

Détecteurs Supraconducteurs pour l'Astronomie et l'Astrophysique

Faouzi Boussaha

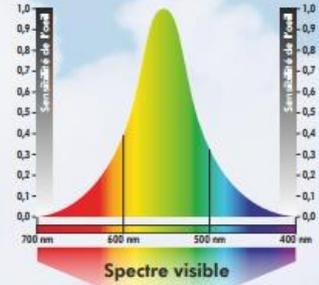
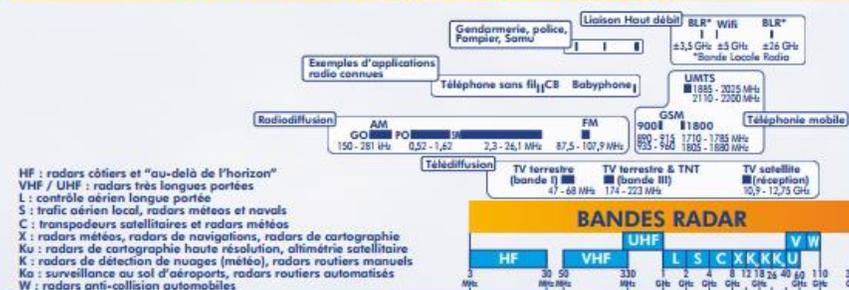
Galaxies, Etoiles, Instrumentation et Physique



Atelier virtuel Franco-Tunisien de Radioastronomie 8-9 Février 2021

- **Généralités**
- **Technologie des détecteurs supraconducteurs:**
 - **Supraconducteur-Isolant-Supraconducteur (SIS)**
 - Bolomètre à électrons chauds (HEB)
 - Détecteur à inductance cinétique (MKIDs)
 - Transition Edge Sensor (TES)

SPECTRE RADIOFREQUENCE (3 Hz - 300 GHz)



Le spectre électromagnétique est la décomposition du rayonnement électromagnétique selon ses différentes composantes en terme de longueur d'onde ou d'énergie des photons, les deux grandeurs étant liées par la constante de Planck $h [E = h \cdot \nu]$

Si la lumière désigne un rayonnement électromagnétique visible par l'œil humain, les ondes radio, les rayons X et γ sont également des rayonnements électromagnétiques. À partir des rayons X, les longueurs d'ondes sont rarement utilisées : comme on a affaire à des particules très énergétiques, l'énergie correspondant au photon X ou γ détecté est plus utile.

Cette énergie est exprimée en électron-volt [eV], soit l'énergie d'1 électron accéléré par un potentiel de 1 volt.

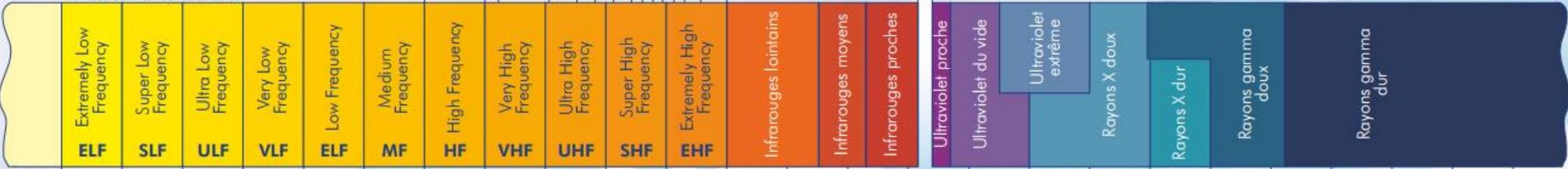
Un rayonnement électromagnétique est caractérisé par un flux de particules sans masse, les photons, associé à une onde, l'onde électromagnétique. En associant simultanément des propriétés antagonistes d'ondes et de particules, la connaissance par l'Homme du rayonnement électromagnétique a fait naître la théorie de la dualité onde-particule dont le concept est l'un des fondements de la mécanique quantique.

La compatibilité électromagnétique, ou CEM, est l'aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement. Dans la perspective du spectre électromagnétique, la CEM s'applique potentiellement sur l'ensemble du spectre radiofréquence (en pratique jusqu'à 40 GHz).

Le rayonnement électromagnétique peut également être utilisé à des fins d'espionnage mais aussi de guerre électronique.

L'utilisation de radio-émetteurs, notamment en téléphonie mobile, s'accompagne de nouvelles exigences en terme d'ondes et santé pour s'assurer qu'aucun danger n'est induit sur les individus selon les conditions d'exposition.

BANDES RADAR



ONDES RADIO (9 kHz - 3000 GHz)

MICRO-ONDES

INFRAROUGE

ULTRAVIOLET

RAYONS X

RAYONS GAMMA

OPACITE DE L'ATMOSPHERE AUX ONDES ELECTROMAGNETIQUES



Pollution électromagnétique générée de manière non intentionnelle par l'ensemble des équipements électriques et/ou électroniques

Communication pour sous-marins en plongée
 Réseaux électriques
 Partiel antivol et autres matériels à boucle à induction
 Etiquetage RFID
 Jouets radiocommandés
 Télédiffusion
 Radars de détection maritime et aérien, radars météorologiques
 Émetteurs radio grandes ondes et FM
 Liaison satellite
 Micro-onde
 Télémétrie
 Radars routiers

Lasers
 Vision thermique
 Lumières incandescentes et fluorescentes
 Satellites d'exploration spatiale

Cabine à bronzer
 Dispositifs de stérilisation

Imagerie par rayon X
 Photolithographie
 Microscopes électroniques

Synchrotrons
 Cristallographie

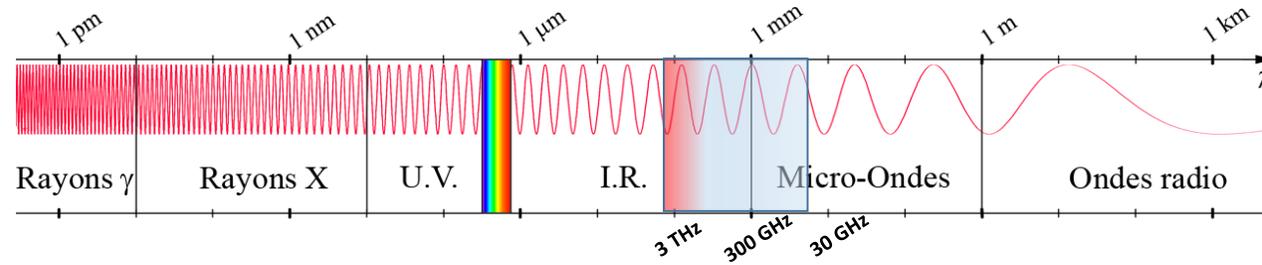
Explosion nucléaire
 Accélérateurs de particules

Radiothérapie
 Rayons cosmiques



- **Astronomie et astrophysique : cosmologie, milieu interstellaire, galaxies, atmosphères des planètes y compris la notre...**
- Télécommunication : communication ultrarapide...
- Biologie, médecine : étude des réactions cellulaires dans le submm/THz, diagnostics précoces des cancers...
- Industrie : détection de la moisissure...
- Sécurité et défense : détection des explosifs...

Détecteurs les plus adaptés pour les applications astronomiques



■ Ondes millimétriques, submillimétriques et THz

• Détection hétérodyne submm/THz :

- Amplitude et la phase
- Grande résolution spectrale : 10^6 - 10^7

Analyse spectrale à très haute résolution.

- A base de Semi-conducteur : diode Schottky, HEMT (Transistor à Haute Mobilité Electronique)
- A base de Supraconducteur : **Supraconducteur-Isolant-Supraconducteur (SIS)**, **bolomètre à électrons chauds (HEB)**

• Détection directe :

- Amplitude
- Faible résolution spectrale : 10^4

Détecteurs : TES (Transition Edge Sensor), **MKIDs (Microwave Kinetic Inductance Detectors)**, bolomètres, Jonction SIS

Mesure en continuum des températures de surfaces solides ou liquides ou de poussières...

■ Ondes optiques

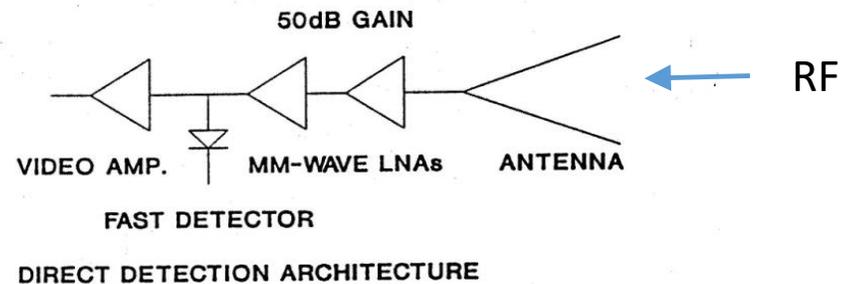
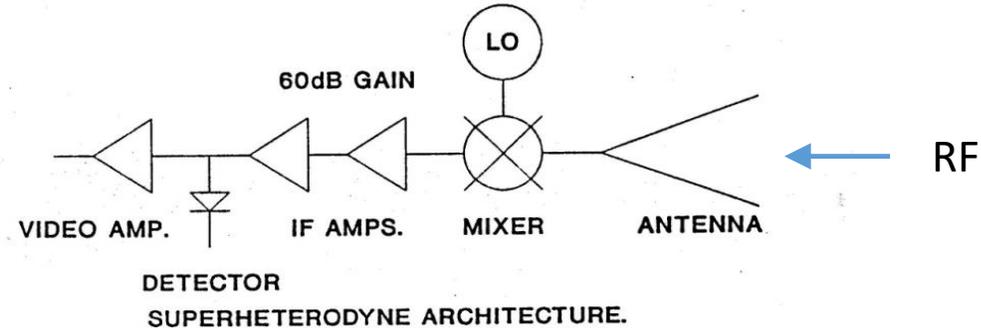
- CCD/CMOS, **MKIDs** : photométrie et spectroscopie

Grâce à leur performance inégalée, particulièrement en terme de sensibilité qui peut approcher la limite quantique donnée par le bruit d'un photon, **les détecteurs à base de supraconducteur** représentent le choix de prédilection lorsqu'il s'agit de :

- détecter la lumière primordiale émise au début de l'expansion de l'univers (CMB),
- de sonder le milieu interstellaire qui est le siège de la formation des étoiles
- d'étudier les processus physico-chimiques des atmosphères planétaires y compris celle de la Terre...

FUNDAMENTALS OF RECEIVERS FOR TERAHERTZ SYSTEMS

- Direct and Heterodyne Detection Systems

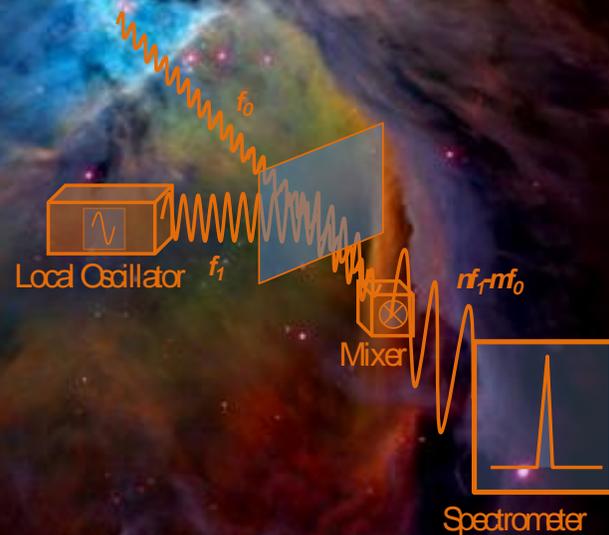


- **L'hétérodyne** est utilisée pour permettre l'analyse spectrale à très haute résolution.
- **La détection homodyne (ou directe)** permettent des larges bandes passantes donc des sensibilités élevées en continuum (ex: mesure de températures de surfaces solides ou liquides ou de poussières...)

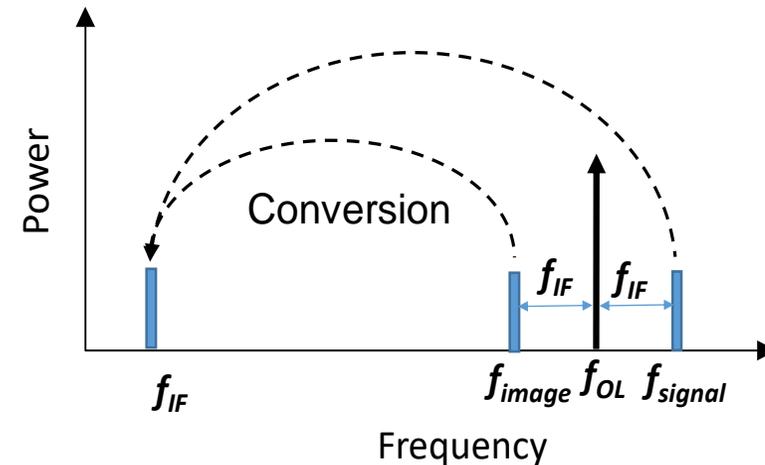
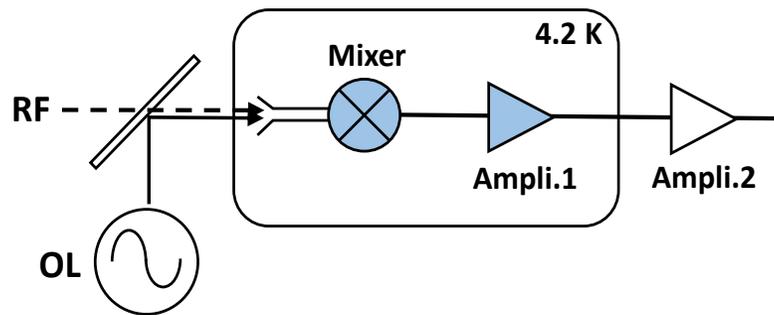
Détection Hétérodyne

Détection hétérodyne

Le milieu interstellaire qui constitue l'essentiel des galaxies, jusqu'à 99% des galaxies spirales comme la nôtre, abonde en gaz et poussières. Sa température varie entre 10 K pour les régions les plus froides et 200 K pour les régions les plus chaudes correspondant à une bande de fréquence de $f = k_B T/h \sim 200 \text{ GHz} - 4 \text{ THz}$.

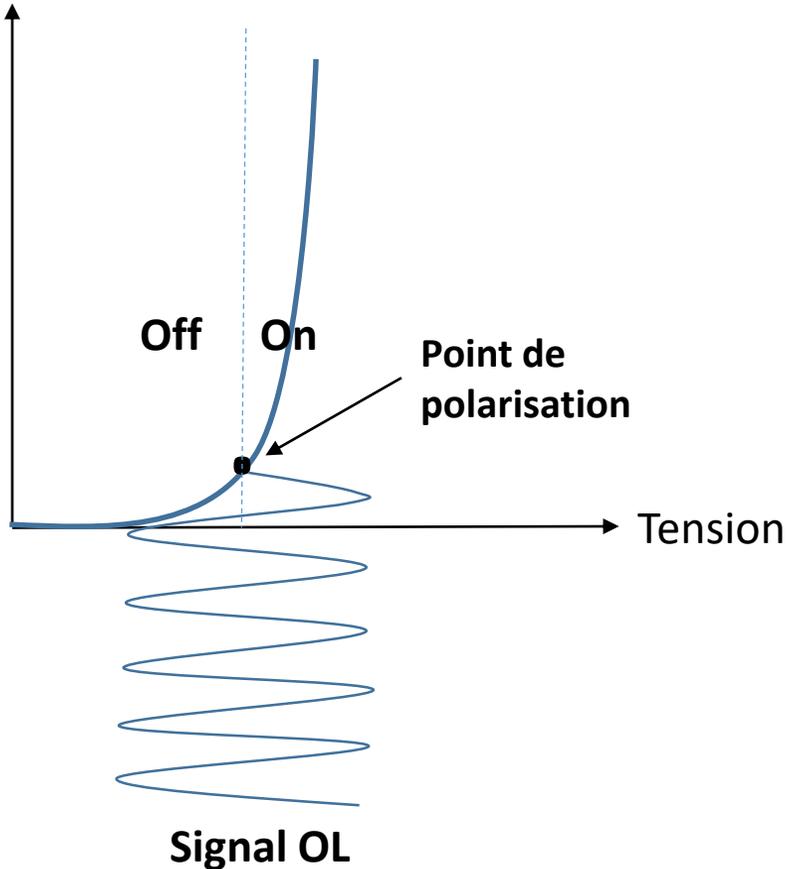


La spectroscopie hétérodyne Terahertz est un outil puissant pour détecter les raies spectrales du gaz atomique et moléculaire qui jouent un rôle important dans la formation des étoiles et l'évolution du milieu interstellaire ainsi que dans les processus physico-chimiques des atmosphères planétaires, y compris celle de la terre.



