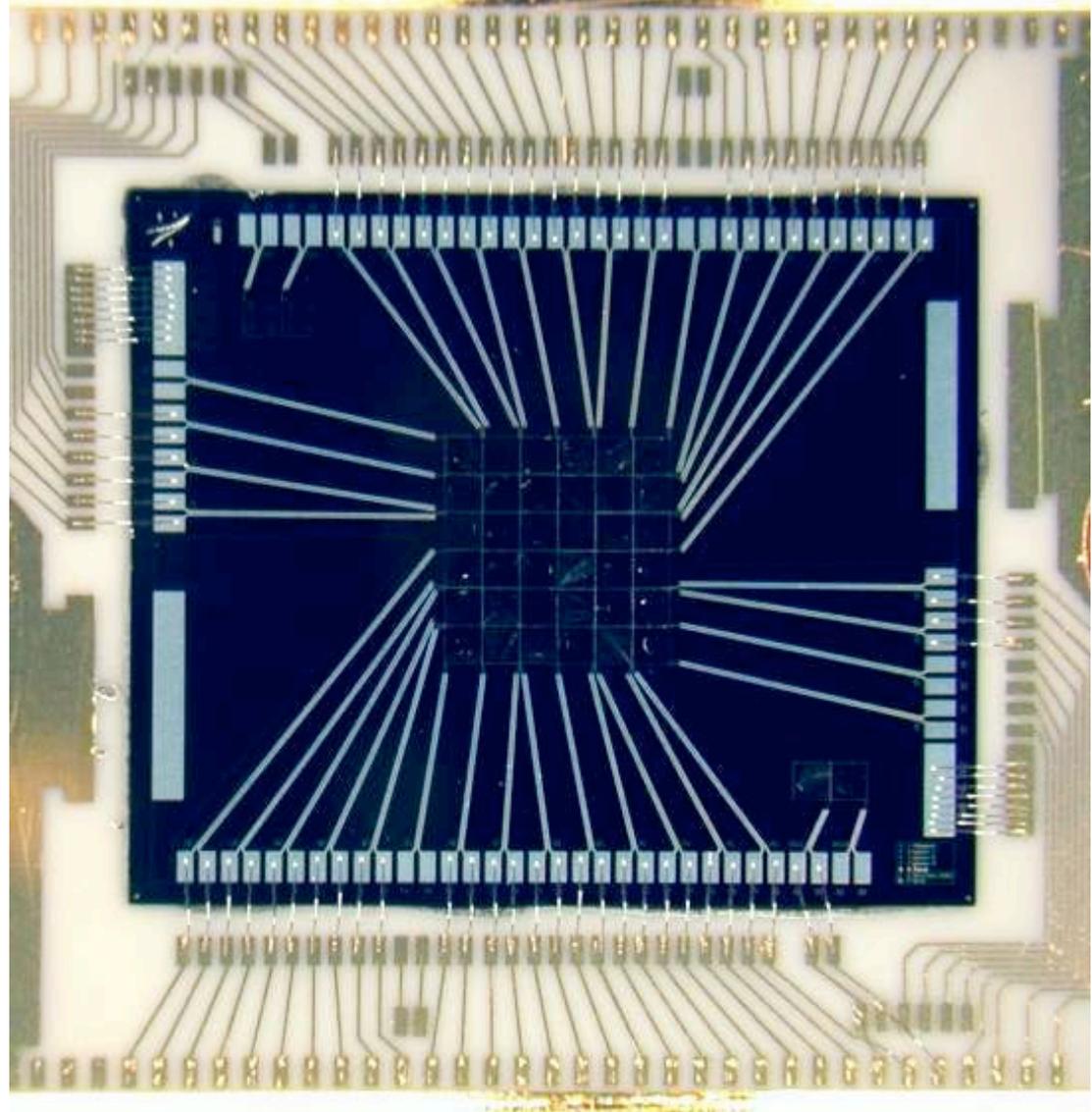
Multiplexage thermique : Un même senseur pour différents  
absorbeurs avec des liens thermiques différents :

