

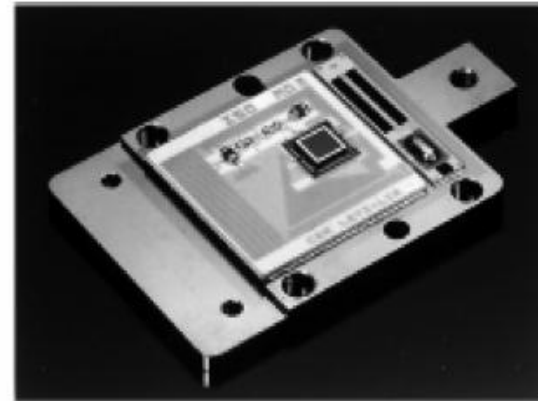
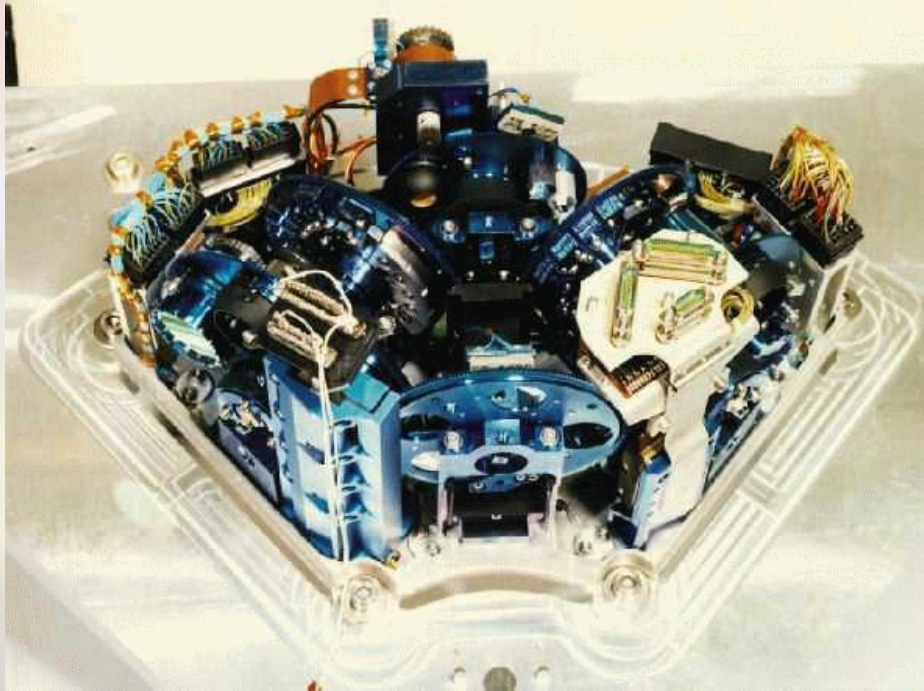
Le bolomètre résistif vu par..

Révision 1

L. Rodriguez
CEA/DSM/IRFU/SAP



La suite du programme initié pour ISO.



LW 4-17 μ
32x32 100 μ x100 μ
Si:Ga DRO
LETI-LIR/SAp
R.N. 180 e⁻
T=3.8K

• 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
(surtout à

Quand on dit
bolomètre
partiel.

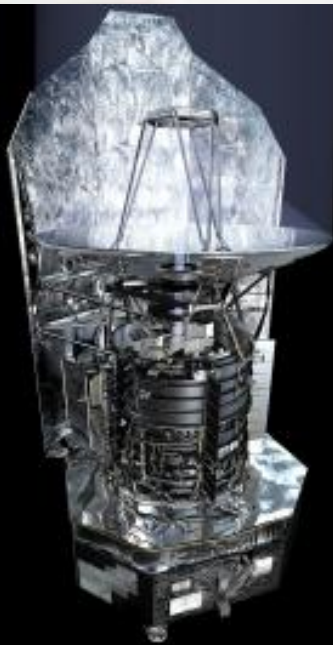
C'est ce pat
faire sent



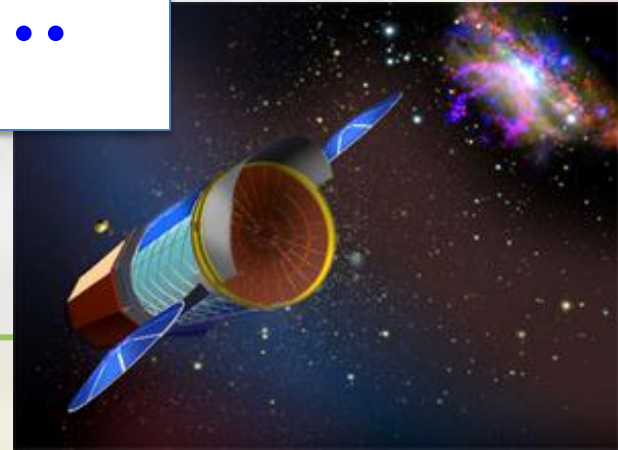
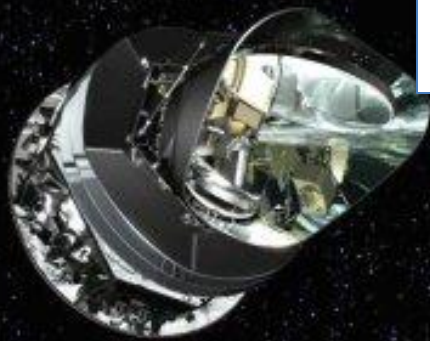
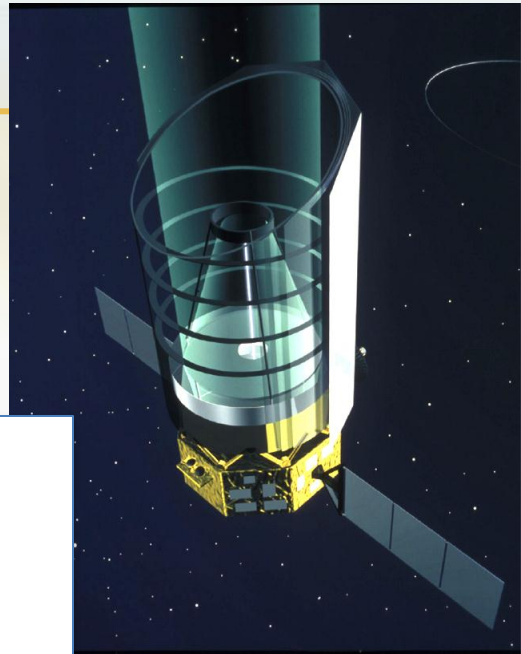
5 aspects

aborde le
est forcément

er de vous



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



2 grands domaines

- Dans le domaine des rayons X

⇒ micro-calorimètres

mesure de l'énergie des photons à l'unité

traité plus tard par JL Sauvageot

- Dans le domaine sub & millimétrique

⇒ Bolomètres (détecteurs quadratiques)

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

Pour des photons de faible énergie pas d'équivalent en détecteurs quantiques.



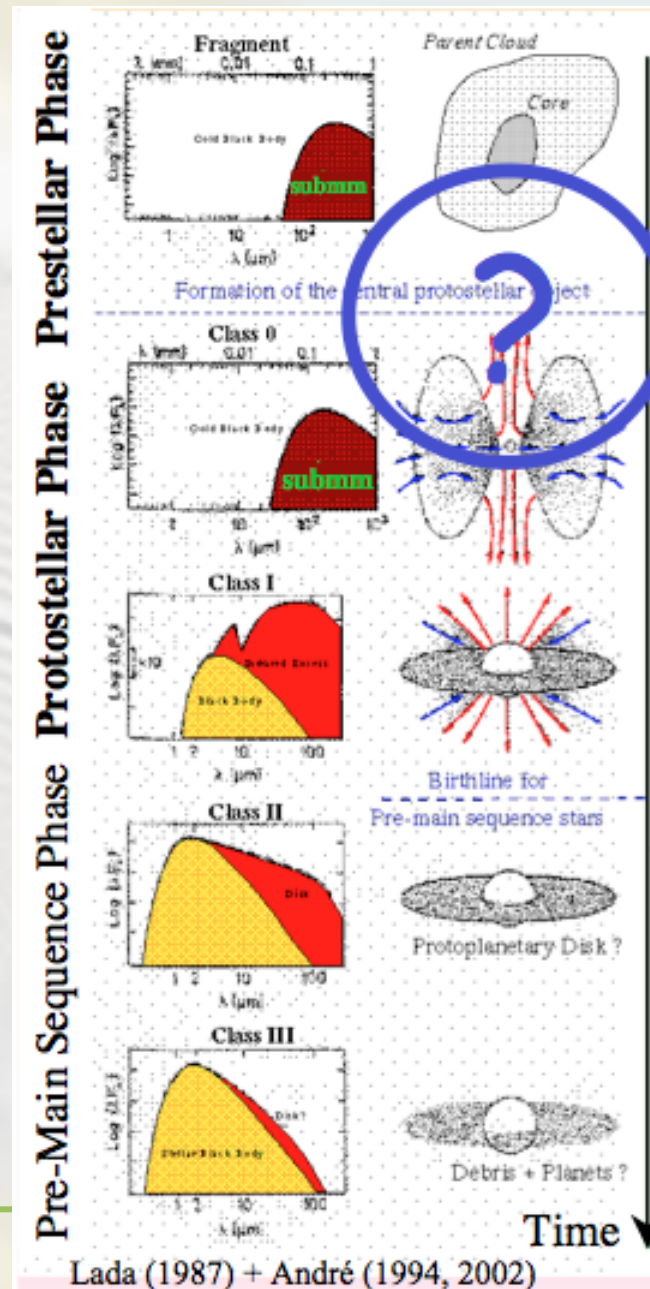
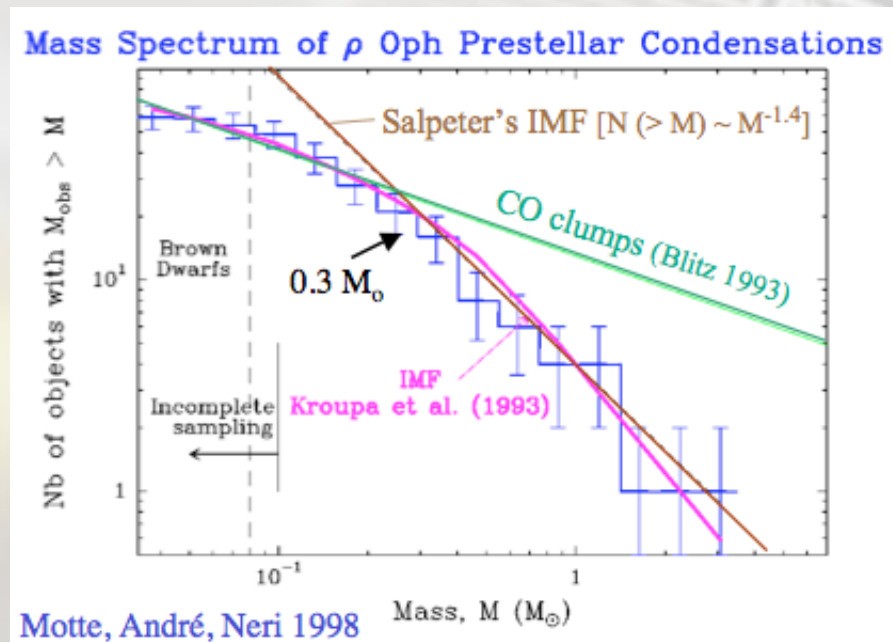
Les conditions aux limites:

La science/
la technologie

2 grands Thèmes

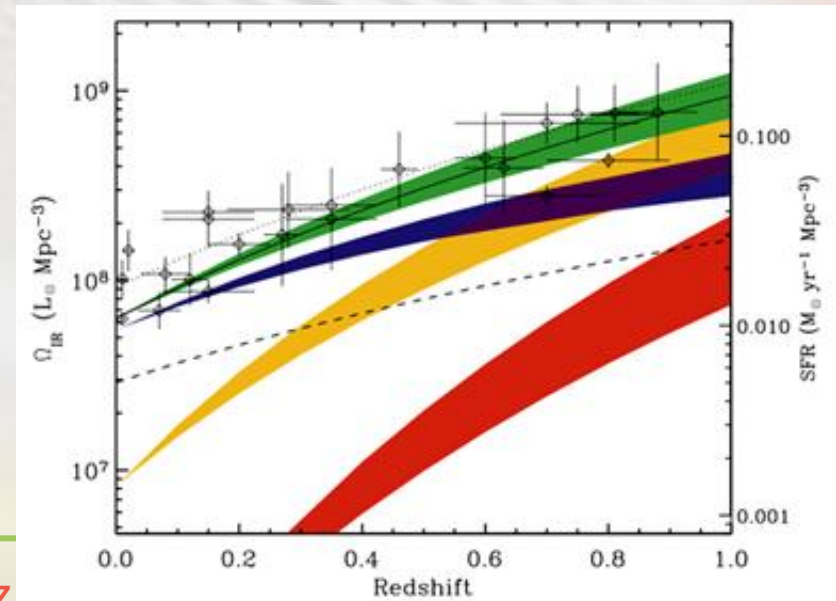
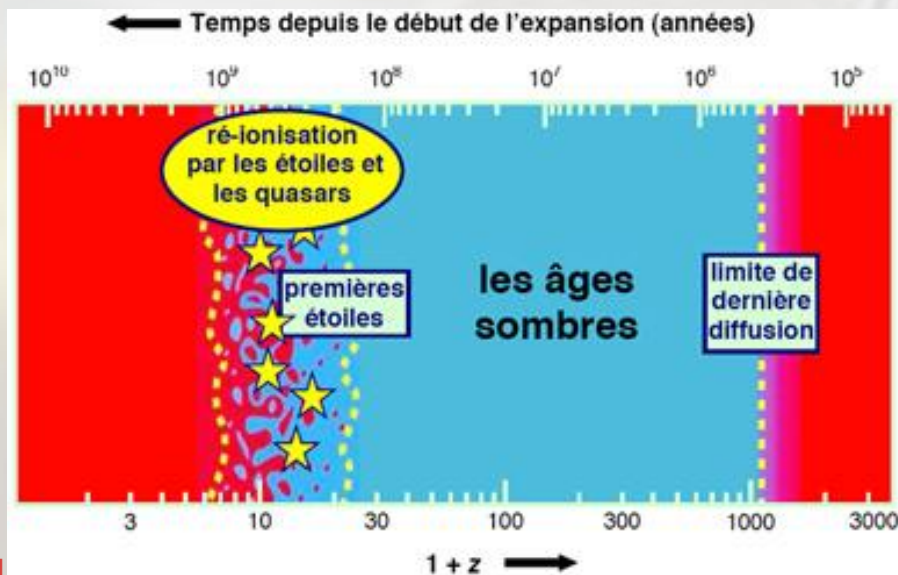
La formation des étoiles à partir de la matière de l'ISM

Tiré de P André 2007



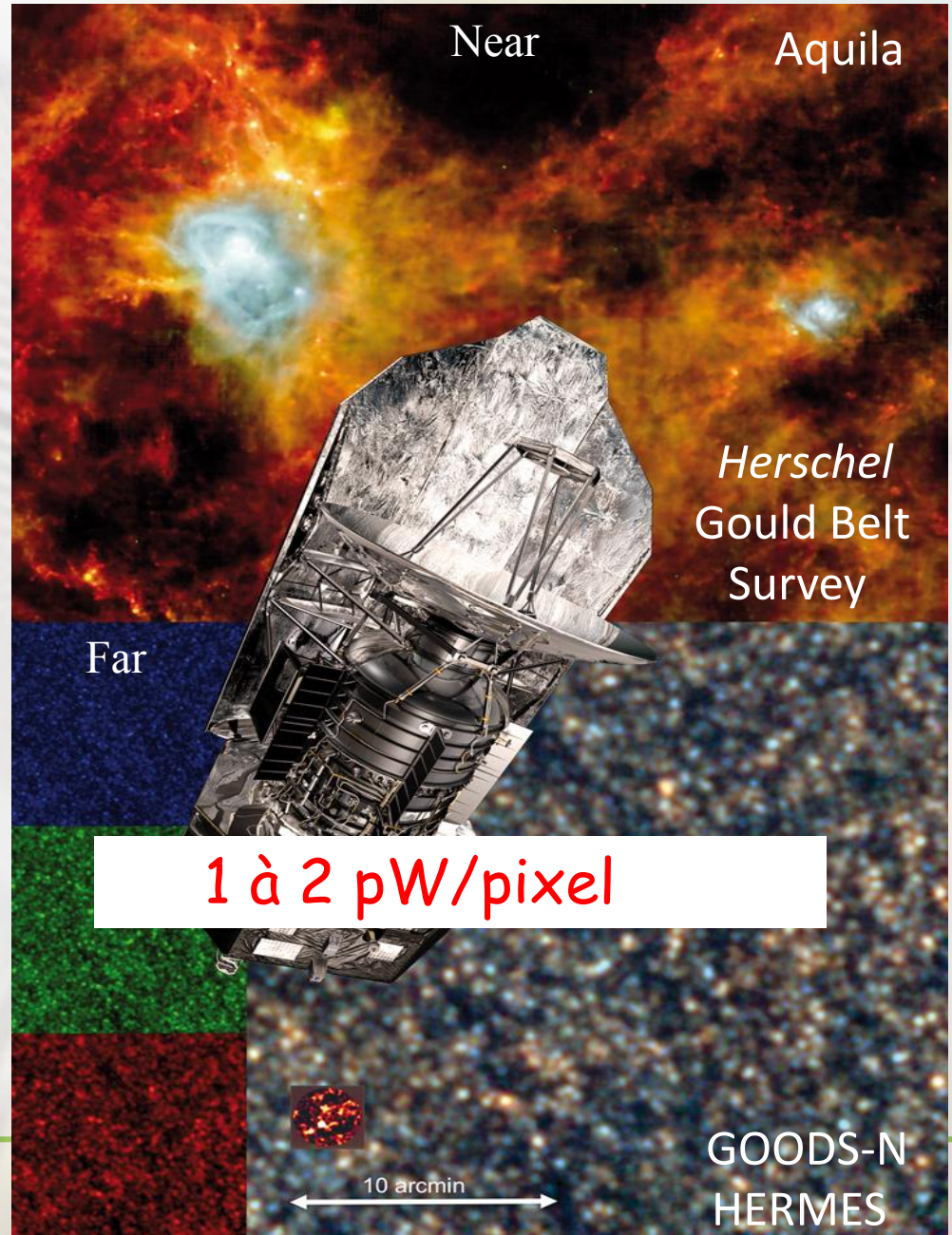
L'évolution de la matière au cours de l'histoire de l'Univers

Le moteur de l'évolution des galaxies est la formation des étoiles. Herschel va nous permettre de mesurer sans ambiguïté la quantité d'étoiles qui se forment dans l'univers à chaque instant de son histoire, depuis il y a 10 milliards d'années jusqu'à nos jours. En mesurant comment la formation des étoiles évolue dans l'univers à chaque époque, on obtient un élément essentiel qui pourra nous amener à comprendre comment ont évolué les nuages de gaz primordiaux pour former les galaxies que l'on observe de nos jours dans toute leur diversité.



