

Développement de récepteurs hétérodynes ultra sensibles dans le domaine THz

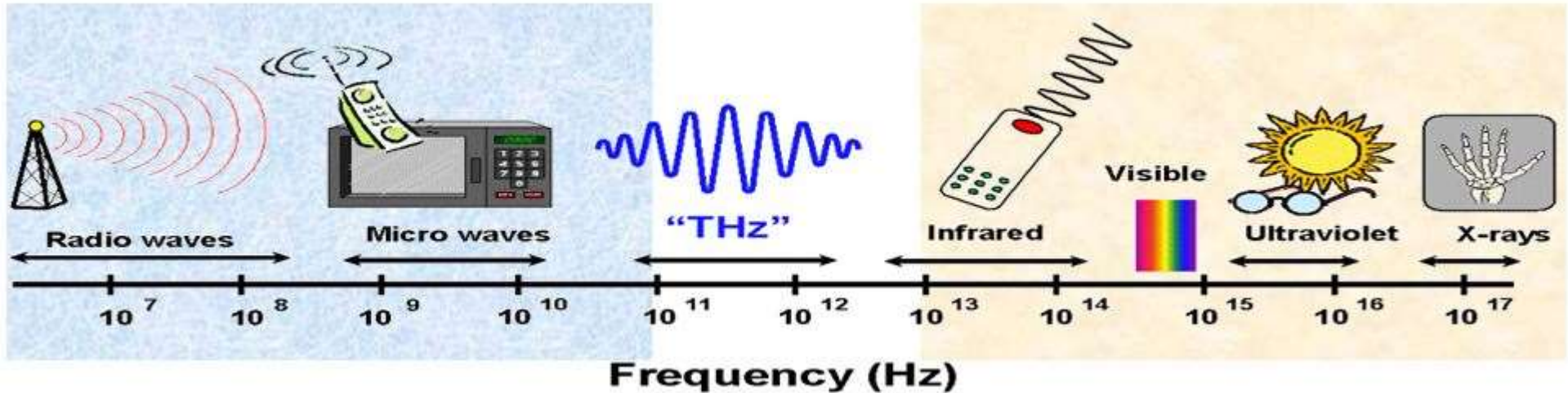
Y. Delorme¹, F. Joint^{1,2}, T. Vacelet¹, M. Wiedner¹, Y. Jin², R. Colombelli²

¹LERMA, Observatoire de Paris

²Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies

THz et Détection Hétérodyne

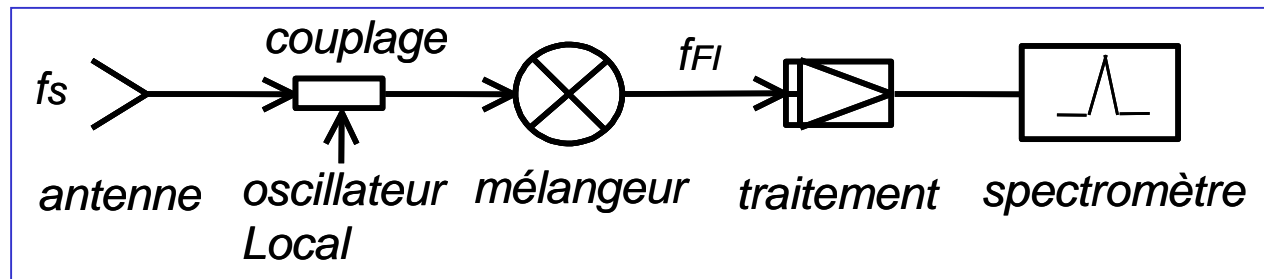
○ Domaine sub-mm/THz : 100 GHz ~ 10 THz (3mm ~ 30μm)

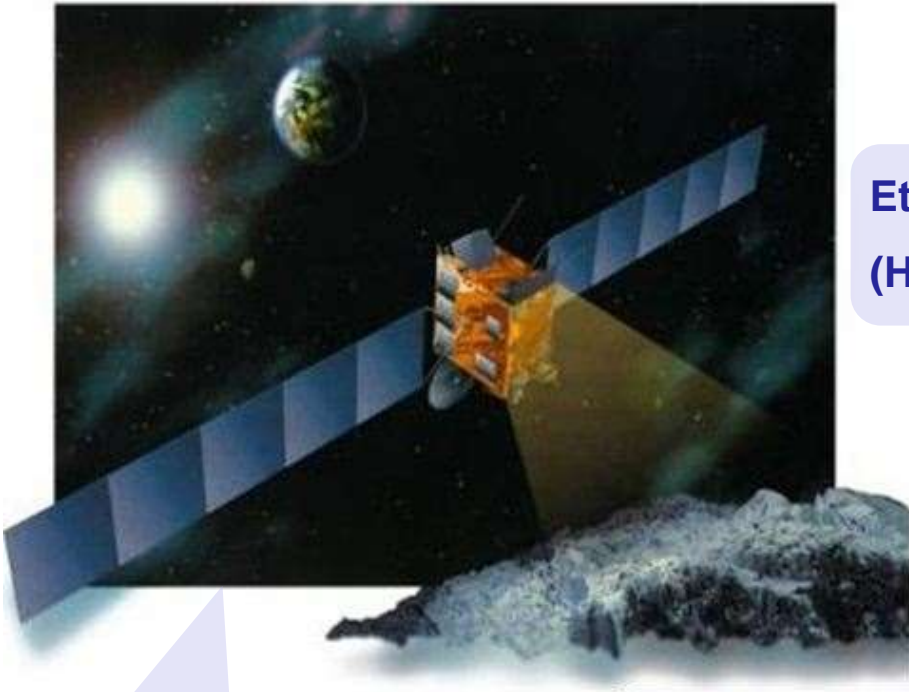


○ Détection hétérodyne

⇒ La meilleure résolution spectrale

⇒ Haute sensibilité





Etude des planètes et
la comète (Churyumov-
Gerasimenko)
(Rosetta - MIRO)

Etude de l'Univers
(Herschel - HIFI)



Etude de la Terre
(EOS - MLS)

Technologie du mélangeur THz

○ Semi-conducteur

⇒ Diode Schottky

○ Supraconducteur

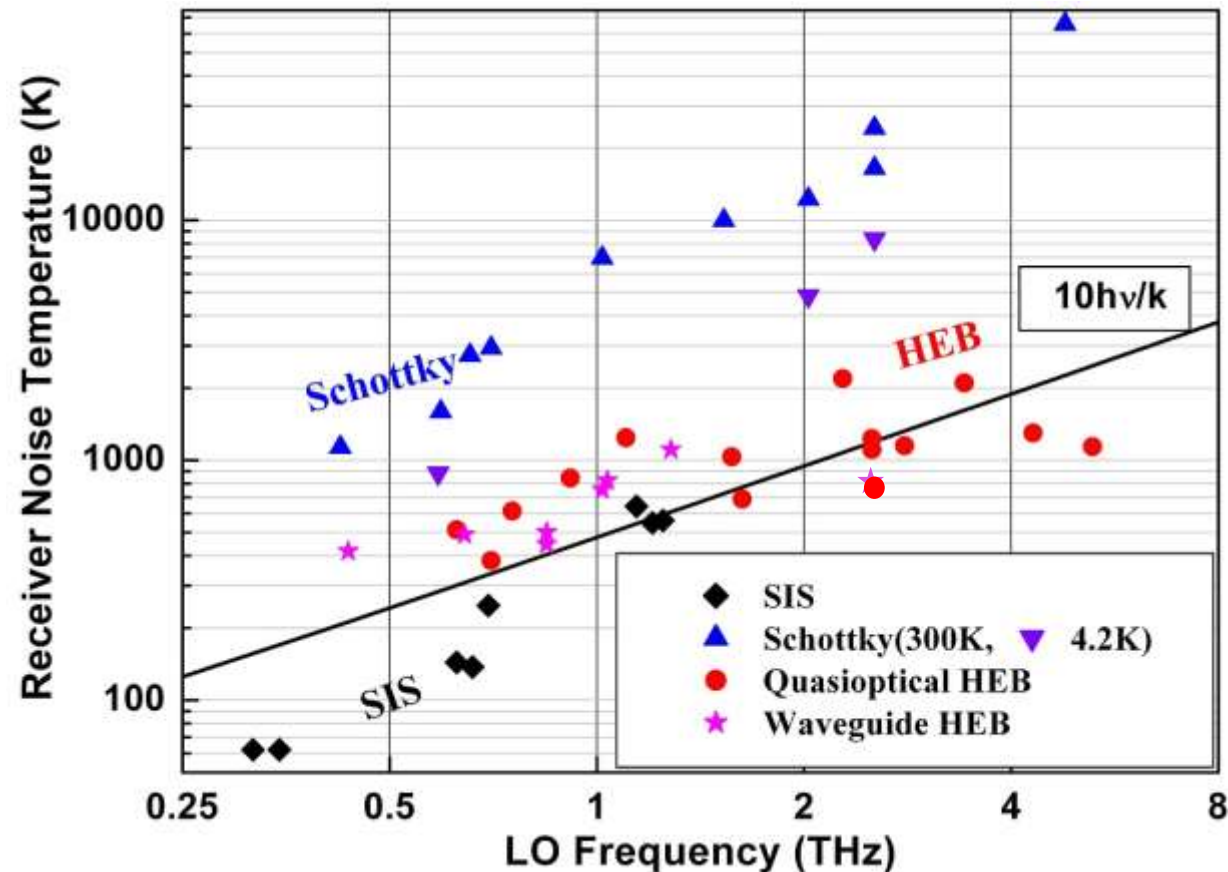
⇒ Jonction SIS
(Superconductor-Insulator-Superconductor)

⇒ Bolomètre à électrons chauds
(Hot Electrons Bolometer)

○ Couplage RF

⇒ Guide d'onde

⇒ Quasi-optique



Développement- moyens et compétences

○ Particularités

- ⇒ miniaturisation des composants
- ⇒ propriétés des matériaux, effets du second ordre non négligeables

○ Conception

- ⇒ logiciels CAO commerciaux (ADS, CST-Microwave-studio, HFSS, FEKO ...)
- ⇒ programmes spécifiques
- ⇒ supraconducteurs, mécanique quantique, électromagnétique, quasi-optique