Caractéristique courant-tension d'une diode Schotky (jonction semiconducteur-métal)

Courant



$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right) \quad \text{Equation de Richardson:}$$

$$I_s = AA^* T^2 e^{\frac{q\phi_b}{KT}}$$

$$I(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n V^n$$

$$V_{RF}(t) = V_{RF} \cos(\omega_{RF}t + \varphi)$$

$$V_{OL}(t) = V_{OL} \cos(\omega_{OL}t)$$

$$V(t) = V_{RF}(t) + V_{OL}(t)$$

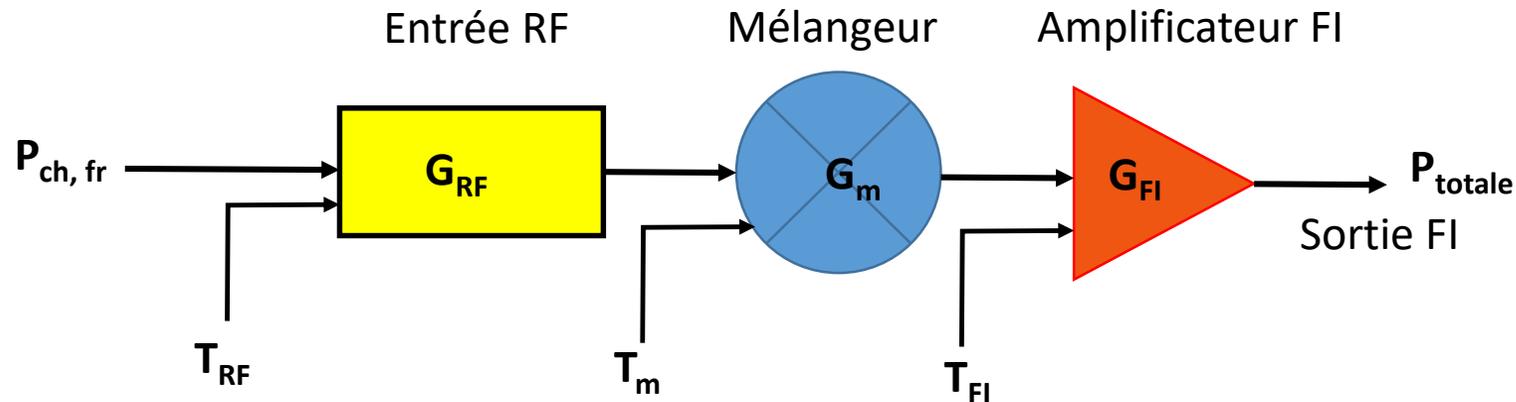
$$I(t) = a_0 + a_1(V_{RF}(t) + V_{OL}(t)) + a_2(V_{RF}(t) + V_{OL}(t))^2$$

$$a_2(2V_{RF}V_{OL} \cos((\omega_{OL} - \omega_{RF})t + \varphi_{RF}) + 2V_{RF}V_{OL} \cos((\omega_{OL} + \omega_{RF})t + \varphi_{RF}))$$

$$V_{FI}(t) \propto aV_{OL}V_{RF} \cos((\omega_{RF} - \omega_{OL})t + \varphi_{RF})$$

- L'amplitude de la tension V_{FI} est proportionnelle à l'amplitude du signal RF.
- La fréquence $f_{FI} = f_{RF} - f_{OL}$ dépend de la fréquence du signal.
- La phase du signal de sortie est le même que celui du signal d'entrée.

En radioastronomie, on utilise la notion de puissance de bruit en sortie d'un récepteur.



$$T_{tot} = G_m G_{FI} G_{RF} (T_{RF} + T_{ch, fr}) + G_m G_{FI} T_m + G_{FI} T_{FI}$$

$$T_{Rec} = T_{RF} + \frac{1}{G_{RF}} \left(T_m + L_m \frac{T_{FI}}{G_m} \right)$$

(cf. formule de Friis)

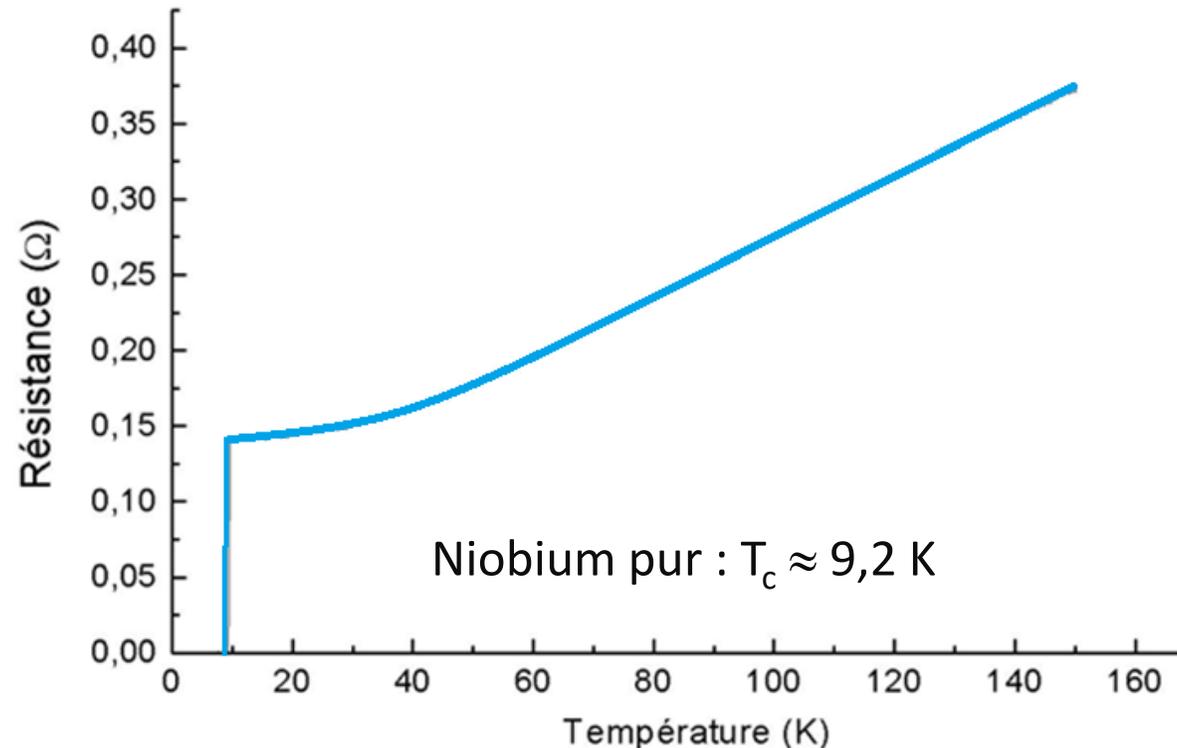
$$T_{Rec} = \frac{T_{ch} - Y T_{fr}}{Y - 1} \quad \text{avec} \quad Y = \frac{P_{ch}}{P_{fr}} \quad \text{et} \quad \begin{aligned} P_{fr} &= k_B T_{fr} B \\ P_{ch} &= k_B T_{ch} B \end{aligned}$$

La sensibilité limite des récepteurs hétérodynes est donnée par la limite quantique qui peut être exprimée par la température équivalente de bruit $T=hf/K$. Elle est de 0,05 K par 1 GHz ou 50 K par 1 THz.

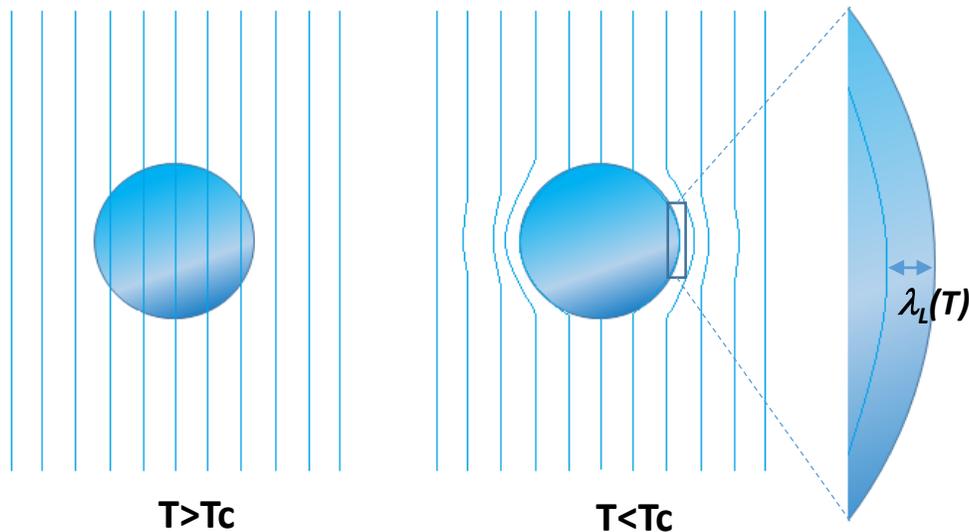
Détection hétérodyne

- 1. Supraconducteur/Isolant/Supraconducteur (SIS)**
2. Bolomètre à électrons chauds (HEB)

- La première caractéristique qui marqua le début de l'histoire de la supraconductivité, fut découverte par Holst et Kamerlingh Onnes en 1911. Après avoir réussi à liquéfier l'hélium deux ans plutôt, **ils constatèrent que la résistance d'un échantillon de mercure baignant dans l'hélium liquide, chuta brusquement pour une température un peu au-dessus de 4,2 K.**



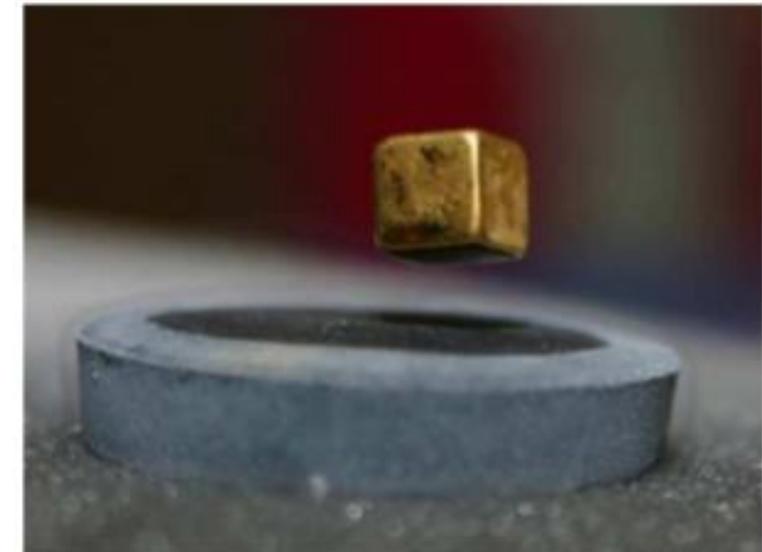
- La seconde caractéristique qui permet de dévoiler le vrai visage de la supraconductivité, fut découverte par Meissner et Ochsenfeld en 1933 : **expulsion totale du champ magnétique observé que dans les métaux purs (excepté le niobium)**.
- En 1935, London expliqua l'effet Meissner en considérant que l'état supraconducteur se caractérise non seulement par la disparition du champ électrique (E) grâce à la conductivité DC infinie mais en plus par celle du champ magnétique (B) à l'intérieur du supraconducteur.



$$\vec{B}(x) = \vec{B}(0) \exp\left(-\frac{x}{\lambda_L}\right)$$

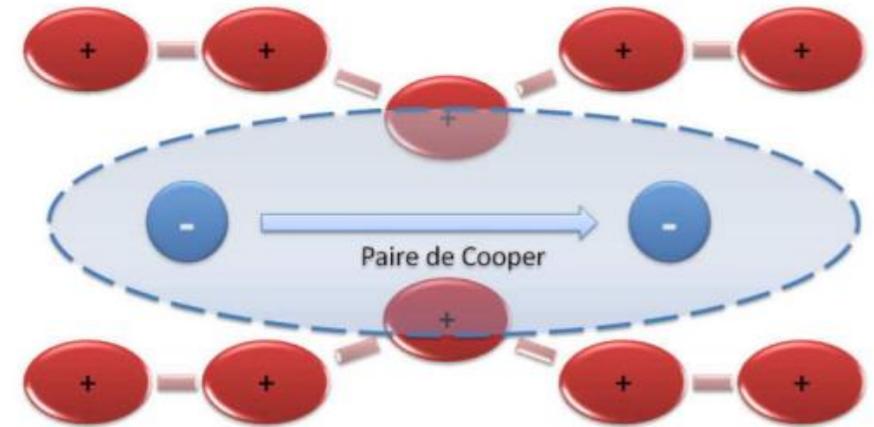
- Dans certains alliages supraconducteurs, le champ magnétique arrive à pénétrer le supra sans casser pour autant l'état supraconducteur. Le supraconducteur se subdivise en régions alternativement normales et supraconductrices. Les régions normales ont la forme d'un tube parallèle au champ magnétique qu'on appelle vortex ou fluxon. Chaque vortex porte un quantum de flux magnétique :

$$\Phi_0 = h/2e = 2,062 \times 10^{-15} \text{ T.m}^2 \text{ ou Weber}$$



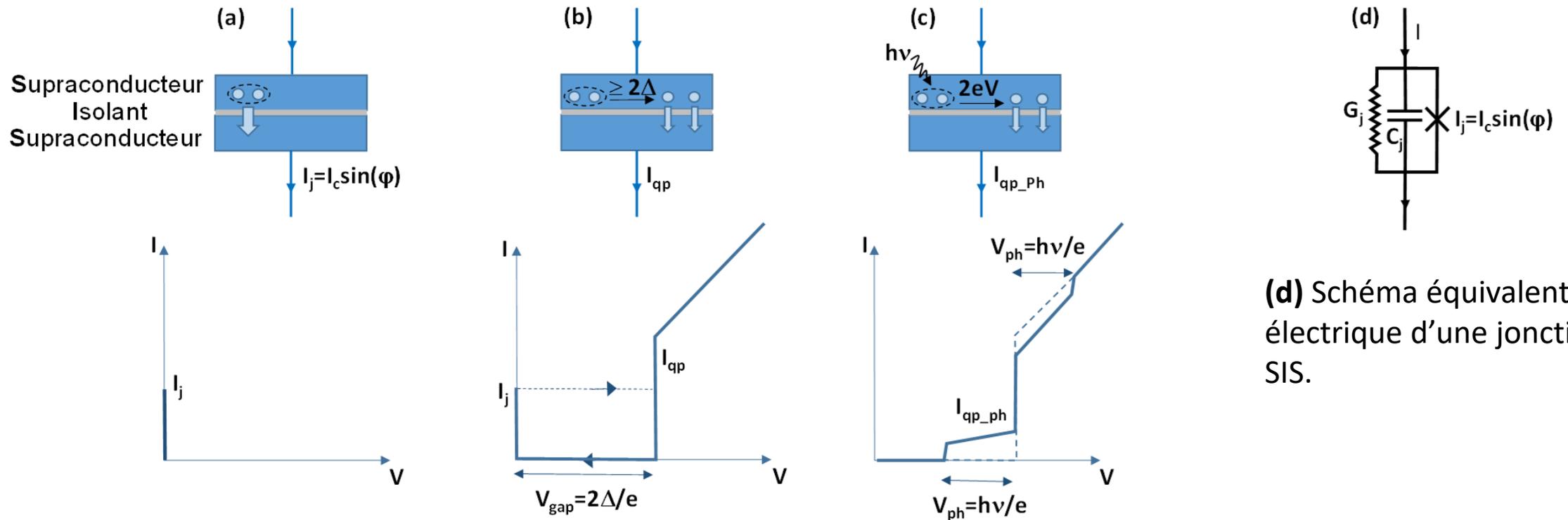
- En 1957, une théorie élaborée par Bardeen, Cooper et Schrieffer, appelée BCS, permet d'aborder la supraconductivité de manière microscopique.

- L'idée de base de la théorie BCS est que deux électrons de moments et de spins opposés s'attirent plus qu'ils ne se repoussent naturellement et se couplent en paire. L'attraction fait intervenir les vibrations du réseau (phonons).



- L'ensemble des paires d'un supraconducteur peut être décrit par une seule fonction d'onde qui peut être cohérente (car insensible aux collisions) sur une grande longueur : $\psi = |\psi| e^{j\varphi}$
- Une paire brisée produit deux particules semblables appelées quasiparticule. Les quasiparticules peuvent être assimilés à des électrons sans qu'ils ne le soient exactement car ils ont des durées de vie plus courtes.

- La température critique T_c où $R \rightarrow 0$ lorsque $T < T_c$
- Longueur London λ_L (*effet Meissner*)
- Le champ magnétique critique B_c : Champ magnétique maximum dans un supraconducteur.
- Le courant critique I_c : courant maximum dans un supraconducteur.
- longueur de cohérence notée ξ_L : la distance moyenne entre les deux électrons d'une paire ($\xi_{L_{Nb}} = 38 \text{ nm}$).
- **Gap : chaque électron d'une paire de Cooper possède une énergie d'attraction faible de quantité Δ . 2Δ exprime ainsi le gap d'énergie qui sépare l'état supraconducteur de l'état normal. Comparativement aux semi-conducteurs, les supraconducteurs se caractérisent par un gap d'énergie beaucoup plus faible rendant possible la détection de photons de très faible énergie (photons millimétriques et submillimétriques). L'aluminium supraconducteur ($\Delta E \approx 0.180 \text{ meV}$) est environ 6000 fois plus faible que celui du silicium ($\Delta E = 1.1 \text{ eV}$).**



(d) Schéma équivalent électrique d'une jonction SIS.

