

Le bolomètre résistif vu par..

*L. Rodriguez
CEA/DSM/IRFU/SAP*

10.0 kV Spot Magn WD |-----| 200 µm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

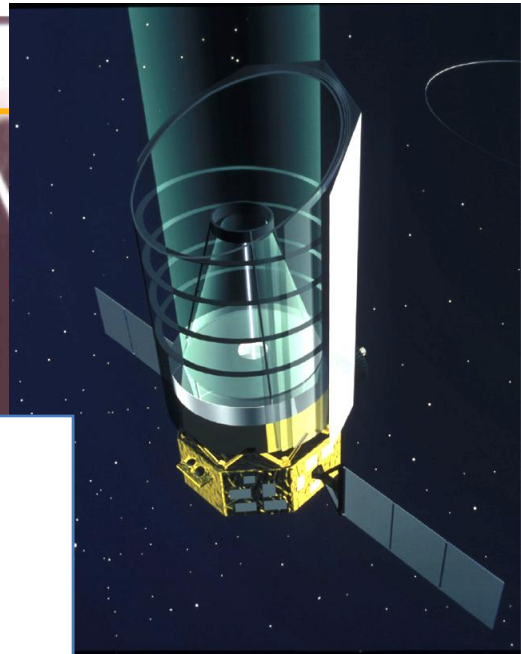
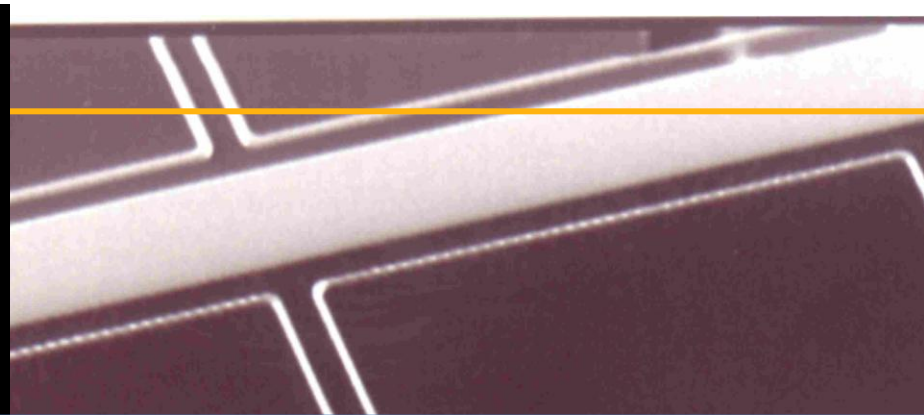
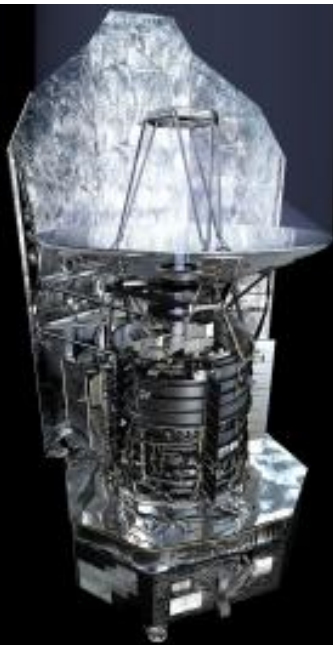
- Les bolomètres sont aux confluents de nombreux domaines scientifiques ou techniques:
 - Détection
 - Physique du solide
 - thermique
 - traitement du signal
 - Optique
 - Cryogénie
 - électronique
 - μ techno du Si, SiN

Il est difficile d'en maîtriser tous les aspects (surtout au début).

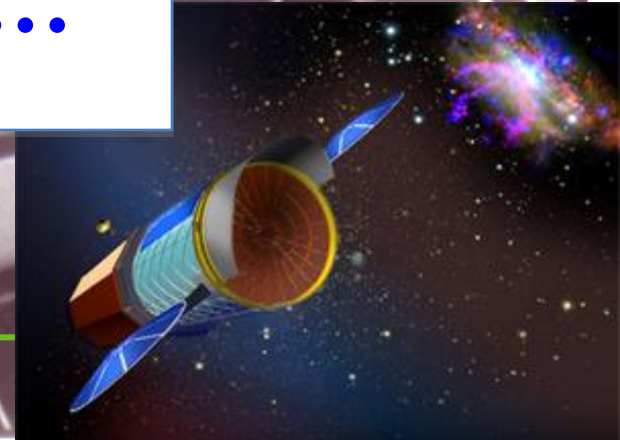
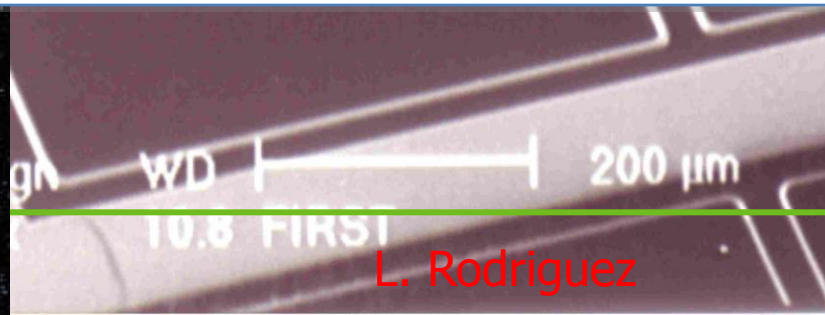
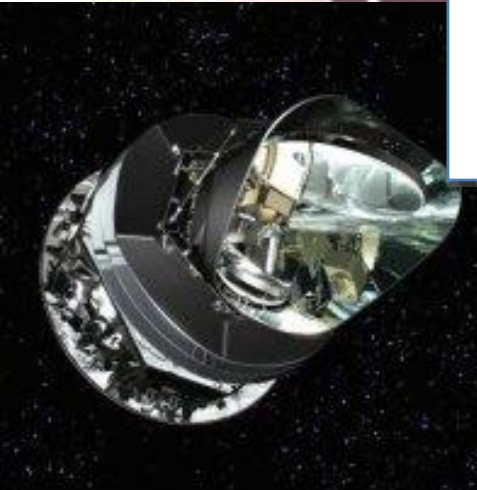
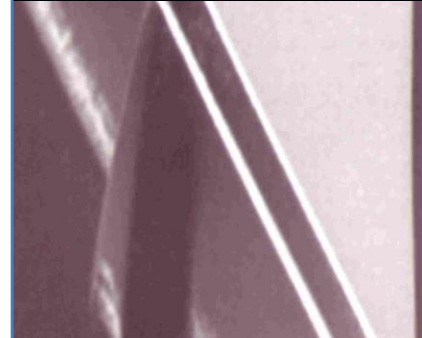
Quand on discute technologie chacun aborde le bolomètre par son point de vue qui est forcément partiel.

C'est ce patchwork que je vais essayer de vous faire sentir.

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μ m
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST



Le bolomètre
vu par
le petit bout de
la lorgnette...



L. Rodriguez

- Dans le domaine des rayons X

⇒ micro-calorimètres

mesure de l'énergie des photons à l'unité

gain en résolution en énergie / au détecteurs
quantiques

- Dans le domaine submillimétrique

⇒ Bolomètres (détecteurs quadratiques)

mesure du flux de puissance dans une bande spectrale
définie par un élément extérieur (filtre, spectromètre...)

Domaine non couvert par les détecteurs quantiques.

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

Le bolomètre
vu par
le thermicien...

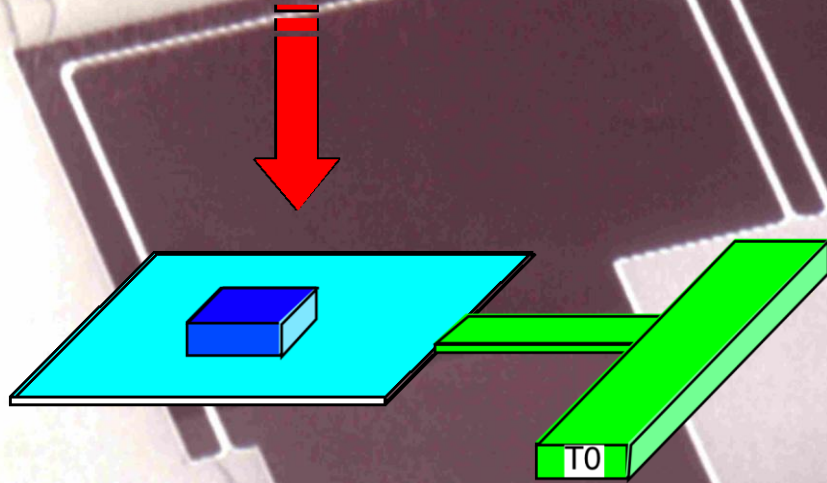
10.0 kV Spot Magn WD | | 200 µm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

- Dans le domaine des rayons X
 - ⇒ On mesure une impulsion de température
 - Mesure de l'énergie de la particule
 - gain en résolution / au détecteurs quantiques
- Dans le domaine submillimétrique
 - ⇒ Bolomètres (détecteurs quadratiques)
 - mesure de la température du détecteur
 - représentative du flux de puissance incidente.
 - Domaine non couvert par les détecteurs quantiques.

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μm
10.0 kV 0.0 00X 10.0 FIRST

Principe du Bolomètre

Inventé par S. P. Langley en 1880...



- L'absorbeur convertit la puissance incidente en chaleur.
- Un élément thermométrique vient mesurer l'élévation de température
- L'élément sensible est relié à une source froide via une résistance thermique.

Paramètres importants :

- **capacité calorifique** : la plus faible possible (basse température),
- **élément thermométrique** : le plus sensible possible,
- **résistance thermique** : adaptée aux besoins.

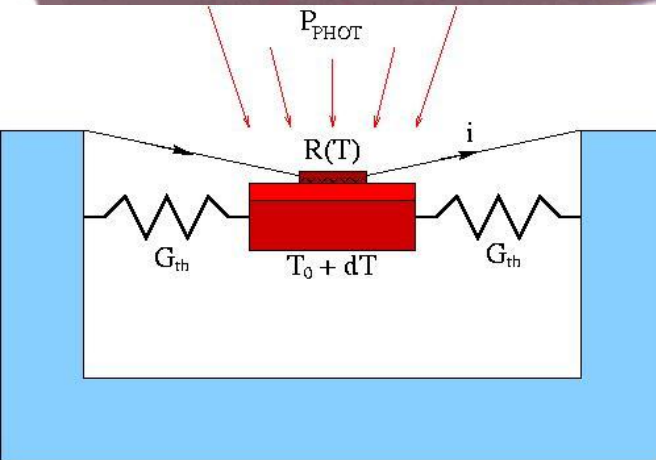
Capacité calorifique & Conductance thermique

- **Capacité calorifique** = Chaleur spécifique \times masse.
La chaleur spécifique croît avec la température
 - En T dans le cas des électrons d'un métal,
 - En T^3 pour un cristal
 - Très faible pour un supraconducteur loin du T_c
- **Conduction thermique** = Conductance thermique $\times \Delta T$.

La Conductance thermique est proportionnelle à la chaleur spécifique(T) le long du conducteur thermique.

Choisir les bon matériaux, réduire la masse et descendre en Température sont les ingrédients essentiels du détecteur thermique !

10.0 kV 5.0 66X WD | 200 μ m
10.8 FIRST



- Thermometre
- Absorber
- Substrate
- Thermal link
- Heat sink T_0

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

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

- Quelle puissance ?

- La plus basse possible: $P_{joule} \ll P_{phot} \Rightarrow$ signal !
Le niveau de signal est trop faible: le bruit thermique domine.

- La plus haute possible: $P_{joule} \gg P_{phot} \Rightarrow$ signal !
La température du bolomètre est dominée par la "chaleur Joule".

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

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μ m
10.0 kV 0.0 00x 10.8 FIRST

- **Analytique:** exacte (du point de vue mathématique) peu gourmande en puissance de calcul mais forcément simplificatrice.

C'est le domaine de la résolution des petits signaux (les principaux paramètres sont constants ou suivent des lois simples).

- **Numérique:** on intègre par pas de temps l'équation intégrale correspondante. On peut y inclure tous les détails de C , G , P_{joule} ou P_{phot} .

On traite les petits et les grands signaux (comme la présence d'un petit signal sur un fond important).

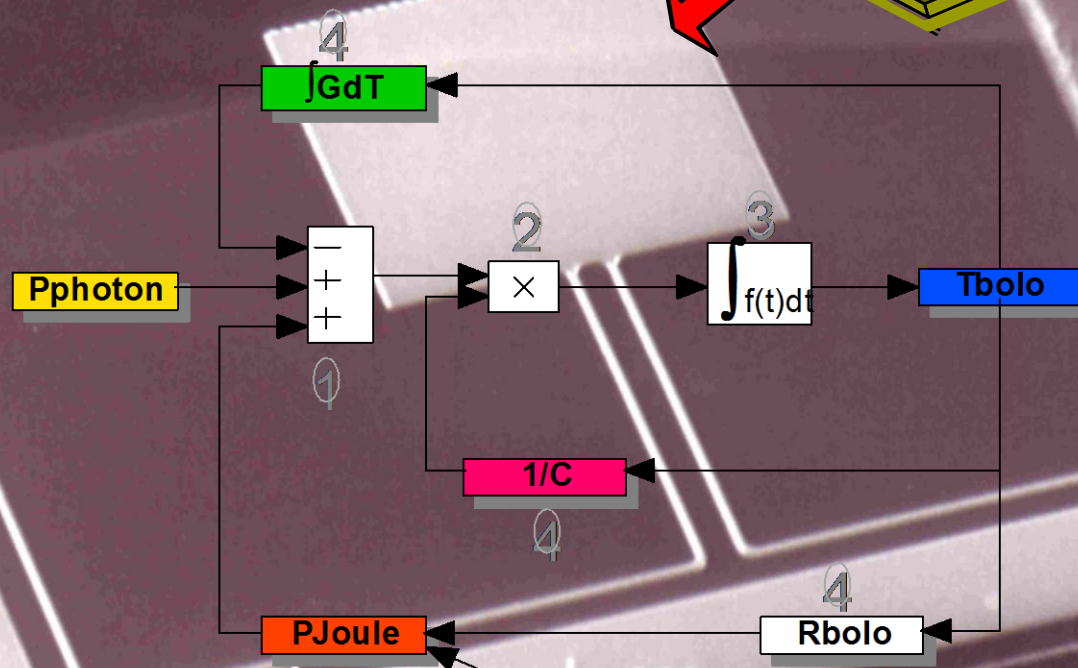
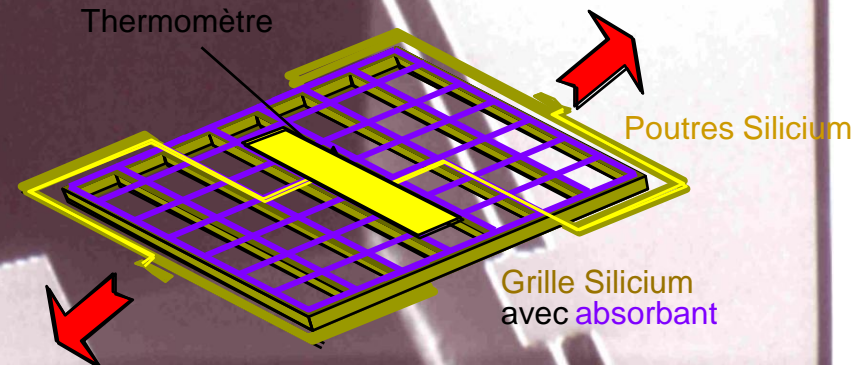
Permet de se sortir d'équations algébriques

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

Résolution numérique de l'équation

- Pour un bolomètre soumis à un flux de photons

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{1}{C} [P_{ph} + P_j - G_T(T_b - T_0)]$$



Vbolo
+ autres
paramètres

- La réponse du bolomètre est le produit de 2 facteurs:
- Gain thermique, Bande passante therm
- Gain électrique. Bande Passante élec

$$Rep (V/W) = G_{el} (V/K) \times G_{th} (K/W)$$

les stratégies de détection vont privilégier l'un ou l'autre des facteurs.