○ Réalisation

- ⇒ micro-électronique, micro-mécanique

○ Caractérisation

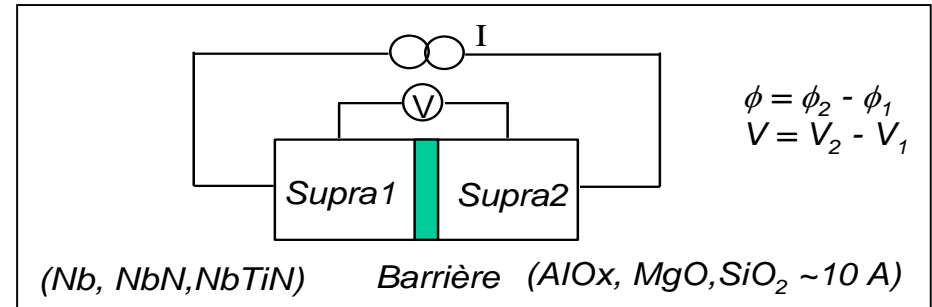
- ⇒ hautes fréquences, faible bruit, cryogénie

Mélangeur à supraconducteur - SIS

SIS : Superconductor Isolator Superconductor

○ Principe

- ⇒ Structure tri-couche
- ⇒ Paramètres caractéristiques
- ⇒ Effet Josephson

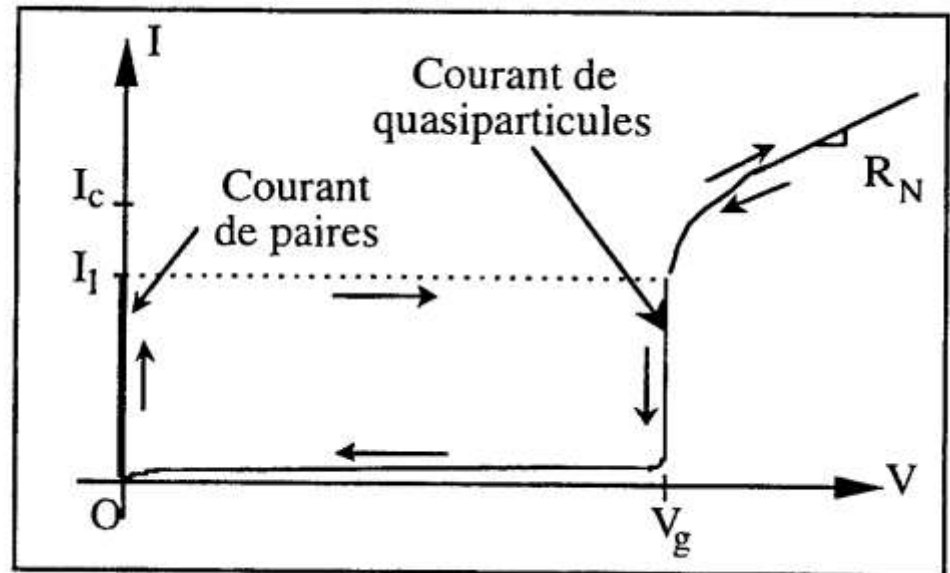


○ Avantage

- ⇒ bruit ~ bruit quantique ($\hbar\nu/k$)
- ⇒ puissance OL nécessaire : faible
- ⇒ possibilité : oscillateur intégré

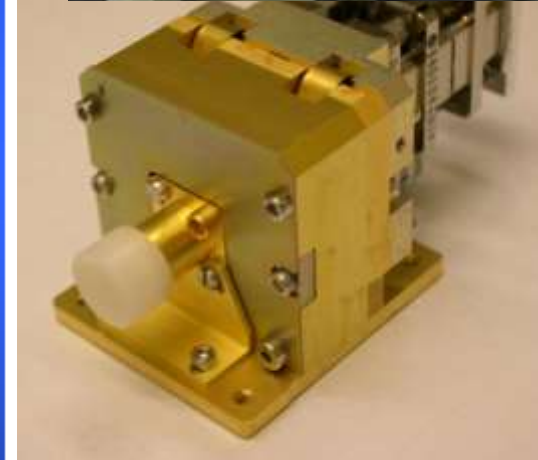
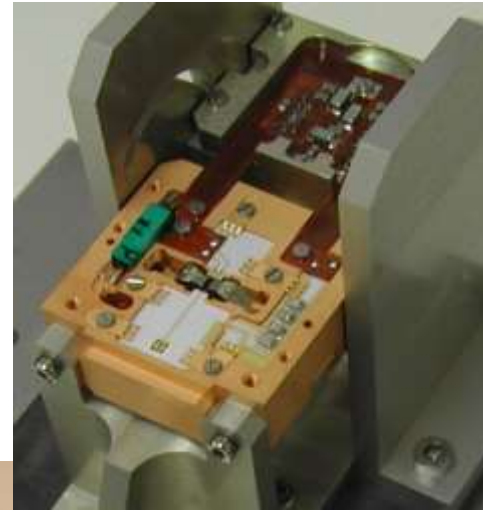
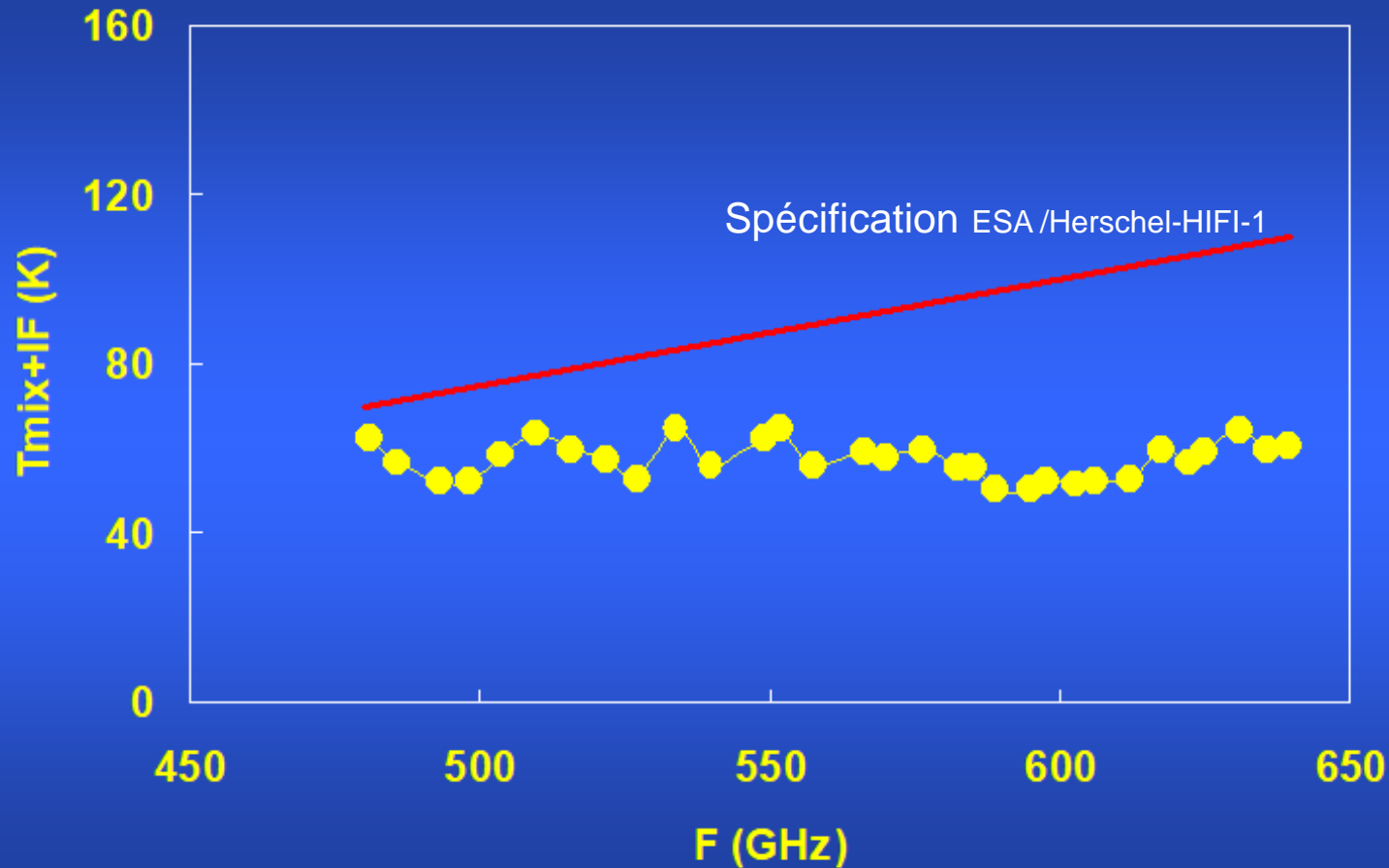
○ Limitation