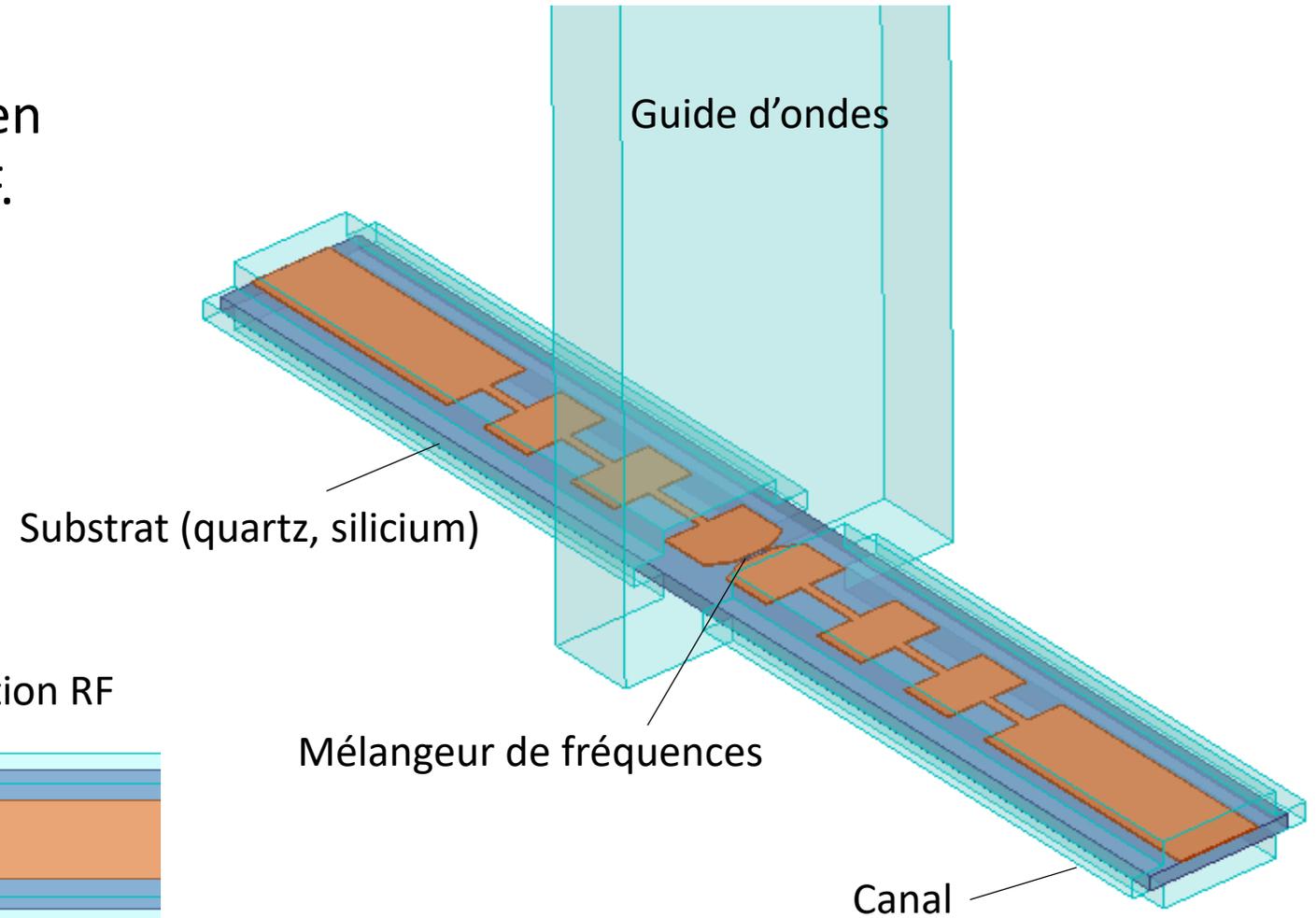
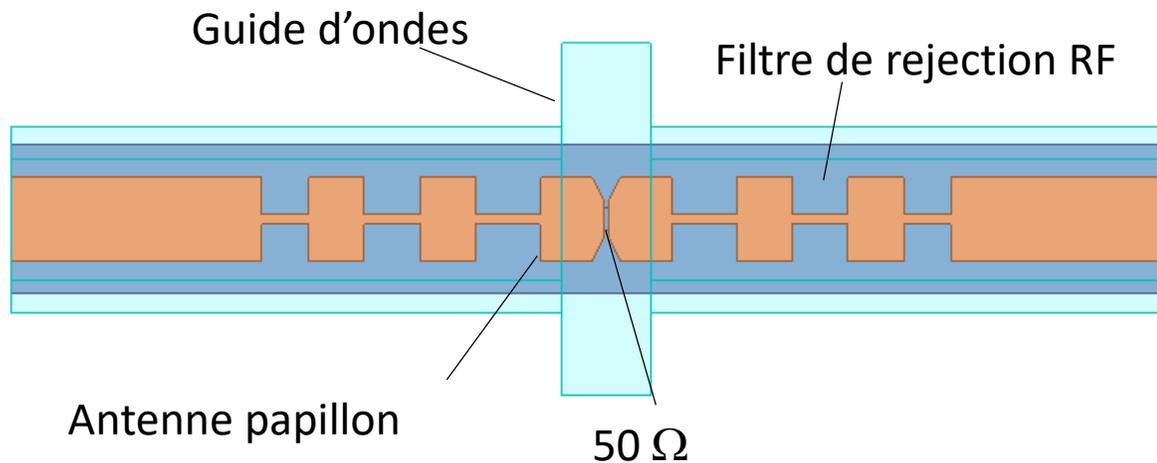
(a) En l'absence de différence de potentiel entre les électrodes supraconductrices, les paires de Cooper traversent par effet tunnel la barrière isolante dont l'épaisseur $<$ longueur de cohérence (ξ).

(b) Jonction polarisée par une tension $V_b > V_{gap} = 2\Delta/e$, les paires de Cooper se brisent en quasiparticules.

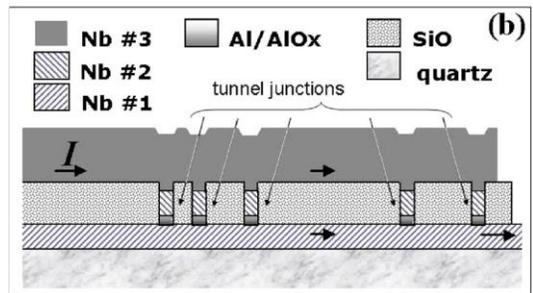
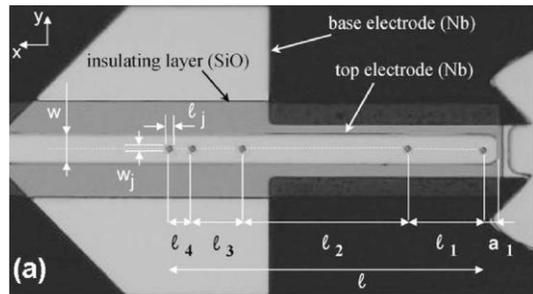
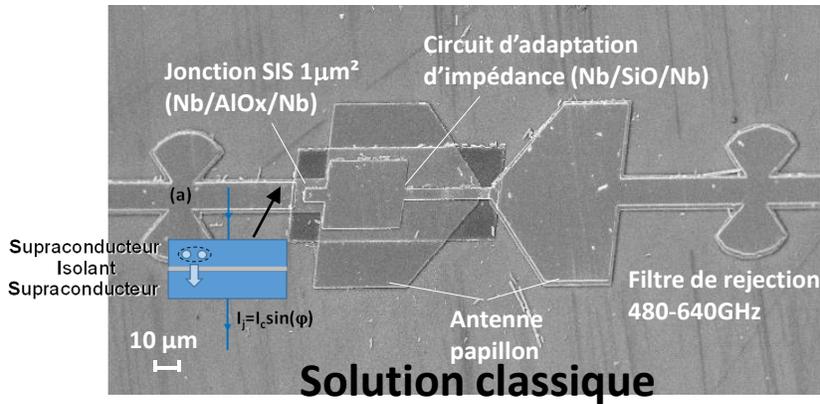
(c) En présence d'un rayonnement électromagnétique, pour $V_b < V_{gap} = 2\Delta/e$, les photons d'énergie $h\nu$ font passer les quasiparticules entre les deux électrodes en leur communiquant l'énergie manquante $V_0 + nh\nu/e > V_{gap}$ (n entier).

- Le mélangeur est conçu en prenant en considération son environnement RF.

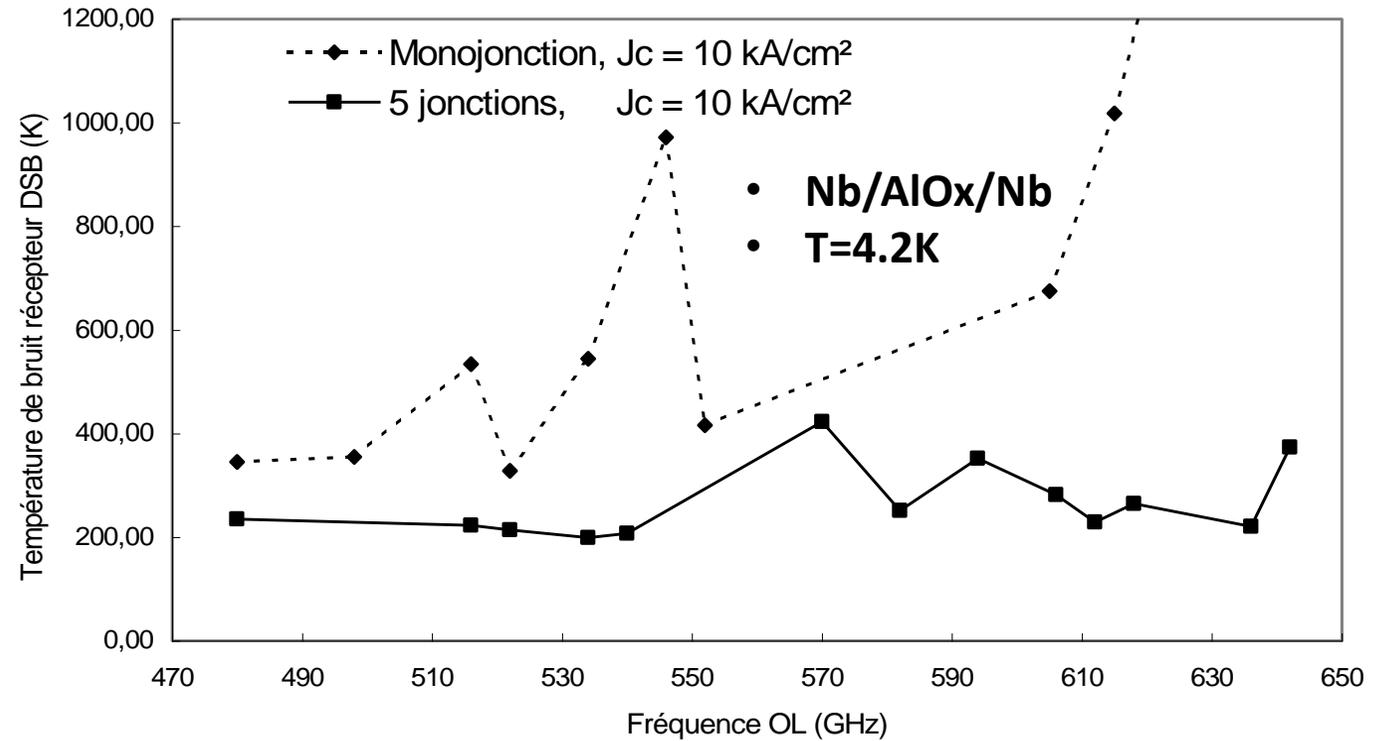
Exemple : à $f_0=2.7$ THz,
guide d'ondes : $l \times w = 78 \times 38 \mu\text{m}$



Développement des mélangeurs de fréquences SIS à l'Observatoire de Paris



Solution multijonction



- Les multijonctions (n=2 et 5 jonctions) ont permis d'élargir la bande passante RF de plus 30%
- Puissance OL faible (elle n'est pas proportionnelle au nombre de jonctions)
- Des densités de courant faibles à modérés ($J_c \leq 10 \text{ kA/cm}^2$)

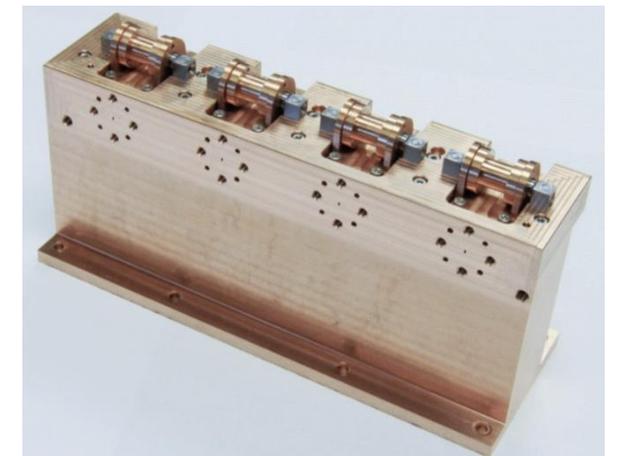
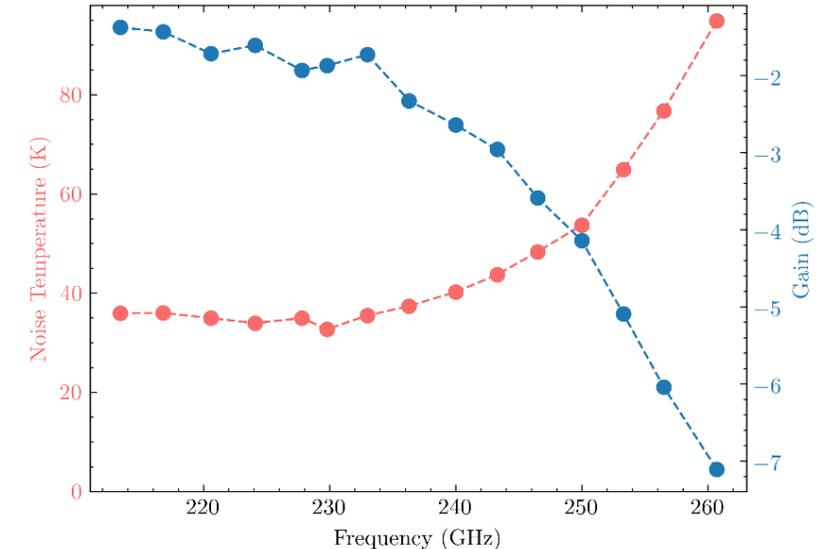
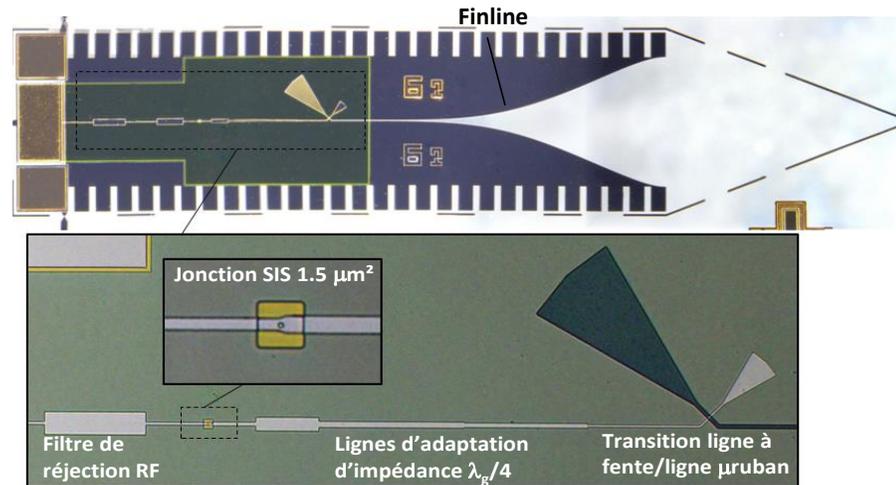
- Ces travaux ont permis de valider le concept de multijonction pour le canal 1 de l'instrument HIFI du satellite Herschel.