CEA L'image de l'Univers est dominée par les avant plans:

Pour Herschel les miroirs du télescope
 $R \sim 97\%$
 $T = 80 \text{ K}$



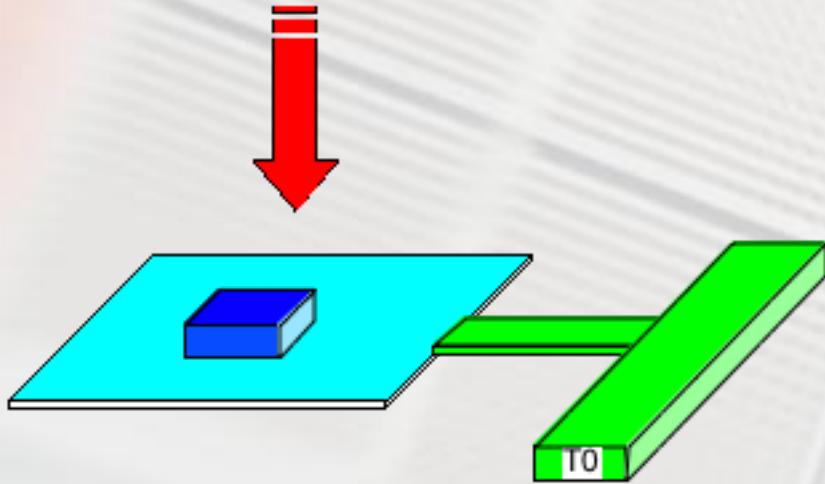


Le bolomètre vu par le thermicien...



- 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.

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.

Conductance thermique



- **Capacité calorifique** = **Chaleur spécifique** × **masse**.

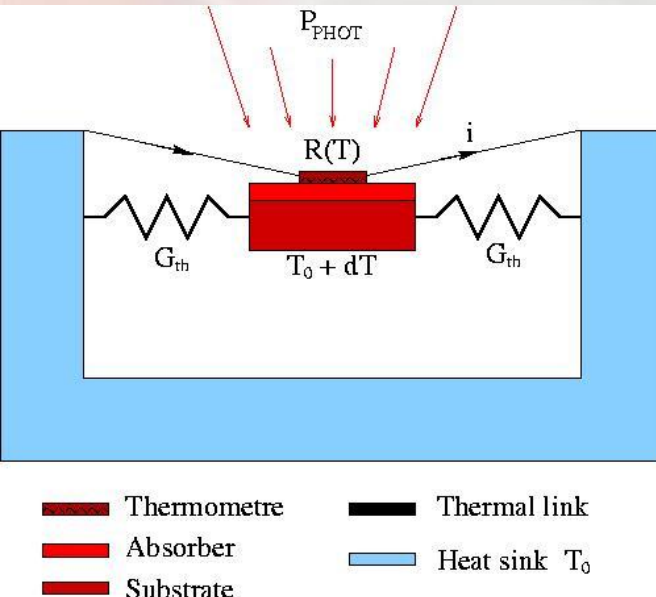
La chaleur spécifique croît avec la température

- 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** × ΔT .

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 !



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

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



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

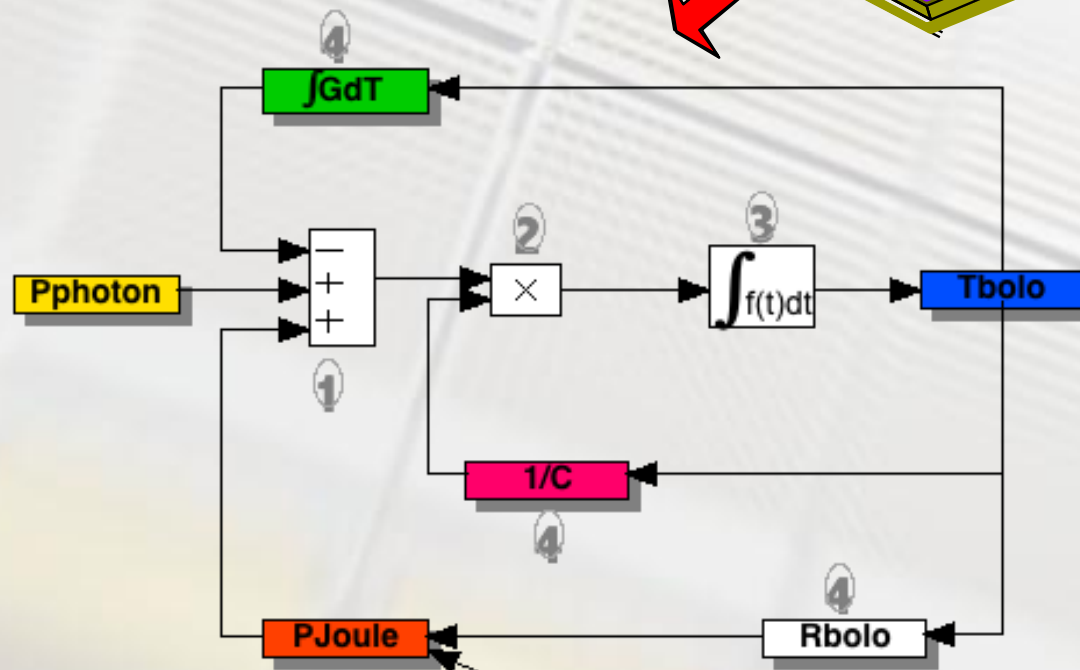
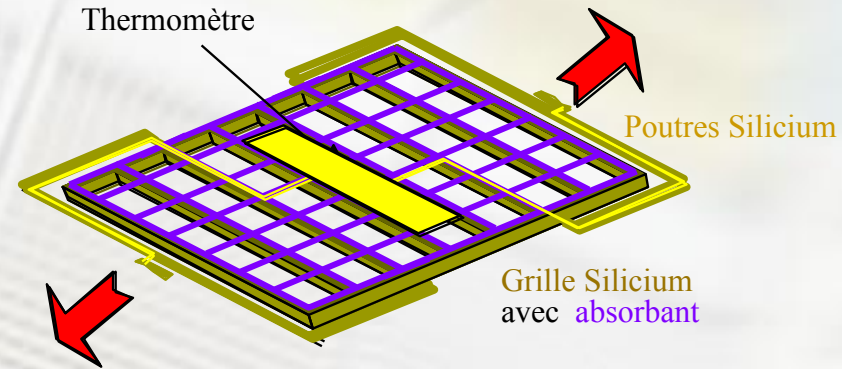
petits signaux

- **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} .

Résolution numérique de l'équation

- Pour un bolomètre soumis à un flux de photons

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





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

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

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



• 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 réagir face à un changement de flux incident. A conductance donnée, c'est elle qui détermine la "vitesse de réaction" du détecteur.

$$\tau = C/G.$$



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



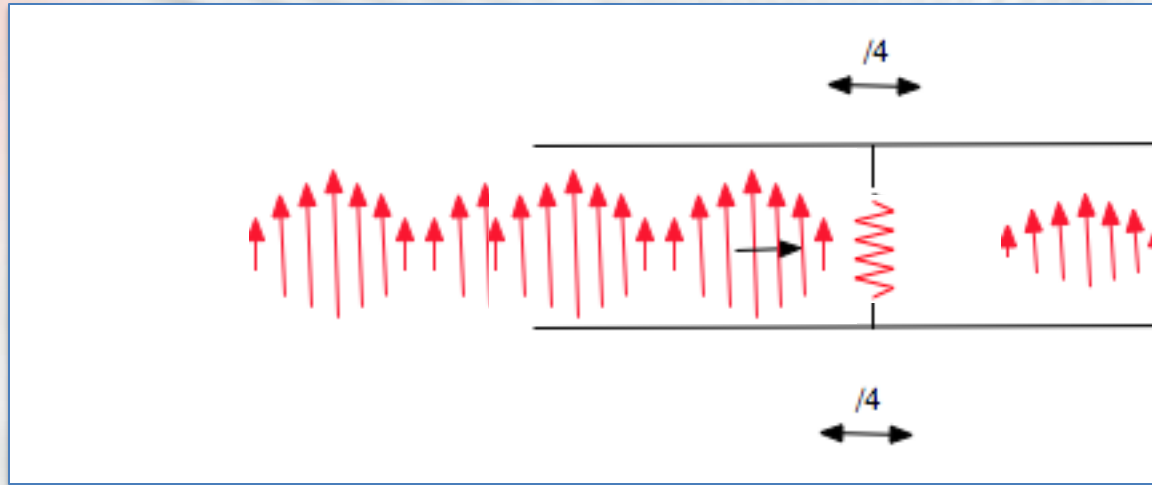
• Dans le domaine submillimétrique

⇒ 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.

- Une couche résistive optimisée (mince).



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

Multiplier les passages pour épuiser l'onde:

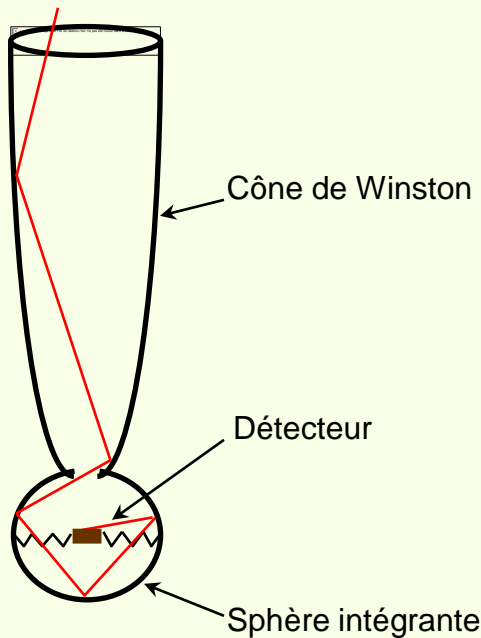
=> l'absorbeur est au centre d'une cavité intégrante.



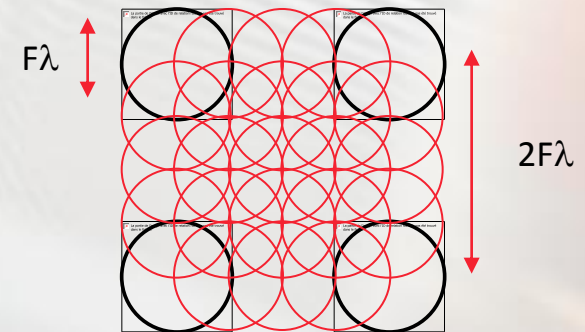
- Un concentrateur de lumière augmente la taille apparente du détecteur.

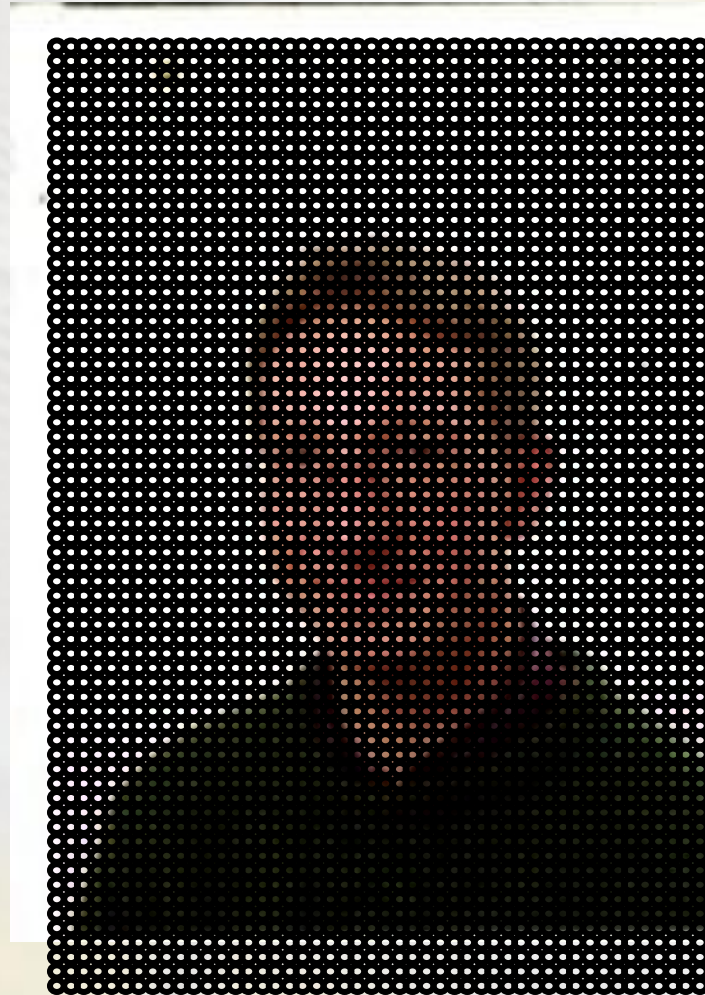
Le cône de Winston => cornet corrugué,

- 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

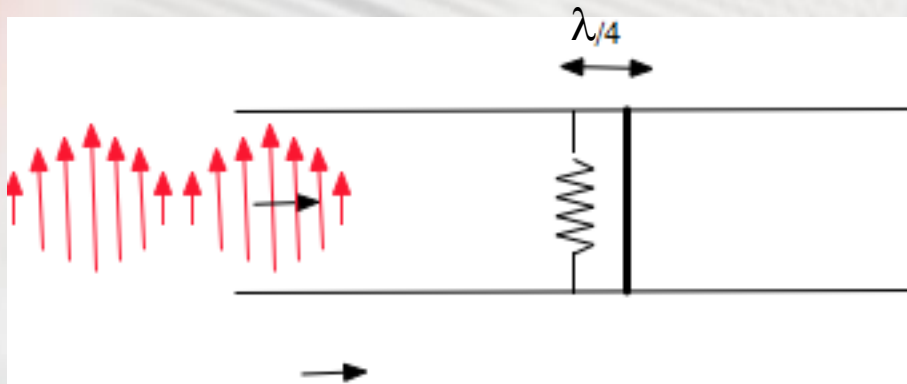




La méthode PACS

• Éliminer la composante B de l'onde.

- Méthode exposée vers 1940 par Denisson & Hadley
- En réalité cela vient de + loin: G Lippmann nobel 1908



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

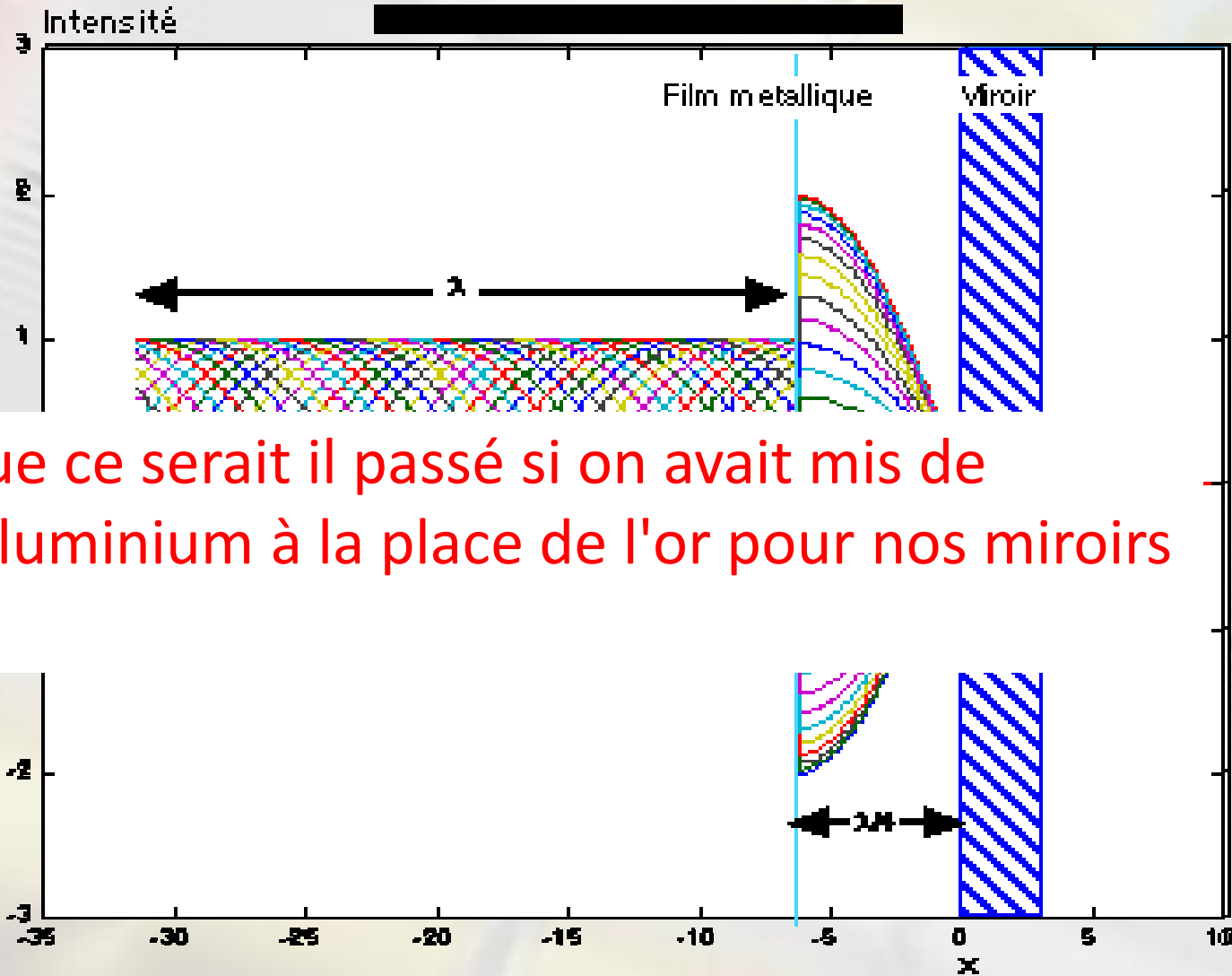
Et une onde stationnaire B dont les ventres sont à $\lambda/2, \lambda, 3\lambda/2$...