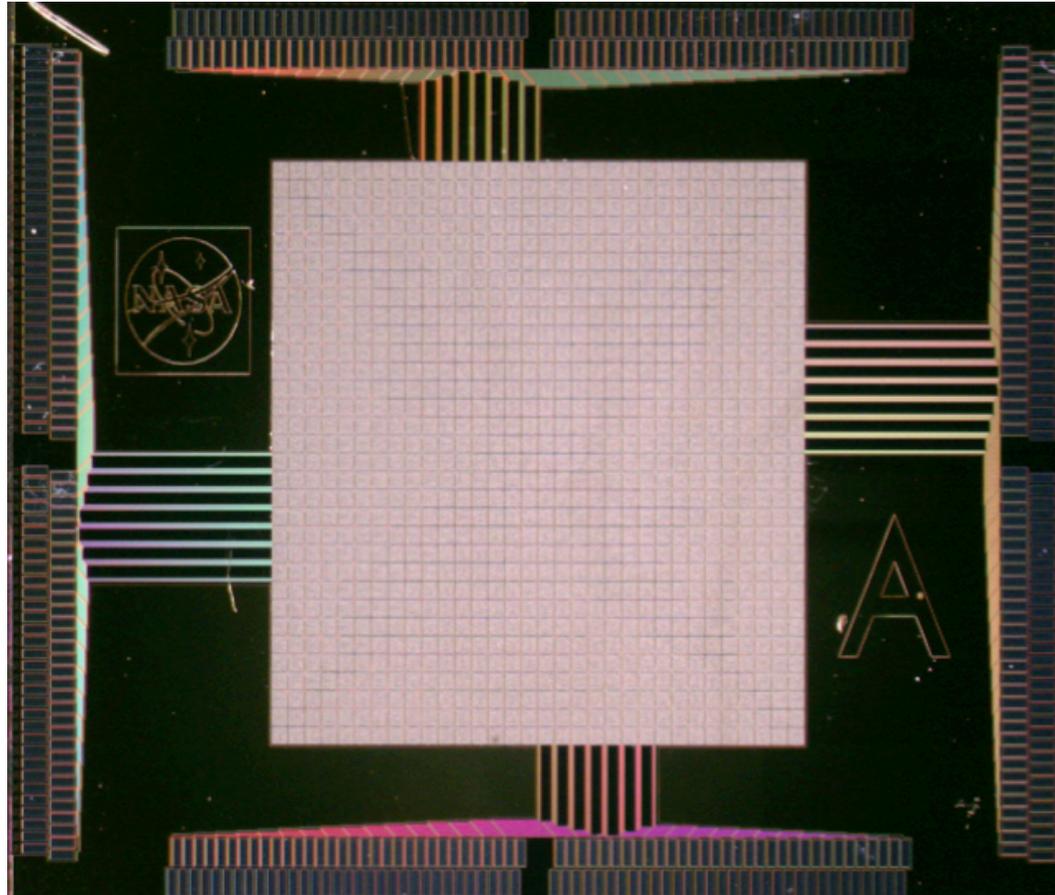
Extérieur du plan focal TES IXO, dégradation des performances

## XRS-2 Les électrodes