10.0 kV 6.0 66X WD 10.8 FIRST 200 μm

- Le "gain" thermique est donné par la faculté de produire une plus grande élévation de température pour une "excitation" donnée.
- Dans le cas des micro-calorimètres:

dépôt d'énergie "instantané" = régime impulsionnel

La capacité calorifique est déterminante pourvu que le lien thermique ne soit pas trop conducteur.

$$\Delta T = E/C$$

La fuite thermique ramène le détecteur à l'"état de repos"
Plus la conductance est grande plus le détecteur récupère vite
mais plus il est difficile de saisir l'instant du maximum de
l'impulsion qui détermine la précision sur la mesure de
l'énergie.

En réalité c'est une compétition entre l'homogénéisation de la
température dans la capacité calorifique et la fuite de
chaleur.

- Dans le cas des bolomètres:

flux de puissance = régime continu

Le flux d'énergie va se propager vers la source froide, la **résistance thermique** est déterminante pourvu que la capacité calorifique ne soit pas trop importante.

$$\Delta T = P/G$$

La capacité calorifique va jouer ici un rôle déterminant en ce qui concerne le temps mis par le détecteur à un changement de flux incident. A conductance donnée, c'est elle qui détermine la "vitesse de réaction" du détecteur.

$$\tau = C/G.$$

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

Le bolomètre vu du côté de l'optique...

10.0 kV Spot Magn WD | | 200 μ m
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

- Dans le domaine des rayons X

⇒ Une "mince" couche de matériau à haut Z

- Dans le domaine submillimétrique

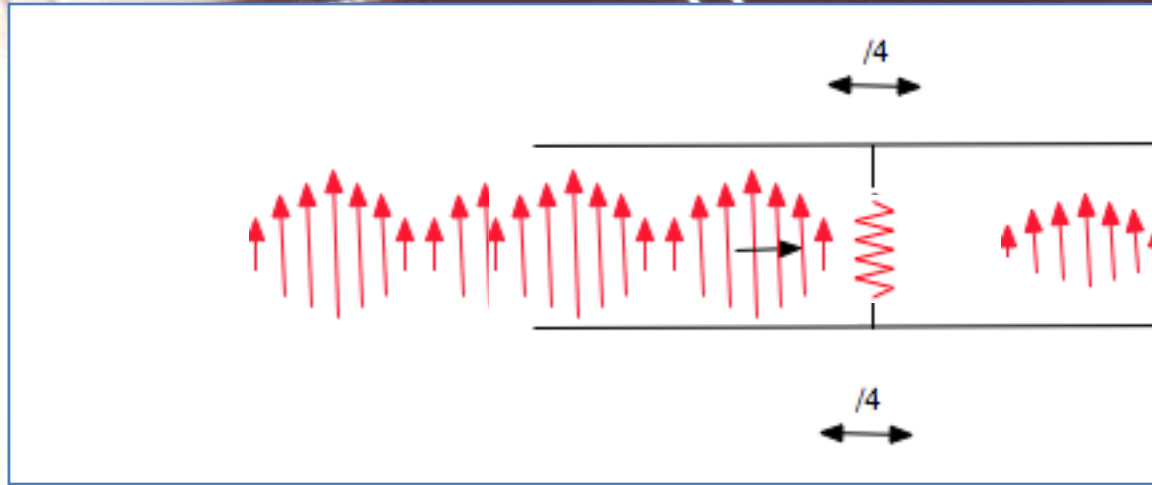
⇒ Une mince couche de métal résistif:

le champ électrique de l'onde met en mouvement les électrons libres du métal qui dissipent la puissance par "effet joule".

Pour obtenir une couche métallique résistive il faut réduire l'épaisseur du métal de quelques dizaines à quelques centaines d'Angströms.

10.0 kV Spot Magn WD | 200 µm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

- Une couche résistive optimisée (mince).



Absorption 50% pour un passage si $R_{\square} = 188 \Omega / \square$

Multiplier les passages pour épuiser l'onde:

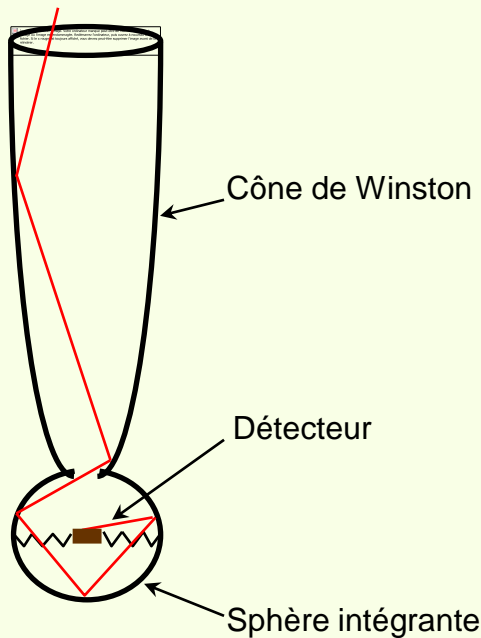
=> l'absorbeur est au centre d'une cavité intégrante.

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μ m
10.0 kV 0.0 00x 10.8 FIRST

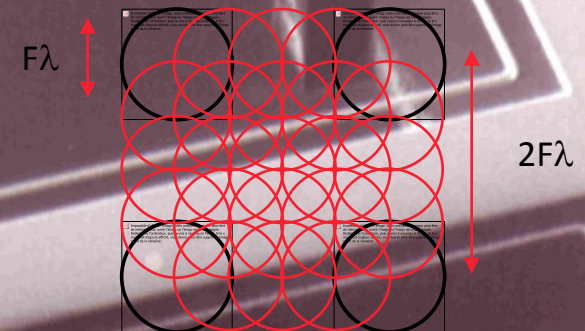
- Un concentrateur de lumière augmente la taille apparente du détecteur.

Le cône de Winston => cornet corrugué,

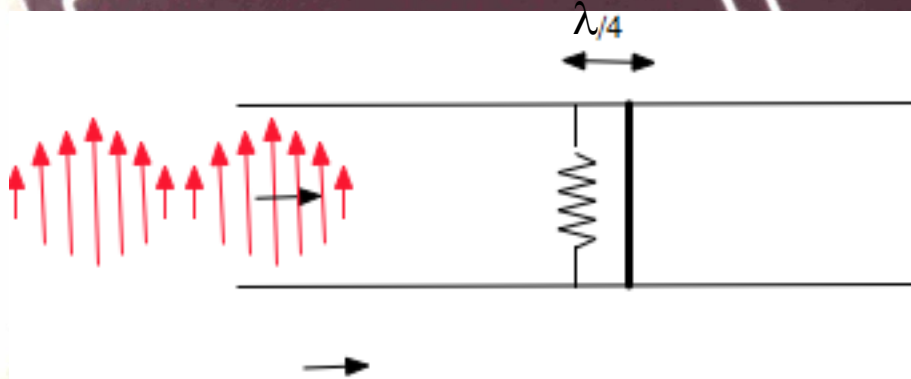
- Le concentrateur de lumière débouche sur la cavité intégrante qui confine le rayonnement autour du (petit) détecteur.



Inconvénient:
Le concentrateur de lumière implique une couverture imparfaite du plan focal



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



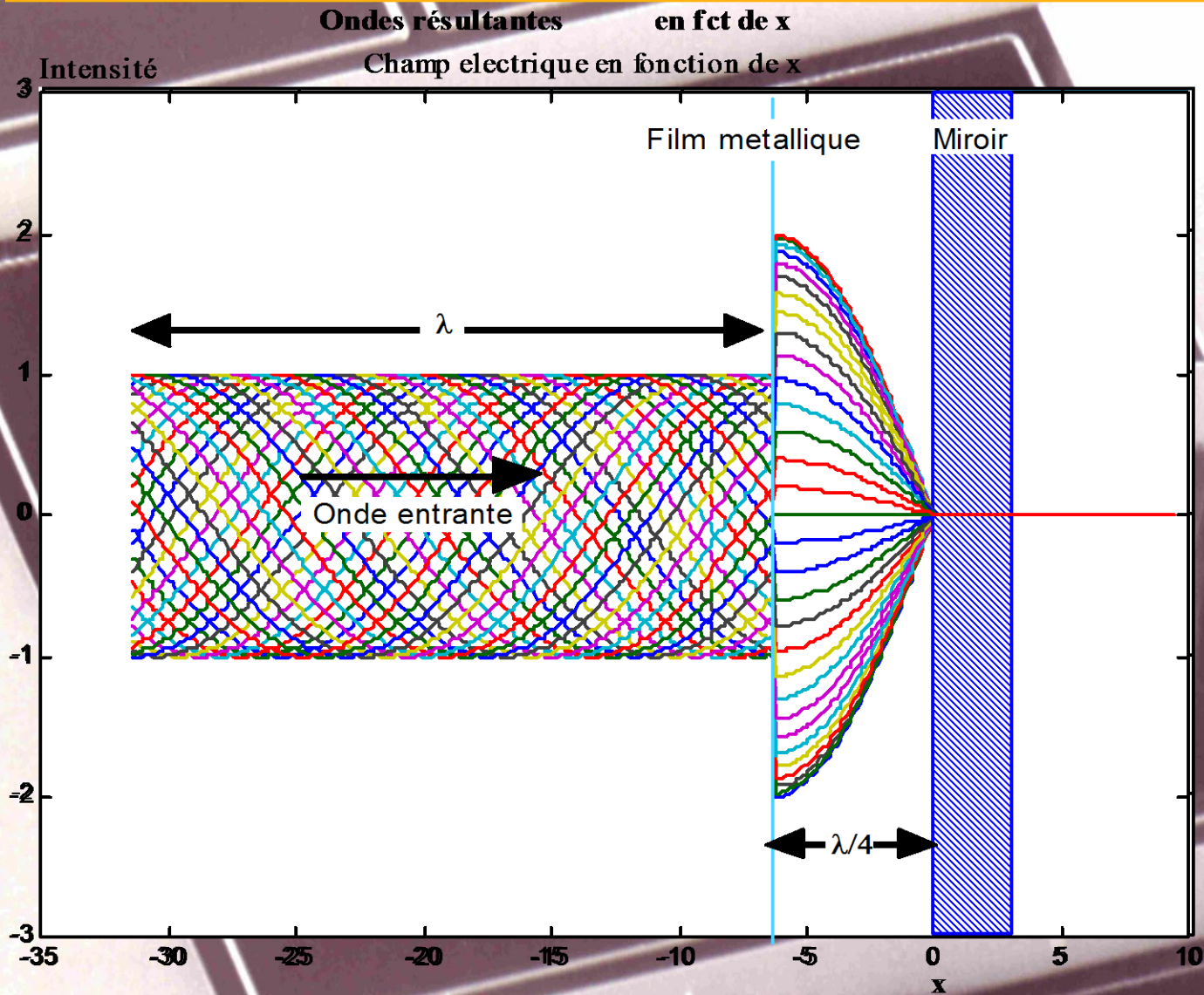
On crée une onde stationnaire dont les ventres de champ E sont à $\lambda/4, 3\lambda/4$ etc...

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

- 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 !!!

