



Les détecteurs cibles de la R&T BiCMOS

AG du GDR DI2I
IP2I Lyon, 2025



Pourquoi la R&T BiCMOS

- La R&T BiCMOS est une réponse concrète à une recommandation émise par un GT précurseur de la Microélectronique des Deux Infinis MI2I
 - Rapport du Groupe de travail “Roadmap Microélectronique@IN2P3” de 2021 sur Atrium
- Nécessité de maintenir une ou deux technologie ASIC **CMOS** / **BiCMOS**(SiGe) pour des besoins spécifiques en astroparticules et physique nucléaire
 - Sans contrainte très forte sur la densité d’intégration (détecteur pixel LHC)
 - Sans contrainte forte sur la tenue aux radiations ~50 Mrad (LHC)
 - Et avec ces qualités :

	Dynamique	Coût fonderie	Design mixte	Accès fondeur	Pérennité	Bruit en 1/f faible	Gain-Bande élevé	Driver fort courants en BF et HF	Performanc e à T < 70K
SiGe L > 130 nm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CMOS L > 130 nm	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗

➤ Axe 1 : BiCMOS

- Trouver un fondeur ==> **IHP130nm SG13S** et SG13G2 (open source)
- Évaluer la technologie ==> **Run 1** lancé en Juillet 2024, **circuits livrés**, actuellement réalisation **carte de test**
- Publier les résultats ==> Papier «Transactions on circuits and Systems, IEEE »

➤ Axe 2 CMOS : Comparaison de technologies CMOS/BiCMOS par :

➤ Simulation de **facteurs de mérites**

- transconductance efficiency : g_m/I_d
- speed efficiency : $f_t \cdot (g_m/I_d)$
- intrinsic gain : $g_m \cdot r_o$
- total equivalent input noise density at W_{ref} , TBC
- Dynamic : $V_{out}^{max} / \text{Noise}_{in}^{min}$, TBC

====>

- transition frequency : f_t
- gain band product : $f_t \cdot g_m \cdot r_o$
- slew rate : $f_t \cdot I_d / g_m$

- Production d'un **document de référence** confidentiel(NDA) pour **comparaison des technologies** : AMS 0.35, ST 130 SiGe, IHP 130, XFAB 180, TSMC 130, ON Semi 350
- Trouver un fondeur ==> **XFAB180nm** XH et XT180 (SOI) : NDA globale
 - Evaluer la technologie ==> pas de run mais retour d'expérience du **run LPC Caen**

Qui sommes nous ?



=



+



+



+



+



- 11 Ingénieurs : Didier Charrier Subatech - porteur, Damien Prêle APC - co, Ludovic Alvado LPC Caen, Edouard Bechetoille IP2I, Si Chen APC, Manuel Gonzalez APC, Laurent Leterrier LPC Caen, Fatima Mehrez LPP⁽¹⁾, Jean Mesquida APC, Patrice Russo IP2I, Bao Ton APC
(1) *Laboratoire de Physique des Plasmas (CNRS Ingénierie)*

- 2 Chercheurs : Michel Piat APC, Dominique Thers Subatech
- Le projet de Recherche et Technologie BiCMOS est financé par le CNRS Nucléaire & Particules depuis 2022

