

Hot Electron Bolometers, Nanowire SSPDs, Tunnel Junction Single Photon Detectors

Out-line:

Introduction to '*non thermally controlled*' superconducting photon detectors

1- Principle of Hot Electron Bolometers (HEB) and Josephson phase mixers for direct and heterodyne detection

2- Superconducting Nanowire Single Photon Detector (SNSPD)

3- Superconducting Tunnel Junction Detectors (STJ)

4- LTS & HTS Detectors Integration in Superconducting Electronics

Thanks to P. Cavalier, L. Maingault, S. Bouat, R. Espiau, V. Michal, Ph. Feautrier/LAOG, J-Ph Poizat/INéel



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Hot Electron Bolometers, Nanowire SSPDs, Tunnel Junction Single Photon Detectors

Out-line:

Introduction to '*non thermally controlled*' superconducting photon detectors

1- Principle of Hot Electron Bolometers (HEB) and Josephson phase mixers for direct and heterodyne detection

1-1. Principle of HEB detectors and mixers

1-2. Josephson phase mixers used in detection and Hilbert transform spectrometer

2- Superconducting Nanowire Single Photon Detector (SNSPD)

3- Superconducting Tunnel Junction Detectors (STJ)

4- LTS & HTS Detectors Integration in Superconducting Electronics

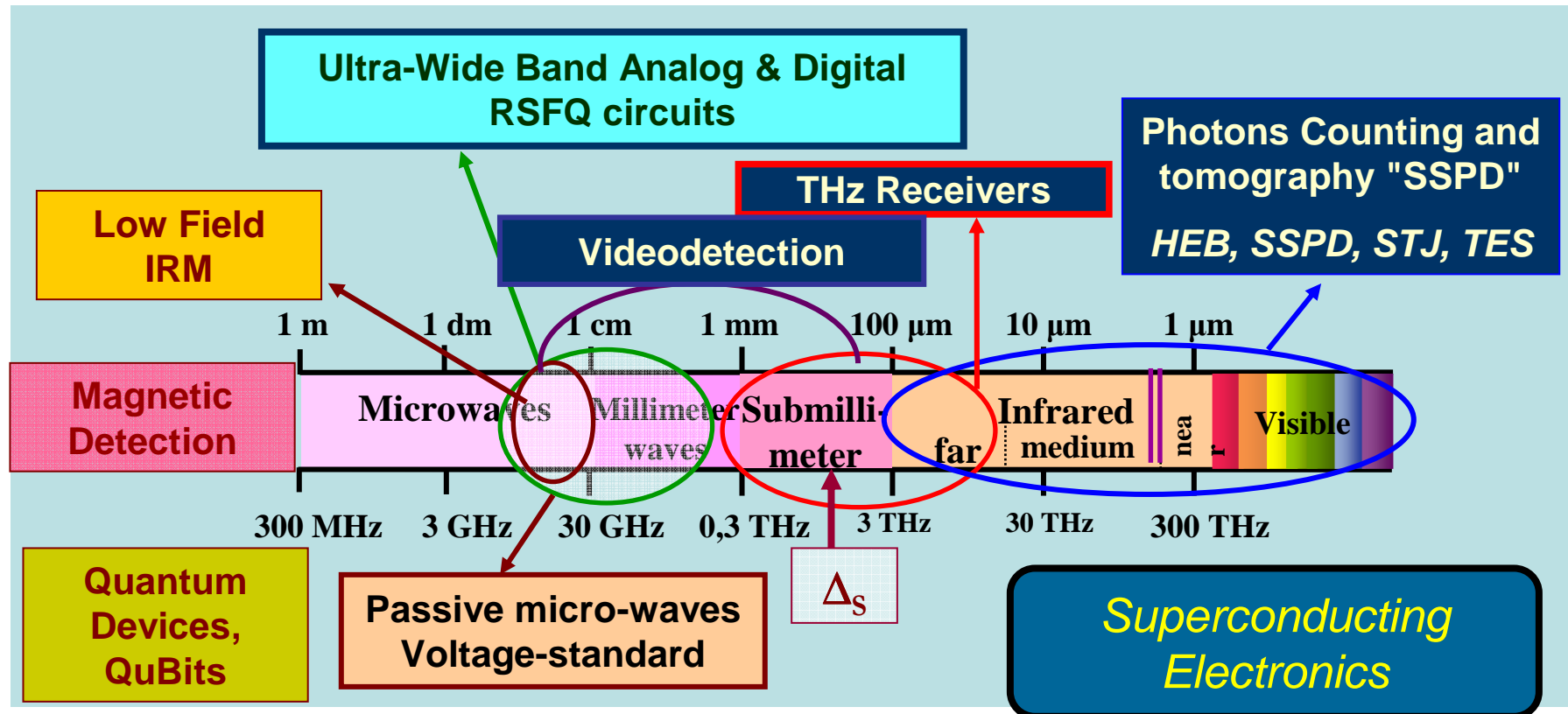


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Motivation: positionner de nouveaux types de détecteurs supraconducteurs en s'appuyant sur les techniques d'intégration nanoélectronique



Applications: - instrumentation et métrologie (astronomie, volt-étalon, .), - télécoms spatiales, - applications médicales (imageurs, tomographie OCT),



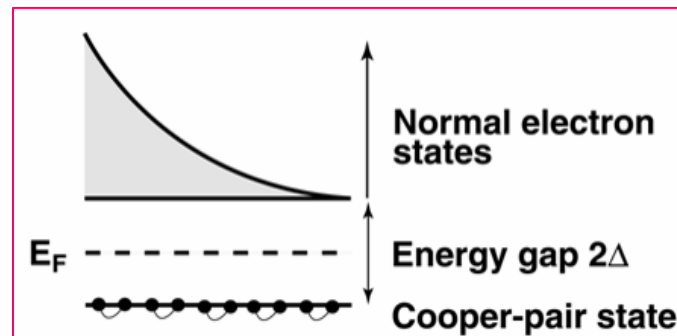
HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Propriétés génériques du fluide supraconducteur

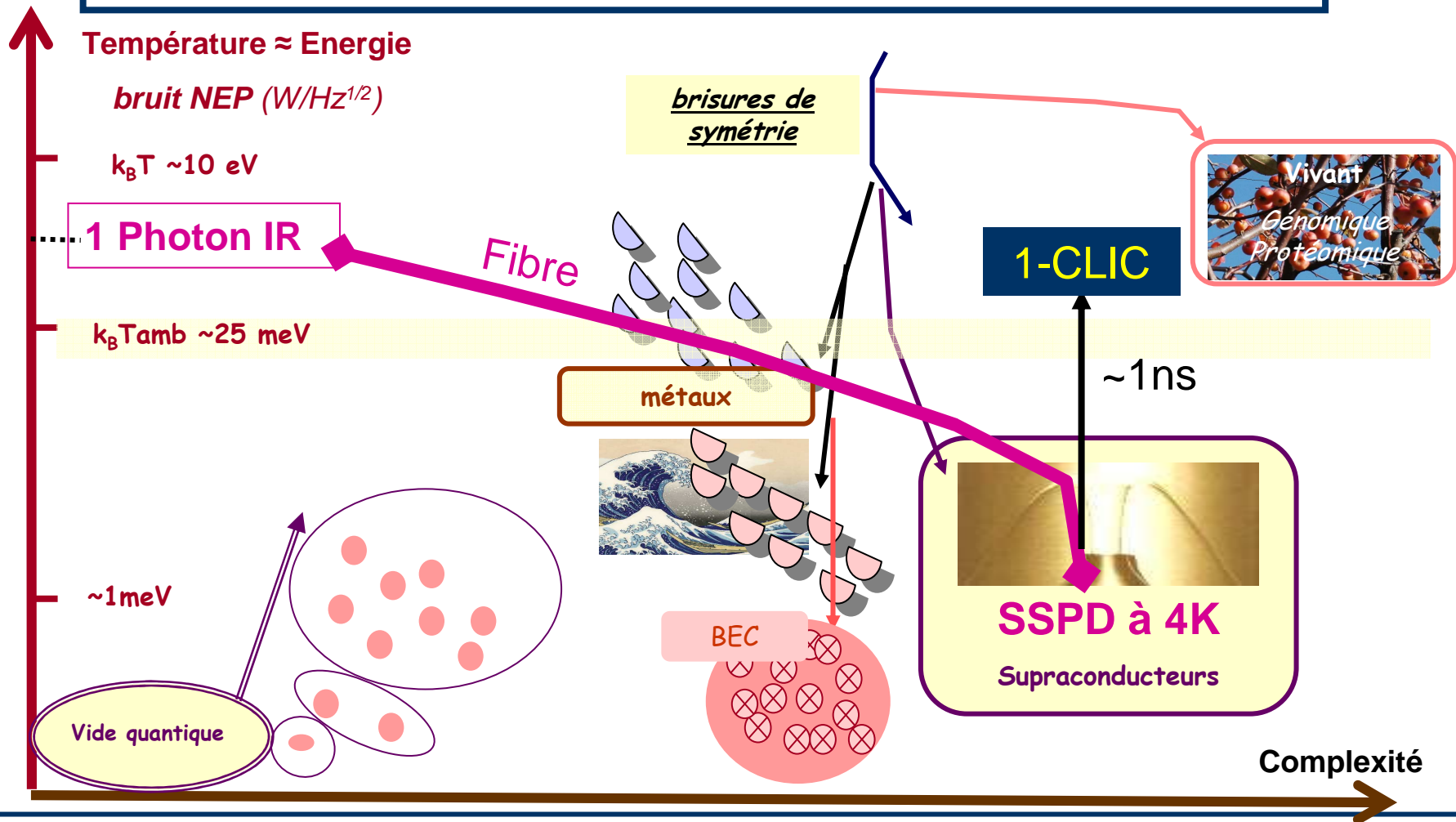
- La supraconductivité émerge comme état condensé naturel ('**condensat superfluide**' de '**paires de Cooper**'), superposition cohérente d'ondes électroniques générées par une instabilité de la surface de Fermi.
- Un **gap d'énergie** est ainsi acquis à basse température sur l'état normal (Δ par électron condensé ~ 3 meV pour NbN) : $\nu \sim \Delta/h \sim 1$ THz.



- A basse température le **condensat dans ses jonctions** peut transiter vers un **état quantique macroscopique** → **Qubits**.



Dispositifs Opto-Numériques Supraconducteurs



Les dispositifs de détection et de traitement analogique et numérique tirent parti des propriétés spécifiques de l'état supraconducteur pour réaliser une fonction ou un algorithme basé sur le dénombrement rapide d'impulsions et/ou de quanta de flux

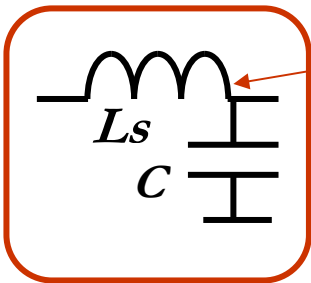


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

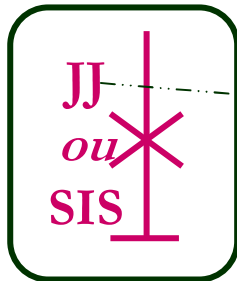
jean-claude.villegier@cea.fr



Briques des circuits supraconducteurs



inductance pure,
circulation des courants sur λ_{eff}



$$I_s = I_C \sin \varphi$$

$$V = \frac{2\pi}{\Phi_0} \frac{d\varphi}{dt}$$



Lignes de propagation, Cavités résonantes, Filtres & Antennes Supraconductrices

-Faibles pertes et faible dispersion

- $v < \Delta/h \sim 1 \text{ THz}$

Jonction Tunnel Josephson SIS

-Coherence de phase au delà du THz ($2\Delta/h$)

-Quantification du flux $h/2e$ ("Fluxonique")

-Détection cohérente THz

'Hot Electron Bolometer' & NanoFils

- $F_{coupure}$ thermique ($\sim 10 \text{ GHz}$ BW for IF)

-Détection Geiger par le condensat $\sim 10^{-20} \text{ W/Hz}^{1/2}$



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



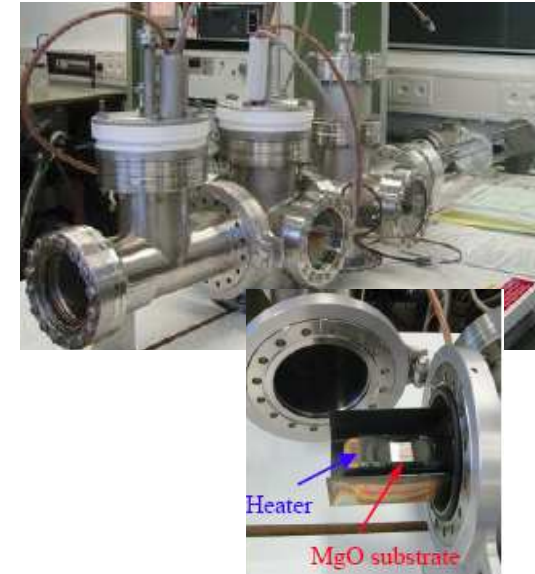
Quatre machines de production par sputtering de nano-couches supras
Économique, procédé compatible micro/nanoélectronique.
Multi-couches produites in-situ (@ CEA INAC/SPSMS).



MRC 903: 3 cathodes,
dépôt sur 1000 cm²
[Nb, NbN, TaN, MgO,.]



Alcatel 650: 4 cathodes dépôt sur 100
cm² sur substrat chaud 20°C <T_s<700°C
[Al, Nb, NbN, TaN, AlN, MgO,.]



KF2 : 2 cathodes ICM dépôt sur 10 cm²
sur substrat chaud 20°C <T_s<900°C
[YBaCuO, PrBaCuO,.]

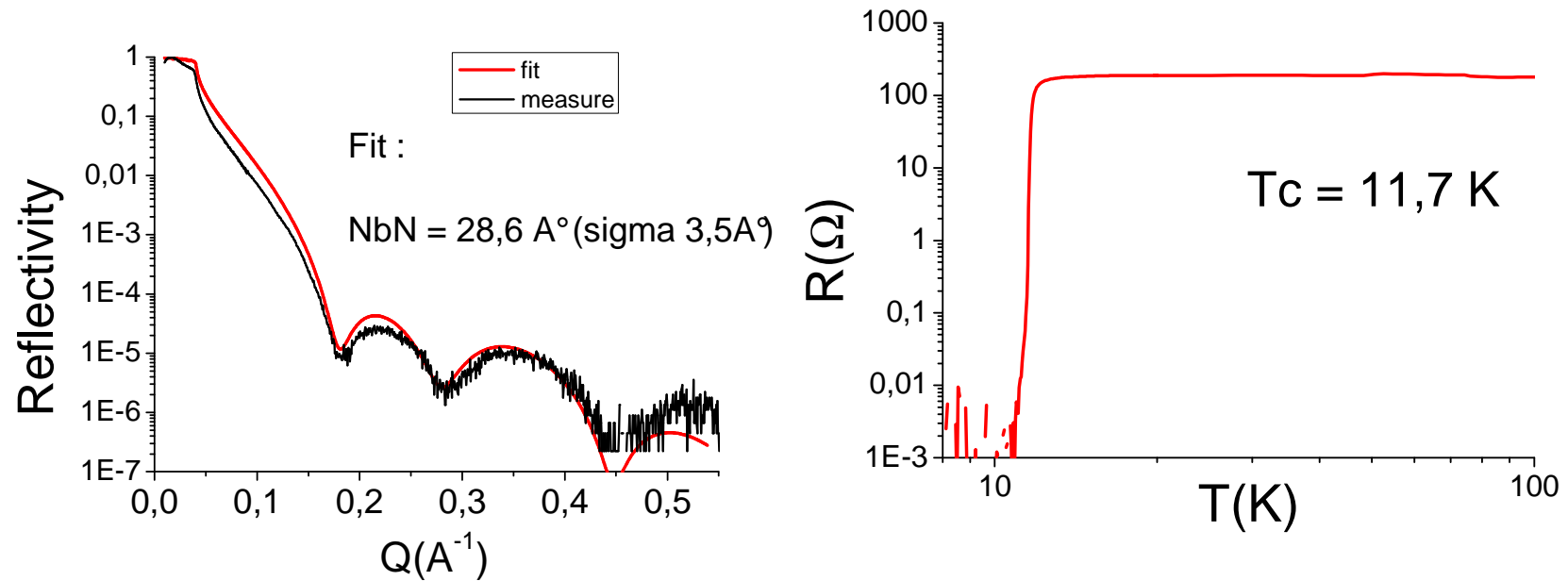


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Couche de détection NbN ultra-mince (2,9nm) épitaxiée à 600°C sur le plan-M d'un substrat de saphir 100mm



→ Application détecteur de photon unique SSPD



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Nouvelle plateforme ouverte CEA INAC de nanolithographie « PTA »



- (E-beam masker
(res~20nm; SEM...))

- photo-lithographie, CMP,
gravures et dépôts en
procédés 100mm



Jeol SEM



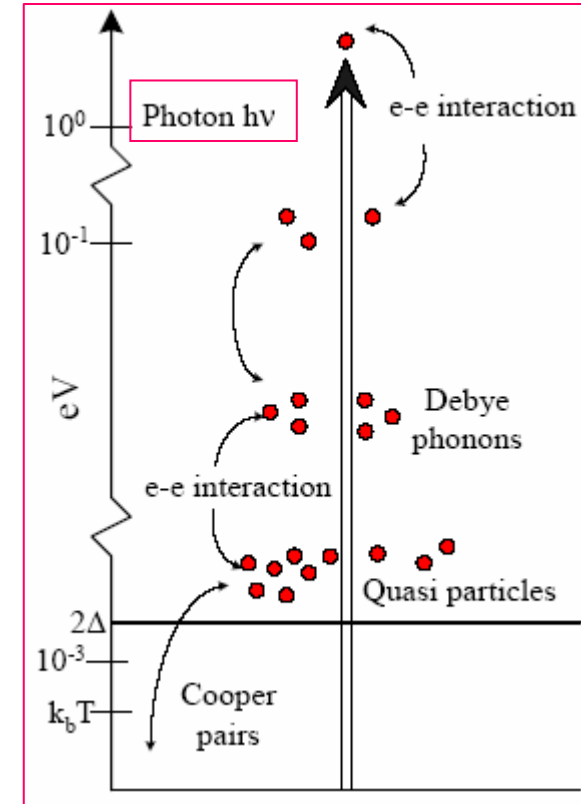
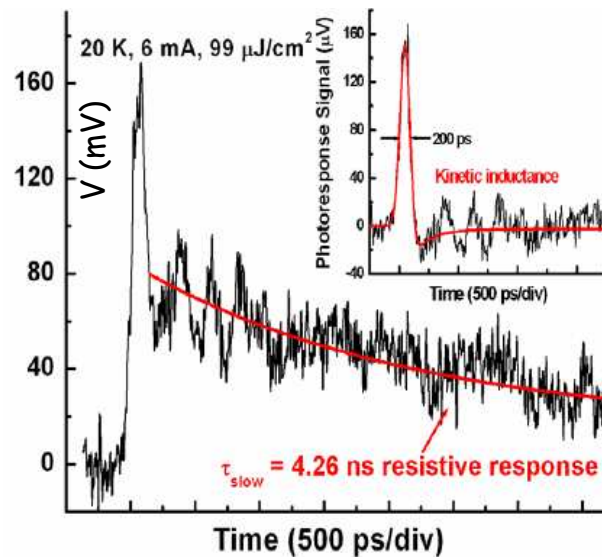
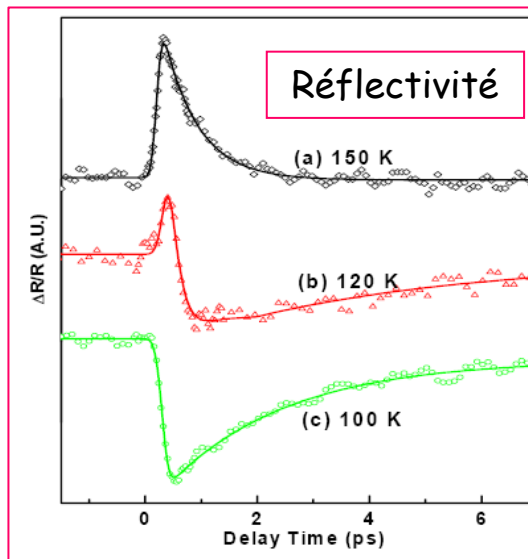
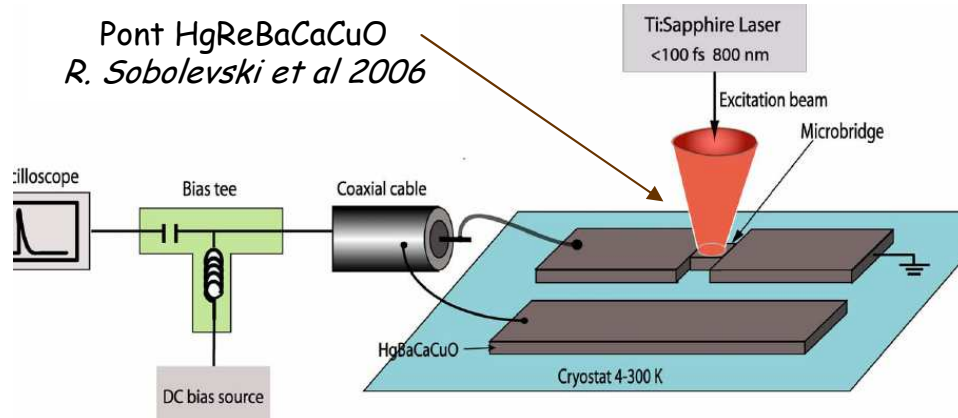
HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Réponse rapide d'un film de cuprate HTc soumis à une impulsion laser courte

Pont HgReBaCaCuO
R. Sobolevski et al 2006



Mécanismes mis en jeu lors de la relaxation du supraconducteur après l'impulsion laser

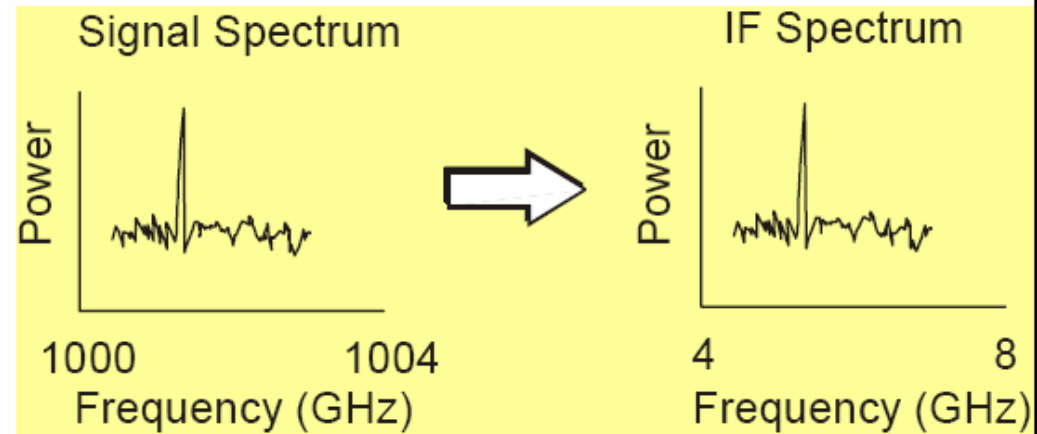
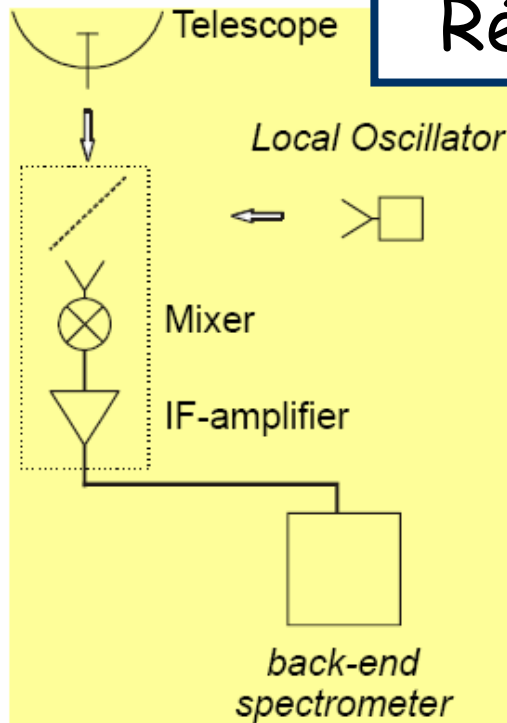


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Récepteurs hétérodynes THz



Mélange d'un faible signal $V(\omega_s)$ à observer avec un puissant **signal d'oscillateur** $V(\omega_{OL})$ de fréquence voisine pour amplifier le **signal IF** issu du battement

Diode 'HEB' non-linéaire , $I \propto aV^2$

OU Détecteur quantique SIS

$$V_s = \cos(\omega_s t + \varphi), \quad V_{LO} = \cos(\omega_{LO} t)$$

Grande résolution en fréquence

$$I_{IF} \propto \dots + V_s V_{LO} \cos((\omega_s - \omega_{LO})t + \varphi)$$

$$f/\Delta f \geq 10^7$$

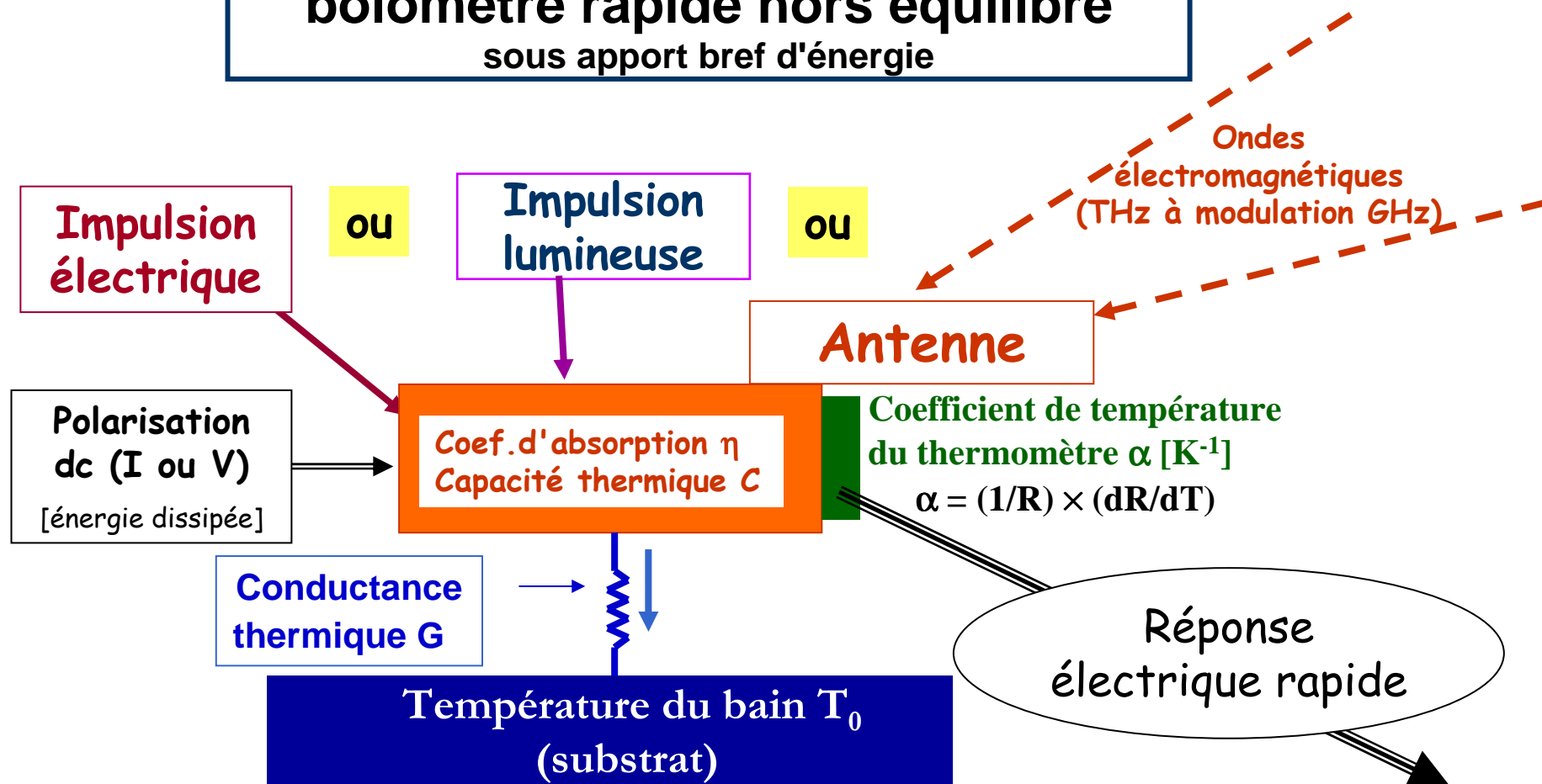


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

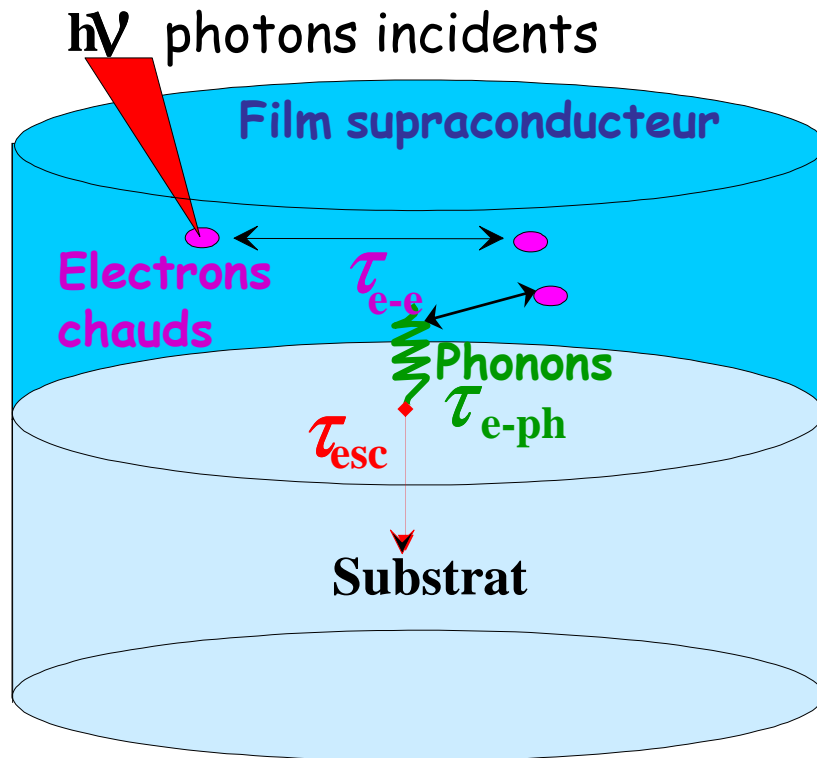
jean-claude.villegier@cea.fr



Conditions de fonctionnement d'un bolomètre rapide hors équilibre sous apport bref d'énergie



