

DéTECTEURS CRYOGÉNIQUES ET INSTRUMENTATION ASSOCIÉE : panorama IN2P3

Physique et détecteurs à la frontière

22-24 juin 2021, <https://indico.in2p3.fr/event/23982/>

Alex Juillard IP2I

contributions APC, IP2I, LPSC, IJCLab et Institut Néel pour GT08 prospectives IN2P3 2020



Plan

♦ DéTECTEUR cryo ?

- principes de base

♦ Exemple de **rÉALISATION** de « gros instruments »

(avec implications IN2P3)

- EDELWEISS
- CUPID-Mo
- NIKA2
- QUBIC

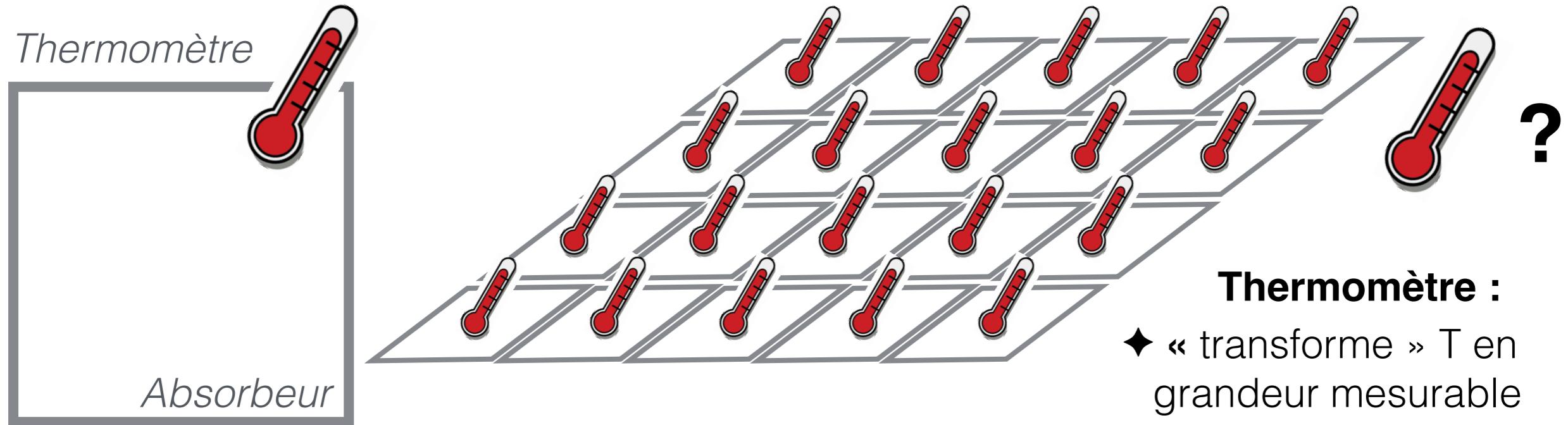
♦ R&D en cours

- bolo massif & matrices de détecteurs

♦ Conclusion

- GDR
- Retour Prospective IN2P3

Détecteur cryo ??



Bolomètre « massif » :

- ◆ $\sim g \rightarrow \sim kg$
- ◆ procédé de fabrication en partie «à la main»
- ◆ détection de particule « une à une »
- ◆ application principale : **détection d'événements rares** »
 - Matière Noire
 - $0\nu\beta\beta$
 - CEvNS

Matrice de Bolomètre :

- ◆ $1 \rightarrow 100k$ « pixels »
- ◆ procédé de fabrication en partie «collectif»
- ◆ détection de particule « une à une » ou flux de puissance
- ◆ application principale : **Astro**
 - Sub-mm (50-600 Ghz)
 - X

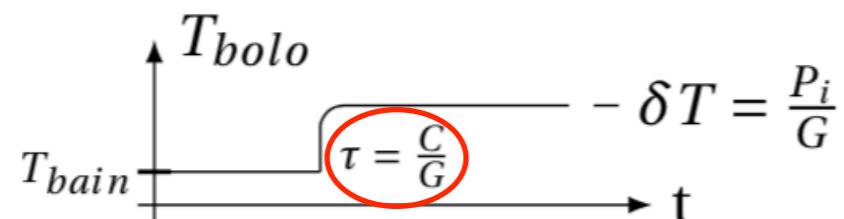
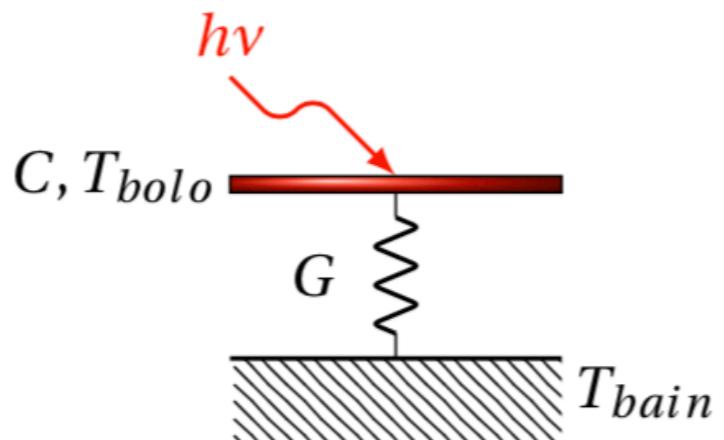
Thermomètre :

- ◆ « transforme » T en grandeur mesurable
- ◆ Résistif
 - supraconducteur
 - Transition Métal-Isolant
- ◆ Magnétique
- ◆ avec médiateur hors d'équilibre
 - Paire de Cooper dans matériaux supra :
 - Kinetic Inductance vs dN_{qp}
 - phonon hors d'équilibre peuvent « casser » des paires de Cooper

lien fort avec senseurs quantiques

Détecteur cryo ??

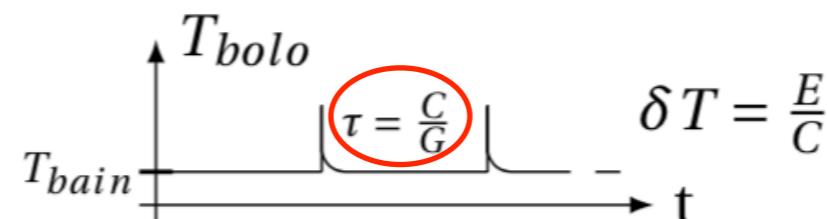
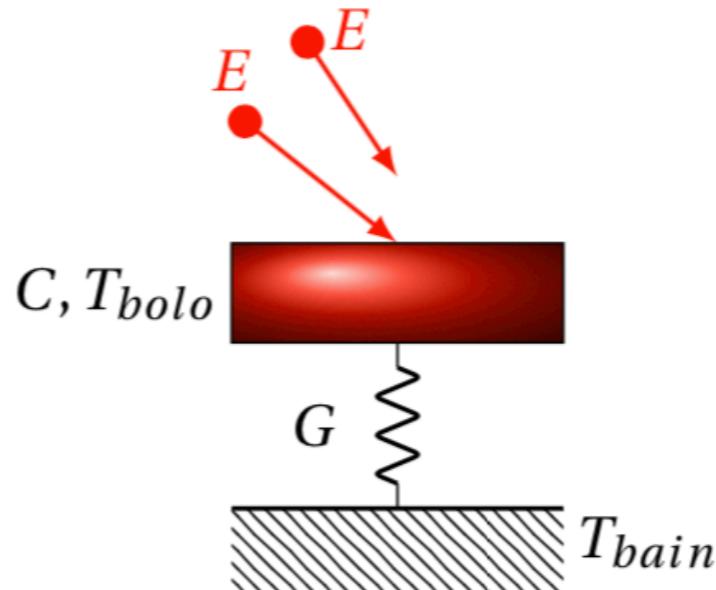
"background"/flux de photon



Mode « bolométrique »

- ◆ Réponse en C/G
- ◆ NEP = $\sqrt{4k_B T^2 G}$ [W/ $\sqrt{\text{Hz}}$]

photons>eV/particules



Mode « calorimétrique »

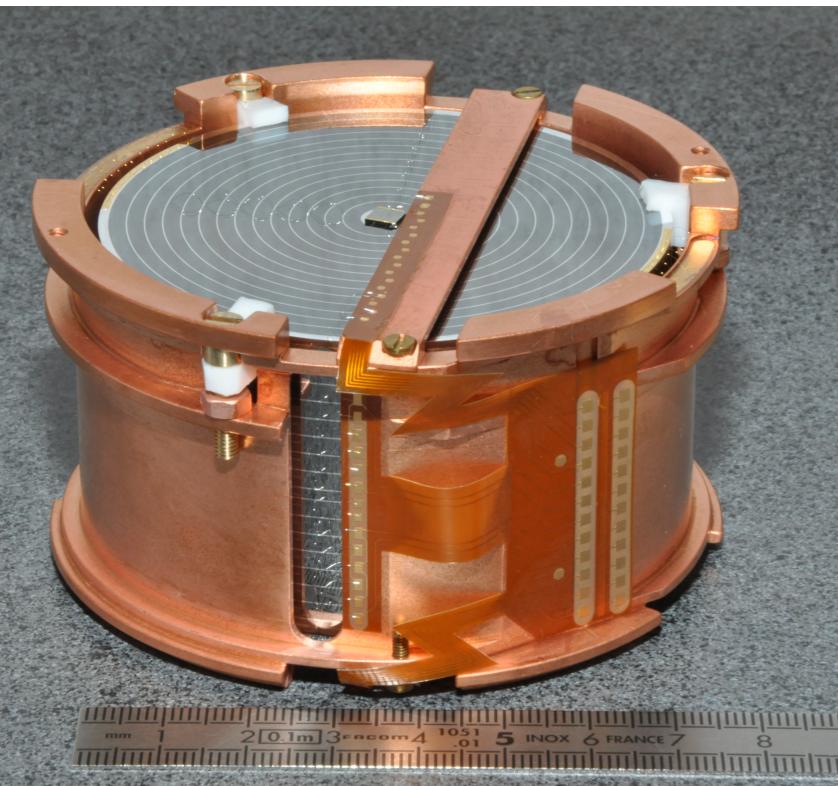
- ◆ Décroissance en C/G
- ◆ $\delta E = \sqrt{4k_B T^2 C}$ [J]

Il faut refroidir : sensibilité ↗ et bruit ↘

$T_{bain} \sim 10 \text{ mK} - 300 \text{ mK}$

R&D = absorbeur + thermomètre + électronique (adaptation Z, gain, readout) + environnement cryo