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

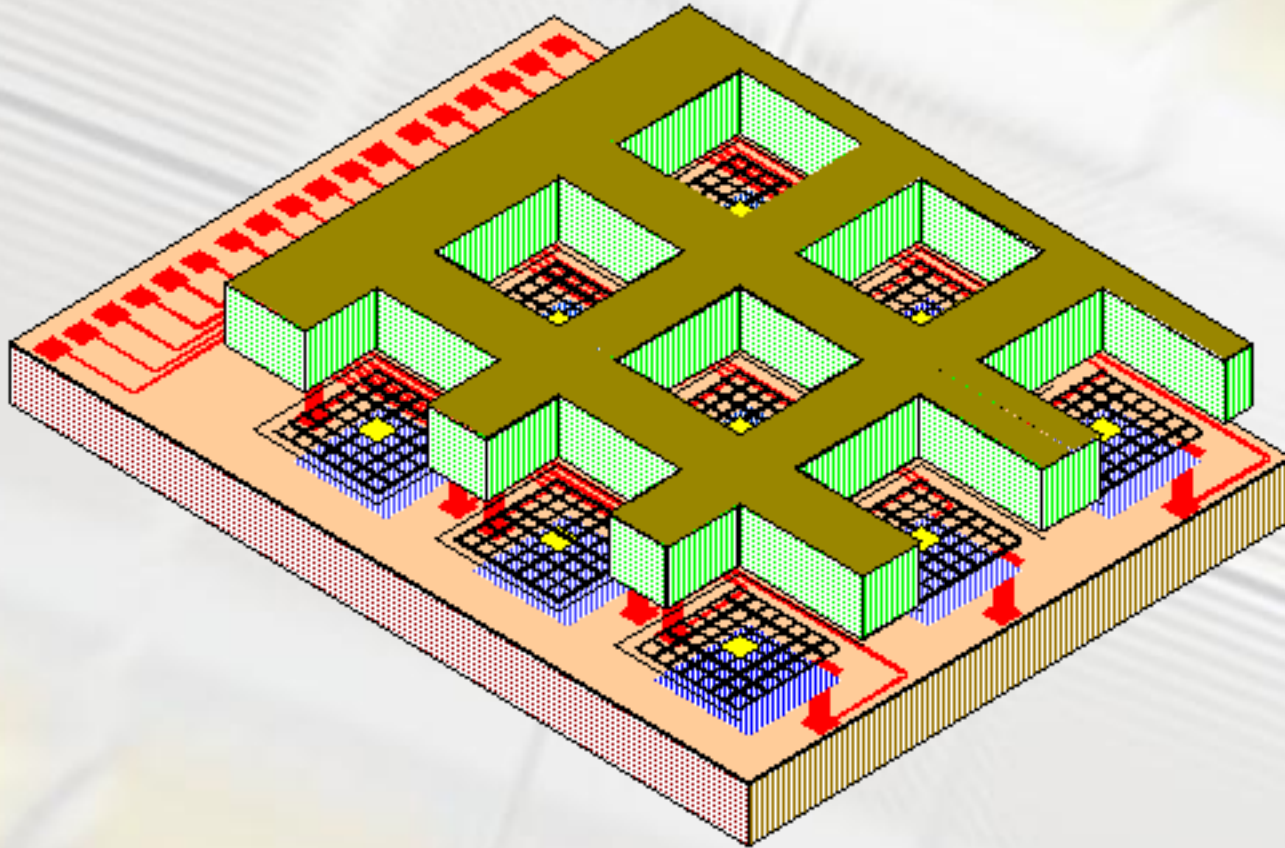
On peut absorber 100% de l'onde incidente en 1 passage !!!

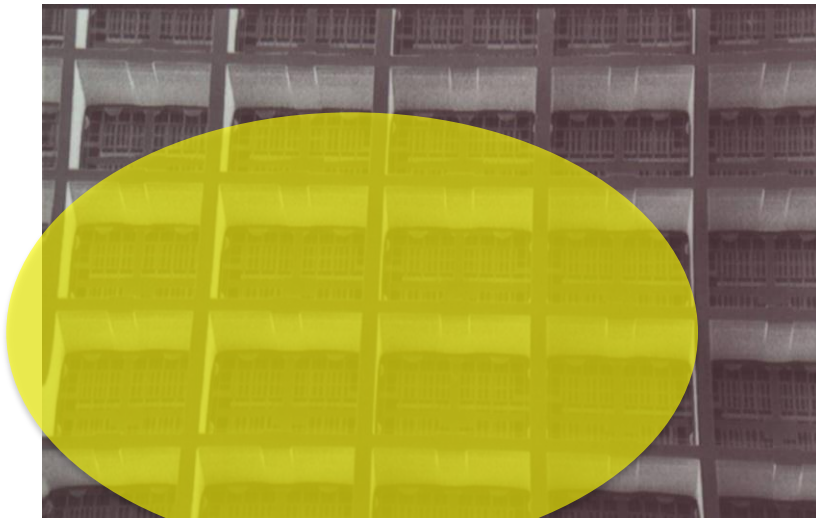
Illustration simpliste

Ondes résultantes en fct de x

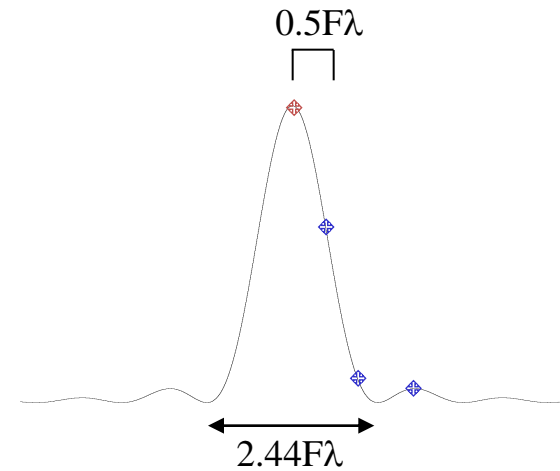


Que ce serait il passé si on avait mis de l'aluminium à la place de l'or pour nos miroirs





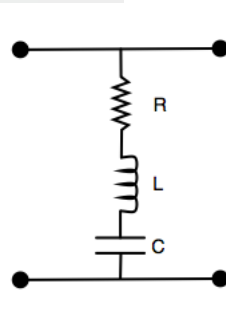
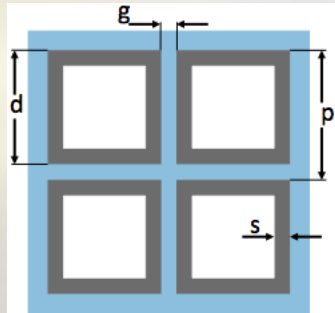
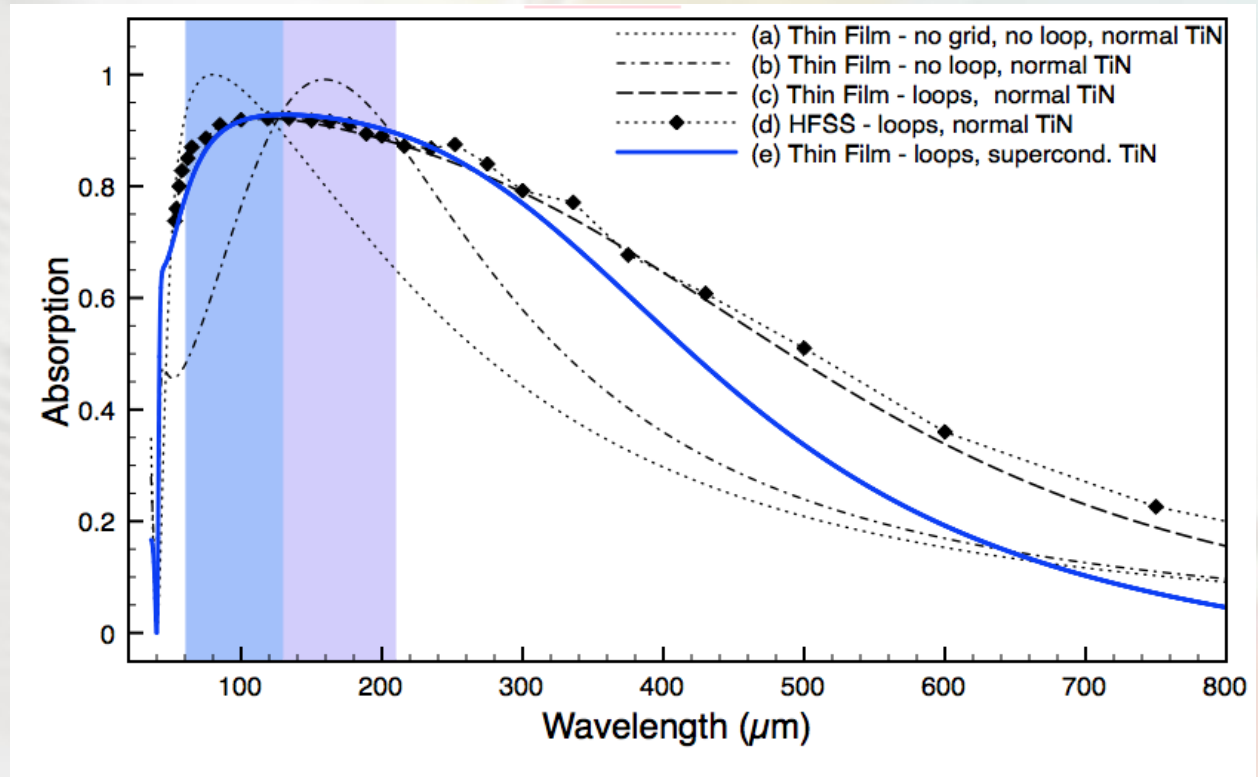
Filling factor close to 1

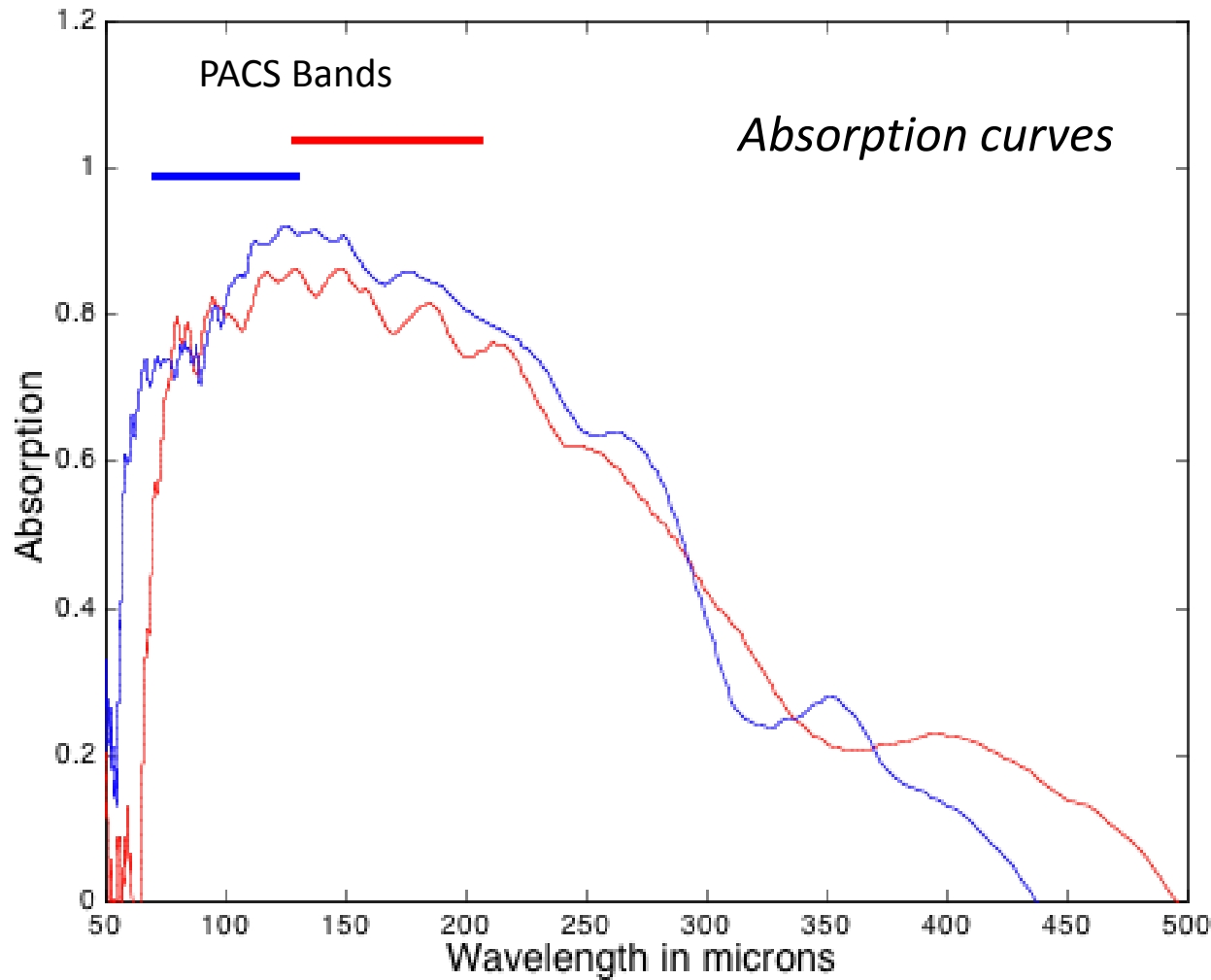


Nyquist sampling



Calculs
V Revéret 2003-2010
HFSS P Agnès 1998





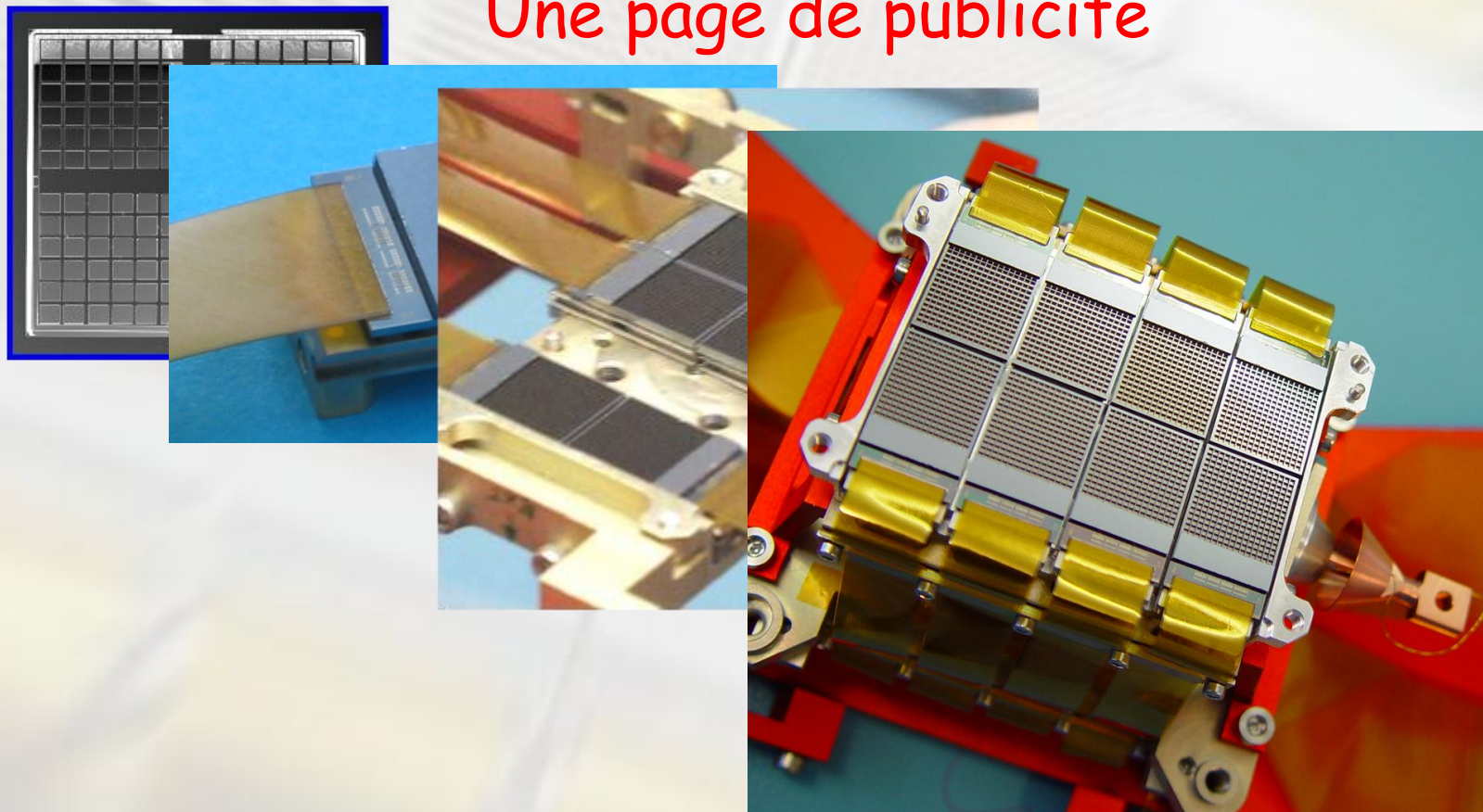
Cavité

20 μm

25 μm

Mesure
V Revéret 2003

Une page de publicité





Le bolomètre vu comme "dispositif" électrique...