"HEB" (Hot Electron Bolometer) Supraconducteur



Absorbeur : électrons (chauffés) du film
Thermostat : phonons du film
Relaxation thermique: par interaction electron-phonon

$T_e > T_{ph}$ condition : $\tau_{e-e} \ll \tau_{e-ph}$
(dépendant du matériau)
 « HEB » condition : $\tau_{esc} \ll \tau_{e-ph}$
(associé au procédé technologique)

NbN: $\tau_{e-ph} \sim 10$ ps
 Bande-passante ~ 10 GHz

YBaCuO : $\tau_{e-ph} \sim 1$ ps
HgCaCuO Bande ~ 100 GHz



Fonctionnement d'un pont HEB-YBaCuO court en régime THz (col. LGEP-Supelec; CNES)

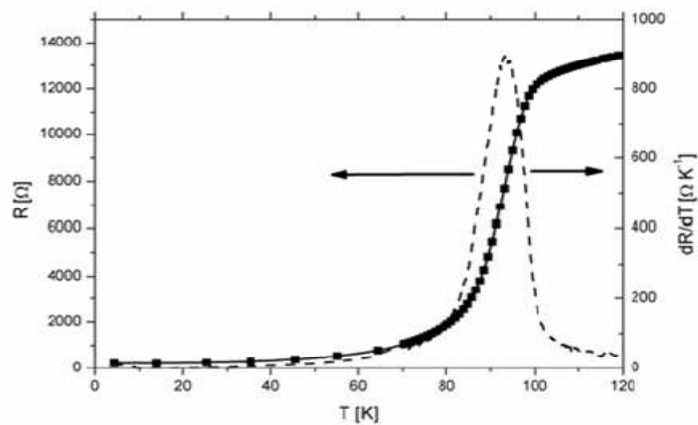
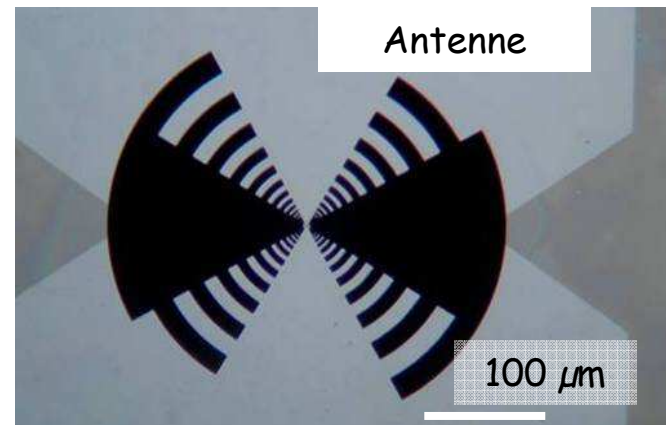
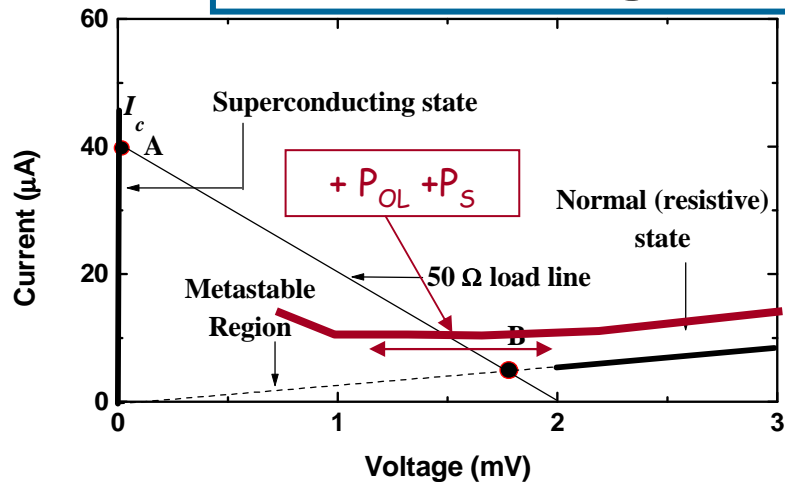
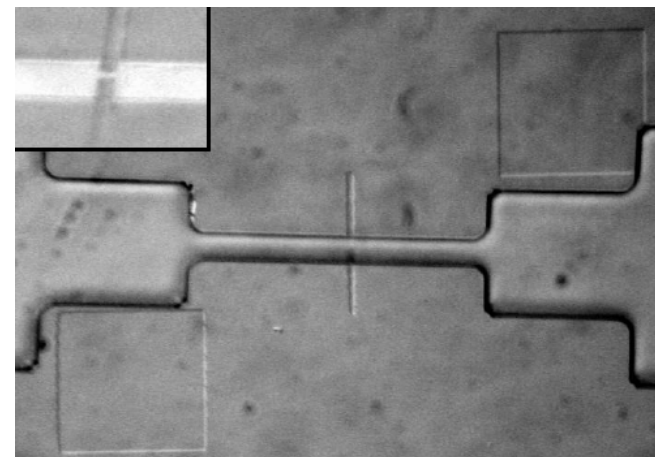


Fig. 6. Resistance versus temperature (at $0.5 \mu\text{A}$ DC measurement current), for a $0.8 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ nano-bridge HEB device, fabricated on a PBCO ($\sim 4 \text{ nm}$) – YBCO ($\sim 15 \text{ nm}$) – PBCO ($\sim 4 \text{ nm}$) tri-layer.



J-C. Villégier et al, SPIE-5727, (2005)

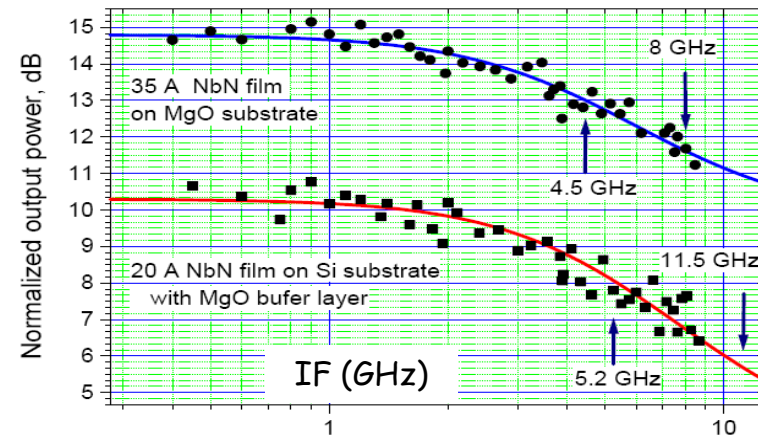
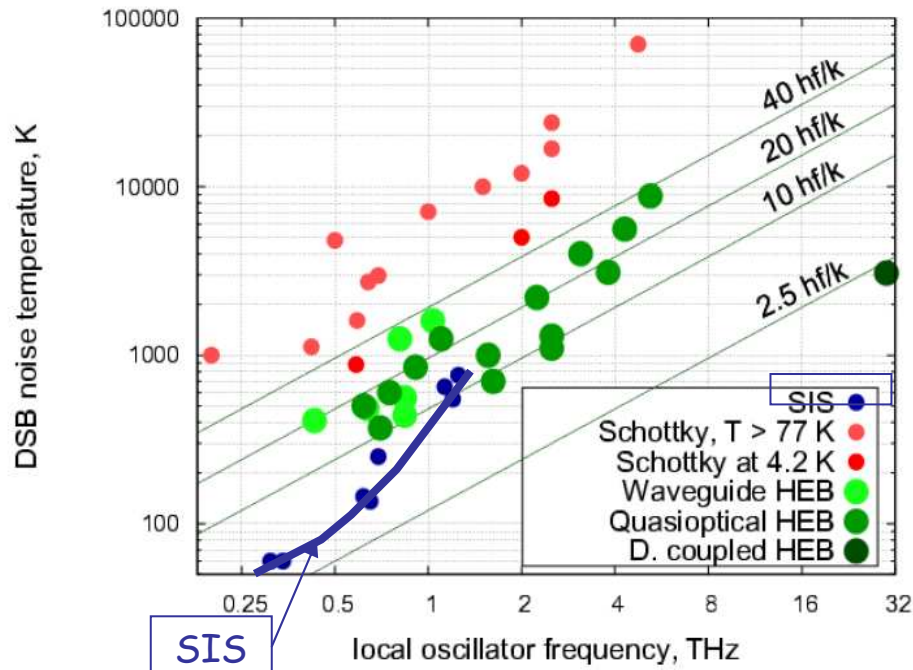
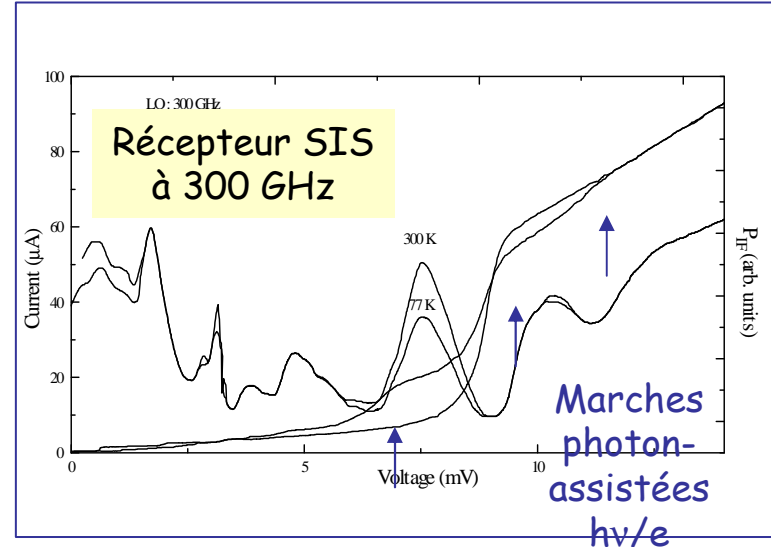
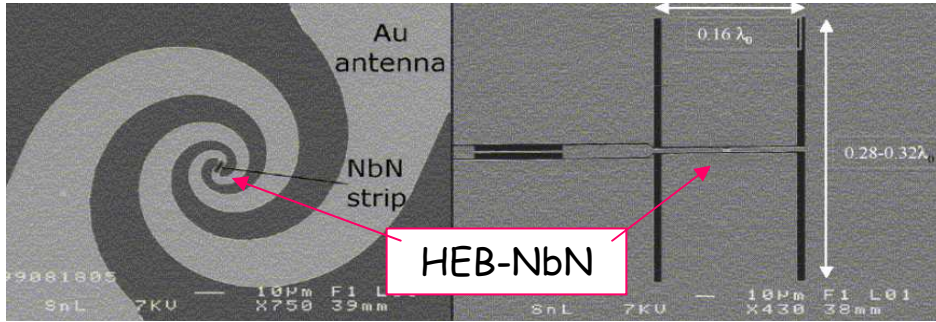


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Performances des récepteurs hétérodynes supraconducteurs 'SIS' et 'HEB'



J. R. Tucker, M. J. Feldman, Rev. Mod. Phys. 57, 1055 (1985)



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

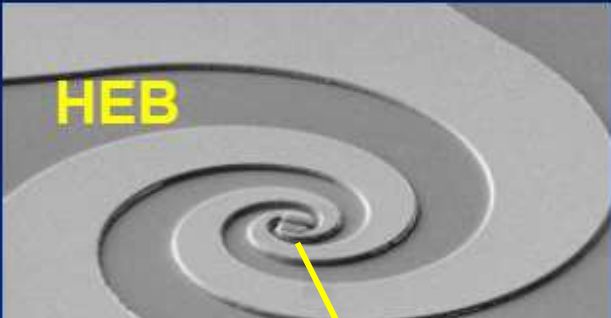
jean-claude.villegier@cea.fr




Applications des Détecteurs et radio-récepteurs THz

HEB DETECTORS FOR THz RADIATION: TECHNOLOGICAL ISSUES AND PROXIMITY EFFECT IN NbN THIN FILM STRUCTURES

Hot-Electron Bolometer




HEB




Au NbN Au
Si substrate

Universität Karlsruhe (TH)


GREAT: German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequency



The synchrotron light source of the Research Center Karlsruhe



TELIS: Terahertz Limb Sounder



- astronomy
- THz spectroscopy and imaging
- security
- plasma and synchrotron radiation

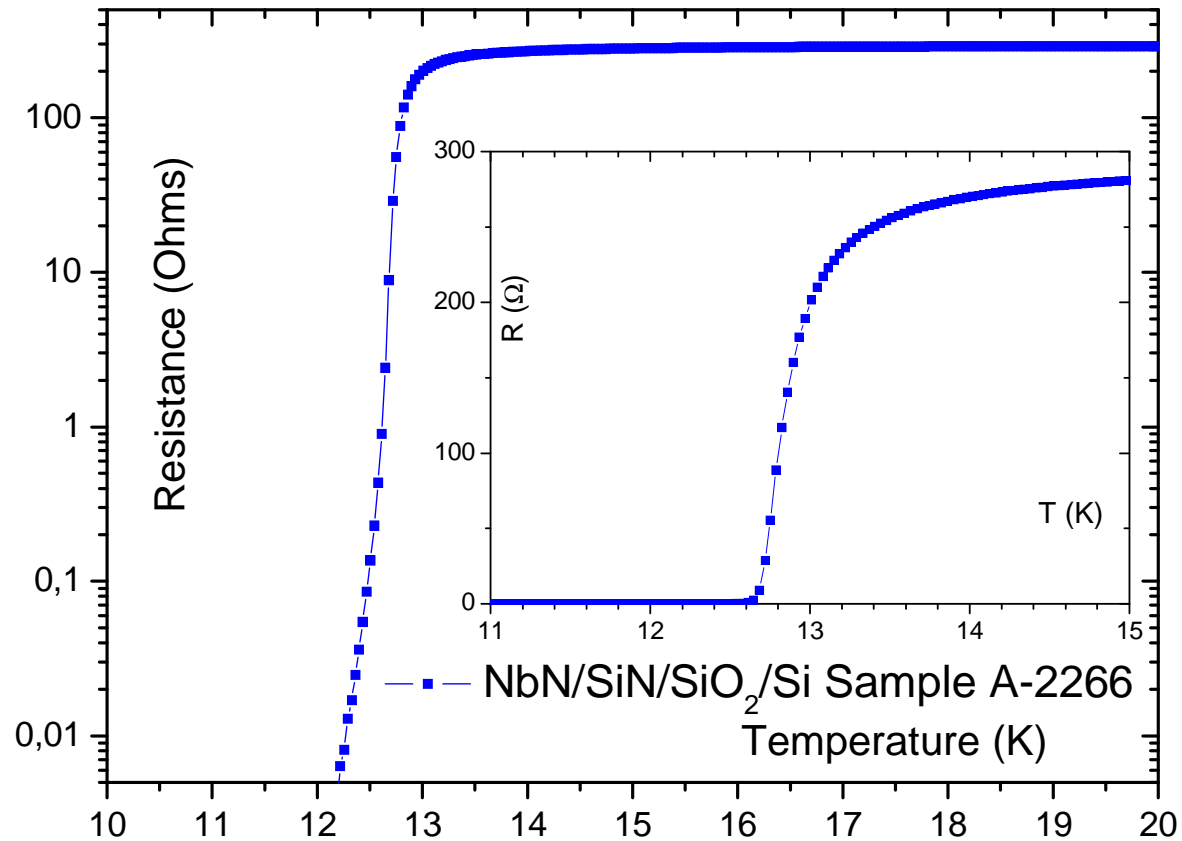


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Couche NbN (~4nm)/SiN-SiO_x/Si pour détecteur hétérodyne HEB sur membrane, col. *LERMA*

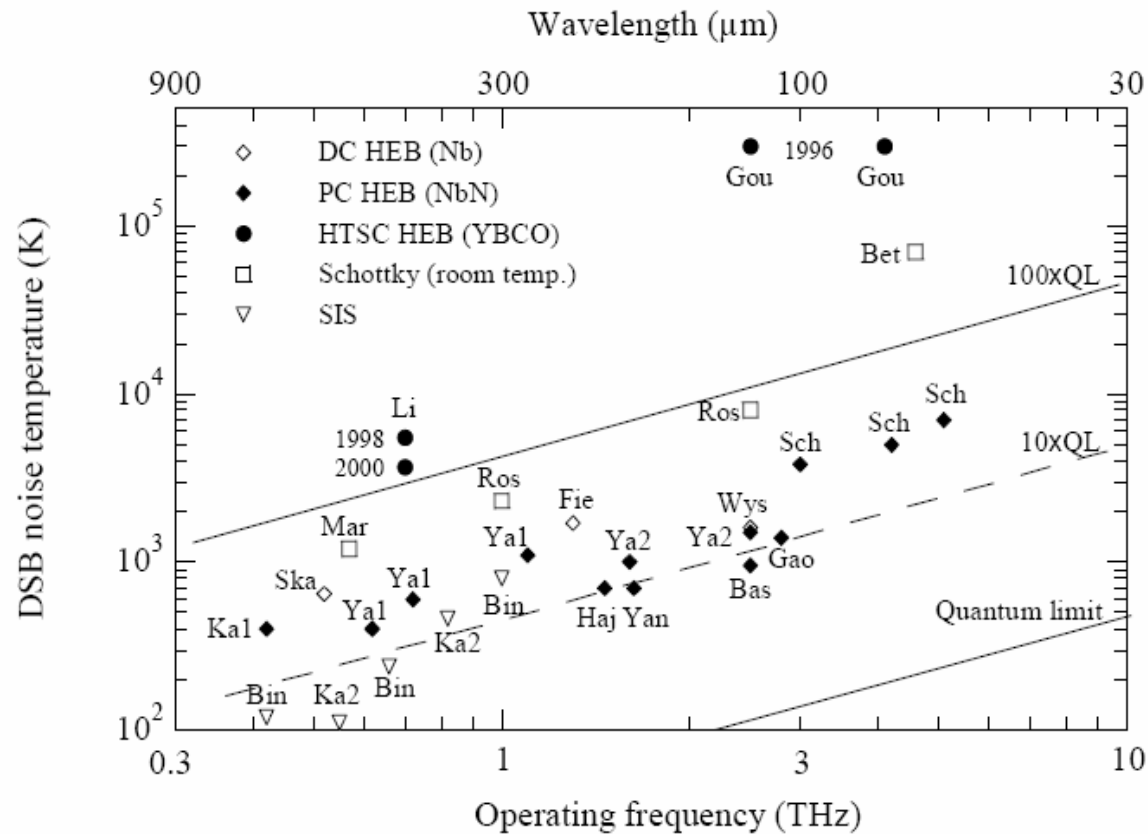


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



État de l'art des SIS et HEB



Température de bruit 'Double side-band' en fonction de la fréquence du rayonnement pour les détecteurs hétérodynes.

[1] A. J. Kreisler and A. Gaugue, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. 1235-1245, 2000.

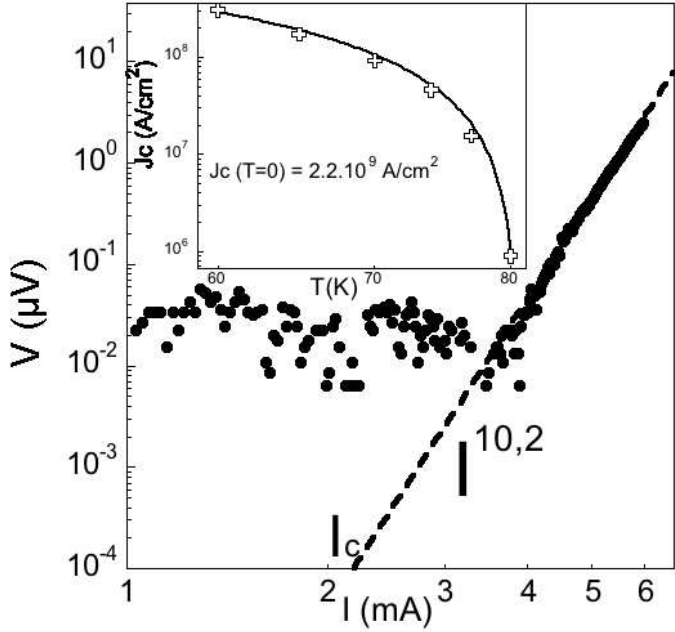
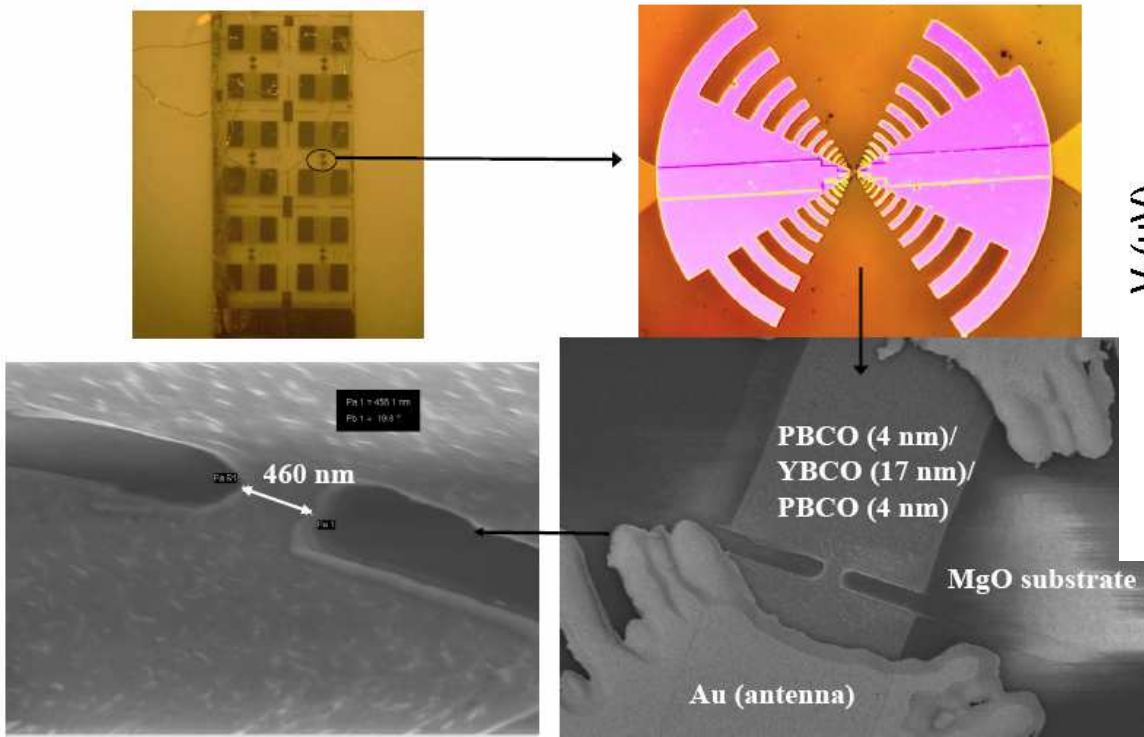


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



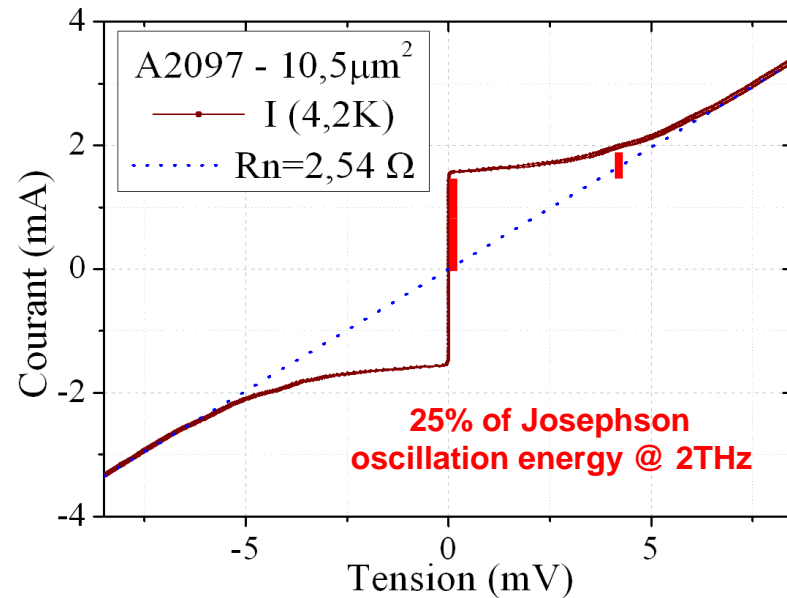
Technologie des détecteurs directs et récepteurs THz à base de nanocouches YBaCuO



M. Aurino, A. J. Kreisler, J-C. Villégier, A. F. Dégardin, Journal of Physics, **97**, 012075, (2008)



Josephson Oscillation of NbN/Ta_xN/NbN junction at 4.2K Hilbert Fourier Spectroscopy



Parameter		INAC
S	μm ²	10,5
d	nm	7
Jc	kA/cm ²	14,75
Rnlc	mV	3,94
f _j	THz	1,9
ρ	mΩcm	380

R Setzu et al *J. of Physics*, 97, 012077, (2008)

$$J_c(T) \propto \Delta(T)^2 \sqrt{T} e^{(d/\xi_n(Tc))\sqrt{T/Tc}}$$

$$S_{i_f^2}(f) = \left(\frac{1}{\pi}\right) P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H(f_j)}{(f_j - f)} df_j$$

$$H(V) = (8/\pi)(h/2e)[\Delta I(V)I(V)V/I_c^2 R_n^2]$$

$$\delta f = 4\pi(2e/h)^2 kT(R_d^2/R_n)[1 + (I_c^2/2I^2)]$$

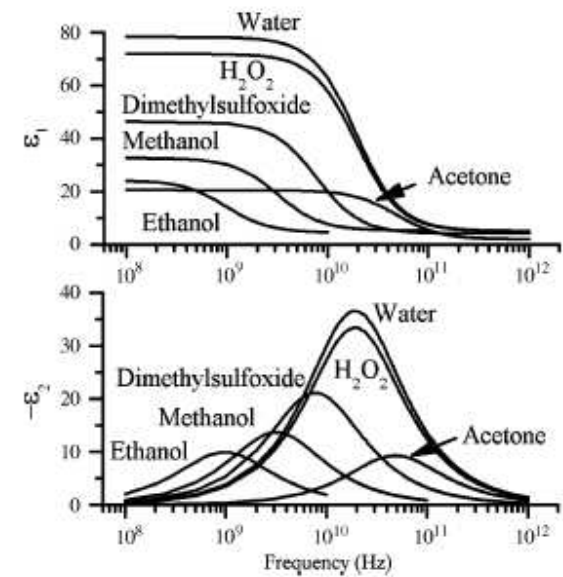
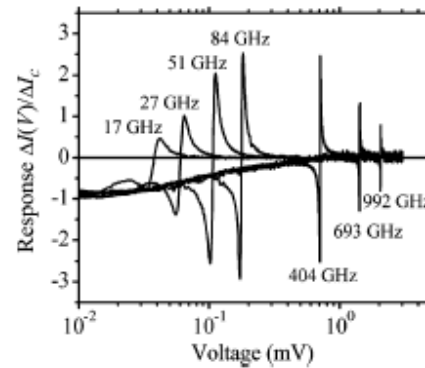
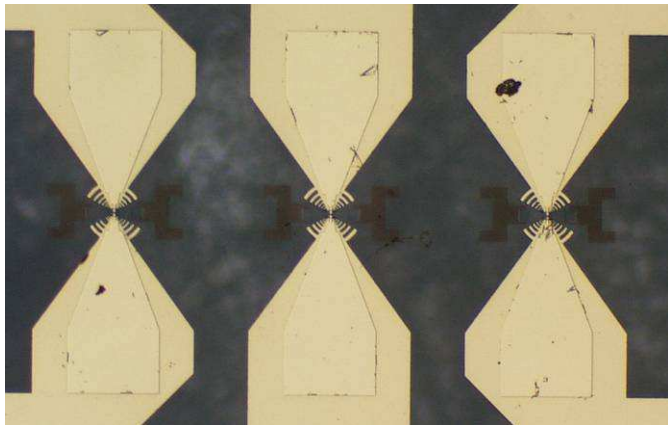


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



High-Tc Josephson Square-Law Detectors and Hilbert Spectroscopy



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



High-Tc Josephson Square-Law Detectors and Hilbert Transform Spectroscopy

Divin et al, Julich, IEEE, 2008

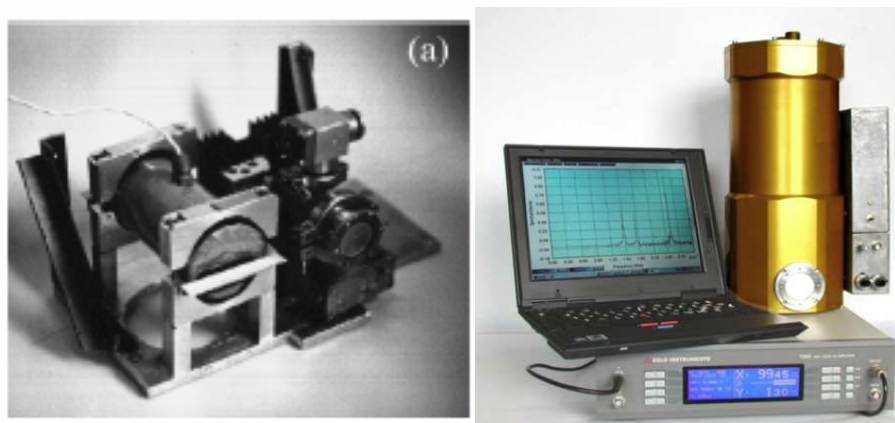
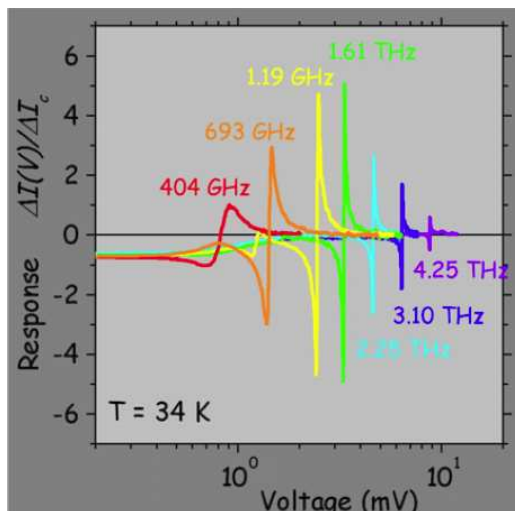
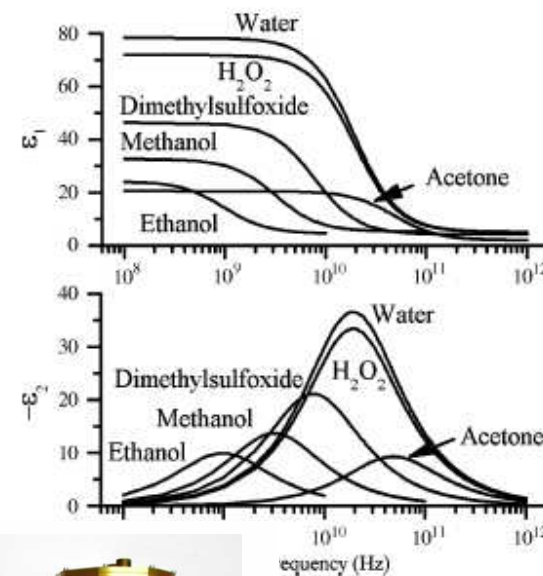
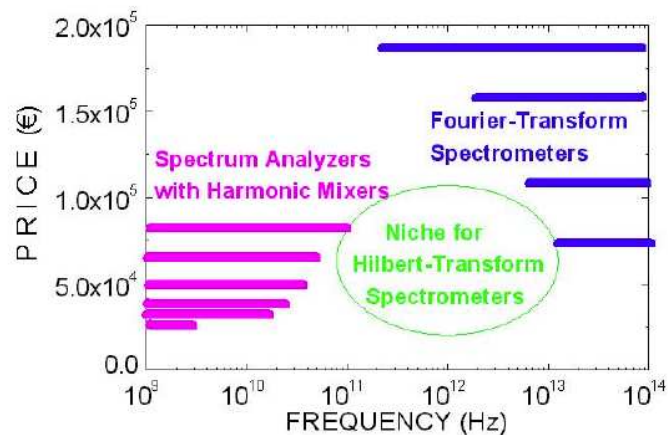
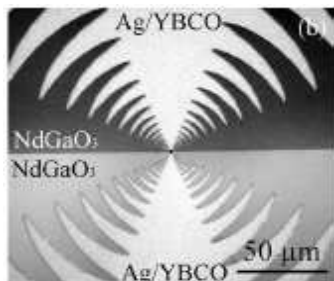


Fig. 6. Two demonstrators of Hilbert transform spectrometers with (a) a Stirling cooler and (b) a liquid-nitrogen cryostat.