Ex. de réalisation : EDELWEISS-III



36 * FID-800

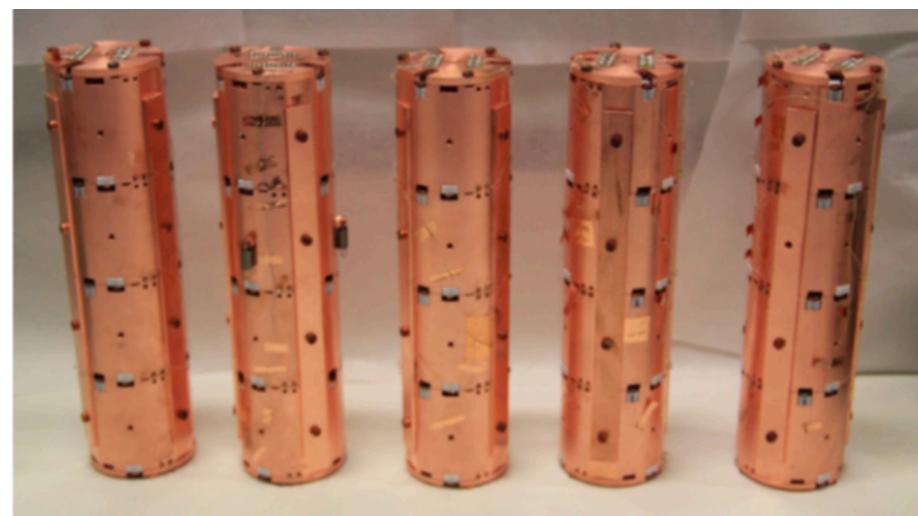
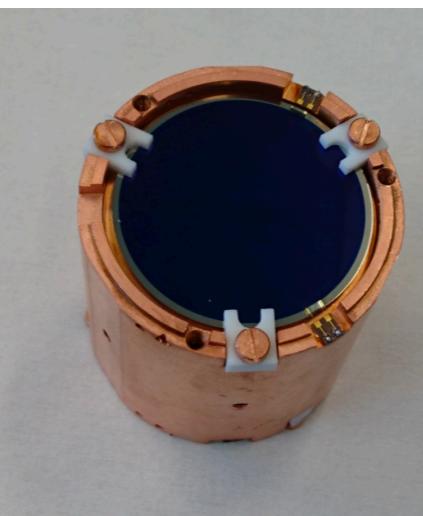
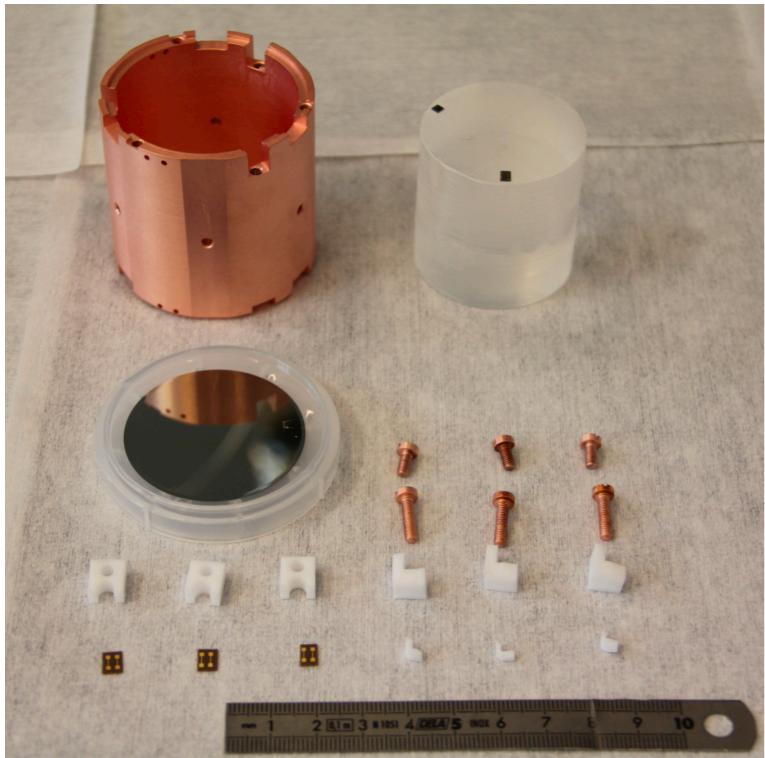
- ♦ **Ge 820 g**
- ♦ Thermomètres haute impédance Ge-NTD (cristal Ge dopé par neutron)
- ♦ 4 jeux d'électrodes Al pour collecte charge
 - Mesure simultanée **ionisation - chaleur**
 - Discrimination active du fond



INSTRUMENT (> 2013)

- ♦ **Cryostat 10mK** + 40 tonnes blindages PE + Pb @ LSM
- ♦ **3000 cables coaxes (6 km)**
- ♦ **350 transistors Si-FET @ 120K**
- ♦ 36*2 « Bolometers Boxes » @ 300K

Ex. de réalisation : CUPID-Mo

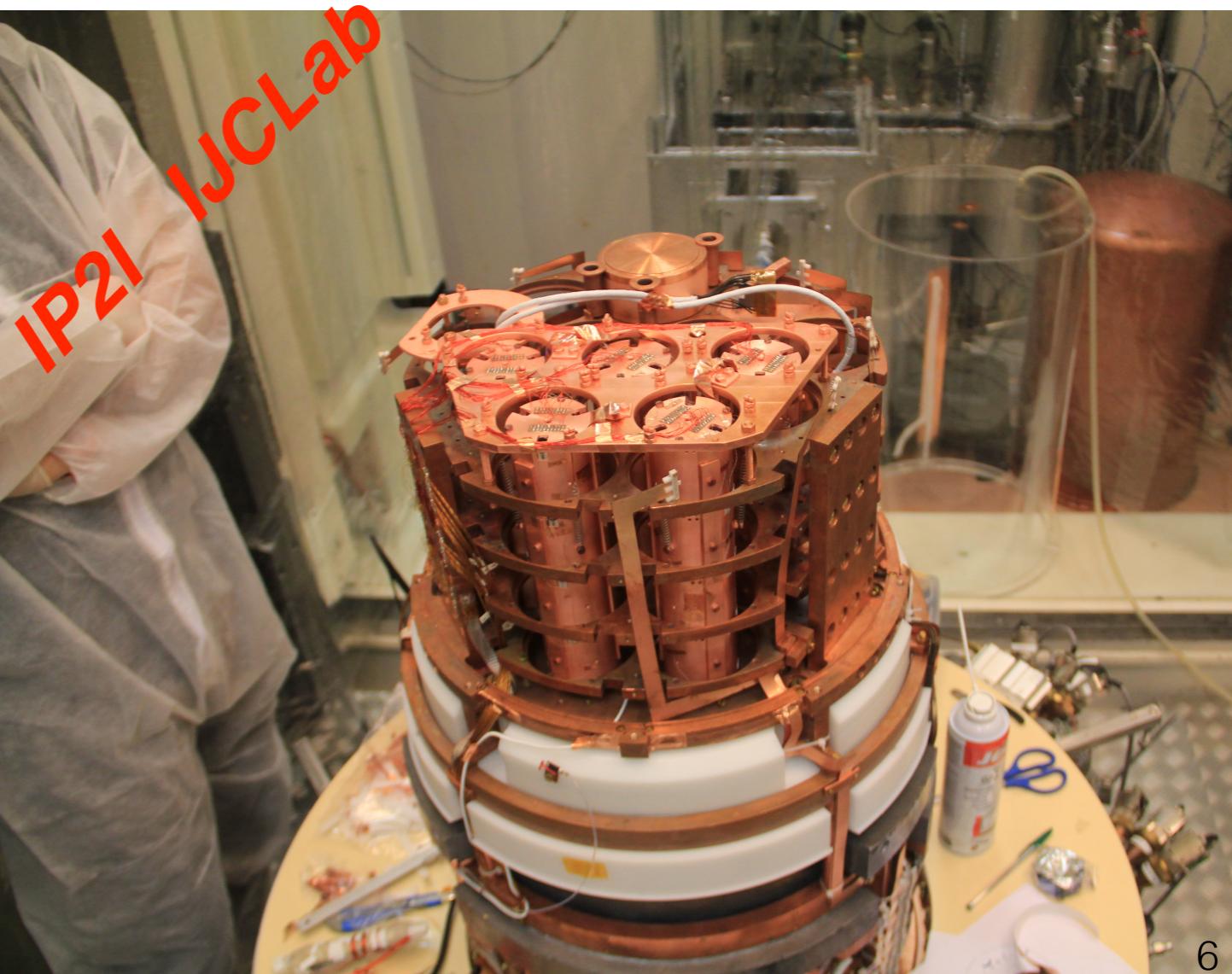


<https://arxiv.org/abs/1909.02994>

5 tours de 4 détecteurs (2018)

- ◆ Absorber $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$: Ø 43.8 x 45 mm, 210 g
- ◆ Light detector: Ge wafer Ø 44.5 mm x 170 μm with SiO coating
- ◆ Thermomètre Ge-NTD
- ◆ **Mesure simultanée chaleur - lumière** pour discrimination fond alpha
- ◆ Cu basse radioactivité

Cryostat, Electronique & DAQ
EDELWEIS-III

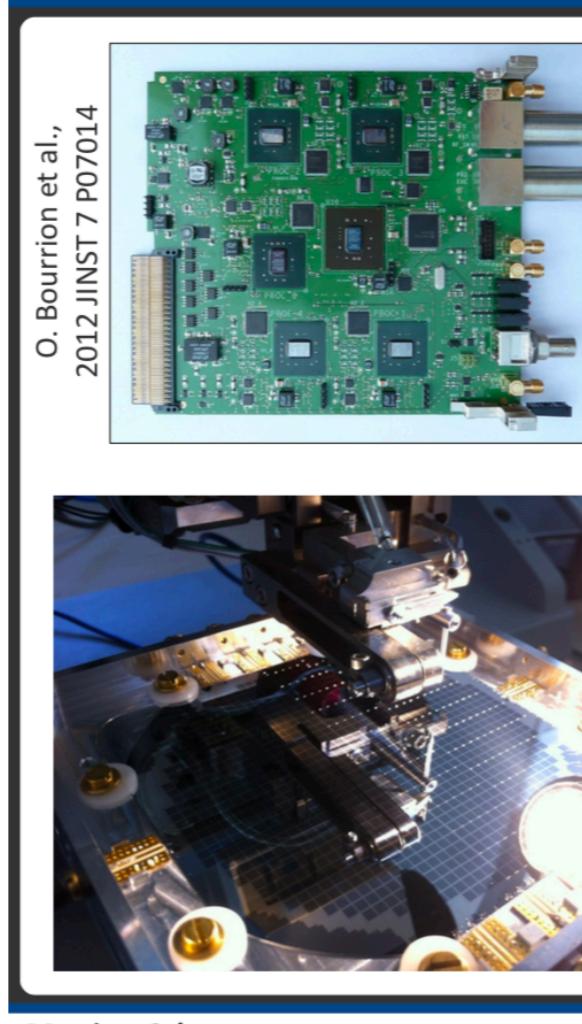


Ex. de réalisation : NIKA2

A&A 609, A115 (2018)



I. Néel LPSC

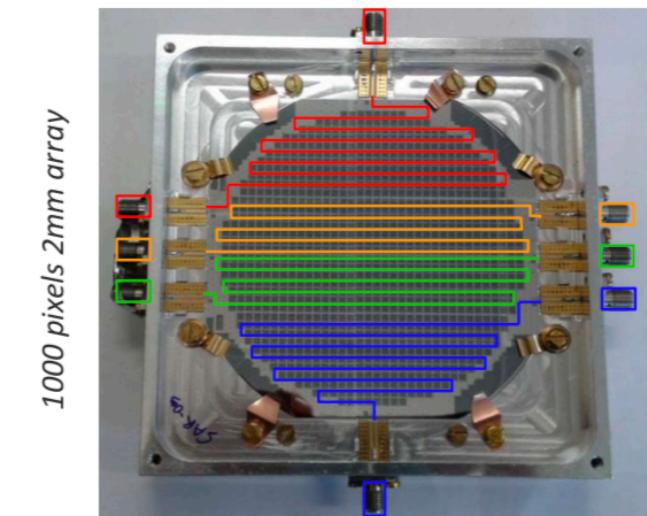


Cartes **NIKELv1**: facteur MUX 400 sur 500MHz de bande

Facteur MUX adopté: **200** (Q au sol + marge)