• Une variation de résistance avec T

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

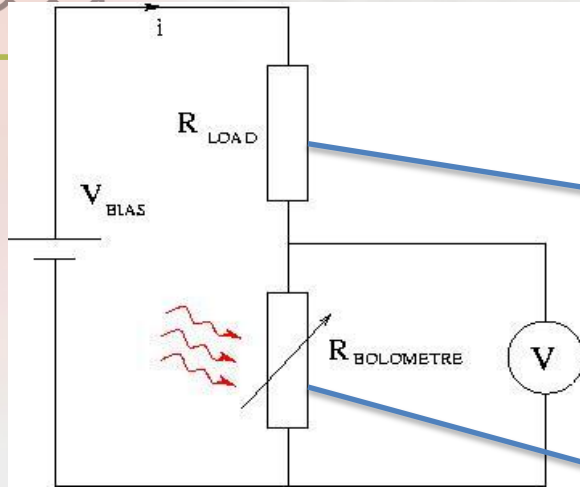
Le choix:

- 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.

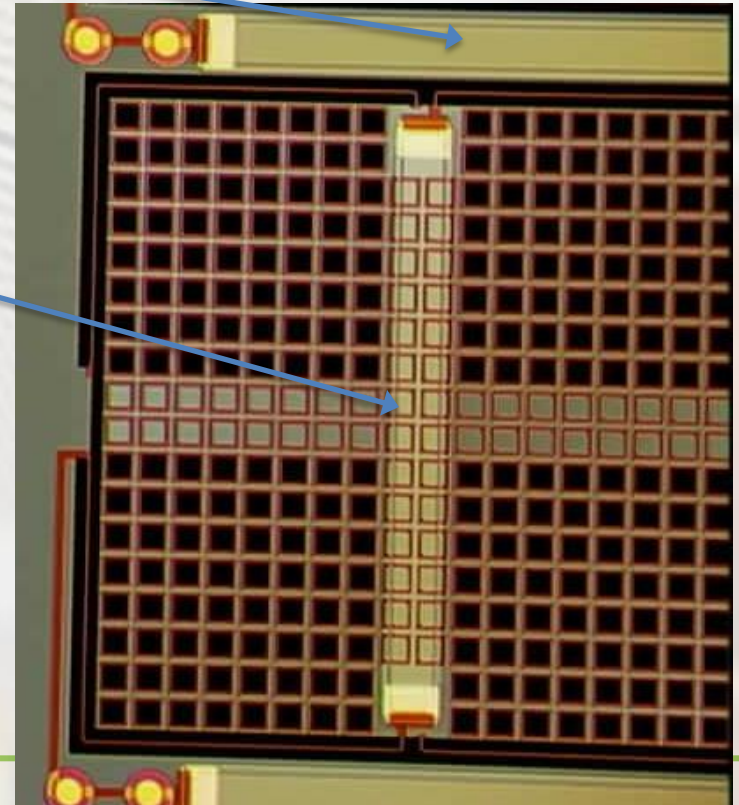
En pratique on choisit le semi conducteur ($M\Omega$: Résistif)
ou la transition supraconductrice ($m\Omega$: TES)

- pour des bolomètres individuels:

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



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



• 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.

- 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 ... **badaboum !!!**
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 ...

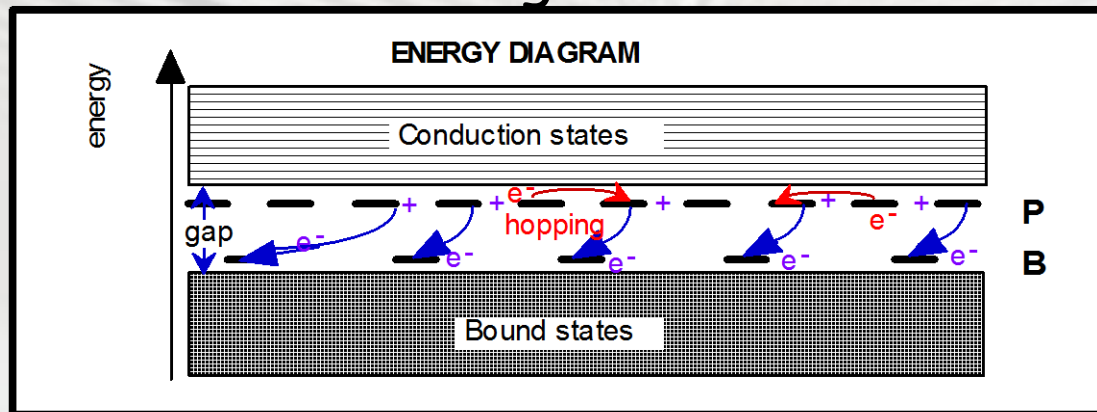
Seule solution: limiter le courant...

...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.



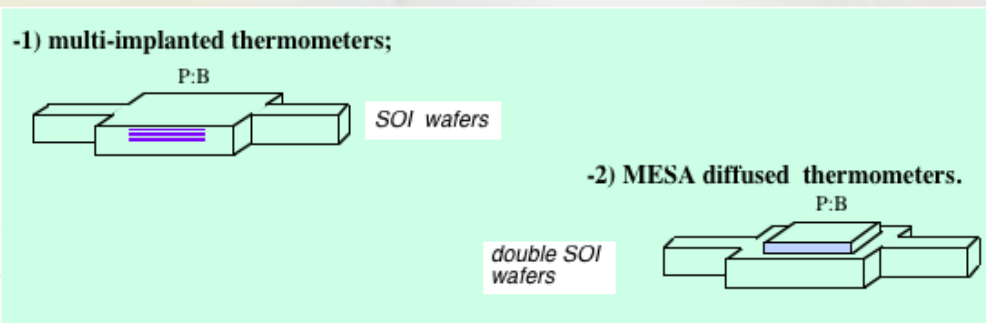
Conduction par saut aléatoire activée thermiquement. Petite asymétrie dans la direction du saut due au champ électrique de polarisation. Les états d'énergie de chacun de ces sites se combinent pour créer une "bande de conduction" où se développe le pseudo gap de Coulomb.

- Le NTD Ge:

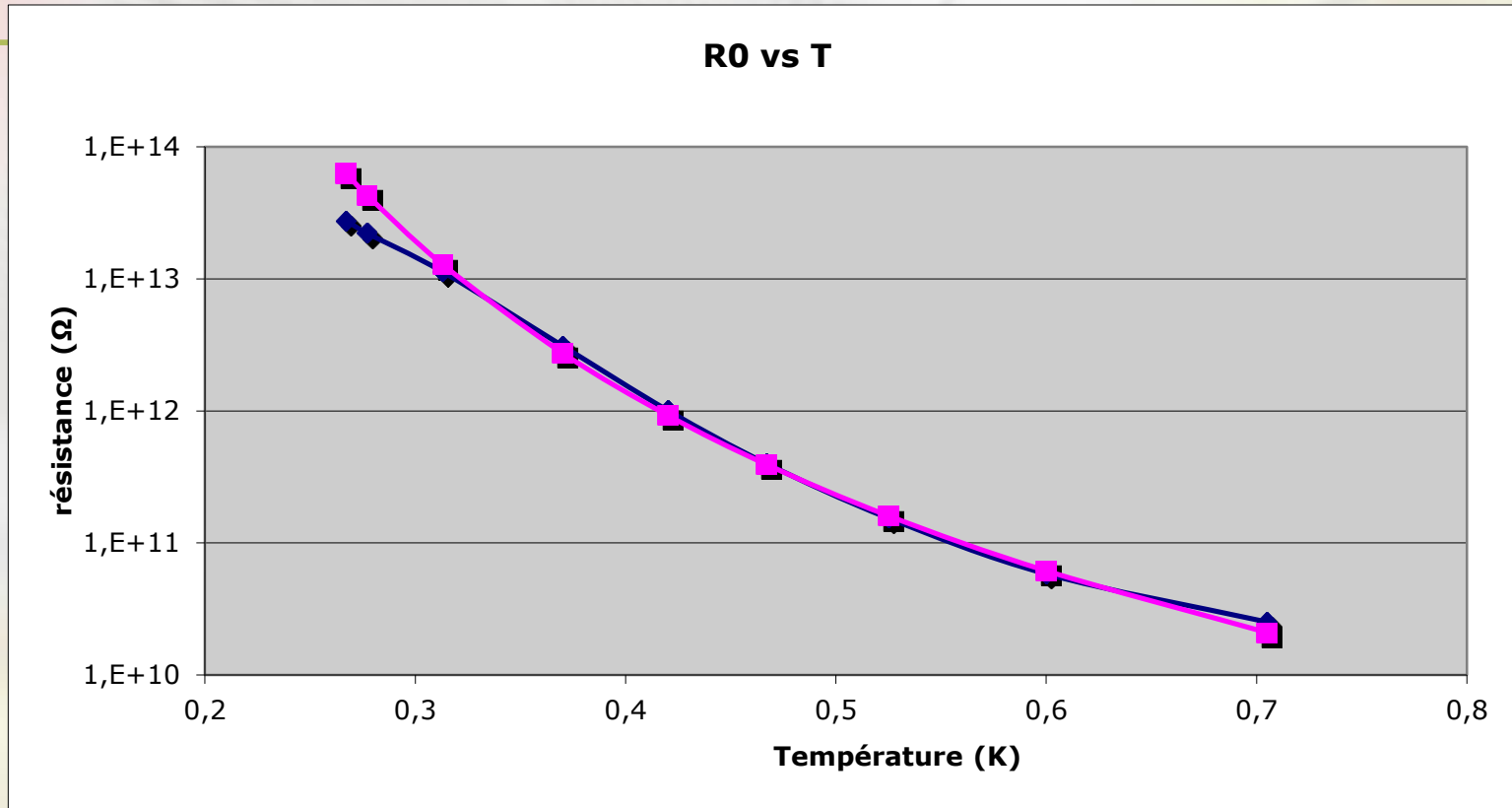
Le germanium comporte quatre isotopes (70-2 3 4) la capture neutronique produit deux espèces chimiques l'arsenic et le sélénium. Très homogène. Compensation liée aux proportions des 2 isotopes et des sections efficaces de capture neutronique.

- 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.



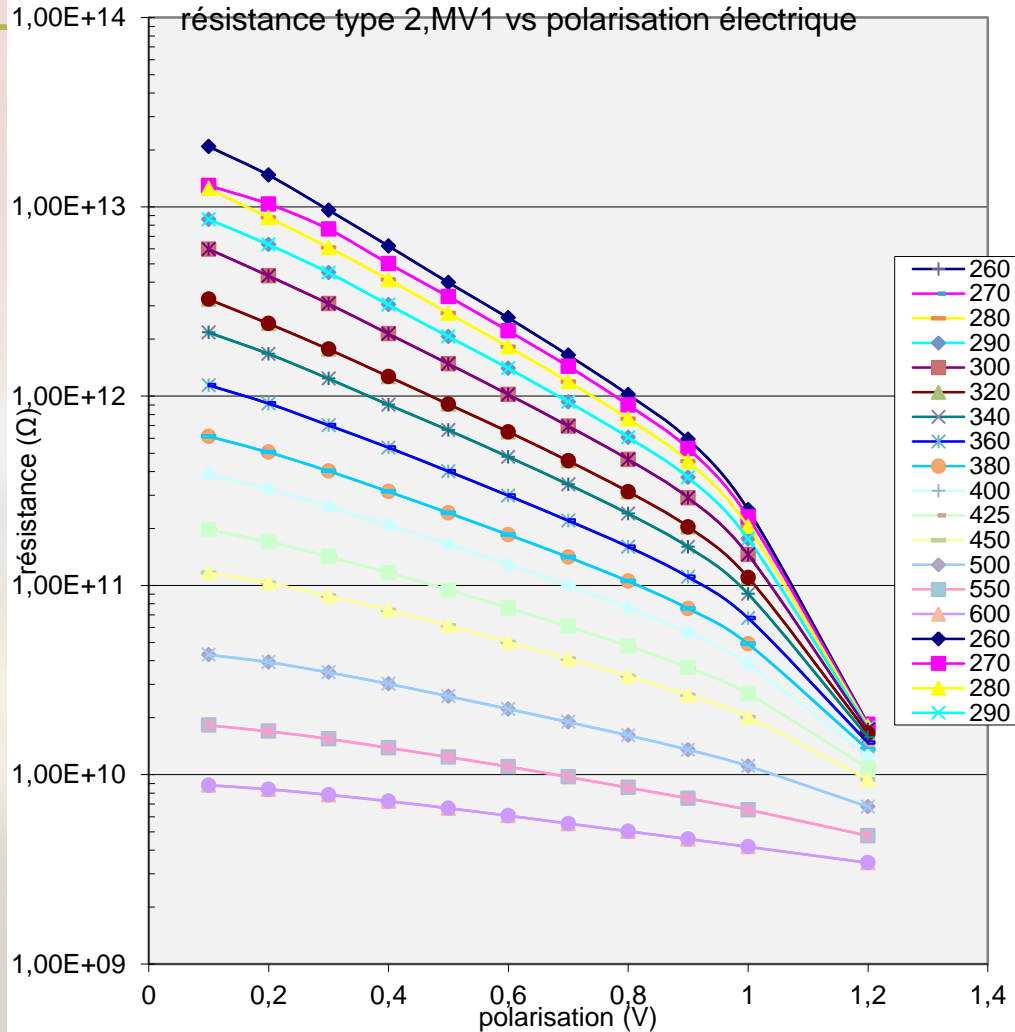
- Loi de Efros - Shklovskii en régime de champ faible



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

Exemple de dépendance en T & E

- 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

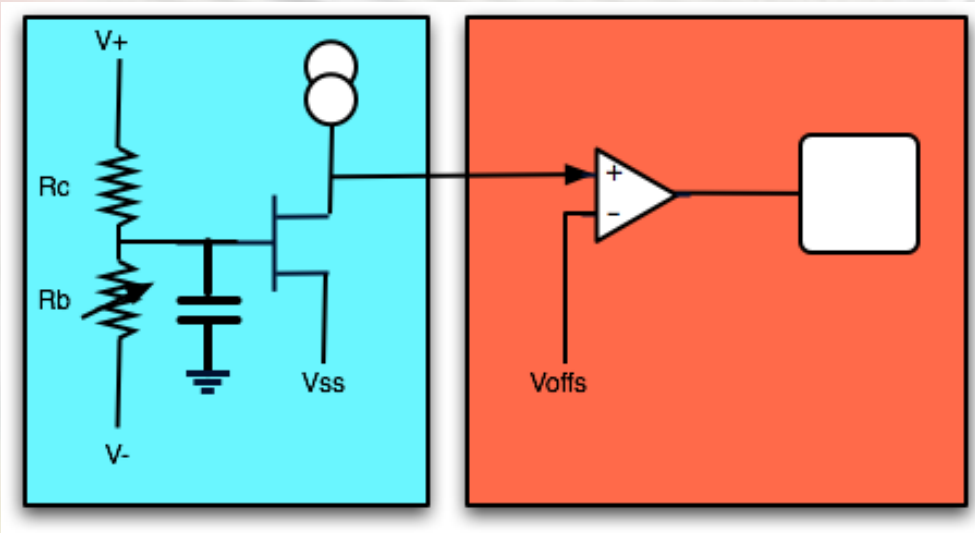


Le bolomètre vu du point de vue de l'électronicien...

Lire le signal issu du pont bolométrique.

- 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 !

Importance du bruit:

La limite à l'extraction du signal, c'est la présence de "bruits".

Certains sont intrinsèques au signal (bruit de photons) d'autres sont liés à la façon dont on détecte ces photons.

L'origine du bruit

- Le bruit de Photons: nature granulaire de la lumière.