T~70K



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

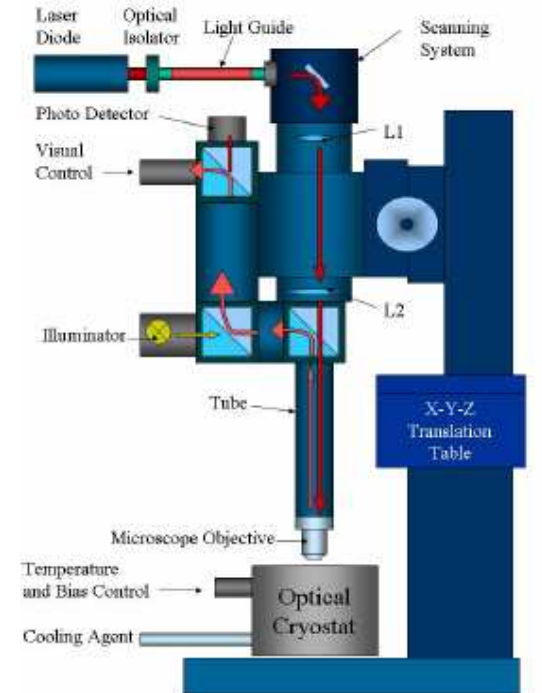
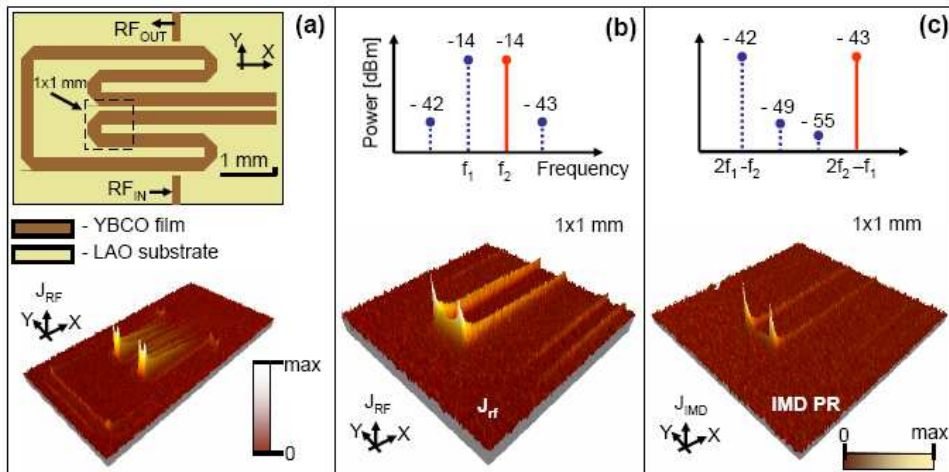
jean-claude.villegier@cea.fr



Imaging of Microwave Currents and Sources of Nonlinearities in Superconducting Circuits

A. Ustinov et al, Euroflux, 2008

Spatially-resolved microwave photo-response

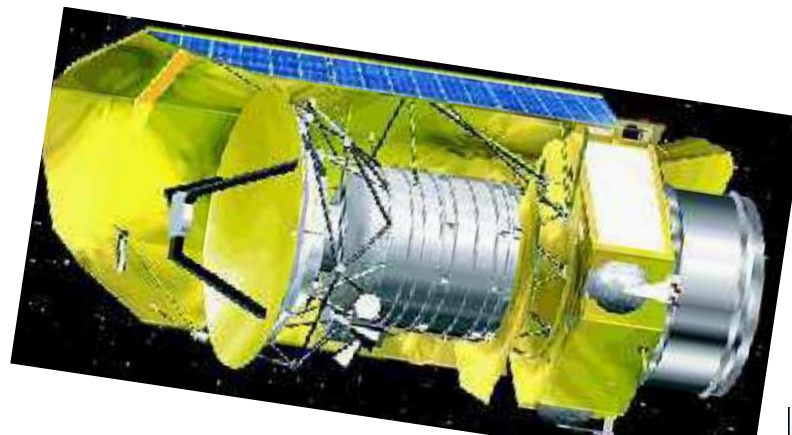


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr

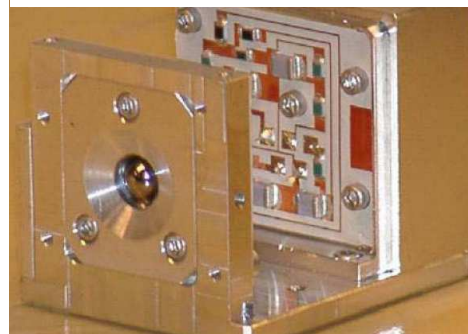


Télescopes avec récepteurs submillimétriques SIS et HEB-NbN



Band 6L Herschel HIFI

Observatoires du Chili, et d'Hawaï



MixerTHz, HEB-NbN, Chalmers-MSPU



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Hot-Electron Titanium Nanobolometers

B.Karasik et al, ASC-08, IEEE on Appl Supercond. 2009

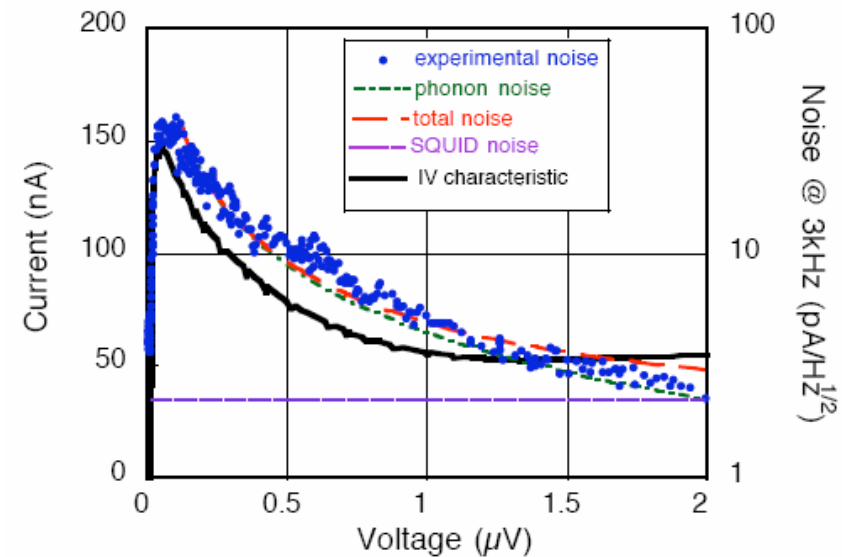
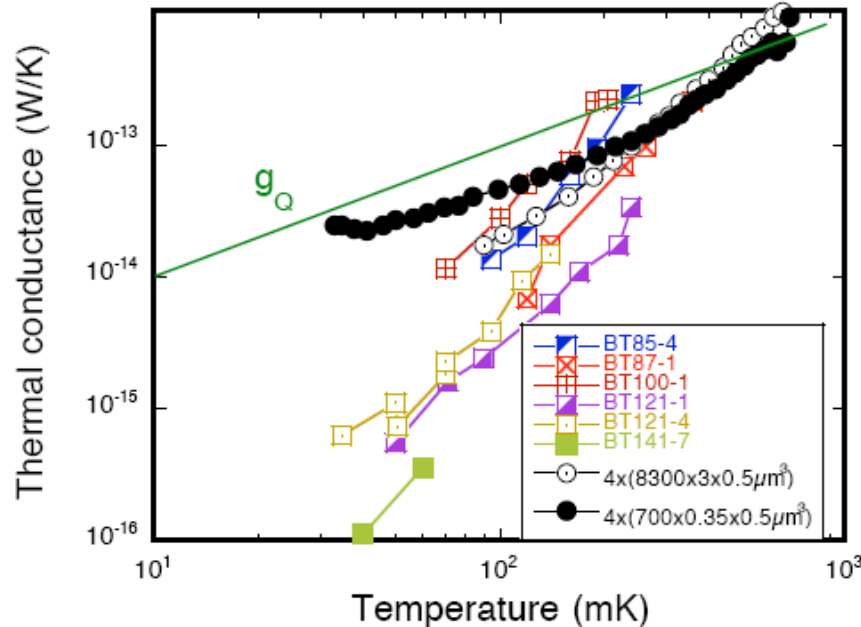


Fig.1. Comparison of the thermal conductance in Si_3N_4 beam suspended bolometers [4] (round symbols) and in Ti hot-electron nanobolometers similar to those described in [1] (square symbols). The Ti devices were 40 nm thick, 0.1-0.14 μm wide and 0.5-1.0 μm long. $g_Q = \pi^2 k_B^2 T / 3h$ is the so-called “quantum of thermal conductance” which is the limit of the thermal conductance for 1D photons and 1D ballistic phonons.

$$NEP = \sqrt{4k_B T^2 G_{e-ph}} = (6-7) \times 10^{-18} \text{ W/Hz}^{1/2}.$$

$$\tau = \frac{C_e / G_{e-ph}}{1 + L} = 1.9 \mu\text{s}.$$

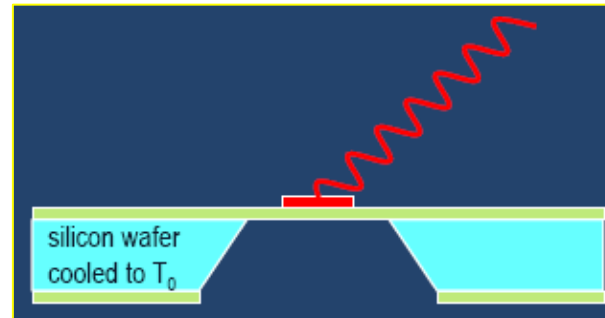


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Multispectral imaging & image fusion: Vis + THz



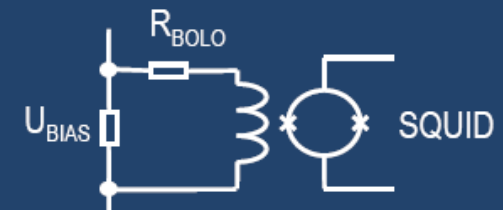
	Microwave	Terahertz	Infrared
spatial resolution	poor	fair	good
transmission	perfect	good for below 1 THz	poor
spectral information	almost none	broad vibrational lines	sharp optical transitions
technology readiness level	established, costly for high frequencies	lab tested	established, cheap



Vis + THz

ipht jena

preamplifier (in our case: SQUID)



Dry cooling = carefree

Cooling is not longer a big issue.

Pulse tube coolers, even with additional cooling stages down to 10mK(!) are commercially available and approved in industrial environments.



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Hot Electron Bolometers, Nanowire SSPDs, Tunnel Junction Single Photon Detectors

Out-line:

Introduction to '*non thermally controlled*' superconducting photon detectors

1- Principle of Hot Electron Bolometers (HEB) and Josephson phase mixers for direct and heterodyne detection

2- Superconducting Nanowire Single Photon Detector (SNSPD)

2-1 Self-resetting Geiger mode based on the hot spot

2-2 Fabrication of NbN SSPD and compact SWIFTS spectrometer

3- Superconducting Tunnel Junction Detectors (STJ)

4- LTS & HTS Detectors Integration in Superconducting Electronics



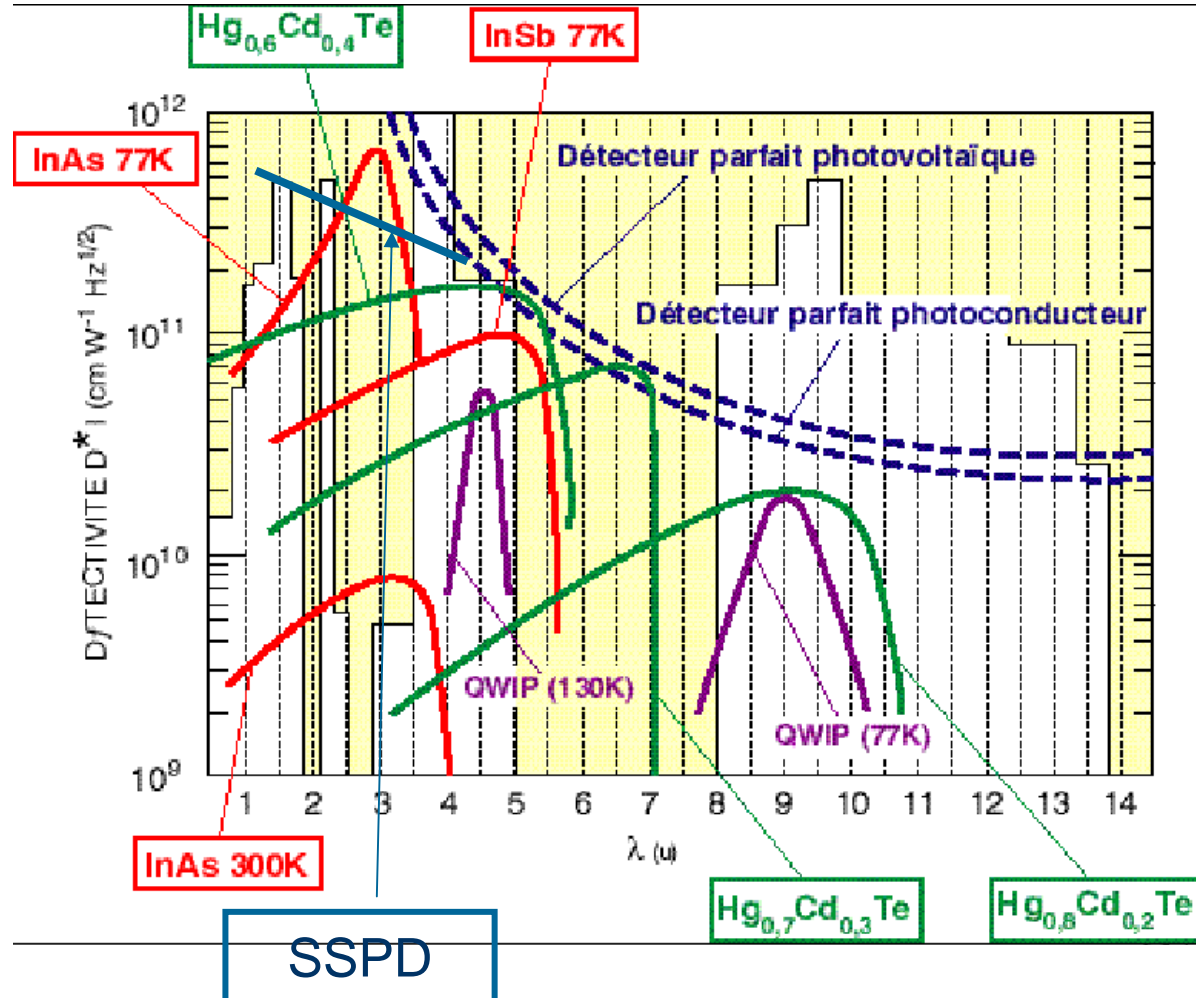
HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr

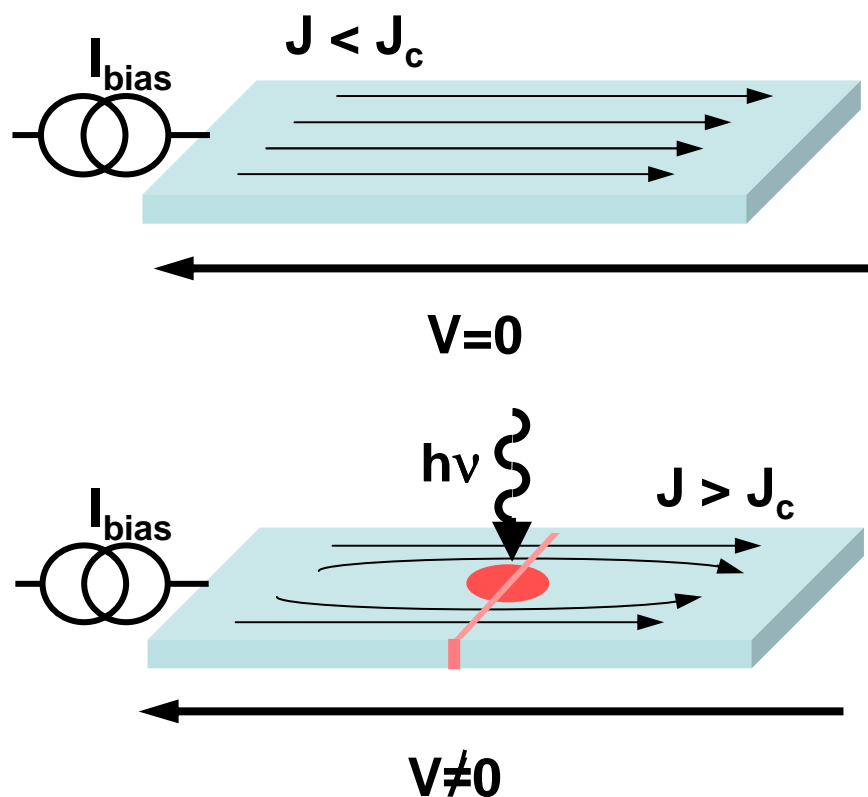


27

Délectivité des photodétecteurs infrarouges



Processus de détection d'un photon unique par un « SSPD* » NbN



- pont de largeur < 200 nm) en NbN ultrafin ($\sim 3,5$ nm) épitaxié sur saphir et de $T_c \sim 11$ K

- Interaction du photon avec le nanopont parcouru par un *courant supra faiblement sous-critique*.

- Création d'un point chaud bref puis d'une **disjonction transitoire**: Hot-Spot ($\tau < 30$ ps) puis Phase-Slip ($\tau < 100$ ps)

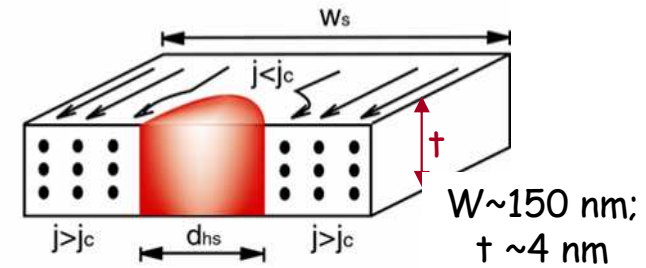
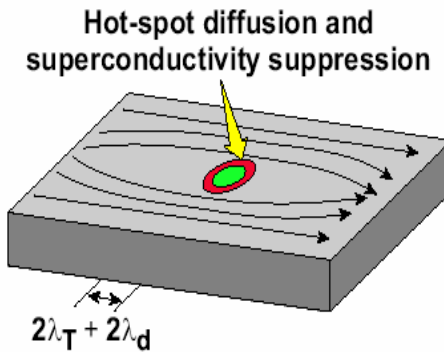
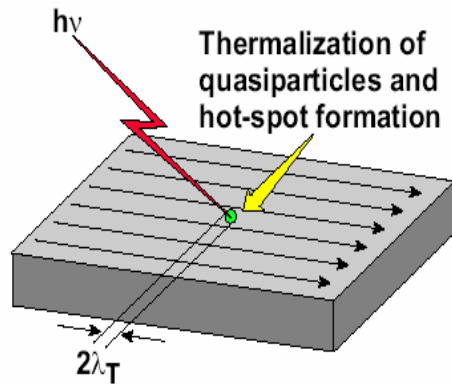
- Impulsion de tension détectée (~ 2 mV, ~ 100 ps)

➔ Détecteur en forme de méandre pour couvrir un pixel de $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$

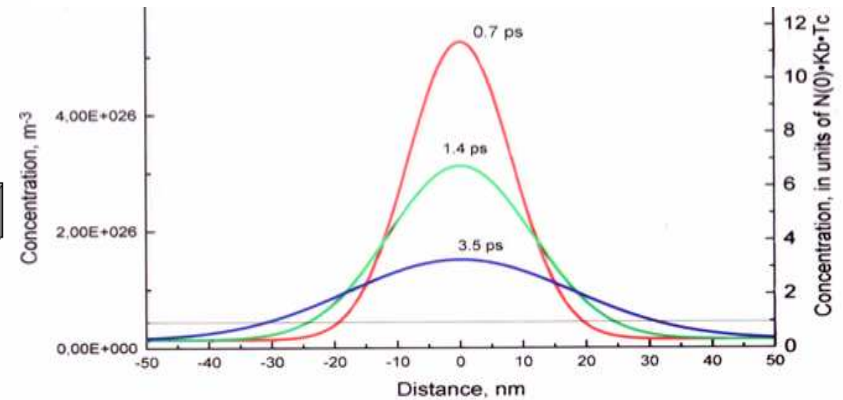
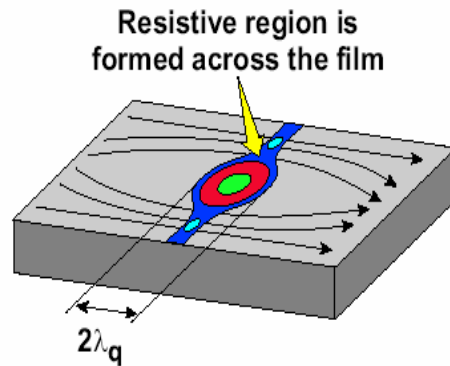
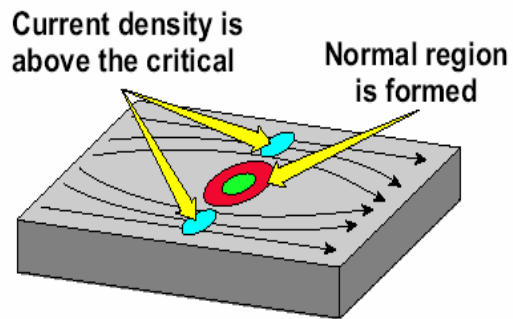


Principe physique de détection d'un photon par génération d'un point-chaud suivi d'un PSC

Application d'un courant dc sous-critique



$$r_{\max} \propto \sqrt{\frac{h\nu}{\Delta}} \sqrt{\frac{1}{N_0 k_B T_C d}} \left(\frac{\tau_{ee} v_F^2}{D} \right)^{1/3}$$



Z2509

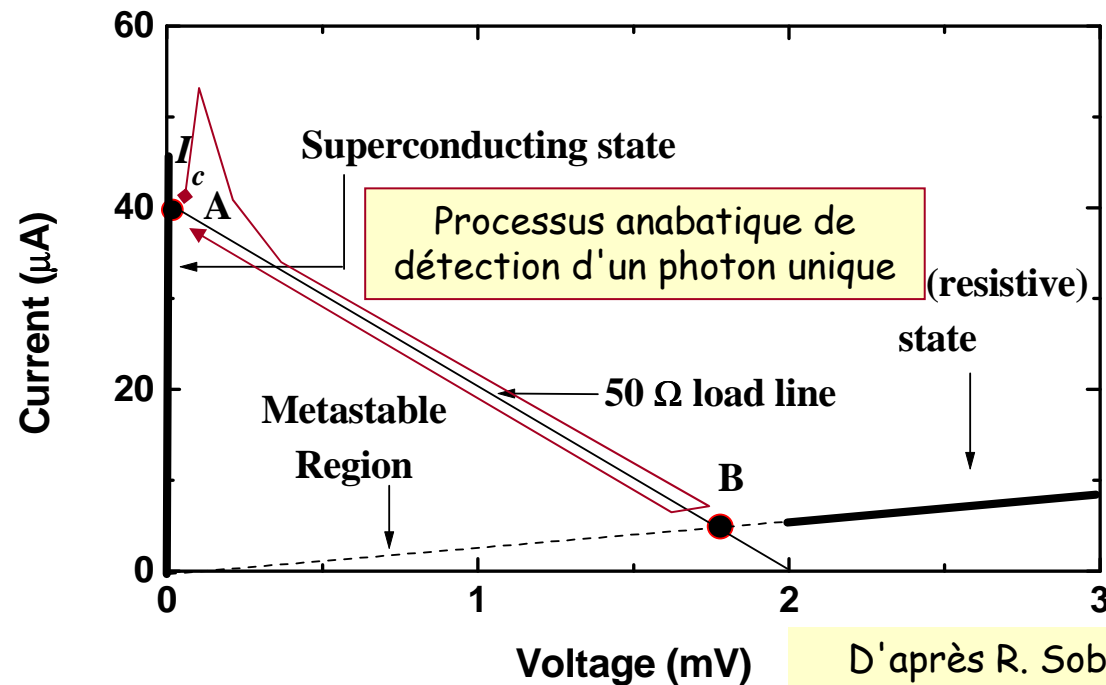
d'après G. Golt'sman, R. Sobolevski, A. Semenov et al, 2004



Régime de fonctionnement d'un photodétecteur SSPD NbN

(Superconducting Single Photon Detector)

Une ligne coaxiale 50 Ω charge shunte le détecteur (contre réaction électro-thermique et permet d'assurer le retour au point A)



D'après R. Sobolewski, G. Goltsman et al, 2002-2004

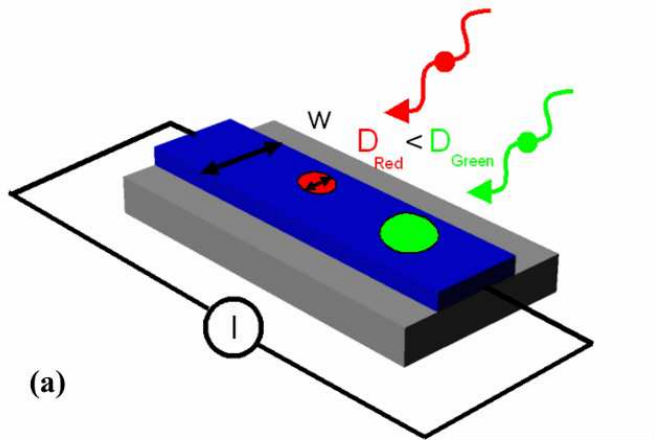


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

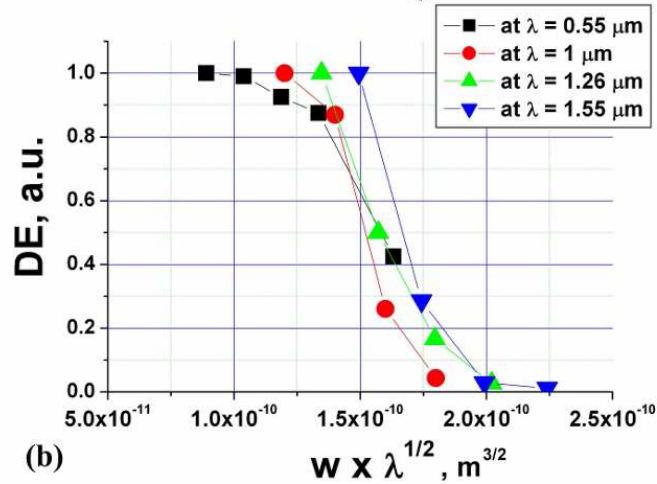
jean-claude.villegier@cea.fr



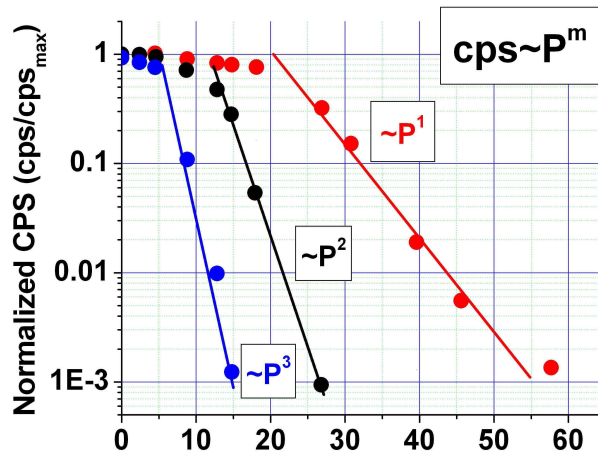
SSPD detection efficiency scales with photon energy and Nanowire section



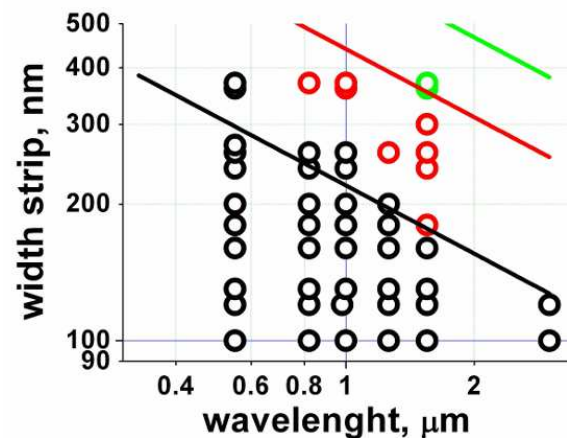
(a)



(b)



Light attenuation, dB



$$P(n) \sim \frac{e^{-m}(m)^n}{n!}$$

n is the slope which correspond to regime of detections.