- 2mm: 600÷1000 pixels → 4 feedlines
- 1.25mm: 1200÷2000 pixels → 8 feedlines

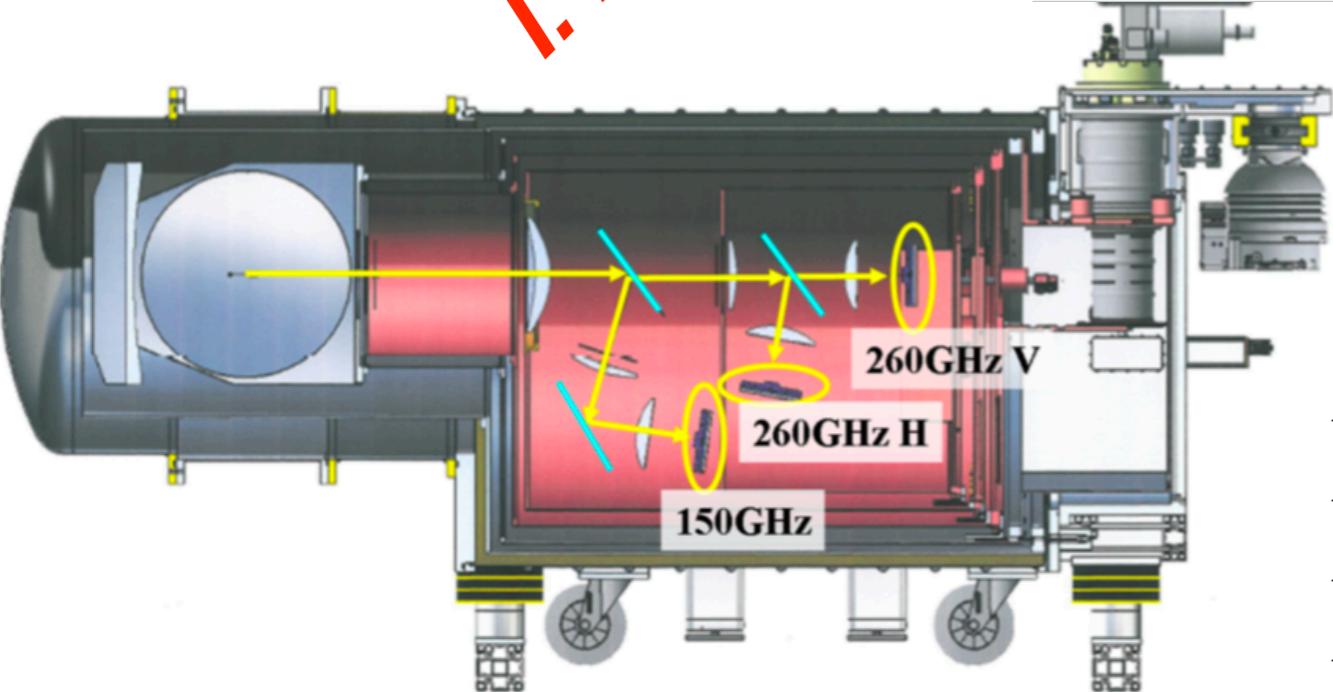
Fabrication 'mono-step' sur wafer 4"



Martino Calvo

26

École DRTBT, Aussois, 13/12/18

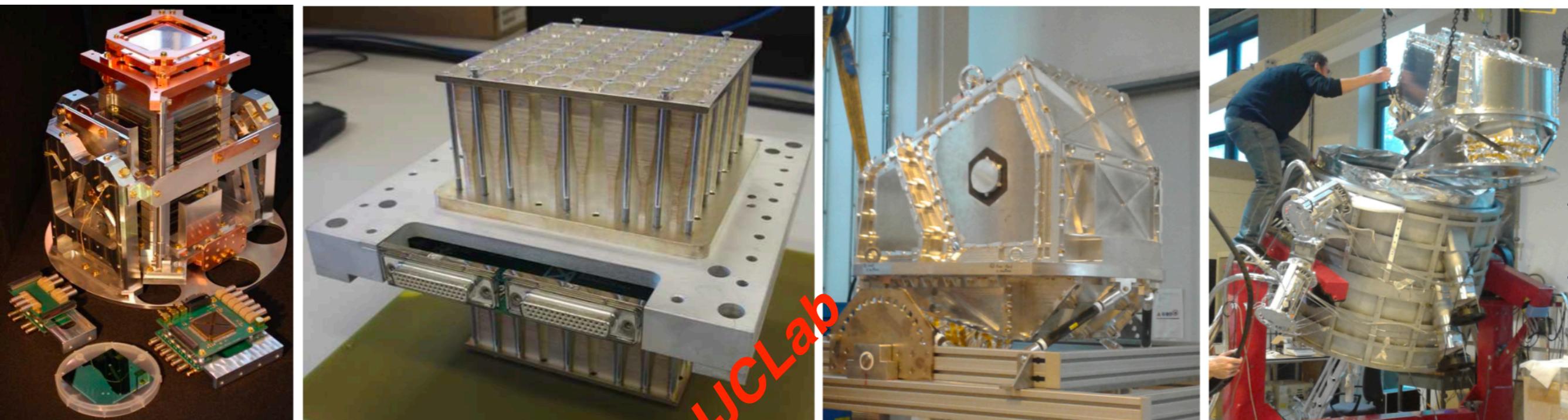


Band	Number of KIDs	Wavelength	Bandwidth
NIKA2 2 mm/150 GHz	616	2.00 mm	125-170 GHz
NIKA2 1 mm/260 GHz	2x1140	1.15 mm	240-280 GHz

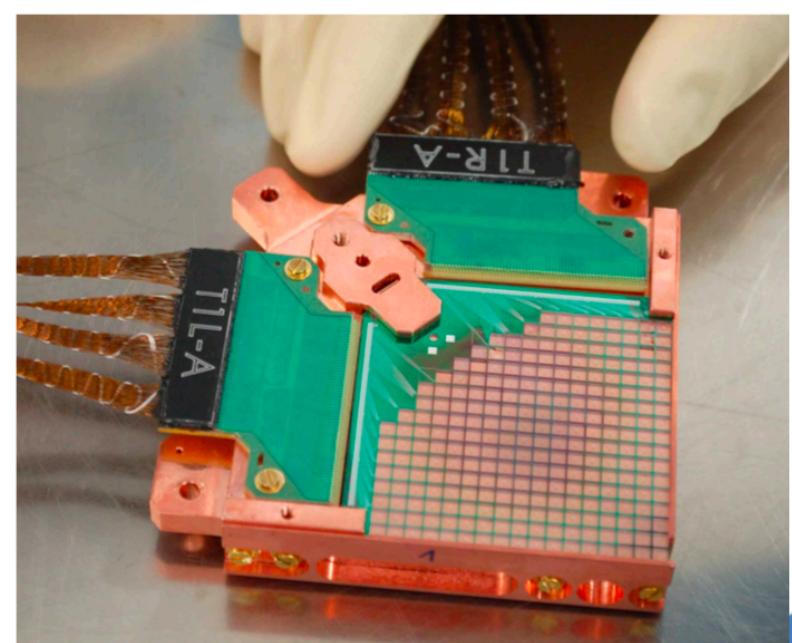
3 Matrices de KIDS (kinetic inductance det.)

- ◆ Cryostat 150 mK
- ◆ 3000 pixels. 150 & 260 GHz
- ◆ Only 20 feed lines and 20 HEMT LNA@4K !
- ◆ LPSC 300K elec.

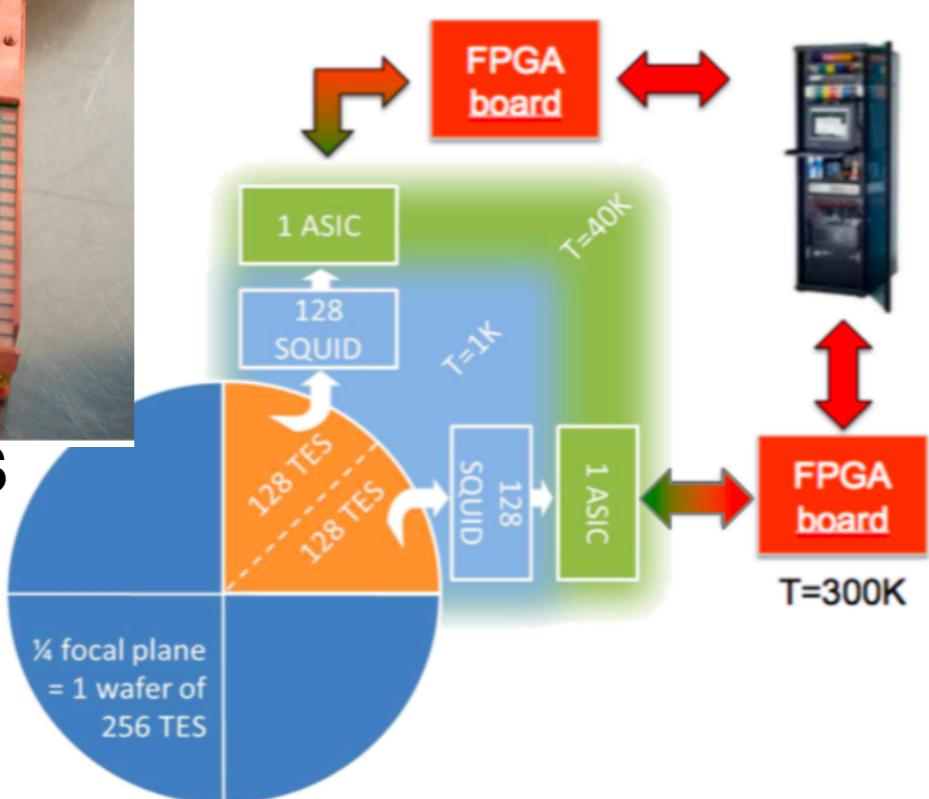
Ex. de réalisation : QUBIC



<https://arxiv.org/abs/1812.00785>



Matrice NbSi TES
(IJCLab)



Démonstrateur Technologique@APC

déploiement possible en Argentine
(2020)