Development of 230 GHz SIS heterodyne receivers

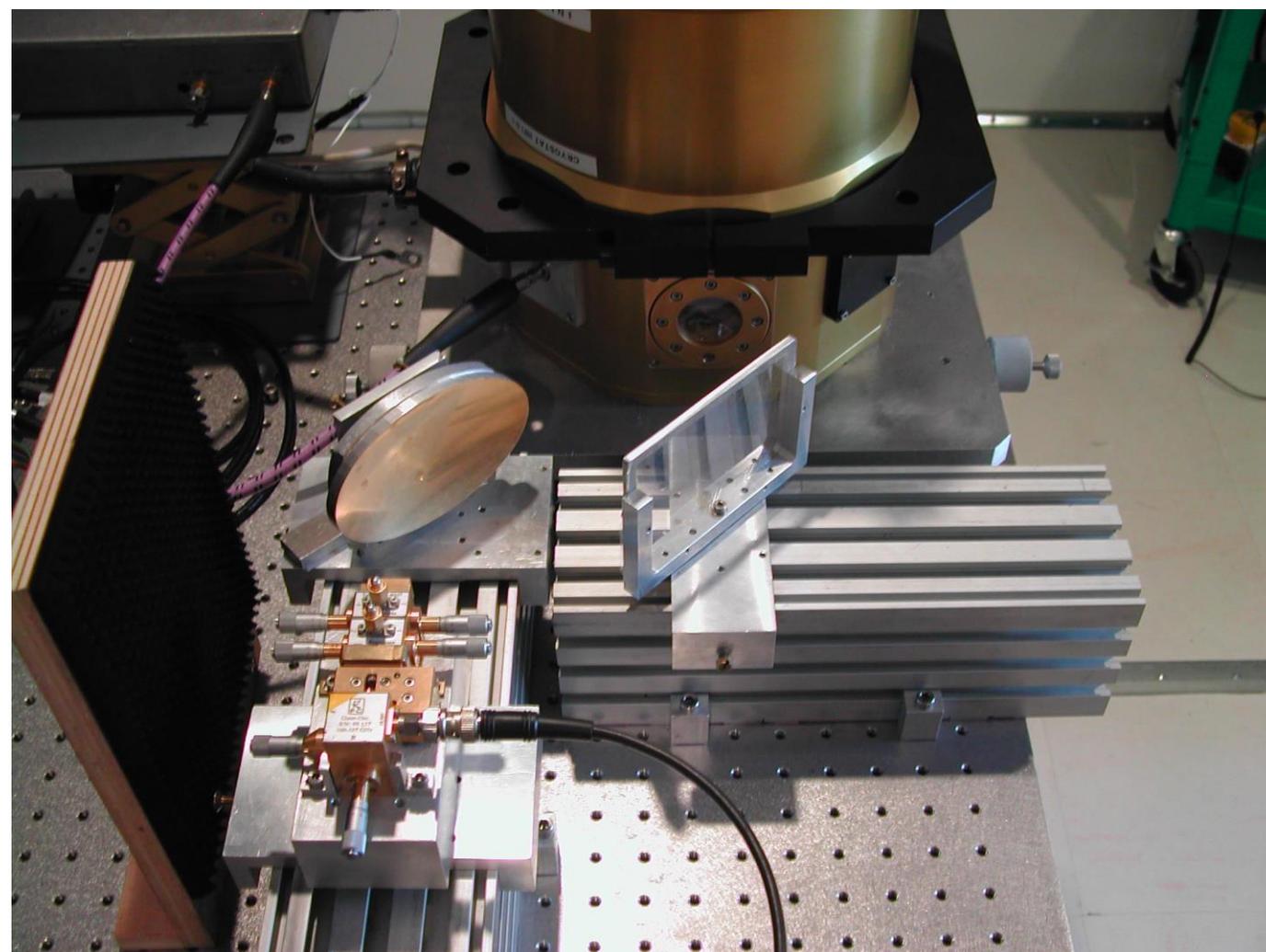
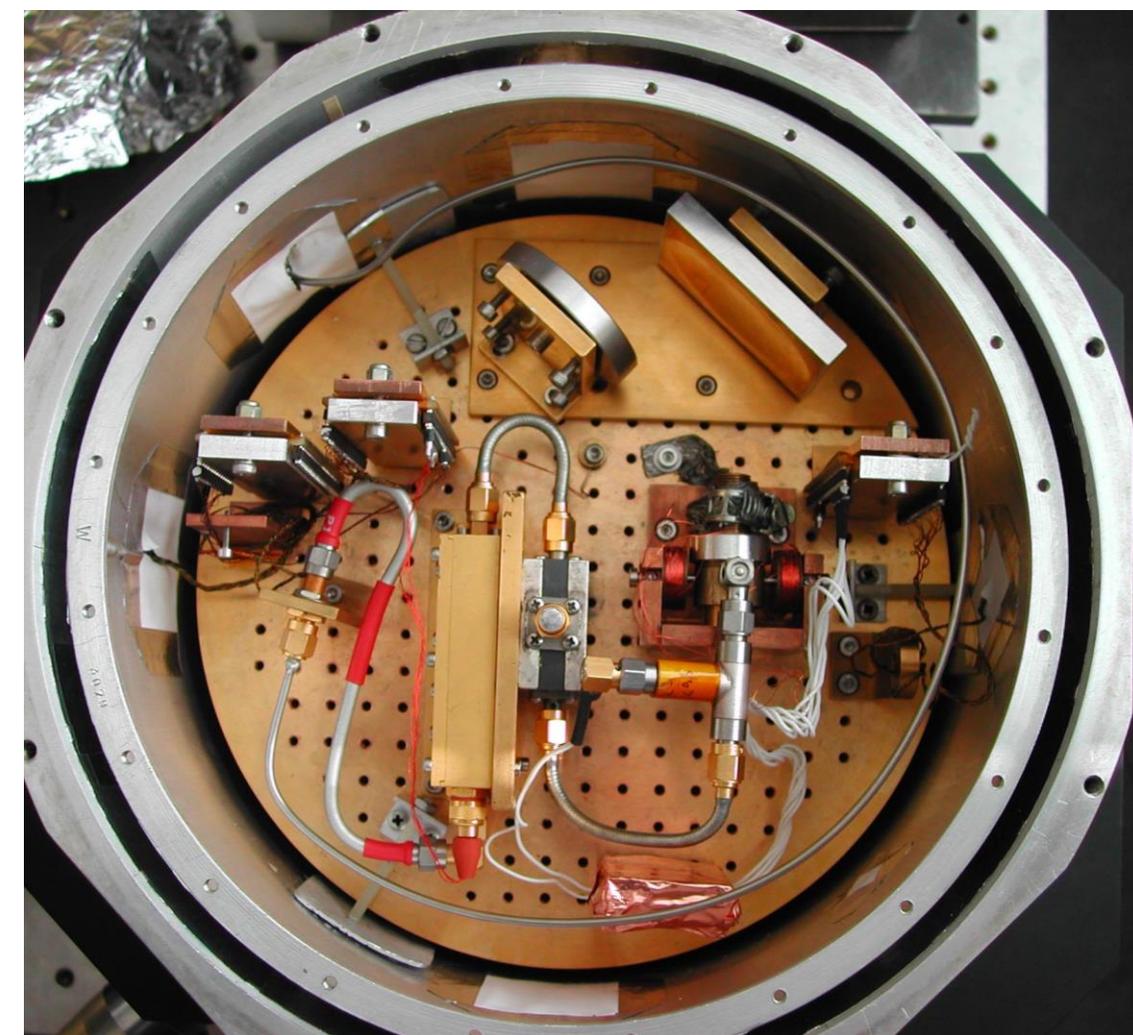
G. Yassin, B Kok Tan - Department of Astrophysics, University of Oxford, UK

- Etude du fond diffus cosmologique (CMB), et plus particulièrement, l'effet Sunyaev Zeldovich (S-Z) à 220 GHz.

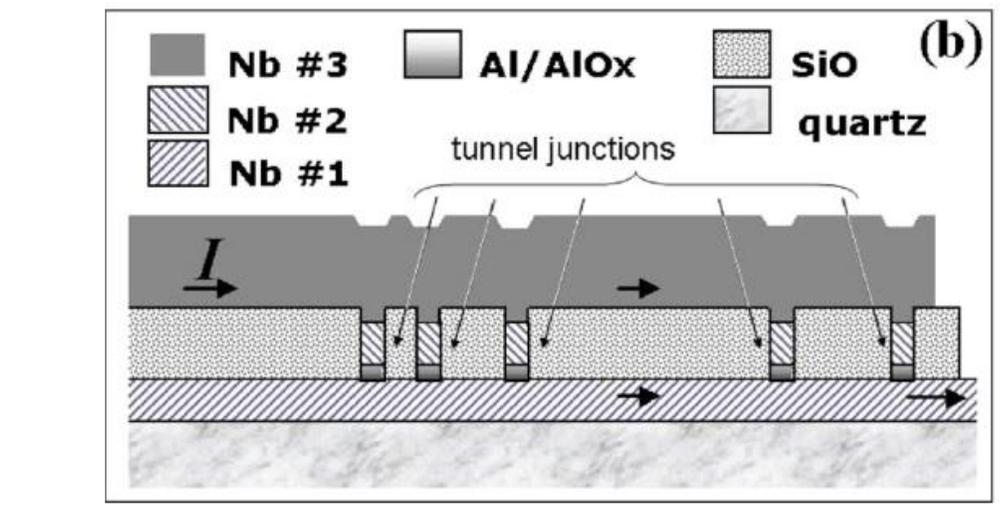
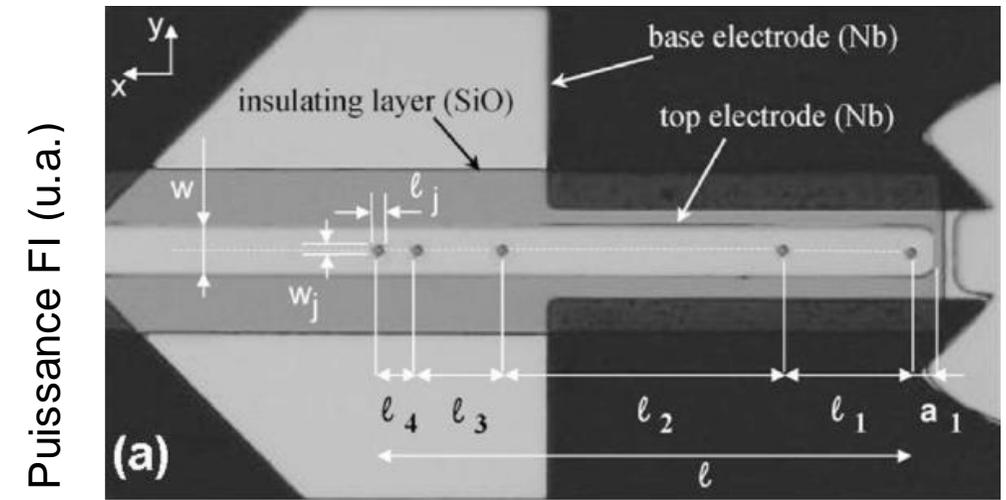
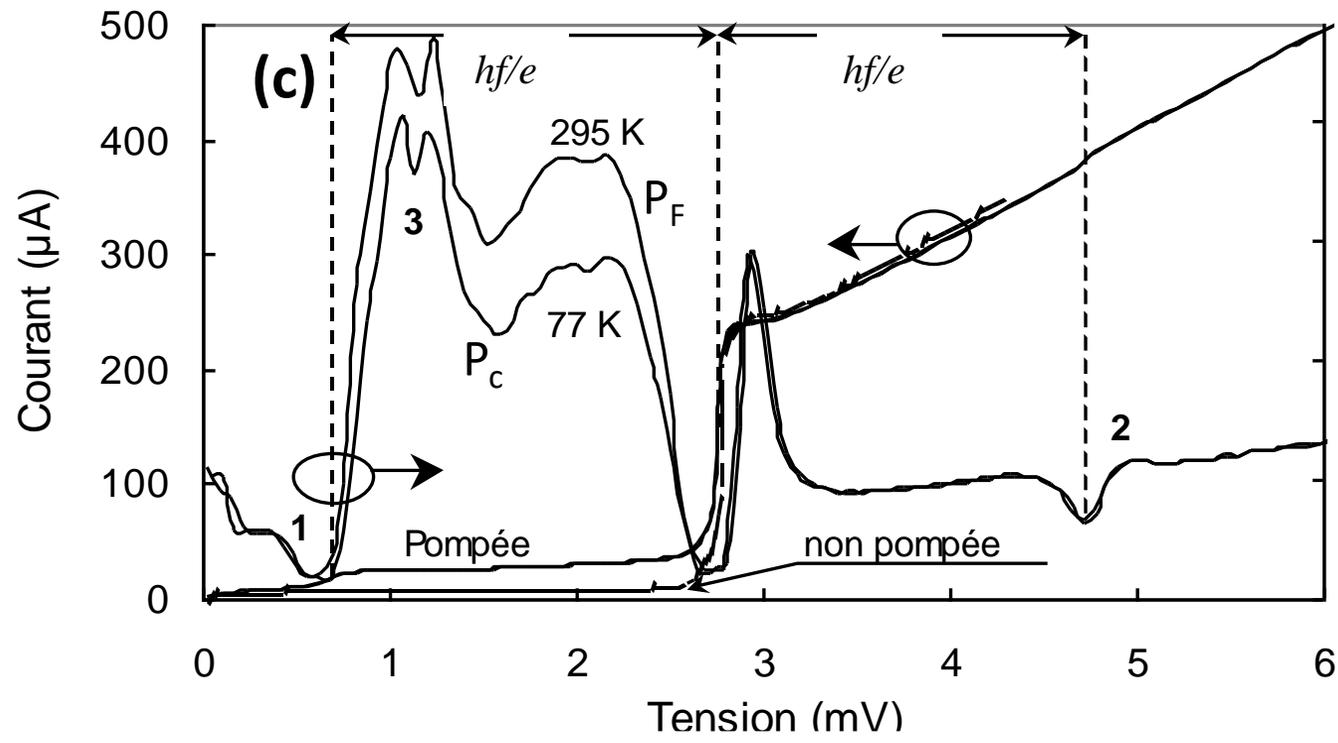
- Technologie fineline
- Sensibilité : 38 K ($\sim 3 \times h \nu / k_B$)
- Large bande FI ~ 12 GHz



- Récepteur hétérodyne SIS 220 GHz à 4 pixels pour augmenter la vitesse d'observation ($\propto N/T_{rec}^2$ où N est le nombre de récepteurs et T_{rec} est la température de bruit du récepteur).

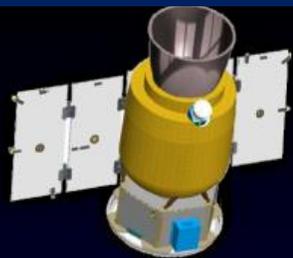


- Mélangeur de fréquences à multijonction SIS : 480-640 GHz



$$P_{Sch} = k_B(T_{ch} + T_r)BG_{rec} \quad P_{Sfr} = k_B(T_{fr} + T_r)BG_{rec}$$

$$T_{Rec} = \frac{T_{ch} - YT_{fr}}{Y - 1} \quad \text{avec} \quad Y = \frac{P_{Sch}}{P_{Sfr}}$$



Space THz Interstellar Mapper

0.5m, 1-2 THz

[CII], [NII]



Stratospheric THz Obs.

0.8m, 1 - 3 THz

[CII], [NII]



GRASI / SOFIA

2.5m, 4.7 THz

[O]



SOFIA

(Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy)

Supercam / HHT

10m, 0.3-0.4 THz

CO

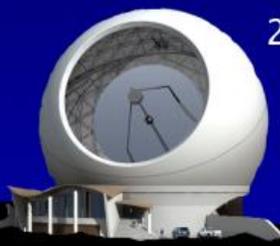


ALMA 64 antennes 0.1 – 1 THz

Supercam / Atacama

25m, 0.6-0.8 THz

CO, [CI]

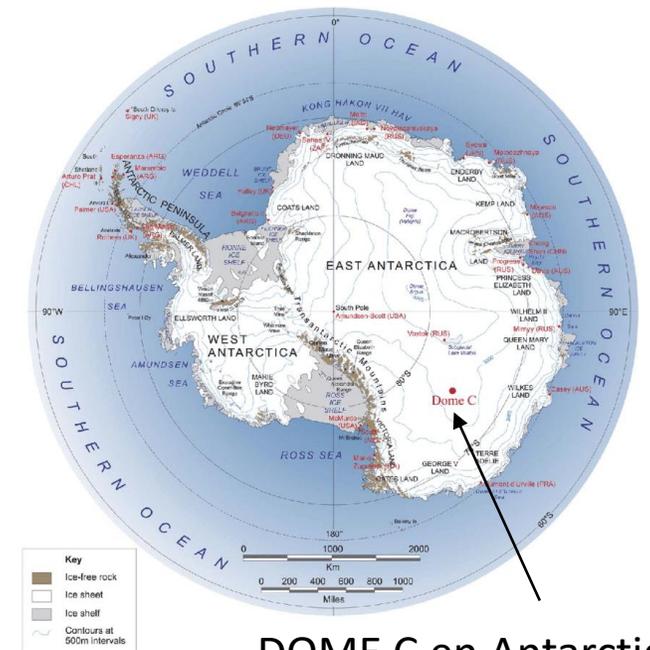
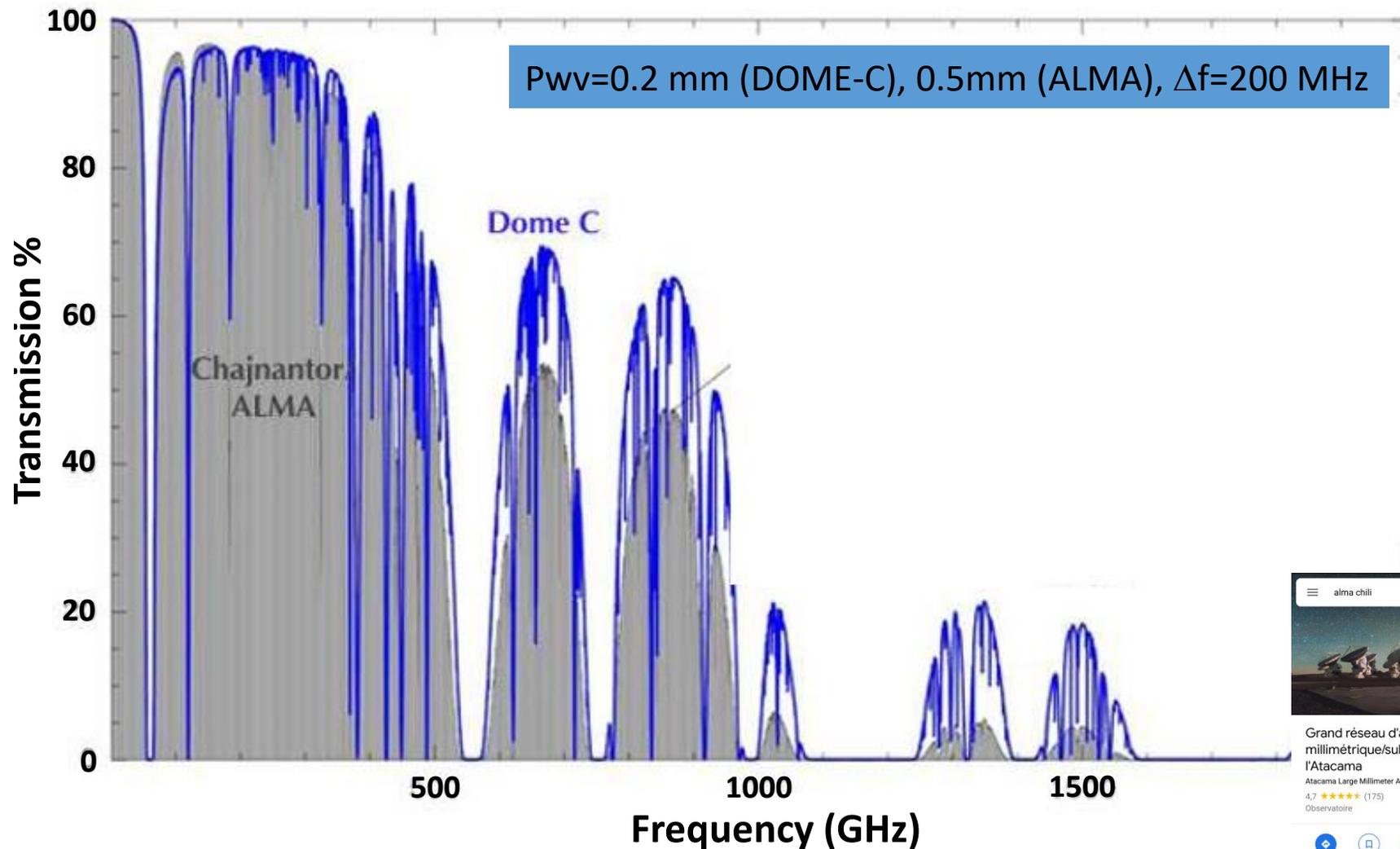


HEAT / Dome A

0.5m, 0.8 - 2 THz

CO, [CI], [CII], [NII]





DOME C en Antarctique

alma chili

Grand réseau d'antennes millimétrique/submillimétrique de l'Atacama

Atacama Large Millimeter Array

4.7 ★★★★★ (175)