Illustration simpliste

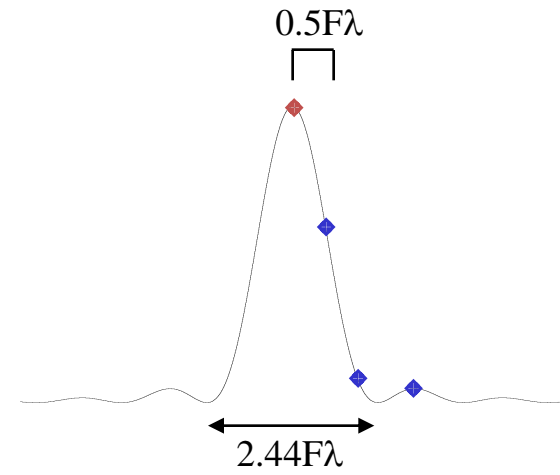


10.0 kV Spot Magn WD | 200 μ m
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST



Credit CEA

Filling factor close to 1



Nyquist sampling

10.0 kV Spot Magn 10.0 66X WD 10.8 FIRST 200 μm

Detector design. Concepts

Bolomètres résistifs

Si layer #1

70 μ m

750 μ m

Physical pixel size
=750x750 μ m²

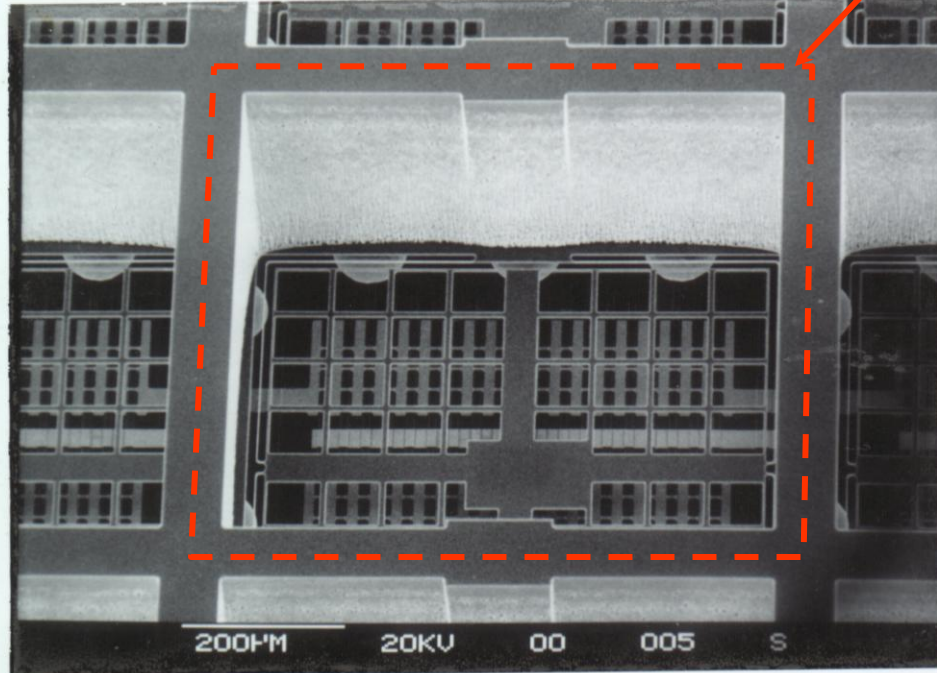
Si mesh

450 μ m

Si grid

absorber

Thermometer

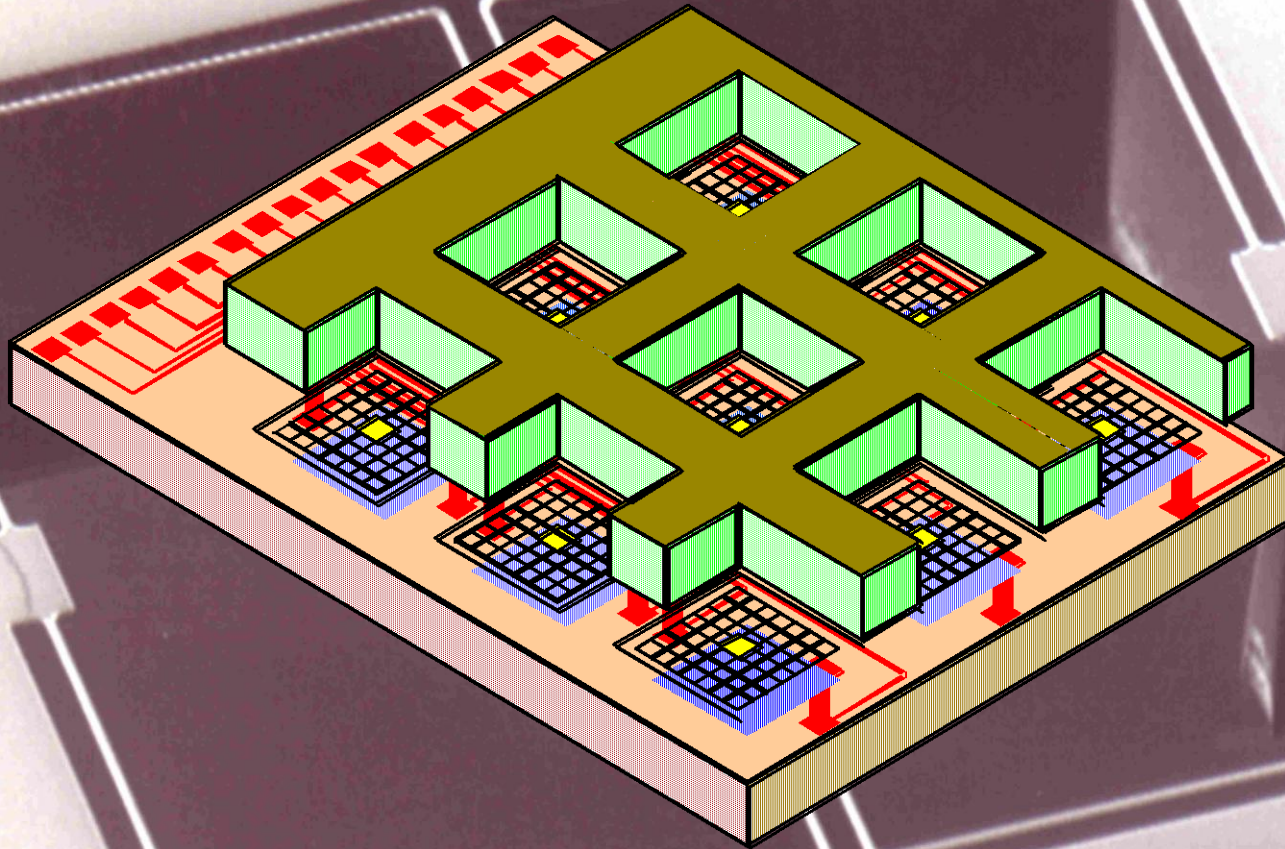


Indium bumps

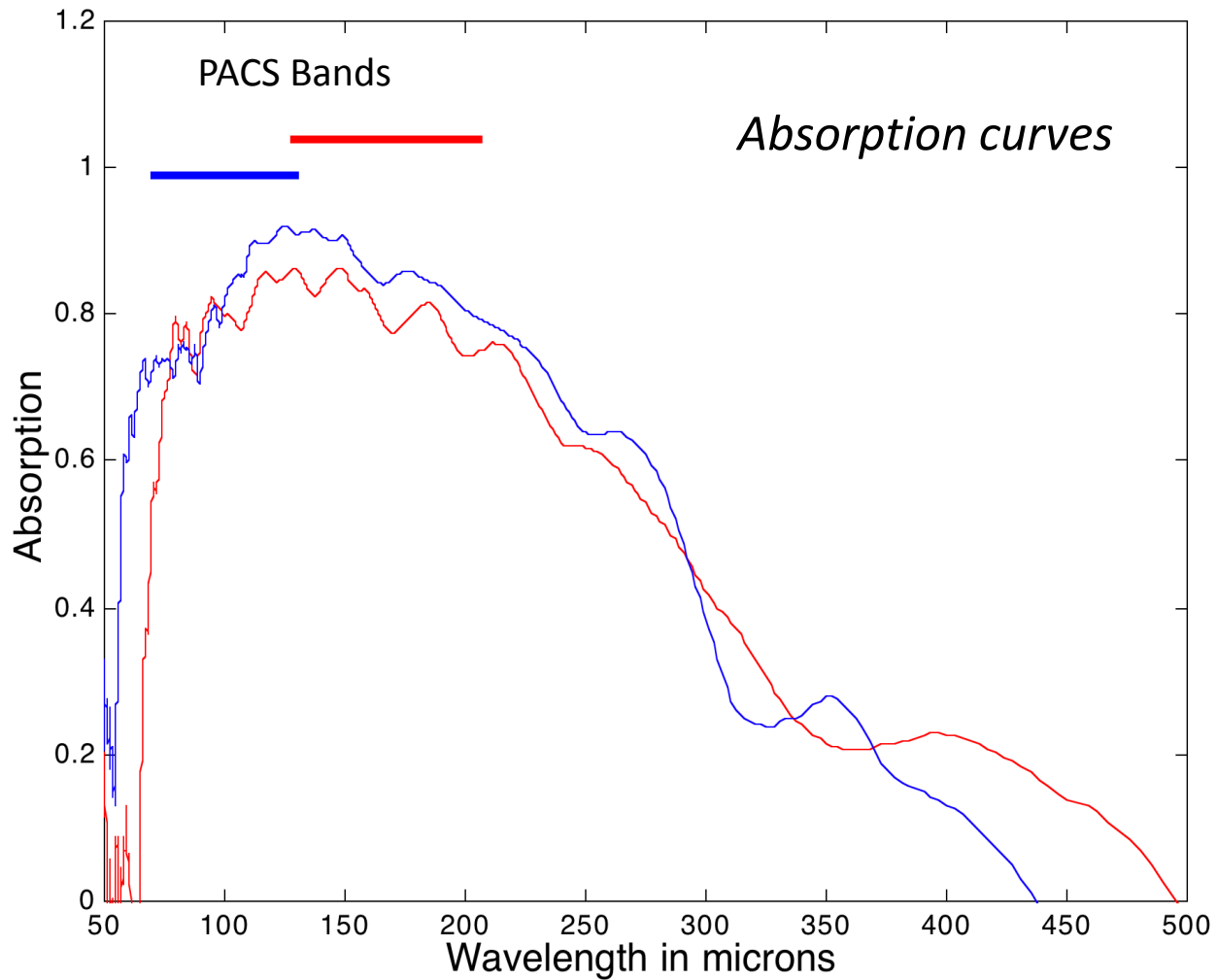
Reflector

Si layer #2

read-out electronics
beneath the reflector

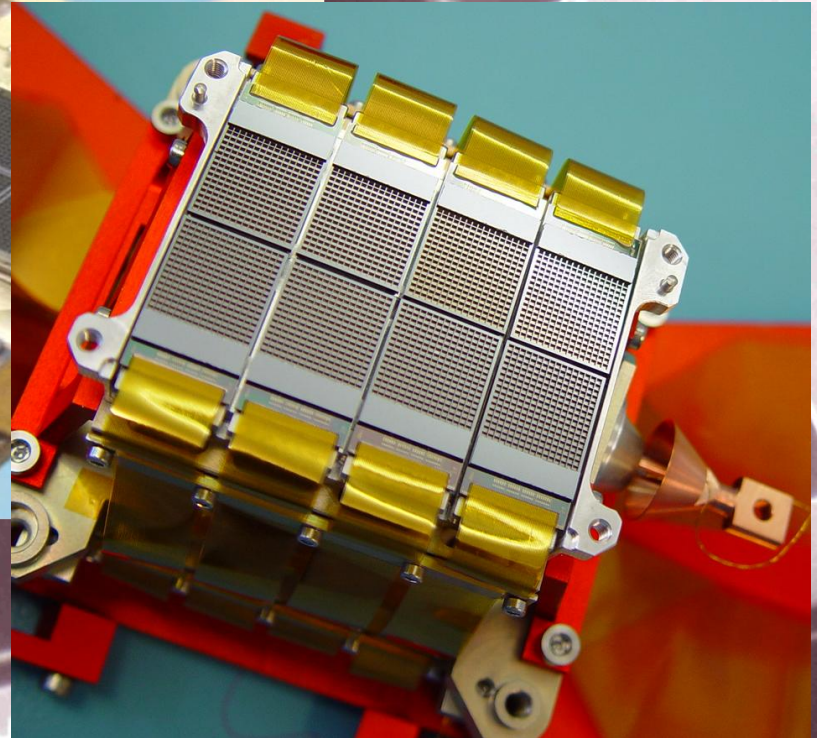
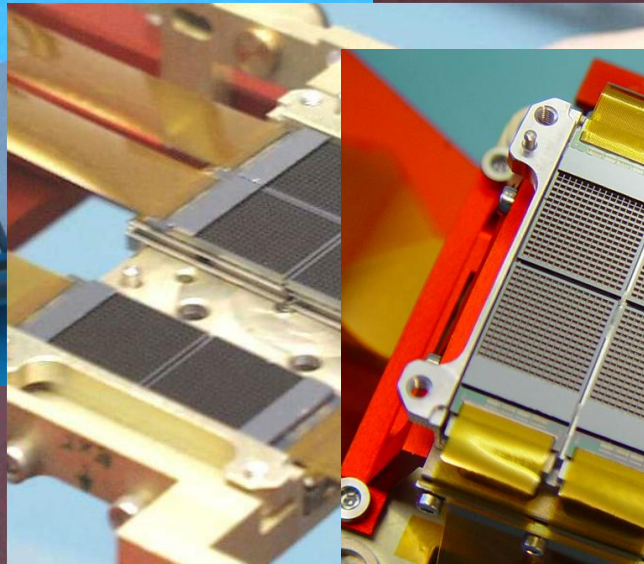
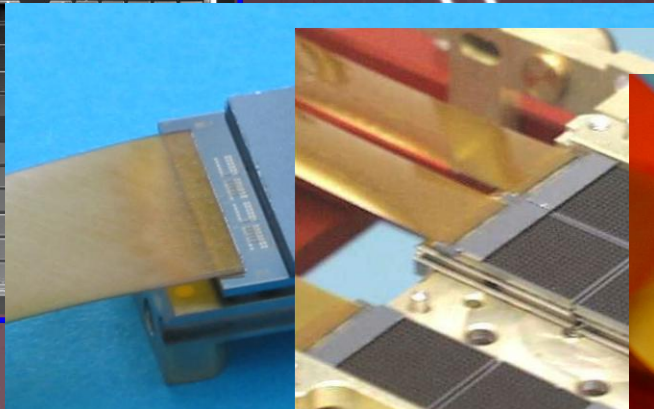
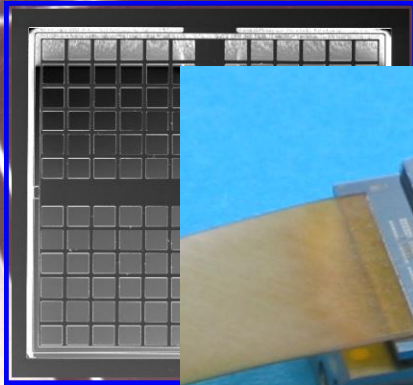


10.0 kV Spot Magn WD | 200 μm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST



Cela existe !

Une page de publicité



10.0 kV Spot Magn WD | 200 μm
10.0 kV 6.0 66X 10.8 FIRST

Le bolomètre
vu comme
"dispositif" électrique...