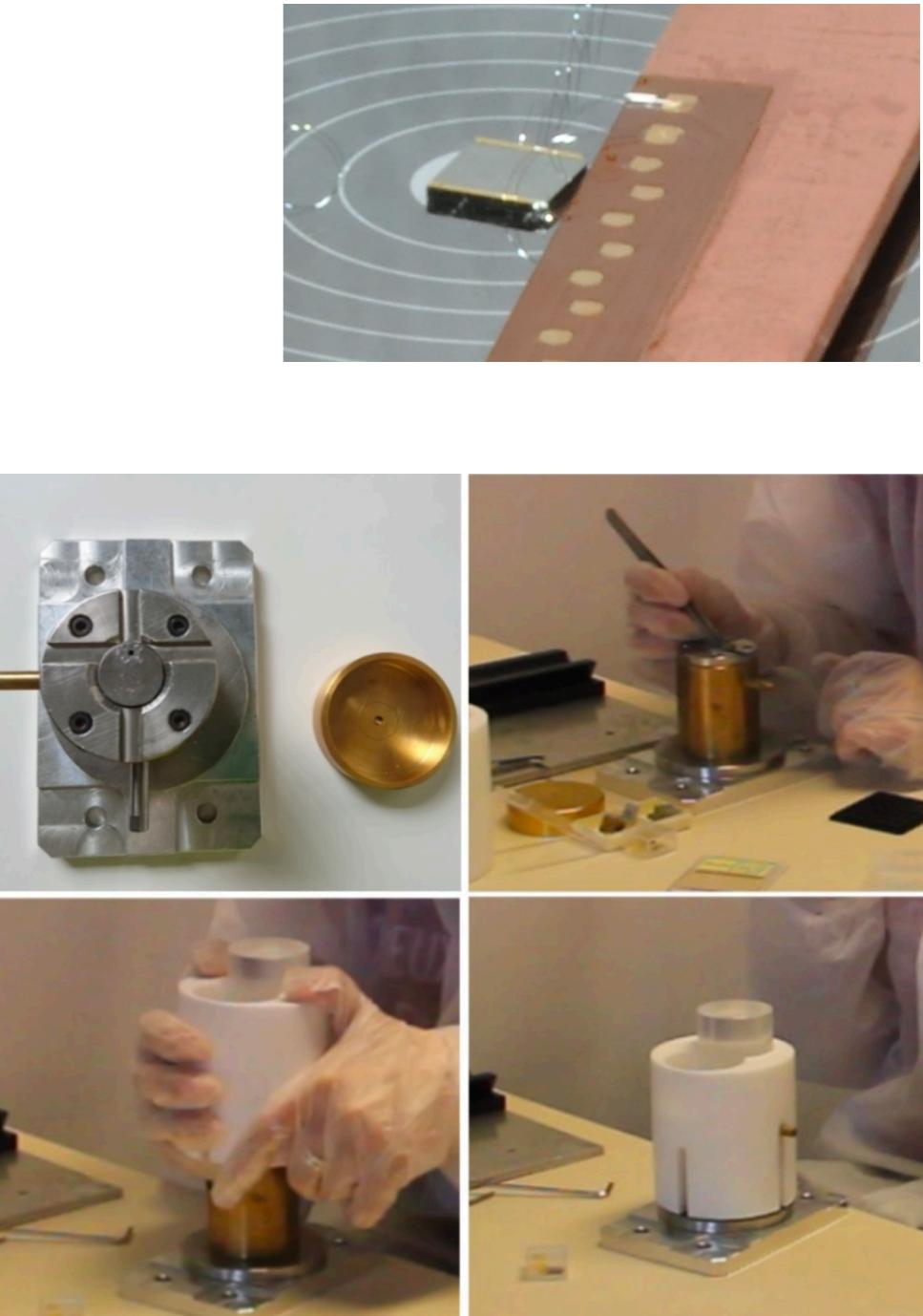
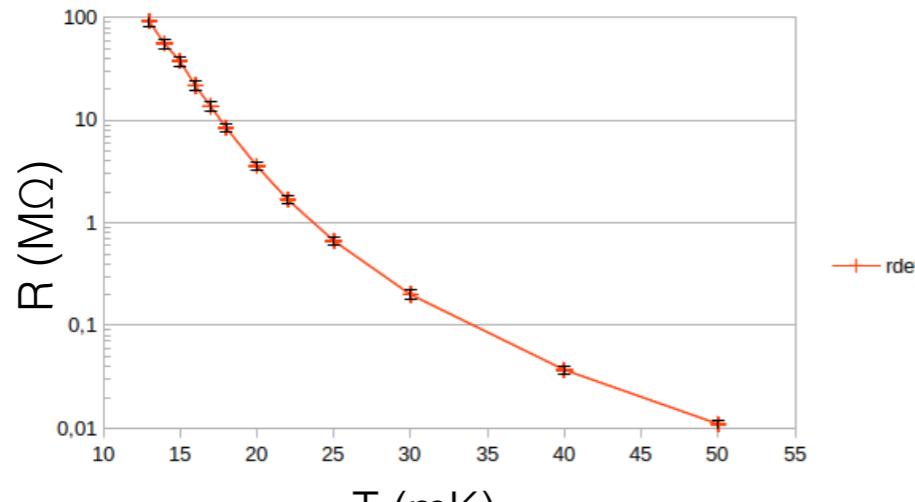
- ♦ Interférométrie bolométrique
- ♦ Cryostat 300 mK
- ♦ 248 pixels NbSi supra (2000 sur Inst. final).
- ♦ 150 GHz (+ 220 GHz sur Instr. final)
- ♦ Custom squids + ASIC cold elec (AMS 0.35 SiGe)
- ♦ 128:1 multiplexage

Prospective R&D : senseurs thermiques Ge-NTD

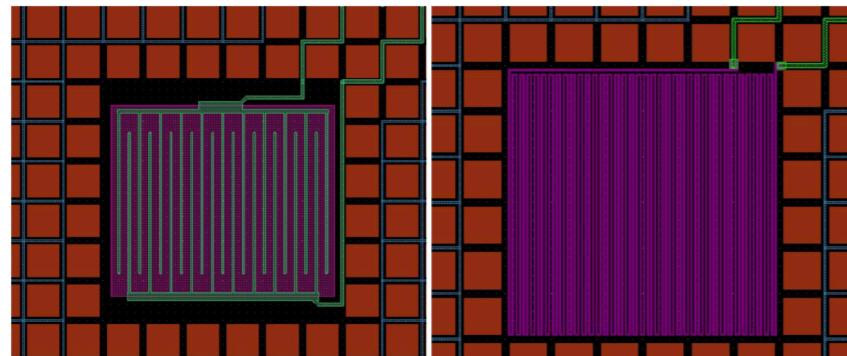
Ge-NTD (IJCLab, IP2I)

Semiconducteur dopé par neutron. Proche de la transition métal isolant.

- ◆ Production de NTD auprès de réacteur de recherche possible en France
- ◆ Production récente (2015) dans le cadre de l'ANR LUMINEU (CSNSM - CEA)
- ◆ Pas de nouvelle production envisagée. Contact avec d'autres filières.
- ◆ **R&D : Optimisation**
 - découpe, métallisation, collage.
 - Gros travail de sélection et de mesure de possible bruit en excès
 - **préparer les besoins futurs (1000s of NTDs sur 10 ans)**



Prospective R&D : senseurs thermiques NbSi



Basse Impédance Haute Impédance

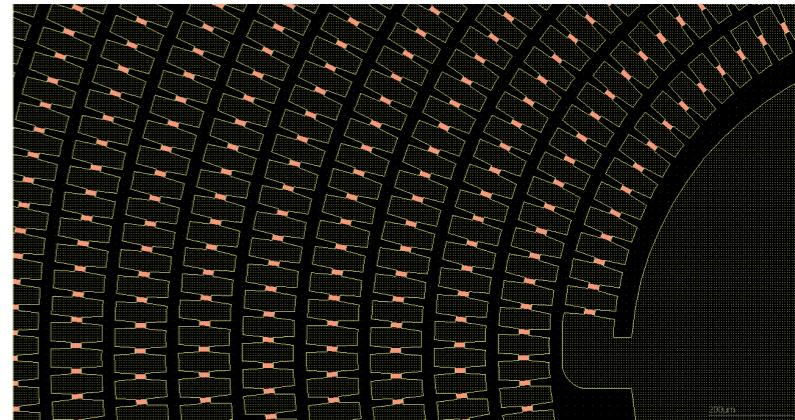
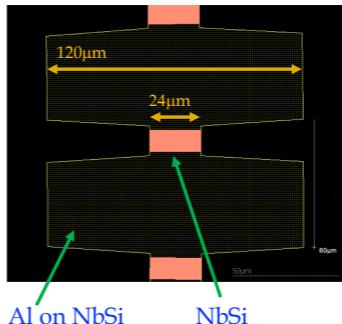
Nb_xSi_{1-x} (IJCLab)

Alliage proche de la transition métal-isolant ou supra

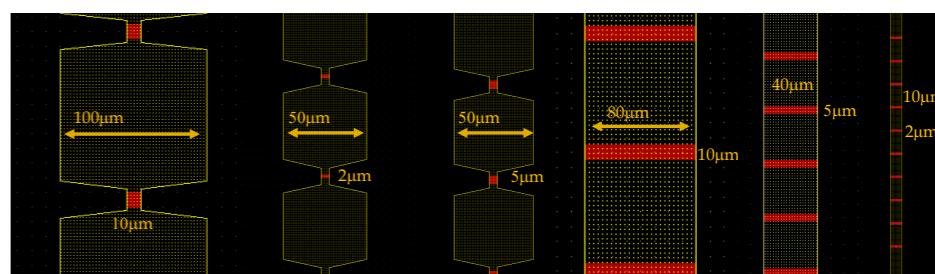
- ◆ > 20 ans de développement. Co-évap film mince
- ◆ Convergence vers **supra haute ou basse impédance**
- ◆ Techniques de **micro-lithography** (CNRS/C2N) adaptées pour **matrices de détecteurs** (QUBIC) **ET bolomètres massifs** (EDELWEISS, Ricochet).
- ◆ **R&D :**
 - minimiser la chaleur spécifique en alternant les parties senseurs et **pièges à phonons**
 - veto pour **événements de surface** de basse énergie (états supra« metastable »)

The NbSi phonon-trap design

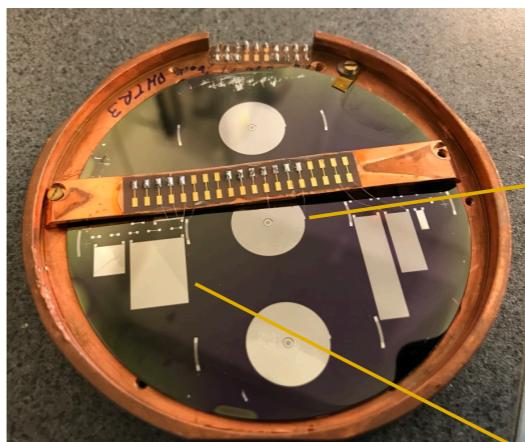
17000 NbSi-Al cells in series to form a spiral



Other tested designs ...
10 μm, 5 μm
and 2 μm TES

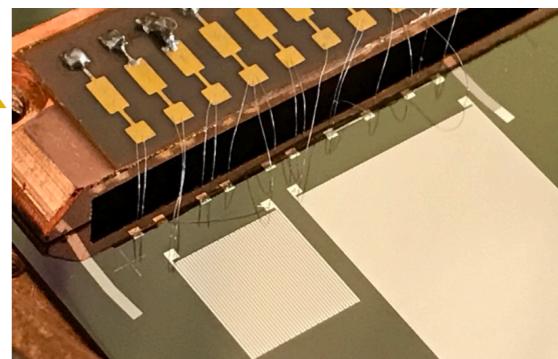
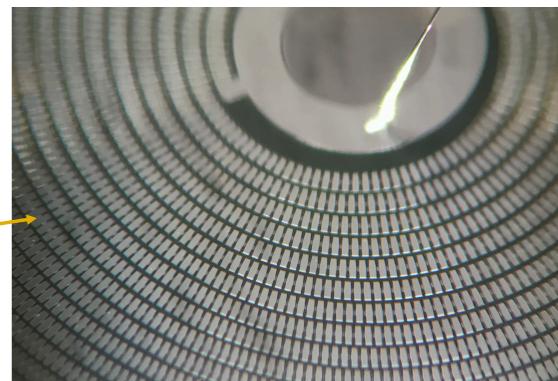