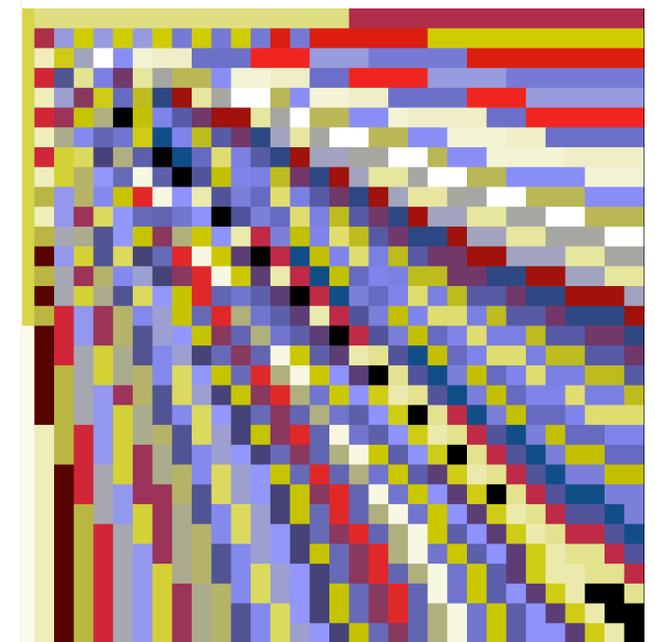
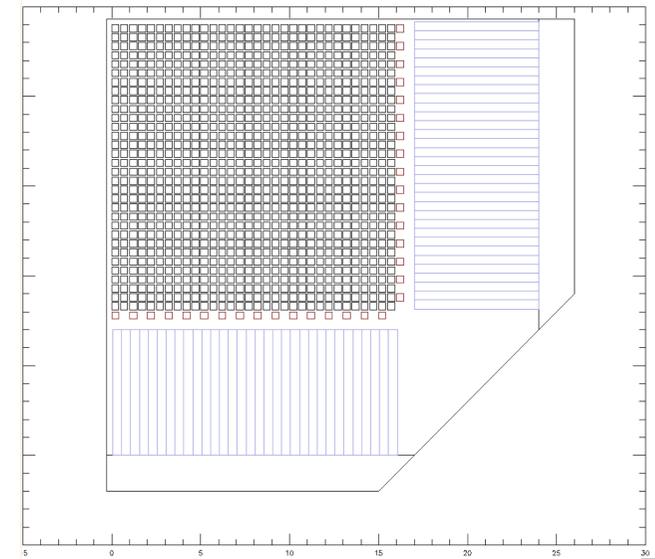
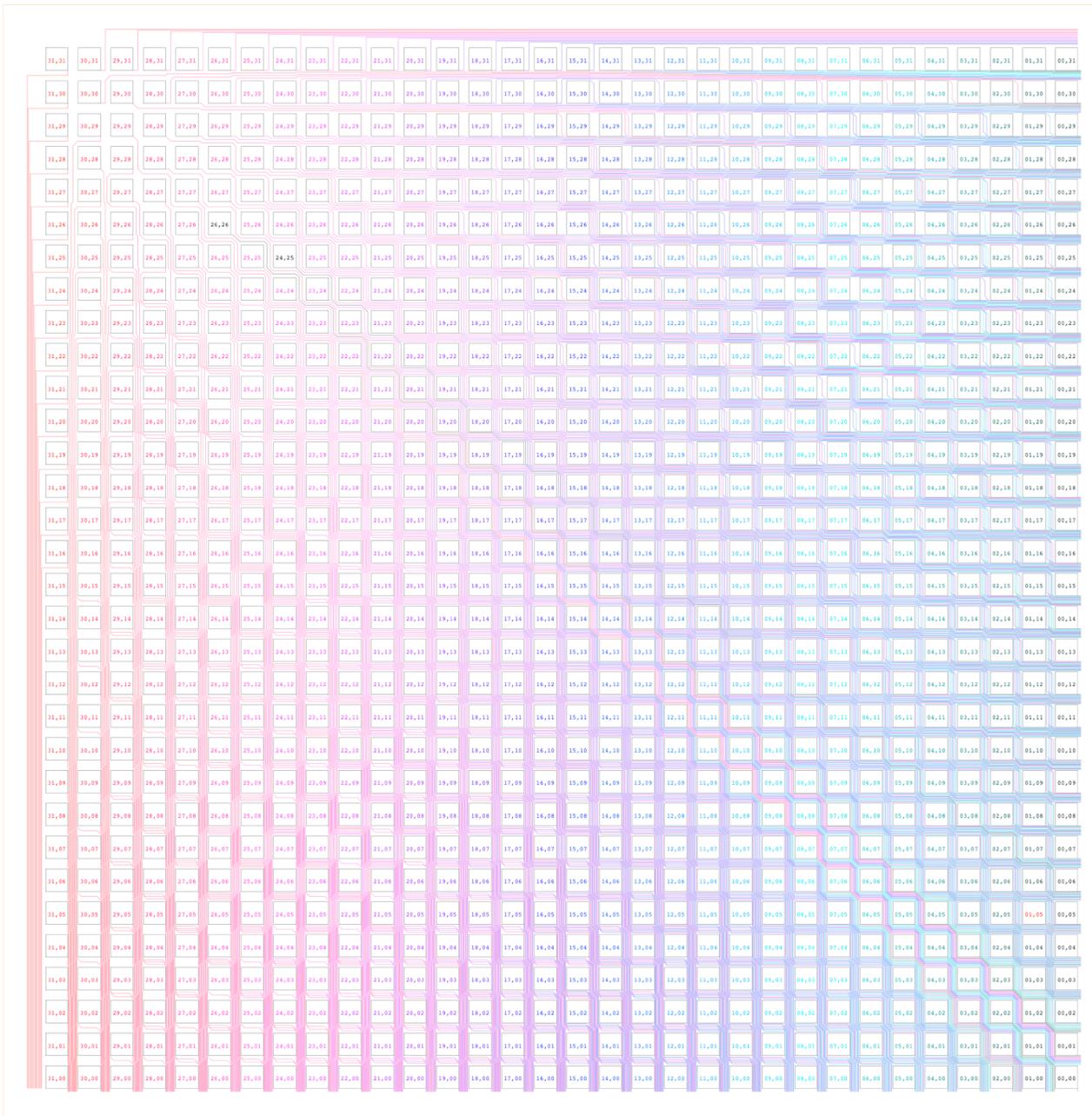
Implantations dégénérées