- ⇒ fréquence de gap (Nb : 700 GHz)
- ⇒ effet capacitif



Mélangeur SIS – Haute sensibilité

Température de bruit proche de bruit quantique



Mélangeur SIS pour Herschel-HIFI-1

Température de fonctionnement : 2K

Mélangeur à supraconducteur - HEB

HEB : Hot Electron Bolometer

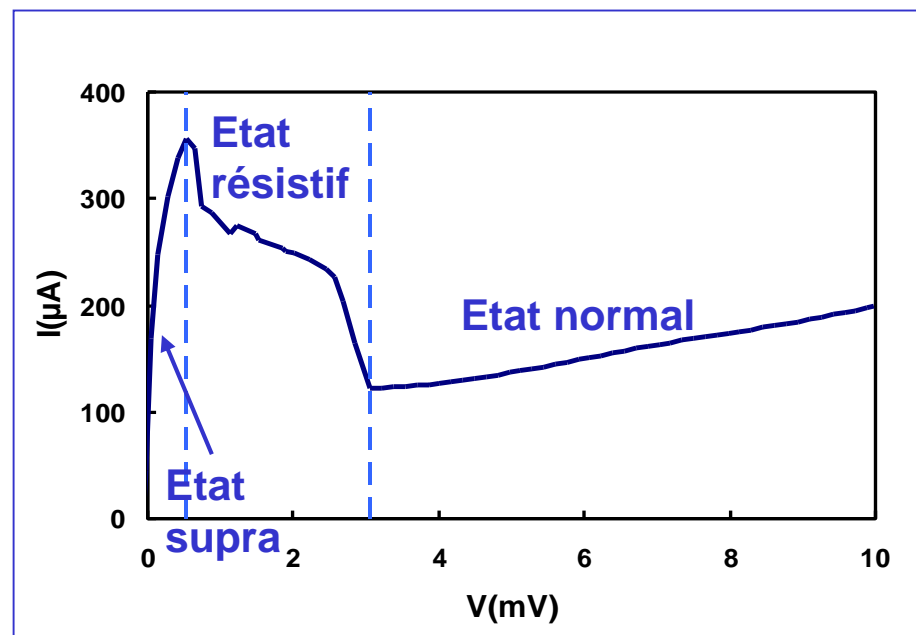
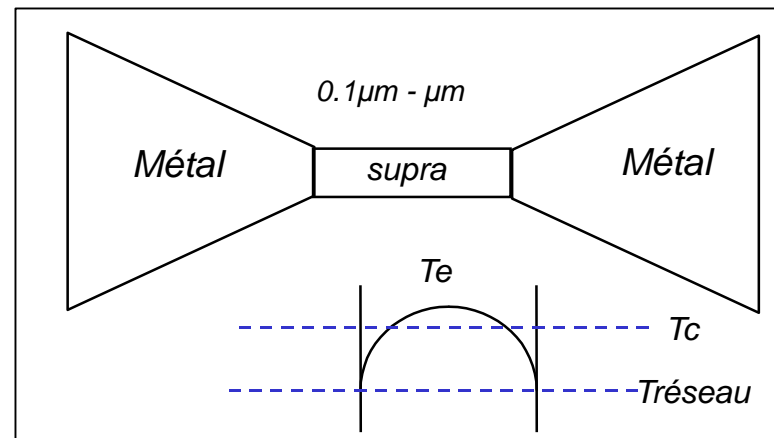
○ Principe et structure

- ⇒ Micro-pont à supraconducteur
- ⇒ Formation du « hot spot »
- ⇒ Matériaux supra : NbN, NbTiN ...

○ Avantage :

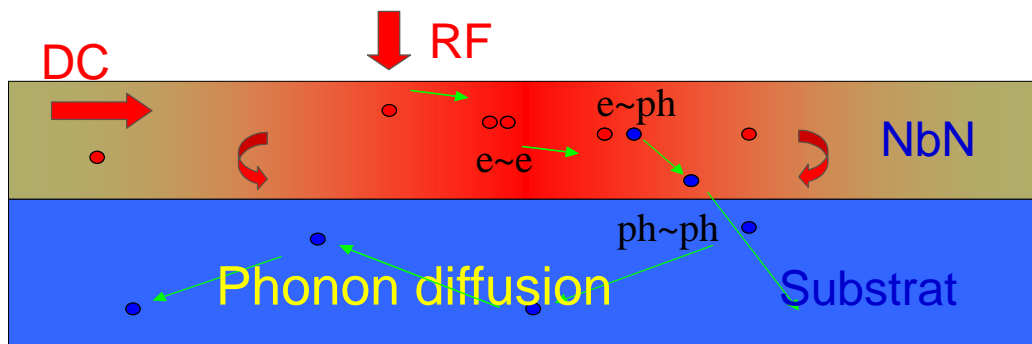
- ⇒ Faible bruit
- ⇒ Faible puissance OL nécessaire
- ⇒ Pas de limite de fréquence
- ⇒ Impédance réelle

Le plus sensible et le plus prometteur au delà du THz

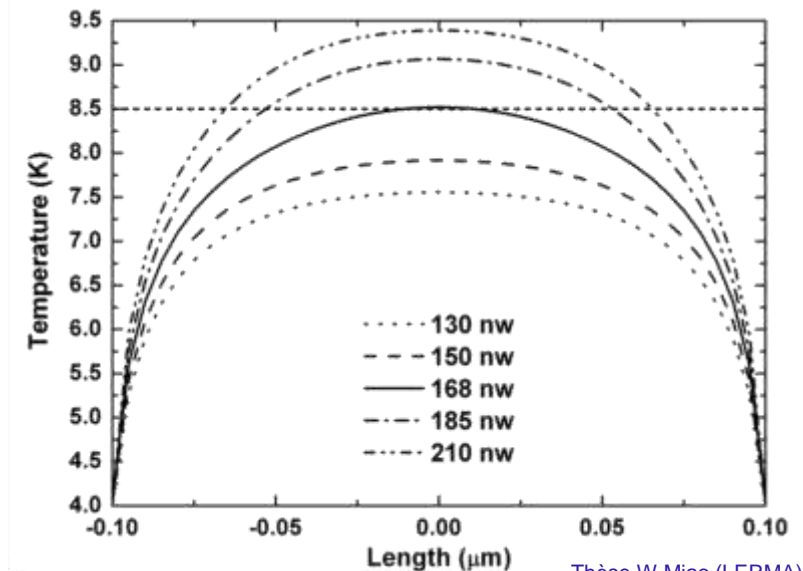
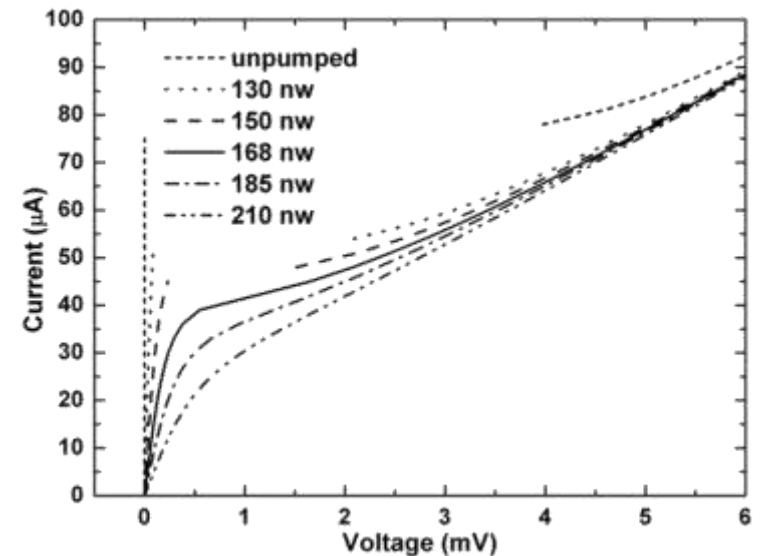


○ Modèle « hot spot »

- ⇒ Résoudre les équations d'échange thermique entre: électrons-phonons, film-substrat
- ⇒ Permettre de calculer :
 - Le profil de la température d'électrons
 - La caractéristique IV du HEB
 - La performance en hétérodyne

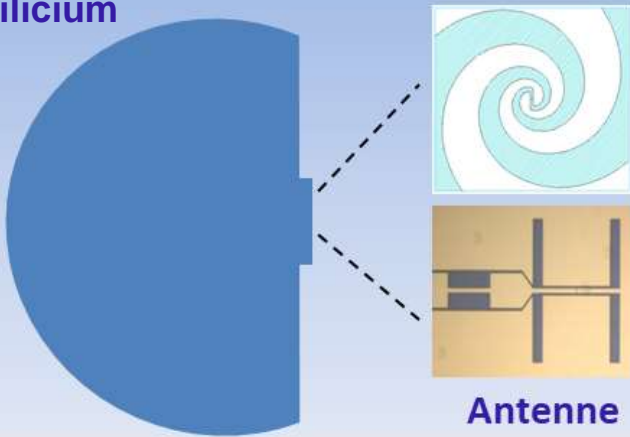


Echange thermique dans un HEB



Conception Quasi-optique

Lentille au Silicium



Antenne

Principaux paramètres :

Impédance : accord antenne / HEB
Diagramme de rayonnement

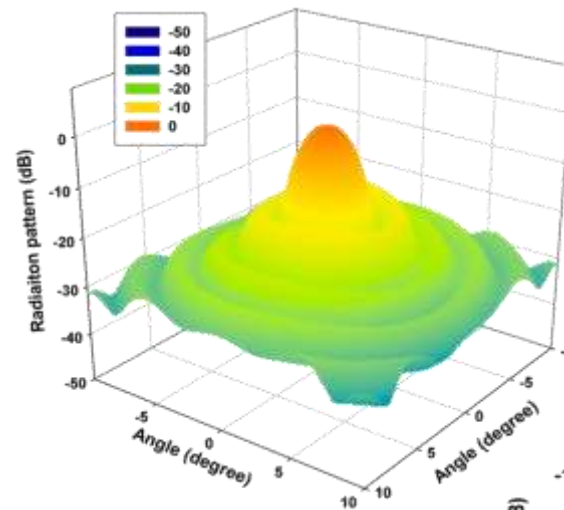
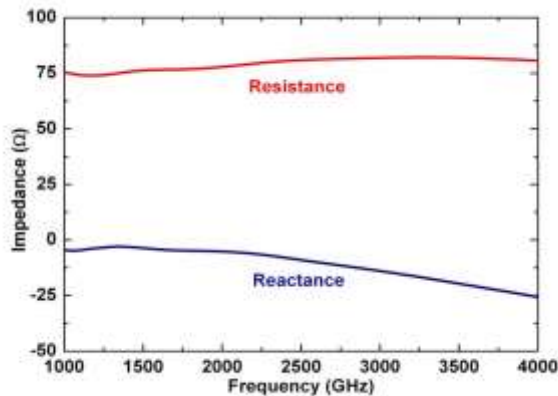
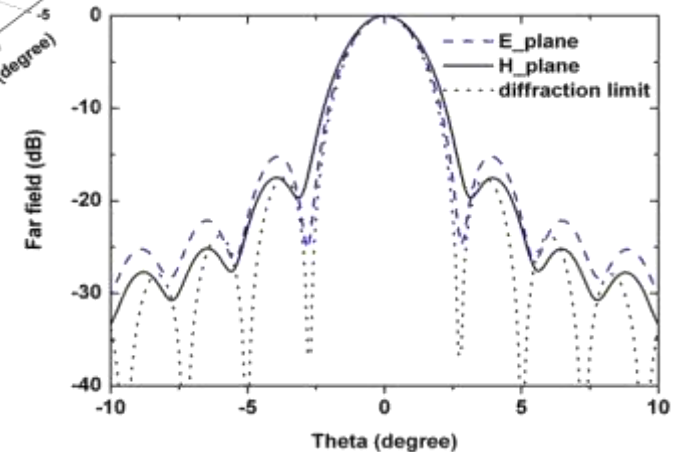