CEA 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 $1/f...$

- La NEP (Puissance équivalente de Bruit)

- La NEP Johnson

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

- La NEP Phonon

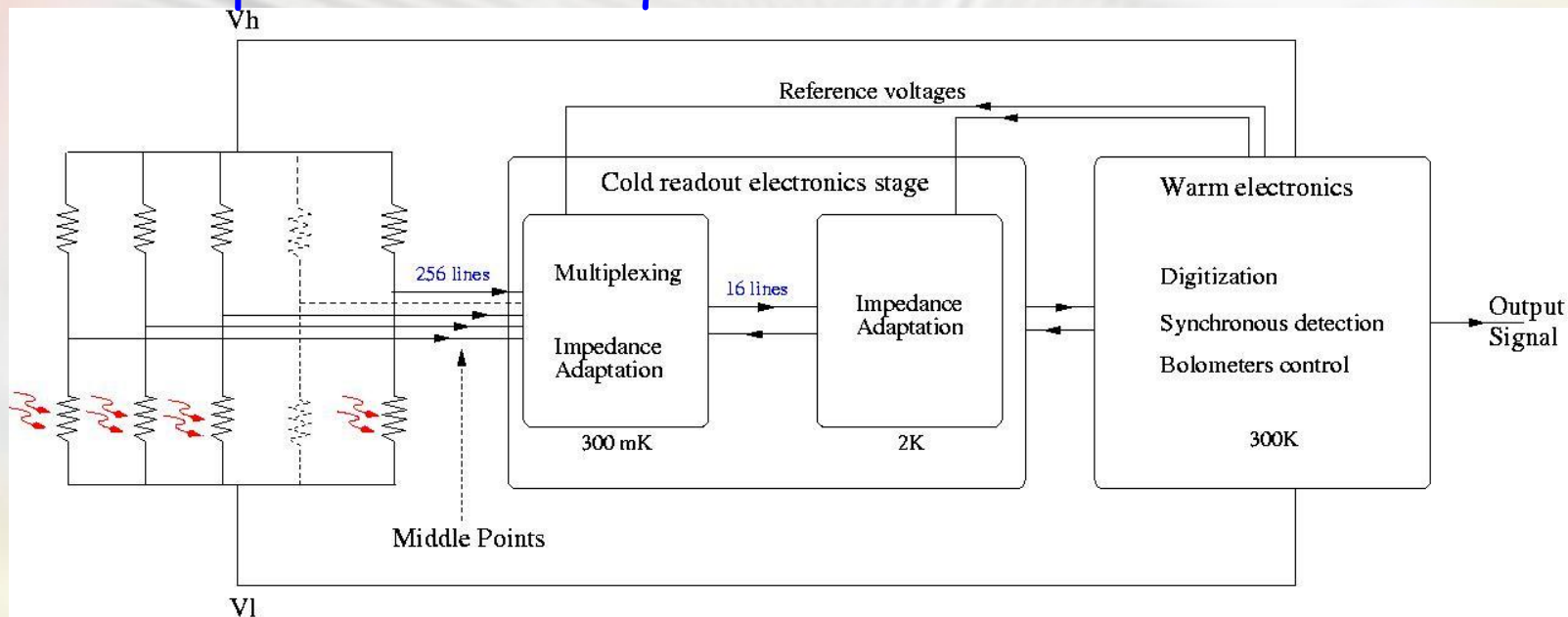
$$NEP_{phon} = \sqrt{4kGT^2}$$



- **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.

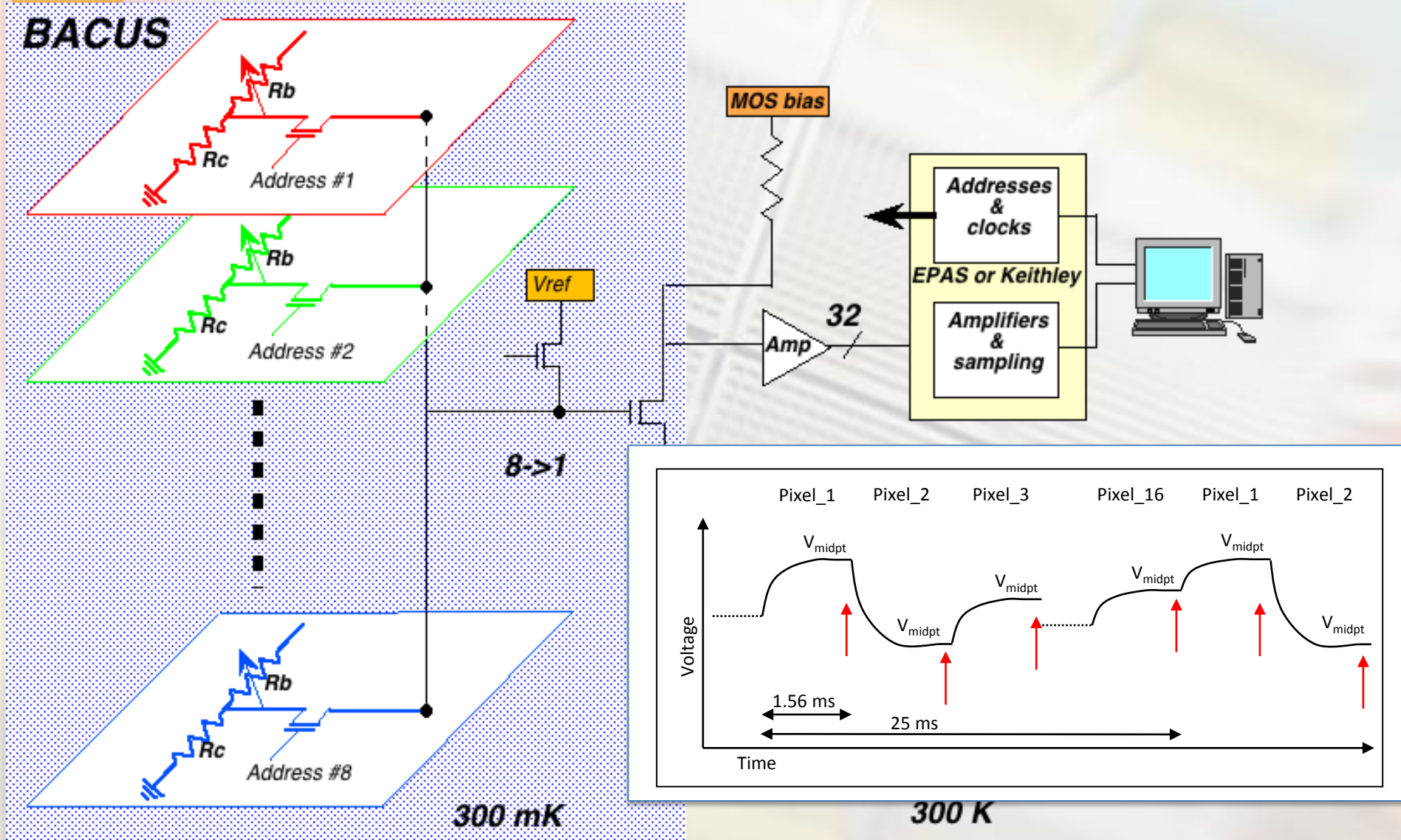
Le double échantillonnage corrélé: on présente alternativement au circuit de lecture le signal du détecteur et celui d'une référence. On soustrait par la suite les deux valeurs qui ont subi le même bruit de la part du circuit de lecture.

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

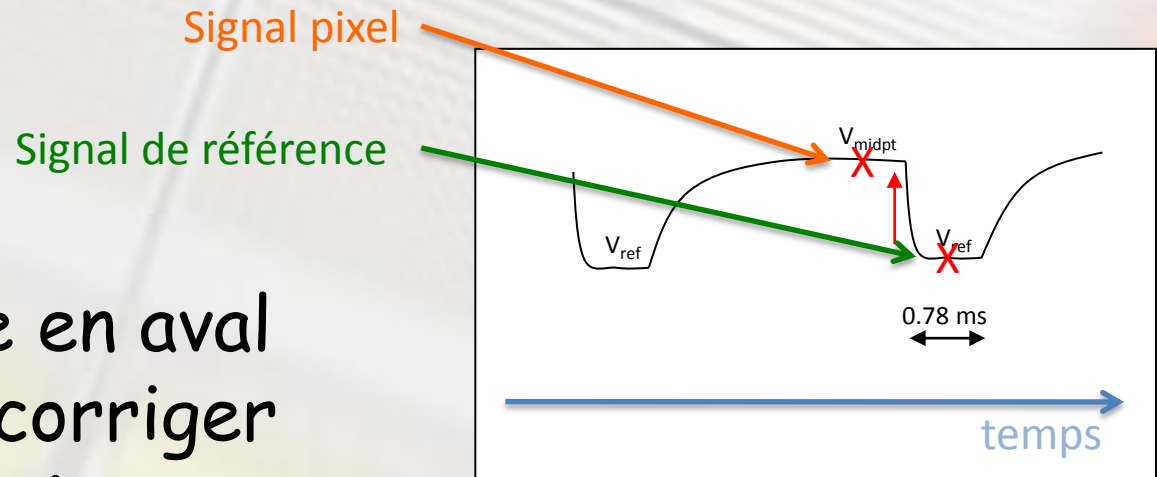


...la **charge thermique** apportée par les fils de connexion.

Le multiplexage temporel



- Les détecteurs restent polarisés même pendant qu'on lit les autres pixels ("ils intègrent" les fluctuations de signal : le bruit photonique au delà de leur bande passante).
- On peut facilement pratiquer le double échantillonnage corrélé (DCS en anglais).



- Si l'électronique en aval fluctue on peut corriger de cette fluctuation

• Nous sommes obligés d'avoir une bande passante électronique égale à :

• la BP du détecteur X facteur de multiplexage.

=>> Implication sur le bruit de lecture...

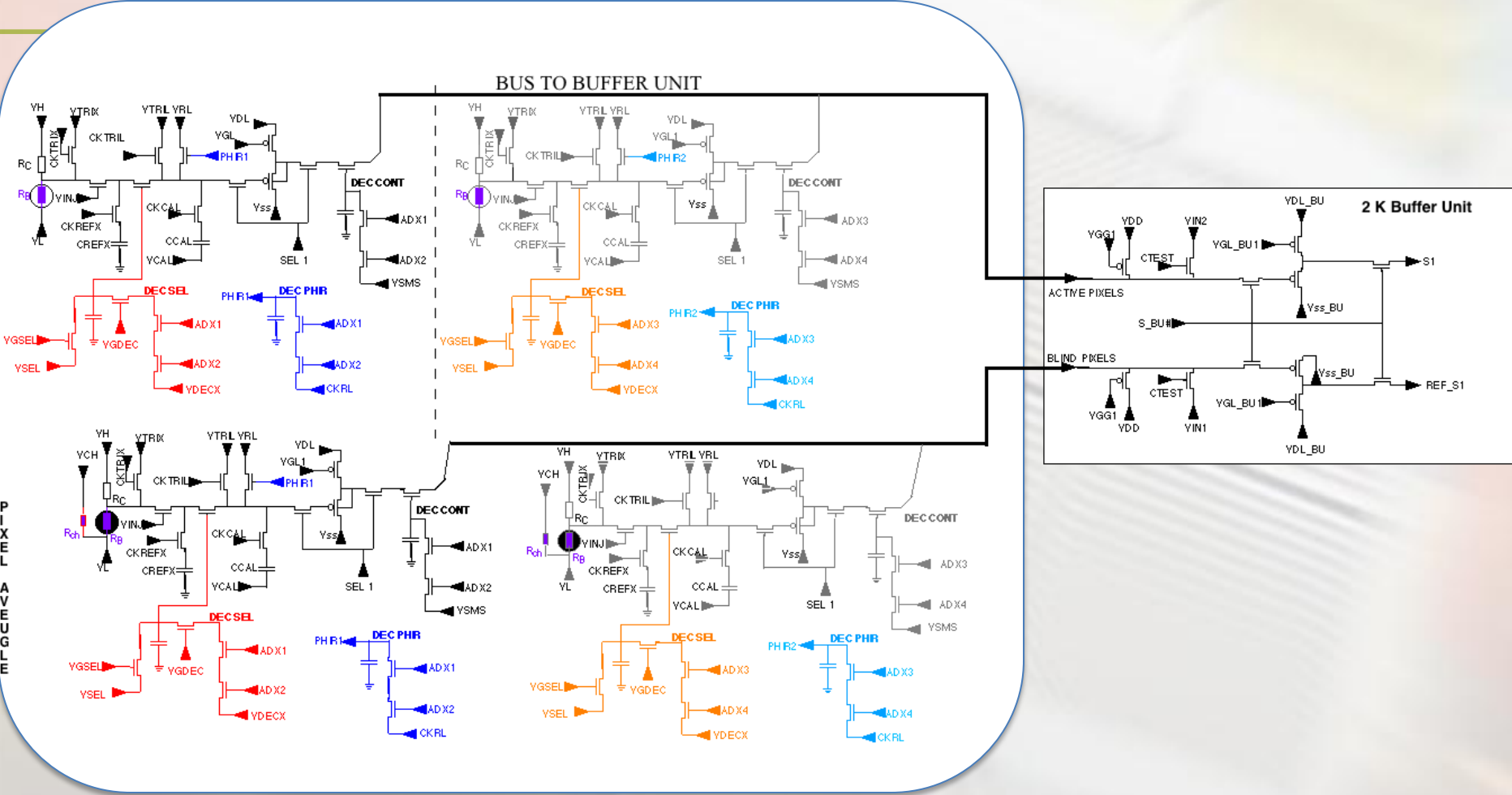
... et donc sur le niveau de bruit de l'électronique de lecture!

Solution possible

Voir plus loin...

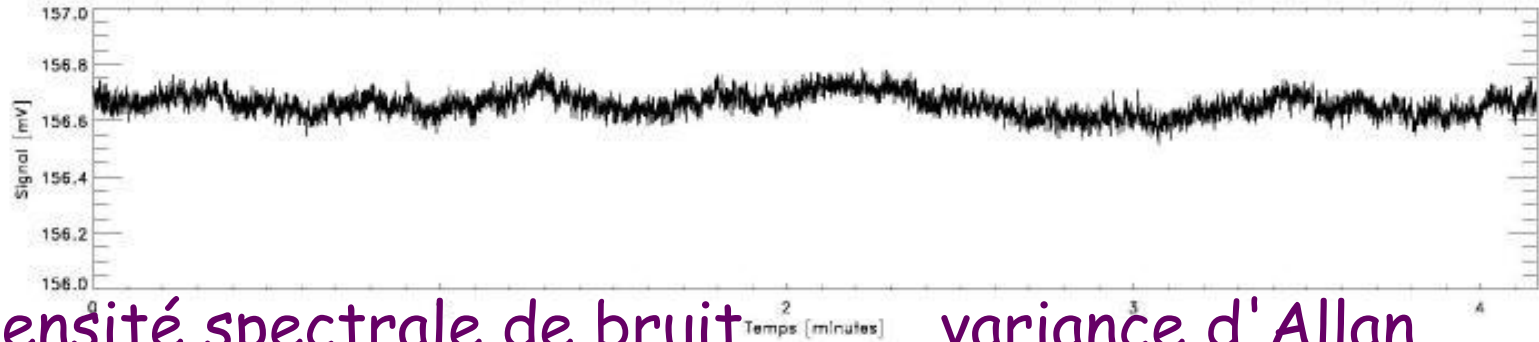
C D M

... c'est compliqué





- Le signal temporel (40 Hz)

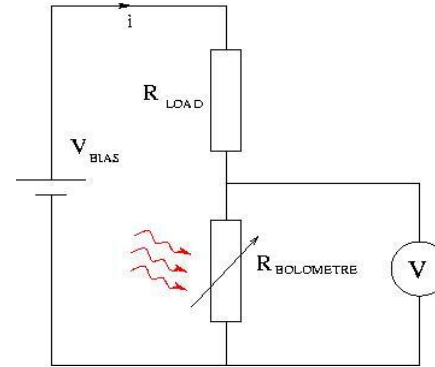
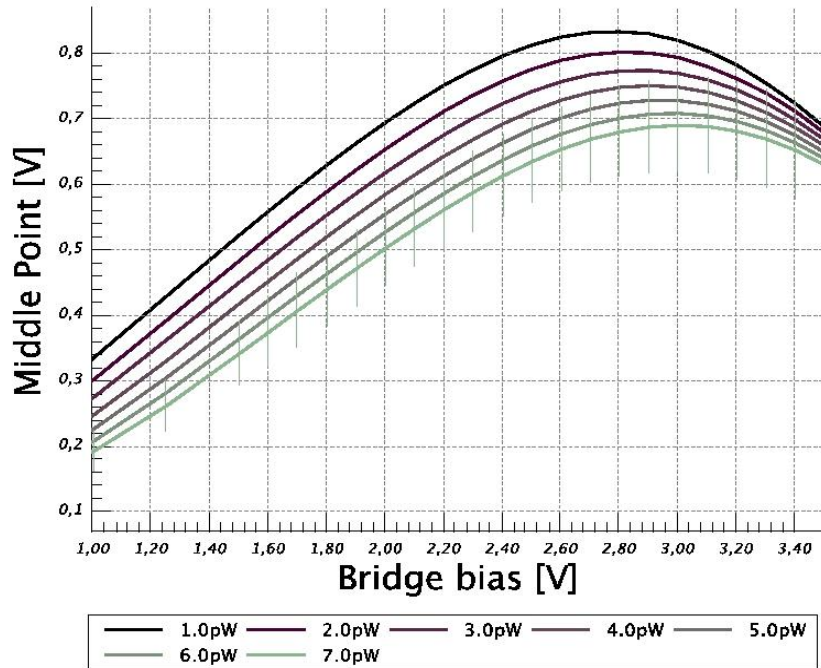


- Densité spectrale de bruit variance d'Allan

- La NEP se cache ici !



Le bolomètre par l'illustration...