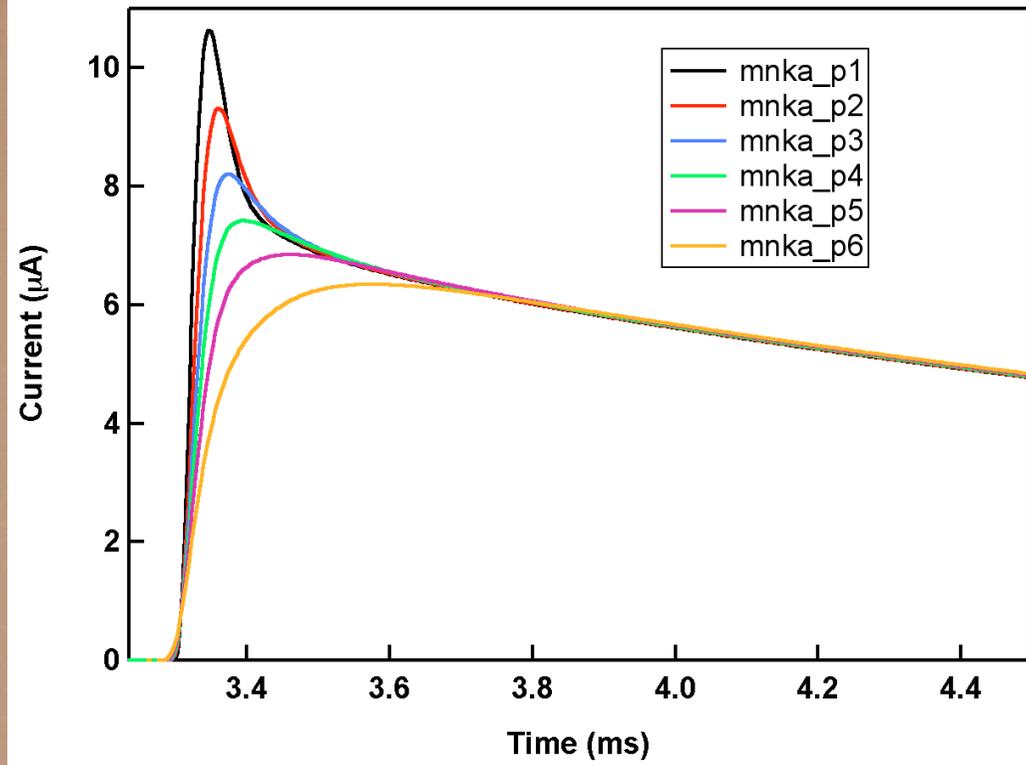
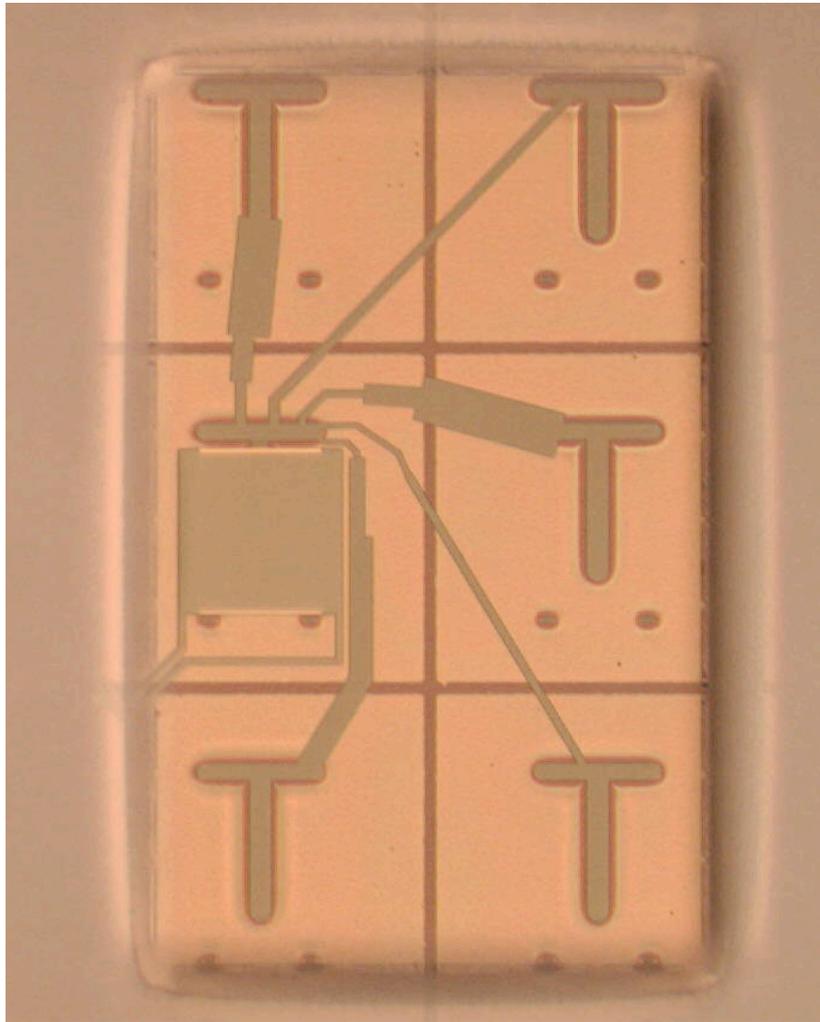