Observatoire

San Pedro de Atacama, Antofagasta, Chili

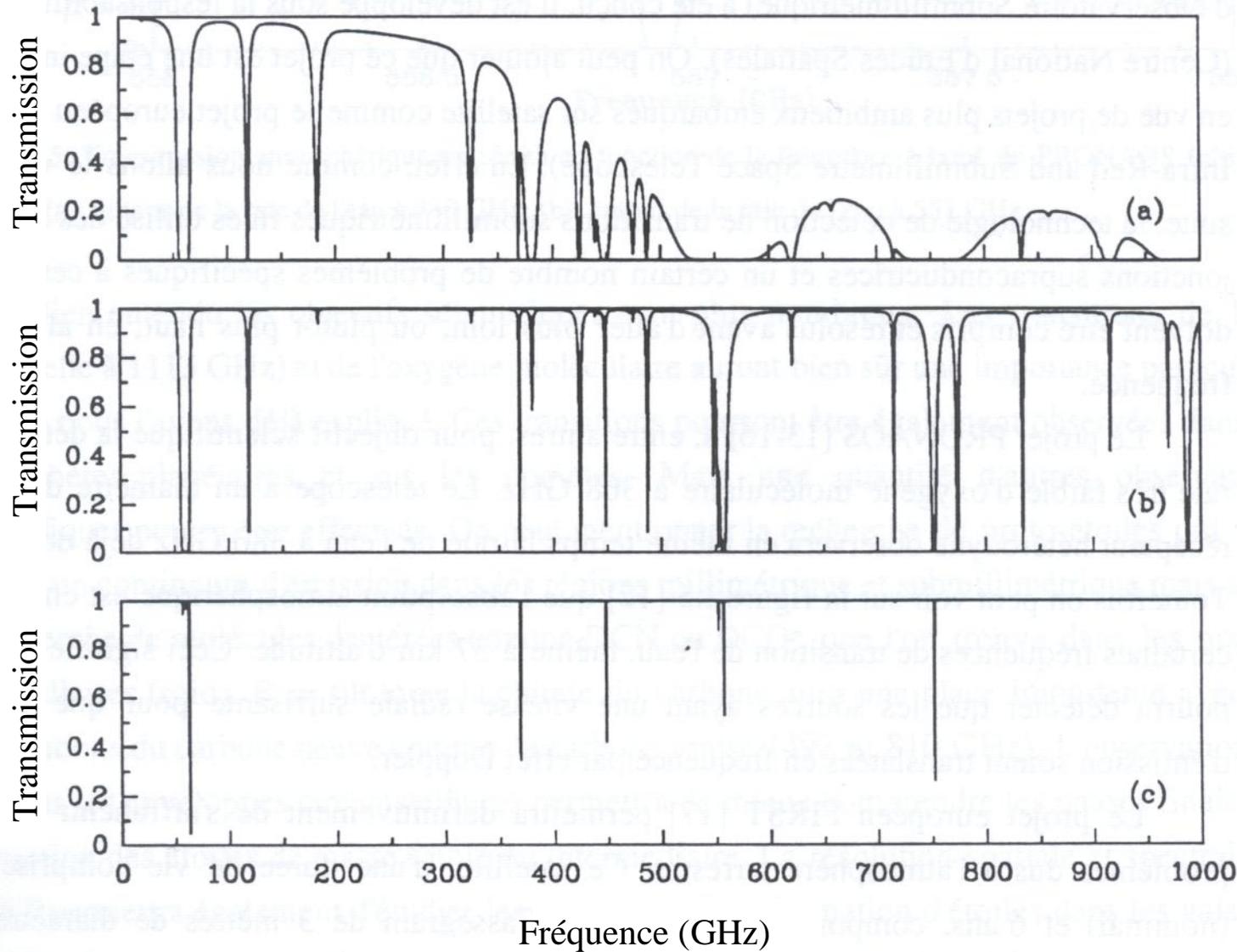
Établissement ouvert : Ouvert 24h/24

almabobservatory.org

X66W-JF Pajonales, San Pedro de Atacama, Chili

The figure is a screenshot of a Google Maps search for 'alma chili'. The search results show a location in Chile with a red pin. The text on the screen includes the search term 'alma chili', the name of the facility 'Grand réseau d'antennes millimétrique/submillimétrique de l'Atacama', the full name 'Atacama Large Millimeter Array', a rating of 4.7 stars from 175 reviews, and the location 'San Pedro de Atacama, Antofagasta, Chili'. There is also a small inset image showing the ALMA antennas.

Absorption de l'atmosphère terrestre à différentes altitudes



- 4 200 m sur le site de Mauna Kea,

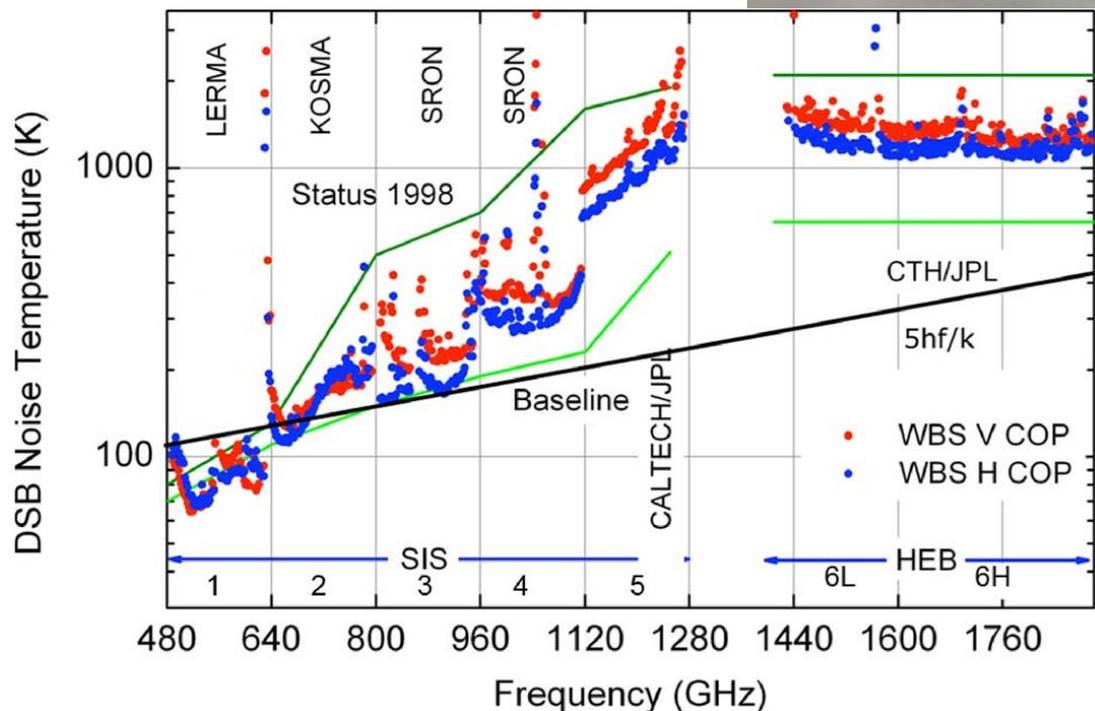
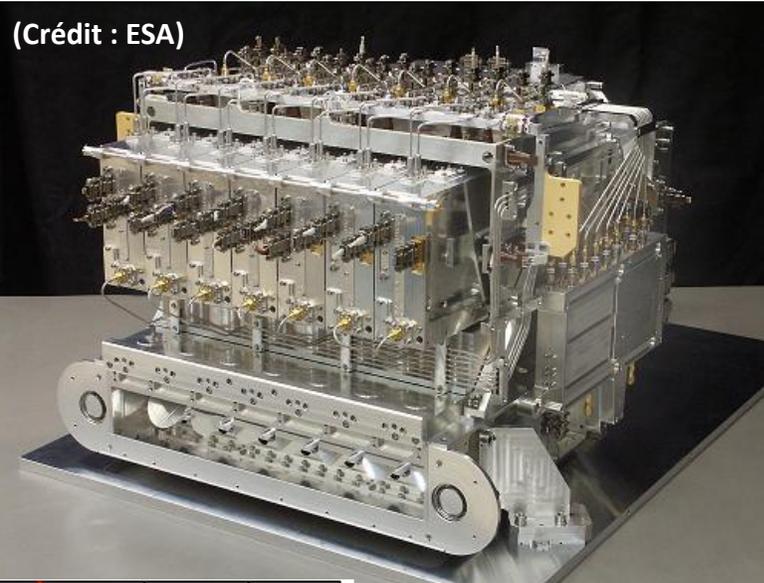
- 12 000 m à bord d'avions

- 37 000 m à bord de ballons stratosphériques

- Les technologies de détecteurs submm/THz permettent de couvrir une large bande de fréquence, allant du mm jusqu'à l'optique pour l'astronomie (milieu interstellaire, galaxies et étoiles, système solaire, exoplanètes...)



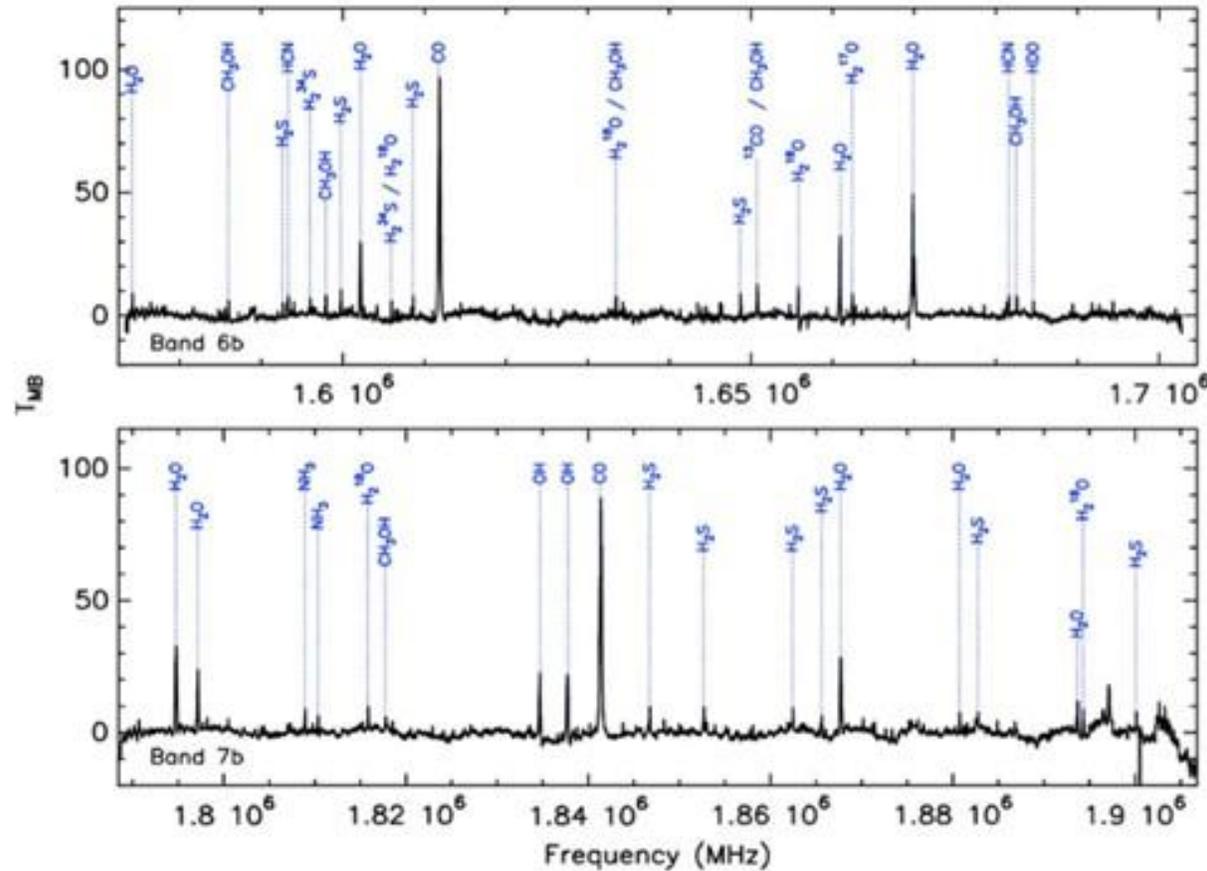
HIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared)



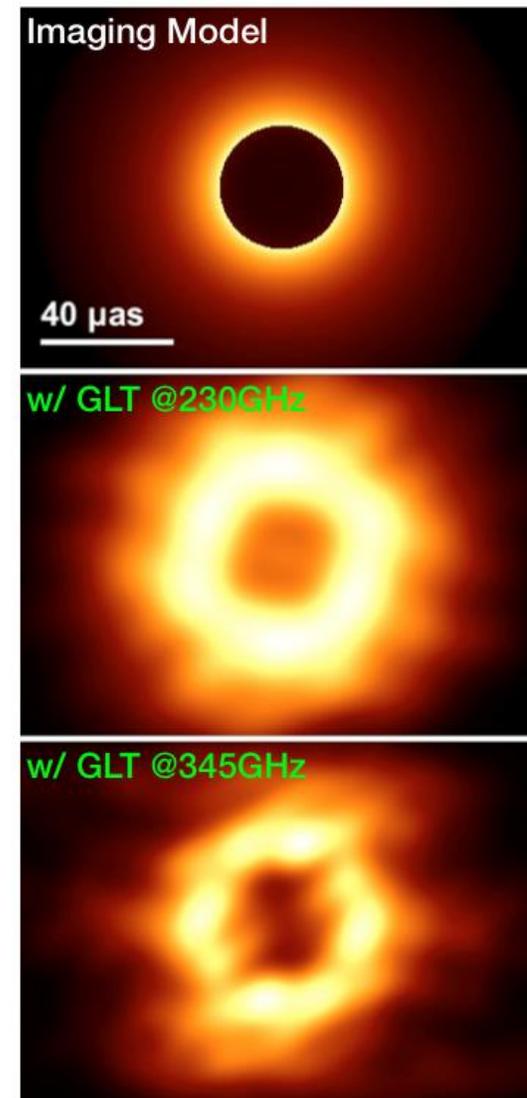
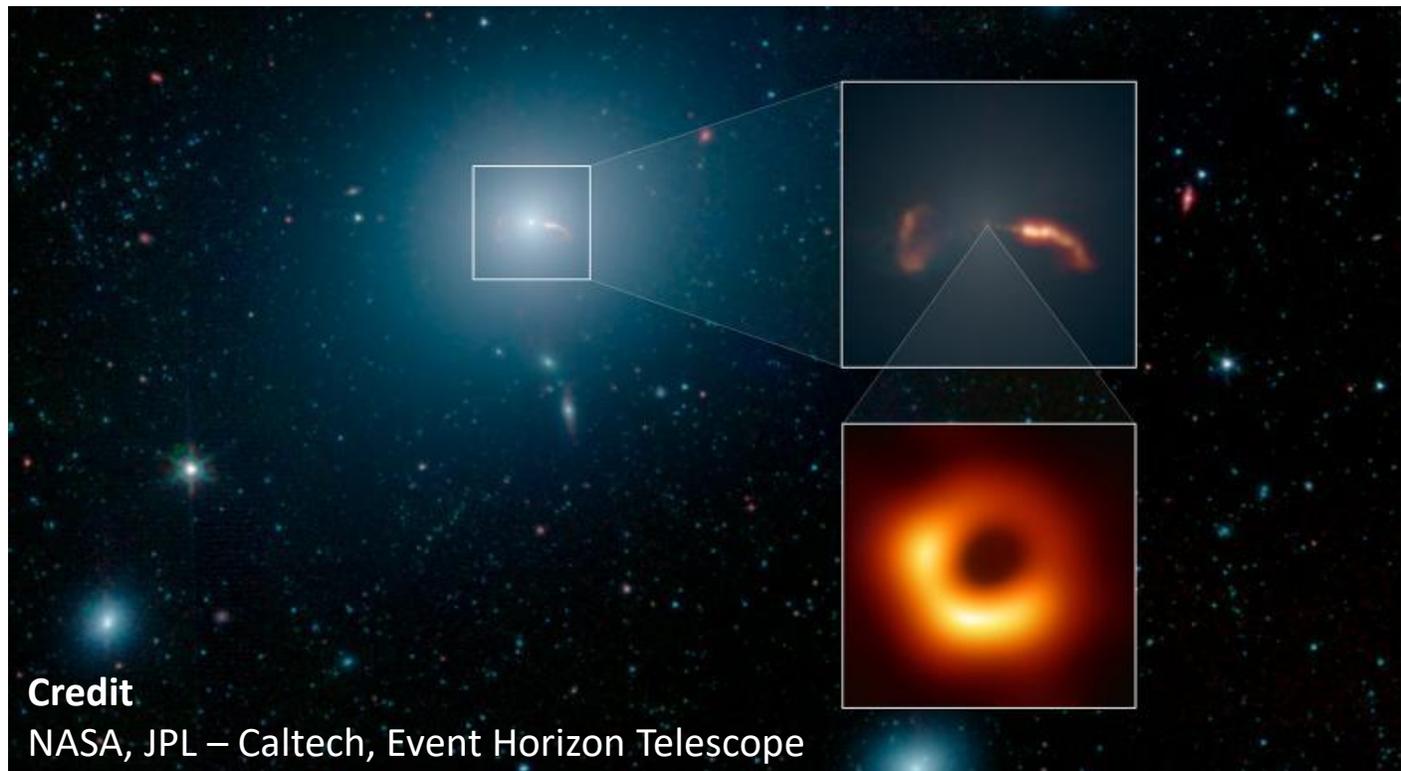
Satellite Herschel 2009 – 2013
 Hauteur : 7.5m, largeur : 4m,
 Poids : 3800 kg

Détection de la matière et processus de formation des étoiles dans le milieu interstellaire

Le milieu interstellaire qui constitue l'essentiel des galaxies, jusqu'à 99% des galaxies spirales comme la nôtre, abonde en gaz et poussières. Sa température varie entre 10 K pour les régions les plus froides et 200 K pour les régions les plus chaudes correspondant à une bande de fréquence de $f = k_B T / h \sim 200 \text{GHz} - 4 \text{THz}$.