When $m \ll 1$ (by attenuating the flux of photons on the SSPD), the probability $P(n)$ simplifies to

$$P(n) \sim \frac{m^n}{n!}$$

G. N. Gol'tsman, et al., Appl. Phys. Lett. 79, 705 (2001)

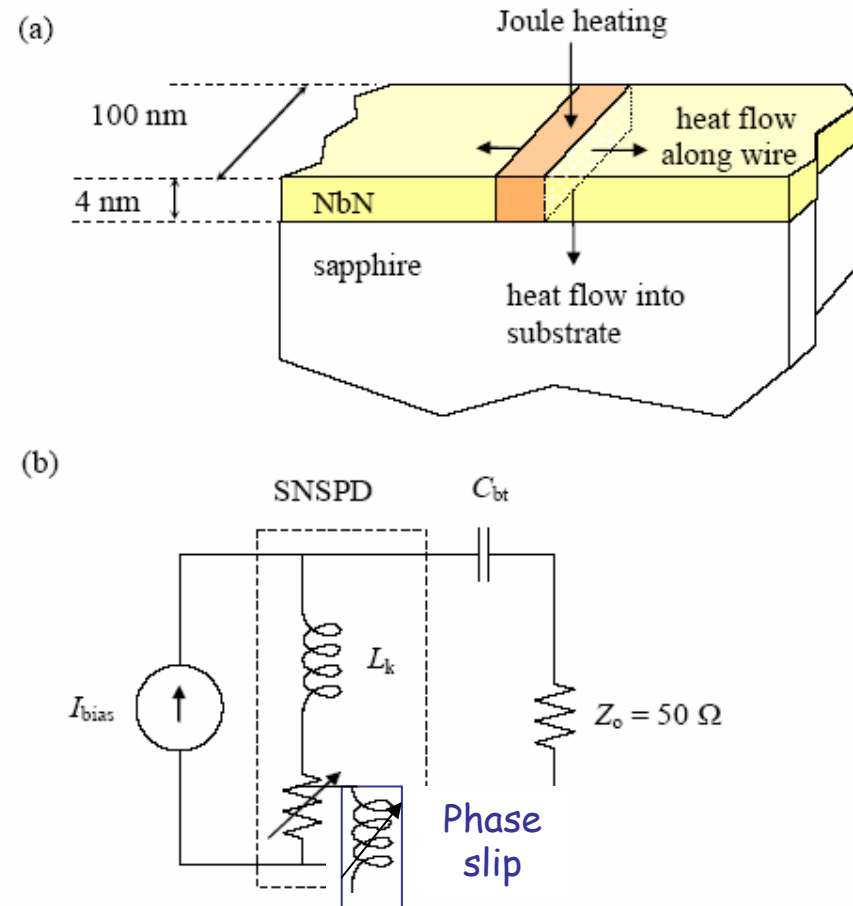
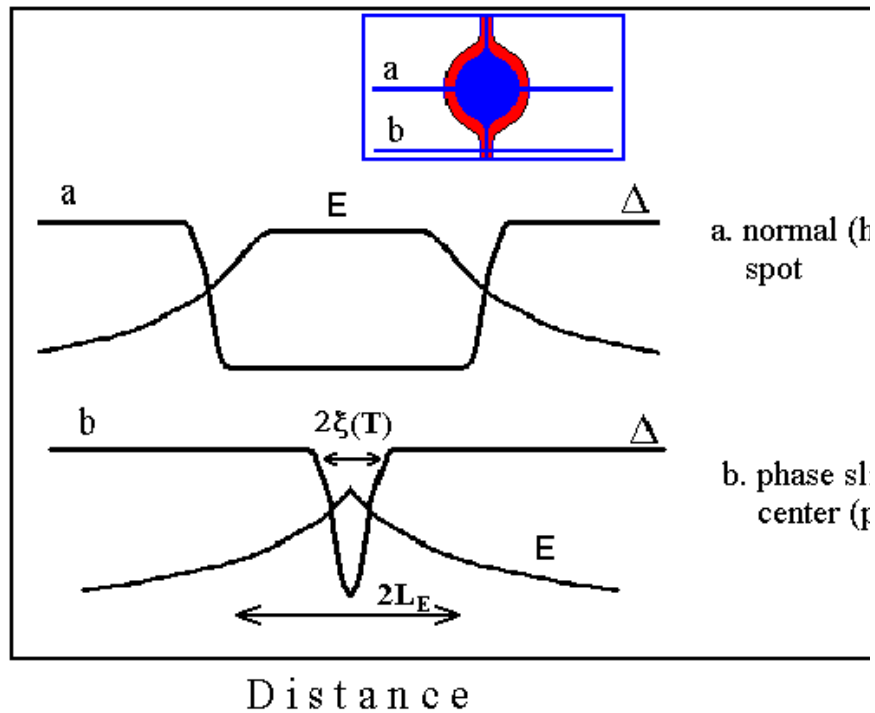


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

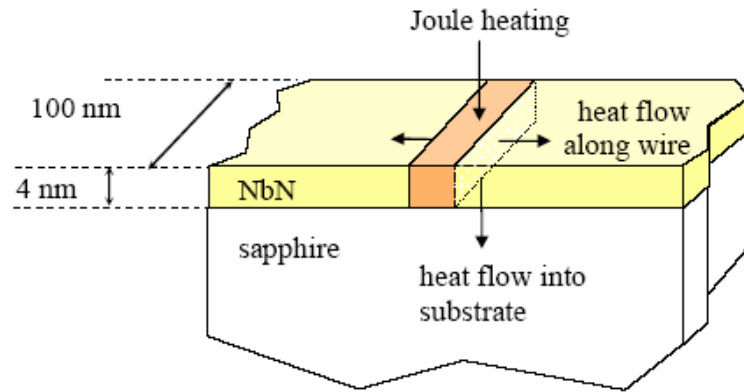
jean-claude.villegier@cea.fr



Mécanisme de formation combinée d'un point chaud suivi d'un PSC



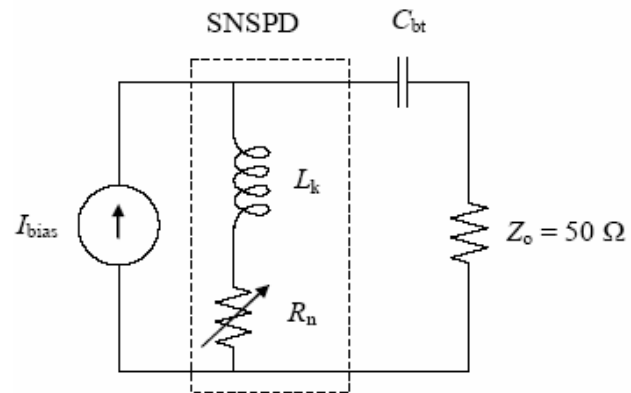
Modèle électrothermique du SSPD NbN



$$J^2 \rho + \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha}{d} (T - T_{\text{sub}}) = \frac{\partial cT}{\partial t}$$

$$I_c(T) = I_c(0) \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right)^2$$

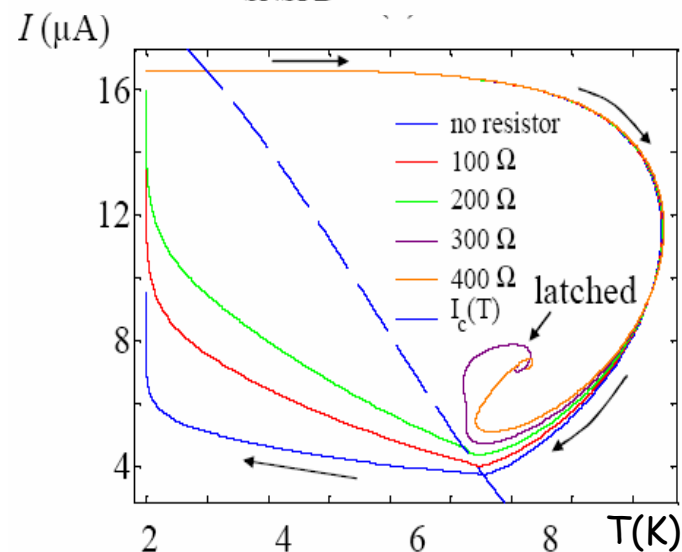
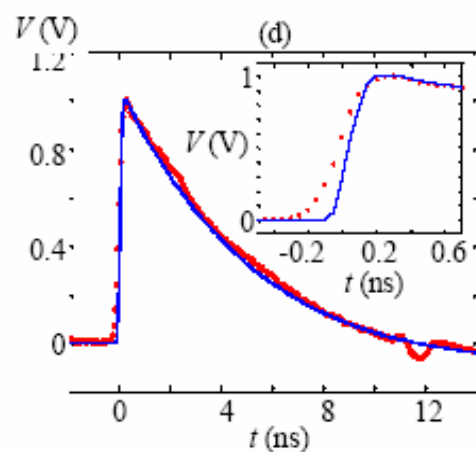
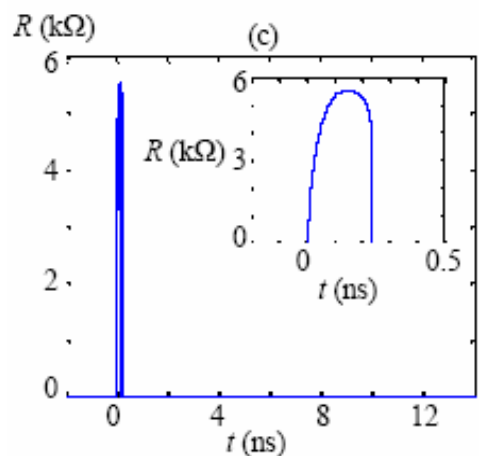
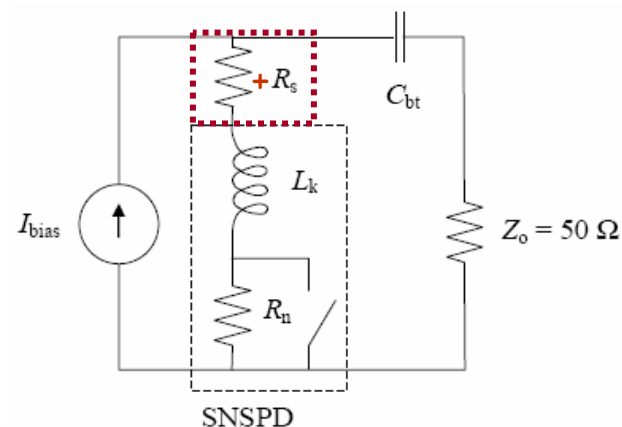
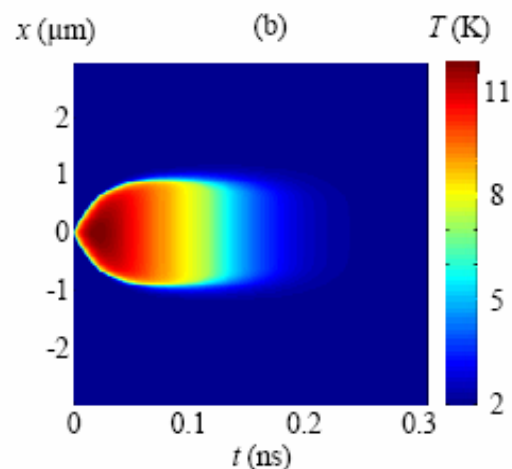
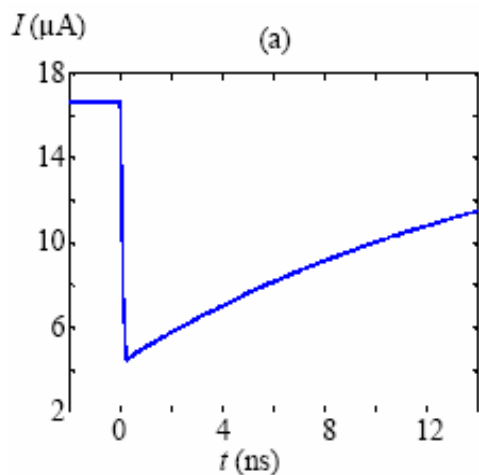
$$C_{\text{bt}} \left(\frac{d^2 L_k I}{dt^2} + \frac{d(IR_n)}{dt} + Z_o \frac{dI}{dt} \right) = I_{\text{bias}} - I$$



d'après Kerman et al IEEE Appl.Sup. 2007



Modèle électrothermique du SSPD NbN (2)



D'après Kerman et al ASC-06



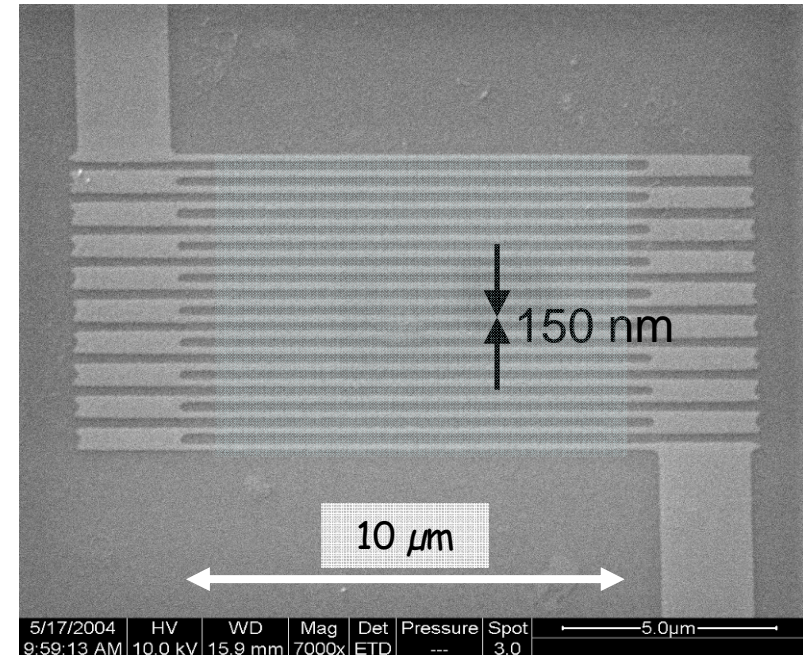
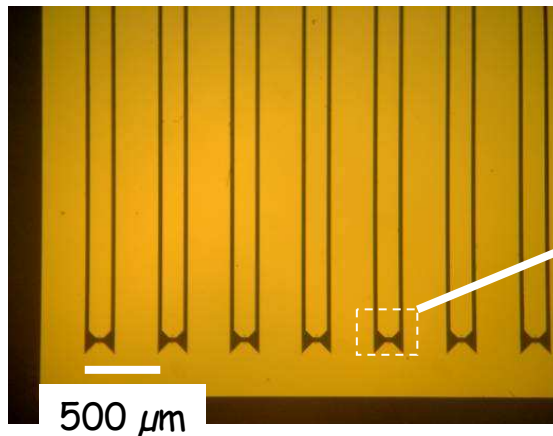
HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Détecteur HEB-NbN ultrafin ($t=4 \text{ nm}$) en forme de méandre

Polarisation dc (I ou V) et ac
en ligne coplanaire (1-50 GHz)



Intérêt du méandre: couvrir la surface maximale d'un pixel de détection infrarouge pour détecter un photon unique à $1,55 \mu\text{m}$

Collaborations ACI-DESIQ et CNES: LAOG, UJF-LSP, Leti-DOPT, ENS-Paris, IOTA,...

Collaborations STREP-SINPHONIA: Univ. Genève (LPMC & GAP-O), Univ. Moscou, Id-Quantique, EPFL, CNR, Thalès, Pirelli



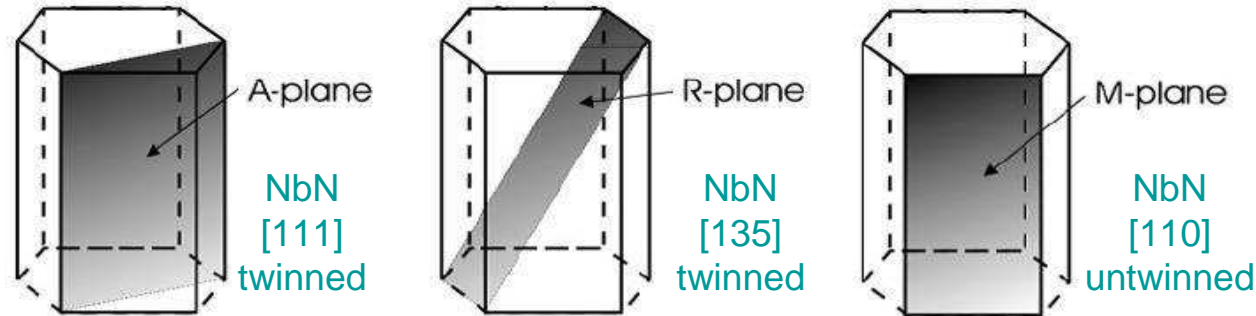
HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



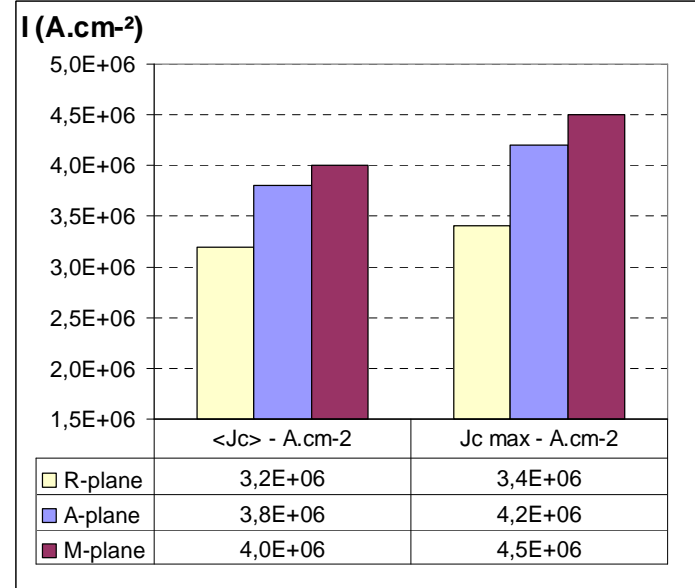
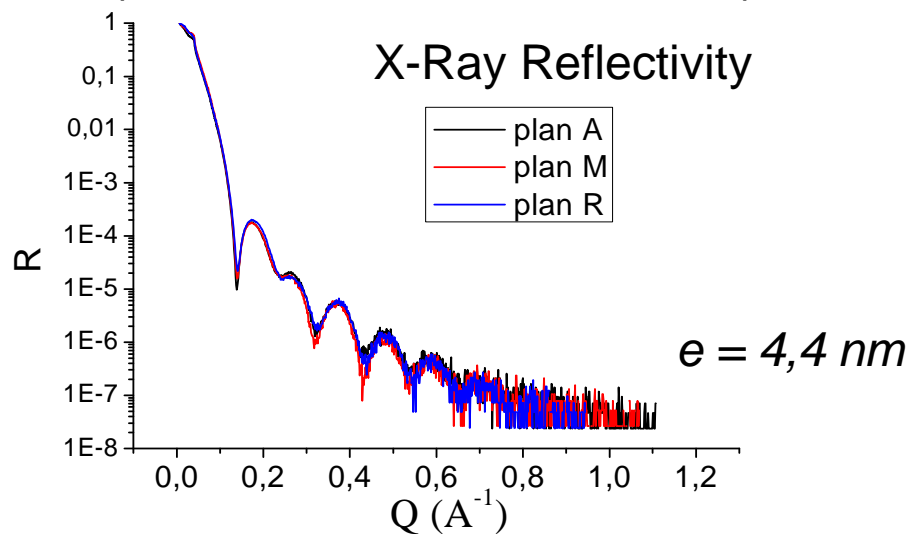
Dépôt par épitaxie du NbN sur l'orientation M du saphir (T_c , ρ , J_c)

Mesure de l'épaisseur par réflectivité de R-X



R. Espiau de Lamaestre, Ph. Odier, J-C. Villégier, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 232501 (2007)

Epaisseurs NbN sur A2180 ==> Identiques!



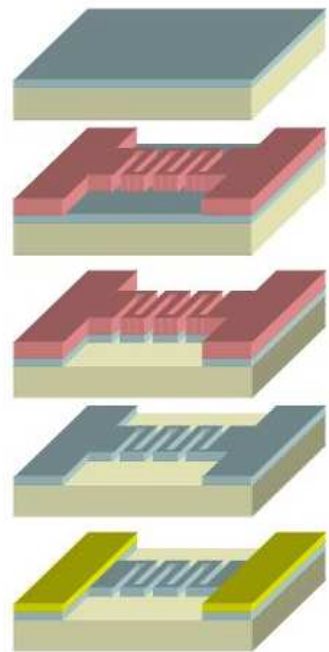
HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Procédé de fabrication des SSPD (CEA)

Description du process :



(a)

(a) NbN deposition on substrate by DC-mag sputtering at 600°C, 3 and 4 inch sapphire (or Si, MgO) wafers
[R. Espiau, Ph. Odier, JC Villegier, APL 2007]

(b)

(b) Resist deposition, e-beam lithography

(c)

(c) NbN SF6 RIE patterning

(d)

(d) Resist stripping – EKCLE

(e)

(e) Gold contacts deposition by sputtering

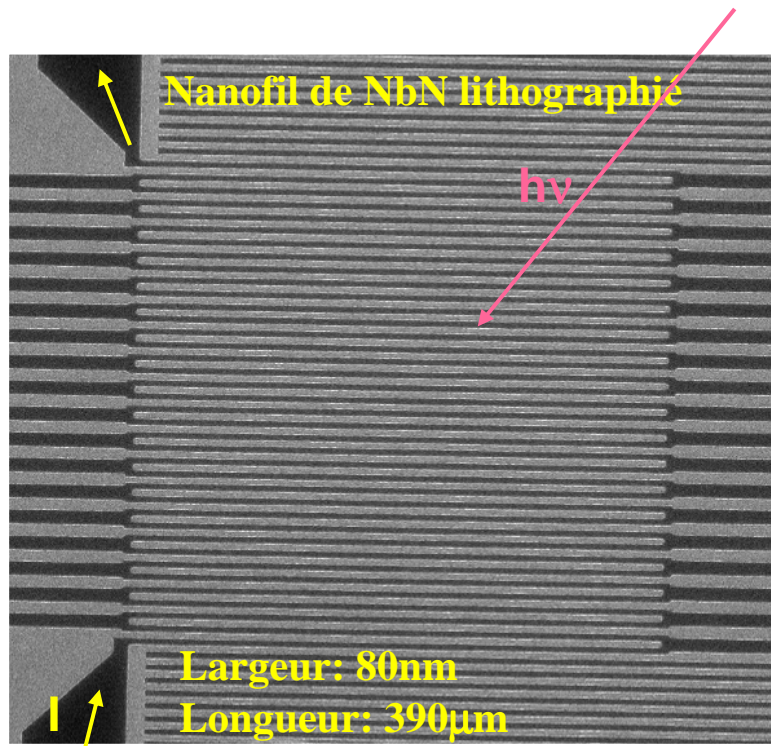
C. Constancias, R. Espiau de Lamaestre, O. Louveau, P. Cavalier; J-C. Villégier, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **25-6**, 2041 (2007).



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

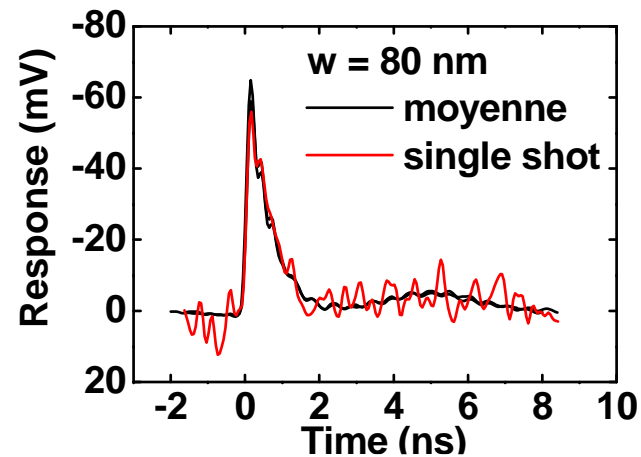
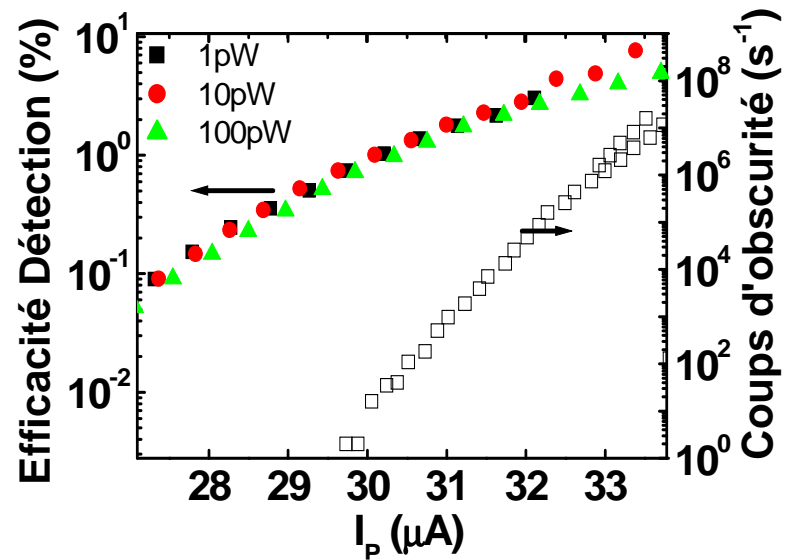
jean-claude.villegier@cea.fr





Application à la Cryptographie Quantique
(STREP-Sinphonia)

R. Espiau de Lamaëstre, Ph. Odier, E. Bellet-Amalric, P. Cavalier, S. Pouget, J-C. Villégier, Journal of Physics, 97, 012046, (2008)



$$L_K = \mu_0 \frac{\lambda_L^2}{t \cdot w}$$

Détection de photon unique à l'état de l'art (QE≈8.5% @ λ=1.55µm, pixel 3x3 µm, T=4.2K)

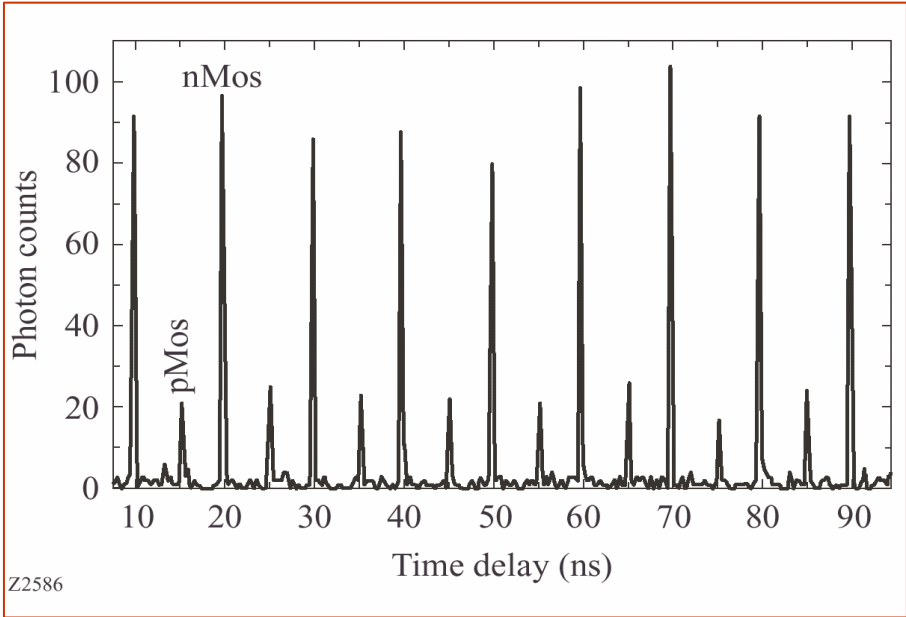


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



L'amplitude et la durée de la réponse électrique dépend de l'énergie déposée au delà d'une énergie seuil



Propriétés :

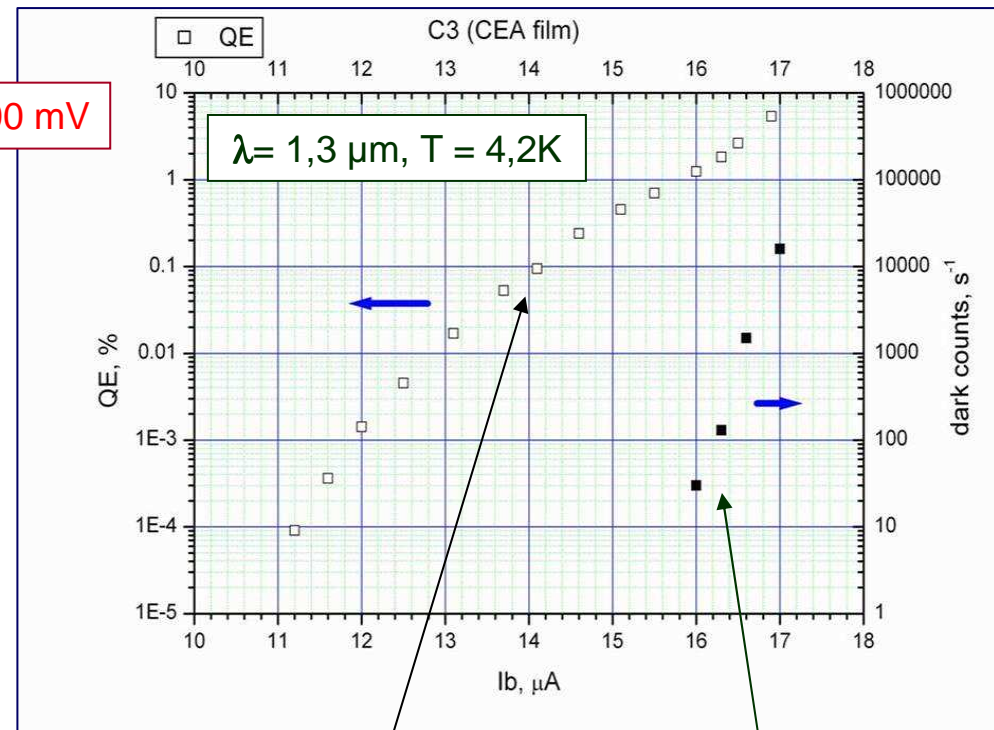
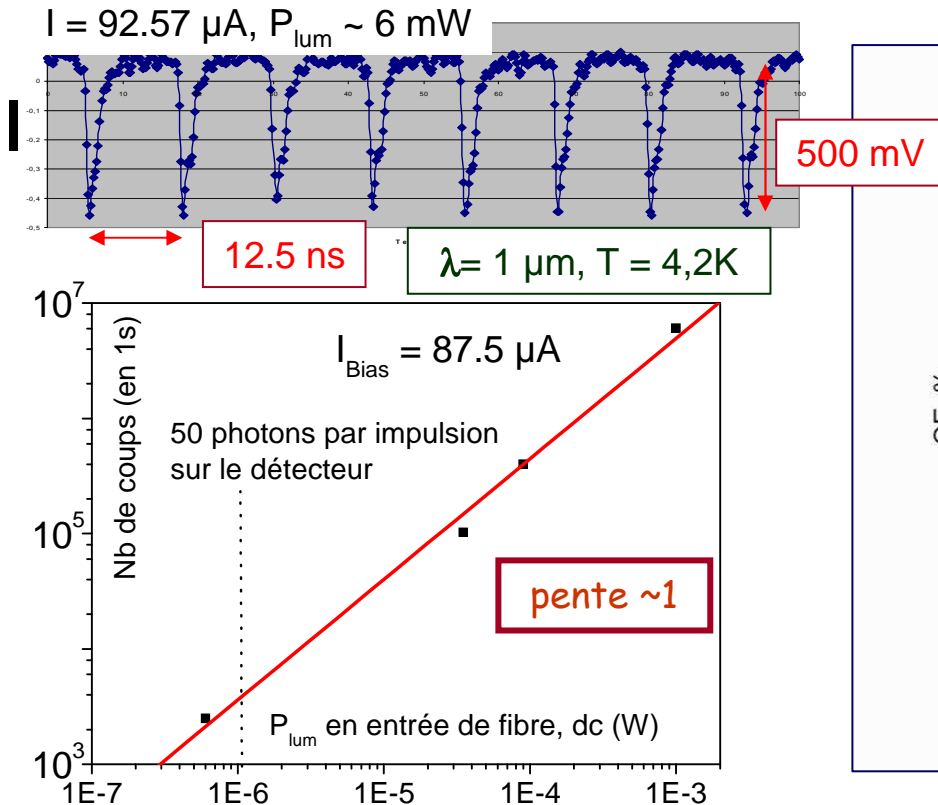
- Régime de comptage de photons
- Détecteur ultrarapide (20 ps) sans temps mort
- Gamme de longueur d'onde : visible et proche IR
- Possibilité de résoudre le nombre de photons