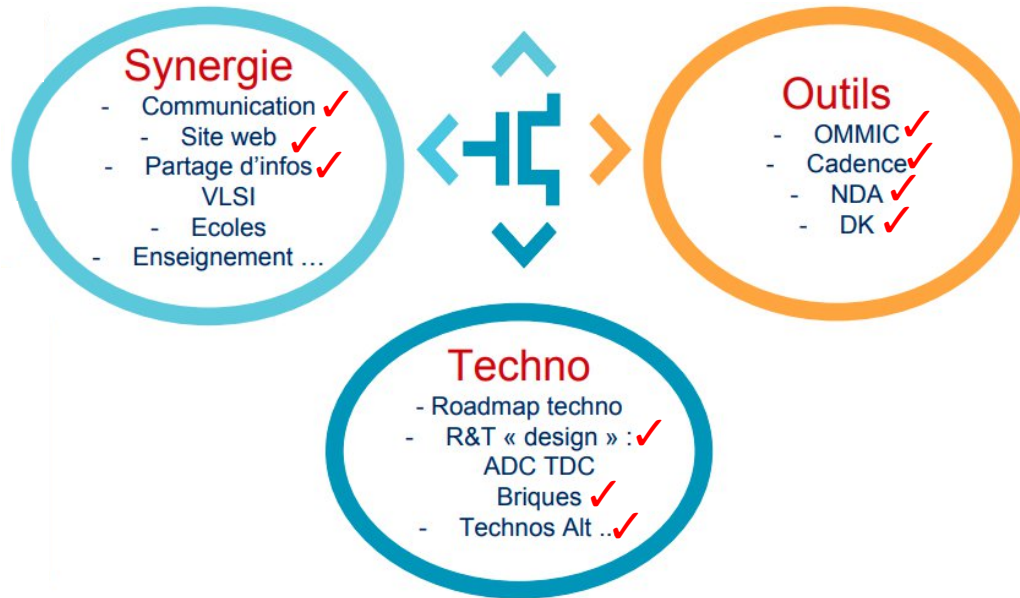


Journées R&T BiCMOS, Nantes, 8&9 octobre 2024

Environnement de la R&T BiCMOS

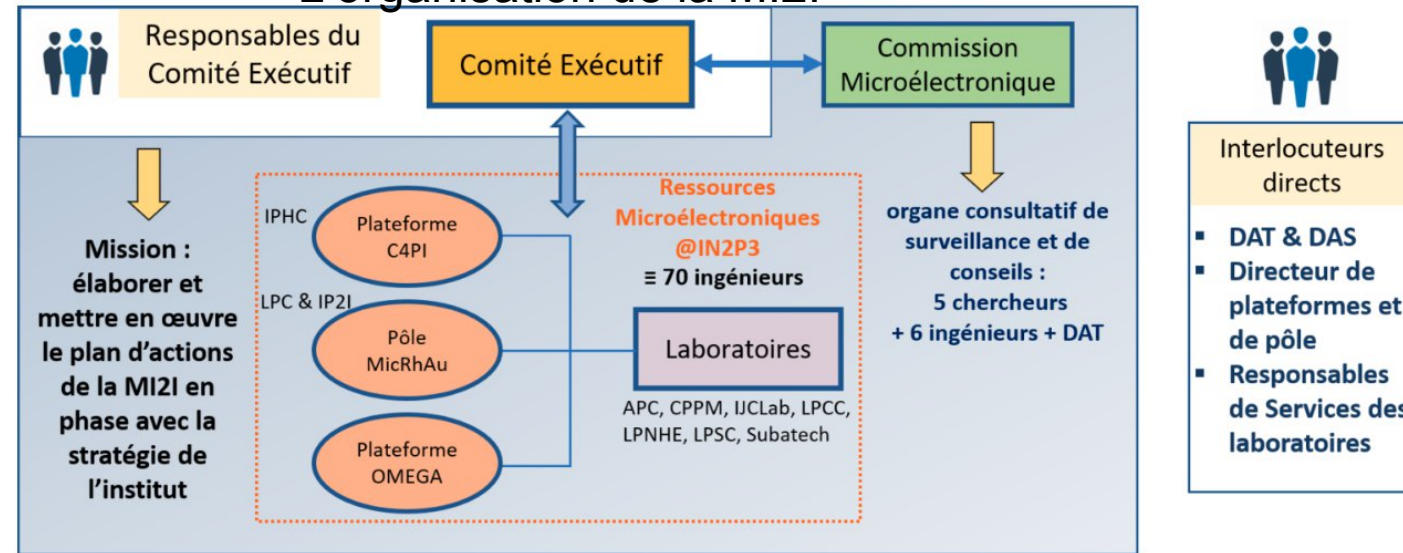


Les 3 axes de la MI2I



source : « journées Samuel Manen, Lyon, 2024 » D. Prêle

L'organisation de la MI2I



Organisation de la MI2I

source : <https://caemi2i.in2p3.fr/>

- La R&T BiCMOS est **en phase** avec les 3 Axes de la **MI2I** pour un maximum **d'efficacité** : mutualisation, partage et communication avec les microélectroniciennes et micro électroniciens du CNRS Nucléaire & Particules
 - Axe « Techno » : **R&T** nationale **transverse**, design et fonderie de **briques de base**, **techno alternative** (SiGe)
 - Axe « Outils » avec la mutualisation
 - Installation et maintenance de **Cadence** et des **Design Kit** sur le serveur d' **OMMIC** hébergé au CC et géré par E. Bechetoille
 - Demande de **NDA** globale fondeurs IHP et XFAB
 - Axe « Synergie » : publication sur le **site web** de la MI2I, **communications** aux JME, DI2I ...

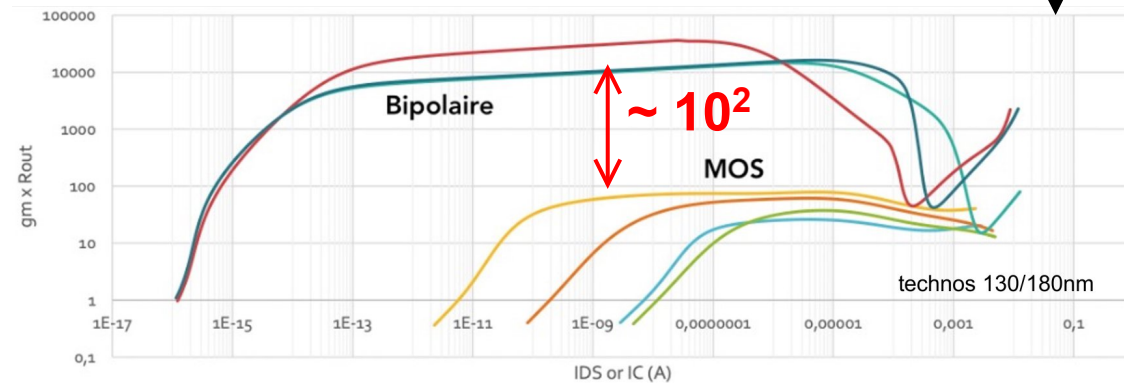
Avantages d'un transistor bipolaire vs MOS

- Efficacité de transconductance : $g_m/I_C = 1/U_T \approx 40 \text{ V}^{-1}$ (@300K), **>CMOS** et indépendant de I_C
 - Gain intrinsèque : $g_m \cdot r_o = I_C/U_T \cdot V_A/U_T = V_A/U_T \approx 4000$ **>CMOS** et indépendant de I_C
 - Design à **faible consommation** possible
 - Mise en œuvre possible à $T = 4\text{K}$ ⁽²⁾
- ➔ **Appli. Cryogénisées (50K)**
- Gain-bande **très élevé** : $g_m \cdot r_o \cdot f_t$ avec $f_t \sim 250\text{GHz}$ ==> Ampli. **HF** ou BF à **grande linéarité** et **rapide**

(2) Il est toutefois possible de faire fonctionner de MOS à 4K : Merken, P., Creten, Y., Putzeys, J., Souverijns, T., & Van Hoof, C. (2004). Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 5498, 622-629. Article 76. <https://doi.org/10.1117/12.550026>

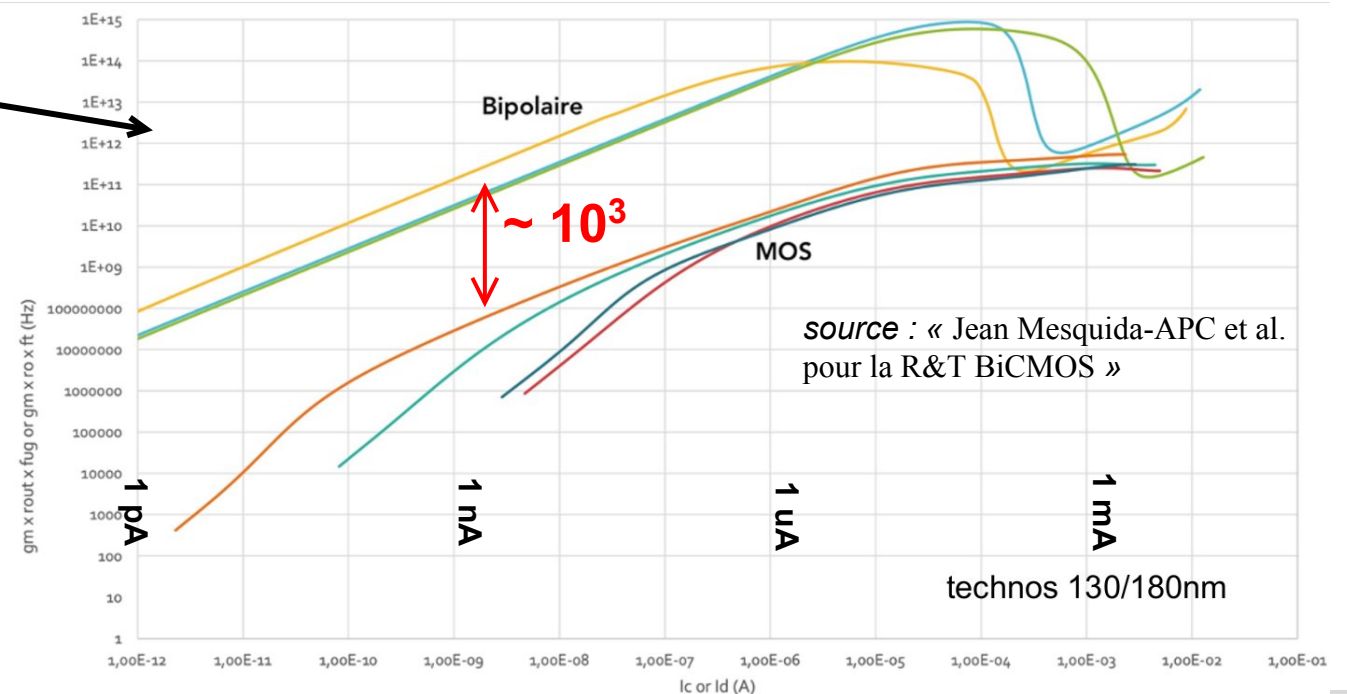
Comparaisons equisurface

Gain-Intrinsèque ($g_m \cdot r_o$) = $f(I_C)$ ou $f(I_D)$, NPN et MOS



source : « Jean Mesquida-APC et al. pour la R&T BiCMOS »