Prototype 32x32 TES array for IXO/XMS

# Sortie du signal sur 2 cotés, possibilité de mosaïque





## L'électronique de lecture-multiplexage

**Les MOSFET Silicium sont bien adaptés à la lecture de senseurs de haute impédance : 100 G $\Omega$  (PACS)**

**Ils sont cryogéniques**

**Pour les senseurs d'impédance intermédiaire (1-10 M $\Omega$ ) :**

**JFETS Silicium, 100K**

**Les HEMTs GaAs/GaAlAs peuvent être utilisés directement dans le plan focal (<100 mK) si la puissance cryogénique le permet  
L'électronique bipolaire SiGe fonctionne à 2- 4 K**

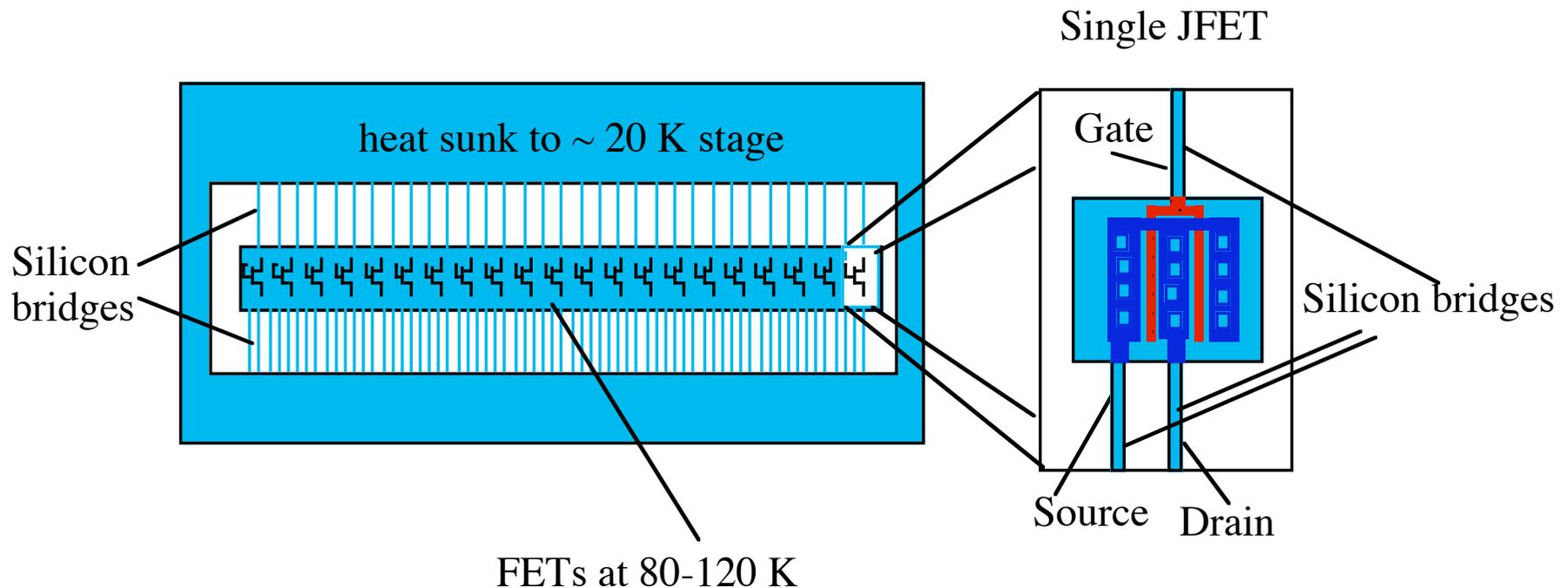
**On peut remplacer les JFETs Silicium par une électronique cryogénique plus intégrée.**