NbSi "PhononTrap" samples



Four Si wafers with several phonon-trap designs were realized

Samples with TES islands ≥ 5 μm are OK
Samples with 2 μm TES have some problems

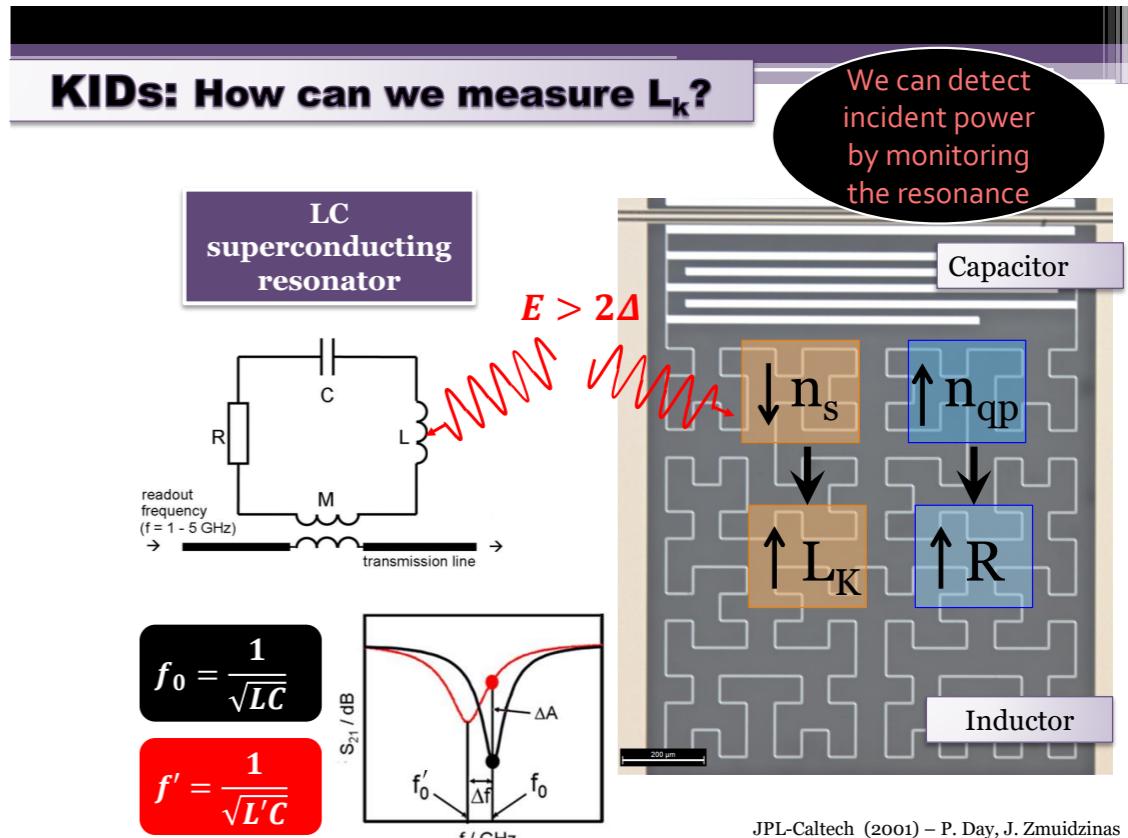


Prospective R&D : senseurs KIDs

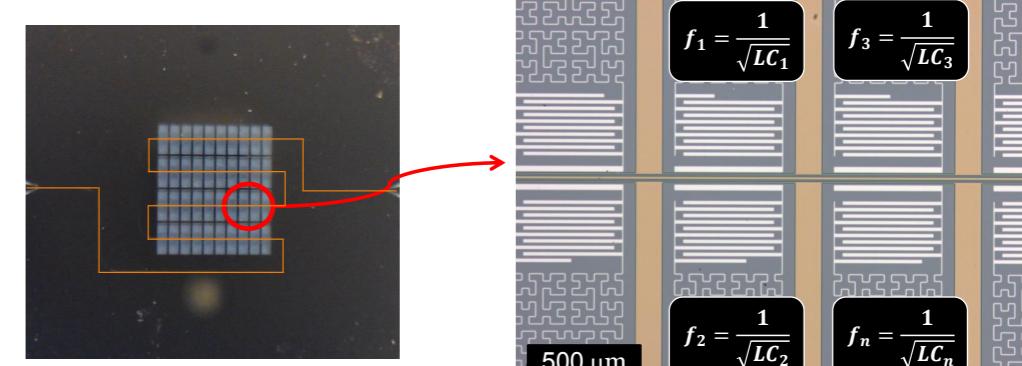
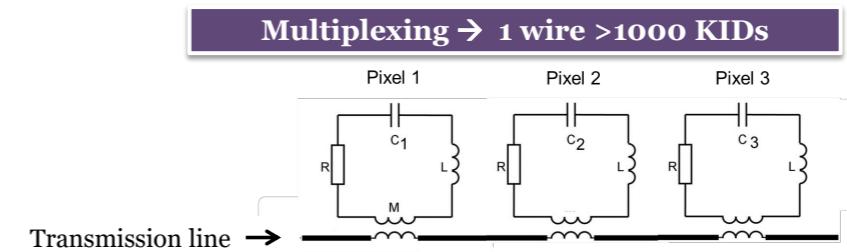
Kinetic Inductance Detector (I. Néel, LPSC, APC)

= Résonateur supraconducteur

- ♦ Résonance dépend de la densité de paire de Cooper : **sensible à tout dépôt $E > \Delta_s$**
- ♦ **Initié en 2000** par Caltech/JPL
- ♦ gros driver France : NIKA2 + Néel group
- ♦ **R&D :**
 - haut niveau d'intégration : **R&D KIDs = R&D détecteur**
 - Pour le moment techno Al mature mais bande passante limitée (gap supra)
 - Objectif : **élargir la bande à 50 - 650 GHz**
 - **diminuer T_c** (T_c Al = 1.4K)
 - Al-Ti ou autre matériaux
 - Sensibilité au phonons
 - **detection de particule** (IP2I)



KIDs: What is the main advantage?



Prospective R&D : Bolomètre massif

3 développements principaux :

- ♦ **0ν2β** (désintégration double beta sans émission de neutrino) :
 - préparer la suite de CUORE = **CUPID**
 - **CUPID-Mo @ LSM**
 - objectif 1 tonne de détecteur avec discrimination active du fond
- ♦ « Crise » de la **Matière Noire** : aucun signe de détection directe + absence de nouvelle physique au LHC
 - « Fin » du WIMPs standard, Élargir la recherche (**EDELWEISS-SubGeV**)
- ♦ Recherche de nouvelle physique via mesure fine **CEνNS (Coherent Elastic neutrino-nucleus scattering)**
 - pousser la discrimination à très bas seuil (**Ricochet**)
- ♦ Nombreuses autres applications :
 - Spectro neutrons rapides, observation décroissance rare, métrologie, etc.

Prospective R&D : CUPID

CUPID

CUORE Upgrade with Particle Identification

- ◆ 30 instituts, 100aines de personnes
- ◆ Long **processus de selection des R&D**
 - <https://arxiv.org/abs/1504.03612>
- ◆ R&D France (**CUPID-Mo**, IJCLab-IP2I + CEA) **sélectionnée comme base de CUPID**
 - <https://arxiv.org/abs/1907.09376>
- ◆ R&D en site souterrain : Projets CROSS, BINGO
- ◆ **programme à ~10 ans**

Parameter	CUPID	CUPID-reach	CUPID-1T
Crystal	$\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$	$\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$	$\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$
Detector mass (kg)	472	472	1871
^{100}Mo mass (kg)	253	253	1000
Energy resolution FWHM (keV)	5	5	5
Background index (counts/(keV kg y))	10^{-4}	2×10^{-5}	5×10^{-6}
Containment efficiency	79%	79%	79%
Selection efficiency	90%	90%	90%
Livetime (years)	10	10	10
Half-life exclusion sensitivity (90% C.L.)	1.5×10^{27} y	2.3×10^{27} y	9.2×10^{27} y
Half-life discovery sensitivity (3 σ)	1.1×10^{27} y	2×10^{27} y	8×10^{27} y
exclusion sensitivity (90% C.L.)	10–17 meV	8.2–14 meV	4.1–6.8 meV
discovery sensitivity (3 σ)	12–20 meV	8.8–15 meV	4.4–7.3 meV

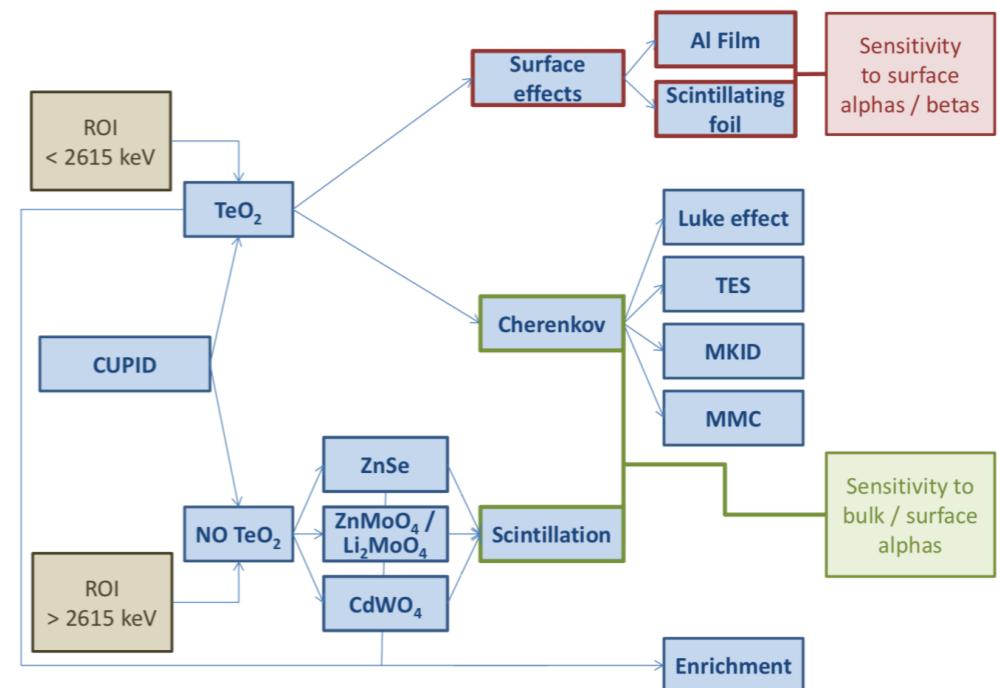


FIG. 1: Scheme of the R&D detector activities for CUPID

Prospective R&D : EDW-Sub GeV

« small is beautiful ! »

- ◆ Pas d'observation de WIMPs « standard » ($M >$ qq GeV) avec des taux d'interactions < 1 evt/tonne/an !
- ◆ Les détecteurs cryo ne sont plus compétitifs dans cette zone
- ◆ Intrinsèquement compétitif à basse masse (résolution et seuil)
- ◆ bonne nouvelle : si DM = Sub-GeV WIMPs il y en a donc beaucoup plus !
 - **1 kg de « bons » détecteurs est compétitif**
- ◆ Axion & ALPs : Reculs électroniques
 - **! fond parasite « chaleur seule »**
- ◆ **Objectif R&D : IPNL IJCLab (+ CEA)**
 - Tenue en tension (courant fuite) pour **« boost » effet Luke**
 - Discrimination jusqu'à la **paire e-/h+ unique**
 - Changement de technologie elec. froid
 - Si-JFET → **HEMT** (C2N/CNRS)
- ◆ **programme à ~ 5 ans**