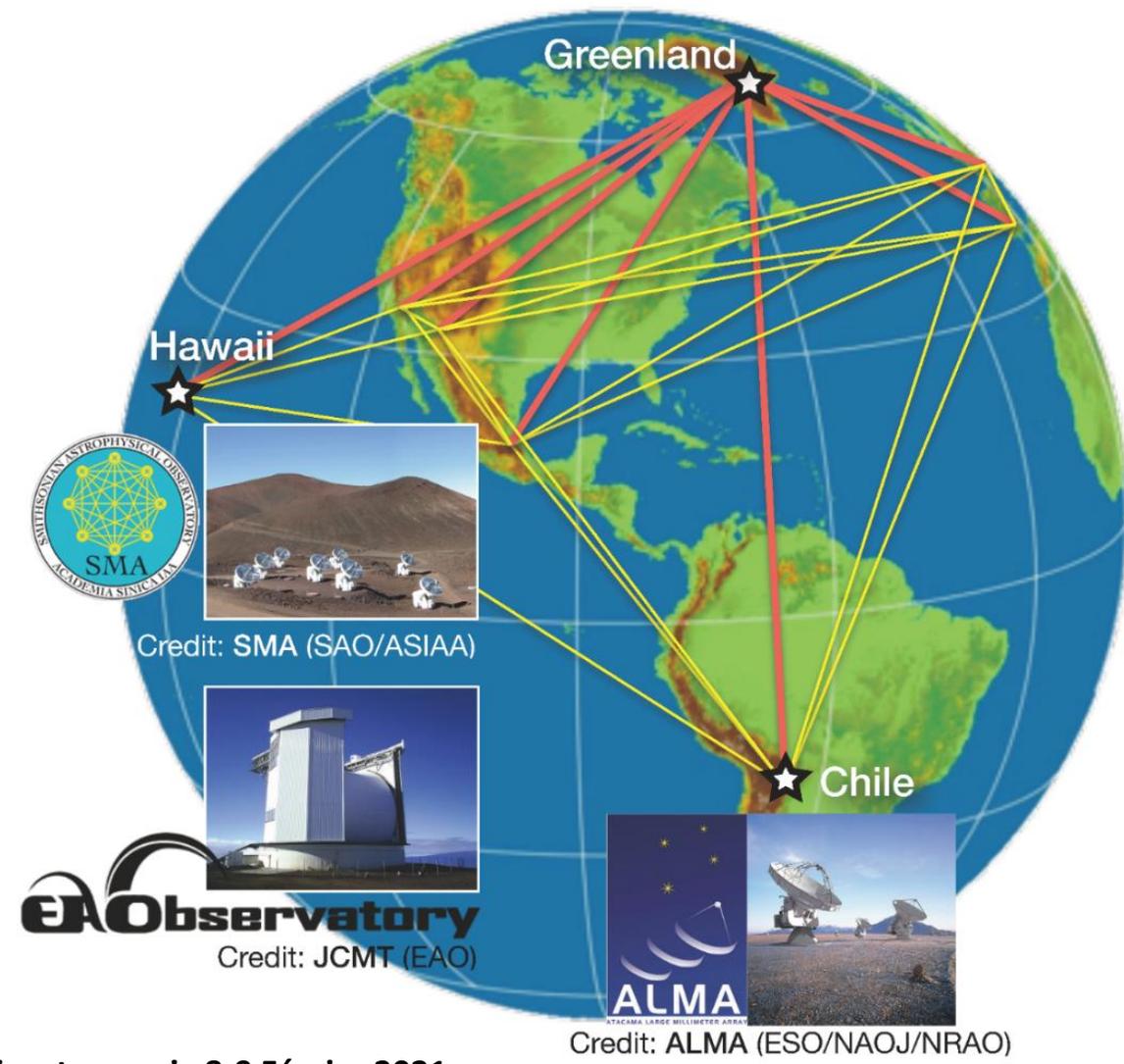
Spectres de fréquences des bandes 6a et 6b de l'instrument HIFI embarqué sur le satellite Herschel

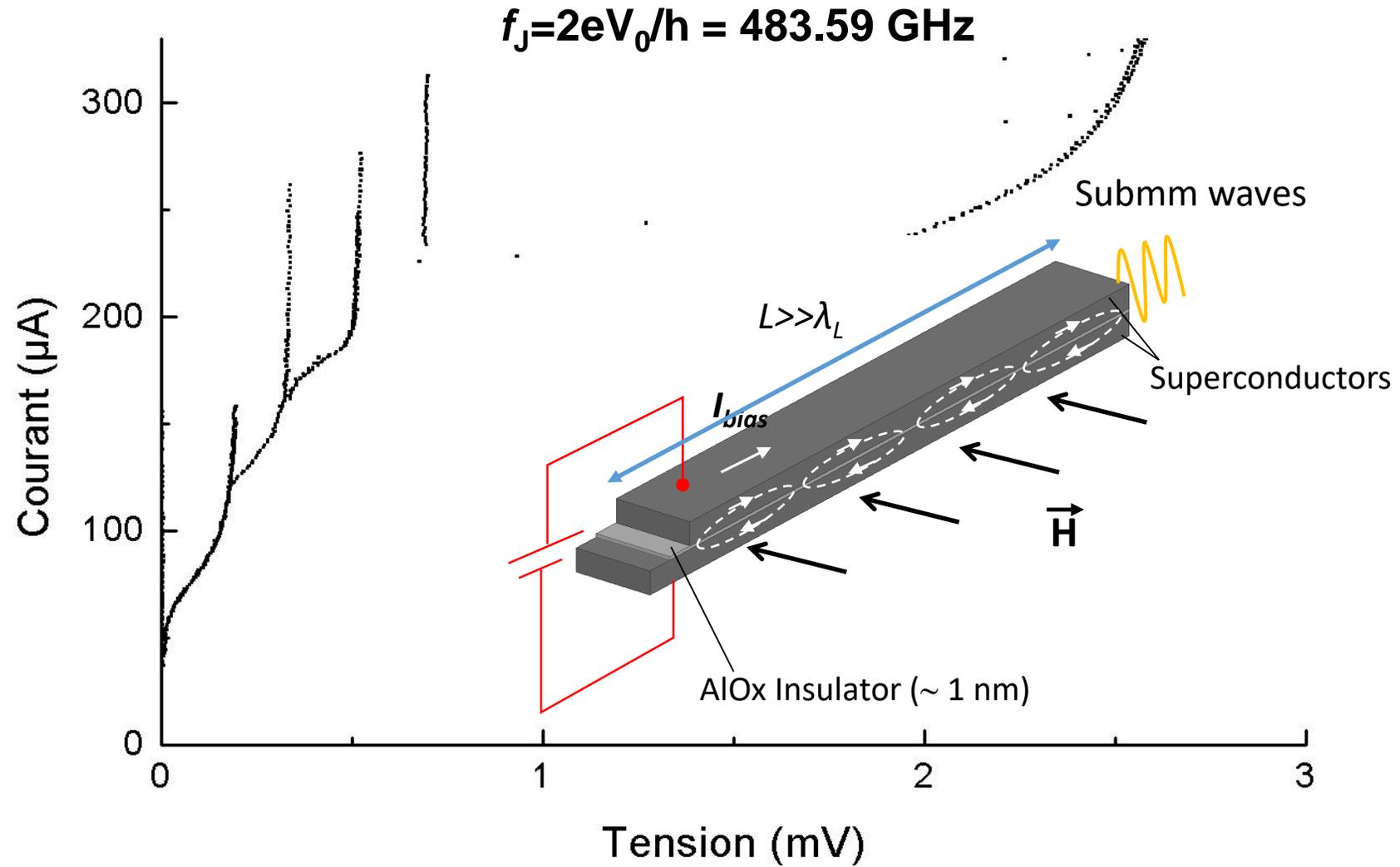


- Observation du premier trou noir super massif situé dans la galaxie M87 qui fait partie des galaxies de l'amas de la vierge, distante à environ 57 millions d'années-lumière de la terre
- L'image a, en réalité, été réalisée à une longueur d'onde de $\lambda=1,3$ mm (230 GHz) et $\lambda=0,896$ mm (345 GHz), contrairement aux photons optiques, les photons millimétriques peuvent voyager du centre de la galaxie jusqu'à la terre sans encombre. **La détection a été réalisée grâce à des récepteurs hétérodynes à base de mélangeurs de fréquences SIS.**

A cause de sa très faible taille, le trou noir ne peut être précisément « observé » y compris avec le plus grand télescope dont la résolution angulaire donnée par λ/D , où λ est la longueur d'onde du rayonnement observé et D est le diamètre de l'antenne du télescope, reste bien en deçà des exigences nécessaires pour une telle observation.

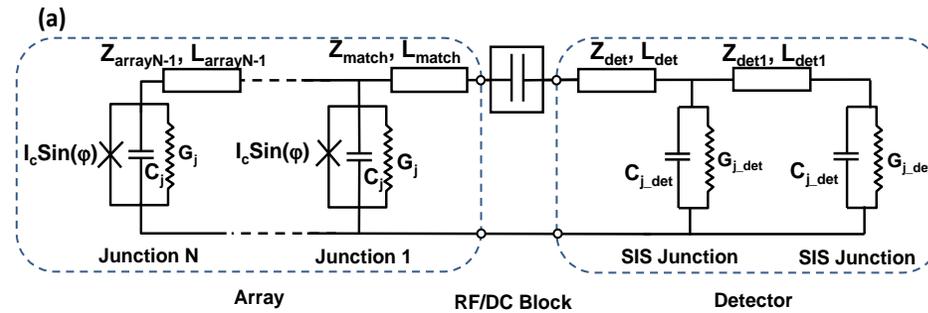
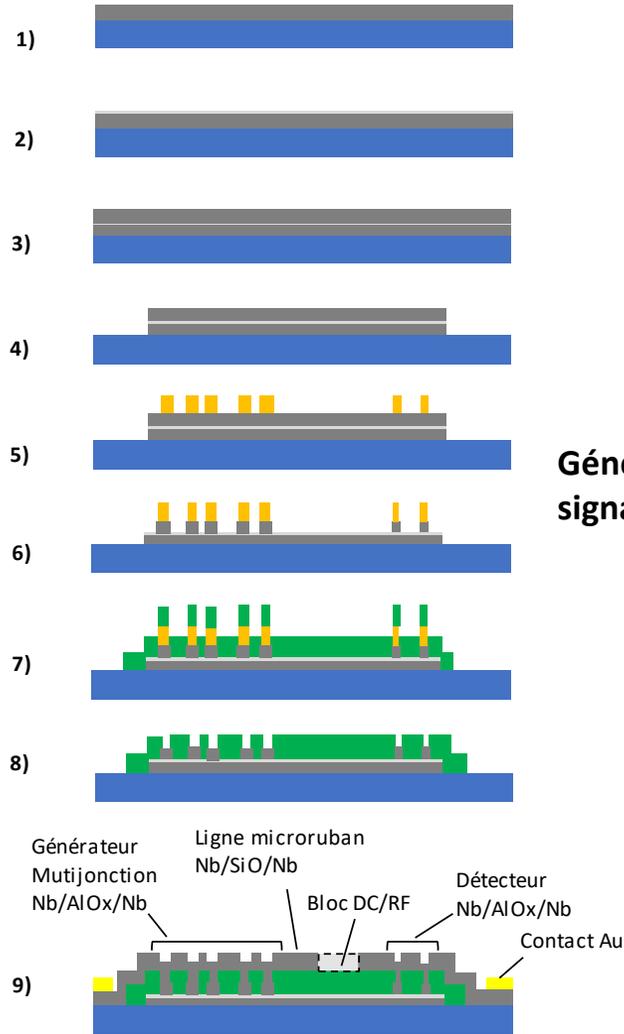
Afin d'atteindre la résolution requise, le consortium EHT a utilisé la technique du VLBI (Very Large Baseline Interferometer) qui fait intervenir plusieurs télescopes synchronisés. Grâce à la technique hétérodyne qui permet de resituer la phase – un paramètre crucial pour la synchronisation, le réseau de télescopes fonctionne alors comme un unique télescope dont la résolution angulaire est déterminée non pas par la taille d'une antenne, mais par la distance séparant les différents télescopes.



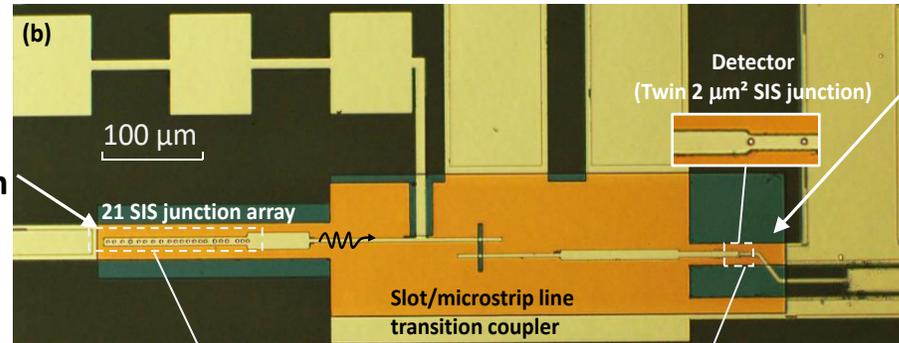


Réseau de jonctions SIS en parallèle

Détecteur et générateur submm intégrés

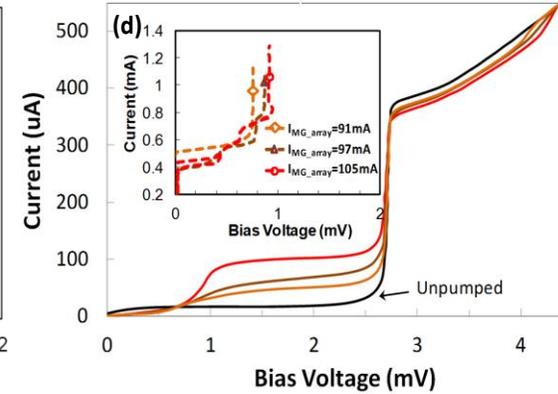
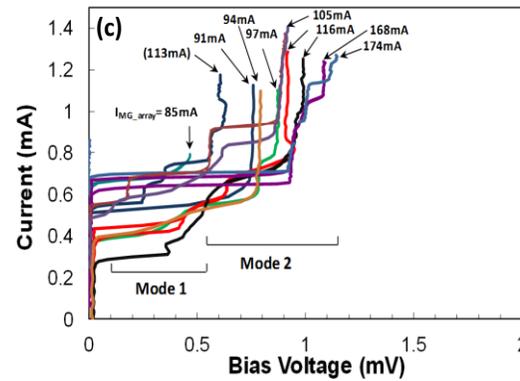


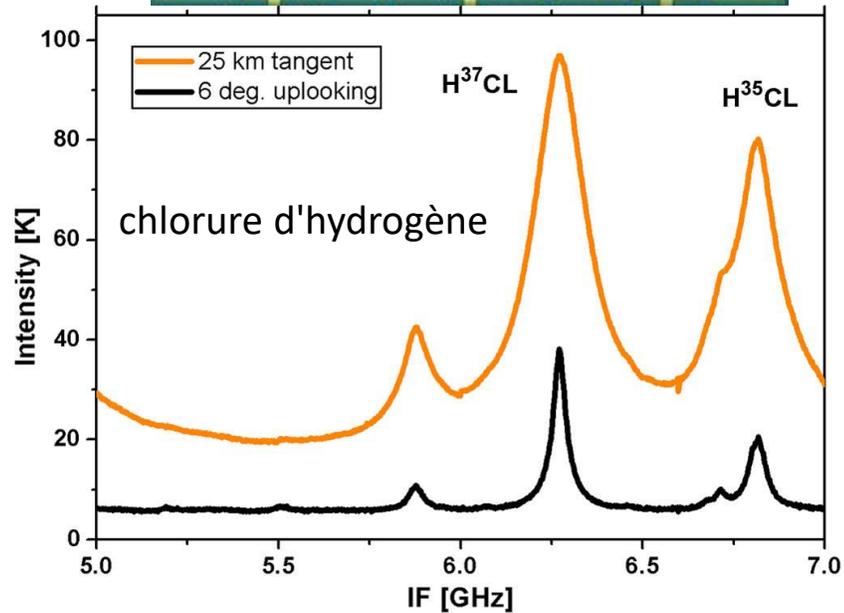
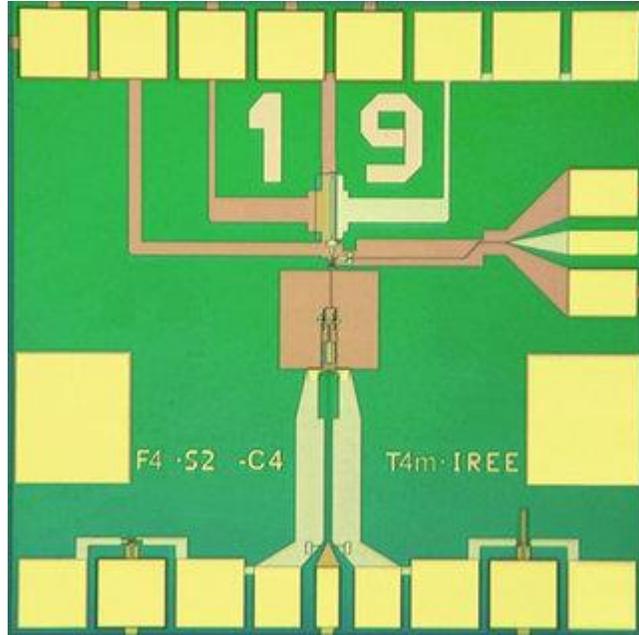
Générateur de signaux submm



Détecteur (bi-jonction SIS)