Photon counting histogram from a 0.13 mm, 1.3 VCMOS chip running at 100 MHz measured with 3.5-nm-thick NbN SSPD with bias current of $0.85 I_c$

NPTest company



Comptage de photons infrarouges à haute fréquence par un détecteur à nanofil NbN



Réponses temporelles fonction du nombre de photons d'un détecteur NbN 4nm

Efficacité Quantique et coups d'obscurité fonction du courant appliqué à 4,2K



Le refroidissement de 4K à 2K permet de réduire les coups d'obscurité et d'augmenter l'efficacité quantique jusqu'à saturation du détecteur SSPD à 1,3 μ m

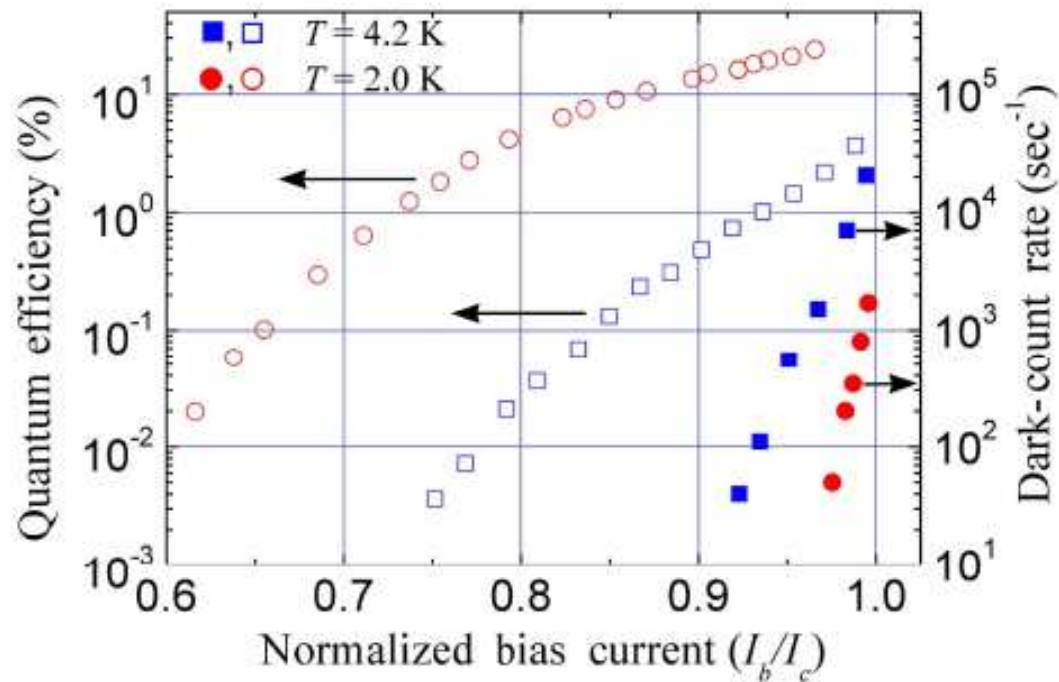
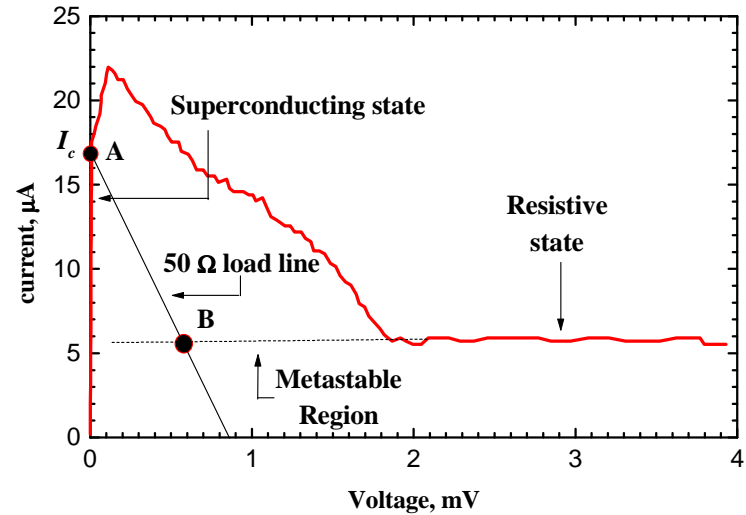
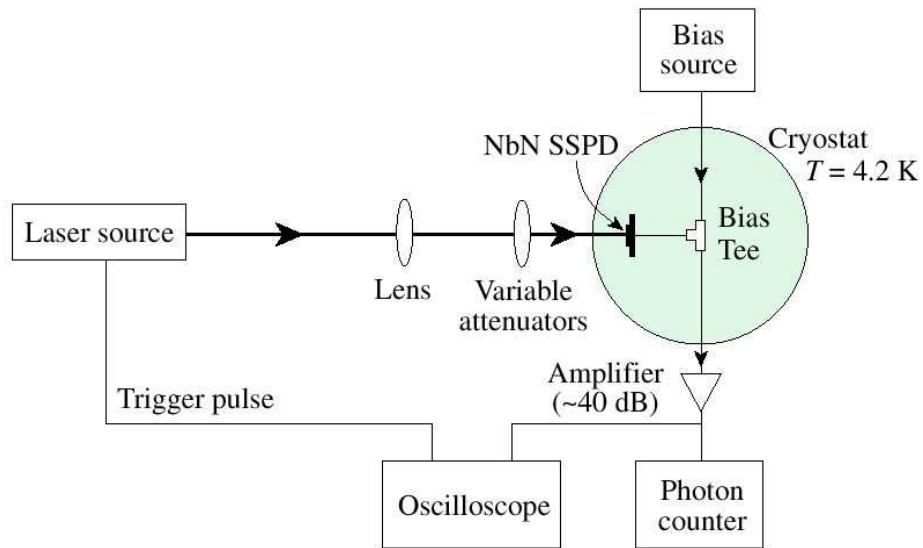


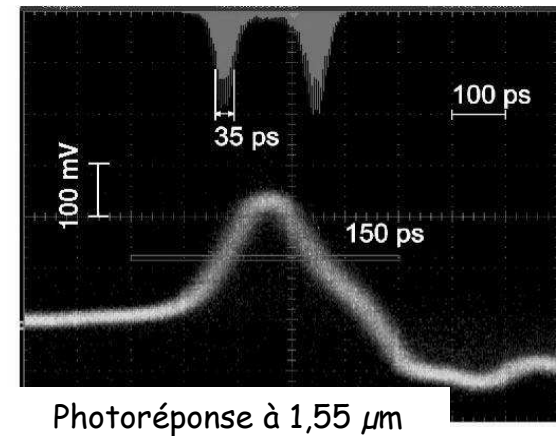
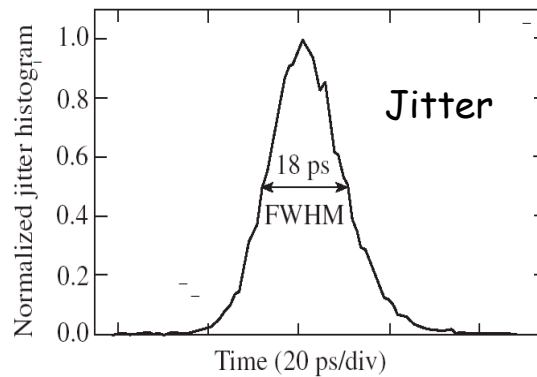
Fig. 3. Quantum efficiency and dark-count rate vs. normalized bias current at 1.3 μ m for two different temperatures (4.2 K and 2.0 K).



Mesure de la très faible gigue (jitter) du SSPD NbN

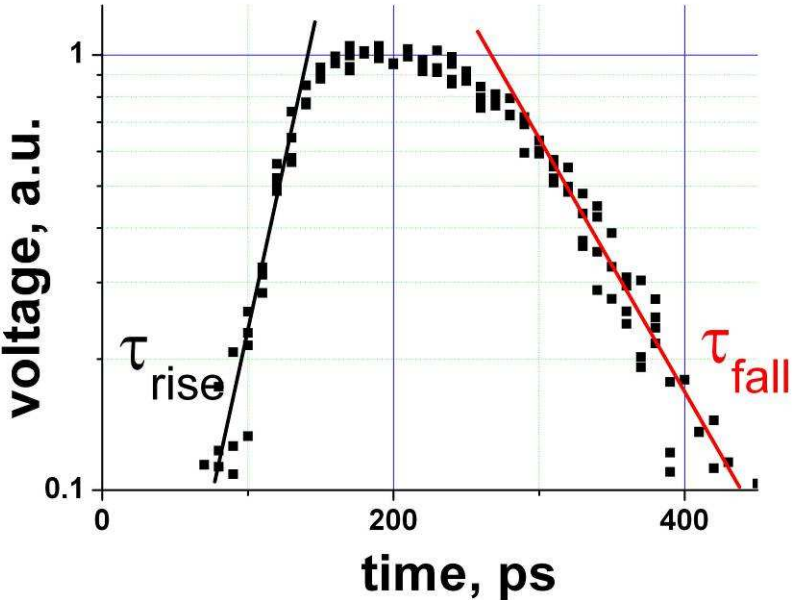


D'après R. Sobolewski, G. Goltsman et al, 2002-2004

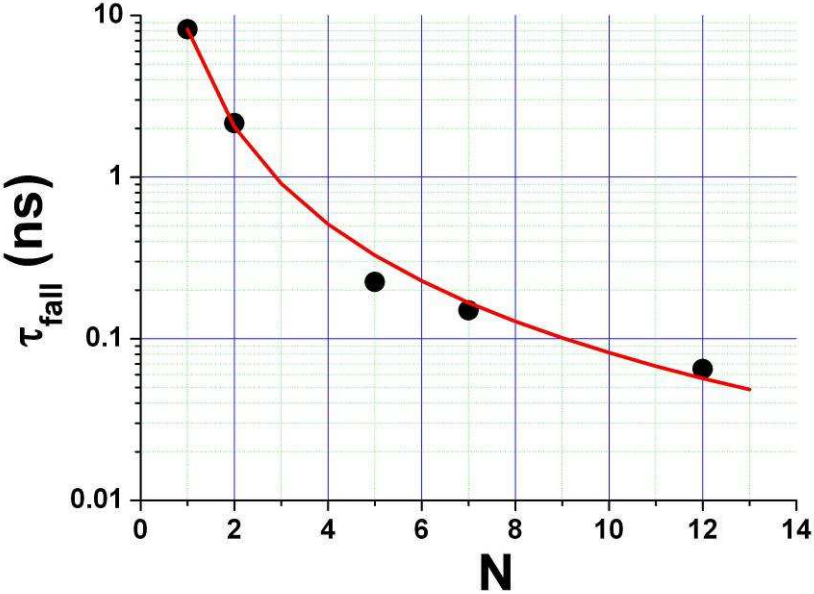


Ultrafast SSPDs

V(t) plotted in log scale for detector with 12 sectors.



Fall time versus number of sectors in the SSPD parallel structure.



The pulse duration (measured at half maximum) of a 12-sections SSPD is 200 ps.

$$\tau_{fall} = \frac{L_k}{50\Omega \cdot N^2}$$



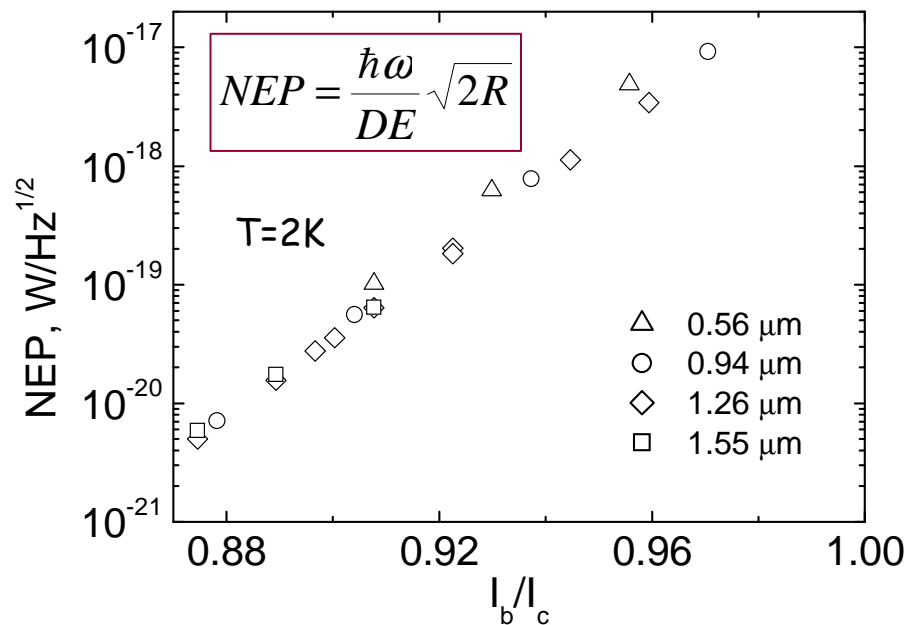
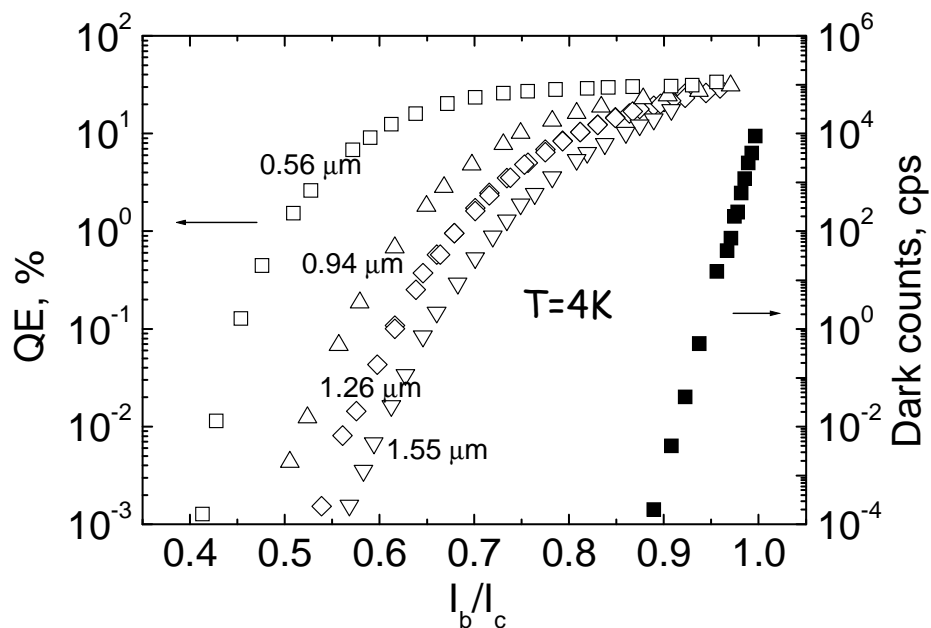
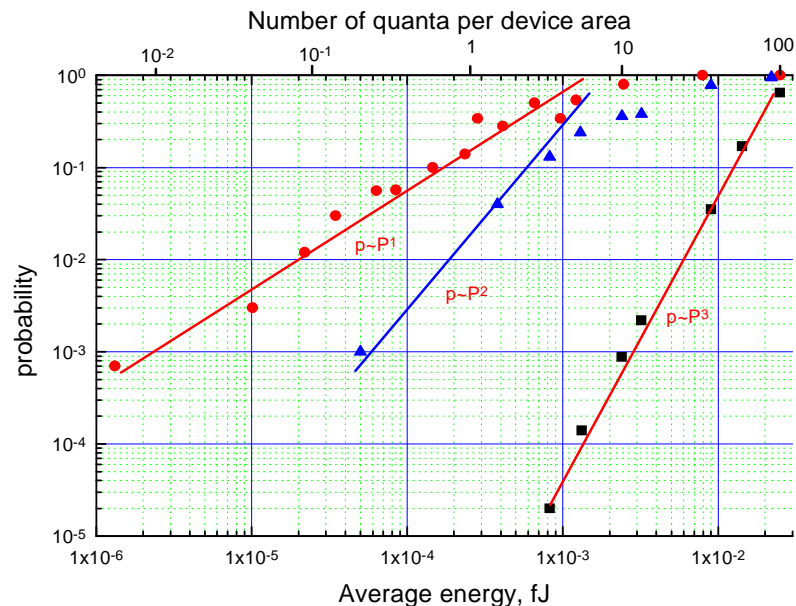
HEB,  & STJ Detectors for Tarkhov et al to appear in APL
 le.megier@cea.fr

 INSTITUT NANOSCIENCES ET CRYOGÉNIE

Très faible NEP à 2K du SSPD

G. Goltsman, R. Sobolewski et al, 2004

Ratio of number of switching-off events counted over long time to the number of trigger events as a function of average input laser pulse energy fed to device area



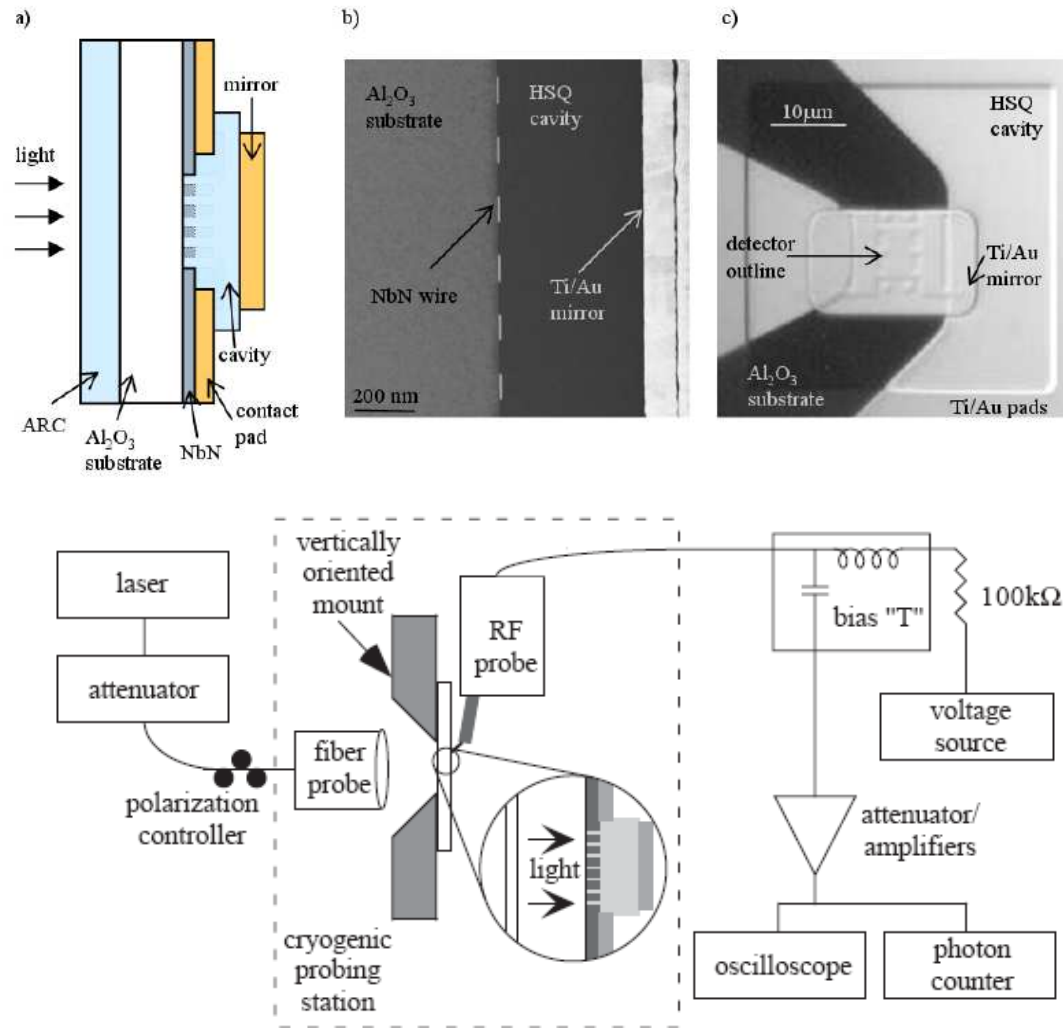
HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr

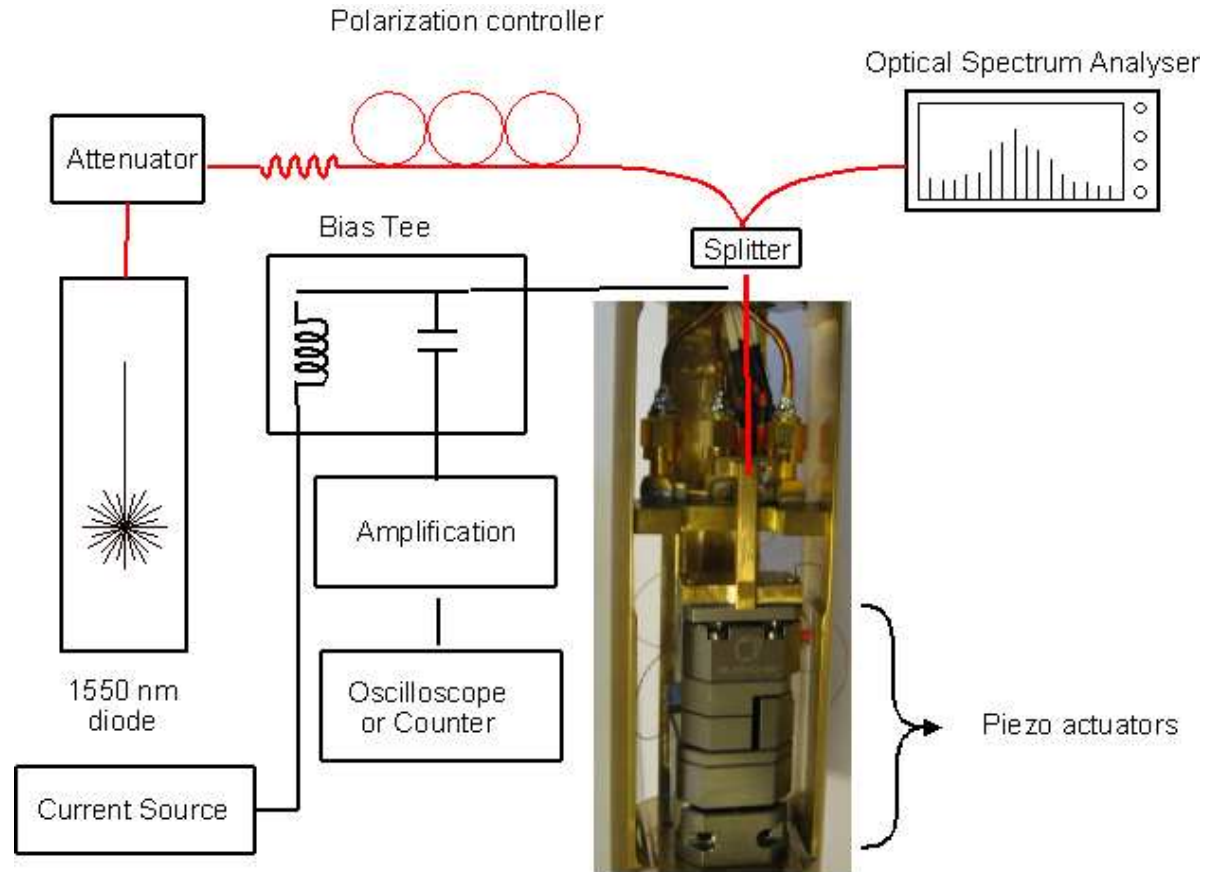


45

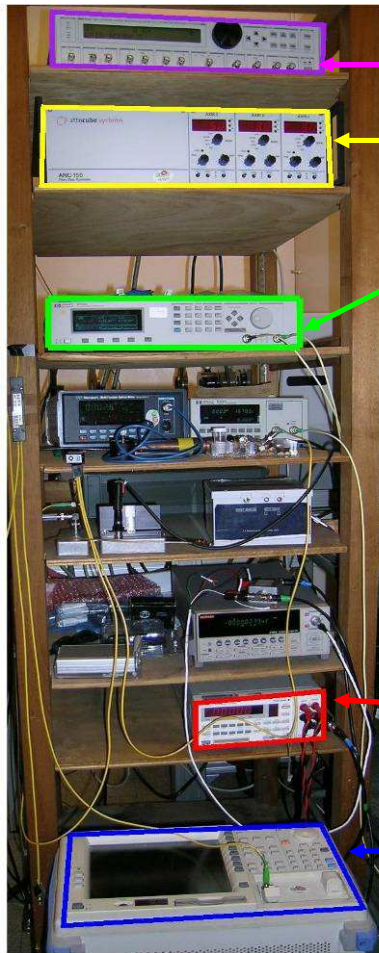
Le couplage optique en cavité résonante avec miroir à $\lambda/4$ permet d'atteindre une efficacité quantique $>50\%$ à $1,5\mu\text{m}$



Mesure de l'effet de polarisation optique attribuée à la structuration en réseau de nanofils du détecteur



Mesures optiques sur SSPD de polarisation à INAC



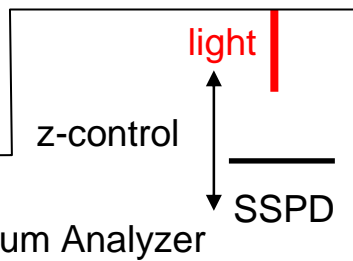
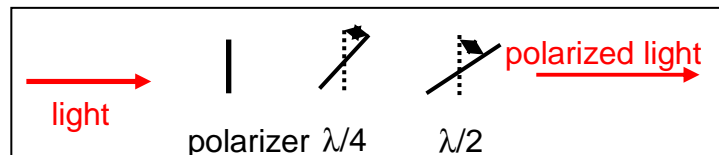
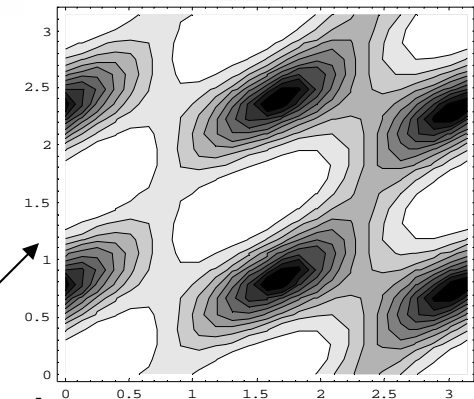
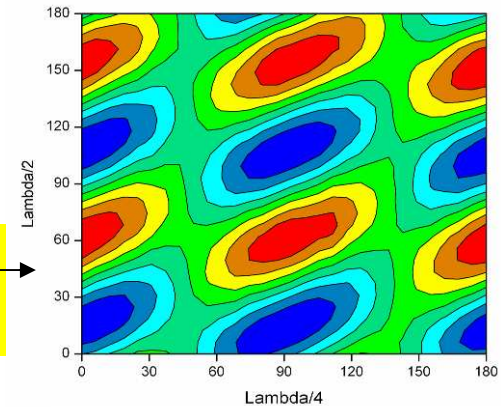
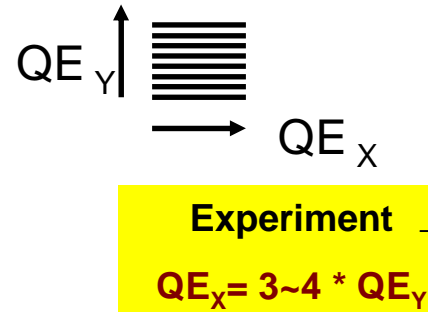
Photon Counter

Piezo Controller

Polarization controller

DC current

Optical Spectrum Analyzer



Modelisation:

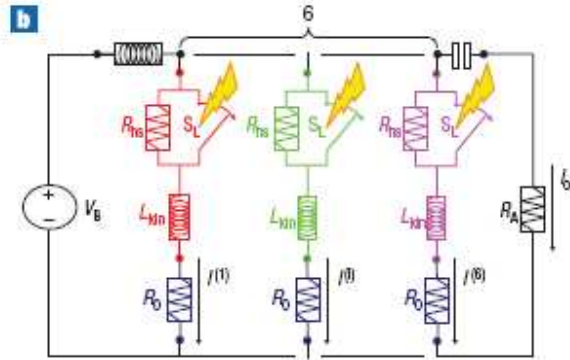
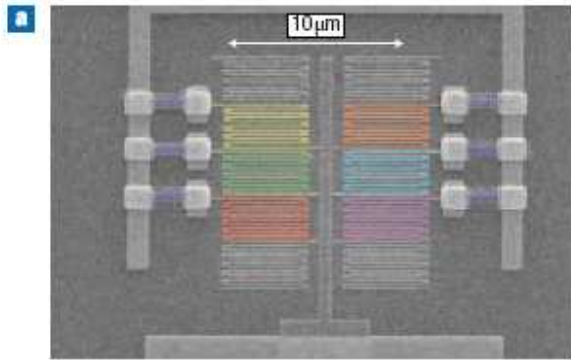
different QEs for X and Y mode

$QE_X = 3\sim 4 * QE_Y$ (for $z < 1\mu m$)

But FDTD simulations: $QE_X = 1.2 * QE_Y$



La segmentation du SSPD en 10 sections, intégrée dans un réfrigérateur permet de résoudre le nombre de photons -PNR-Sinphonia



$$u_0 \frac{\lambda_L^2}{t \cdot w}$$

A.Divochy et al, p308 nature photonics | VOL 2 | MAY 2008 |

Table 1 Reported performance for detectors with PNR functionality.