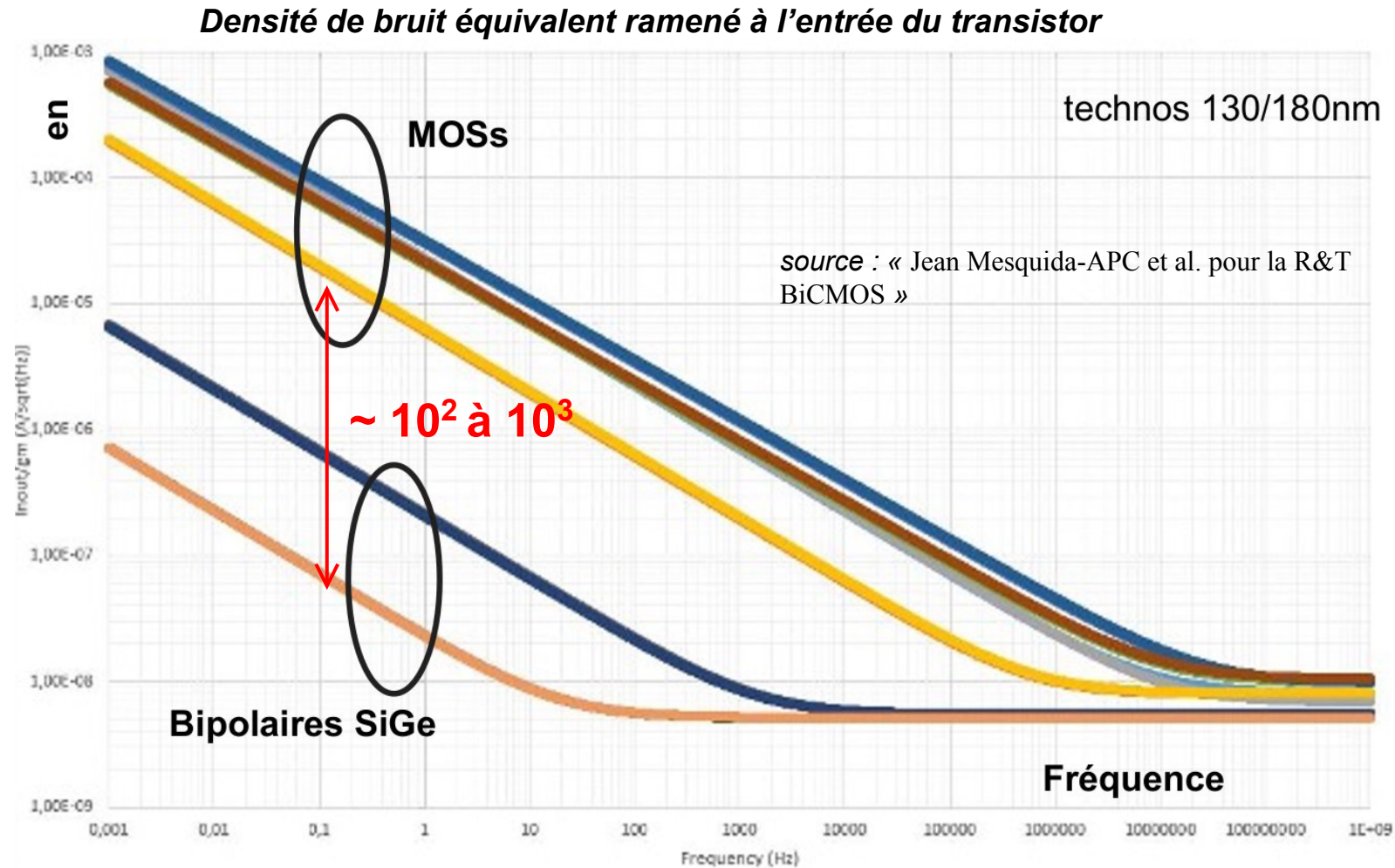
Gain-Bande = $f(I_C)$ ou $f(I_D)$, NPN et MOS



source : « Jean Mesquida-APC et al. pour la R&T BiCMOS »

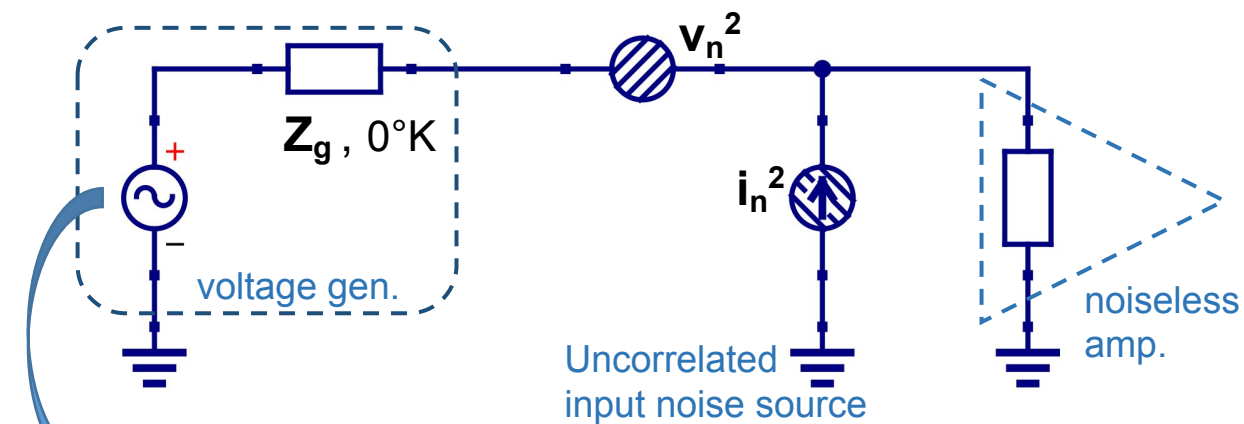
Avantages d'un transistor bipolaire vs MOS

- Grand R_{out} V_{EARLY} / I_c ($\propto L/I_d$ en MOS) ==> Driver **fort courant** à basse et haute fréquences (charge 50Ω)
- **Faible densité de bruit en $1/f$** ==> **Appli. avec faible Bruit dès 1Hz**