10.0 kV Spot Magn WD | | 200 µm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

- Une variation de résistance avec T

On cherche comme thermomètre une résistance qui présente une forte variation avec la Température:

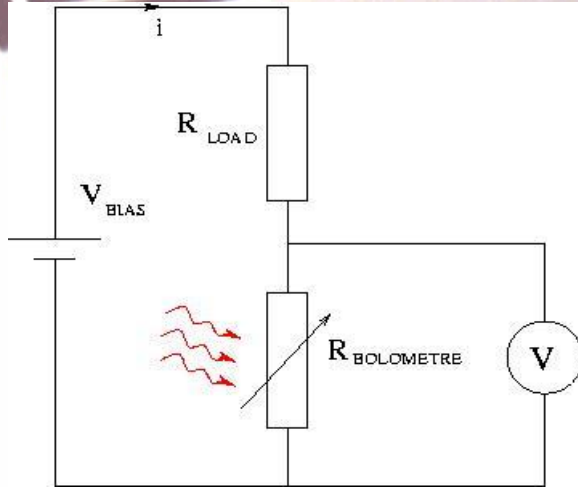
Le choix:

- un métal (varie linéairement avec T),
- un semi-conducteur (varie exponentiellement avec $T^{1/n}$),
(attention à la transition métal/semi-conducteur en fonction du dopage et de la température)
- une transition supraconductrice.

En pratique on choisit le semi conducteur ($M\Omega$ - $G\Omega$: Résistif)
ou la transition supraconductrice ($m\Omega$: TES)

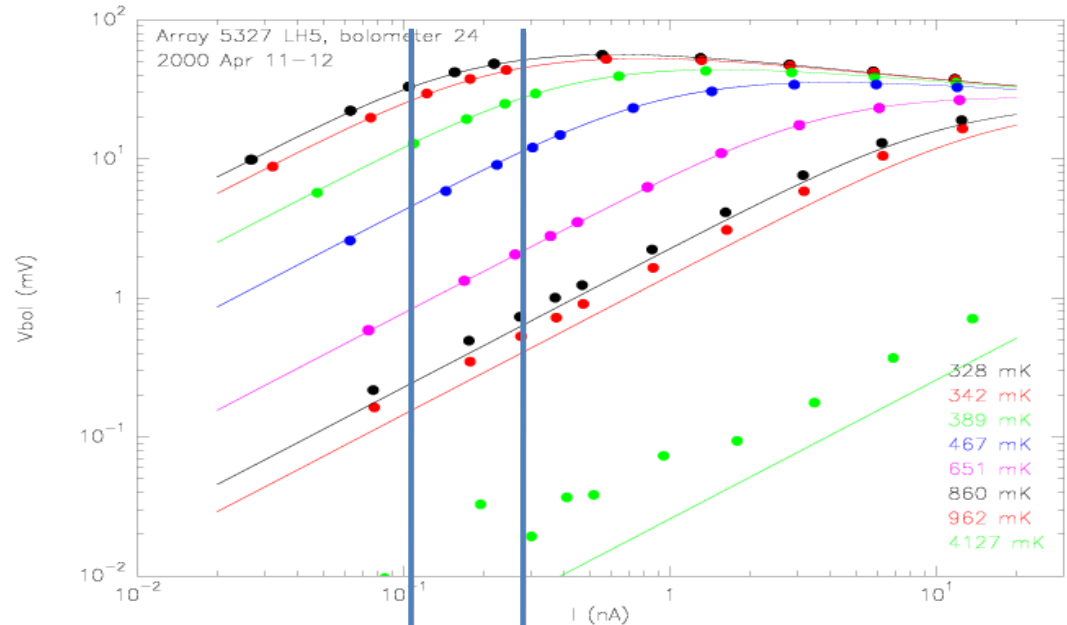
- pour des bolomètres individuels:

On construit les "load curves" : des courbes **courant-tension** sous différents flux.



- On mesure V
 - \Rightarrow On en tire R_{bol}
 - \Rightarrow On en déduit T_d
- Qui permet de déduire le flux incident P_{hot}

SHARC II Load curves (Dowell et al. 2000)



- On définit un "gain" électrique

$$\alpha = \frac{dR}{dT} \quad \alpha = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT} \quad \alpha = \frac{d \log(R)}{d \log(T)}$$

dont le signe et l'intensité vont définir le mode d'utilisation du bolomètre.

- Pour un métal normal et supraconducteur $\alpha > 0$,
- Pour un semi-conducteur $\alpha < 0$.

Le signe de α définit le mode opératoire du bolomètre.

Effet du signe de α : (>0)

- Metal et polarisation en courant:
Résistance polarisée soumise à un flux
 $\Rightarrow R$ augmente à $I=Cte$, V augmente
 $\Rightarrow P_{joule}=VI$ augmente si G petit, T augmente
 $\Rightarrow R$ augmente ...
Seule solution: travailler à tension fixée...

Démarche valable également pour les transitions supraconductrices des TES

- Semi conducteur et polarisation en Tension:

Résistance polarisée soumise à un flux

$\Rightarrow R$ diminue à $V=Cte$, I augmente

$\Rightarrow P_{joule}=VI$ augmente si G petit, T augmente

$\Rightarrow R$ diminue ...

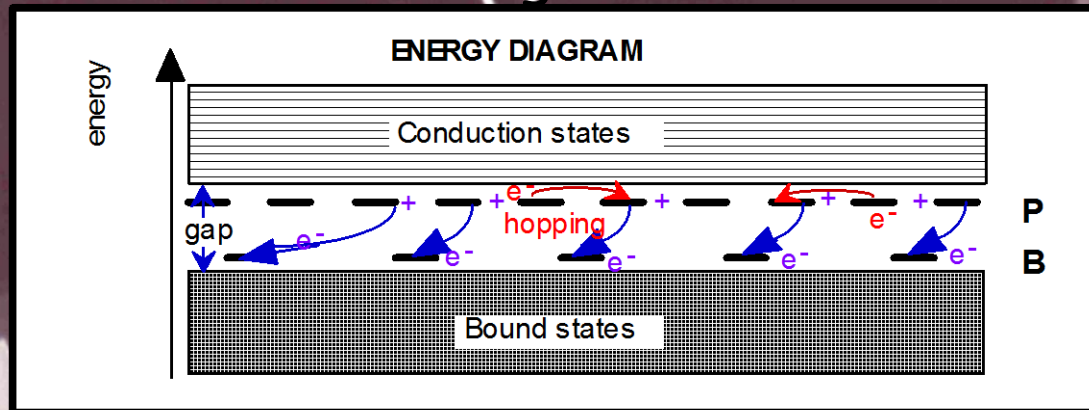
Seule solution: limiter le courant...

...par une résistance de charge.

Si $R_{charge} \gg R_{bolo}$ calculs facilités $I=cte$

D'où le principe de polarisation en courant des bolomètres semi conducteurs.

- 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 développer le pseudo gap de Coulomb.

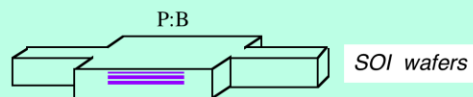
- **Le NTD Ge:**

Le germanium comporte quatre isotopes (70-2 3 4) la capture neutronique produit deux espèces chimiques l'arsenic et le sélénium. Très homogène. Compensation liée aux proportions des 2 isotopes et des sections efficaces de capture neutronique.

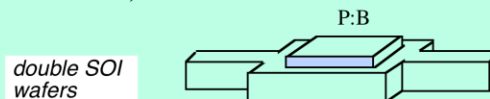
- **Le Si (P:B):**

On implante le Phosphore et le Bore. Puis pour obtenir une couche homogène on "cuit" le wafer à 1000° C pendant une douzaine d'heures. Pour éviter une diffusion trop lointaine il faut créer une barrière.

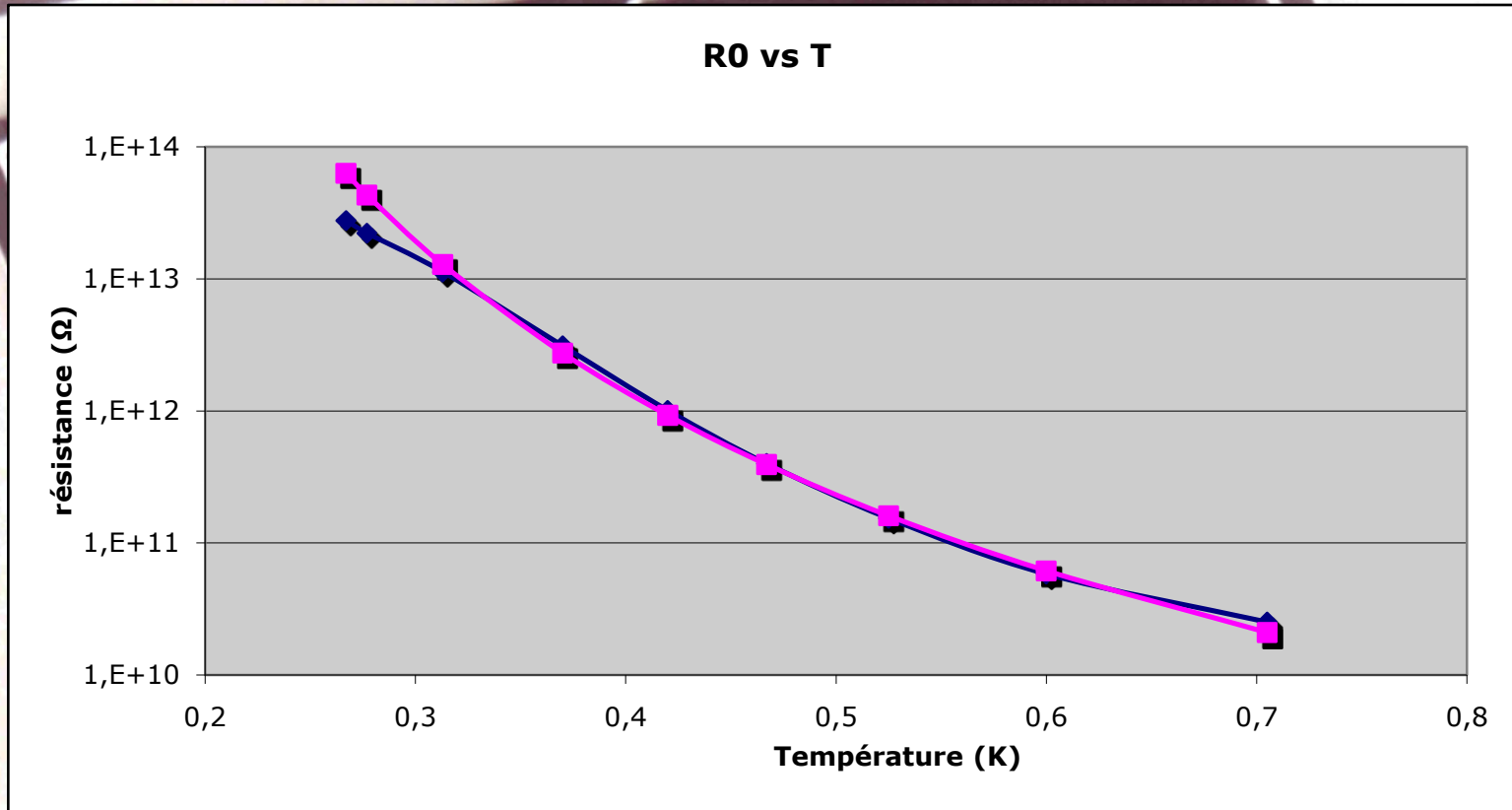
-1) multi-implanted thermometers;



-2) MESA diffused thermometers.

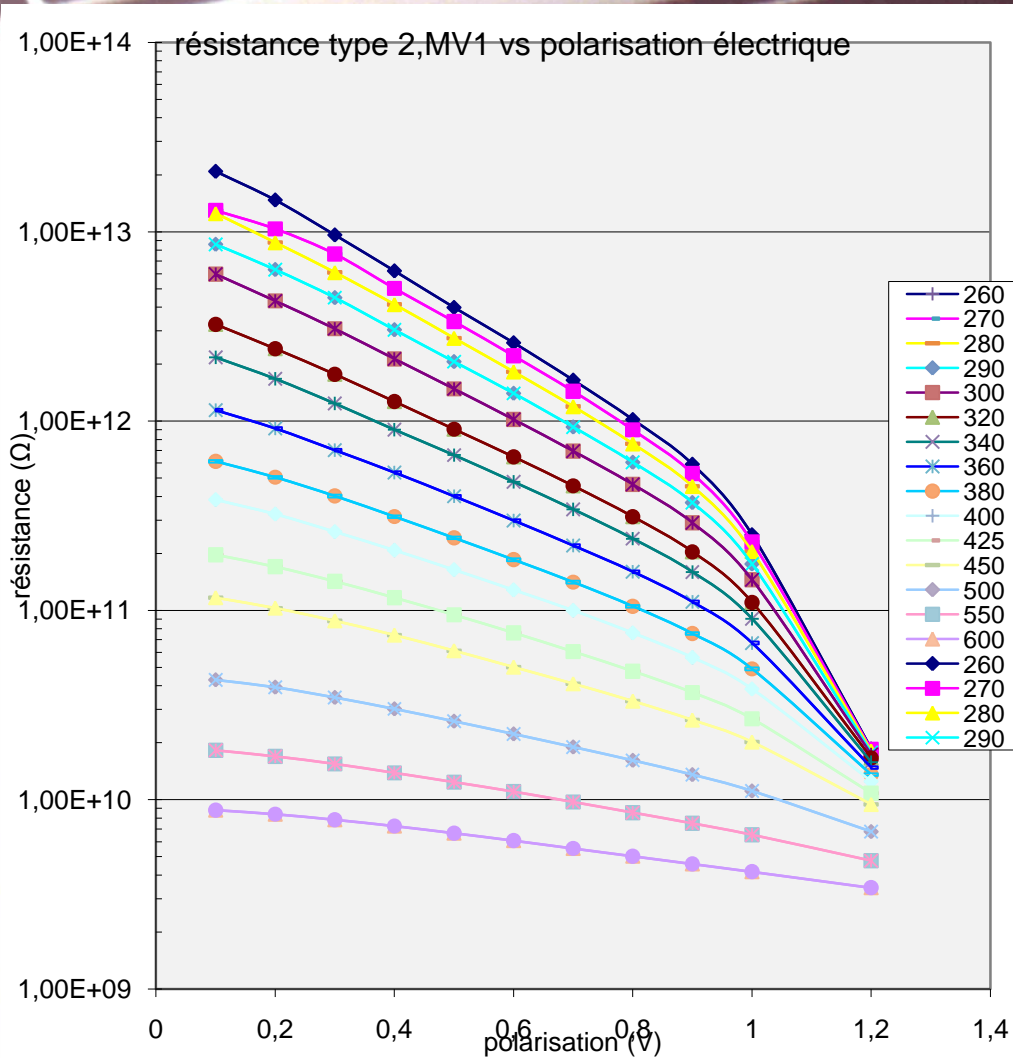


- Loi de Efros - Shklovskii en régime de champ faible



$$R_{bolo} = R_0 \exp\left(\sqrt{\frac{T_0}{T_b}}\right)$$

- 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

- A puissance Joule égale, le signal en (V) augmente avec la résistance.
- Une variation de résistance de 0,1% produit plus de signal pour une polarisation de 1V que pour une polarisation de 10mV.
- Qu'est-ce qui limite la résistance des bolomètres?
 - ⇒ la bande passante électrique, et
 - ⇒ donc le temps de réponse des détecteurs
 - ⇒ Petite incursion dans le monde des électroniciens