	Repetition rate (Hz)	DK (Hz)	η (%)	NEP ($\text{W Hz}^{-1/2}$)	λ (nm)	M_{noise}	M_{max}	T (K)	Readout
CIPD (ref. 3)	40	NR	80	NR	1,550	Yes	NR	4.2	Cryo JFET
QD-FET (refs 4,5)	2×10^5	0.4	1.3	2×10^{-17}	684	Yes	3	4.2	Cryo MESFET
TES (ref. 6*)	5×10^4	400	89	4×10^{-18}	1,550	Yes	11	<0.1	SQUID array
PMT (ref. 7)	6.7×10^5	400	7	1×10^{-16}	523	Yes	9	Room T	Room T amp.
VLPC (refs 8,9)	1.5×10^4	2×10^4	85	9×10^{-17}	543	Yes	10	6-7	Cryo preamp.
MPPC (ref. 10)	1×10^4	1.4×10^5	25-65	7×10^{-16}	400	Yes	100-1,600	Room T	Room T amp.
APD array ¹¹	2×10^4	1.6×10^8	33	1×10^{-14}	1,064	No	1,024	246	Multichannel
Time multiplexed ^{12,24}	1×10^4	NR	66	NR	700-800	No	8-16	Room T	Two-channel
PND	8×10^7	0.15	2	4×10^{-18}	1,300	No	4	2	Room T amp.

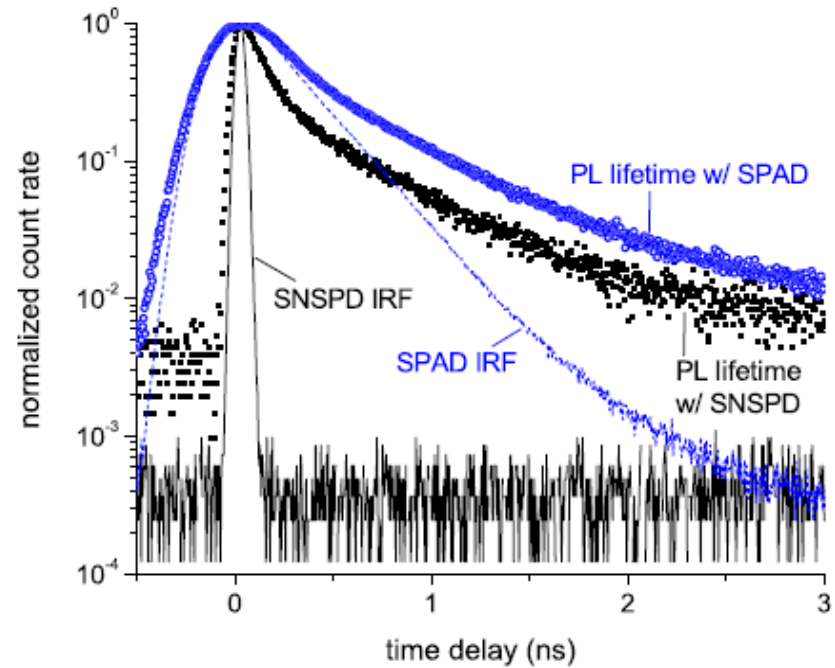
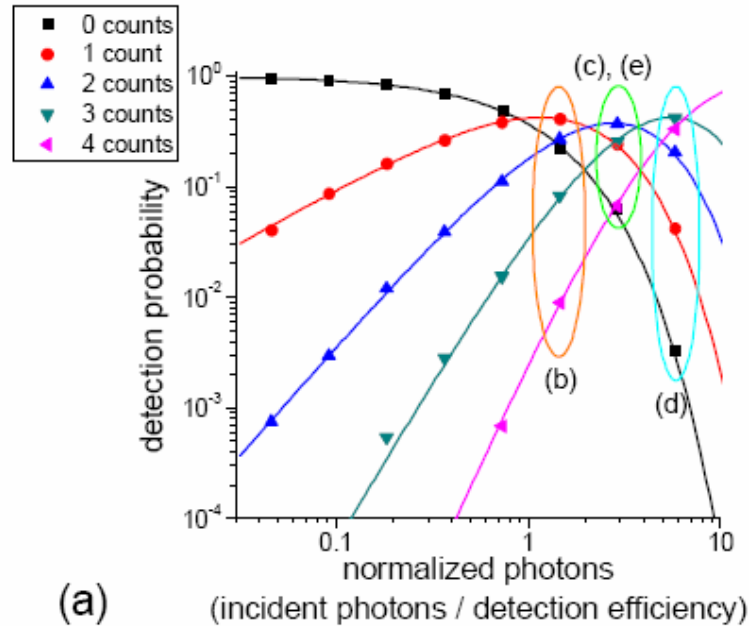


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Le SSPD apporte des performances en rapidité, bandes passantes optique et électrique et faible taux de coups d'obscurité meilleures que celles des APDs à semiconducteurs

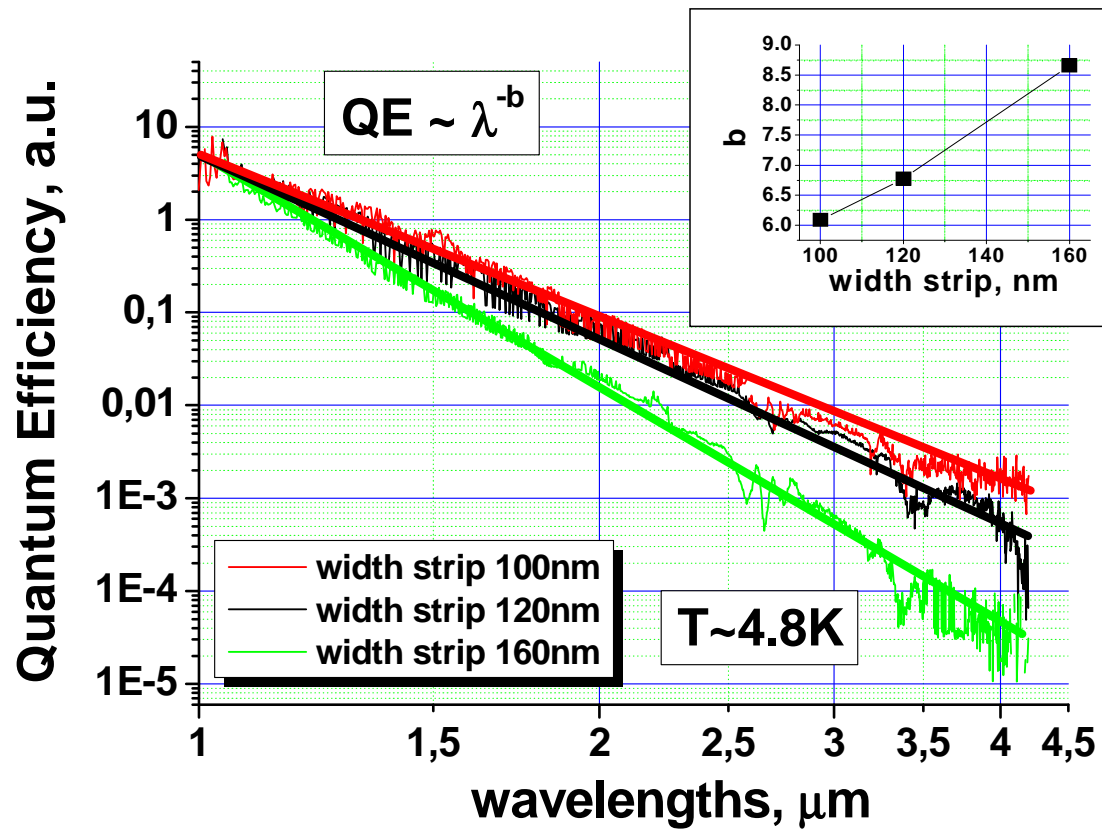


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr

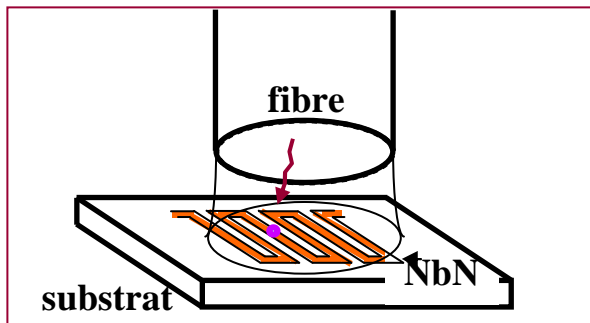


Efficacité de détection du SSPD dans l'infrarouge



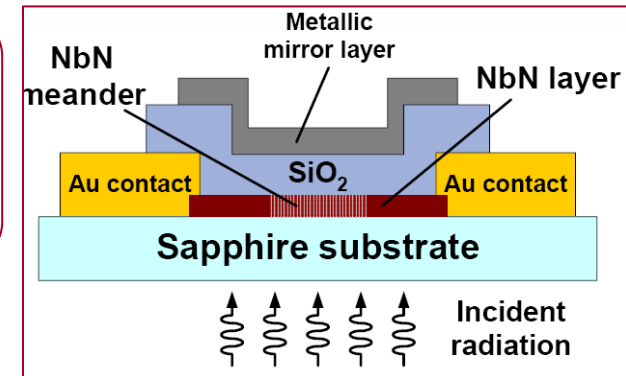
Amélioration du couplage optique du SSPD NbN

La focalisation du rayonnement sur la zone active limite les échauffements, les événements parasites, le rapport S/N et la vitesse du SSPD

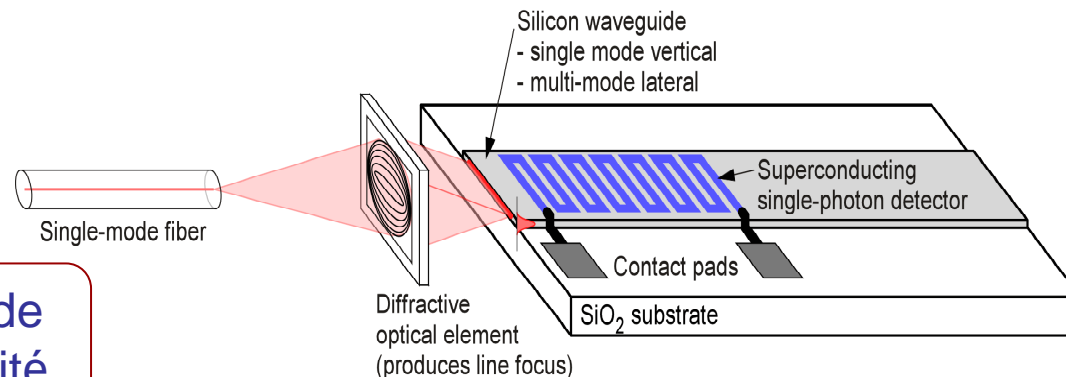


Simple couplage par fibre:
 Transmission 60%
 Réflexion 20%
 Absorption $20\% \times 0.5 = 10\%$

L'adjonction d'une couche miroir permet d'obtenir une absorption de 60% à $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$



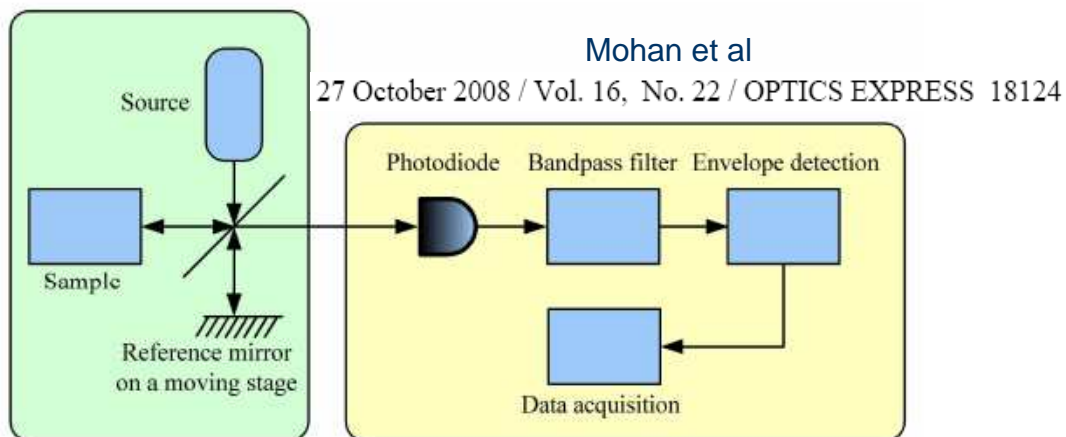
Couplage par guide de lumière ou cavité



D. Jackson, J. Stern JPL, NIST meeting 2004



Optical coherence domain reflectometry for biomedical imaging



Schematic of a conventional coherence-domain reflectometry (OCDR) experiment.

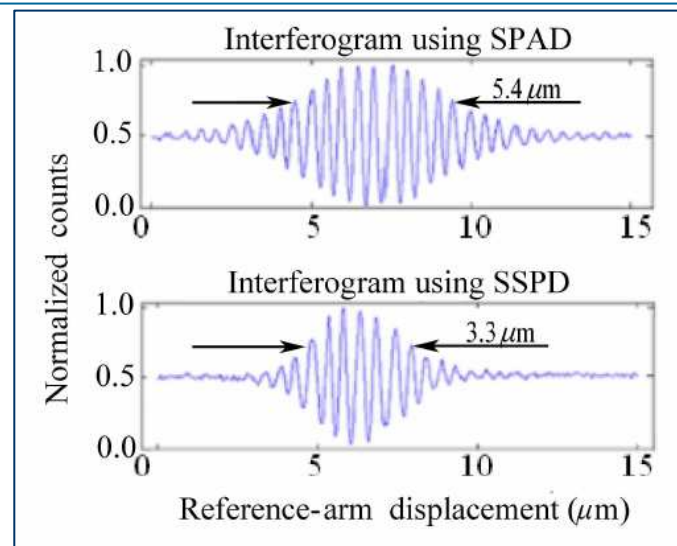
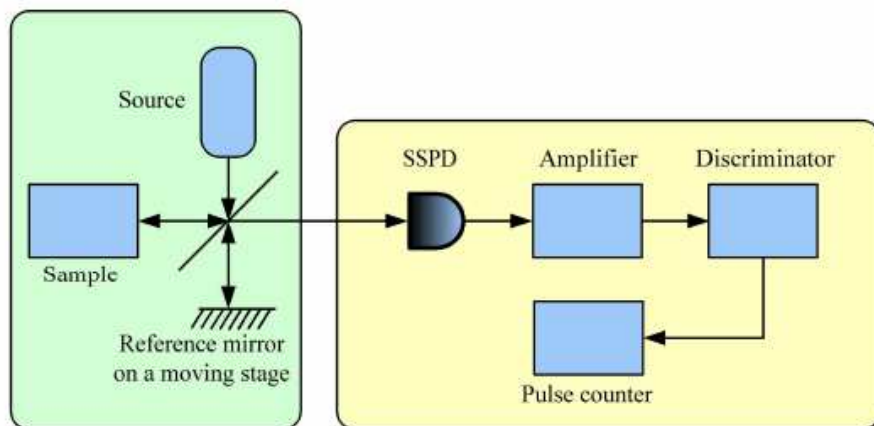
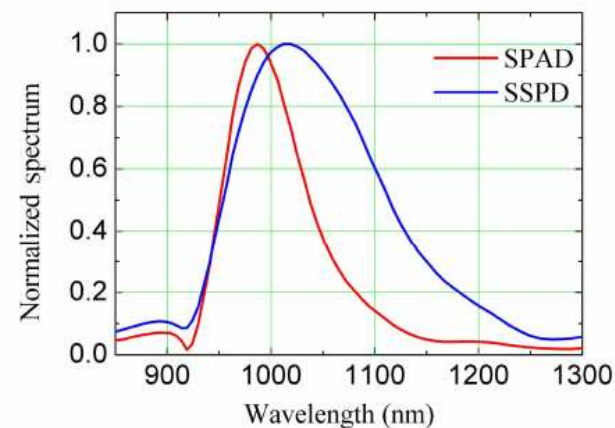


Fig. 7. OCDR interferograms measured with SPAD and SSPD single-photon detectors using the apparatus depicted in Fig. 6. A reduction in the full-width at half maximum (FWHM), corresponding to an improvement in axial resolution, is observed with the SSPD. This is a result of its broader spectral sensitivity.



Schematic of a photon-counting-based optical coherence-domain reflectometry (OCDR) experiment

$$SNR = \frac{R^2 P_R P_S}{\frac{4kTB}{R_f} + 2eBRP_R + \frac{(1 + \Pi^2)}{\Delta\nu} BR^2 P_R^2}$$



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Applications des SSPD

- Micro-électronique : test de défaillance de CI
- Calcul quantique et communications sécurisées (SINPHONIA, ACI-DESIQ)
- Imagerie biomédicale : tomographie, OCT
- Imagerie IR : surveillance, défense
- Télécoms : transmission sans répéteurs (SINPHONIA)
- Astronomie (CNES-LAOG/CEA)



Projet de Microspectromètre SWIFTS

SWIFTS – Stationary Wave Integrated Fourier Transform Spectrometer

Concept : a spectrometer with a micrometric size, inspired from an Interferometric principle for photography, imagined in 1891 by G. Lippmann (1908 Nobel Prize)



Gabriel Lippmann



Photography, 1891

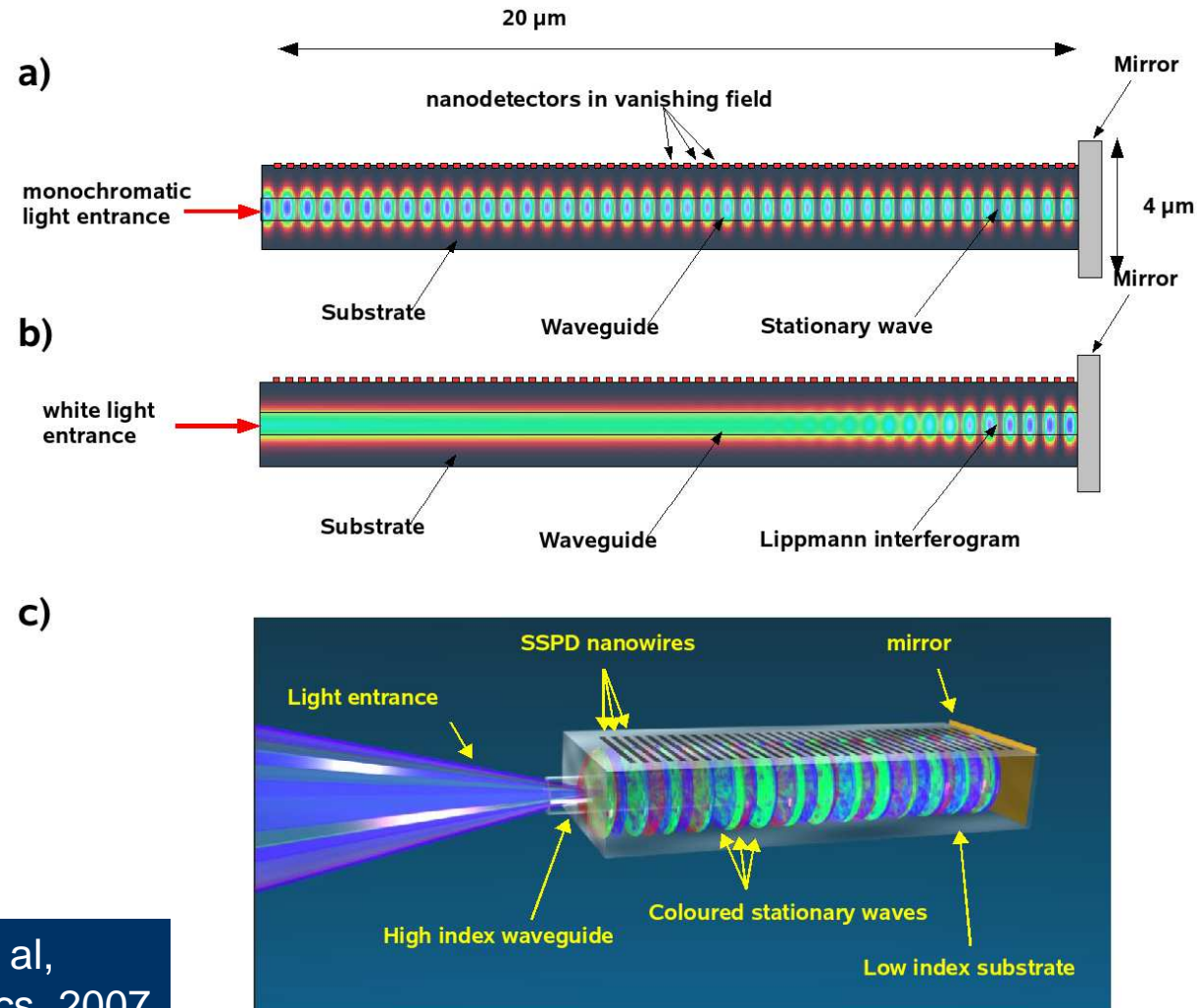


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Structuration du SWIFTS: faisceau de nanofils détecteurs situés dans le champ évanescent du guide à ondes stationnaires étalées

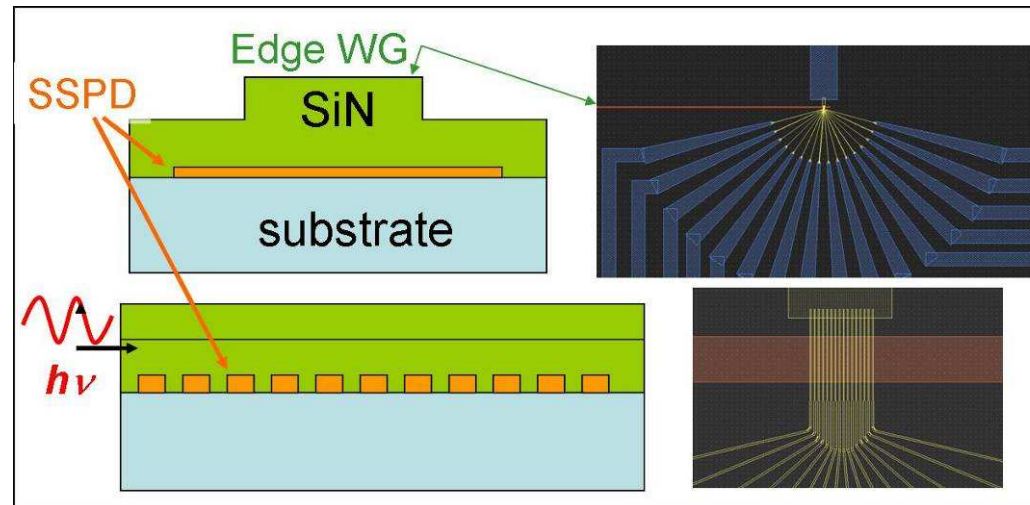


E. Le Coarer et al,
 Nature Photonics, 2007



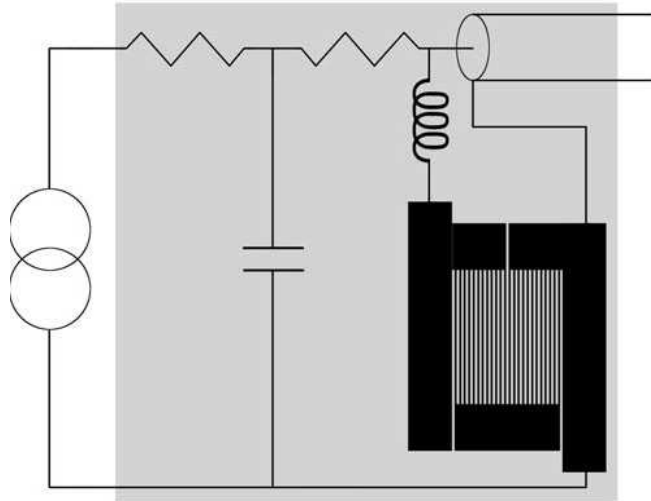
Solution INAC choisie:

Faisceau de 16 nanofils SSPD NbN sous un guide/miroir en SiN



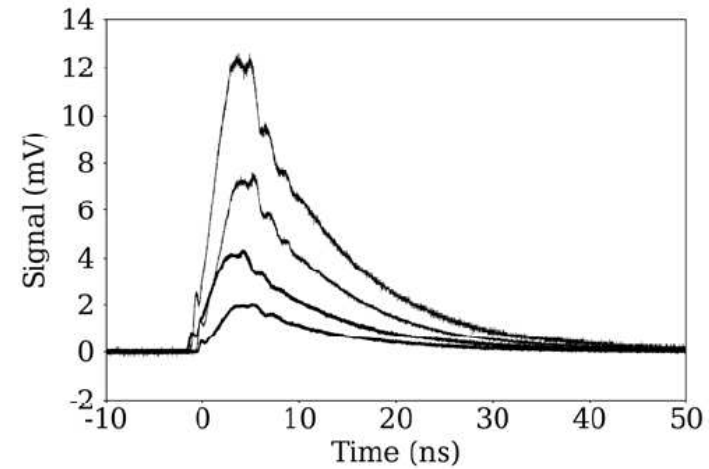
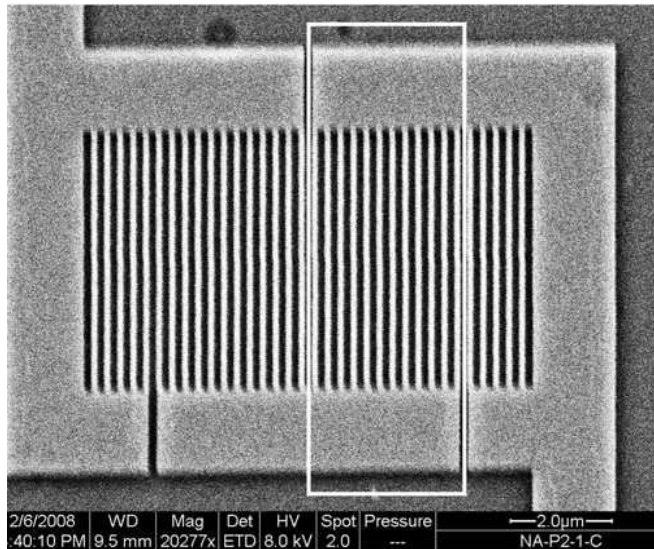
Nano-Fils NbN (4nm d'épaisseur) de 0,1 μ m de large séparés de 0,1 μ m. Guide à 1,5 μ m de SiN (dépôt PECVD d'indice $n \sim 2$ de 1 μ m)





New geometry of Cascade Switch Superconducting Nanowire Single Photon Detectors

M. Ejrnaes et al IEEE 2009



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Hot Electron Bolometers, Nanowire SSPDs, Tunnel Junction Single Photon Detectors

Out-line:

Introduction to '*non thermally controlled*' superconducting photon detectors

1- Principle of Hot Electron Bolometers (HEB) and Josephson phase mixers for direct and heterodyne detection

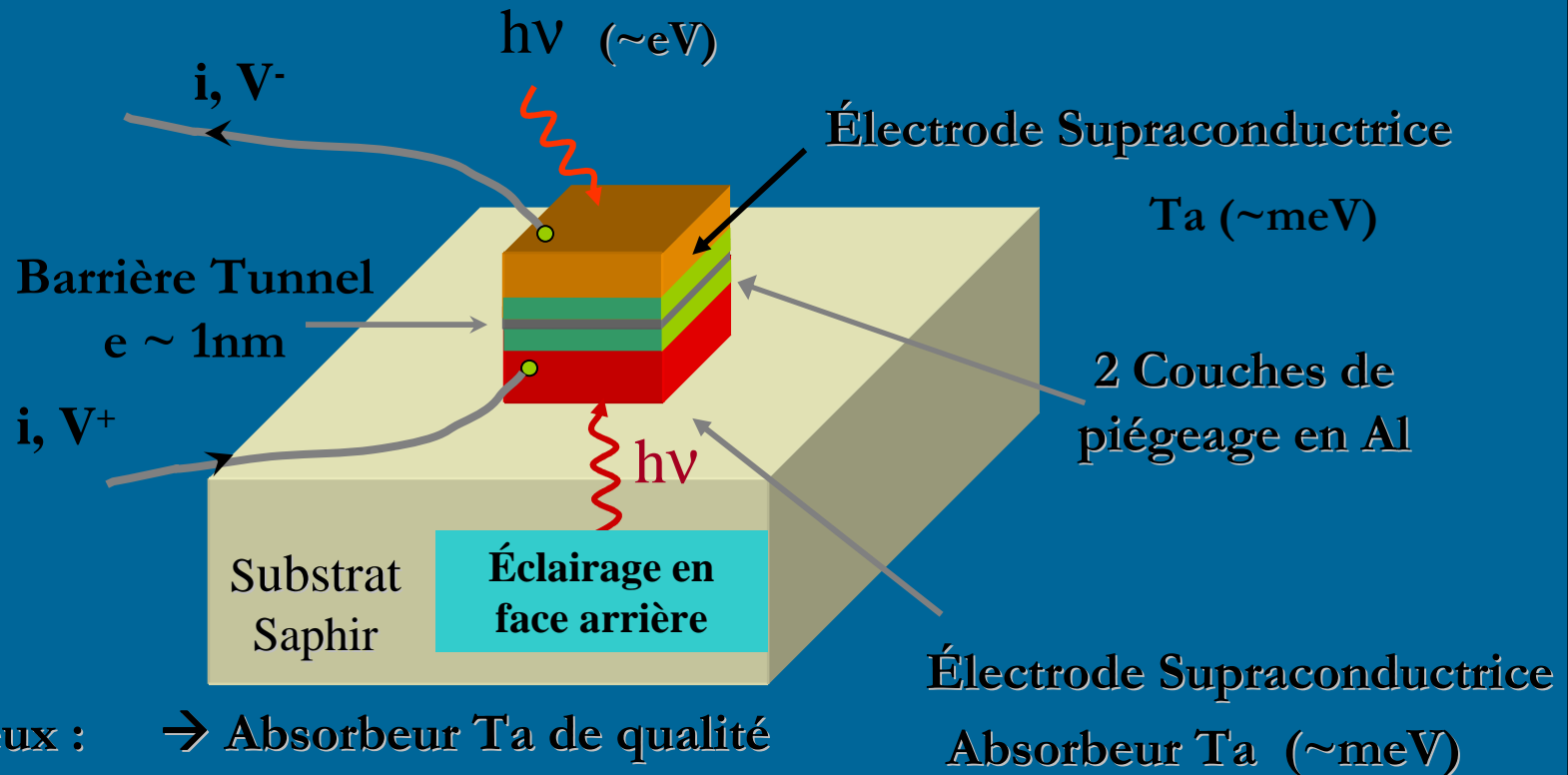
2- Superconducting Nanowire Single Photon Detector (SNSPD)

3- Superconducting Tunnel Junction Detectors (STJ)