Densité de bruit équivalente en entrée

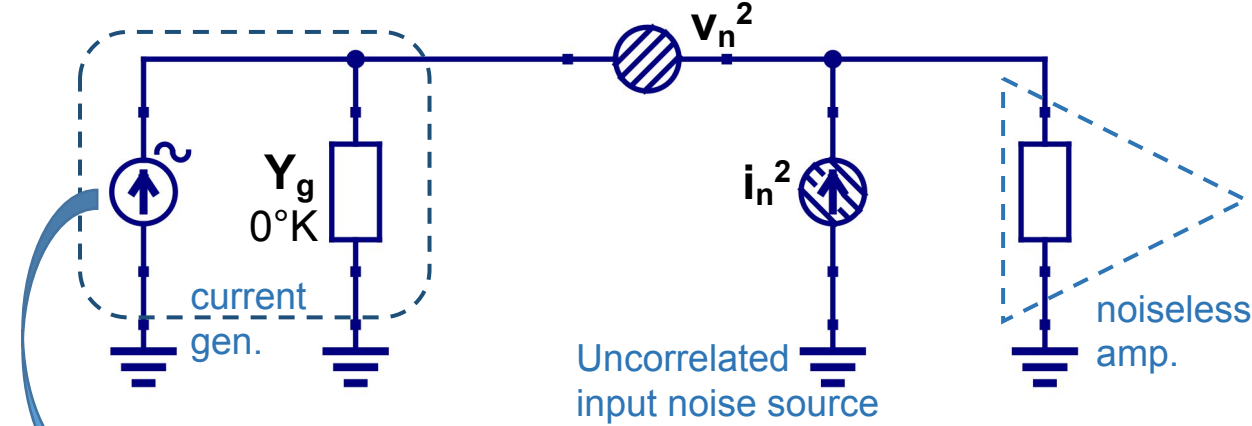
Détecteurs modélisables par un générateur de tension



$$v_{eq}^2 = v_n^2 + i_n^2 \cdot |Z_g|^2$$

Pour détecteurs : SQUID, antennes électriques

Détecteurs modélisables par un générateur de courant



$$i_{eq}^2 = i_n^2 + v_n^2 \cdot |Y_g|^2$$

Pour détecteurs : TPC, silicium, PM, diodes,...

	v_n^2	i_n^2
MOS, CS	$\propto 1/\sqrt{W \cdot I_D/L} + 1/f$	~ 0
BJT, CE	$\propto 1/I_C$	$\propto I_C/\beta + 1/f$

Pour $|Z_g|$ **petit** : R_{squad} , Z_{ant} quelques 100Ω

$$v_{eq}^2 \approx v_n^2 + \cancel{i_n^2 \cdot |Z_g|^2}$$

Pour $|Y_g|$ **grand** : C_{det} et/ou ω grand , R_{fil} pas trop grand

$$i_{eq}^2 \approx v_n^2 \cdot |Y_g|^2 + \cancel{i_n^2}$$

Avantage BJT car bruit relatif MOS / BJT varie en $\sqrt{I}$: $v_{n_BJT}(i_c) / v_{n_MOS}(i_d) \propto \sqrt{I}$

Expériences et détecteurs cibles



Générateur de tension et $|Z_g|$ **petit**

Astro. X

ATHENA : **TES** (+SQUID) 0.1K, $Z_g < 200 \Omega$, LNA à 300K

Cosmologie CMB en ondes millimétriques

QUBIC : **TES** (+SQUID) 0.1K, $Z_g < 10 \Omega$, LNA à 50K

CMB-S4 : Antennes dual-pol. + **TES** (+SQUID) 0.3K,
 $Z_g < 200 \Omega$, LNA à 300K

ACT : Antennes dual-pol. + **TES** (+SQUID) 0.1K,
 $Z_g < 200 \Omega$, LNA à 300K

Radio astronomie.

SKA (LFAA), antennes **UWB** LPDA, $Z_g < 200 \Omega$ [50 - 350]MHz

==> **Bolomètres(SQUID), Antennes** large bande

Générateur de courant et $|Y_g|$ **grand**

Nucléaire

GRIT, $Y_g = j.C_{\text{strip}}.\omega$, **strip DSSD**, up to **40pF**, 2k voies

REA (GANIL), $Y_g = j.C_{\text{det}}.\omega$, **pixel Si** ~ **600pF**, 400 voies

NECTAR, $Y_g = j.C_{\text{det}}.\omega$, **cellules photovoltaïques**, $C_{\text{det}} = 150\text{nF}$

Astro. Xénon liquide ,matière noire

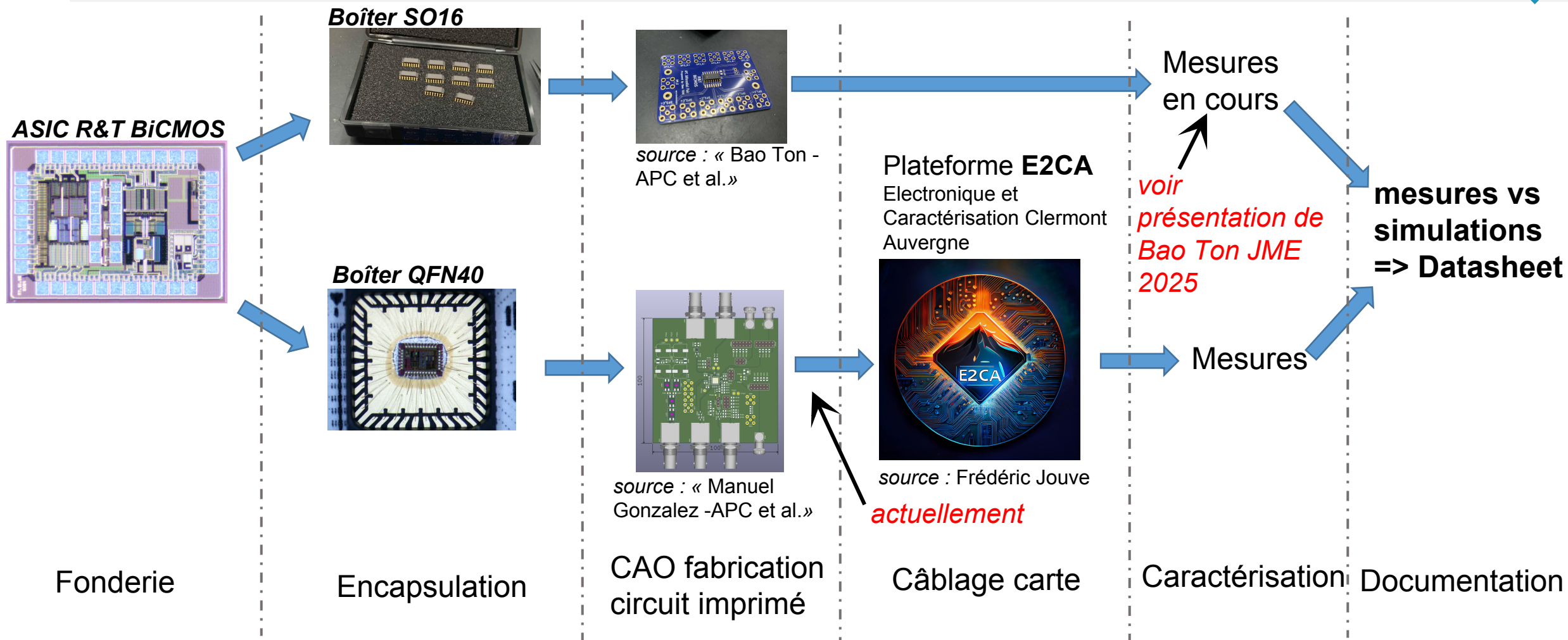
R2D2, TPC, $Y_g = 1/R_{\text{fil}}$, division par **fil résistif** avec $R_{\text{fil}} \sim 3 \text{ k}\Omega$