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

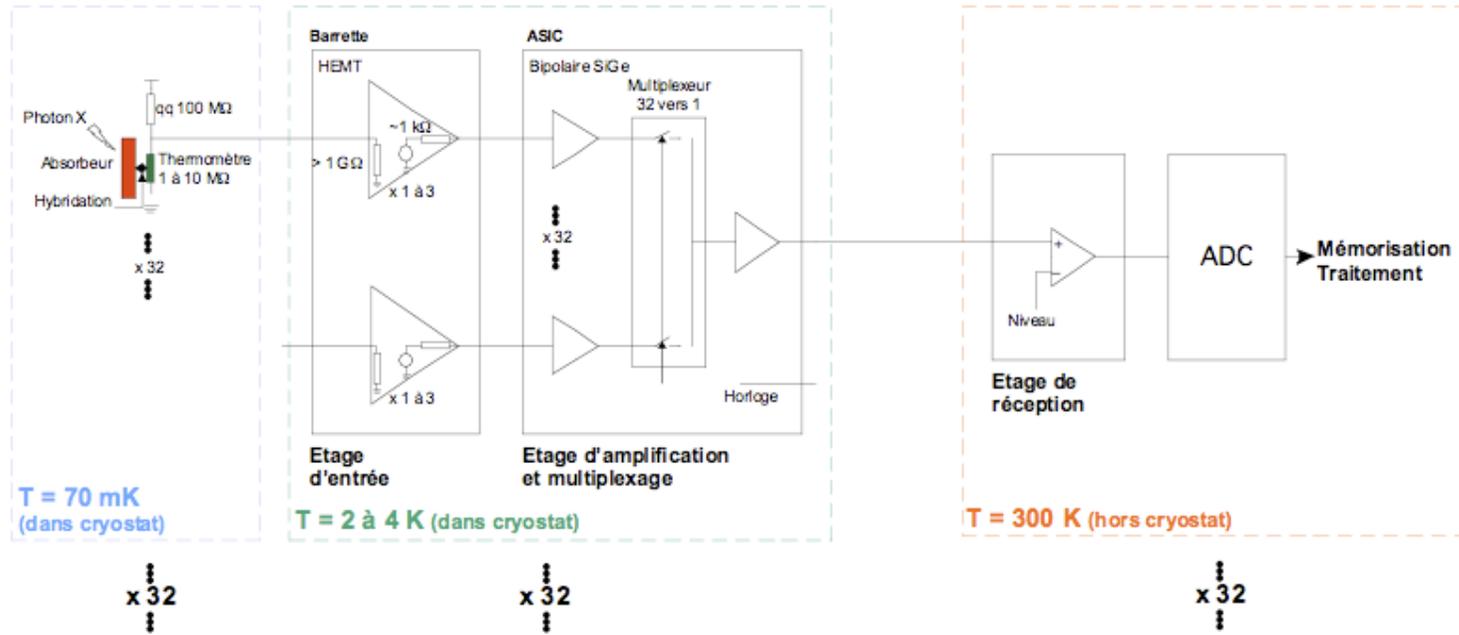
## GSFC MIS arrays

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

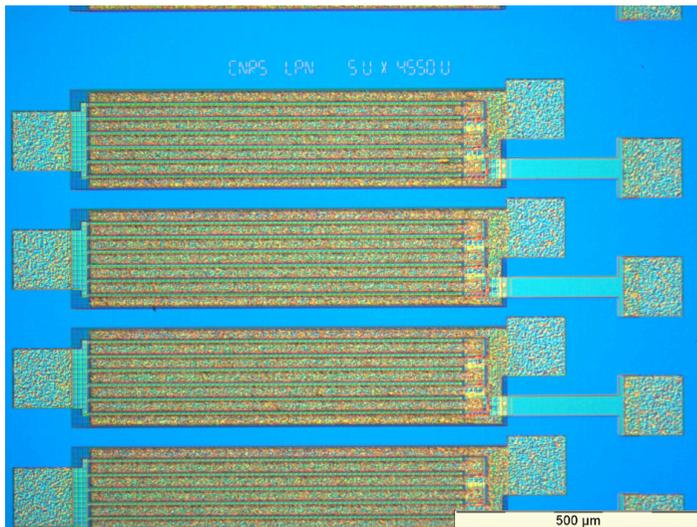
- 60  $\mu\text{W}$  per JFET dumped to 20 K temperature stage or higher
- JFET's operate with lowest noise at 130 K
- 100 JFET's not hard
- 1000 JFET's possible with monolithic JFET's and connections
  - Careful thermal design required to manage the 60 mW



# Electronique cryogénique



Grille



Drain  
Source

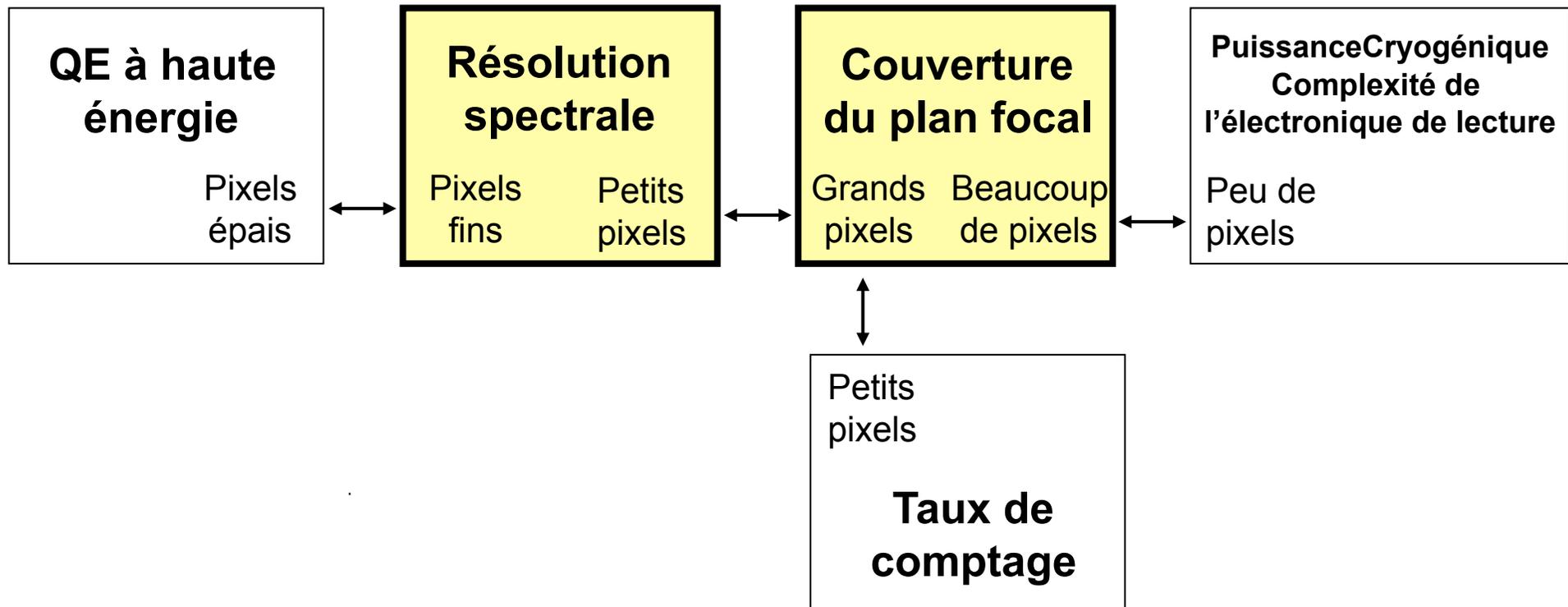
Présentation de Yong Jin  
Vendredi matin