4- LTS & HTS Detectors Integration in Superconducting Electronics



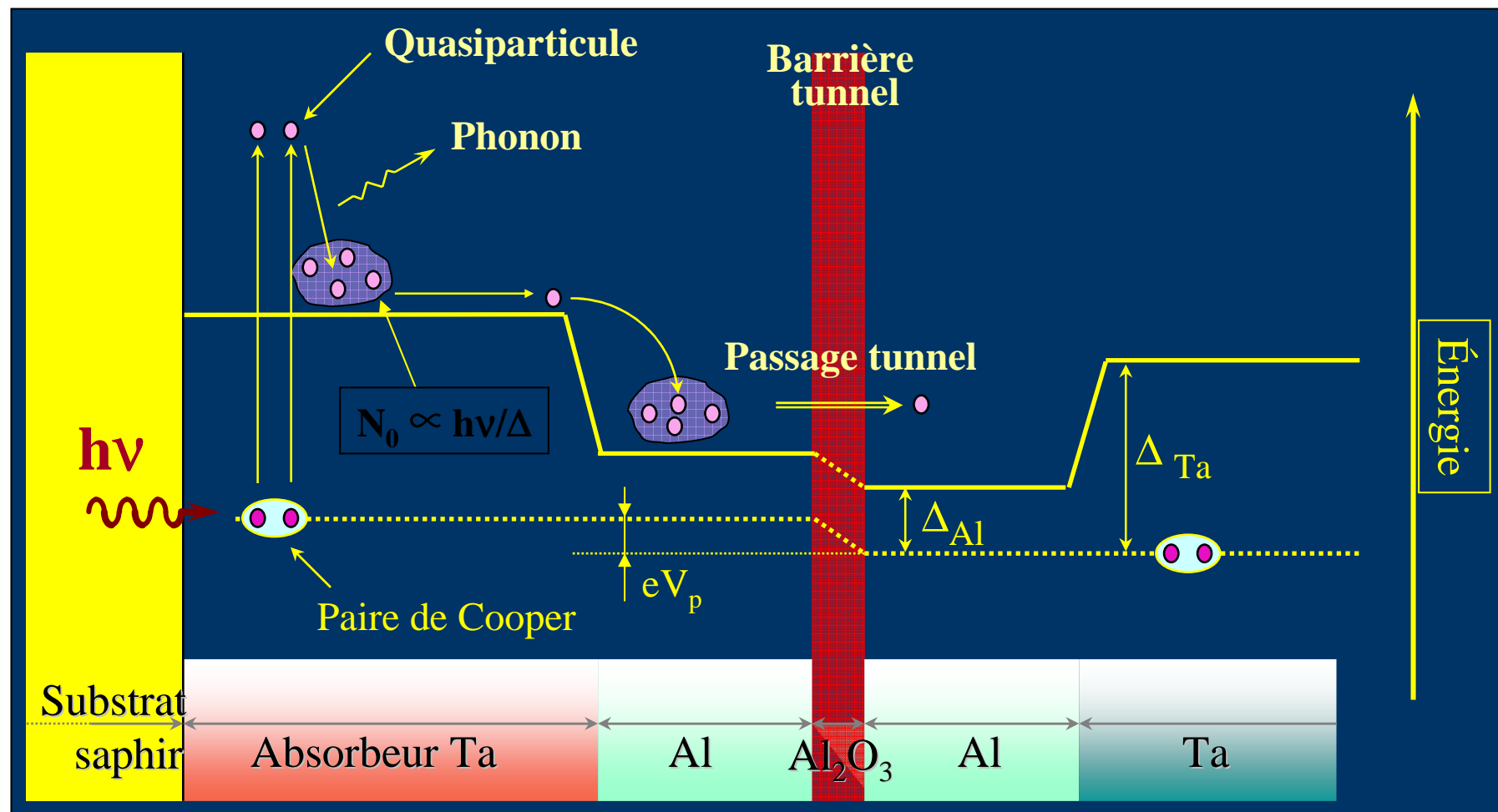
Superconducting Tunnel Junction Detectors -STJ



Les 3 enjeux :
→ Absorbeur Ta de qualité
→ Barrière fine et sans défaut



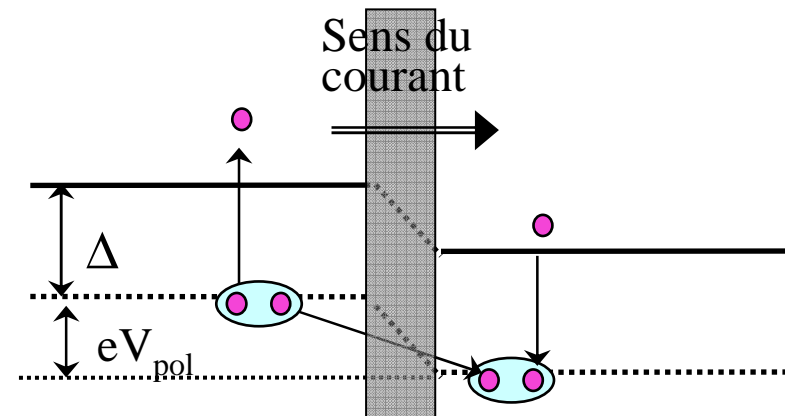
Schéma de principe de l'absorption lumineuse



Processus d'amplification

- $N_0 = hn / 1,7Dg$ (M. Kurakado, 1982)
- Nombre de charges comptées :
 $N = \langle n \rangle N_0$
- $\langle n \rangle$ lié à 2 temps caractéristiques :
 $\langle n \rangle = t_{QP} / t_t$
 - ✓ t_{QP} la durée de vie des QP
 - ✓ t_t le temps tunnel:

Processus de multiplication



$$\tau_t = 4eN_{E_F} V_{ol} R_N \frac{\sqrt{(\Delta + eV_p)^2 - \Delta^2}}{\Delta + eV_p}$$

de Korte (1992)



Choix du supraconducteur du STJ

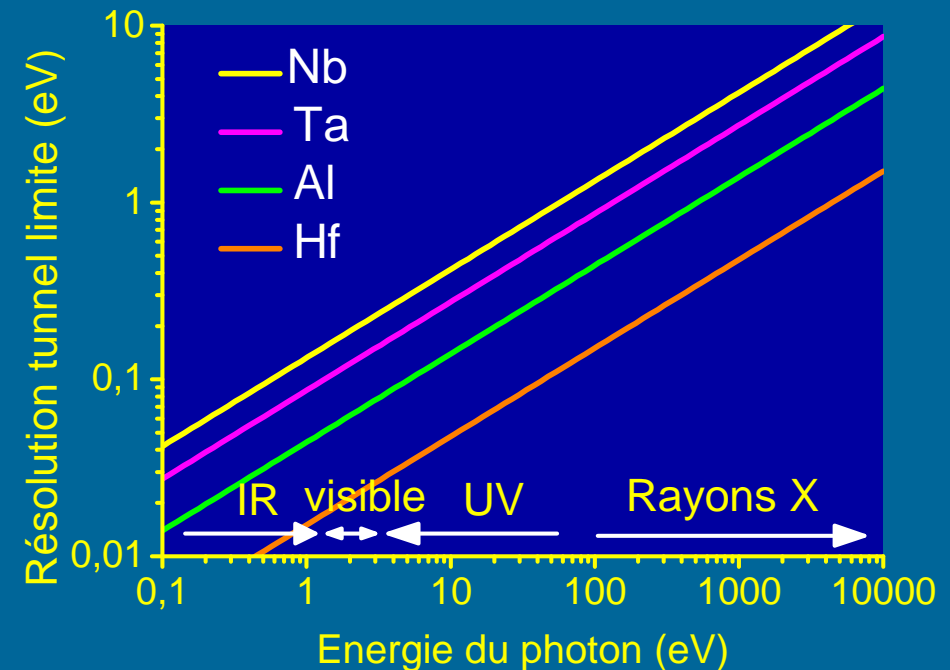
Matériau	T_C (K)	Δ (meV)	N_0 ($\lambda=0,12\mu\text{m}$)	N_0 ($\lambda=2\mu\text{m}$)
Nb	9,2	1,55	4000	250
Ta	4,48	0,66	8000	500
Al	1,17	0,17	30000	2000
Hf	0,13	0,02	300000	18000

$$\Delta E = 2,35\sqrt{(F + G) \cdot 1,7\Delta \cdot E}$$

Avec $F = 0,2$ (Kurakado, 82)

et $G = 1 + 1/\langle n \rangle$ (Goldie, 94)

Valeurs valables à $T < 0,1 T_C$

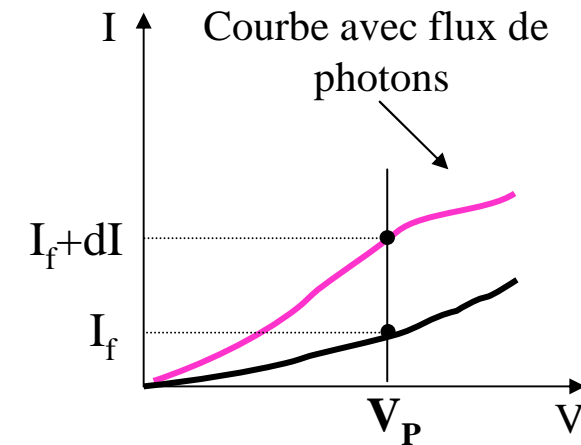
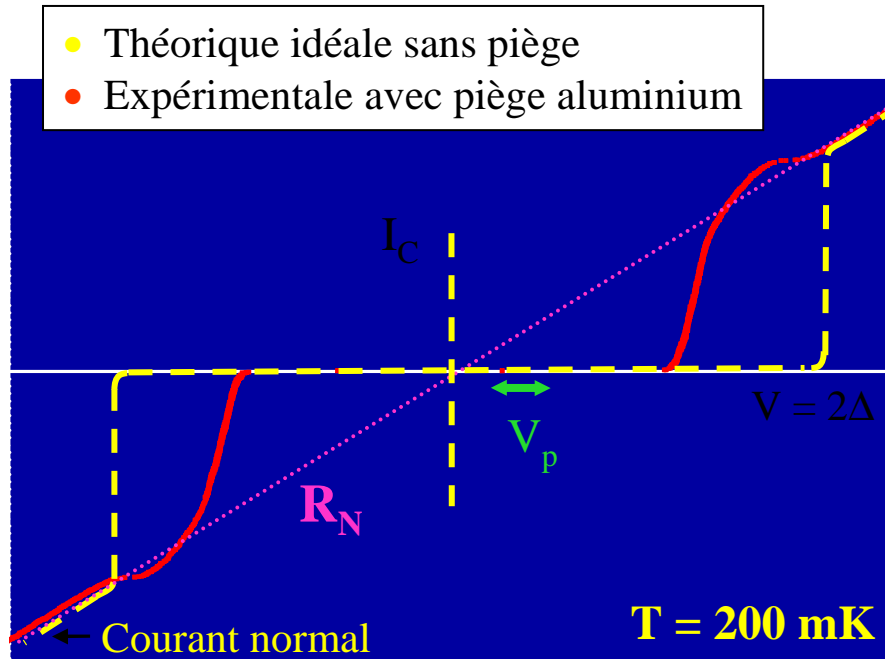


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Caractéristique I-V et point de fonctionnement

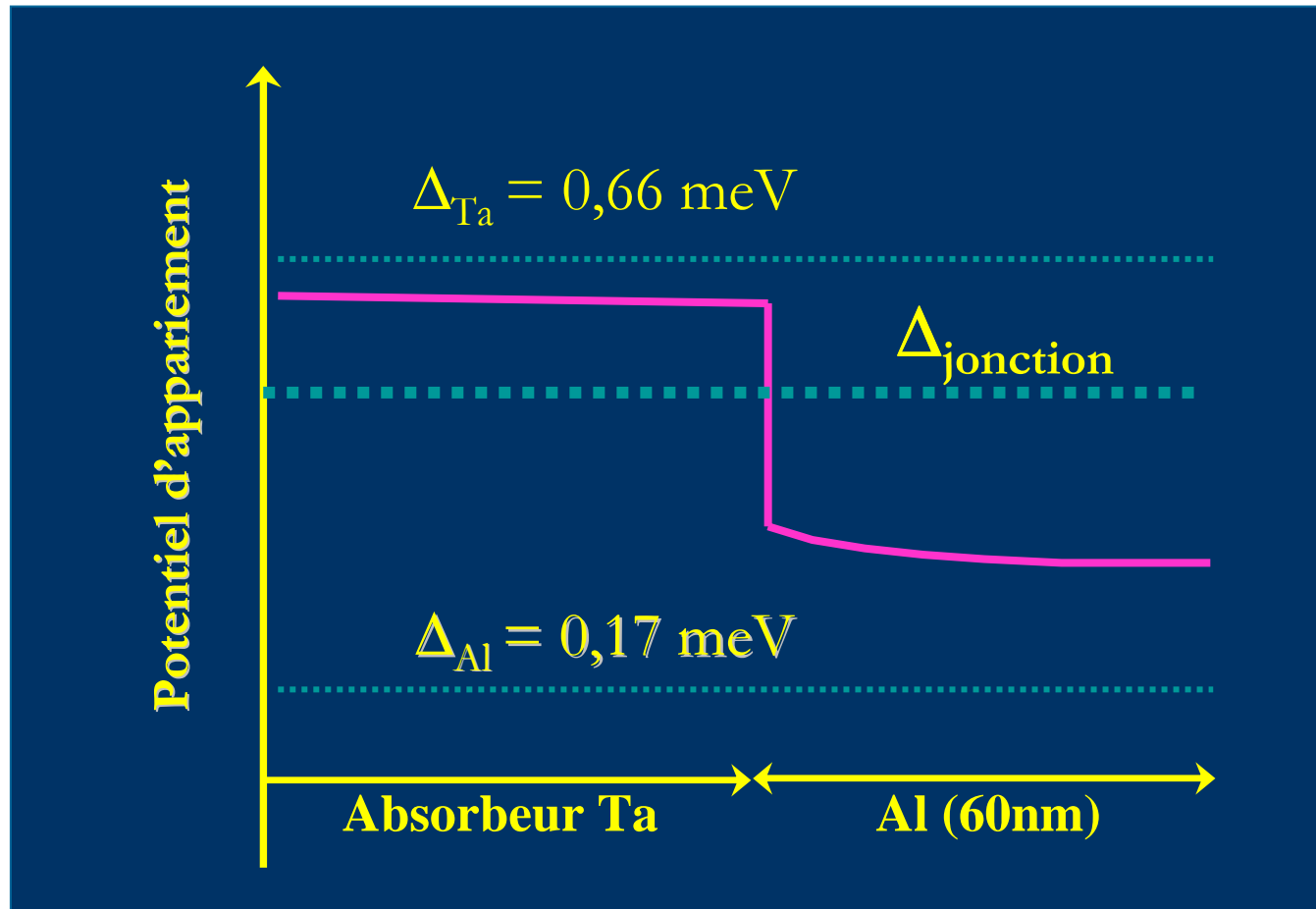


Réprésentation schématique sous le gap

- Suppression du courant Josephson avec B
- Minimisation du courant de fuite sous le gap
 - $T < 0,1T_C$ pour la contribution thermique
 - Barrière sans défauts
- Compromis sur V_p pour régler le rapport dI/I



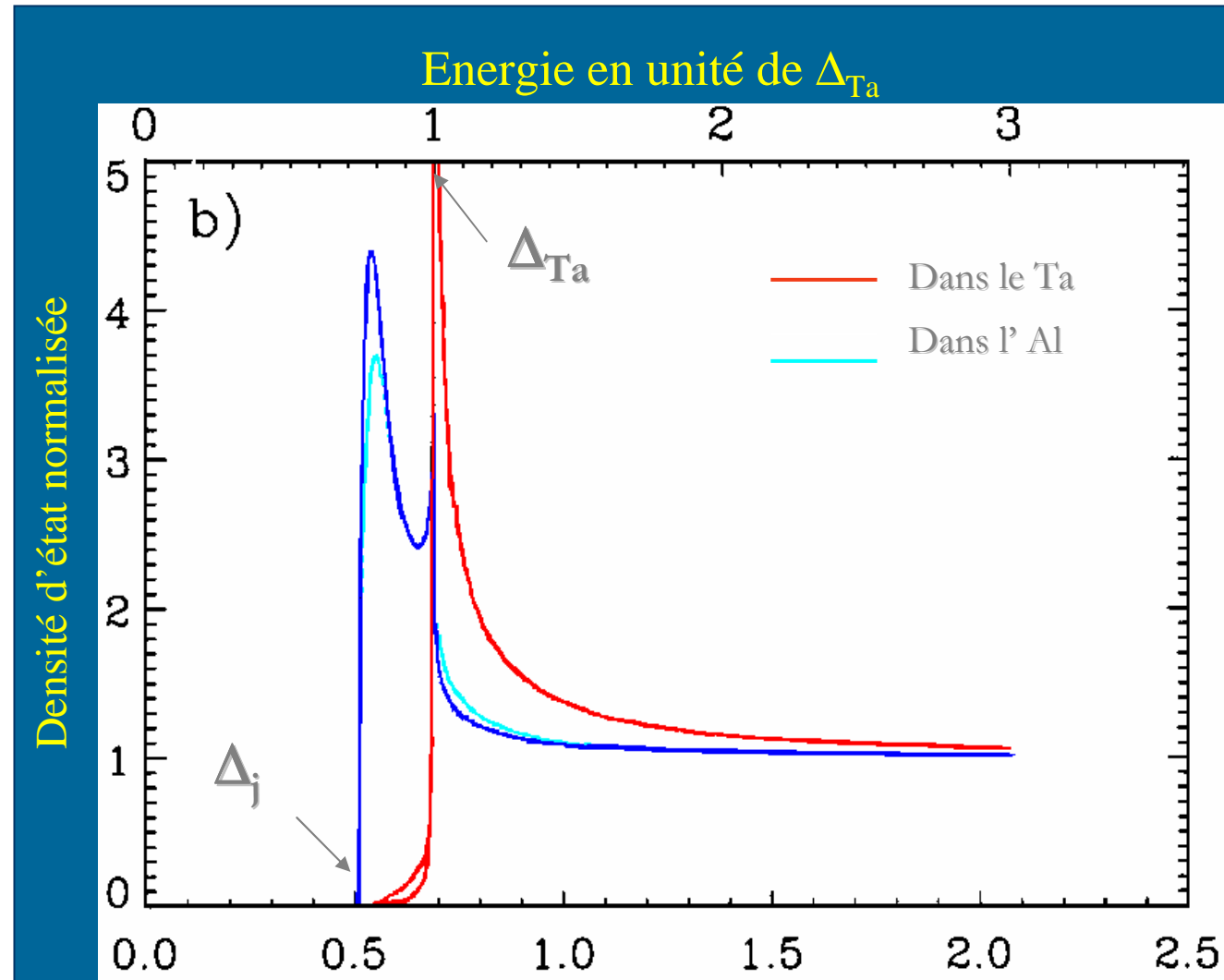
Effet de proximité entre couches Ta et piège Al à optimiser



Représentation schématique, d'après *Brammertz 2003*



Effet de proximité



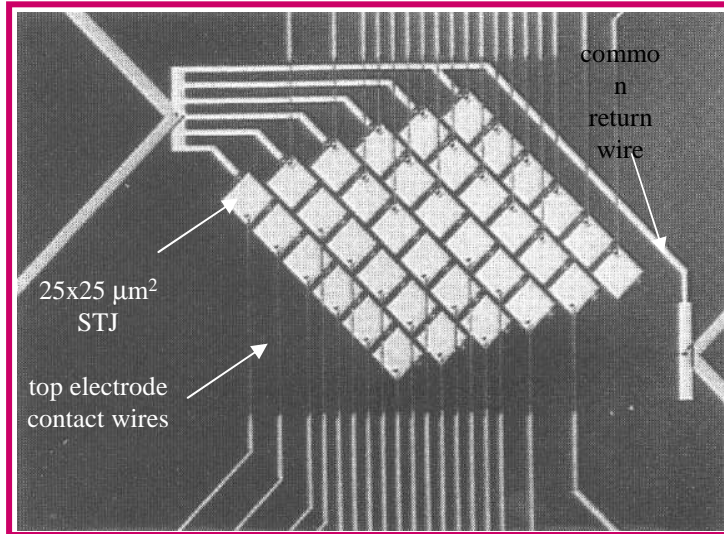
**Courbes de densité
d'état,**
*d'après Brammertz,
2003*



HEP, NIM, SPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr





- Operating temperature: 320mK
- S-Cam2 6x6 Ta-STJ $\lambda/\Delta\lambda=8$ at 500nm (S-Cam3 10x12 Ta-STJ $\lambda/\Delta\lambda=13$)
- Responsivity 10^4 e⁻/eV
- detection efficiency >50%
- Response time 10 μs

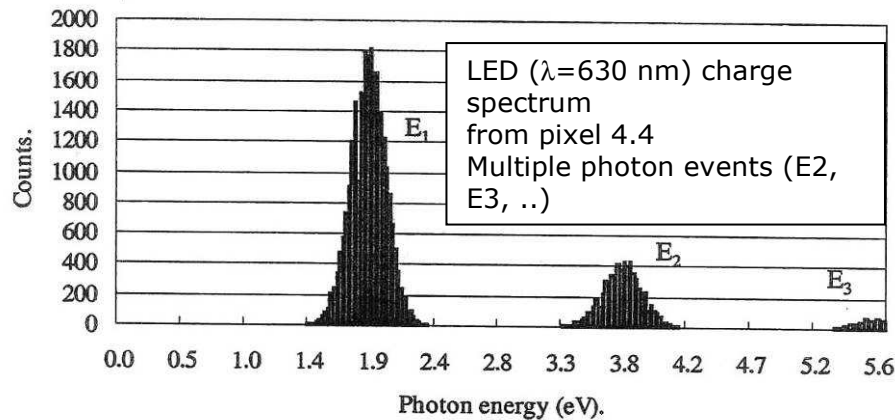
Astronomical Observations:

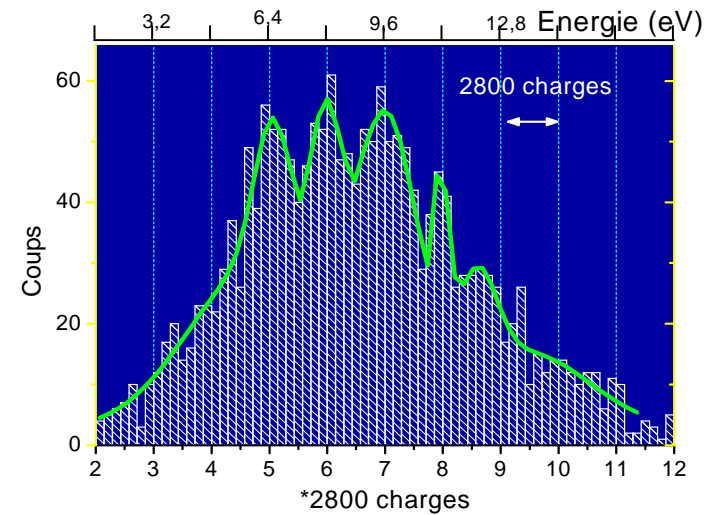
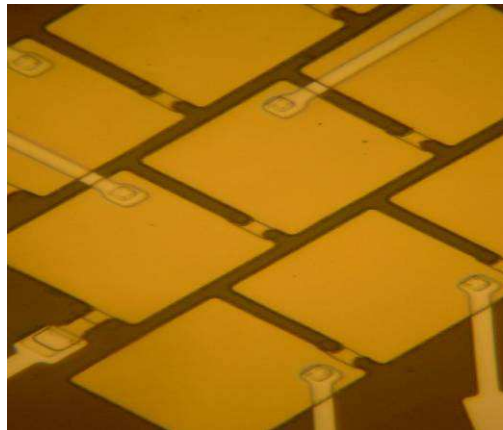
ESA

W. Herschel Telescope on La Palma

RIKEN

SUBARU National Astronomical Obs.





Matrice de 3x3 pixels de jonctions tunnel STJ Ta/Al-AlOx-Al/Ta de 20x20 μm^2 réalisées au CEA-Grenoble en collaboration avec le LAOG et comptage de photons infrarouges réalisé à 200 mK avec un de ces pixel STJ. (C. Jorel, Thèse INPG-2004)



	Quantum efficiency	Dark counts (s ⁻¹)	Timing jitter	Maximum count rate (s ⁻¹)	Energy resolution $E/\Delta E$
Si APD (Perkin-Elmer)	0.7 at 800 nm	100	350 ps	10 ⁷	No
InGaAs/InP APD (Id quantique)	0.1 at 1.55 μm	5 × 10 ⁴	800 ps	10 ⁵	No
Best APD 1 [7]	0.88 at 694 nm	2 × 10 ⁴			No
Best APD 2 [8]	0.7 at 702 nm	1.7 × 10 ⁴	2 ns		15
PM (Hamamatsu)	0.4 at 500 nm	100		10 ⁷	No
PM-MCP (Hamamatsu)	0.2 at 500 nm	2000	25 ps	10 ⁷	No
HEB ($T = 4$ K) [15]	0.1 at 1.55 μm 0.2 at 1.26 μm	10 ⁻¹	18 ps	>10 ⁹	1
STJ ($T = 0.2$ K) [11, 16]	0.5 at 200–500 nm	≈0	<2 ns	5 × 10 ⁴	10
TES ($T = 0.1$ K) [17]	0.2 at 200–1800 nm	10 ⁻³	350 ps	2 × 10 ⁴	15



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Hot Electron Bolometers, Nanowire SSPDs, Tunnel Junction Single Photon Detectors

Out-line:

Introduction to '*non thermally controlled*' superconducting photon detectors

1- Principle of Hot Electron Bolometers (HEB) and Josephson phase mixers for direct and heterodyne detection

1-1. Principle of HEB detectors and mixers

1-2. Josephson phase mixers used in detection and Hilbert transform spectrometer

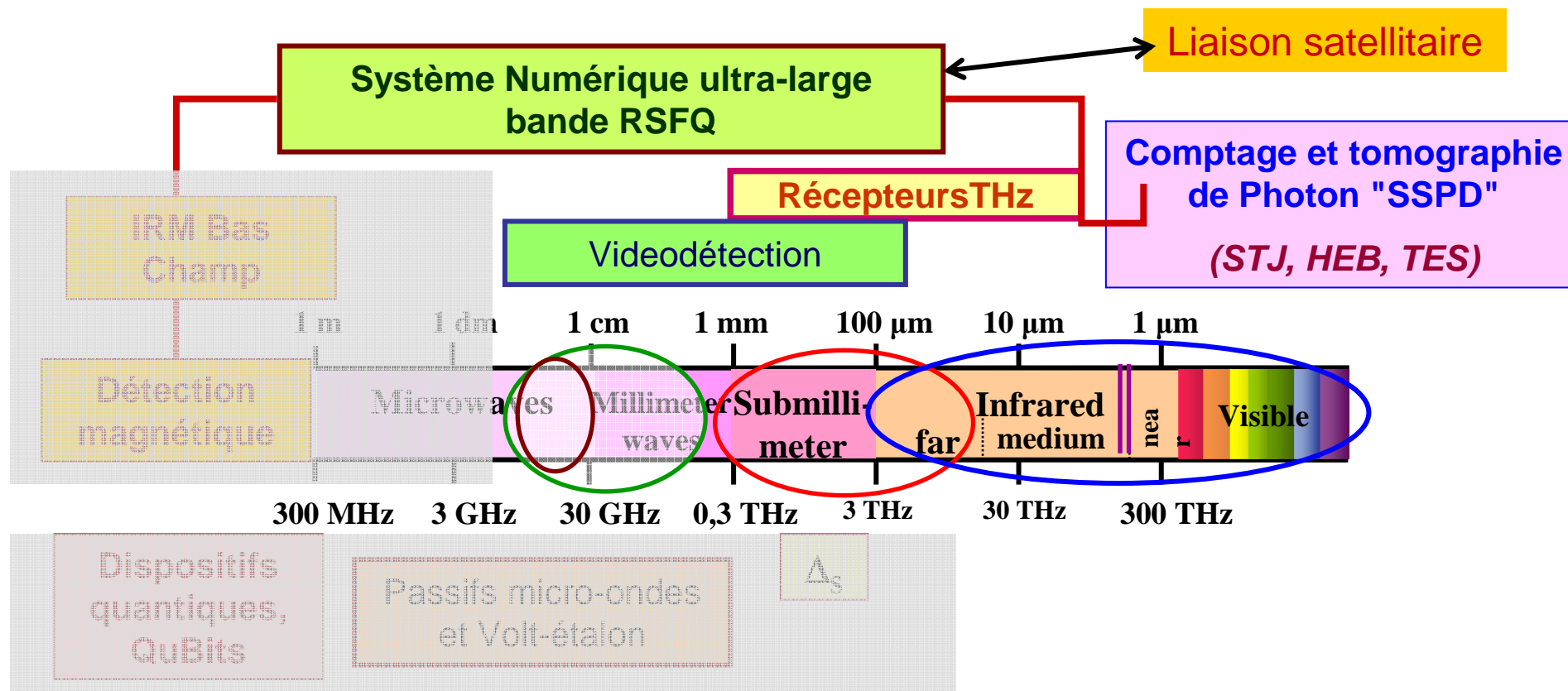
2- Superconducting Nanowire Single Photon Detector (SNSPD)

3- Superconducting Tunnel Junction Detectors (STJ)

4- LTS & HTS Detectors Integration in Superconducting Electronics



Systemes intégres d'imagerie du centimètre au nanomètre



- INAC:**
- Circuits RSFQ NbN ($T_c=16K$) et passifs portés en 200mm opérant à 9K
 - Détecteurs SSPD à nanofils NbN opérant à 3K [*+mixer THz YBCO, SKID NbN*]
 - Technologie multicouches NbN épitaxiée

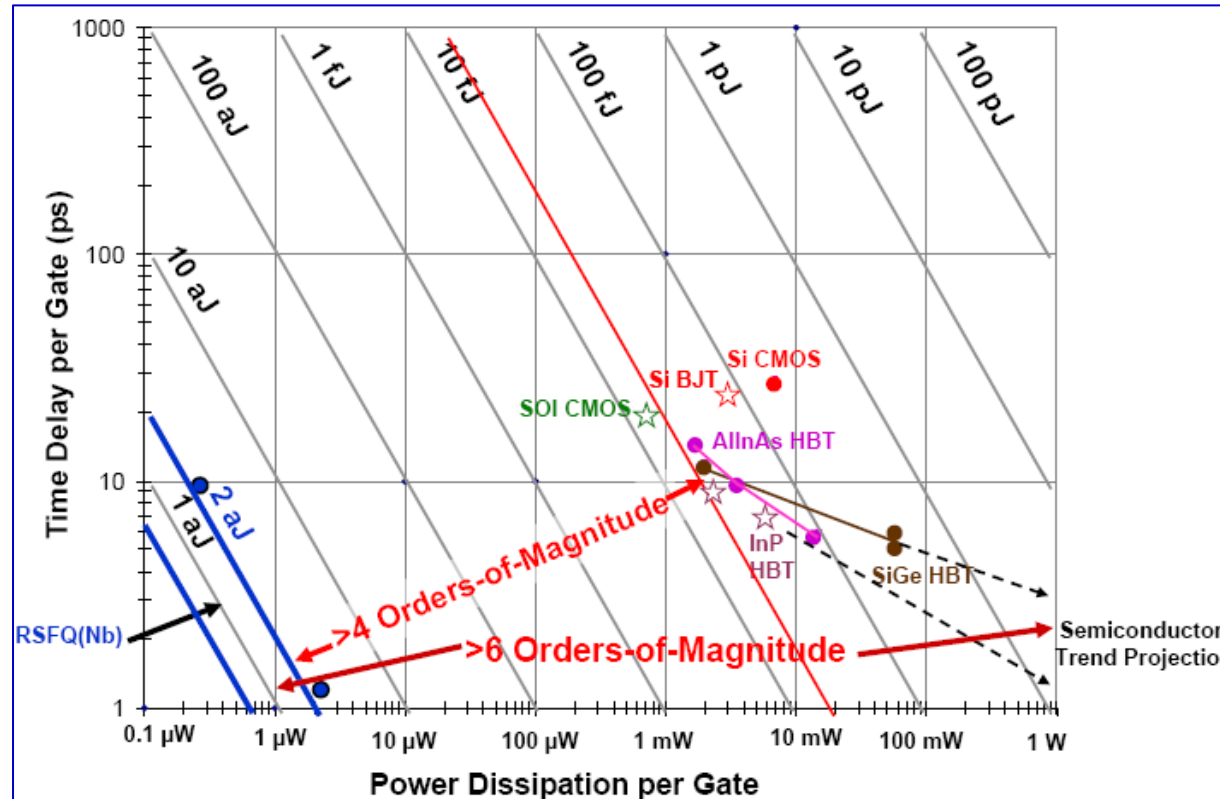


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



L'intégration de la logique Rapid Single Flux Quantum (RSFQ) près du plan focal permet d'effectuer avec une grande sensibilité des opérations MUX,CAN, filtrages, corrélations numériques



High speed up to **750 GHz** for single asynchronous cells and up to **320GHz** for LSI devices.