HEP particules, CERN

Monolithic Pixel, $Y_g = j.C_{\text{det}}.\omega$, ω **grand**, Fast CSA,ps

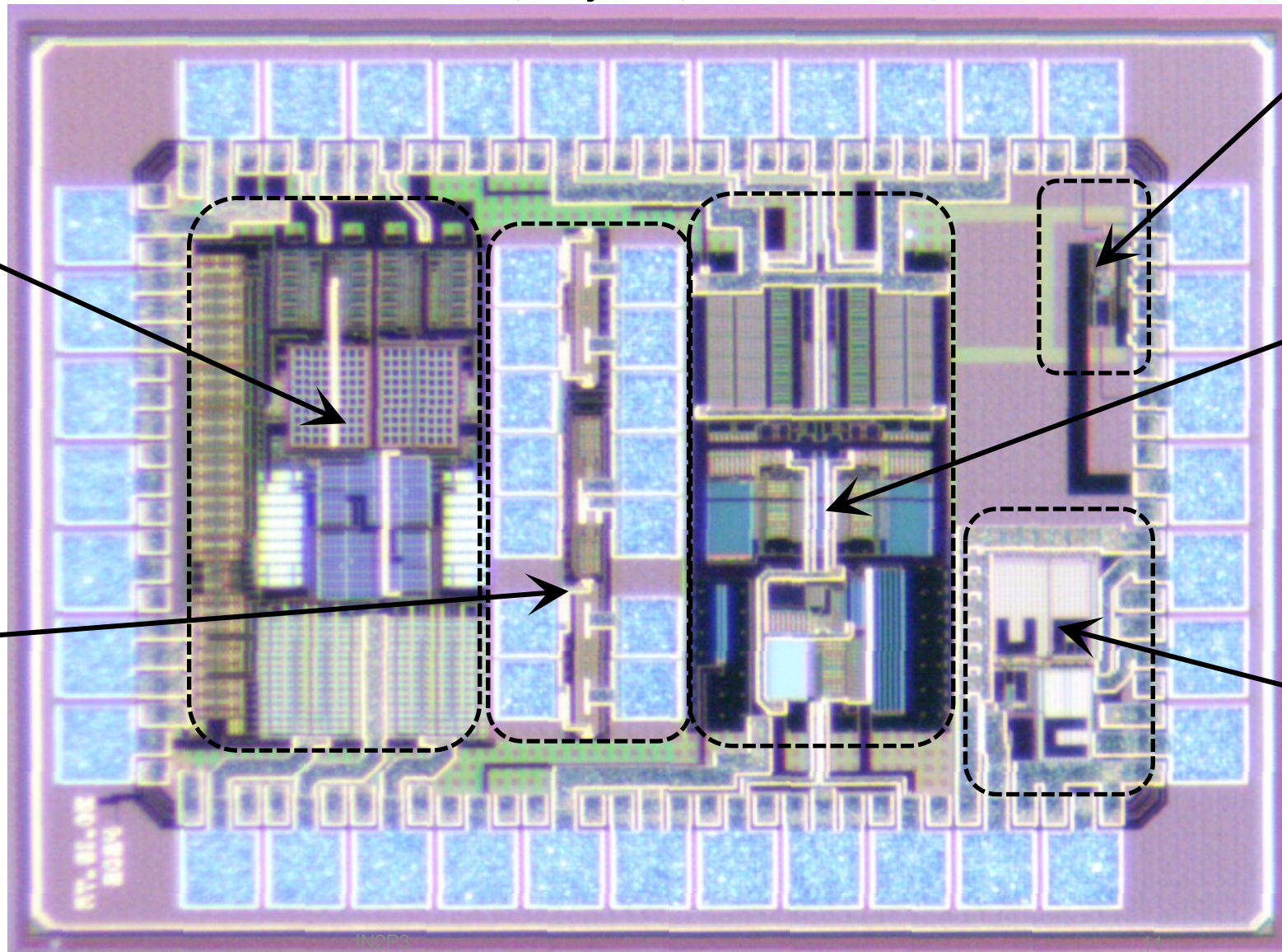
==> Détecteurs **silicium** à **pixel** et **strip**, TPC à **fils résistifs**, **cellules photovoltaïques**

Evaluation de la technologie IHP SG13S par un 1^{er} run



Les briques de base du 1^{er} run IHP SG13S

FULL LAYOUT OF R&T BICMOS ASIC, July 2024, IHP SG13S RUN, Area : 1263 x 1733 = 2.189 mm²



LNA, APC

- full diff
- in noise < 1nV/√Hz
- 1/f corner : 100Hz
- BW-1dB : DC-41MHz
- Gain : 90 V/V
- power out : 200Ω load
- supply : 3.3V

NPN arrays, APC

- 3 differential pairs
- NPN measurement at 300K and 70K
- centroid evaluation

R2R CMOS amplifier, IP2I

- Rail to Rail : in & out
- GB product : 14MHz
- offset : 13uV
- consumption : 600uW

Transimpedance Amplifier, SUBATECH

- single in, diff out
- in noise < 1pA/√Hz
- 1/f corner : 20Hz
- BW-1dB : DC-30MHz
- Gain : 166 kV/A
- power out : 200Ω load
- supply : 3.3 V

Thermometer, APC

- PTAT CTAT diff. compensation
- Vout = 20mV/K
- supply : 1.65V
- consumption : 12mW