Diagramme de rayonnement

Impédance de l'antenne sur lentille (Antenne spirale)

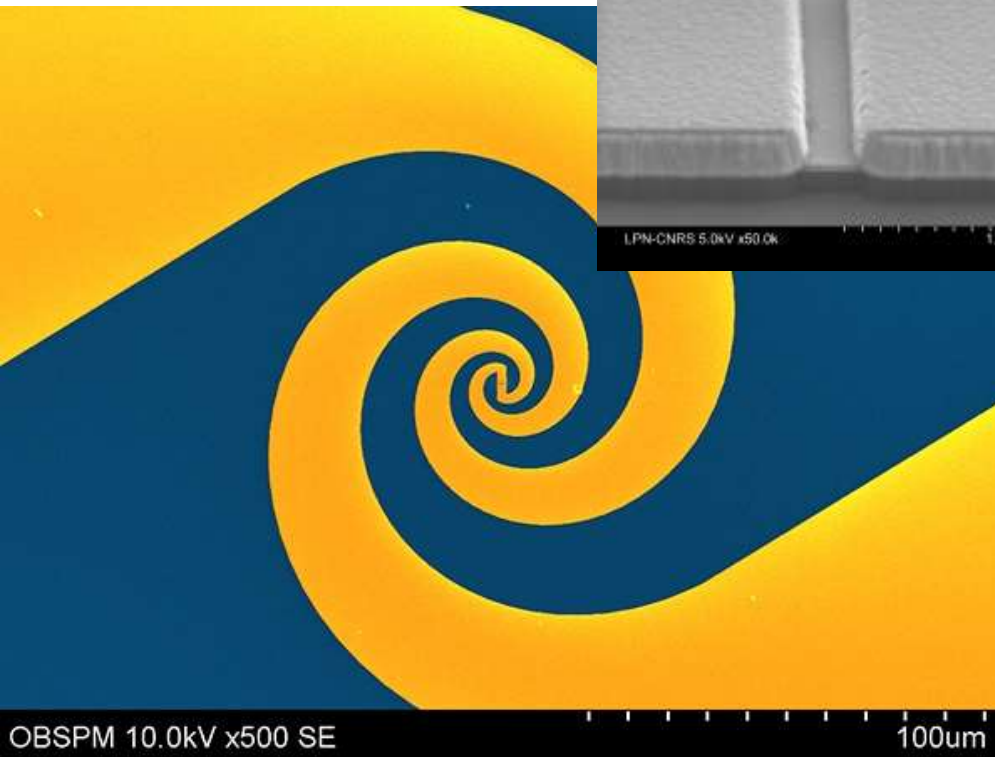
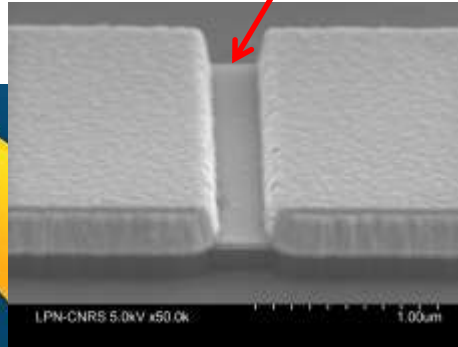


Calcul en combinant :
HFSS / CST
Optique géométrique
Optique physique

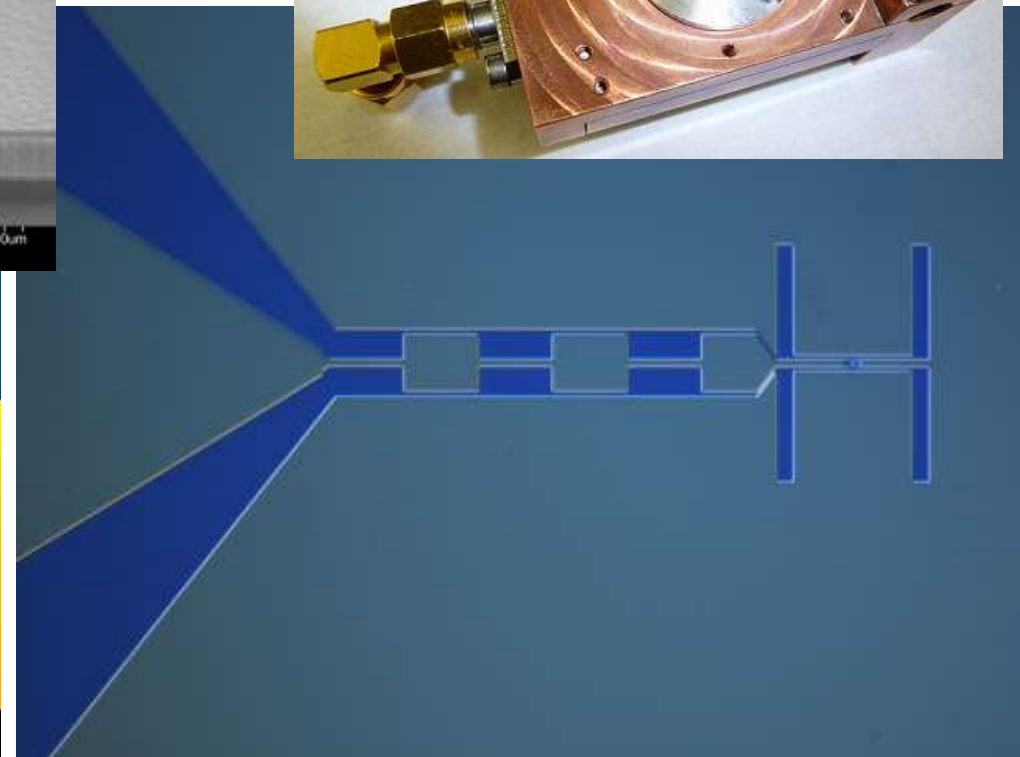


NbN pont dimension : $0.2 \times 2 \mu\text{m}$
 NbN épaisseur : 3.5 nm (Scontel)
 Substrate : Si