100V Spot Magn WD | | 200 μ m
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

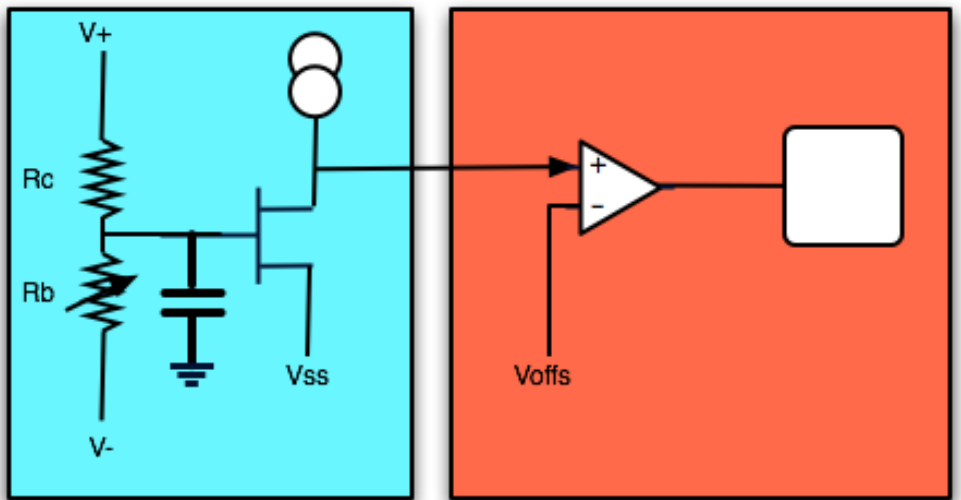
Le bolomètre vu du point de vue de l'électronicien...

10.0 kV Spot Magn WD | 200 µm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

Lire le signal issu du pont bolométrique.

Bolomètres résistifs

- Un circuit de lecture sans fuite de courant:
Transistor à effet de champ (grille isolée).



La capacité parasite...

..à prendre en compte est celle qui se développe dans la partie "haute impédance: entre les résistances et le transistor de lecture.

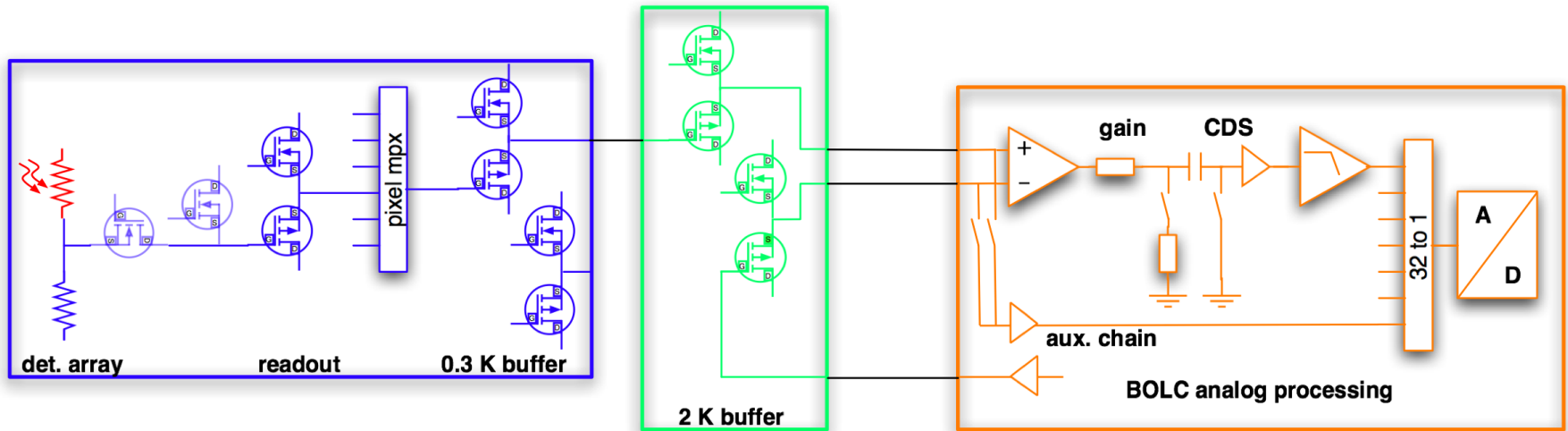
L'établissement du signal requiert un temps proportionnel à RC !

L'effet Miller:

Comme le potentiel du "drain" suit la "grille" avec un gain de l'ordre de $g=0,95$, la capacité effective est la capacité géométrique diminuée du facteur $(1-g)$.

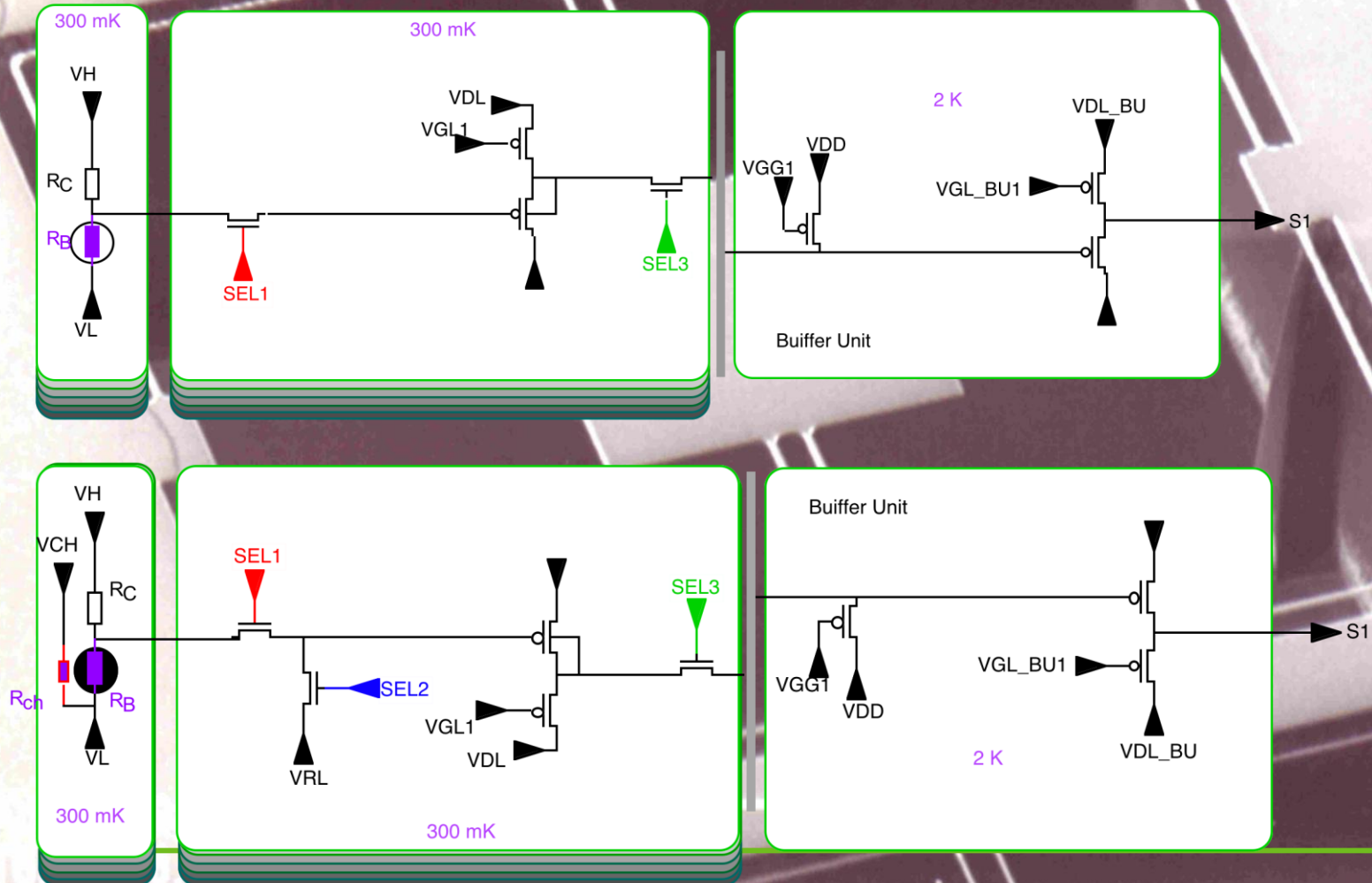
Un exemple de source de courant

- Un "pont" de transistors: l'adaptation d'impédance.

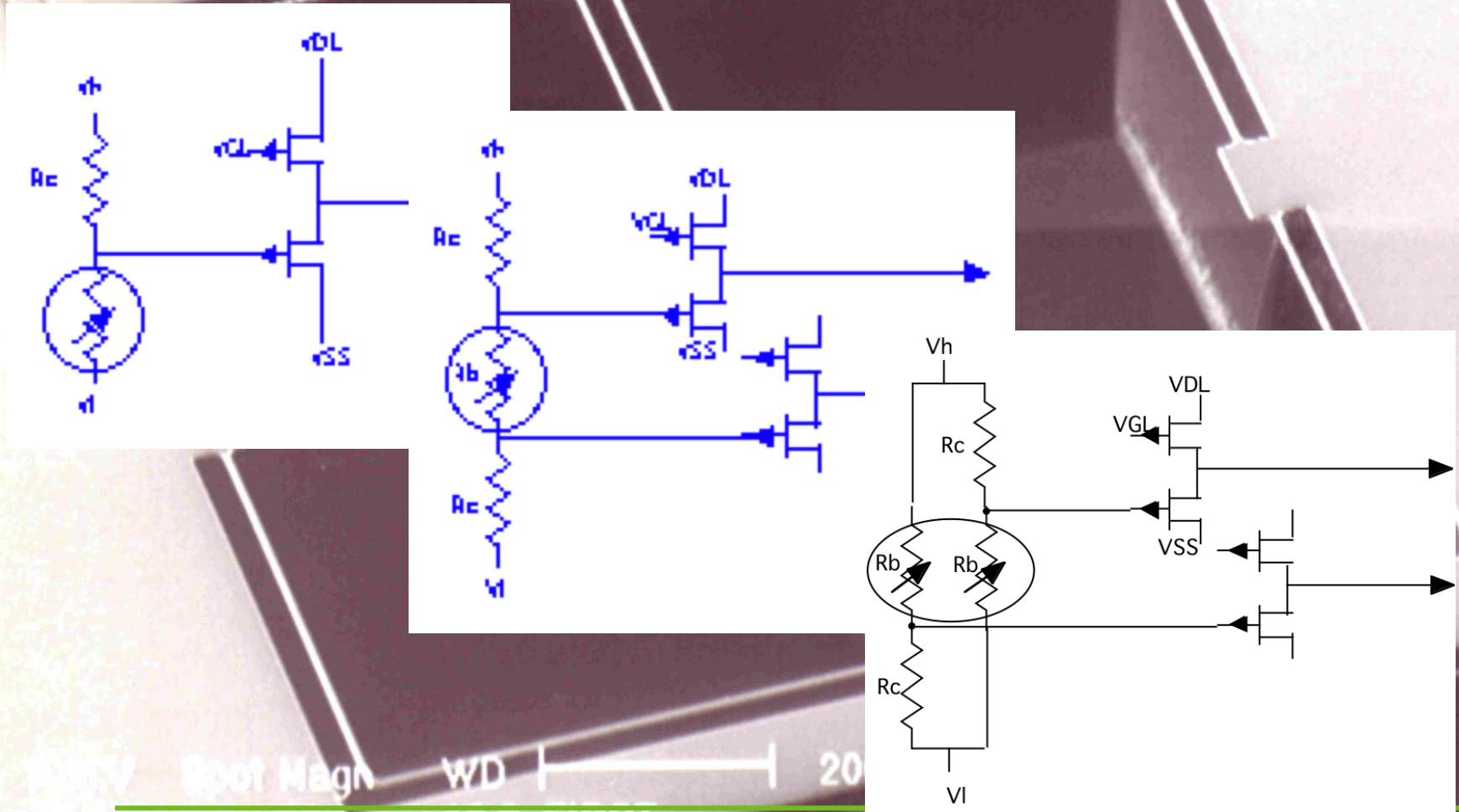


10.0 kV Spot Magn WD | 200 μm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

- Détection directe: le pont simple.
- Mesure différentielle: multi pixels.



- Mesure différentielle: intra pixel.