Détecteurs cibles : R2D2

R2D2 Detectors

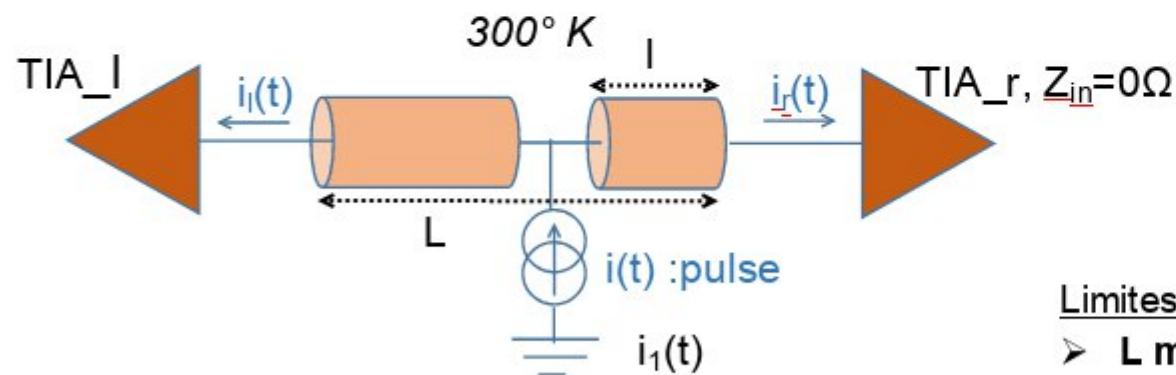
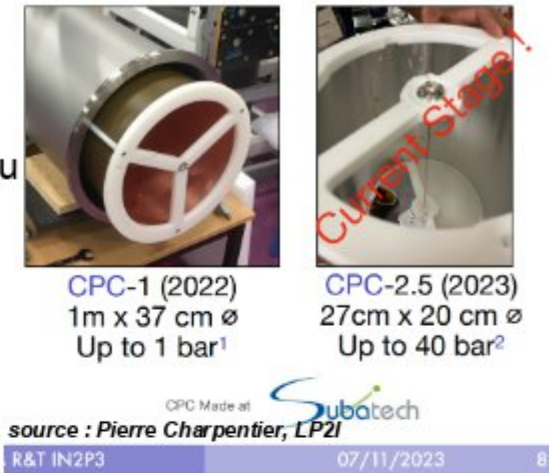
The R&D is currently considering two detectors options:

- *Spherical Proportional Counter (SPC):**
 - A grounded spherical cathode with a positively bias central anode readout.
 - Both signal and tension go through the anode.
 - Electric Field: $\propto \frac{1}{r^2}$
- *Cylindrical Proportional Counter (CPC):**
 - A grounded central anode readout and a negatively bias cylindrical cathode.
 - Signal is read through the anode and decoupled from tension applied to the cathode.
 - Electric Field: $\propto \frac{1}{r}$

source : Pierre Charpentier, LP2I

Pierre Charpentier Journée R&T IN2P3 07/11/2023 6

- CPC : cylindrical proportional Counter
- TPC cylindrique à xénon liquide
 - Collection de charge par l'anode à 0V sur l'axe du cylindre
 - **Division de charge maîtrisée** car fil résistif et Préampli. aux deux bouts
 - Cathode à un potentiel négatif HT



Modélisation du détecteur par 2 lignes de transmission

- $L=2\text{m}$, $0 < l < 2\text{m}$, $Z_c=415\Omega$, $c=3.10^8\text{m/s}$
- $R = 1 \text{ à } 2.5 \text{ k}\Omega/\text{m}$, $L = 1.38\mu\text{H}/\text{m}$, $C=8.05\text{pF}/\text{m}$

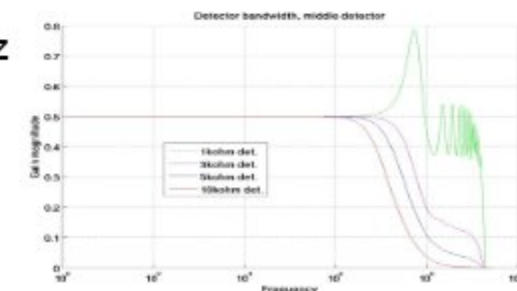
Au premier ordre, avec détecteur réduit à la seule résistance totale du détecteur supposée homogène et un TIA parfait ($Z_{in}=0$) on démontre que :

$$\frac{1}{L} = \frac{i_l}{i_l + i_r}$$

Limites du détecteur

- **L max** car résonance propre à $f_0 = c/2L = 75\text{MHz}$ pour $L=2\text{m}$, $p = -1$ car CC
- **R fil max** car limitation de bande passante
 - $f_c = 46/22/10 \text{ MHz @ } 3/5/10 \text{ k}\Omega$
- **R fil min** car bruit thermique du fil = $4kT/R$

Detector bandwidth vs Rdet

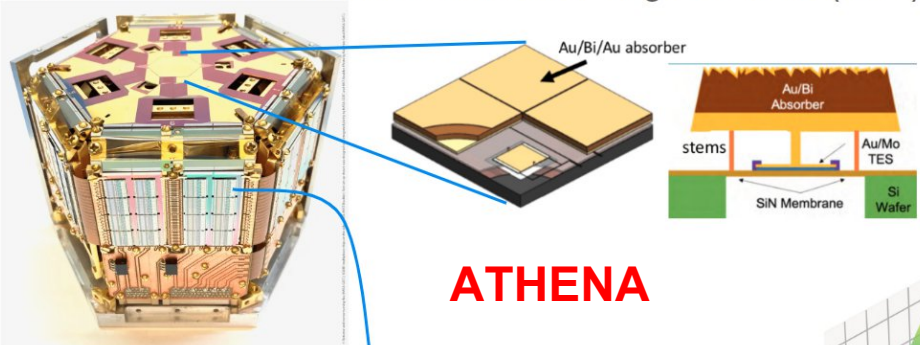


Détecteurs cibles : ATHENA, CMB-S4, QUBIC, ACT

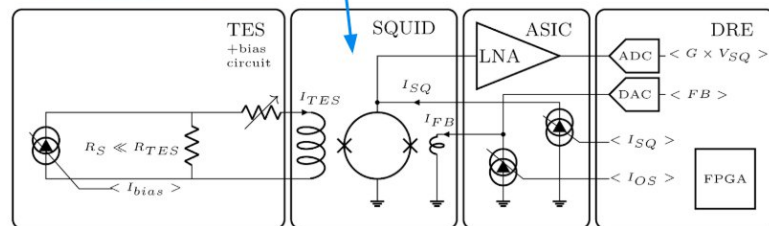


X-IFU - Detectors and readout

Micro-calorimeters based on transition edge sensors (TES)