Micro-pont NbN
 $0.2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$

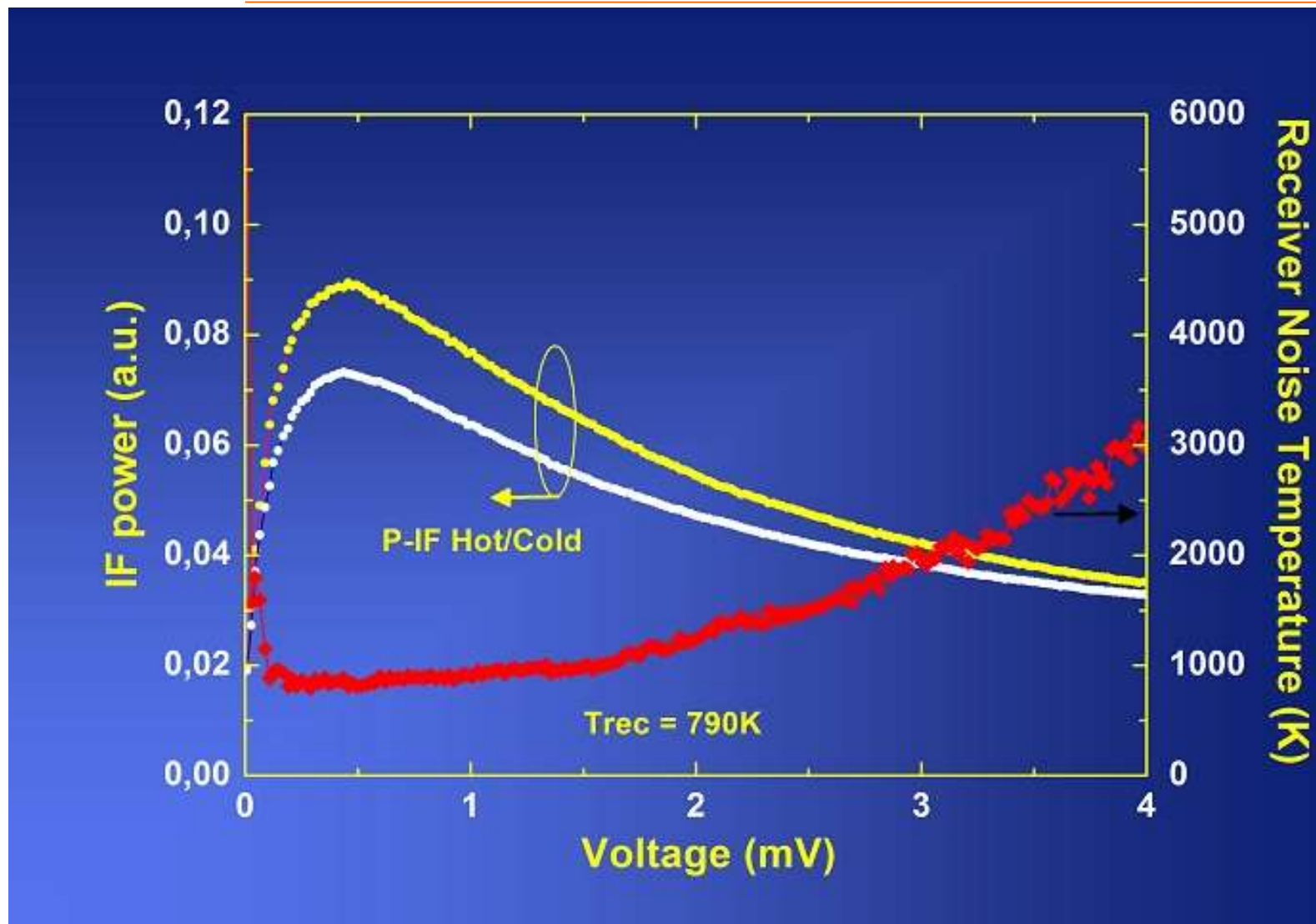


Antenne spirale



Antenne double-slot

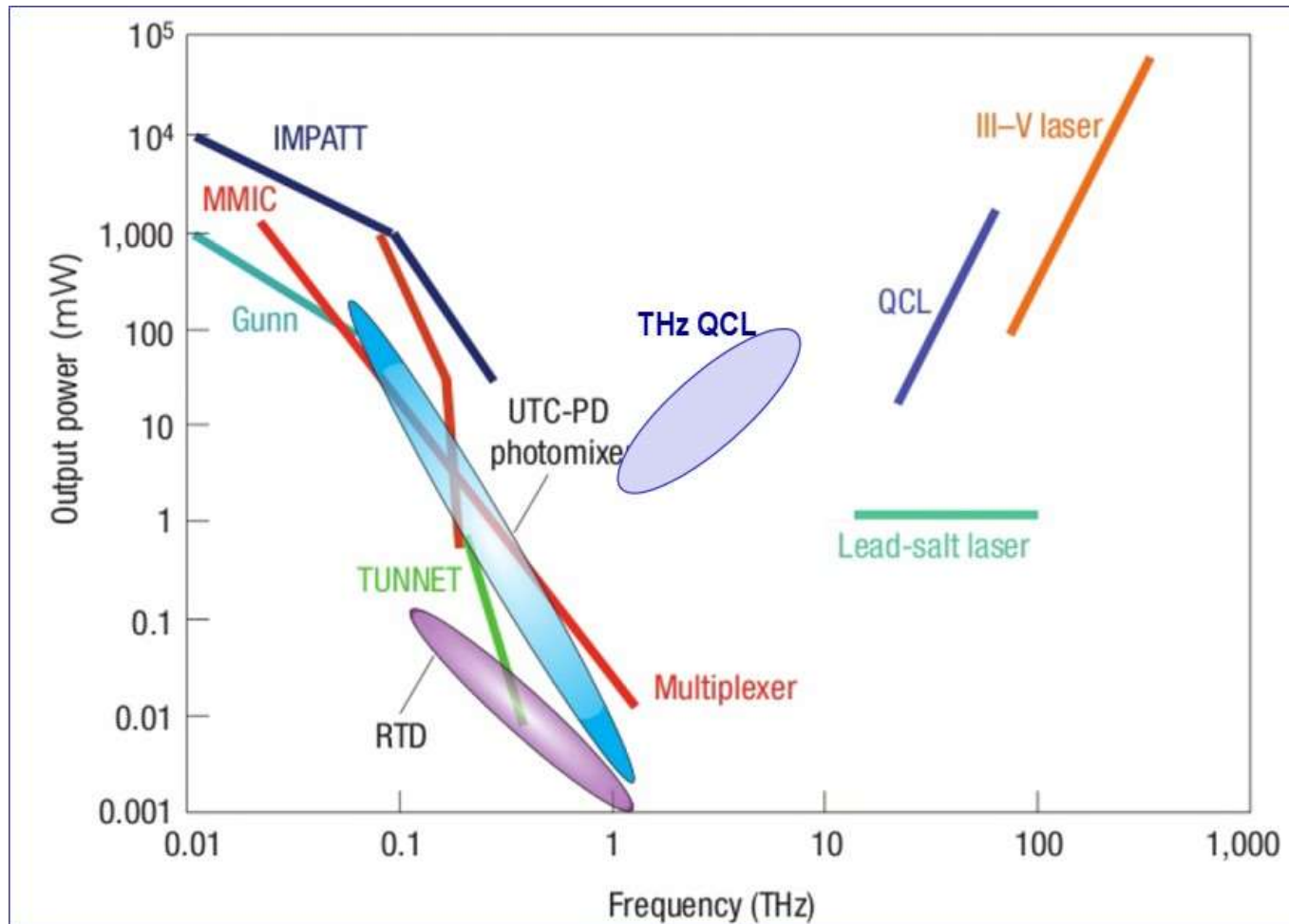
Mélangeur réalisé – Sensibilité à 2,5 THz



Puissance FI en présence de la charge chaude et froide et température de bruit en fonction de la polarisation

Oscillateur local THz

Entre les sources hyperfréquences et les sources optiques, il existe un “fossé”



M. Tonouchi, Nature Photonics 1-97, 2007

Electronics ←

→ Photonics

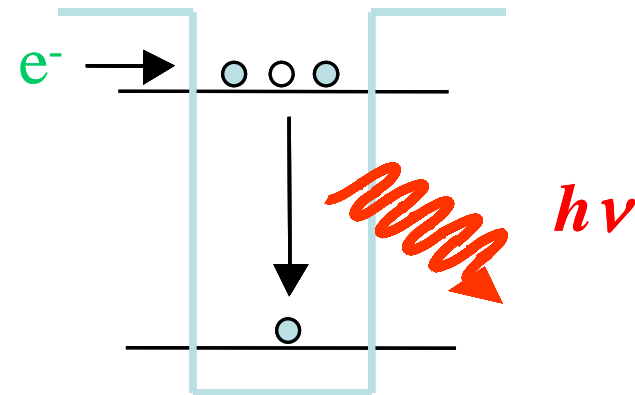
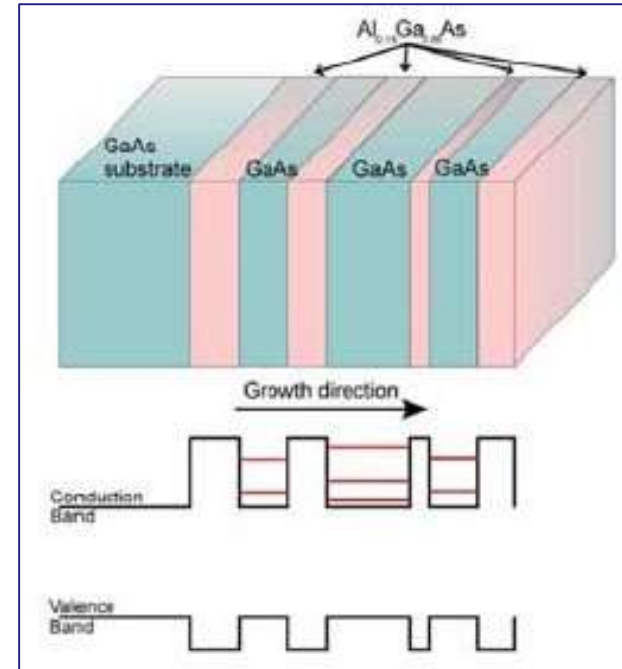
QCL – un système quantique artificiel

○ Structure de la zone active

- ⇒ Technique : épitaxie - couches nanométriques
- ⇒ Matériaux : GaInAs/AlInAs/InP, GaAs/AlGaAs, InAs/AlSb
- ⇒ Succession de puits quantiques

○ Fonctionnement

- ⇒ Décalage du niveau d'énergie
- ⇒ Confinement quantique et l'effet tunnel
- ⇒ Un électron descendant N puits génère N photon
- ⇒ $h\nu$ déterminé artificiellement



○ Optimisation effectuée au travers:

- ⇒ Design du milieu de gain
- ⇒ Qualité des matériaux
- ⇒ Niveau du dopage
- ⇒ Géométrie
- ⇒ Réduction des pertes optiques