Low power consumption **0.2 nanowatt/GHz** per pulse and **0.1 mW** per 1000 gates at 50 GHz.

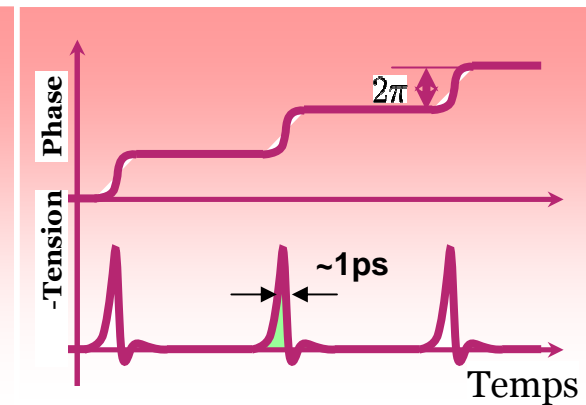
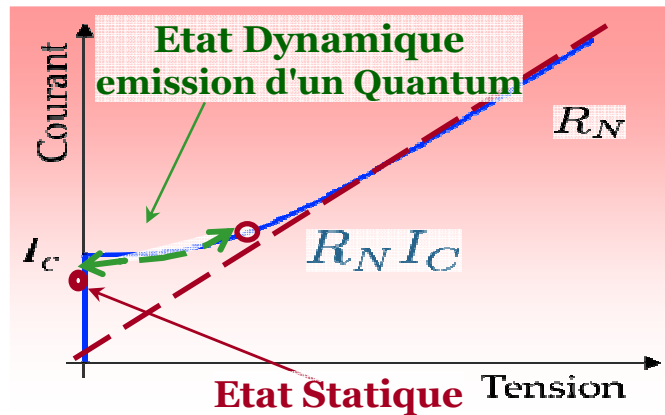
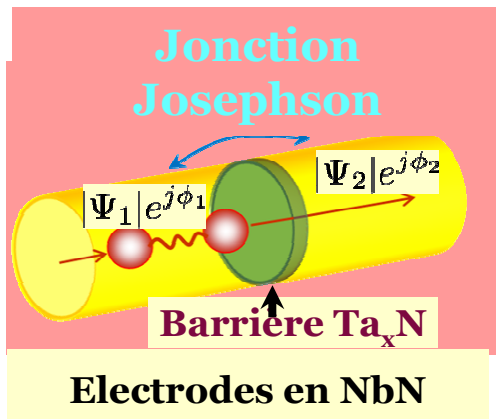


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr

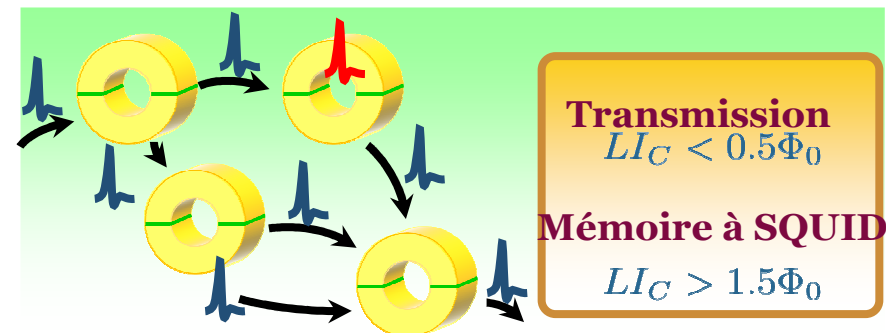


Comptage d'impulsions ultra-brèves d'un Quantum de flux ($h/2e \approx 2mV \times 10^{-12}s \equiv 1bit$) émises par une jonction Josephson

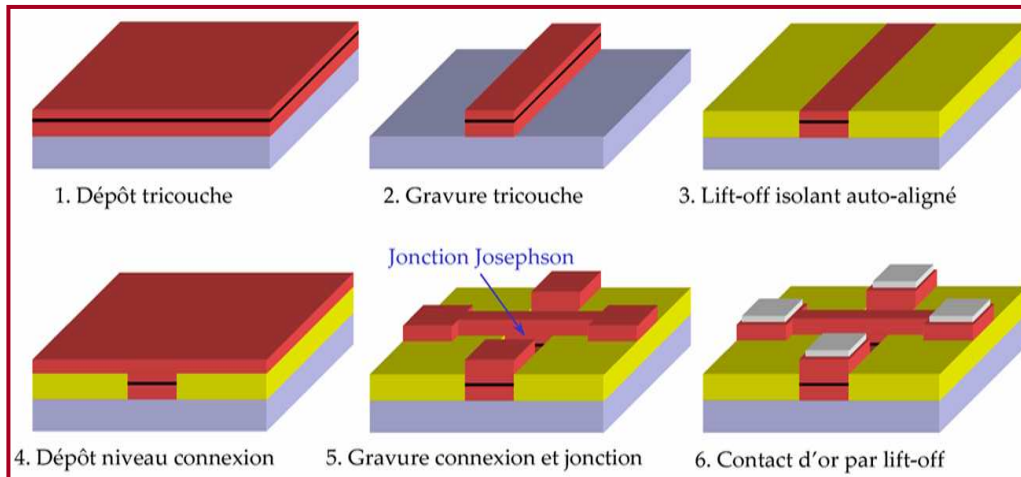


Les Bits *Quanta de flux*, cadencés à ~ 200 GHz traversent les bascules logiques et sont bloqués/débloqués par les interféromètres à 'SQUID'

Chaque incrément d'un signal analogique d'entrée du CAN Σ - Δ est numérisé en quanta

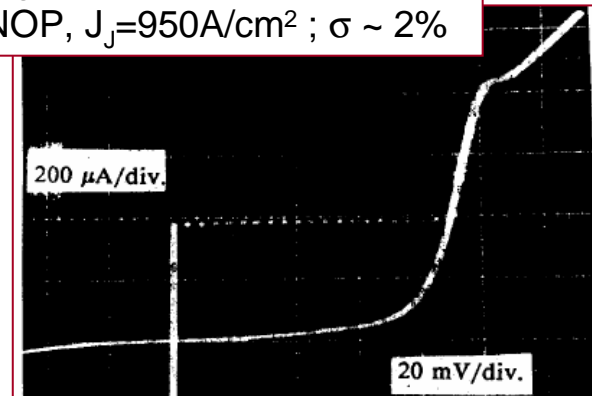


Procédé tricouche SNOP (Selective Niobium Overlap Process) CEA-1984



Simple et court avec diélectrique auto-aligné: 2 niveaux de photo-masques (+ contacts)

Série de 20 jonctions NbN-MgO-NbN à 4,2K; procédé SNOP, $J_J=950\text{A/cm}^2$; $\sigma \sim 2\%$



La faible dispersion observée est attribuée à la lithographie et non à la barrière



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

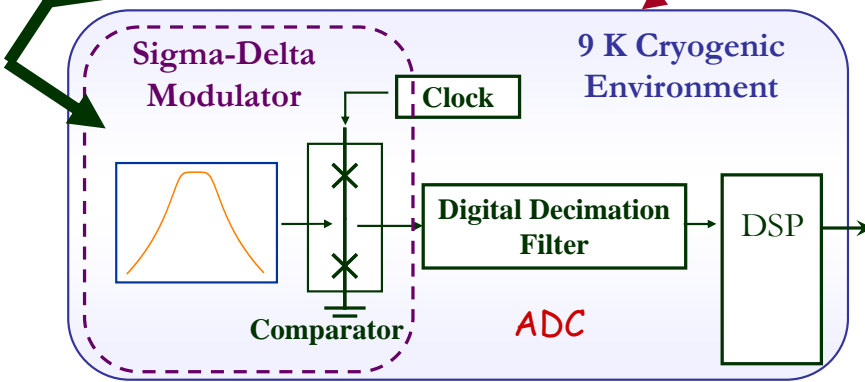
jean-claude.villegier@cea.fr



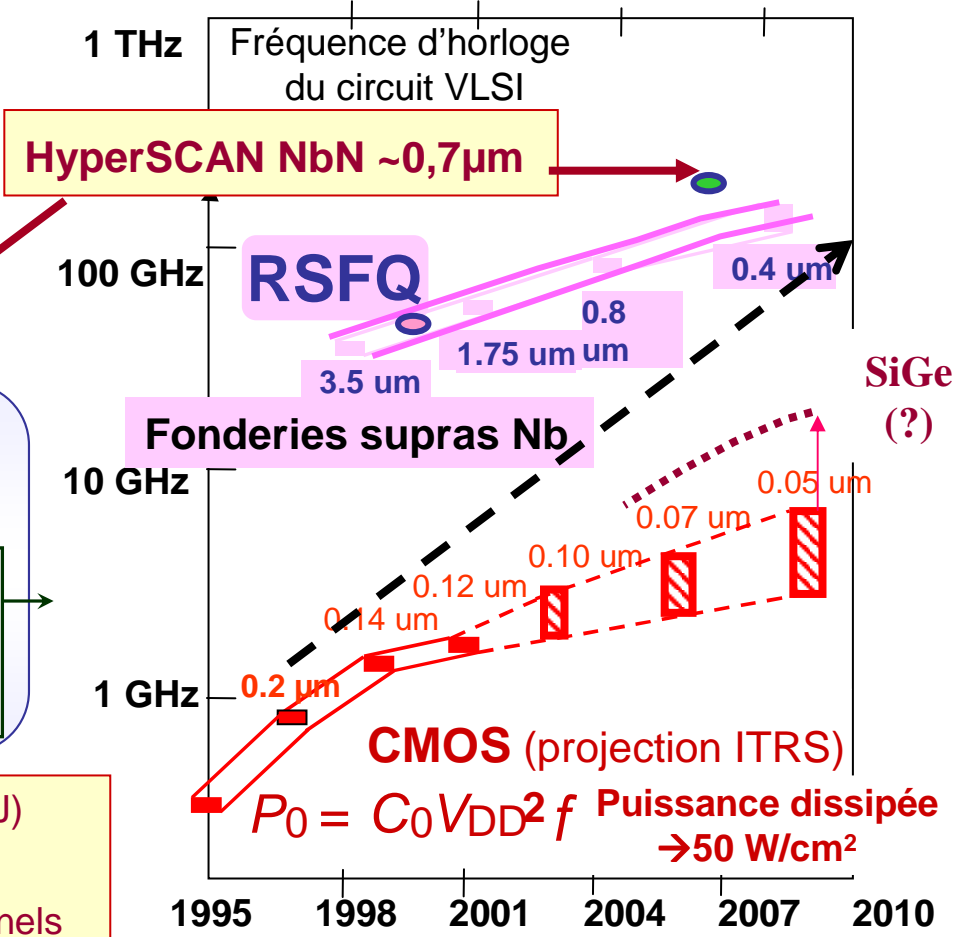
Au-delà de Moore, la porte RSFQ NbN

Intégration monolithique du CAN NbN

Sat-telecoms Antenna:
30 GHz carrier-0.5GHz BW



Or **HyperSCAN chip** (~100mW @ 9K/ ~10kJJ) coupled to
NbN or YBaCuO HEB *IR or THz Detector* channels



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

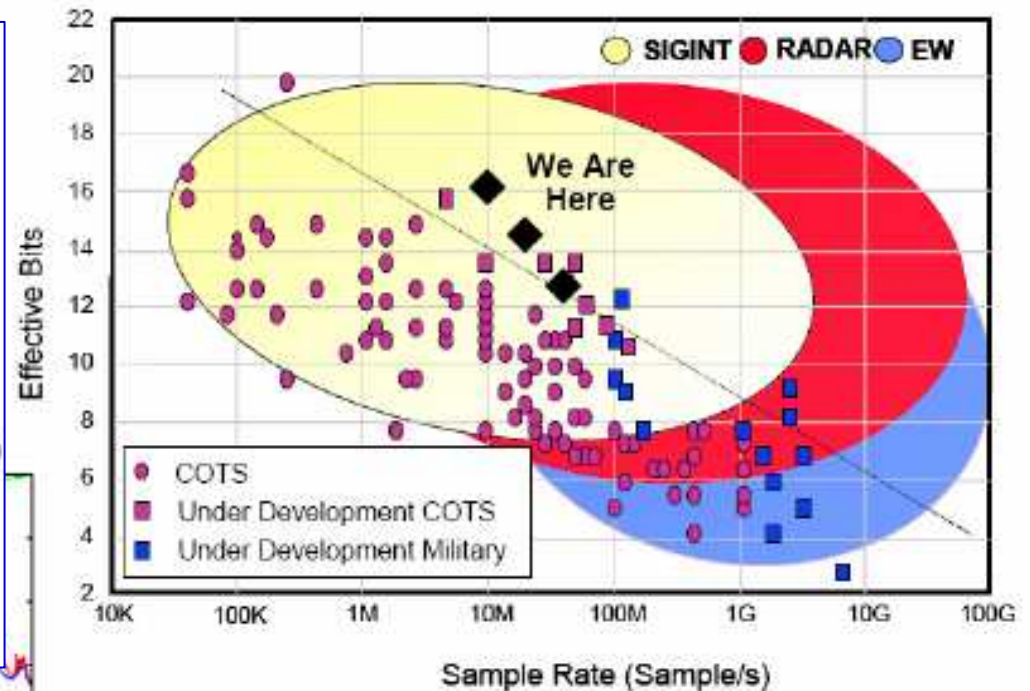
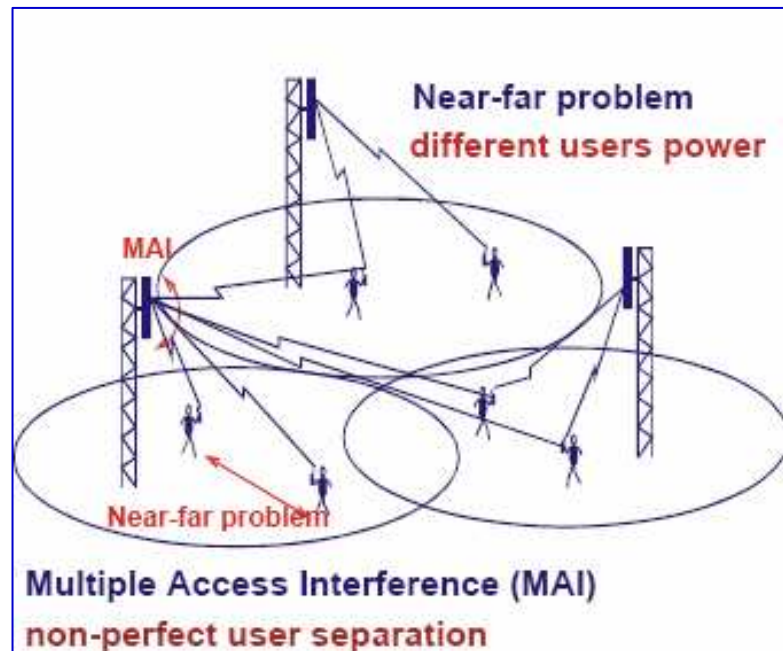
jean-claude.villegier@cea.fr



Circuits intégrés numériques hauts débits



Superconducting electronics is the most developed emerging digital technology with available foundry, packaging, design tools and cooling.

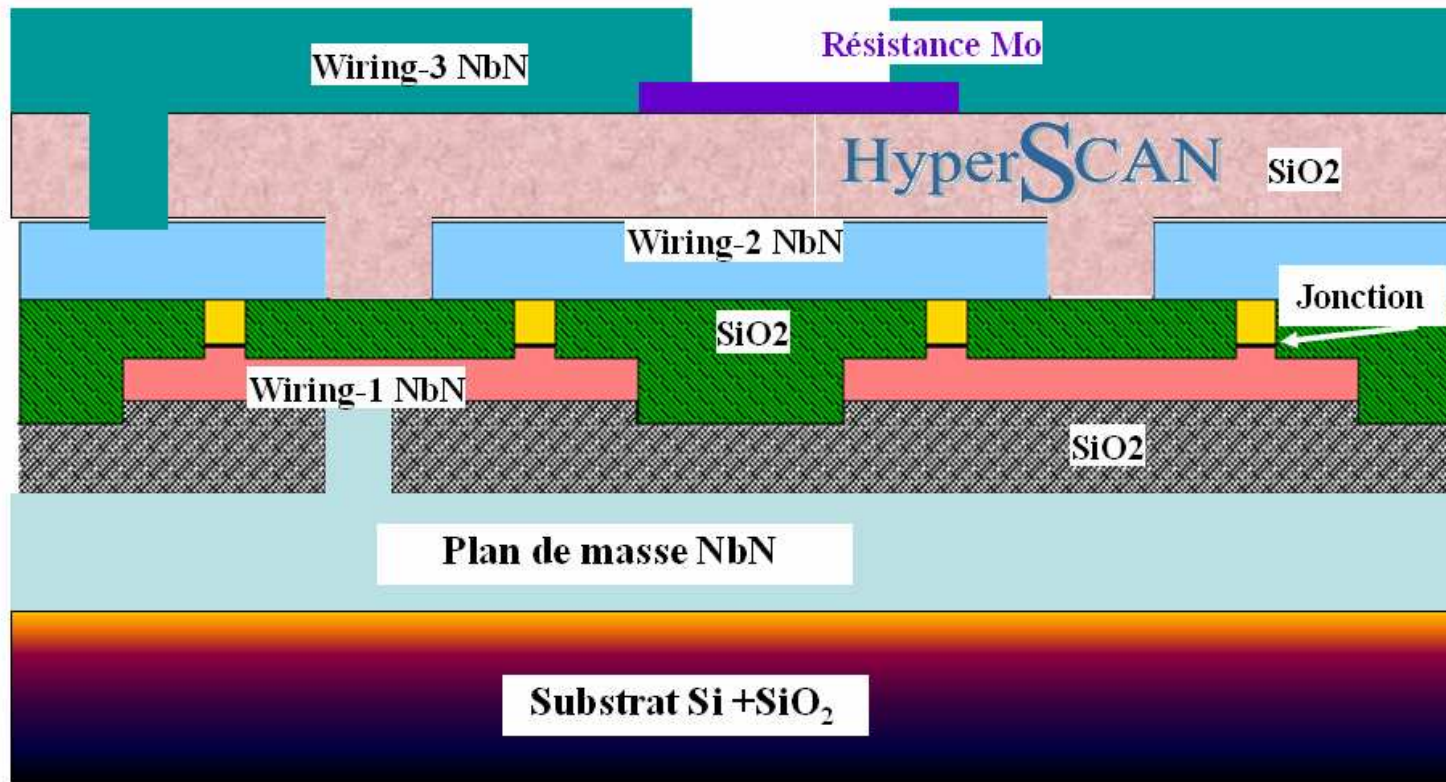


HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Multicouche générique de circuit NbN RSFQ



Empilement de couches de la technologie planaire
‘HyperSCAN’ du CAN-RSFQ NbN



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



Roadmap circuits RSFQ

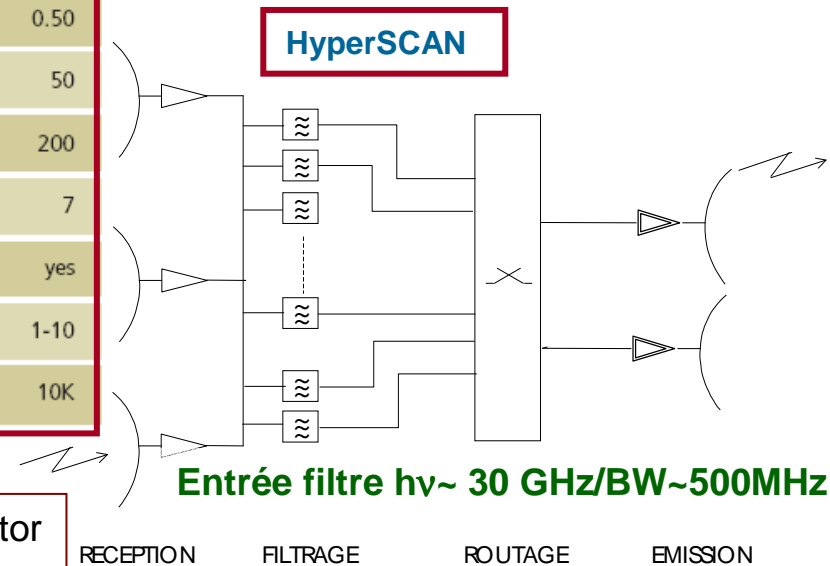
TABLE 4-5. SUPERCONDUCTIVE IC CHIP TECHNOLOGY ROADMAP

Year	1998	2000	2002	2004	2007	2009
Minimum Feature size (μm)	1.5	1.0	1.0	0.60	0.60	0.25
Junction size (μm)	2.50	1.75	1.25	0.80	0.80	0.50
Junction current density (kA/cm^2)	2	4	8	20	20	50
Wafer diameter (mm)	100	100	100	100	200	200
Superconducting Wiring Layers	4	4	4	4	5	7
Planarization	no	no	no	partial	partial	yes
Clean Room class	100	100	10-100	10-100	10-100	1-10
Wafer starts per year	12	200	200	300	1K	10K

Document NSA-USA, 2004

H.J.M. ter Brake et al, "SCENET roadmap for superconductor digital electronics", Physica C, **439**, 1-41, 2006.

Puce du CAN HyperSCAN



$I_j = 150 \mu\text{A}$ par jonction NbN de $0,5 \mu\text{m}^2$
soit $J_j = 25 \text{ kA}/\text{cm}^2$ à 9K



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr



La numérisation HyperSCAN permet la reconfiguration hertzienne

Cablage du système froid pour le satellite

Technologie de Rupture le coeur de la puce bat à 200 GHz

MINALOGIC
l'infiniment petit, infiniment utile

Architectures innovantes et reconfigurables

ThalesAlenia Space

L'application télécoms spatiales

HyperSCAN

Procédure Numérique

Réfrigérateur et puces à 9K

Industriels

ie3

Evaluation module	Sur la puce	Y compris filaments	Comparaison à 2x CAN
HyperSCAN	~ 1000 W	~ 2000 W	~ 4000 W
W / 10000 Book	~ 500W / -15	~ 3000W /	

Importance de la connectique cryogénique et du packaging

Industriels

cea DRFMC

leti MINATEC

Multicouches HyperSCAN portée de 75mm à 200mm

Empilement de jonctions nitures par planarisation et lithographie submicronique sur la plateforme Leti

Physiciens-Technologues

Conception, réalisation des jonctions Josephson THz nitures et test fonctionnel de la puce 'HyperSCAN'

Portage de la technologie NbN en plateforme Leti sur substrat silicium de 200 mm

TELECOM PARIS
école nationale supérieure des télécommunications

Étude des architectures de CAN $\Sigma\Delta$ en logique RSFQ et jonctions nitures

Simulations en langage VHDL-AMS

Exemple d'architecture de puce CAN Nb de 5x5mm² Source: Hypres/MIT

Architectes

Une architecture optimisée pour l'application

UNIVERSITÉ SAVOIE

Accès à la fonderie FLUXONICS: www.FLUXONICS.org

CONCEPTION: Registre à décalage à 16 bits

MESURES

RESULTATS: horloge 100 μ V, signal de sortie

Concepteurs

Simulation et test de portes et circuits

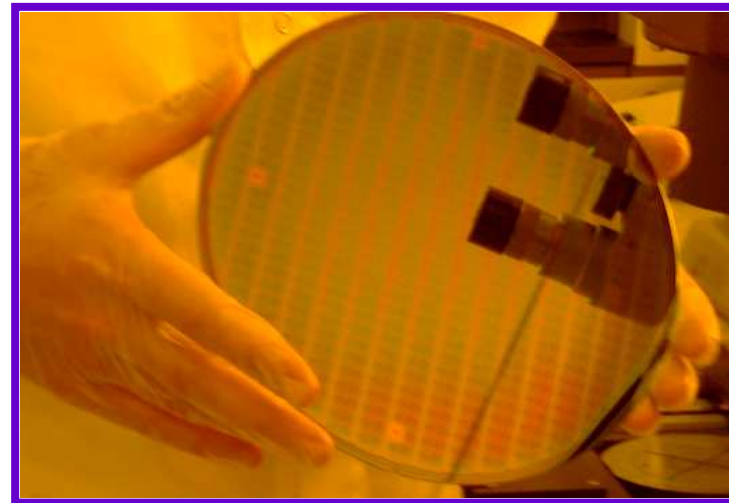
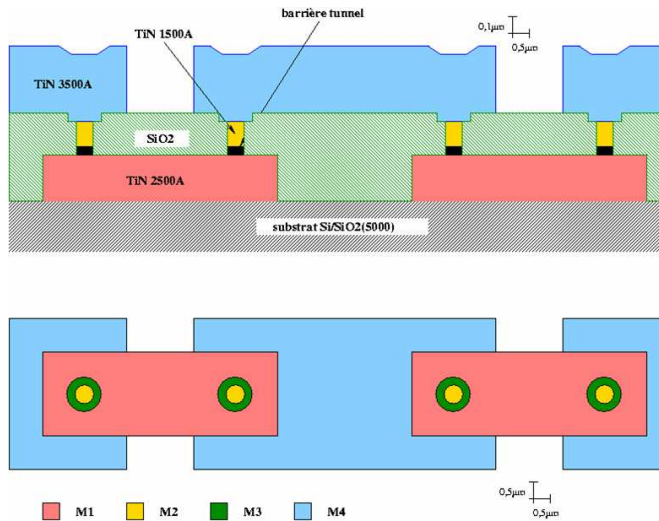
Circuit Hyperfréquences Supraconducteurs de Conversion Analogique Numérique



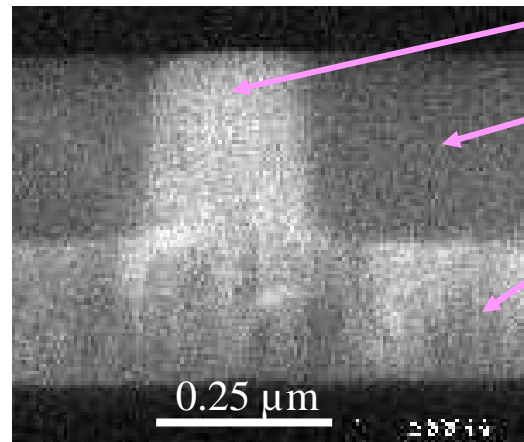
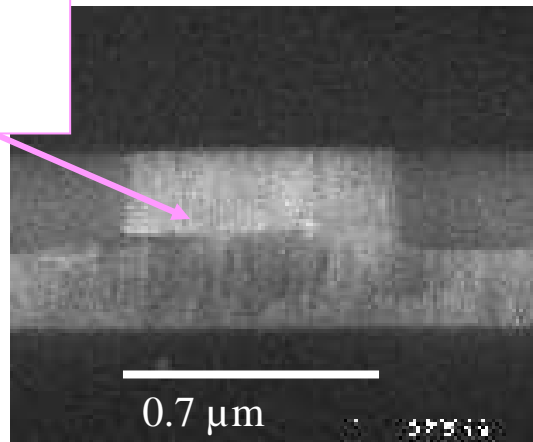
HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr





Barrière
TiN_xO_y



TiN_{TOP}

SiO₂_{PLANAR}

TiN_{INF}

Procédé de réalisation de chaîne de diodes Josephson planaires TiN 0,4 μm par CMP (polissage) mis au point au LETI en 200 mm (Thèse de N. Hadacek UJF-2002)



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr

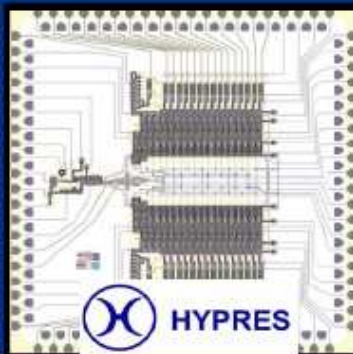


10-level process based on Nb/AIO_x/Nb Josephson junctions

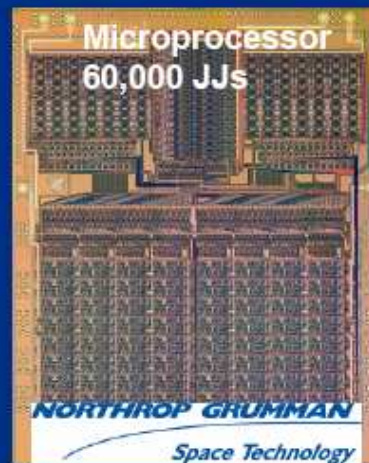


Top= 4K

Digital RF receiver
12,000 JJs



Microprocessor
60,000 JJs



8 mask releases per year
(current number is 313)

~400 chips per wafer
1x1 cm die
150 mm dia.
5x5 mm die

CEA (INAC+LETI): portage de la fabrication NbN à 9K en CI Large Scale Integration



HEB, NW-SSPD & STJ Detectors 5-09

jean-claude.villegier@cea.fr