16x1 HEMT Design

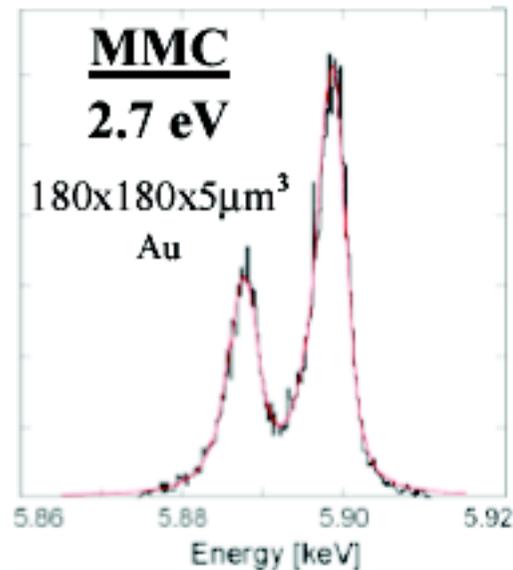
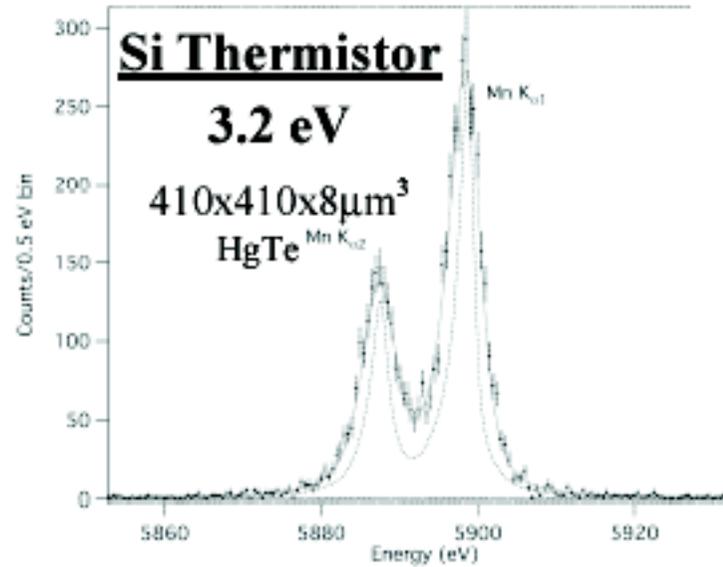
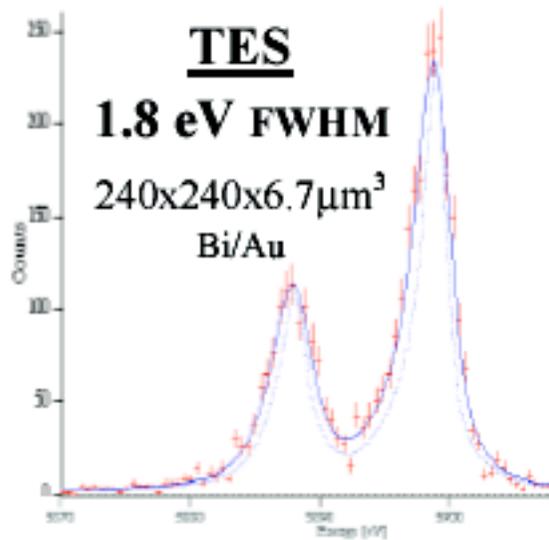
# $\mu$ calorimètres