Récepteur hétérodyne intégré



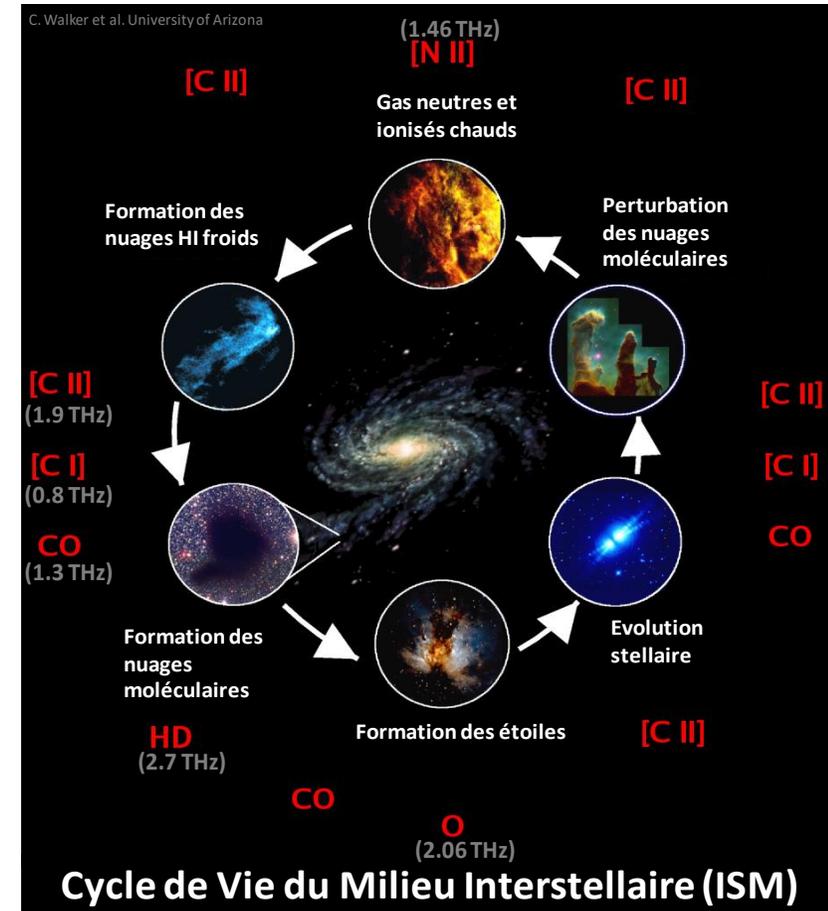
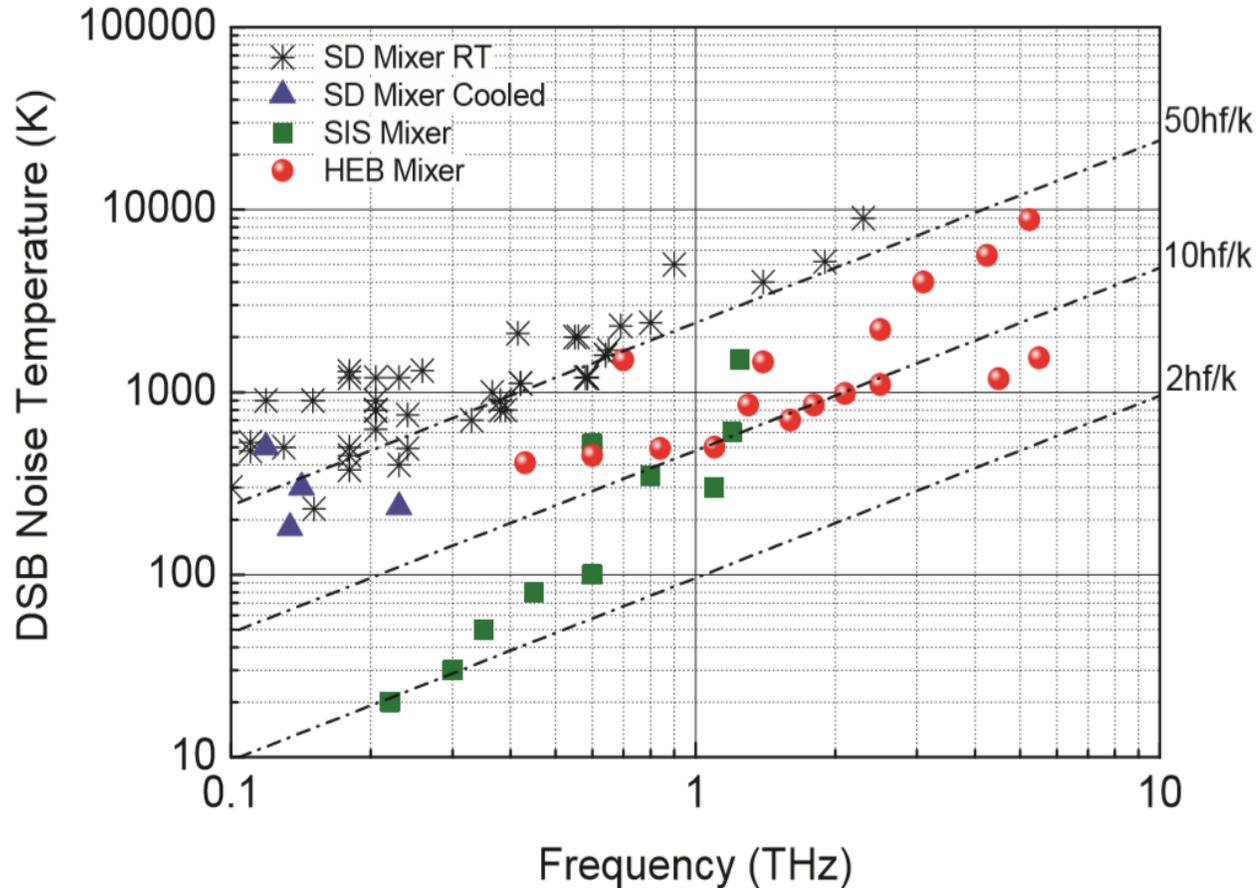


Premier démonstrateur d'un récepteur hétérodyne intégré SIS (500-600 GHz) : SRON en collaboration avec l'Université de Moscou grâce au projet ballon stratosphérique TELIS mars 2009.

V. Koshelets et al., 2009

II - Bolomètre à électrons chauds

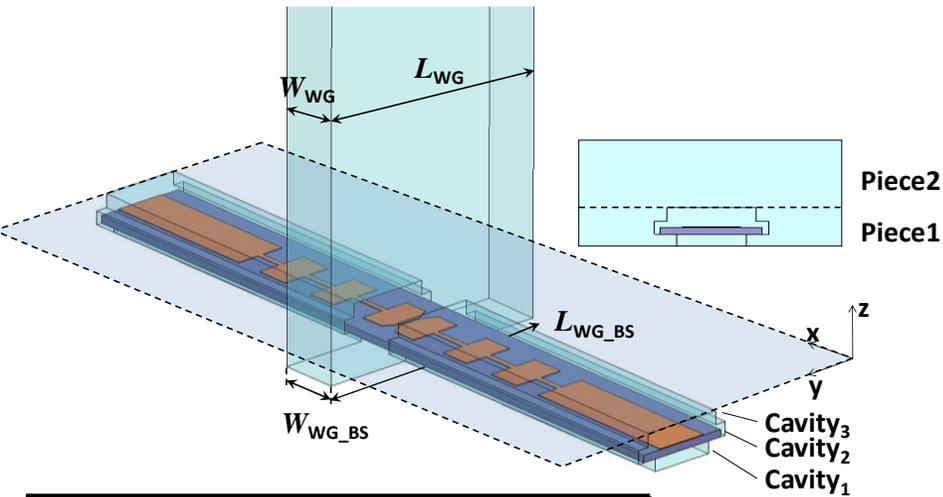
Pourquoi les bolomètre à électron chauds ?



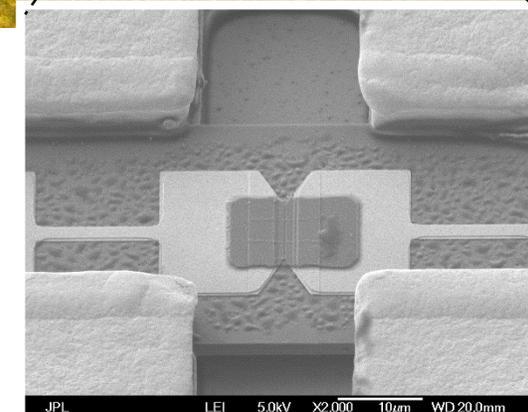
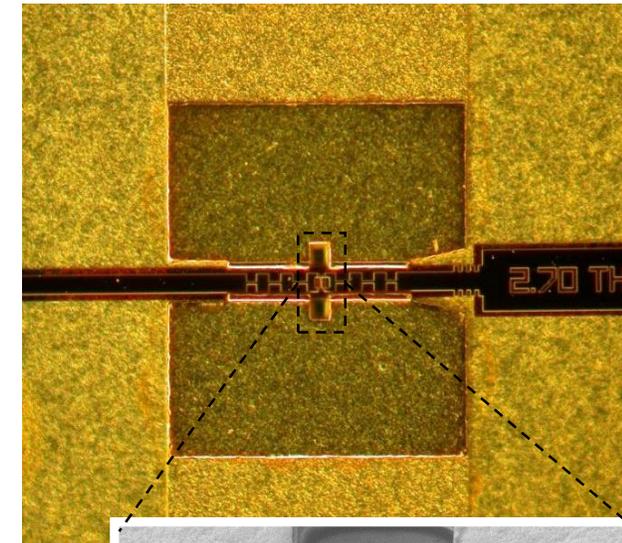
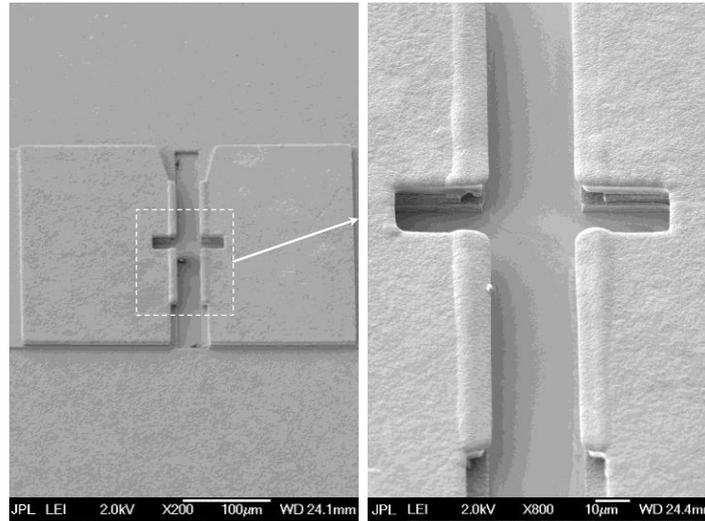
- Montée en fréquence des récepteurs hétérodynes pour détecter les transitions atomiques et moléculaires à 1.4 THz, 1.9 THz, 2 THz, 2.5 THz, 2.7 THz et 4.7 THz.
- Volonté de JPL - NASA de développer des récepteurs hétérodynes THz en technologie guide d'ondes pour ses propres missions : ballon stratosphérique ASTHROS

Bolomètre à électrons chauds - I

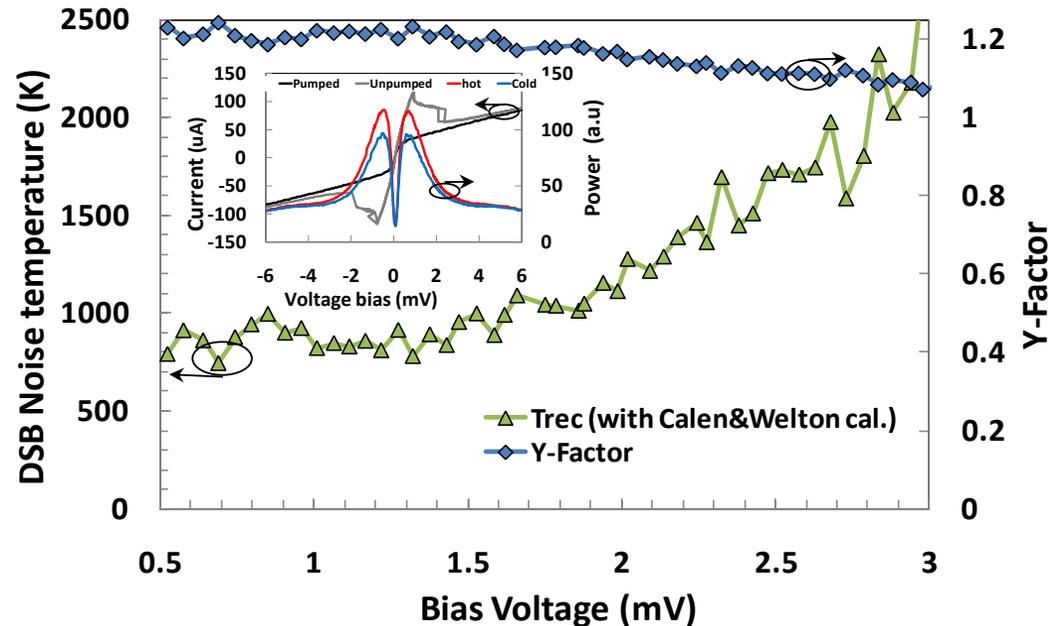
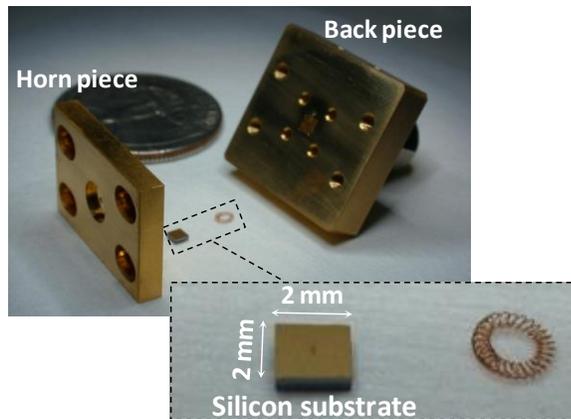
Premier mélangeur en technologie guide d'ondes à 2.7 THz. Contrat NASA.



Cavité	Profondeur (μm)	Largeur (μm)
1	5	26
2	3.5	40
3	5	26

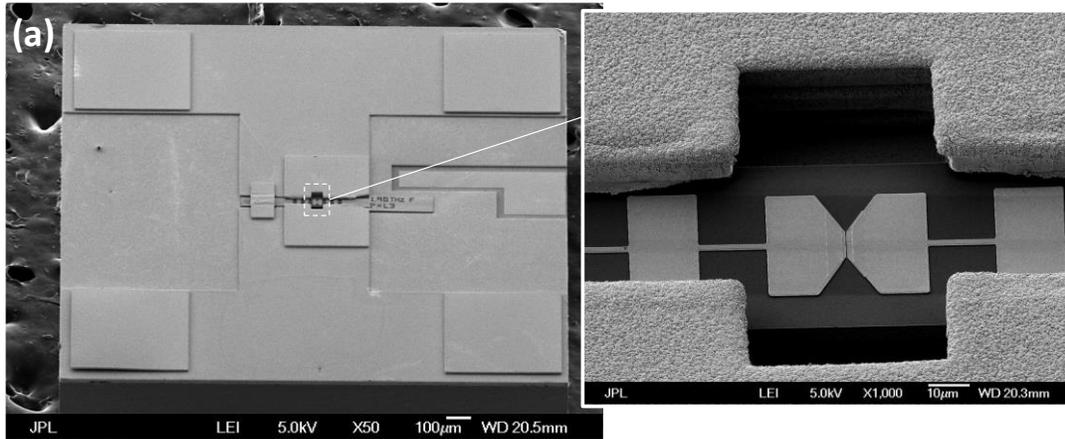


- Réalisé au Micro Device Laboratory MDL JPL par Jeffrey Stern.

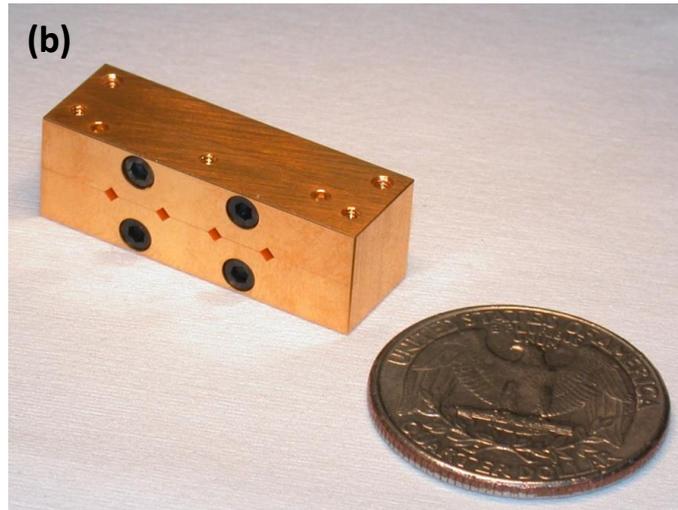


- NbN
- T=4.2K

Développement de récepteurs hétérodynes multipixels THz (Contrat JPL – NASA)



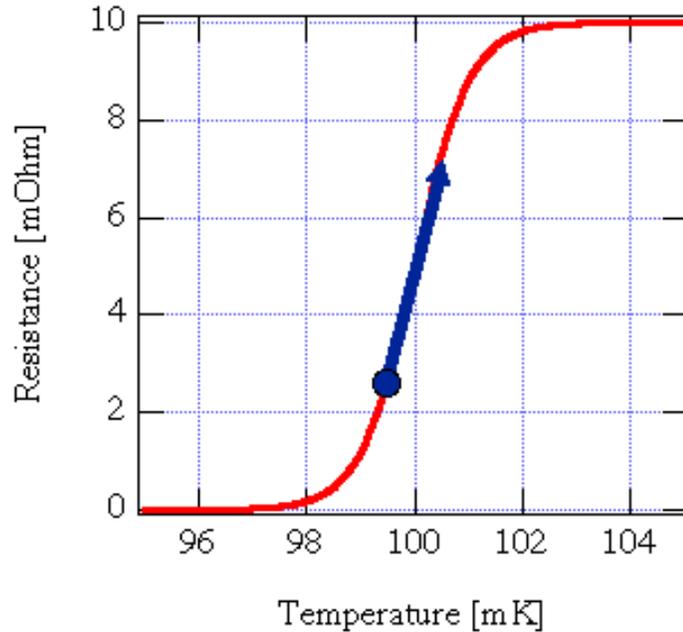
- Mélangeur de fréquences 1.9 THz



- Récepteur hétérodyne 4x1-pixel THz (1.9 THz)
- Sensibilité : températures équivalentes de bruit ~ 800 K.
- Projet en cours : ASTHROS (NASA), récepteurs hétérodynes 4 pixels (1.9 et 2.6 THz) qui seront embarqués sur un ballon stratosphérique à longue durée (Antarctique, prévu en 2023).