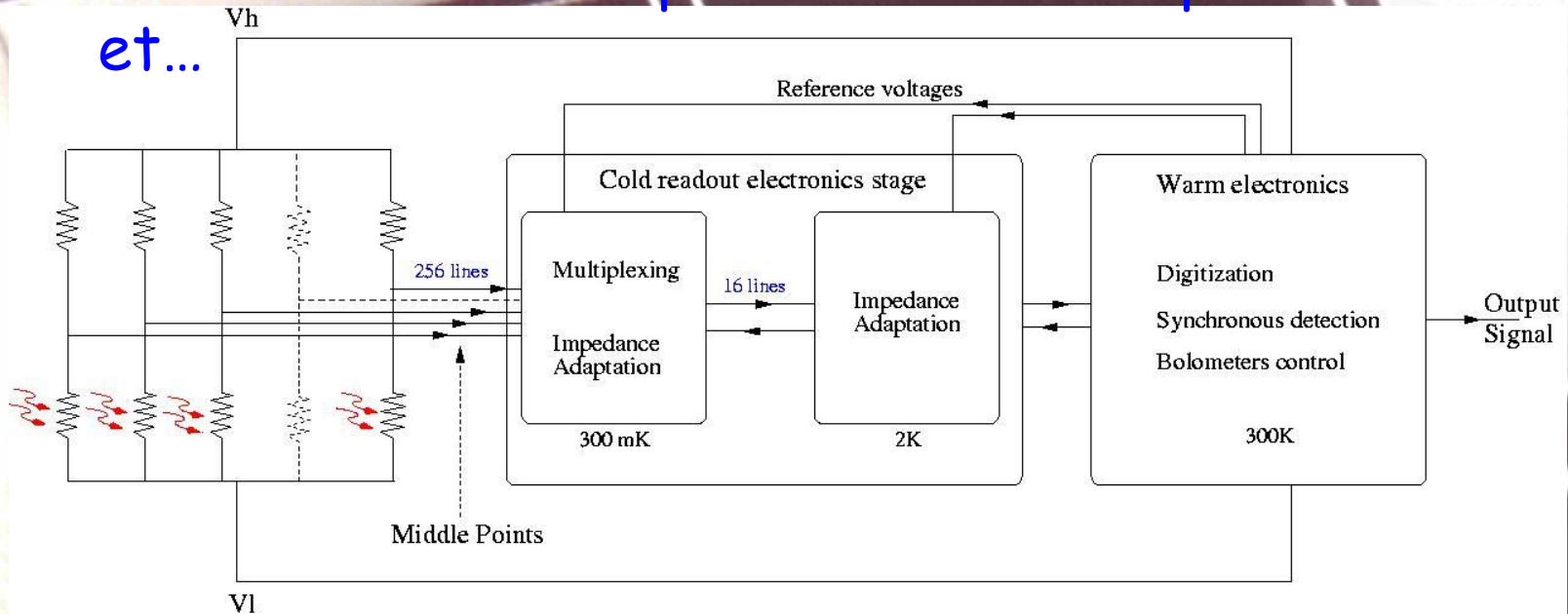


10.0 kV Spot Magn WD | 20
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

- **La détection synchrone:** consiste en une modulation électrique de la tension de polarisation du détecteur à une fréquence ($f_{th} < f_{mod} < f_{el}$), les basses fréquences sont filtrées le signal est alors démodulé et ramené en bande de base.

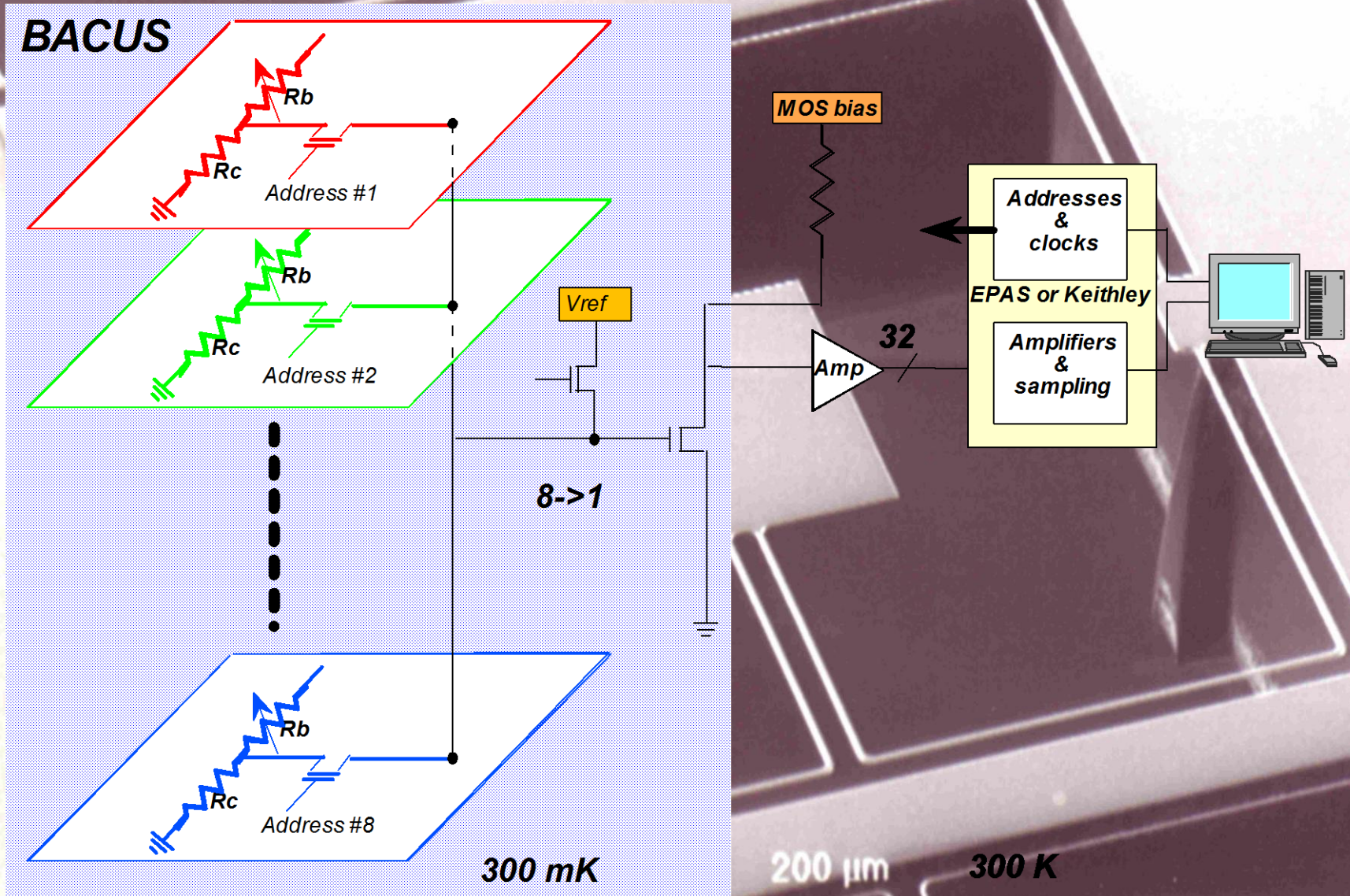
Le double échantillonnage corrélé: on présente alternativement au circuit de lecture le signal du détecteur et celui d'une référence. On soustrait par la suite les deux valeurs qui ont subi le même bruit de la part du circuit de lecture.

- Quand on veut paver le plan focal de très nombreux détecteurs on a un problème : la dissipation électrique et...

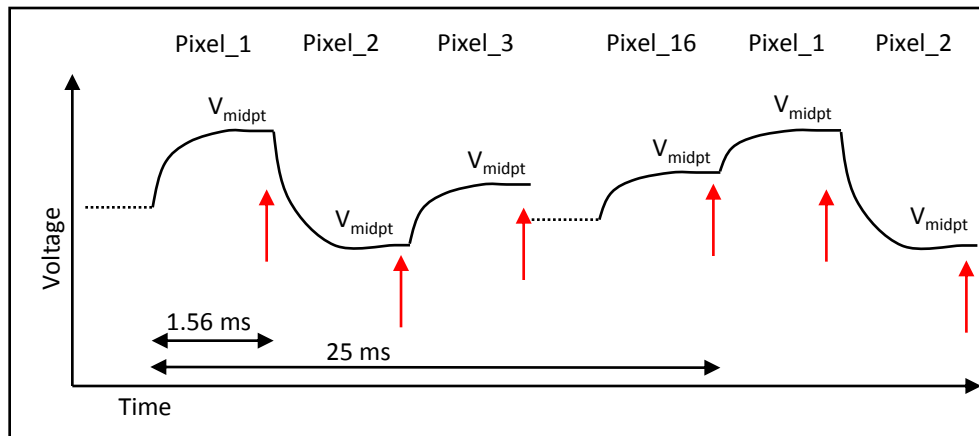


...la charge thermique apportée par les fils de connexion.

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μ m
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

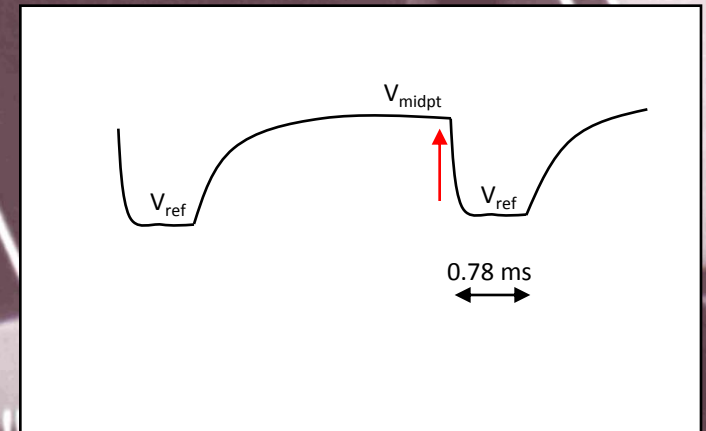


- On lit successivement (MUX temporel) ou
- Simultanément (MUX fréquentiel)