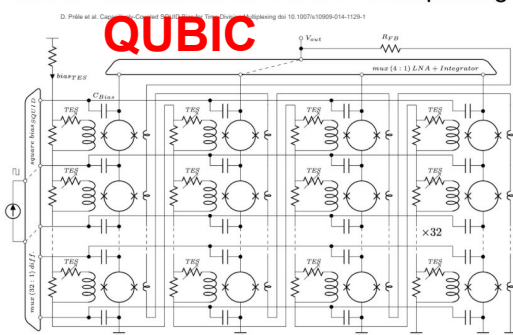


ATHENA



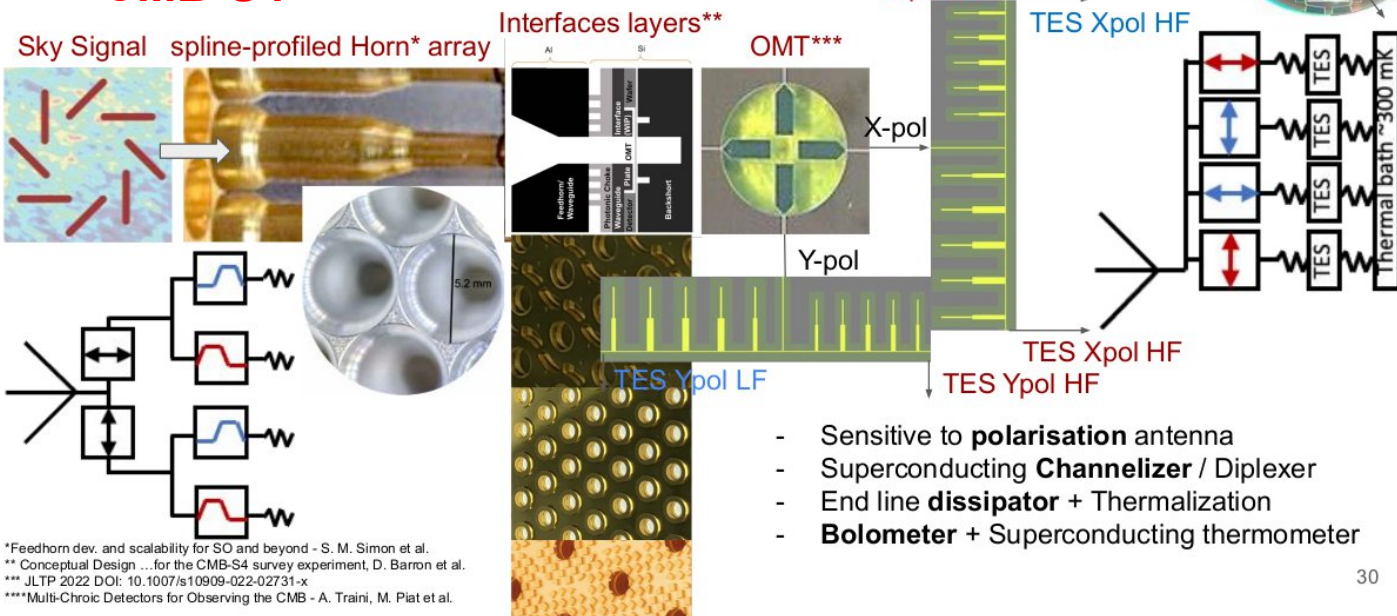
source : «Damien Prêle, Berkeley Lab Instrumentation Colloquium - March 21 - 2025»

QUBIC readout chain : SQUID multiplexing



Polarization sensitive & Multi-Chroic concept

CMB-S4



source : «R. Stompor (CPB), Damien Prêle (APC), CMB-S4: overview and proposed IN2P3 involvement»

Principe général simplifié

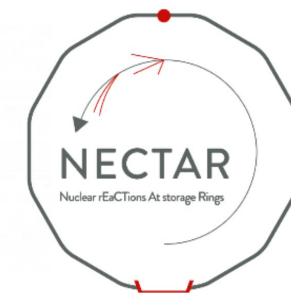
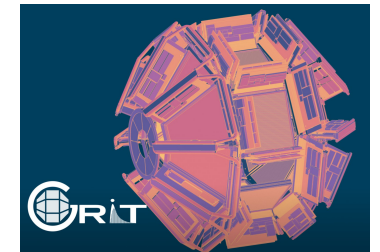
- détecteur primaire à 100mK : bolomètre X ou antennes millimétriques
- énergie transférée à un Transient Edge Sensor (TES) ou un KID à 100mK
- Multiplexage
 - lecture d'un SQUID à 300K par un LNA (différentiel)
 - lecture de Δ_f pour les KID

Détecteurs cibles du prochain run IHP

- Amplificateur optimisé à 77K pour **applications génériques cryogénisées**
 - **Retour d'expérience** des mesures des NPN du premier run
 - DC-10M
 - voir **présentation de Bao Ton** aux Journées des Métiers de l'Électronique 2025, Strasbourg
- Caractérisations de composants élémentaires à 87K(Argon liquide) en prévision du design d'un **amplificateur de courant** suivi d'un **driver de diode laser** pour le troisième module de la **TPC de DUNE**



- Amplificateur de charge (CSA) pour **détecteurs fortement capacitifs**
 - **silicium strip detector** sur GRIT, $C=40\text{pF}$ (LPC-Caen)
 - projet prospectif du LPC-Caen : Rénovation de l'Électronique d'Acquisition au **GANIL** (REA)
 - Détecteur **pixel silicium** pour du contrôle de faisceau , $C=600\text{pF}$, 400 voies
 - cellules **photovoltaïques** de 150nF pour ions lourds sur NECTAR au GSI
 - 10 à 50nF/cm^2
 - Voir **poster de Jérôme Pibernat et al.** : «R&D for heavy ion detection with photovoltaic cells »



Autres applications : lecture de Qubit

source : «R. C. Kwende, D. Rosenstock, C. Wang and J. C. Bardin, "A 6mW Cryogenic SiGe Receiver IC for High-Fidelity Qubit Readout," 2024 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2024, Washington, DC, USA, 2024, pp. 874-877, doi: 10.1109/IMS40175.2024.10600326.»