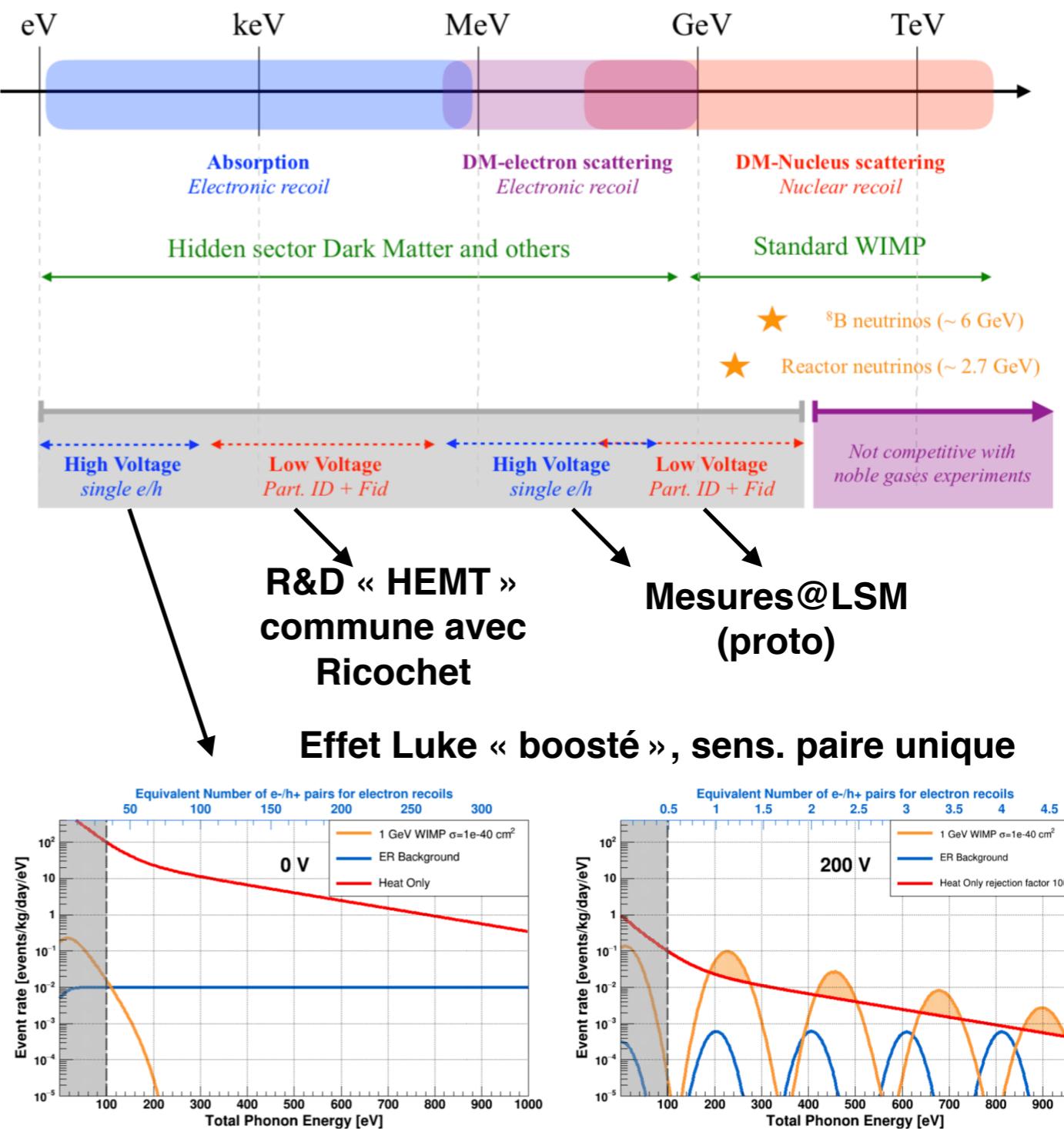


Figure 1: Response of the CRYOSEL detector operated at 0 V (left) and 200 V (right). Orange: expected NR signal for a $1 \text{ GeV}/c^2$ WIMP with a scattering cross-section of 10^{-40} cm^2 . The blue and red lines correspond to the ER and heat-only backgrounds observed in EDELWEISS detectors. The shape of the NR response is sensitive to the actual quenching factor and straggling effects for this type of interaction. In right panel a rejection factor of 1000 is considered for HO events.

Prospective R&D : Ricochet

Mesure de précision d'un signal connu !

IPNL, IJCLab, LPSC, I. Néel

- ♦ changement de philosophie après la Matière Noire
- ♦ **Mesure du CE ν NS pour ν de 5 MeV**
(mesuré en 2018 @ 30 MeV)
- ♦ Cahier des charges « simple »
 - **1 kg Ge (27*38g)**
 - **20 eV ion + 10eV chal**
- ♦ R&D en partie techno (transistor HEMT) et commune avec EDELWEISS

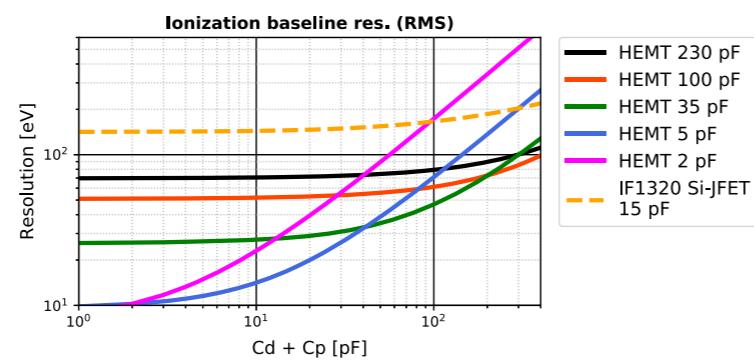
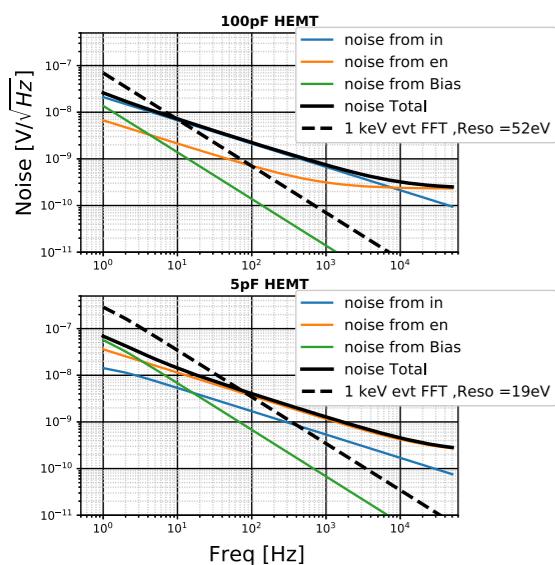


Fig. 5 Left: Contribution to the ionization resolution of the voltage noise, current noise, bias resistor ($10\text{ G}\Omega$ @ 20 mK). The total detector + cabling capacitance is 20 pF. 5 pF and 100 pF geometries have been studied. FFT of 1 keV event are shown. Right: Evolution of the resolution with the detector+cabling capacitance for the 5 HEMT geometries and the IF1320 Si-JFET from InterFET. Noise of the bias resistor is included. (Color figure online.)



Réacteur 60 MW @ ILL / Grenoble

- ♦ Installation Ricochet prévue 2022-23
- ♦ **programme à ~ 5 ans**

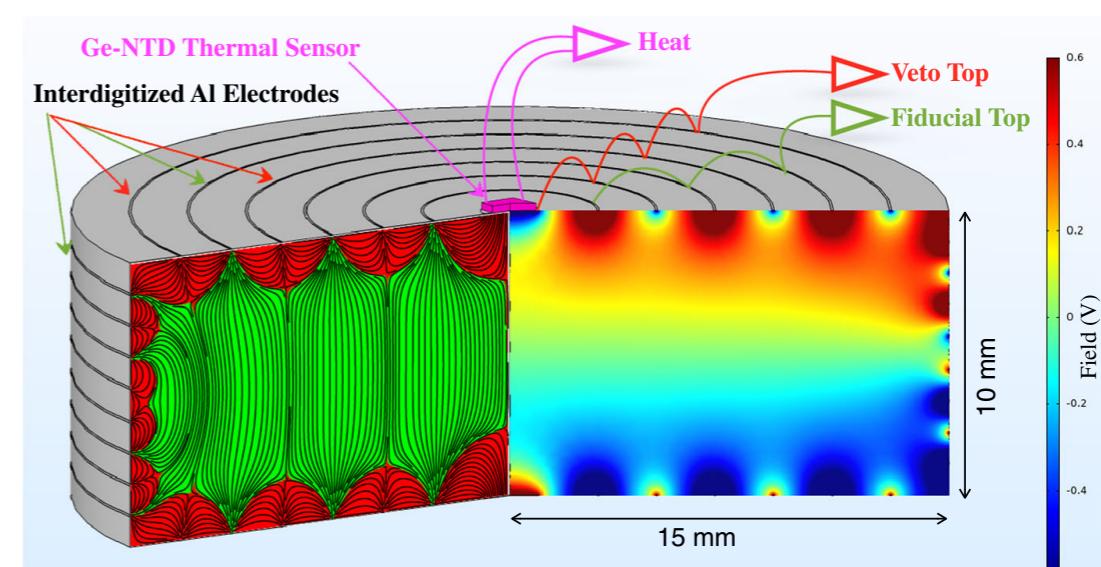


Fig. 6 Electrostatic simulation of a Full Inter-Digitized electrodes scheme on a 38 g germanium crystal ($\Phi = 30\text{ g}$, $h = 10\text{ mm}$). The crystal is surrounded at 2 mm distance by a chassis connected to the ground (not shown). The capacitance of the 4 electrodes with respect to the ground is about 20 pF (Color figure online.)

Prospective R&D : Instruments astro sub-mm

Prospective IN2P3 GT05 :

♦ Short-term goal (2019-2020):

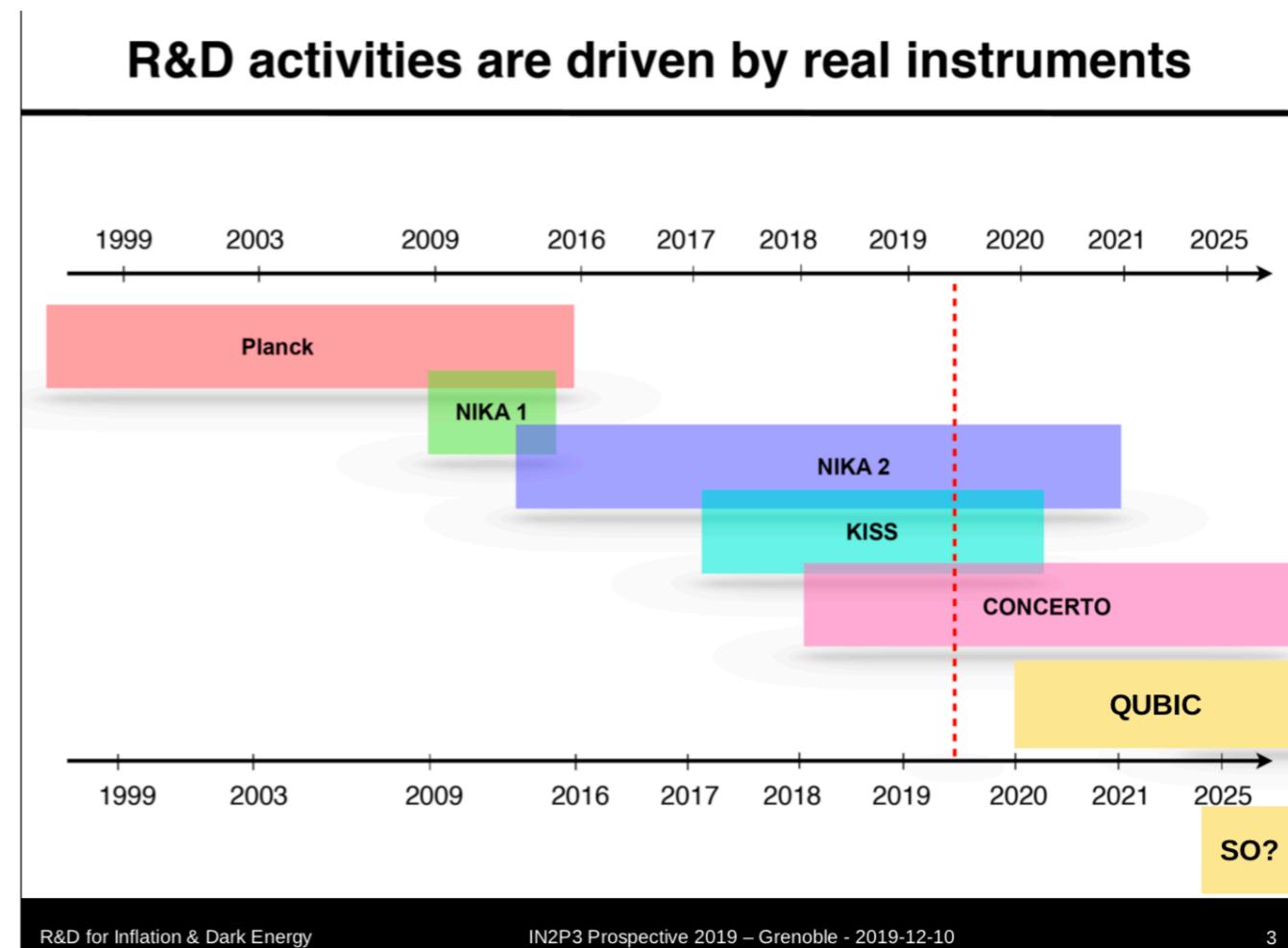
- Maintain **KID activity** with **existing instrument NIKA2 and KISS** ensuring upgrades to increase the performance.
- **Install QUBIC** at 5000m site in Salta province, Argentina. Demonstrate Bolometric Interferometry on sky data