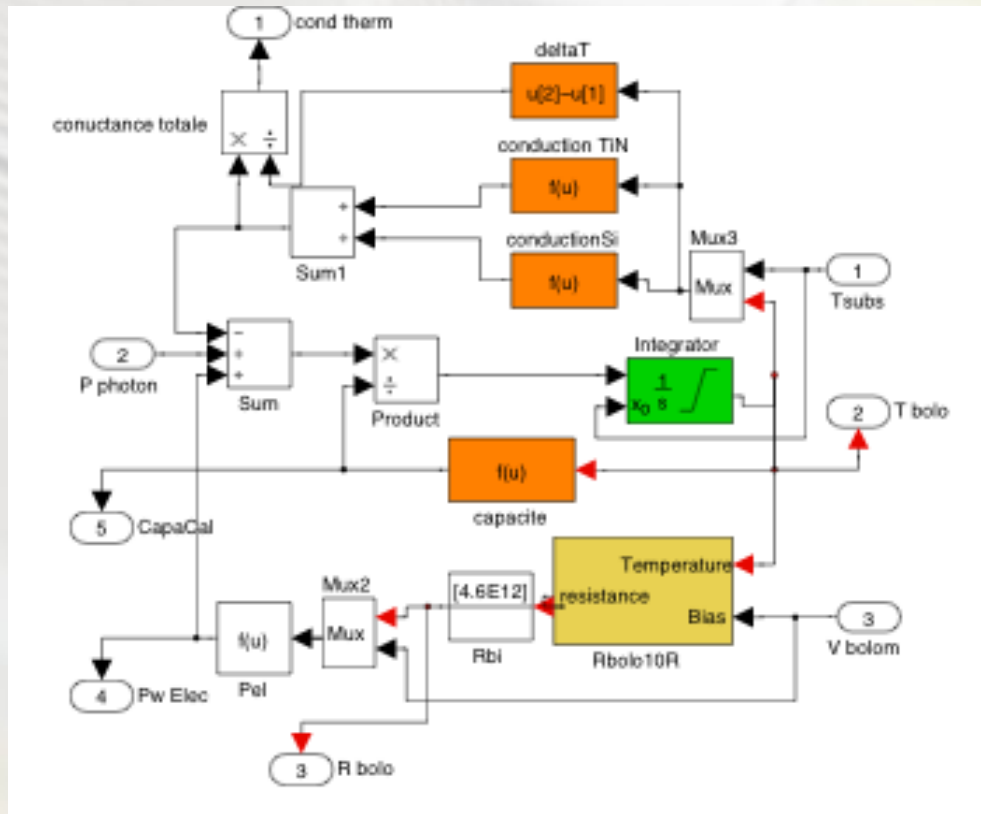


- Mesures statiques

- Pour chacun des 2560 détecteurs de PACS nous avons effectué en parallèle ces mesures de point milieu

- La compréhension fine du détecteur n'est pas aisée
- => nécessité d'un modèle pour la simulation

- 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....

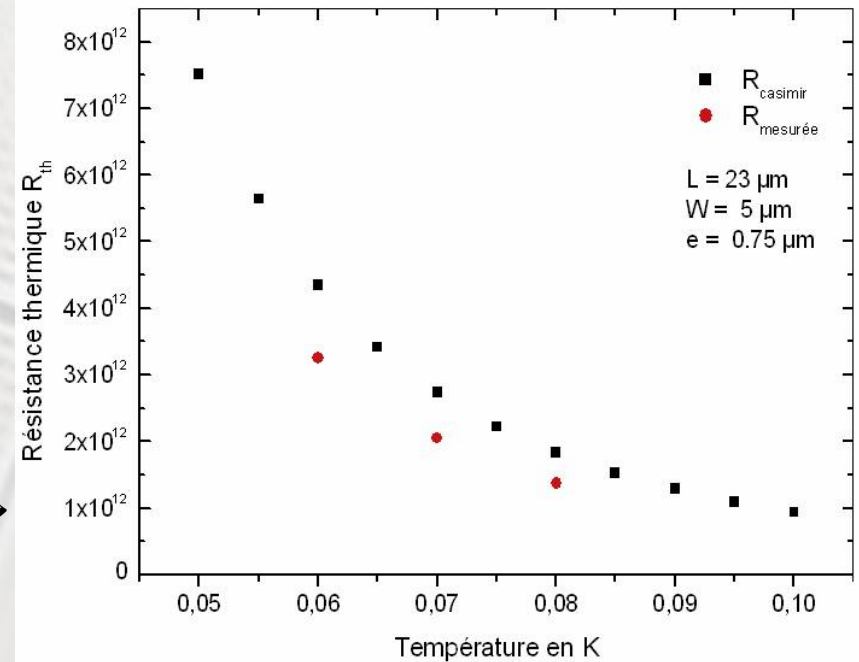
- cea • La résistance thermique : la loi de Casimir.

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

All lengths in μm

Pour le Si cristallin vérifiée jusqu'à 50 mK ->

Les capacités calorifiques sont déduites des mêmes types de mesures.

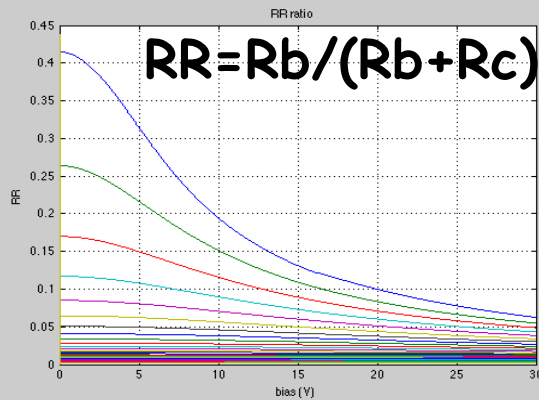
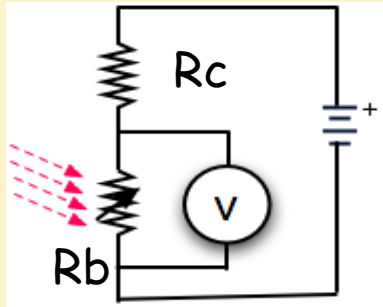


Crédit V Szeflinsky,,FXN,,JLS, CP Saclay

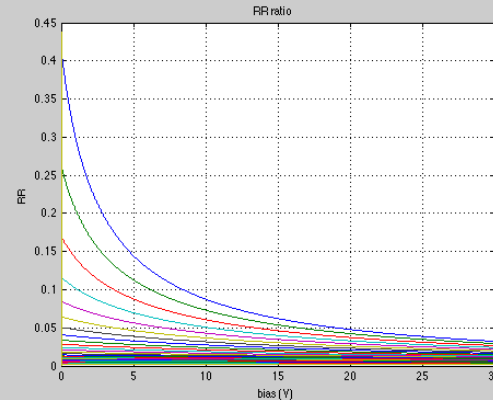
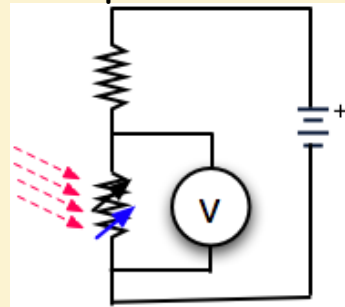
- Nous avons un modèle : nous allons pouvoir jouer avec.

Trois cas

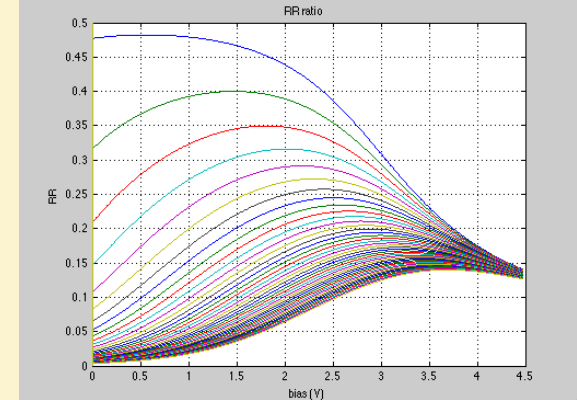
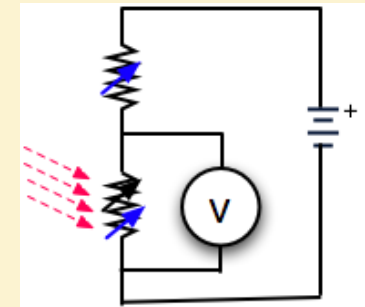
$R_c = Cte$
 $R_b = \text{sans effet de champ.}$




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



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

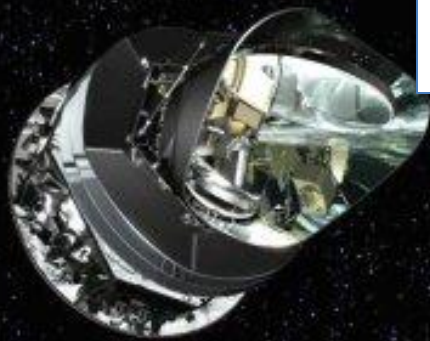
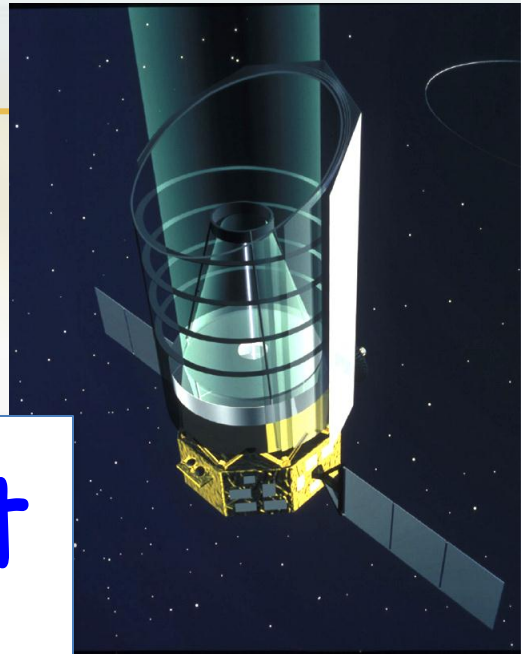


Chaque courbe représente une puissance optique incidente :
0, 1, 2, 3...40 pW/pixel en fonction de la tension de polarisation du pont bolométrique.

- 
- Les performances du détecteur 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.

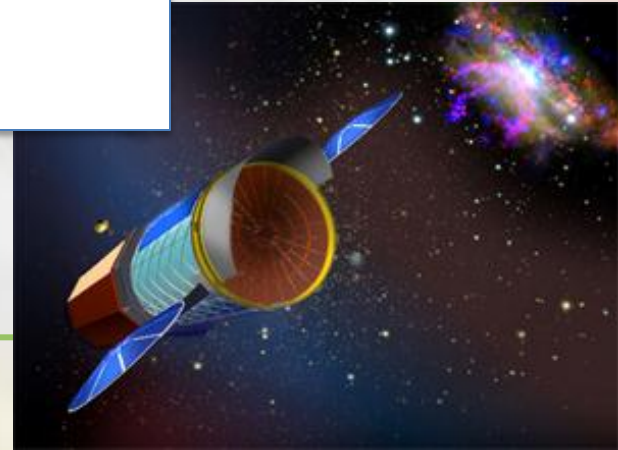


Retour au petit bout de la lorgnette...



mai 2012

L.Rodriguez



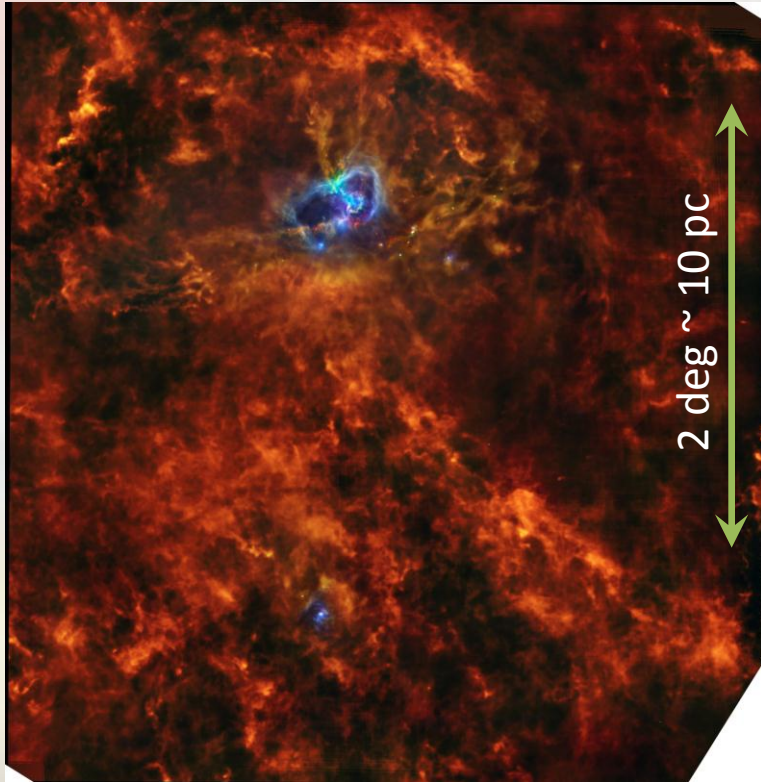
Aquila: Actively star forming

SPIRE 500 μm

+

PACS 160/70 μm

d ~ 260 pc



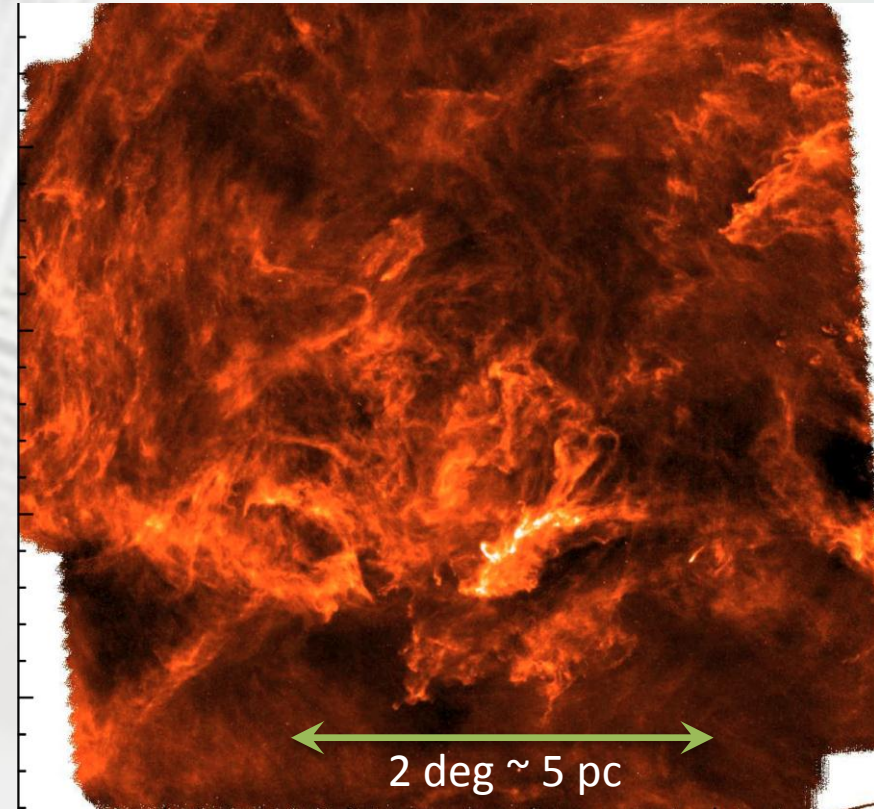
Aquila Rift - *Herschel* Gould Belt survey