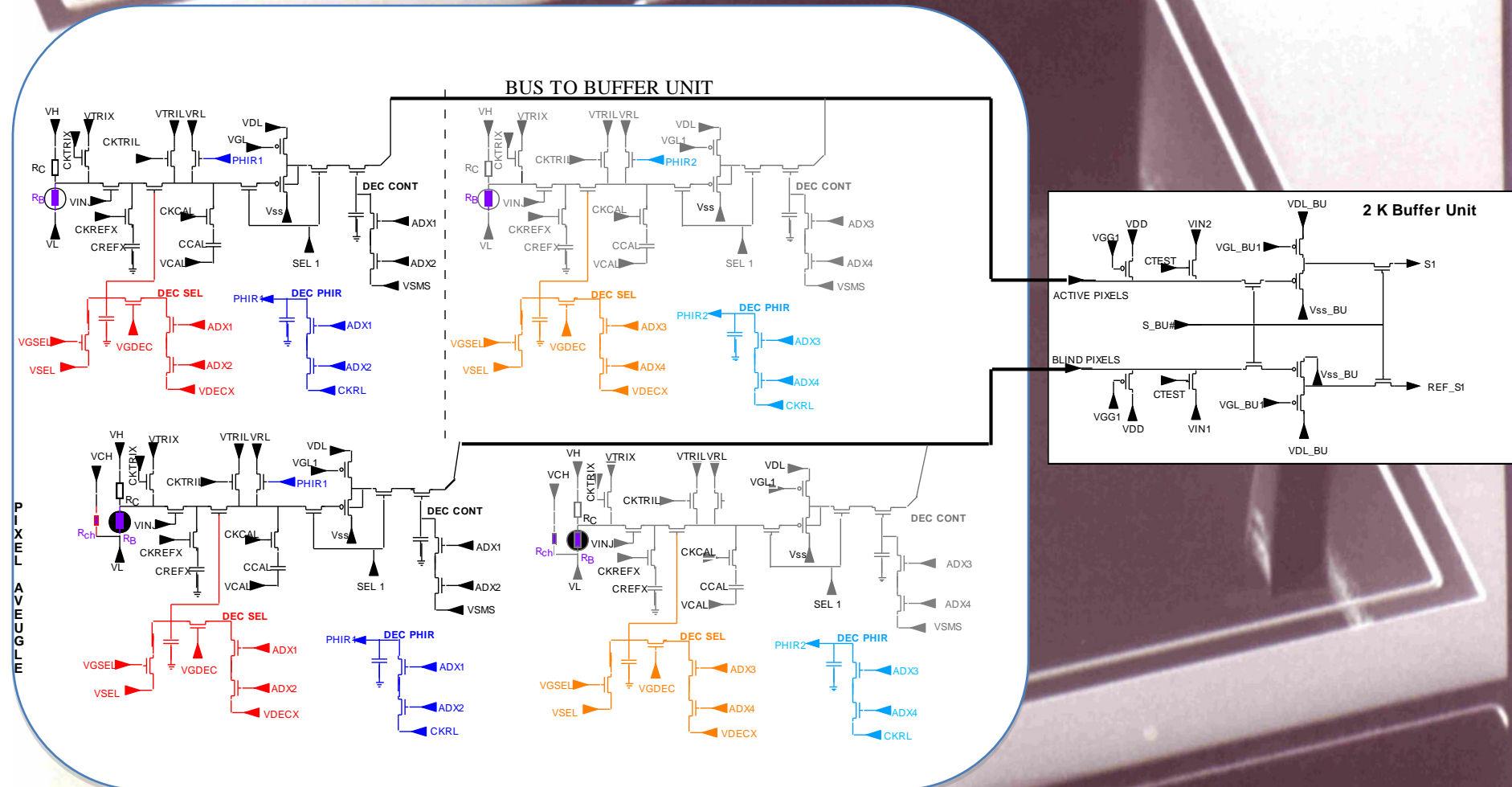
- Et de pratiquer le DCS

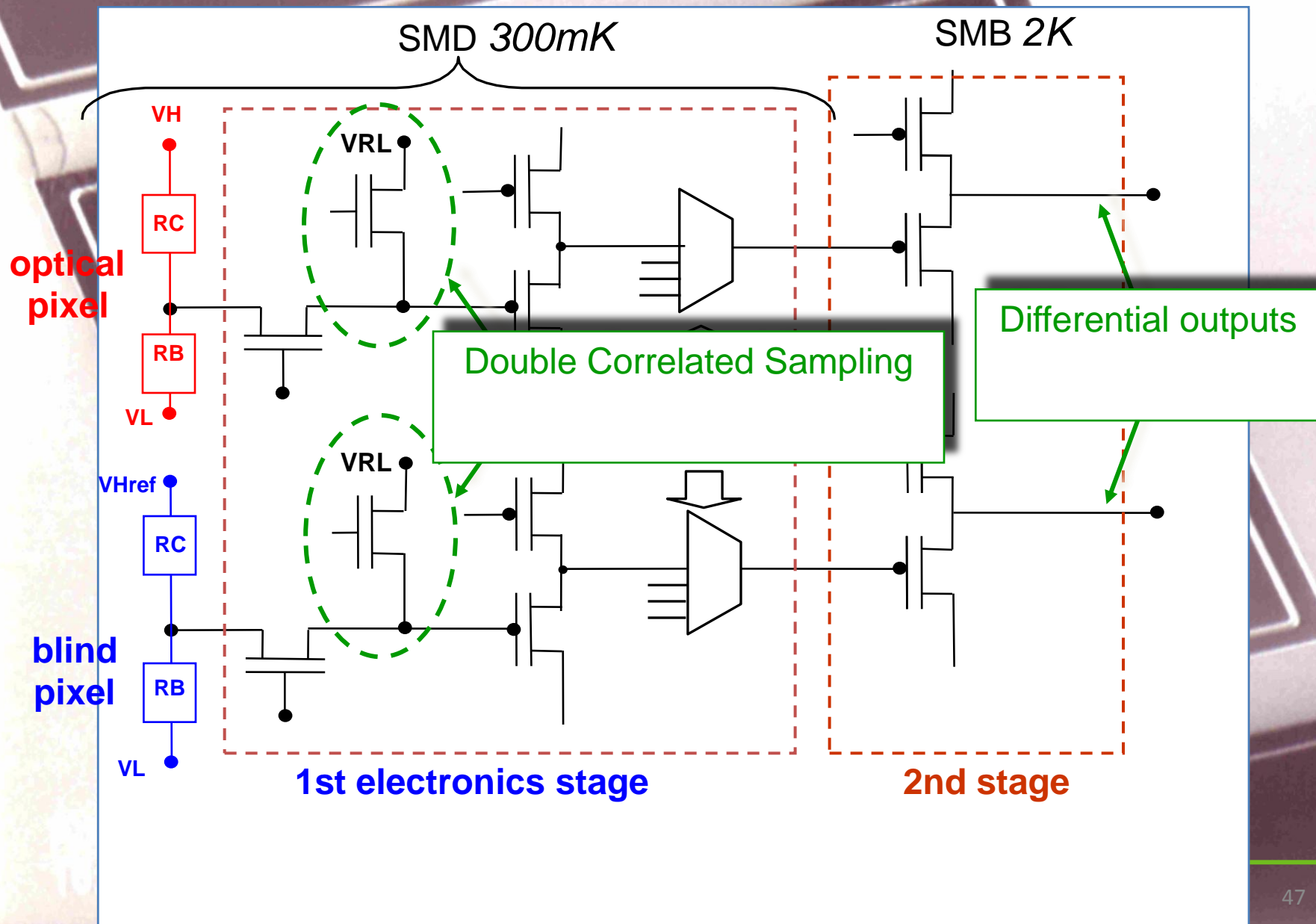
- La bande passante électrique du détecteur est multipliée par le facteur de multiplexage dans le CL.
- Implication sur le bruit de lecture.



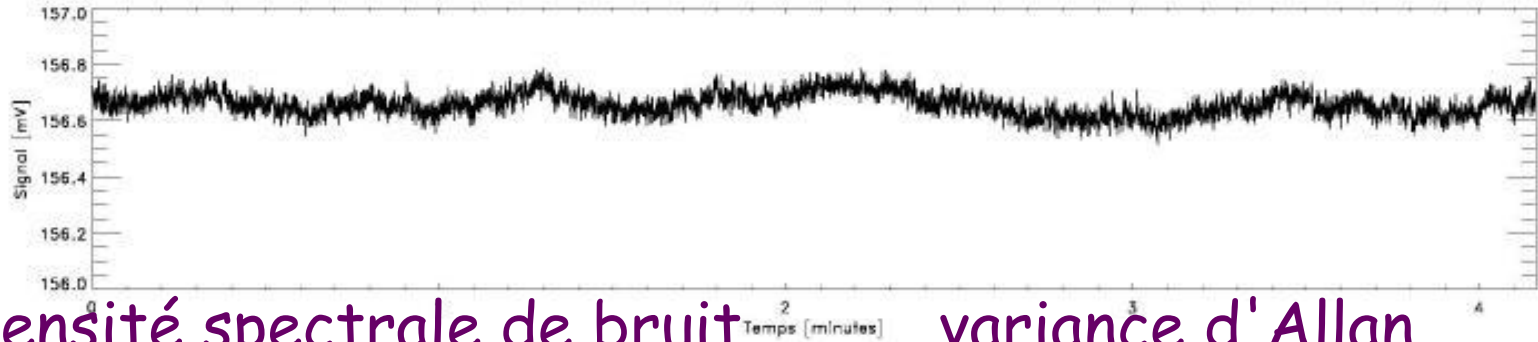
En pratique...

... c'est compliqué





- Le signal temporel (40 Hz)



- Densité spectrale de bruit variance d'Allan

- La NEP se cache ici !

- **Le bruit de Photons:** nature granulaire de la lumière.
Dans le sub mm => correction de Bose nécessaire!

C'est la référence de bruit de nos mesures :
lié à la puissance qui "tombe" sur le détecteur.

Les bruits thermiques

- **Le bruit Johnson:** générés dans les résistances fluctuation en tension et en courant
- **Le bruit de Phonons:** nature granulaire de la chaleur.

Les bruits électroniques

- **Le bruit de lecture:** toute la chaîne électronique va dégrader votre signal: importance du 1^{er} étage de lecture .
- **Le bruit de digitalisation:** la nature discrète des acquisitions peut aussi générer du bruit sur le signal.

et le bruit **1/f...**

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μm
10.0 kV 0.0 00X 10.0 FIRST

- La NEP (Puissance équivalente de Bruit)

- La NEP Johnson

$$NEP_{john} = \sqrt{4kRT} / S$$

- La NEP Phonon

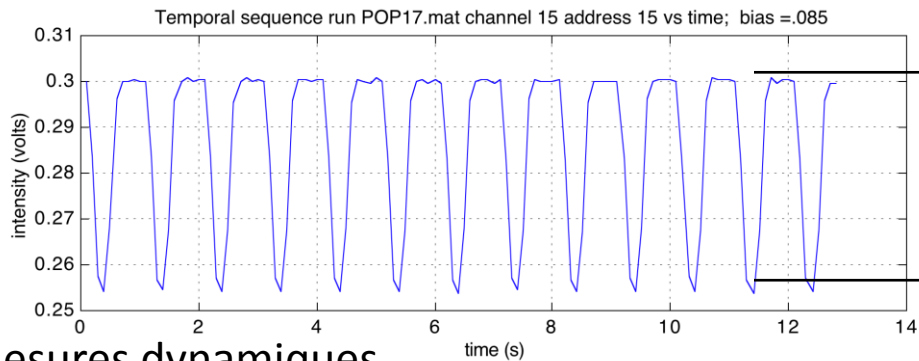
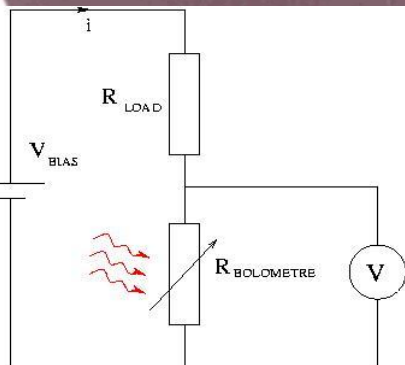
$$NEP_{phon} = \sqrt{4kGT^2}$$

10.0 kV Spot Magn WD |-----| 200 μm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

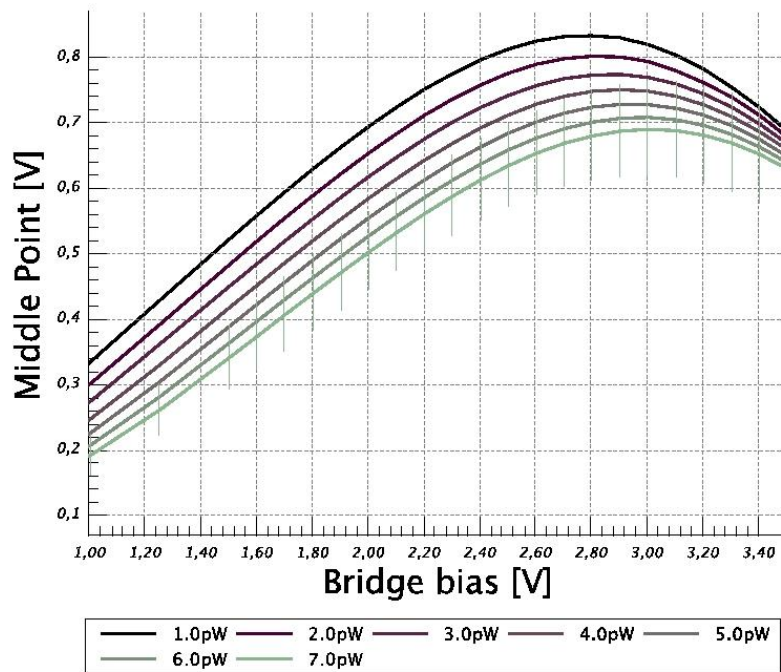
Le bolomètre par l'illustration...

10.0 kV Spot Magn WD |-----| 200 μm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

Les mesures effectuées



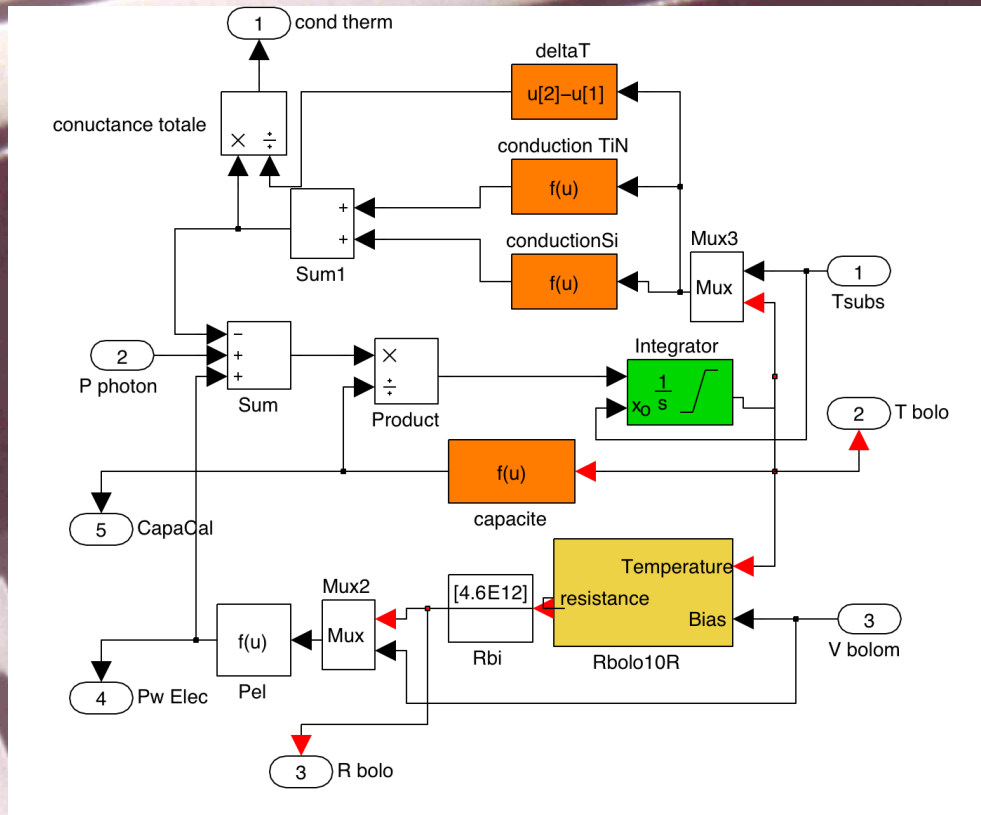
Mesures dynamiques



Cold electronics dynamic range
Warm electronics dynamic range

- Mesures statiques

- Le modèle numérique utilisé



Dans les exemples ci-après, Pour un flux donné on fait varier la polarisation aux bornes du détecteur.

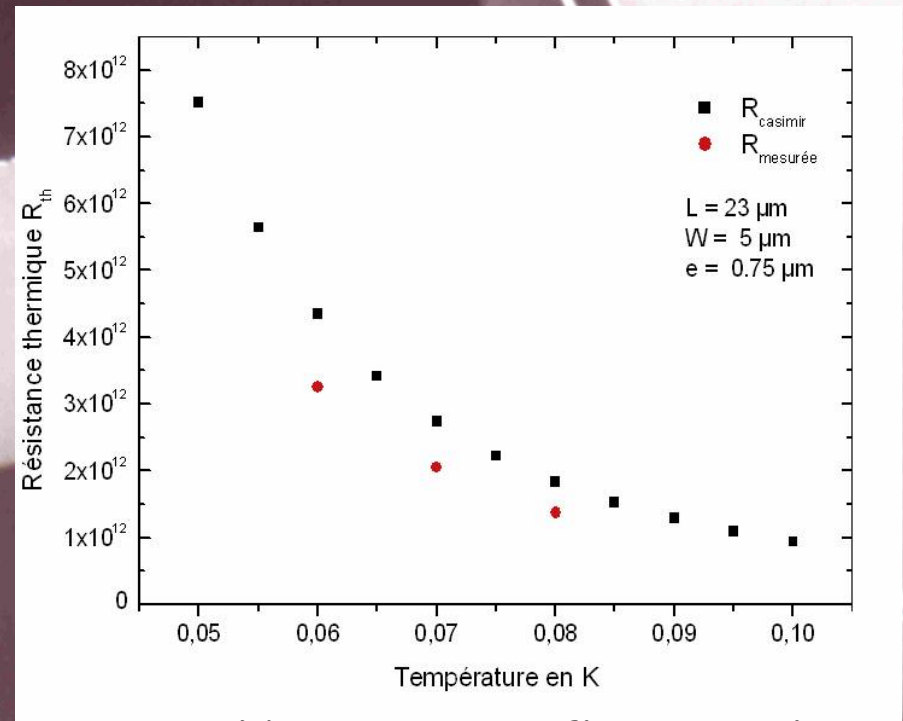
- Mais avant de commencer il faut....