♦ Mid-term goal (2020-2024):

- **installation of CONCERTO** (KIDs, 2021). Maintain the observations for several years.
Begin studying the design for S4-like instruments.
- **Data taking with QUBIC Technical Demonstrator.**
Upgrades: Multimode horns, 400 horn array, additional focal plane for 220GHz

♦ Long-term goal (2024-2030):

- be ready to **answer to the expectations of the S4 network**. Be a valid candidate for covering the focal plane of the **next generation space mission** devoted to the CMB
- Large QUBIC-like instrument with KID detector array, proposed as part of the S4 collaboration
- Bolometric Interferometer in the focal plane of LLAMA



Prospective R&D : QUBIC

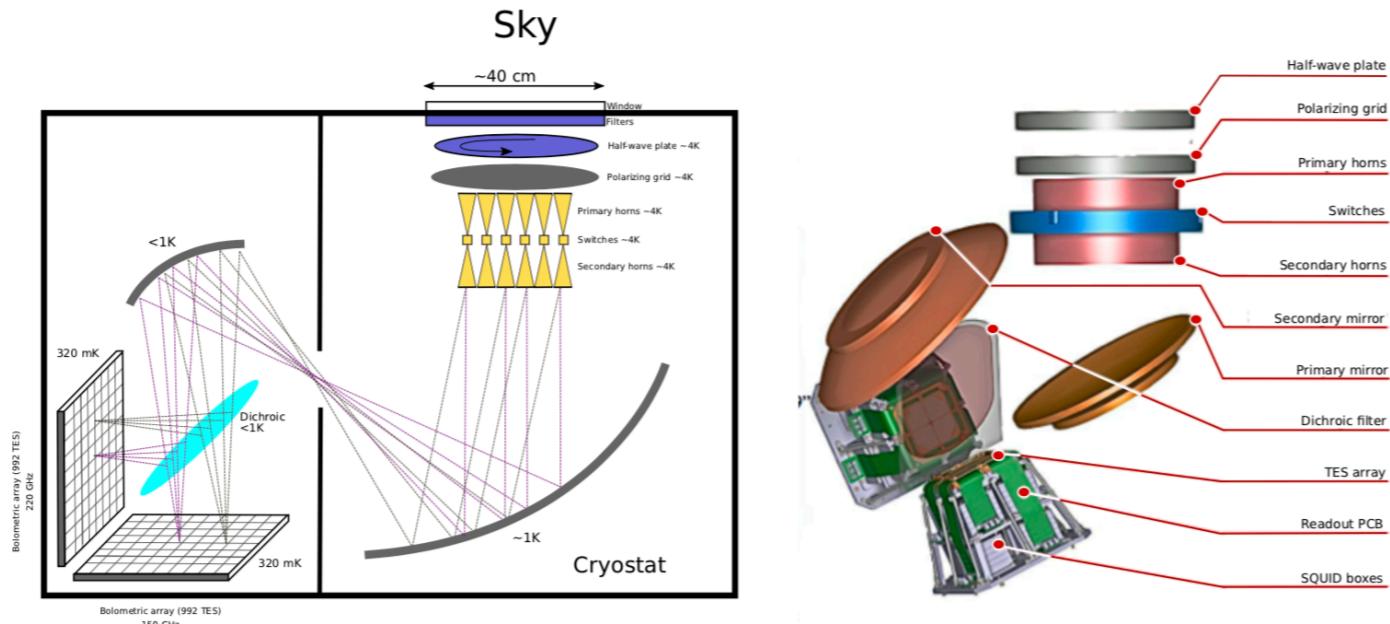


Figure 1. (Left) Schematic of the QUBIC instrument. The window aperture is about 40 cm; the cryostat is about 1.41 m in diameter and 1.51 m in height; (right) 3D rendering of the inner part of the cryostat. TES, Transition Edge Sensor.

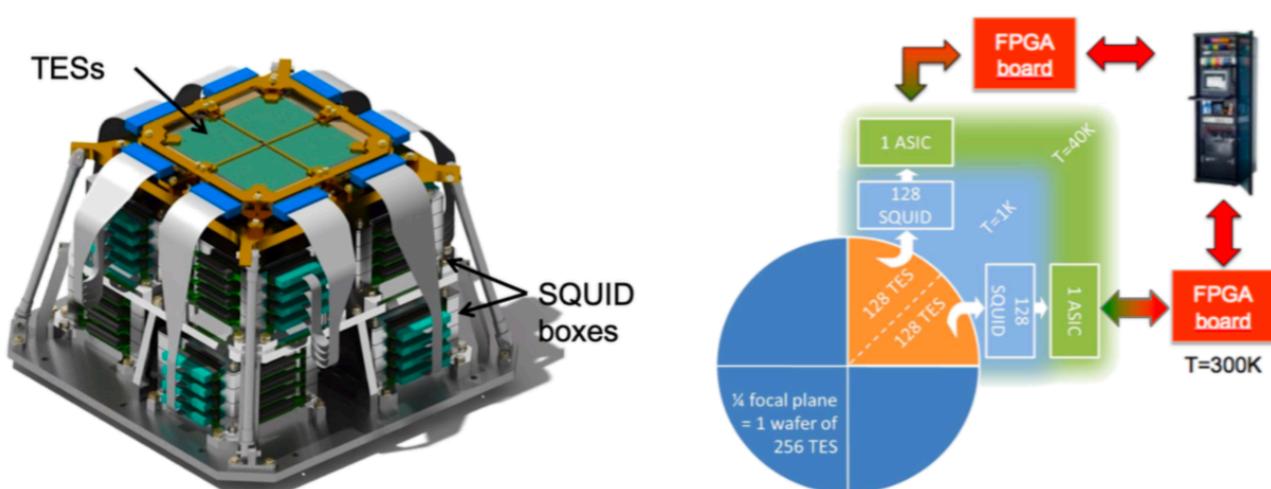
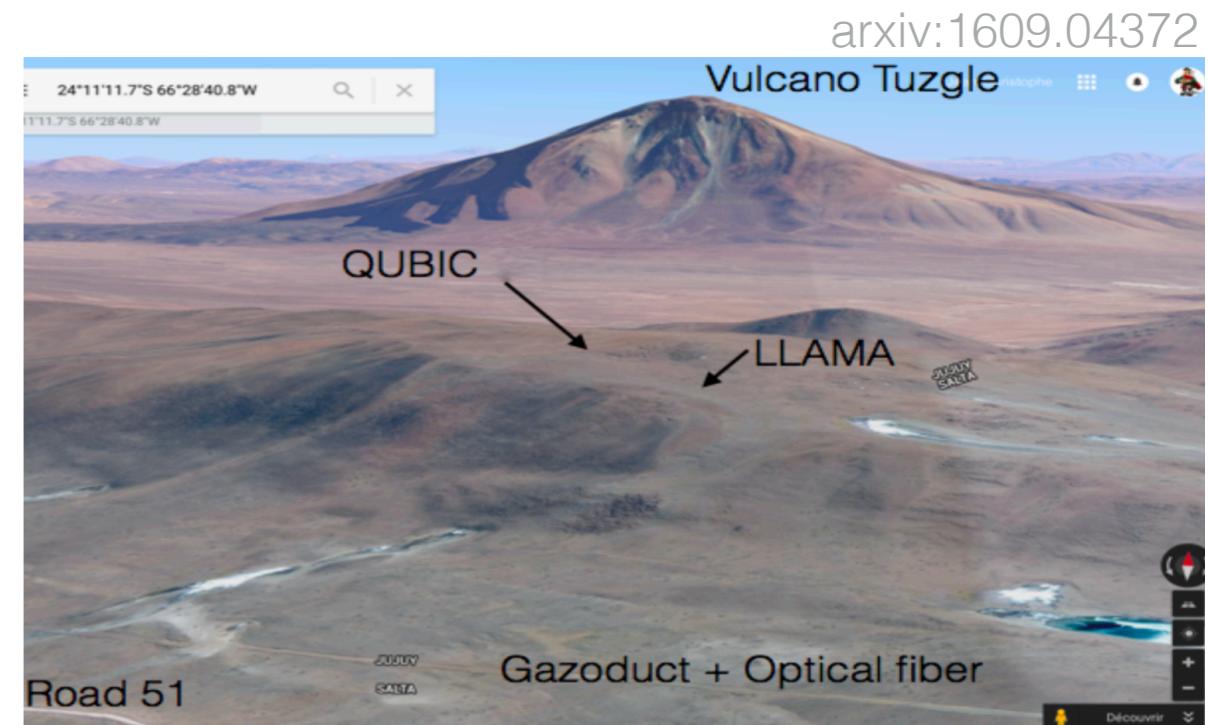


Fig. 2 Left: QUBIC cryo-mechanical structure which supports one TES focal plane at 350mK on top and the SQUID boxes at 1K below. Right: Architecture of the QUBIC detection chain for one focal plane of 1024 channels. (Color figure online.)

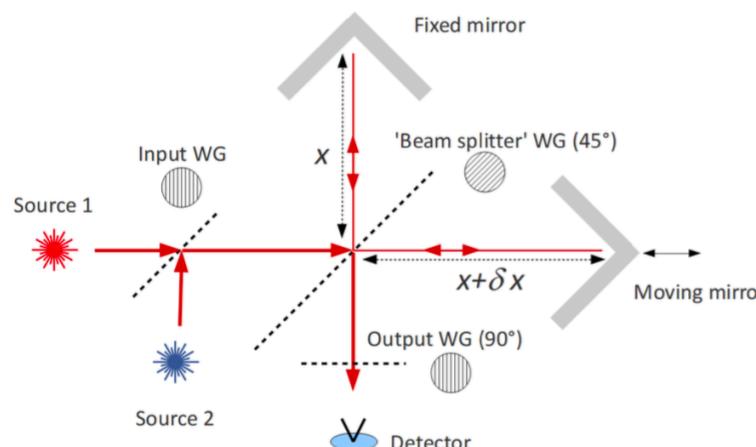
Démonstrateur Technologique @ APC
= 1/8 Instrument Final @ La Puna
(Argentina)
♦ programme à ~ ? ans
♦ décision de déploiement sur site en attente

Prospective R&D : KISS & Concerto

Vue d'ensemble
Passé : Planck
Exemples actuels
Zoom sur N2+K+C

Alternative : spectrométrie MPI

- Avantage : côté détecteurs simplifiée, grands plans focaux possibles
- Problèmes : vitesse, course, échantillonnage...



- Approche choisie pour KISS et CONCERTO !