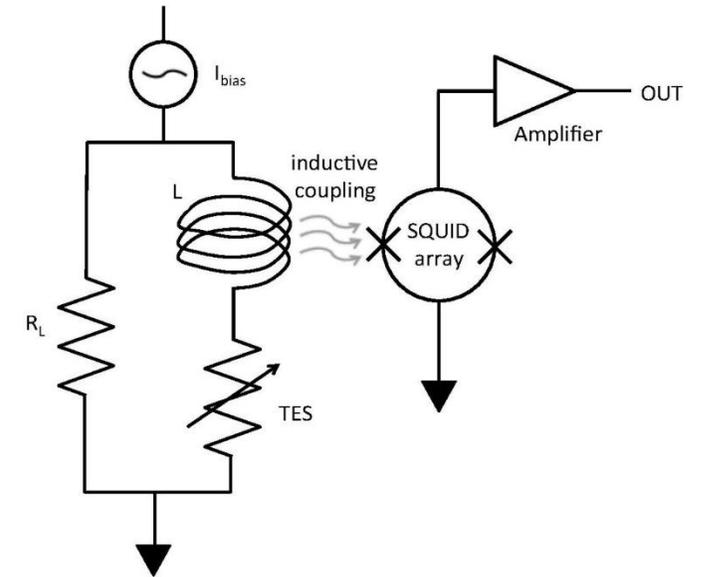
Détection directe

- 1. Transition Edge Sensor (TES)**
- 2. Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)**

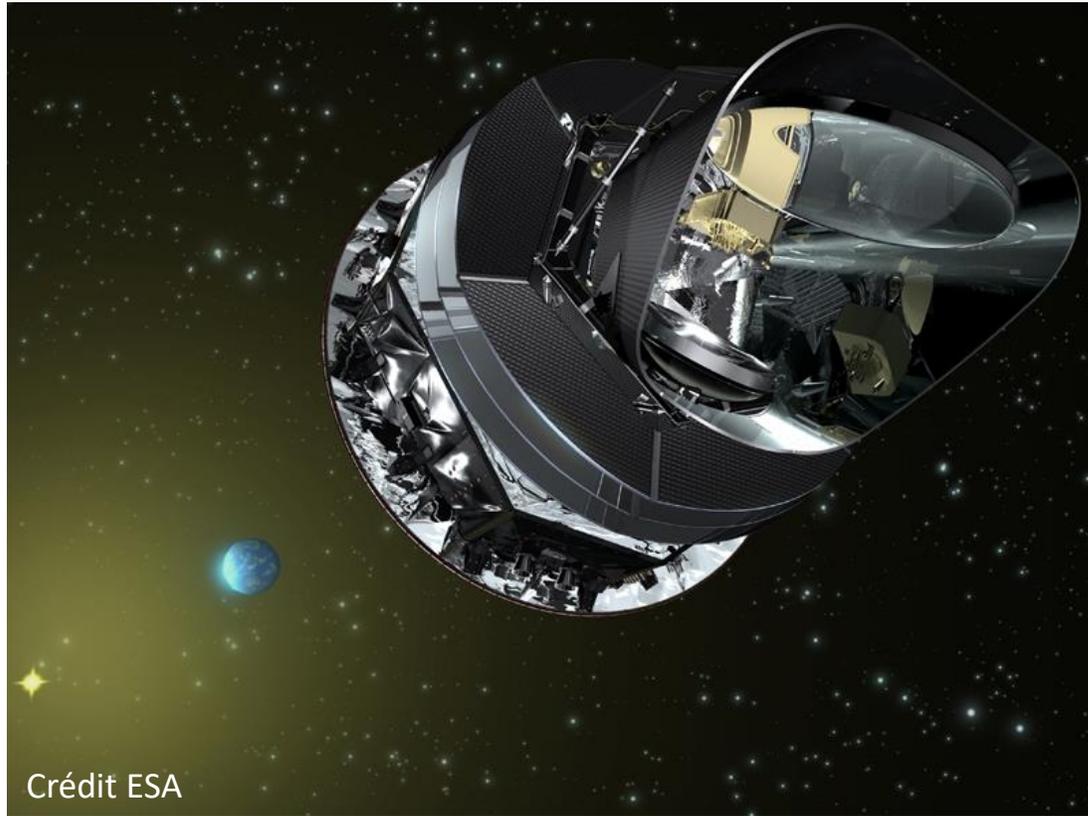


- Un TES est un thermomètre constitué d'un film supraconducteur fonctionnant à proximité de sa température de transition T_c .

Lors de sa transition de supraconducteur à métal normal, une très petite variation de température provoque une grande variation de la résistance.



- Système de lecture à base de SQUID d'un détecteur TES.

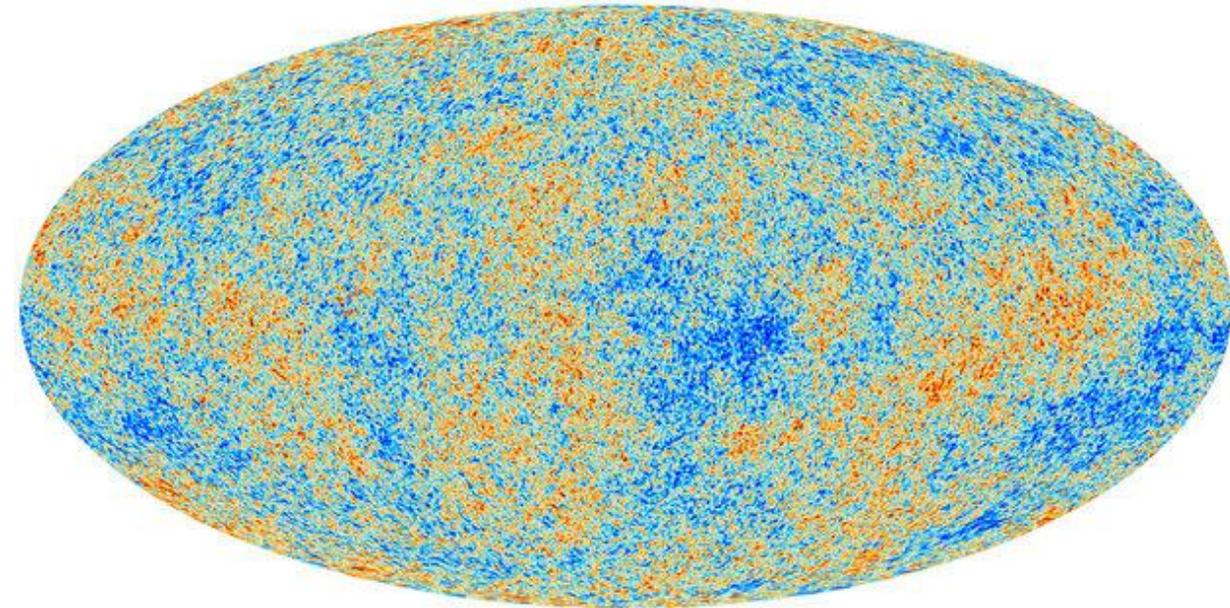


Crédit ESA

Les infimes fluctuations de la température du rayonnement fossile observées par le satellite Planck. Les zones bleues sont légèrement plus froides que la moyenne et indiquent des régions plus denses qui formeront plus tard les structures que nous observons aujourd'hui dans l'Univers : amas de galaxies, galaxies et étoiles.

Les TES peuvent être utilisés pour traquer le rayonnement fossile appelé CMB (Cosmic Microwave background), né 380 000 ans après le big Bang.

Exemple : HFI du satellite Planck a utilisé 54 bolomètres et opérait dans des bandes allant de 100 GHz à 850 GHz. Les bolomètres ont été refroidis à environ 0,1 K, en dessous de 2,725 K qui est la température moyenne du CMB.

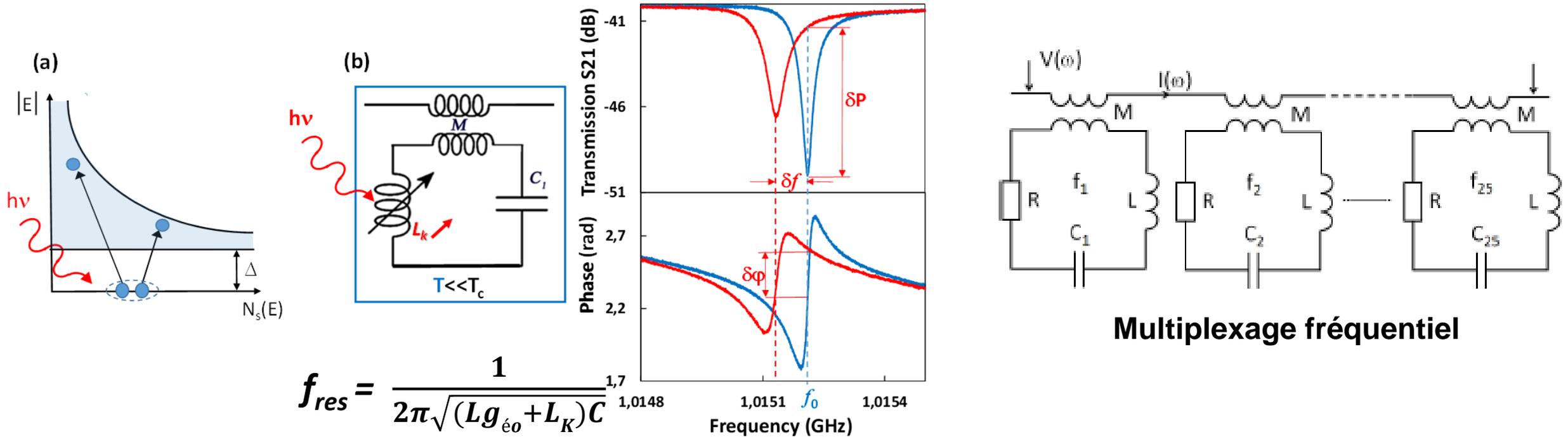


Crédit : ESA/Planck Collaboration

40

Technologie proposée en 2003 par Caltech et JPL :

- Multiplexage fréquentiel simple : une seule ligne de lecture suffit à lire des centaines, voire des milliers, de pixels Important avantage sur les détecteurs bolométriques TES.
- Capable de fonctionner du mm jusqu'au rayons X.



Multiplexage fréquentiel

LEKIDs à capacité à plaques parallèles pleines

60nm TiN 4.6 K bottom electrode

100 nm Nb CPW

(1)

(2)

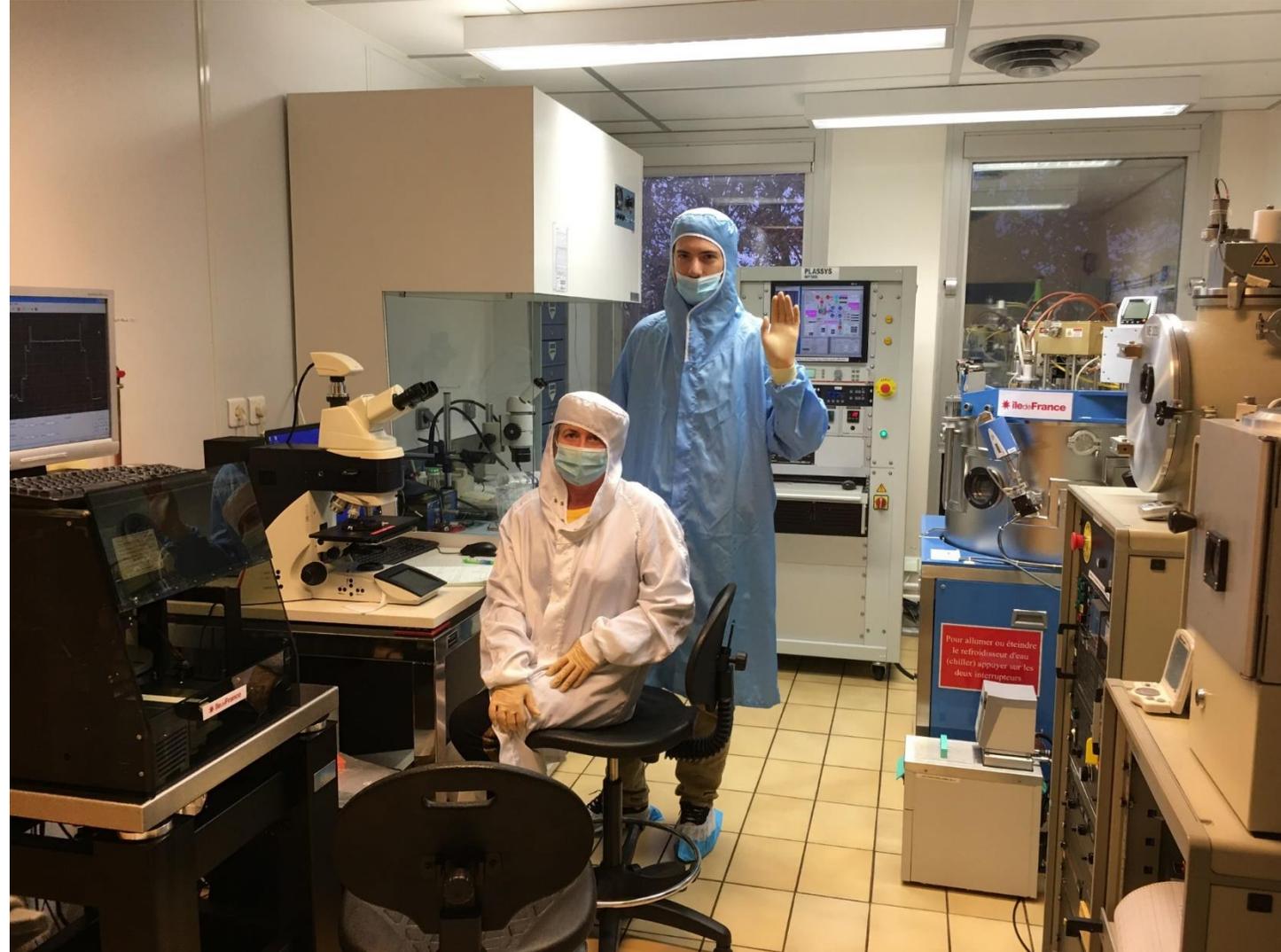
(3)

(4)

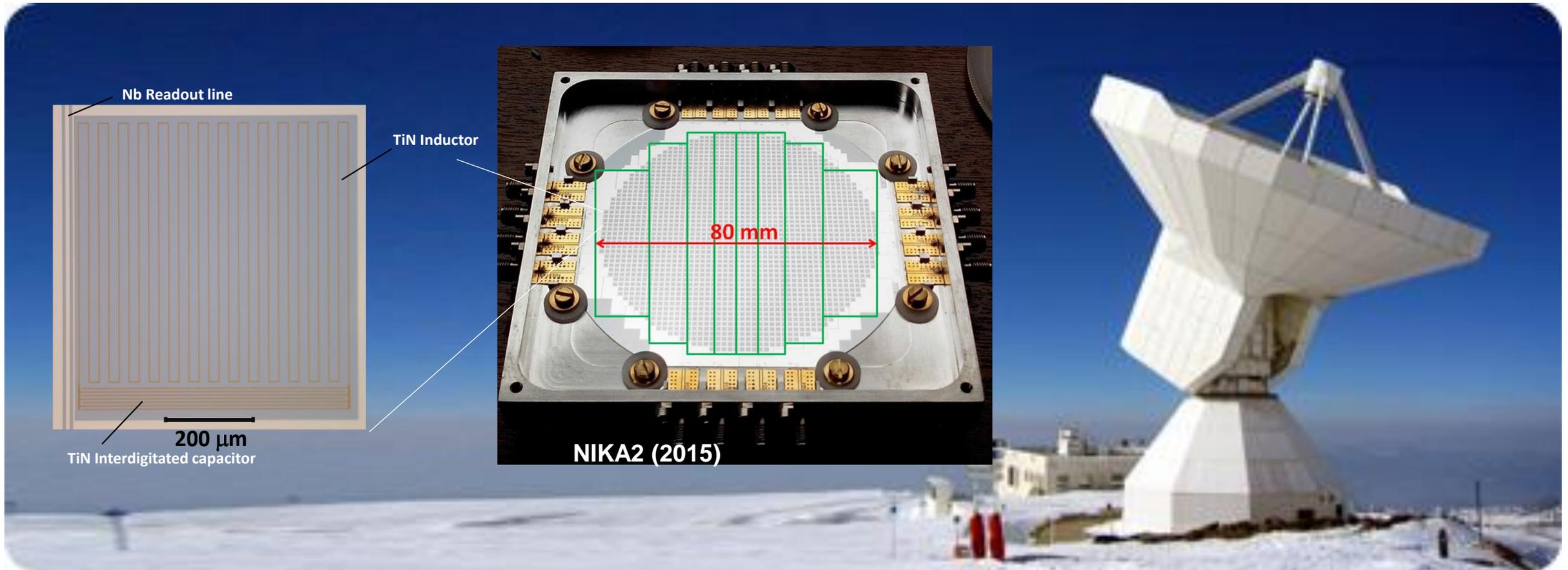
100nm Nb top electrode

22nm Al₂O₃ deposited by ALD
(Atomic Layer Deposition – ENS
Paris)

S. Beldi, thèse 2019



- Camera NIKA2 (Néel-IRAM Kid Array) millimétrique installée sur le télescope de l'IRAM, 1932 pixels :
Cosmologie, milieu interstellaire, etc.



Merci pour votre attention