André et al. 2010, Bontemps et al. 2010,
Könyves et al. 2010

Polaris: Non star forming

SPIRE 250 μm

d ~ 150 pc

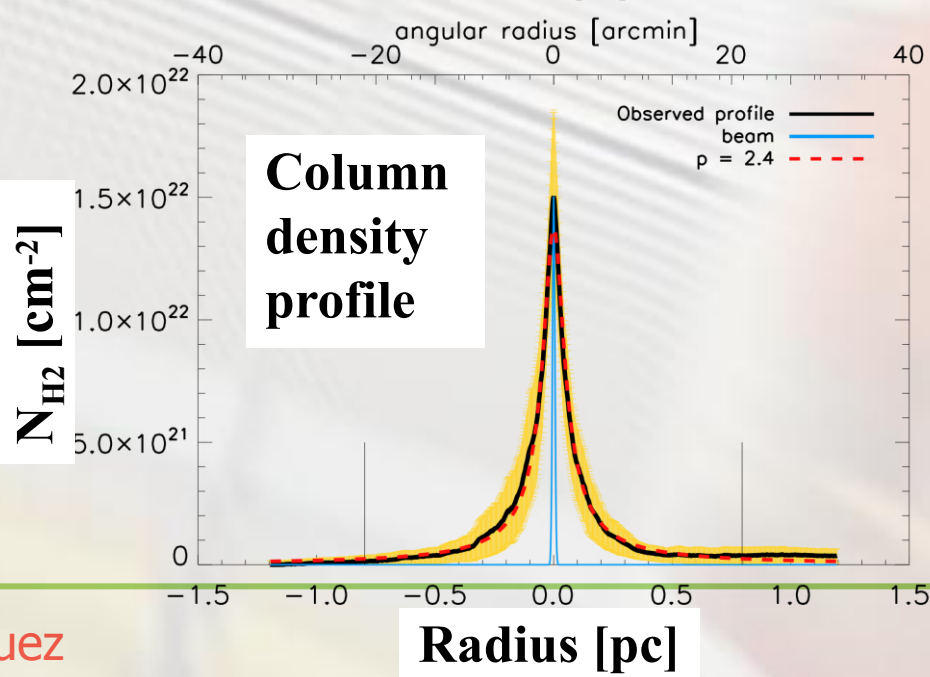
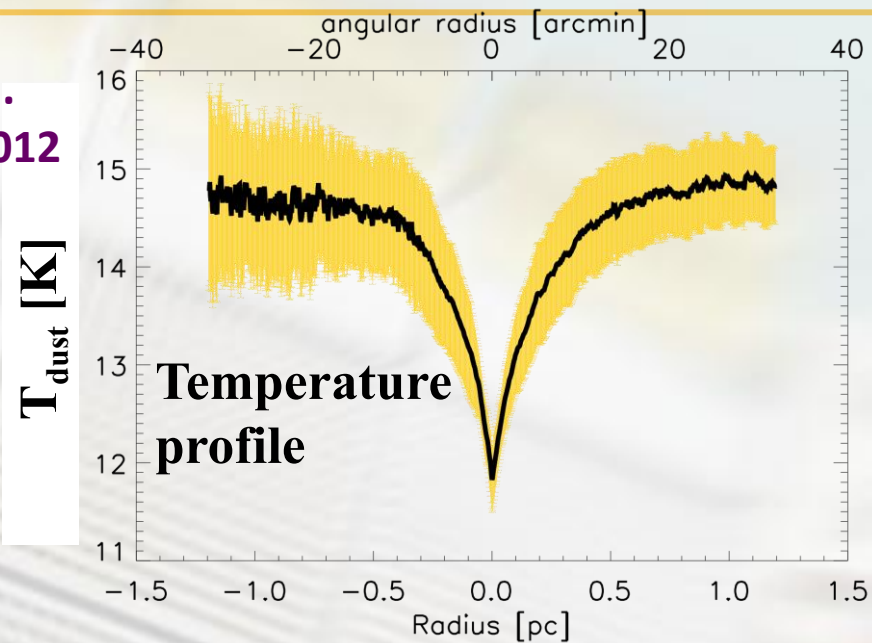
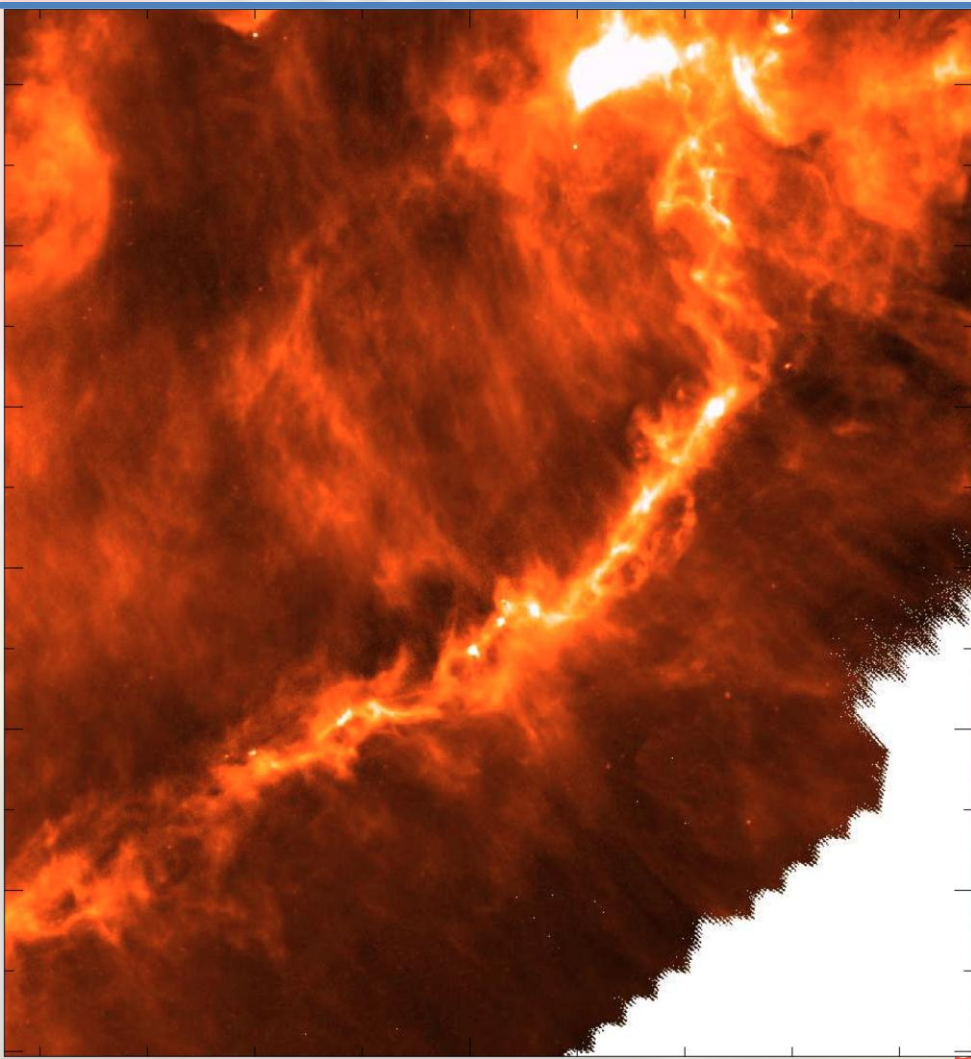


Polaris Flare - Gould Belt survey

Men'shchikov et al. 2010, Miville-Deschênes ea. 2010,
Ward-Thompson et al. 2010

Taurus B213 filament
SPIRE 250 μm

Arzoumanian et al.
Palmeirim et al. 2012



uez



- 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.



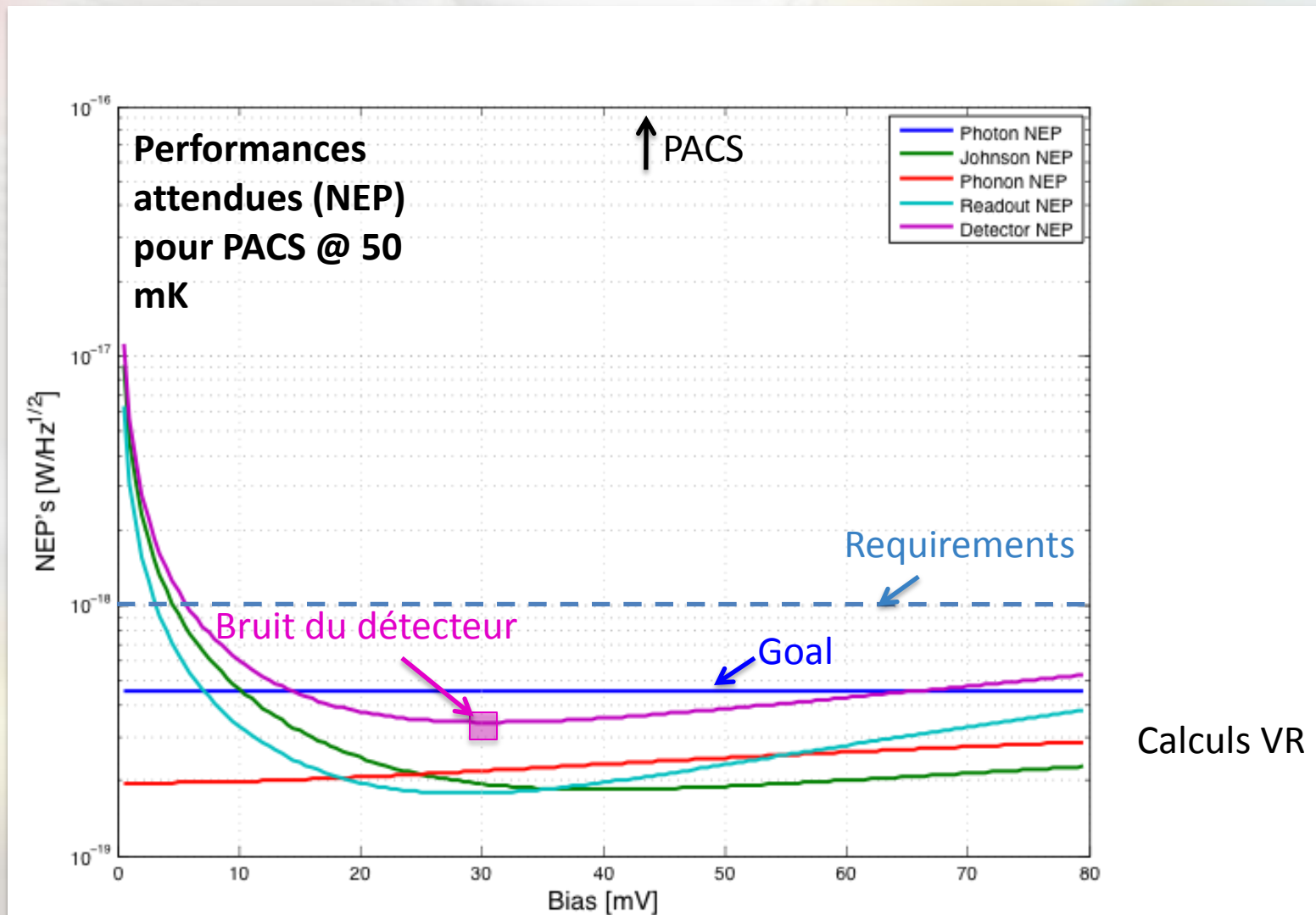
Des bolomètres vus dans une boule de cristal...

Nos détecteurs sont ils satisfaisants ?
NON !

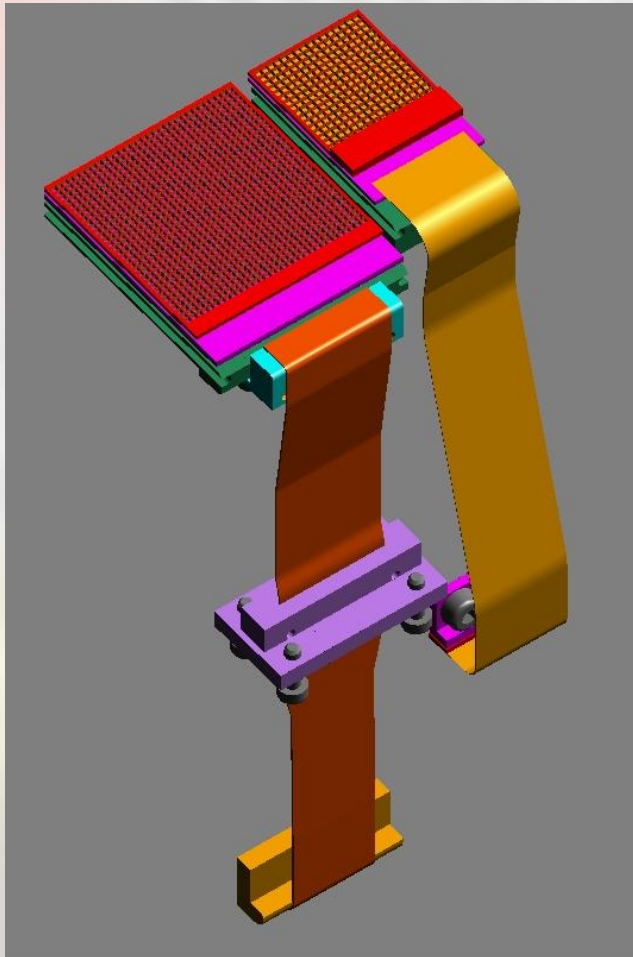
cea ... haute sensibilité ?

- 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 $10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ à 50 mK.

Les réglages sur les thermomètres sont en cours d'investigation. Le Si dopé que nous avons produit suit Efros jusqu'à 100 mK

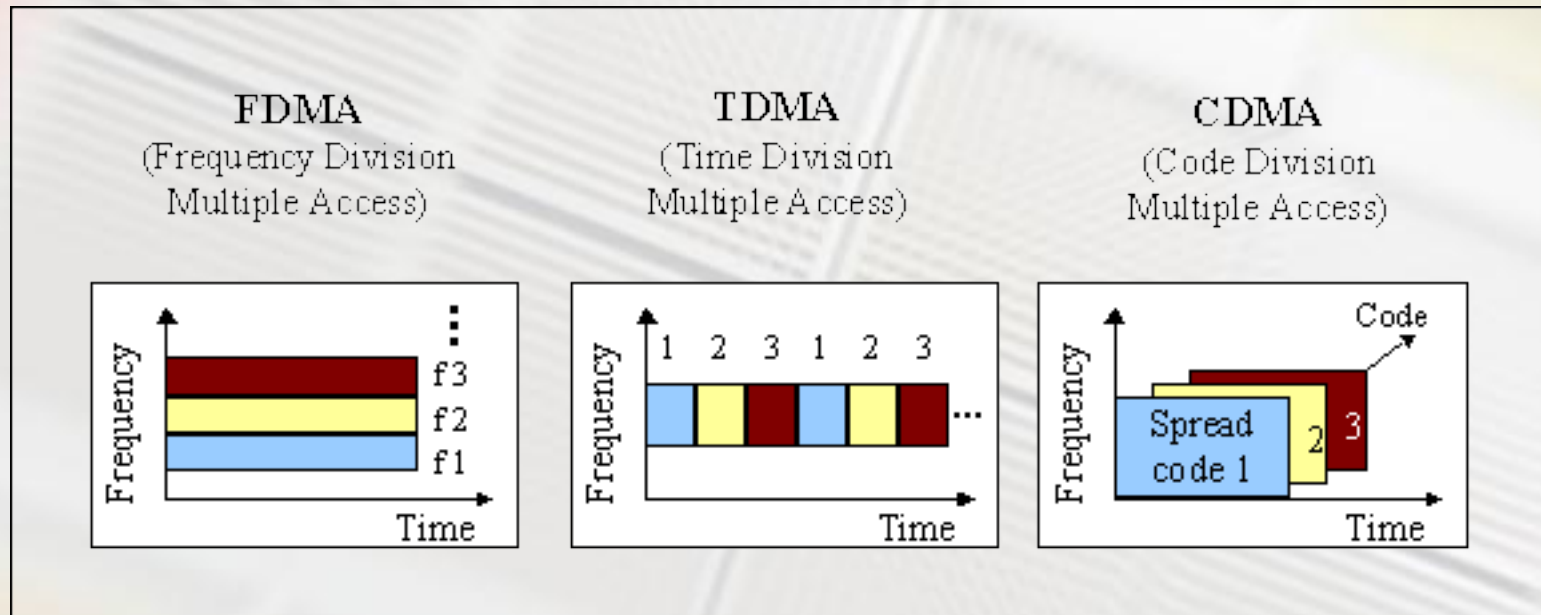


CEA Multiplexage ?



... Plus de pixels

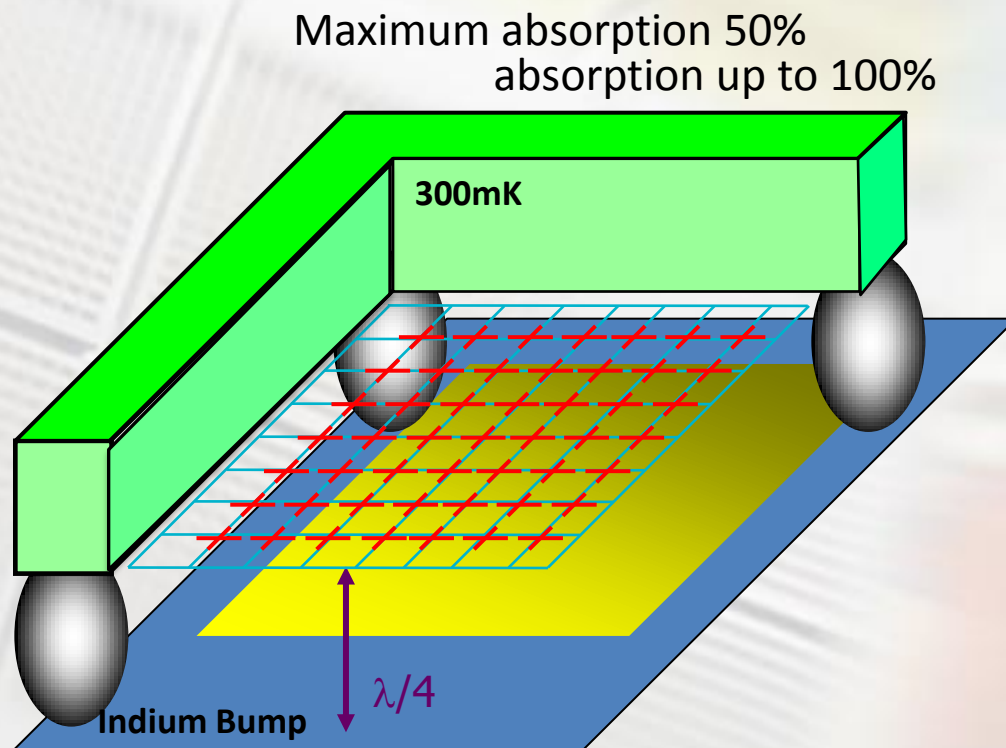
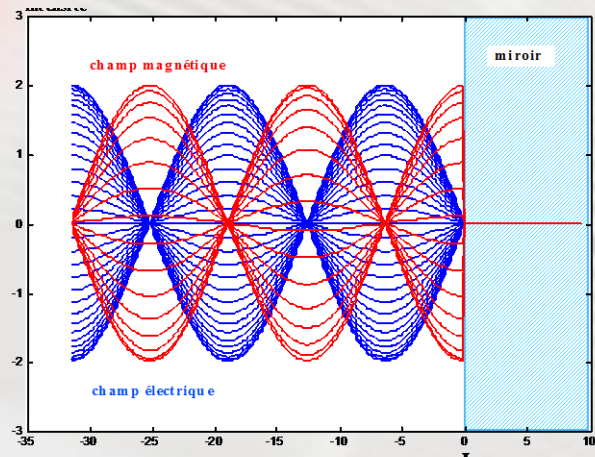
- 1024 par module au lieu de 256 sur PACS.
- TDM très demandeur sur la qualité de l'électronique.
- Peut t-on passer à un multiplexage fréquentiel comme dans le cas des TES?
- On peut l'éviter en introduisant le CDM
- Code Division Multiplexing



Permet de réduire de façon importante (?) la bande passante électronique associée au multiplexage temporel.