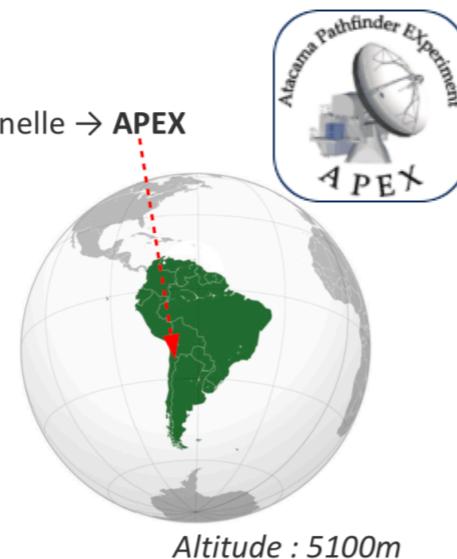
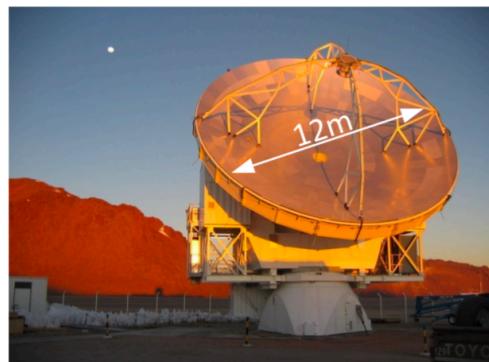
Martino Calvo

32

École DRTBT, Aussois, 13/12/18

CONCERTO et la cartographie du CII

- CONCERTO : un spectromètre dédié à la cartographie du CII
- ~100 bandes entre 200 et 360GHz
- Nécessite un télescope et un site exceptionnelle → APEX



Altitude : 5100m

Martino Calvo

42

École DRTBT, Aussois, 13/12/18

Vue d'ensemble
Passé : Planck
Exemples actuels
Zoom sur N2+K+C

KISS : étude détaillé du SZ

- NIKA2 : 2 bandes
- KISS : ~100 bandes !

Installation sur le télescope QUIJOTE à Tenerife
2.5m diamètre, 2300 mètres d'altitude



Martino Calvo

35

École DRTBT, Aussois, 13/12/18

KISS « Pathfinder pour CONCERTO et spectre MPI »

Averaged sky angular resolution	3.5 arcmin	Number of KIDS	500
Spectral range GHz	80 - 250 GHz	Frequency resolution δ_ν	1.5 GHz
Quijote telescope size	2.5m	Round FOV, Diameter	1 deg
End-to-end optical efficiency	0.3	^3He - ^4He dilution cryostat	100 mK
# of expected observed clusters	10	Expected integration time	3000 hours

CONCERTO Installation 2021

Averaged sky angular resolution	27 arcsec	Number of KIDS	1500
Spectral range GHz	200 - 360 GHz	Frequency resolution δ_ν	1.5 GHz
LLAMA telescope size	12 m	Round FOV, Diameter	12 arcmin
End-to-end optical efficiency	0.3	^3He - ^4He dilution cryostat	100 mK
[CII] survey field size	2 deg ²	[CII] survey integration time	1500 hours

Installé depuis
fin 2018

R&D Readout : discret & ASICs

- ♦ Les **détecteurs cryogéniques** nécessitent une **électronique de lecture spécifique (cryo + 300K)**
- ♦ **Développements discrets (HEMT, JFET, SQUID) et ASIC**
 - **Multiplexeur CMOS AMS 0.35 T<1K** pour astronomie infrarouge (SPICA - IRFU)
 - **Multiplexeur BiCMOS SiGe AMS 0.35 (→ST 130nm) T=4-40K** pour astronomie millimétrique (QUBIC - APC)
 - **Multiplexeur BiCMOS SiGe AMS0.35 T=2.5-15K** pour l'astronomie X (IRFU)
 - **Contrôle et lecture bas bruit "chaude"** (hors cryostat) d'une chaîne de détection cryogénique BiCMOS SiGe AMS 0.35 (→ST 130nm) (APC)
- ♦ Première problématique de prospective : **maintien/transfert des technologies AMS 0.35 pour les futurs missions SPICA et ATHENA.**
- ♦ Adaptation aux nouvelles techniques de multiplexage, notamment le **MicroWave Multiplexing -> bande GHz**
 - ↗ nombre de pixel, **convergence readout KIDs-TES**

Conclusion

- ♦ Les **détecteurs cryogéniques** sont arrivés à maturité et sont **intégrés dans des instruments complexes** et des sites exigeants (Labo souterrain, ballon, satellites, télescope, etc)
- ♦ Quelques grands **projets fédérateurs avec participation IN2P3** bien identifiés sur les 10 prochaines années
- ♦ Les premières discussions informelles ne montrent pas un consensus fort à la participation à un futur GDR « détecteur » dont le contour semble trop grand (regroupe toutes les compétences IN2P3). La communauté cryo n'est pas en manque de projet.

Rappel retour GT08 prospectives IN2P3:

- ♦ Effet ANR / Labex / ERC : **foisonnement de projets** avec des objectifs à court-terme.
 - Au final peu de contrôle sur cette explosion par l'IN2P3 (incitation à la recherche de financement de ce type)
 - **Saturation des services techniques**
- ♦ Développements longs : **Maintien des compétences sur la durée difficile**
 - Nombreuses tâches techniques assurées par des post-docs et CDD

Microtechnology Process

KIDs arrays for NIKA2

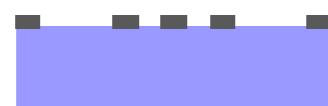
Standard technological Process : Clean Room



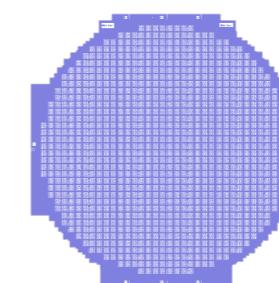
On a 4 inch silicon mono crystalline and high purity ($> 1000\Omega \cdot \text{cm}$) wafer, a thin layer (18nm) of aluminium is coated by electron beam evaporator (under a residual vacuum 5.10^8 mbar)



Print patterns via optical lithography ($\lambda = 365\text{nm}$) through a dedicated mask



The metal is etched by a chemical (phosphoric acid) solution through resist apertures.



Hard points: The homogeneity of the aluminum layer, have a full 4 inch surface without major defects (dust, bubbles)

Microtechnology Process

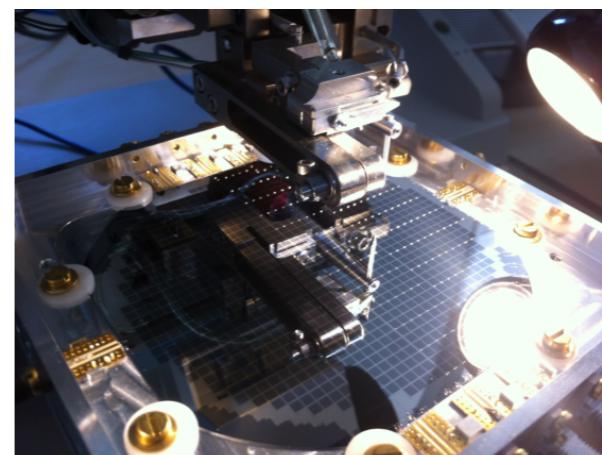
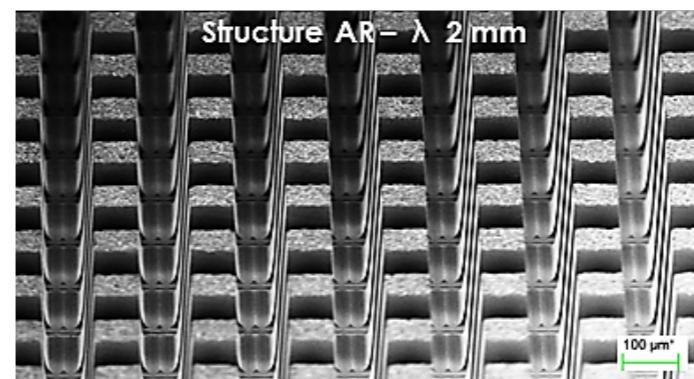
KIDs arrays for NIKA2

Standard technological Process: Packaging

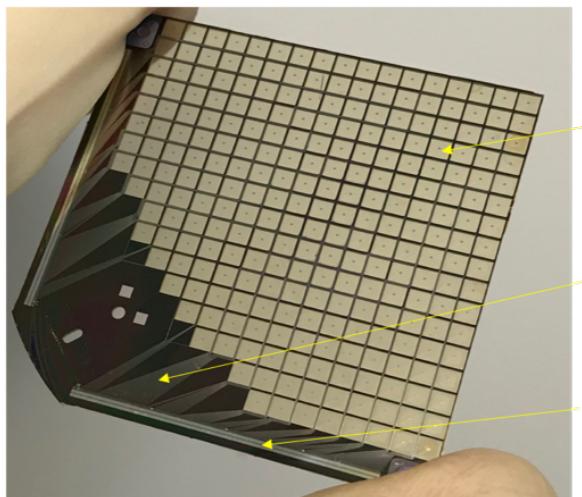
Dicing the edges of the array, and structure the backside of array to add a function of optical adaptation layer (AR).

The AR strategy is to reduce the silicon density by grooves to obtain an effective index
 $n_{void} = 1 < n_{adapt} \sim 2 < n_{Si} \sim 3.4$

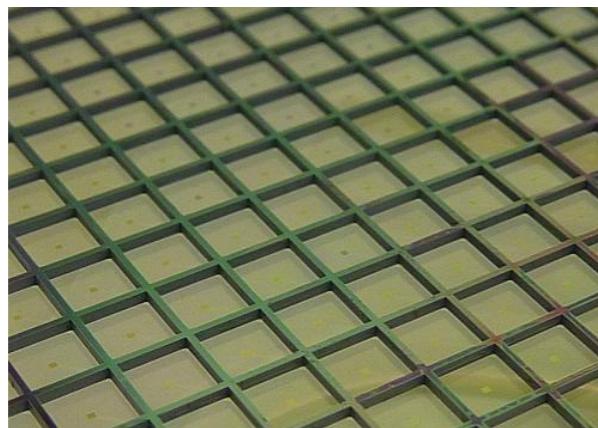
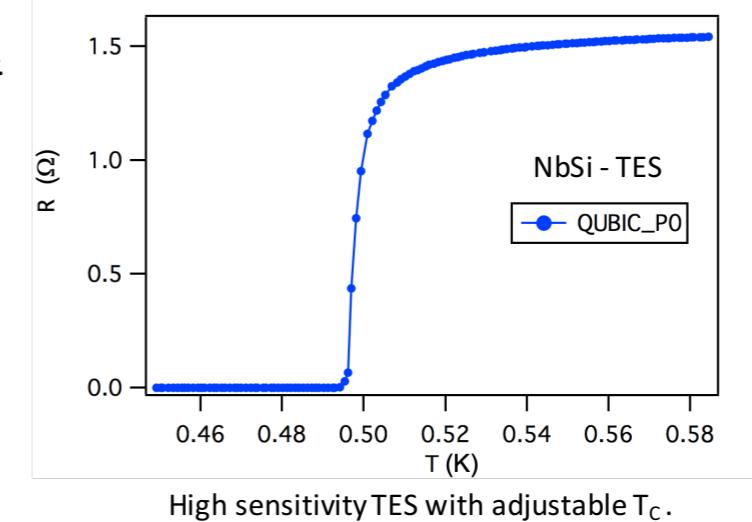
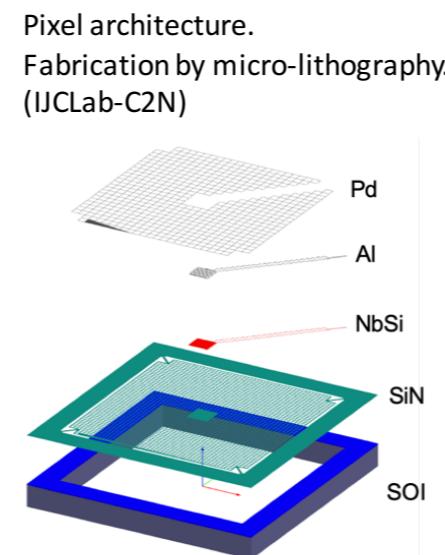
After mounting in a dedicated holder, connect the feedlines and improve the equipotentiality of the ground plan by sticking small bridges above the signal line (25 μ m diameter wires).



NbSi array for QUBIC



250 pixel array for QUBIC.
(full focal plane = 4 arrays)



Deep silicon etching on the backside
to realise the suspended membrane
of the pixels.
High thermal decoupling to optimise
signal/noise of the detector.