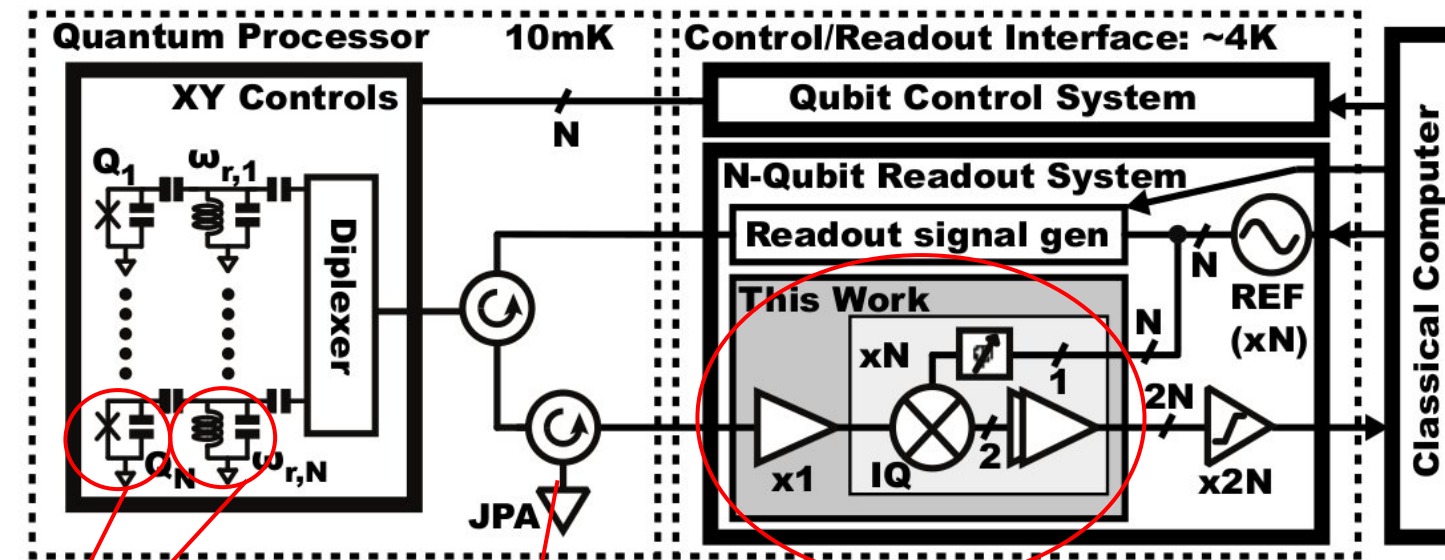


Table 1. Comparison to State-of-the-Art Cryogenic Receivers

	This Work	[13]	[16]	[17]	[18]
Tech. Node	180 nm BiCMOS	40 nm CMOS	40 nm CMOS	28 nm CMOS	65 nm CMOS
Qubit Type	Transmon	Transmon	Spin	Transmon	Transmon
Freq. (GHz)	5-7	6.5-7.5	6-8	6.5-8.1	5.2-7.2
Gain (dB)	55-65	75	58	65-89	50-70
IRL (dB)	-8	-10	-	-3.7	-12
Measured with Qubit	Yes	No	Yes	No	Yes
Requires ext. LNA	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Fidelity	$F_{ 0\rangle} = 99.6\%$ $F_{ 1\rangle} = 97.1\%$	-	-	-	-
Power Diss. (mW)	6	6	66	9.8	17.1

$Z(\text{Qbit}) = f(\text{état})$

Résonateur bouchon LC, $\omega_0 = f(\text{état qubit})$

Principe

- un **signal RF** ~6GHz est injecté dans une matrice de résonateurs
- la **phase** et l'**amplitude** du signal réfléchi est analysée : fonction de l'état du qbit, +/- pi/2 en fonction de ω / ω_0

Amplification

ASIC SiGe à 4K

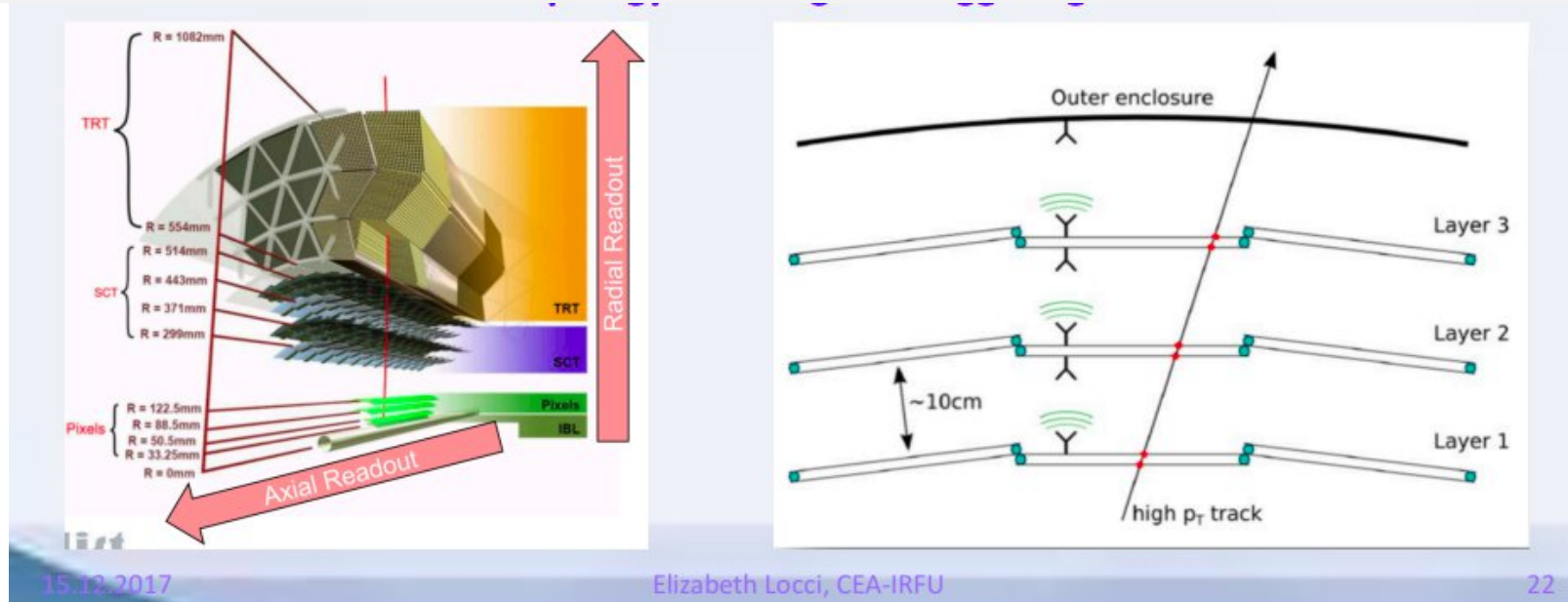
- préampli
- **Transposition de fréquence** (mélangeur) par récepteur **IQ**
- obtention d'une enveloppe $(I+Q)^{1/2}$ et $\text{phase} = \tan^{-1}(Q/I)$ dont le niveau est fonction de l'état du qubit
- **Discrimination** par comparateurs

Avantages de la SiGe

- **pas besoin d'ampli HEMT externe**
- **intégration** d'un grand nombre de voies possible
- haute fidélité >99%
- puissance dissipée **très faible** 6mW

16

Autres applications : WADAPT ?



source : « Multi-Gigabit Wireless Data Transfer for High Energy Physics Applications, Elizabeth Locci et al., CEA-IRFU Saclay, 15.12.2017 working group »

Wireless Allowing Data and Power Transfer

- transmission de données sans fil (DRD 7.1.c)
 - bande disponible vers 60GHz
 - université d'Heidelberg, transceiver en IBM 130 nm SiGe BiCMOS technology , 57-66GHz, 4.5Gb/s sur 1m sur le silicon strip detector (SSD) d'ATLAS
 - Atlas inner tracking pixel detector
 - transceiver CMOS CEA LETI : C. Dehos et al.
 - bande disponible vers 140GHz
 - 16 x 7Gb/s
- transmission d'alimentation sans fil

Merci pour votre attention