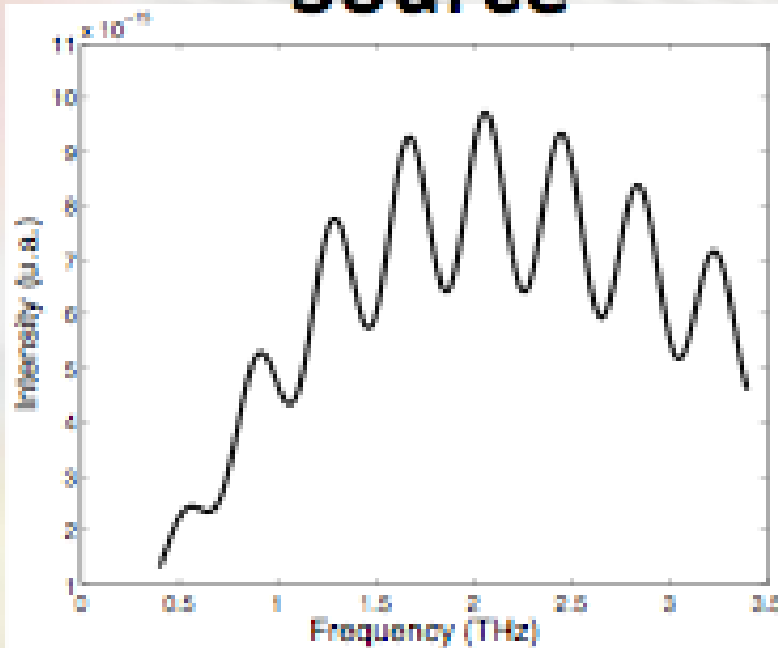


... Spectroscopie ?.

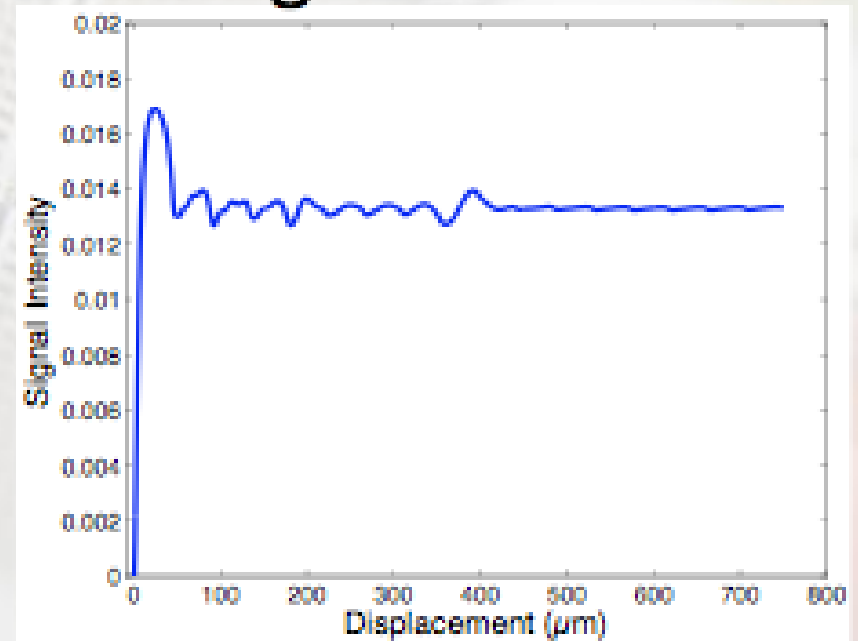


cea ... Spectroscopie ?

Source



Signal de Sortie



Interférogramme classique
modifié par la réponse du détecteur

cea ... changer de senseur ?.

- Utiliser des Supraconducteurs pour la réalisation de TES.
- Demande **Cardiff/SRON** 2008

Quitte à vendre son âme au diable pourquoi ne pas utiliser des transitions à haute impédance. 0.1 -10 M Ω

Nous suivons avec intérêt les avancées au CSNSM (Stephanos).

En parallèle nous avons pris contact avec D Debarre et Francesca Chiodi pour entamer une collaboration et tester le Si Supra.

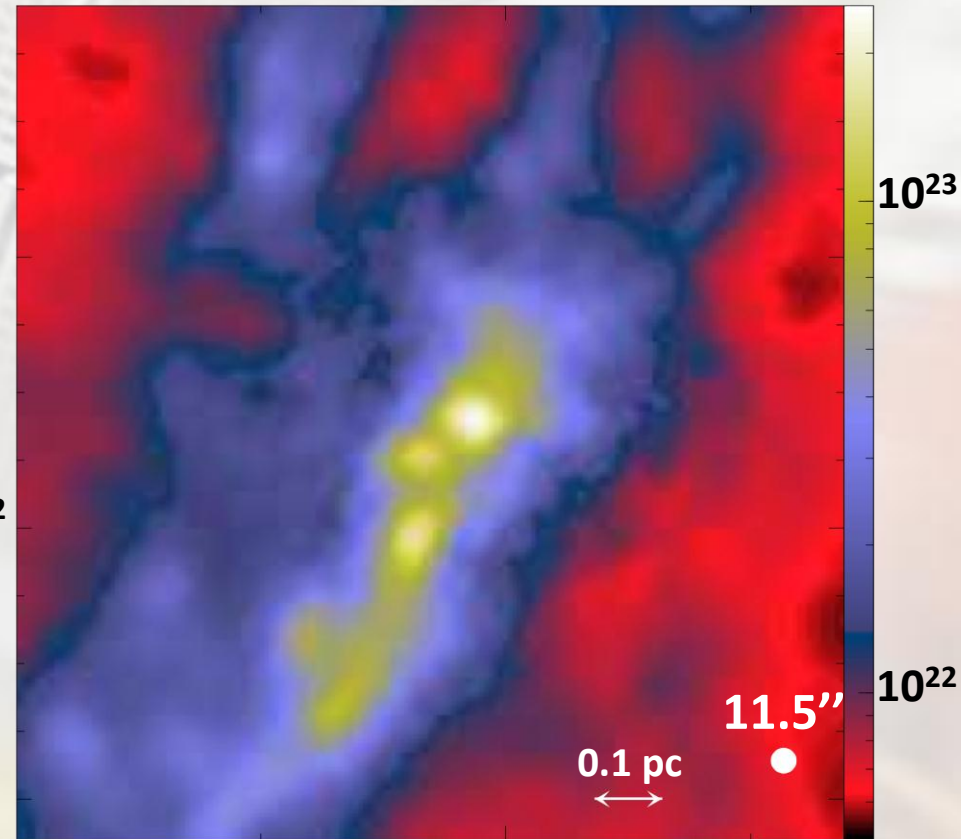
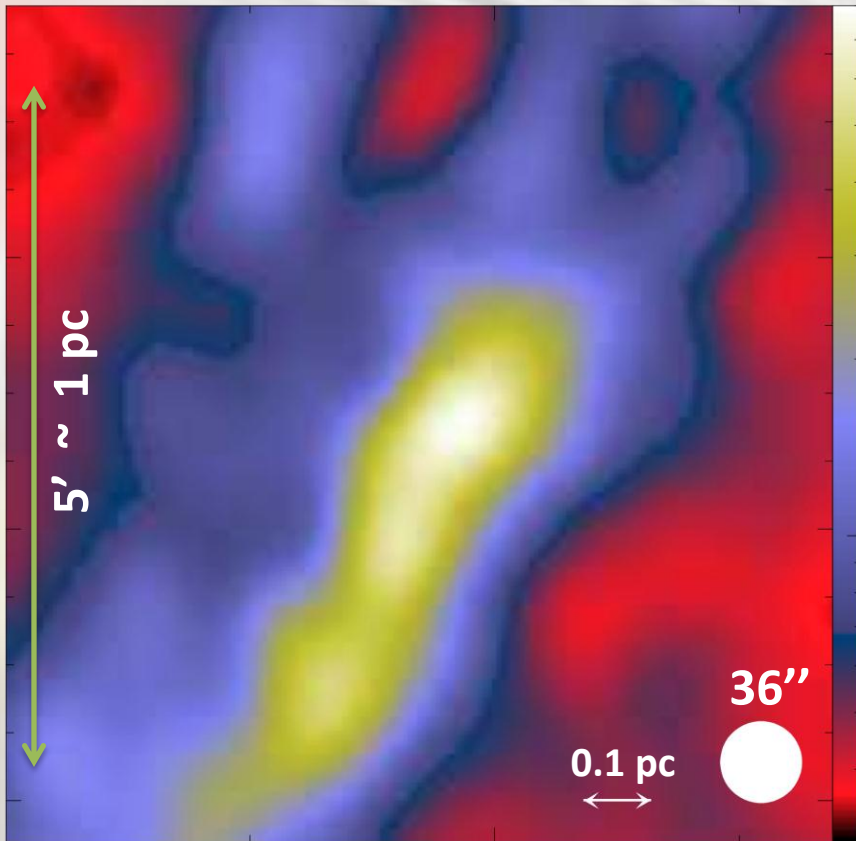
Des perspectives (v)

... augmenter la résolution spatiale ?

Example: RCW36 in Vela-C ($d \sim 700$ pc)

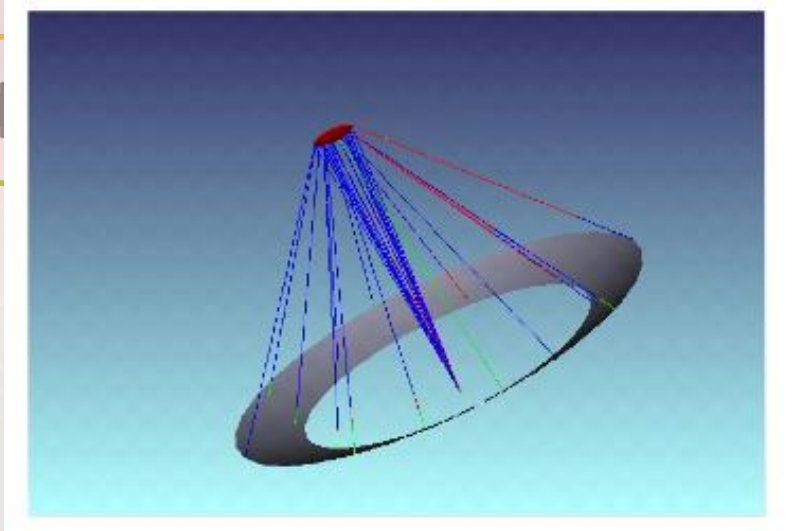
Herschel ($500 \mu\text{m}$ res.: $\sim 36''$)
Column density map (H_2/cm^2)

Herschel + P-ArTéMiS ($450 \mu\text{m}$ res.: $\sim 10''$)
Column density map (H_2/cm^2)

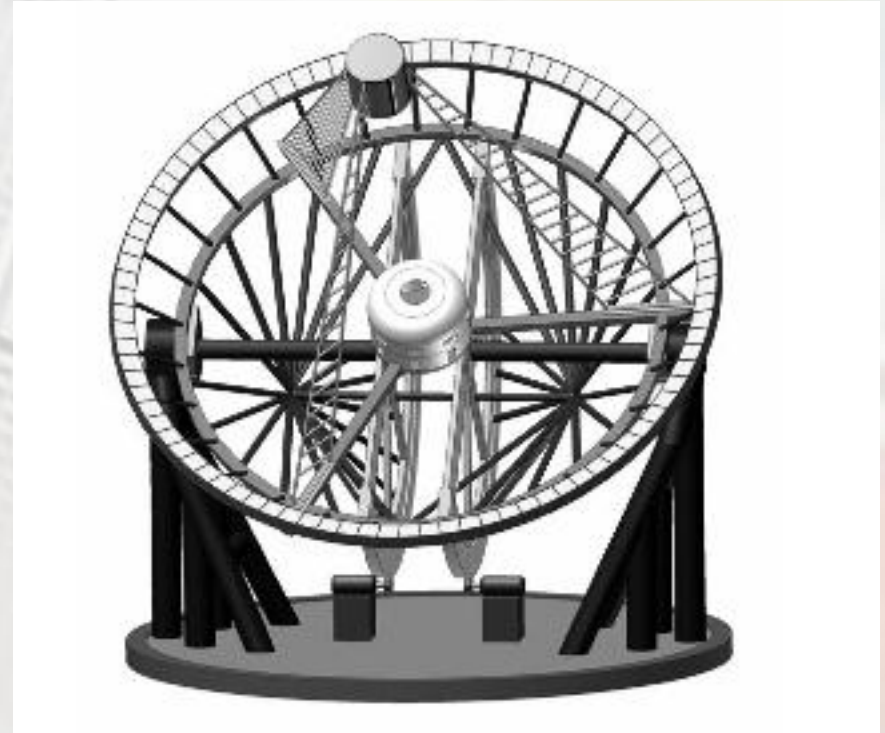
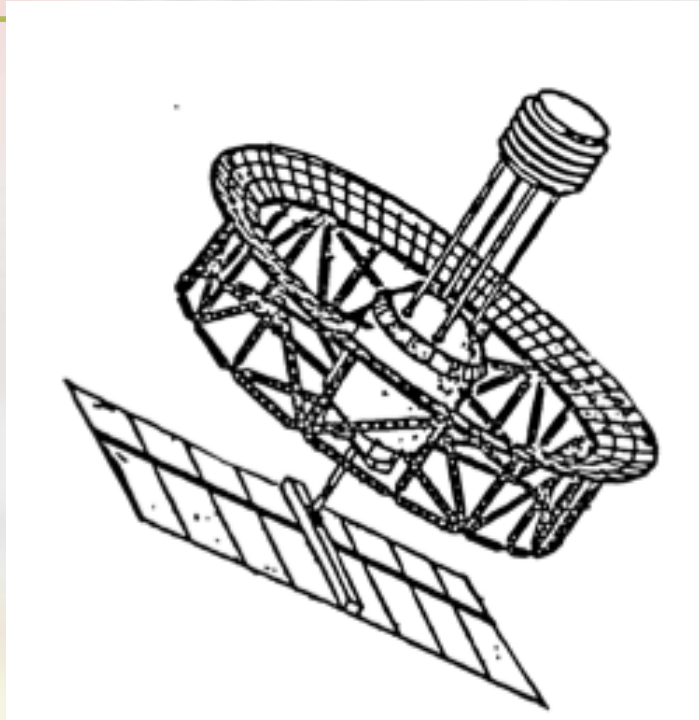


Hill et al. 2011; Minier et al. 2012

APEX/P-ArTéMiS obs. in May 2009



Optique très "fast" : ouverte de $F/0.7$ exemple ci-dessus à $F/0.1$ dans d'autres hypothèses de travail.

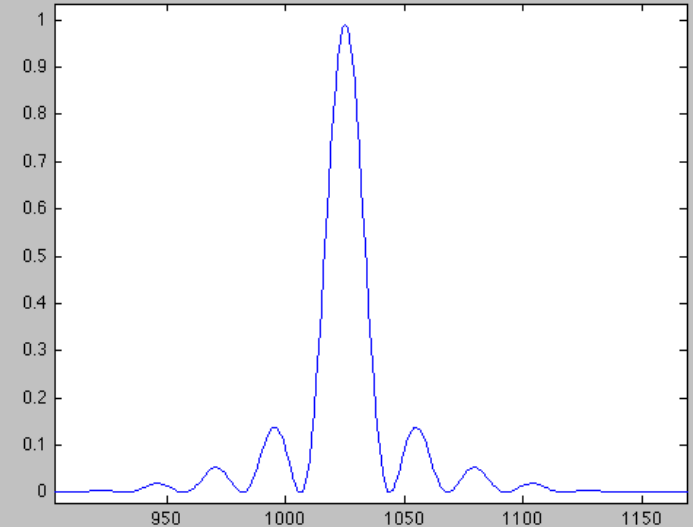
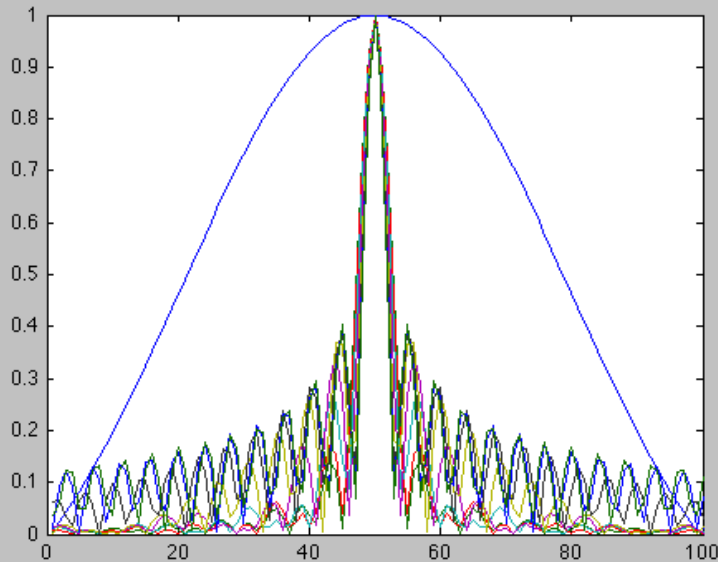


Exploration de la tache d'Airy



Diamètre extérieur: 20m
Largeur de l'anneau : 3 m
En 36 segments de 10°

$$F(X, Y) = \frac{1}{S_0} \cdot \iint_S e^{-i \frac{k}{R_0}(x.X+y.Y)} \cdot dx \cdot dy$$



- 2 m- 20 cm
- 20 m- 2 m
- 20 m- 4 m
- 20 m-10 m
- 20 m-15 m
- 20 m-17 m
- 20 m-18 m
- 20 m-19.4 m
- 20 m-19.6 m
- Normalisés à 1