## Les compromis

### Géométrie du pixel et du plan focal

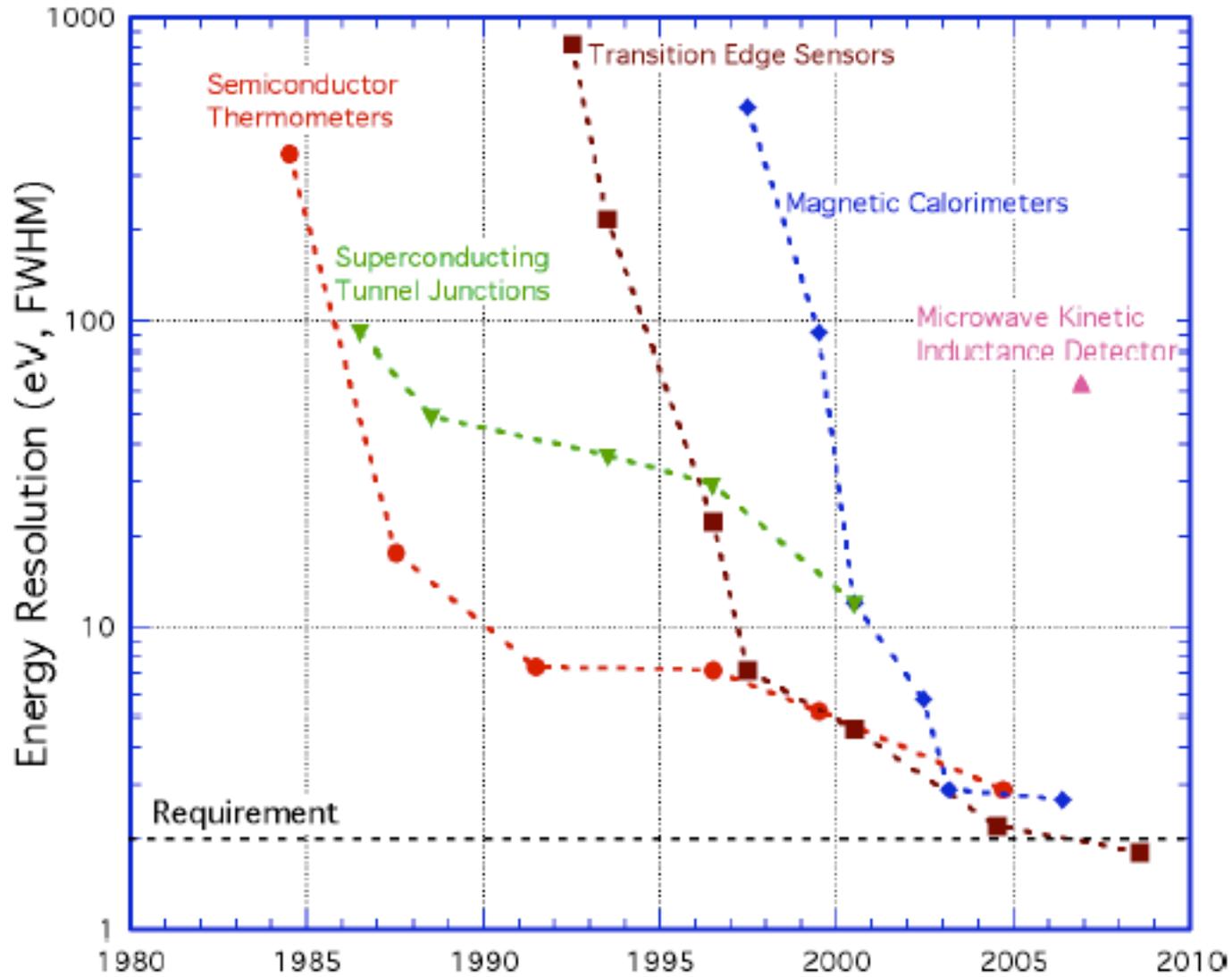


# Résolution spectrale

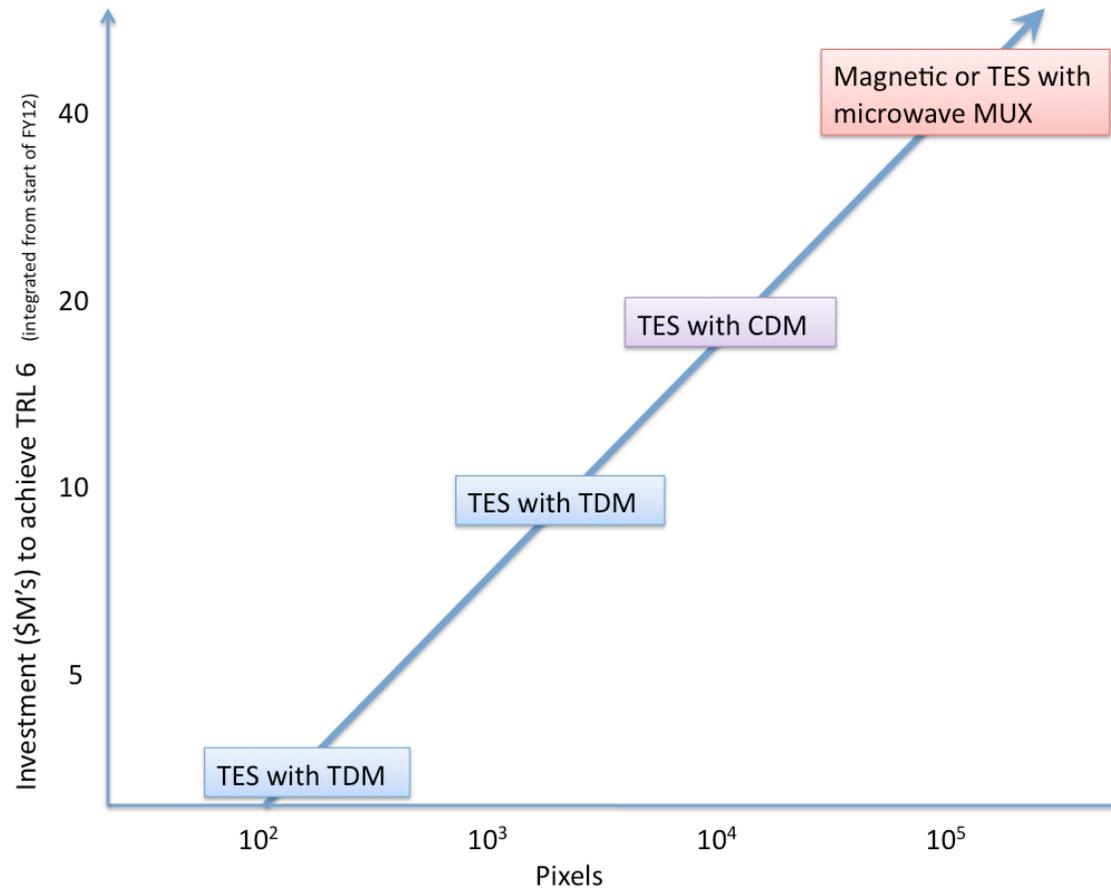


Mesure au GSFC d'un prototype  
 de MPT 4.3 eV @ 5.9 keV

C Pies 2012 MMC 2eV @ 6 keV



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



Enabling Technologies for the High-Resolution Imaging Spectrometer of the Next NASA X-Ray Astronomy Mission - Options, Status, and Roadmap  
 Caroline Kilbourne NASA/GSFC (2011)

# Conclusion

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

**L'enjeu : La couverture du plan focal qqes  $10^4$  à  $10^5$  pixels**

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

**Un multiplexage par ligne de transmission et résonateurs ?**

Proceedings of the LTD14 Conference (Heidelberg 2011), J Low Temp Phys (2012) 167

Enabling Technologies for the High-Resolution Imaging Spectrometer of the Next NASA X-Ray Astronomy Mission, Options, Status, and Roadmap, A response to RFI NNH11ZDA018L, Caroline Kilbourne NASA/GSFC (2011)