Frequency Range : 1,2 – 5 THz

Pmax (pulsed) : ~1W

Typical Power : 10 – 100 mW

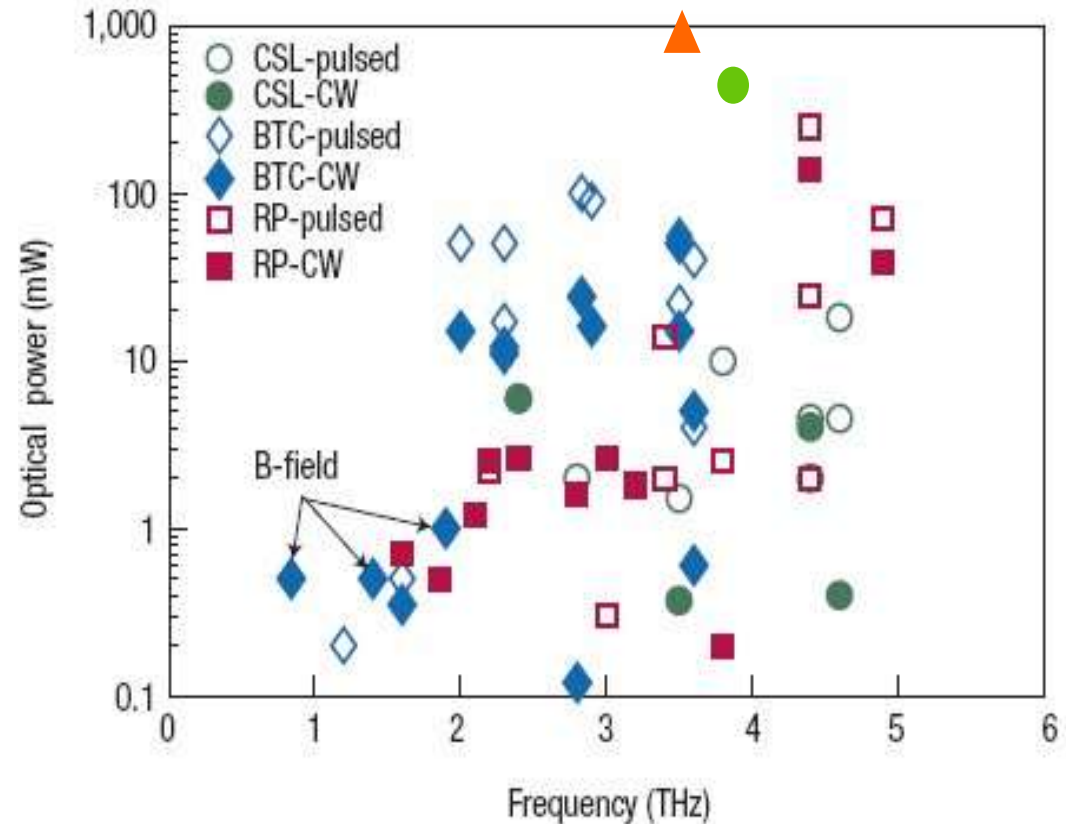
Linewidth : < 100 Hz

Continuous Tuning : < 30 GHz

Tmax pulsed mode : 200 K

Tmax CW mode : 120 K

Puissance optique en fonction de la fréquence



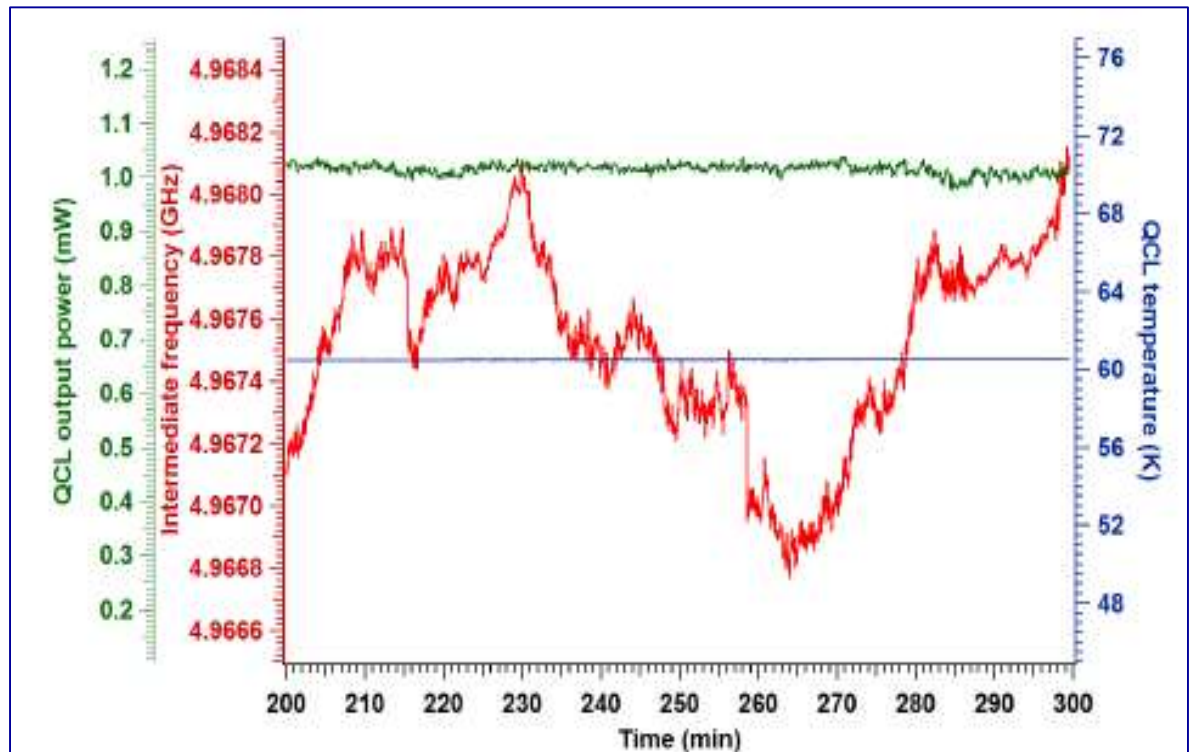
● M. Brandstetter *et. al.*, APL, 2013
 ▲ L. Li *et al.*, *Electron. Lett.*, 50, 309 (2014)
 B. S. Williams, *Nature phonics*, 2007

○ Fonctionnement libre:

- ⇒ Stabilité ~ 10 MHz
(1 MHz avec température stabilisée)
- ⇒ Largeur ~ 20 kHz

○ Stabilisation : kHz ou Hz possible

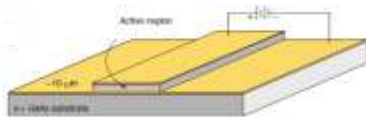
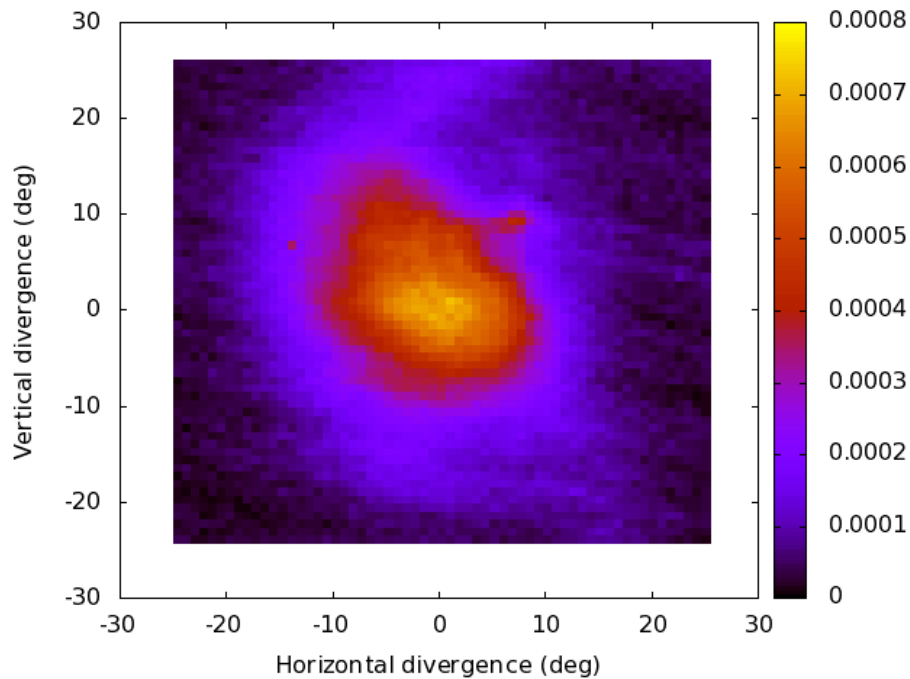
- ⇒ Techniques :
 - molecular line
 - microwave source
 - frequency comb



A. Danylov et al., Proc SPIE 8261

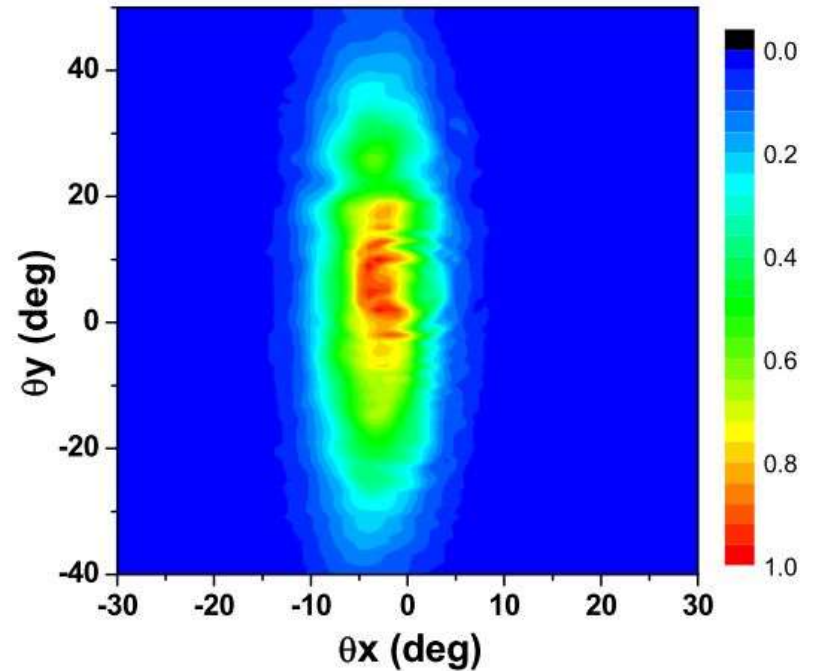
QCL – Diagramme de rayonnement

Double métal / guide d'onde / 3.5 THz



Valavanis et al., *Electron. Lett.* **51**, 919

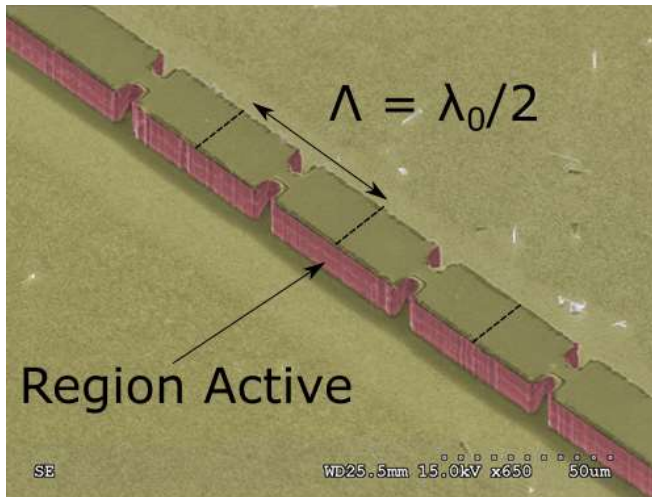
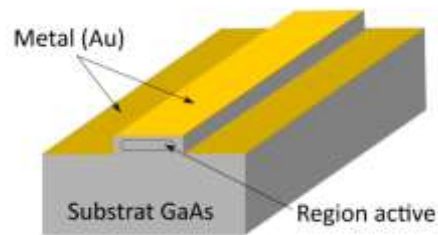
GPH-Distributed FeedBack



G. Xu et al, *Nature Com.* **3**, 952

QCL – Réalisation (LERMA/C2N)