- La résistance thermique : la loi de Casimir.

$$R = \frac{1}{5.10^{-9}} * T^{-3} * P * \frac{L}{Sec^2}$$

All lengths in μm

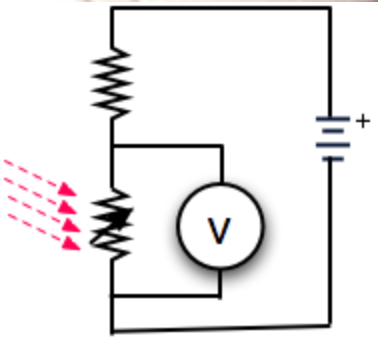
Pour le Si cristallin vérifiée jusqu'à 50 mK →



Crédit Virginie Szeflinsky Saclay

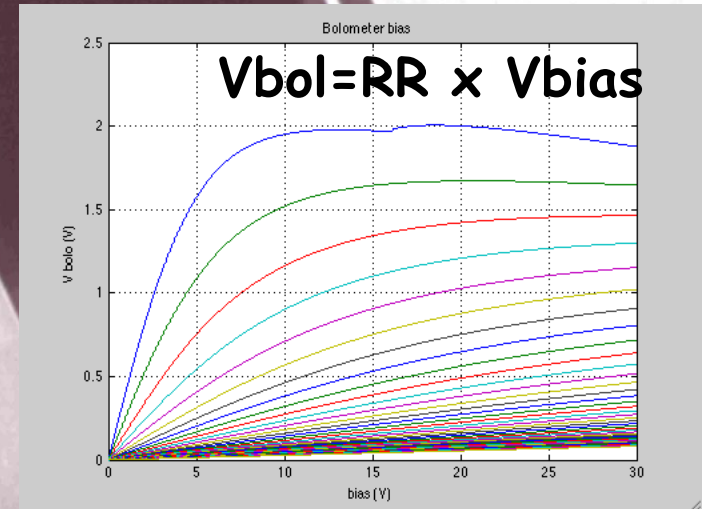
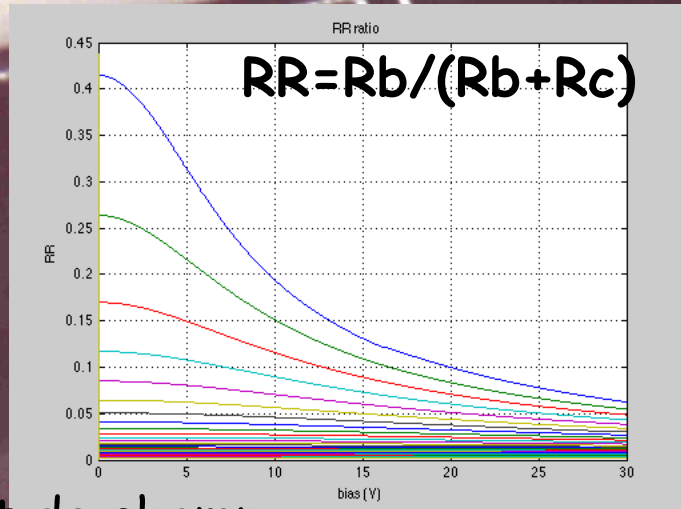
Les capacités calorifiques sont déduites des mêmes types de mesures.

- Une résistance thermométrique et une résistance de charge sans effet de champ.

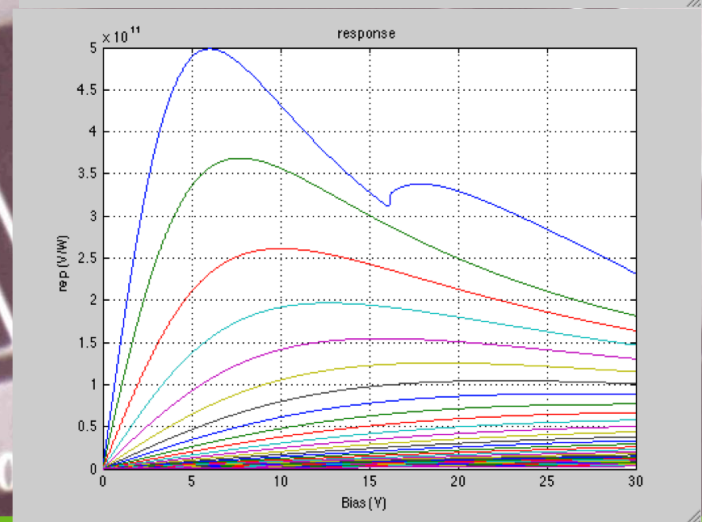


$$R_c = Cte$$

$R_b = \text{sans effet de champ.}$

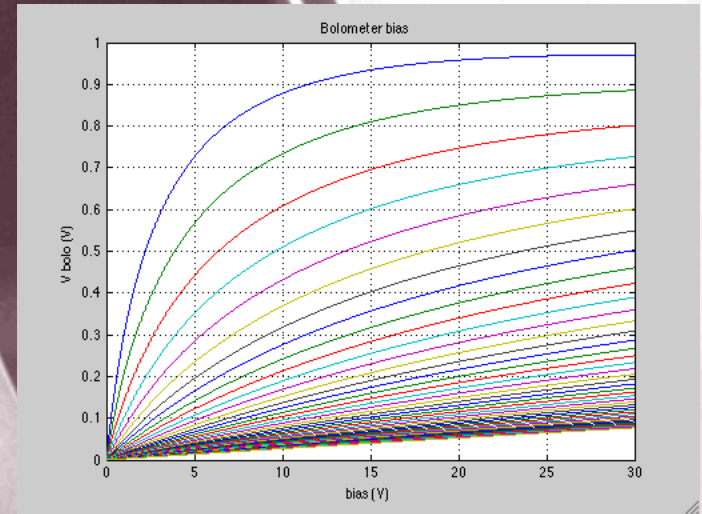
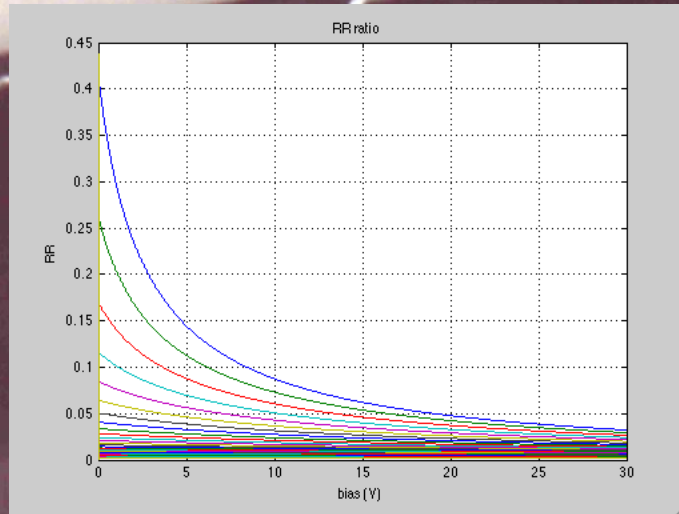
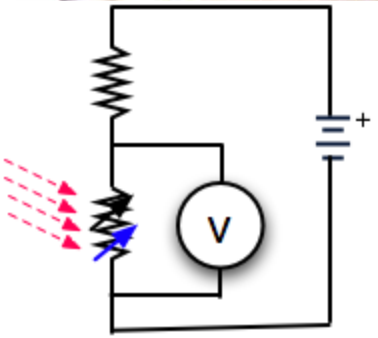


- Chaque courbe représente une puissance optique incidente :
0, 1, 2, 3...40 pW/pixel en fonction de la tension de polarisation du pont bolométrique.



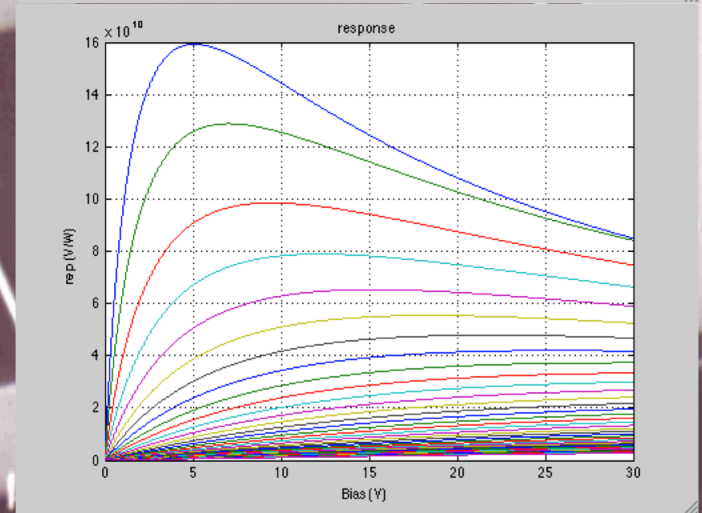
L'effet du champ E

- Que se passe t-il si le senseur sur le pixel subit l'effet de champ.



- $R_c = Cte$
- $R_b = \text{avec effet de champ.}$

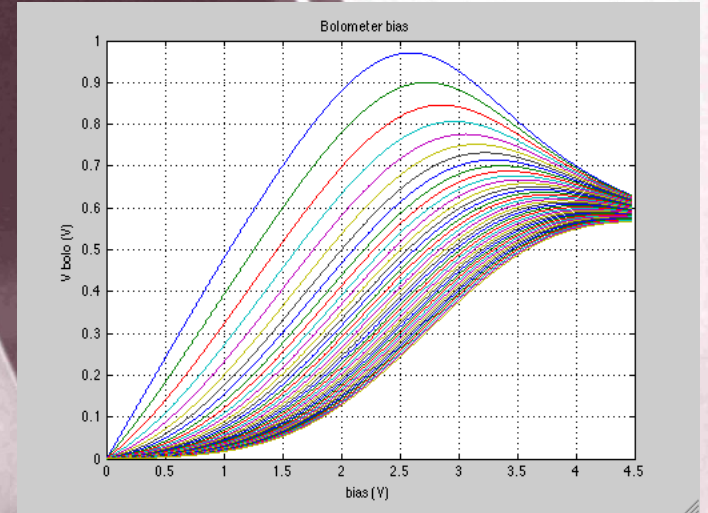
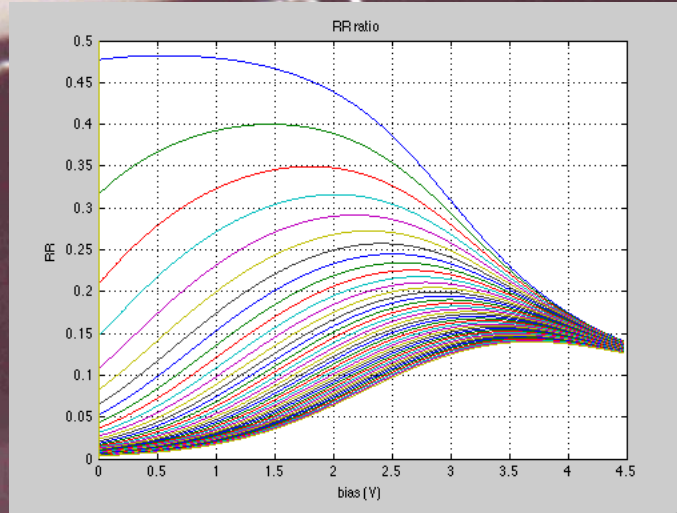
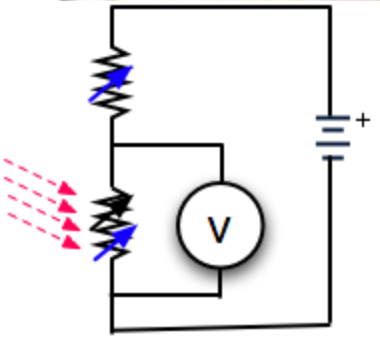
L'effet de champ diminue les performances du détecteur sans effet de champ.



Un bolomètre à effet de Champ généralisé

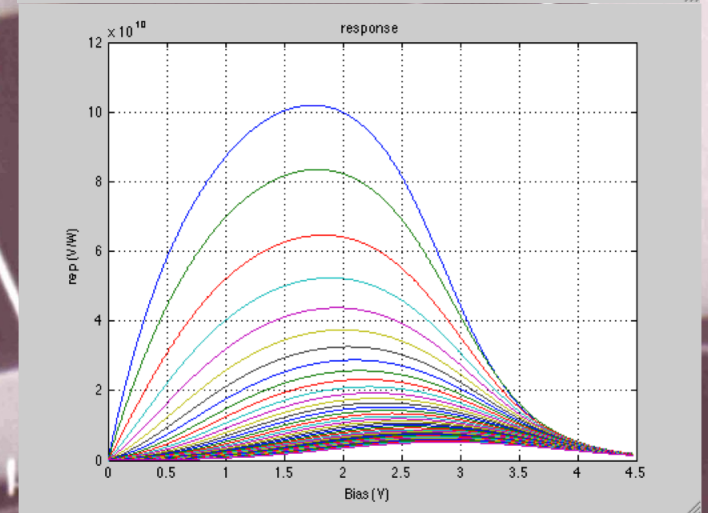
Bolomètres résistifs

- Que se passe t-il si le senseur sur le pixel et la résistance de charge subissent tous les deux l'effet de champ.



- R_c = avec effet de champ
- R_b = avec effet de champ.

Un feedback electro-thermique est mis en route et le bolomètre déploie toute sa gamme de fonctionnement dans 1/10 de la gamme de polar initiale !



- Les performances du détecteur peuvent être ajustées par la température d'utilisation.
- La résistance thermique décroît comme le cube de la température.
- Le bruit Johnson diminue quand on diminue la température.
- Idem pour le bruit Thermique en T^2 mais également du fait de la diminution de G .
- Il suffit donc de refroidir un détecteur, pour le rendre plus performant ?
- Non car la résistance croît démesurément quand on diminue $T \Rightarrow$ bande passante du détecteur diminue.
- Il faut donc doper le thermomètre pour une température d'utilisation donnée.

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μ m
10.0 kV 0.0 00x 10.8 FIRST

- Contrairement à l'idée généralement admise par les non spécialistes un bolomètre **donné** n'est un détecteur universel que dans son principe de fonctionnement !
- En pratique c'est un détecteur spécialisé
 - En longueur d'onde de détection,
 - En température de fonctionnement,
 - En puissance détectée.

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μm
10.0 kV 0.0 00x 10.8 FIRST

- ...peuvent ils être utilisés pour la très haute sensibilité ?.
- Sur le papier "**Oui**" en combinant au niveau système de détection les bons paramètres de G et de dopage on peut atteindre même avec la géométrie des détecteurs de PACS qqes 10^{-19} à 50 mK

10.0 kV Spot Magn WD | 200 μm
10.0 kV 0.0 00X 10.8 FIRST