Structure DFB 3^{ème} ordre



Caractéristique électro-optique

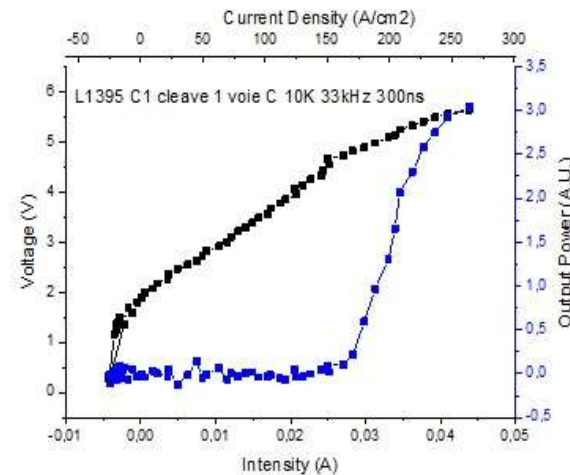
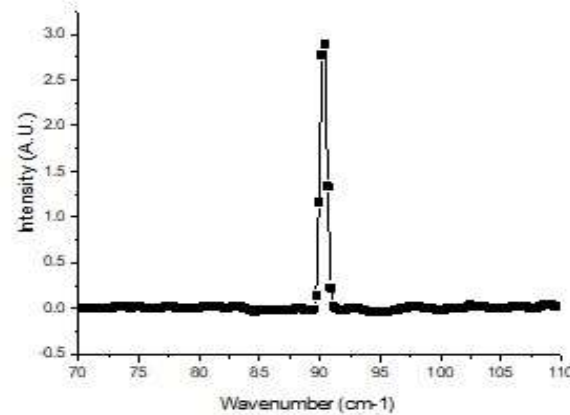
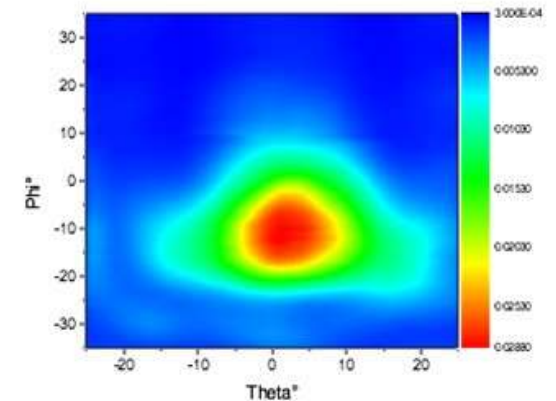
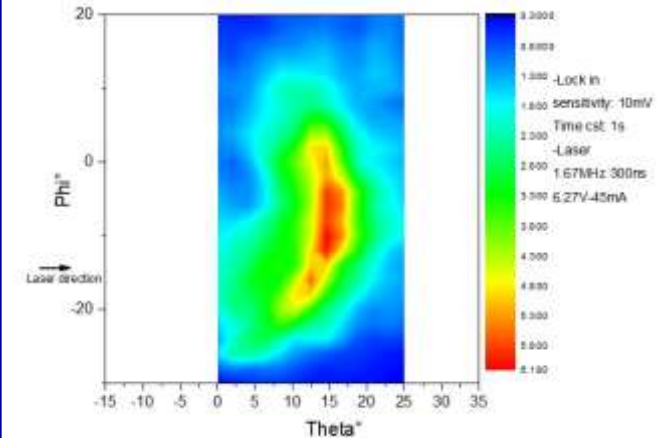
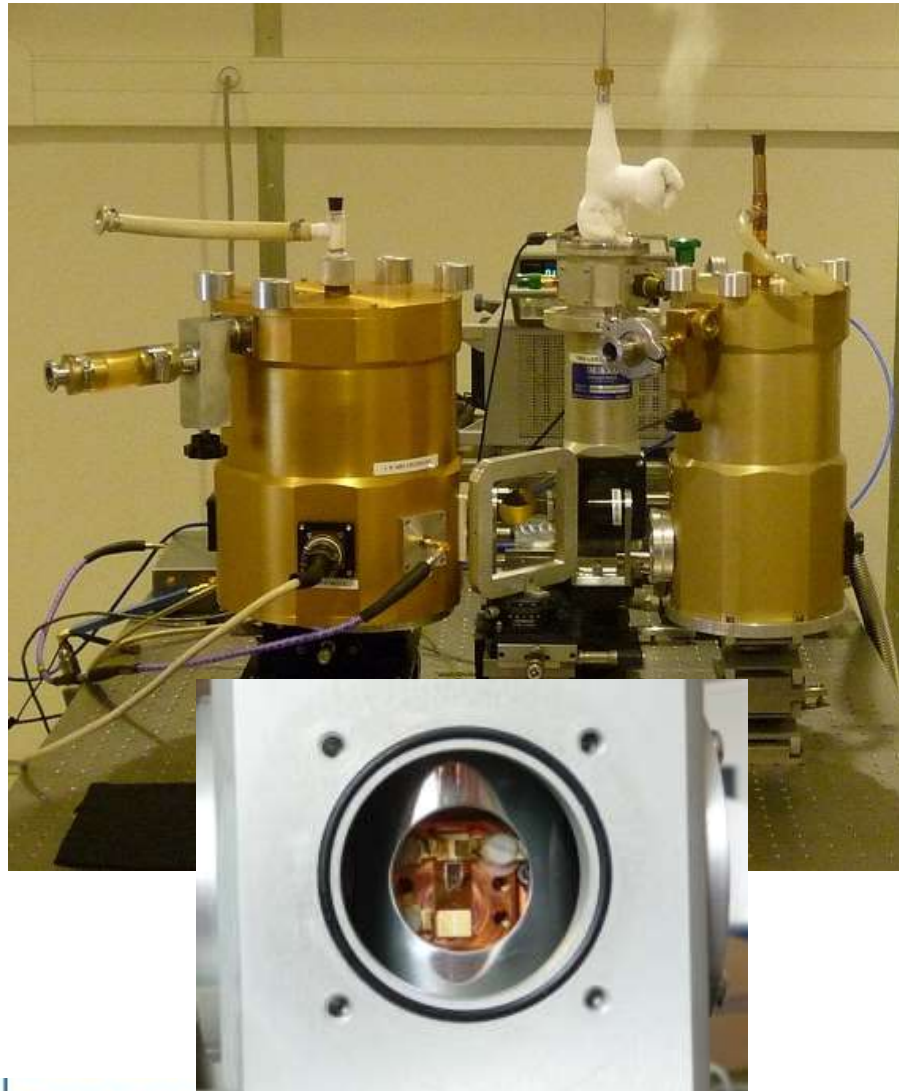


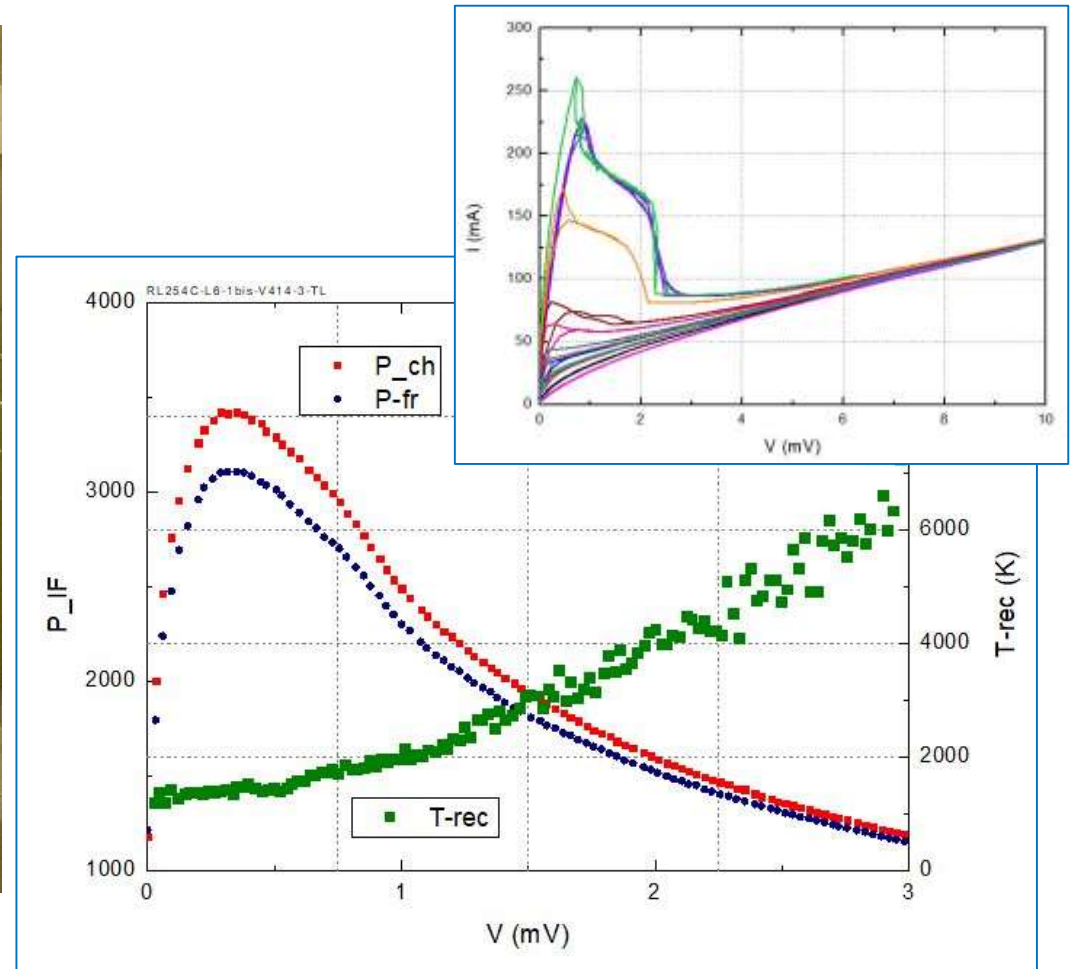
Diagramme de rayonnement



Banc de mesure hétérodyne à 2.7 THz



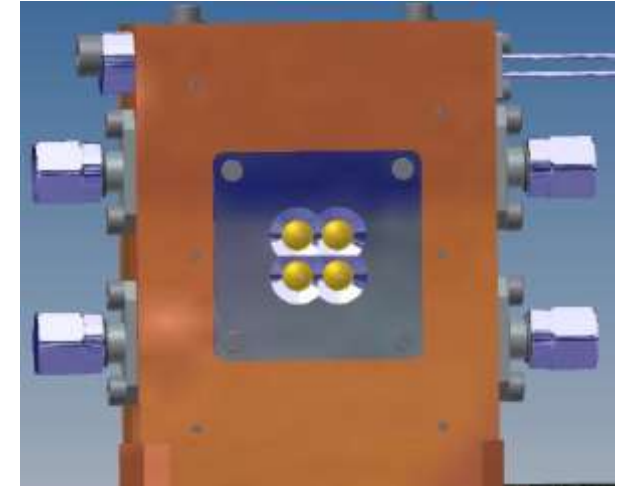
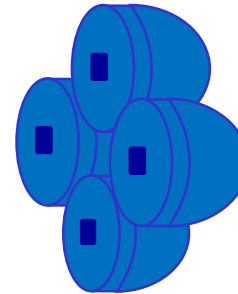
IVs à différentes puissances OL



Puissance FI et température de bruit

○ Mélangeur à 4 pixels

- ⇒ Technologie bien connue pour mono-pixel
- ⇒ Faisceau bien focalisé
- ⇒ Large bande RF



Bloc HEB 4 pixels

○ Distribution de l'OL

- ⇒ Contrôle du faisceau émis par le QCL
- ⇒ Application du modèle «Réseau de phase global»
- ⇒ Design et réalisation du diviseur adapté à la fois à
 - l'émission du QCL
 - la réception du mélangeur

○ Modèle développé au LERMA (F. Defrance)

⇒ Plus général que les modèles existants,

○ Réalisation

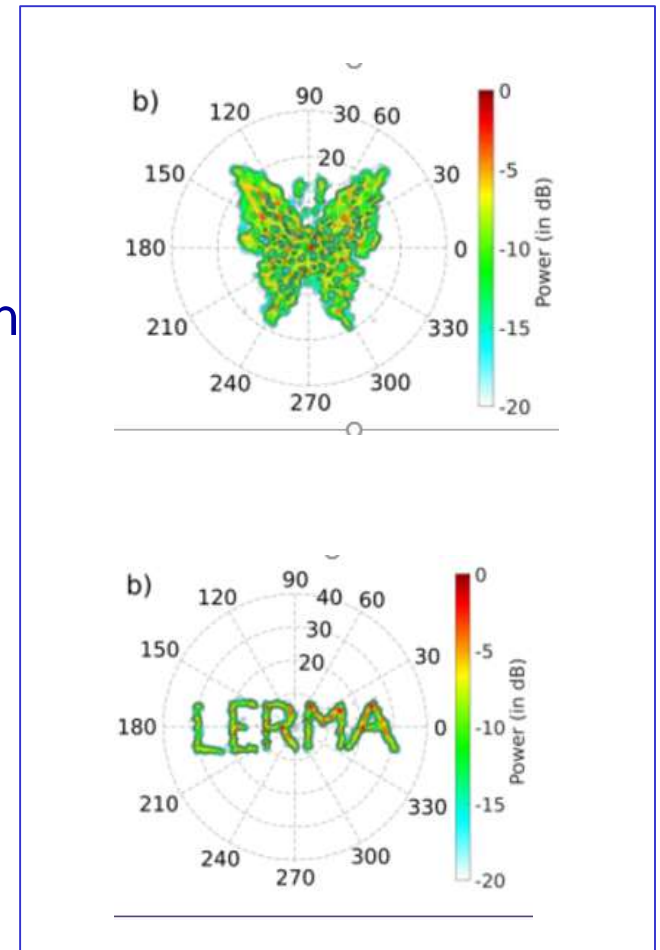
⇒ Outil de calcul et de simulation pour la conception

⇒ Prototypes de diviseur à 4 pixels:

- par réflexion (miroir)
- par transmission (lentille)

⇒ Caractérisation des prototypes

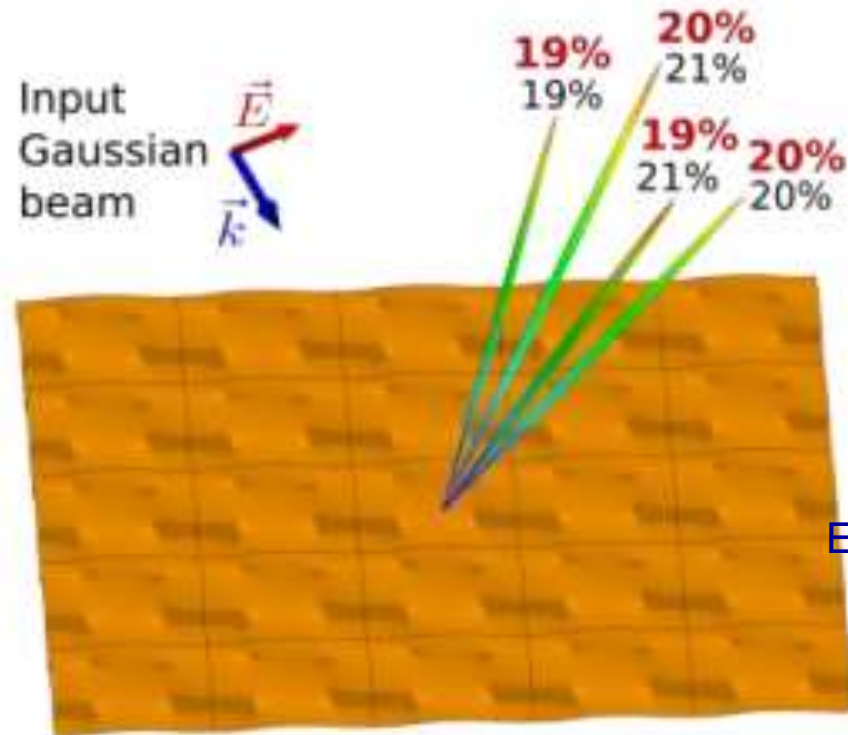
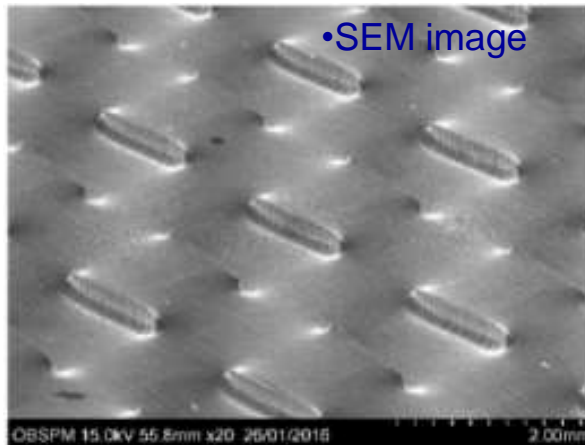
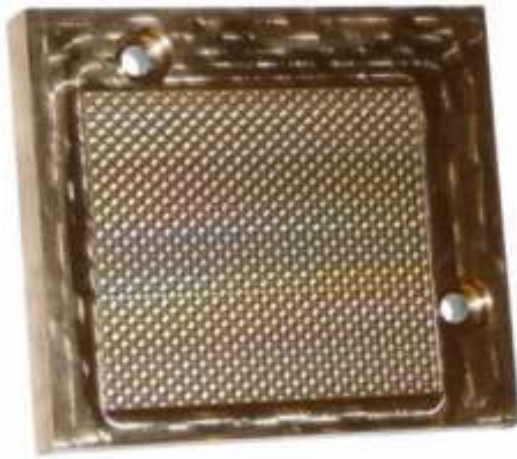
○ Excellents résultats



F. Defrance, Thèse (LERMA)

Diviseur de faisceau - Résultats

Diviseur de faisceau à 600 GHz – par réflexion (miroir)

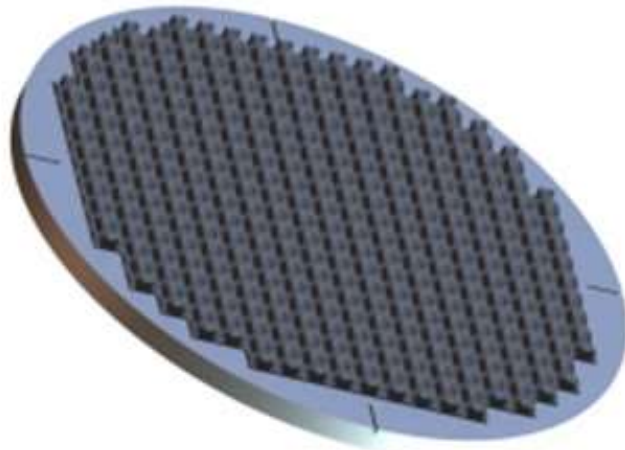


Efficacité ~ 80%

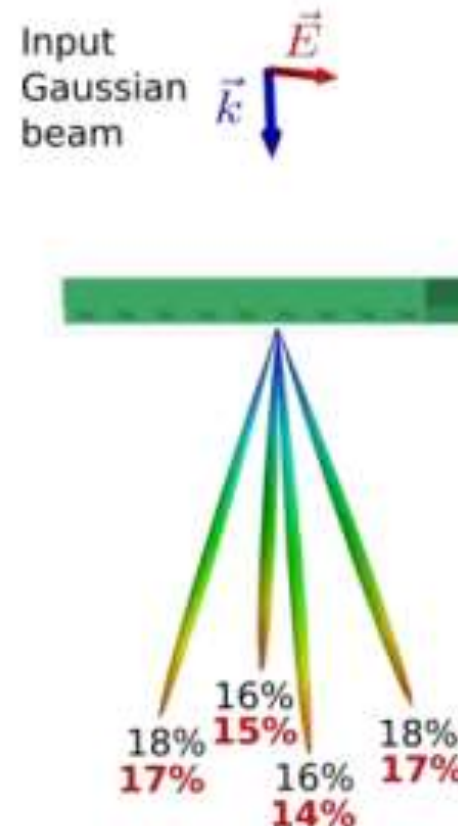
4 faisceaux générés par le prototype: mesure (rouges) comparée à la simulation

Diviseur de faisceau - Résultats

Diviseur de faisceau à 600 GHz – par transmission (lentille)



Diviseur de faisceau réalisé (TPX)



Efficacité ~ 62%

4 faisceaux générés par le prototype: mesure (rouges)
comparée à la simulation

Résumé

○ Détection hétérodyne sub-mm / THz

⇒ Mélangeurs à supraconducteur : SIS / HEB

○ Exemple de réalisations et performances obtenues

⇒ Récepteur SIS (480-640 GHz) : $T_{\text{rec}} \sim 60 \text{ K}$

⇒ Récepteur HEB à 2,5 THz : $T_{\text{rec}} \sim 800 \text{ K}$

○ Nouvelle source THz – QCL

⇒ Compact, puissant → très prometteur pour hétérodyne THz

⇒ Amélioration : diagramme de rayonnement, stabilité, consommation

○ Perspective

⇒ Couplage OL/mélangeur : efficacité et multi-pixels

⇒ Caméra hétérodyne THz

⇒ Application aux futurs projets d'observations