

Métrologie Optique et Instrumentation

école Technologique du réseau Optique et Photonique

IV. Les défis de la métrologie

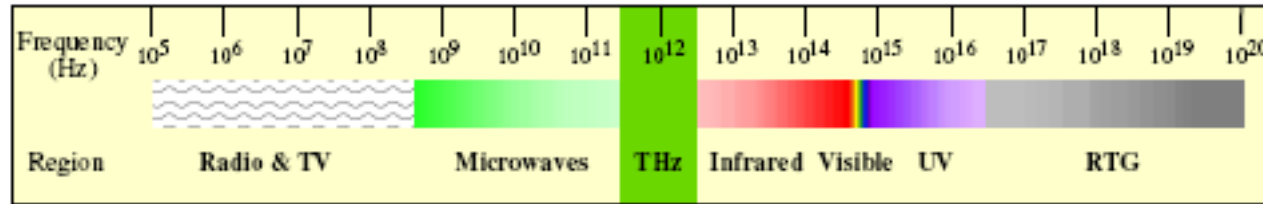
Comment et qu'est-ce qu'on mesure avec le THz ?

Jean Christophe Delagnes - Centre Lasers Intenses et Applications (Bordeaux)

jean-christophe.delagnes@u-bordeaux.fr

Caractéristiques des Rayonnements THz

Terahertz a.k.a Rayons « T » (T-rays), sub-mm, IRL (far IR)



Fréquence : 1 THz = 10^{12} Hz

↔

Période :

1 ps = 10^{-12} s

Energie : 4,1 meV = 48 K

↔

Longueur d'onde : $300 \mu\text{m} = 33 \text{ cm}^{-1}$

Fréquence : Domaine à la **frontière** scientifique et technologique **entre Electronique et Optique**, (télé)Communications et haut-débit

Période : Temps caractéristiques associé à des rotations, des vibrations de **molécules**, de solides (**phonons**), ..., **conductivité** et **transport** micro- et nanoélectronique, ...

Energie : Rayonnements **non-ionisants** (mais pénétrant pour les Z légers ($\frac{A}{Z}X$)), 🖐️ Fond thermique

Longueur d'onde : Terrain de jeu pour la méta-optique

Propriétés de choix pour spectroscopie, imagerie de matériaux (y compris biologiques)

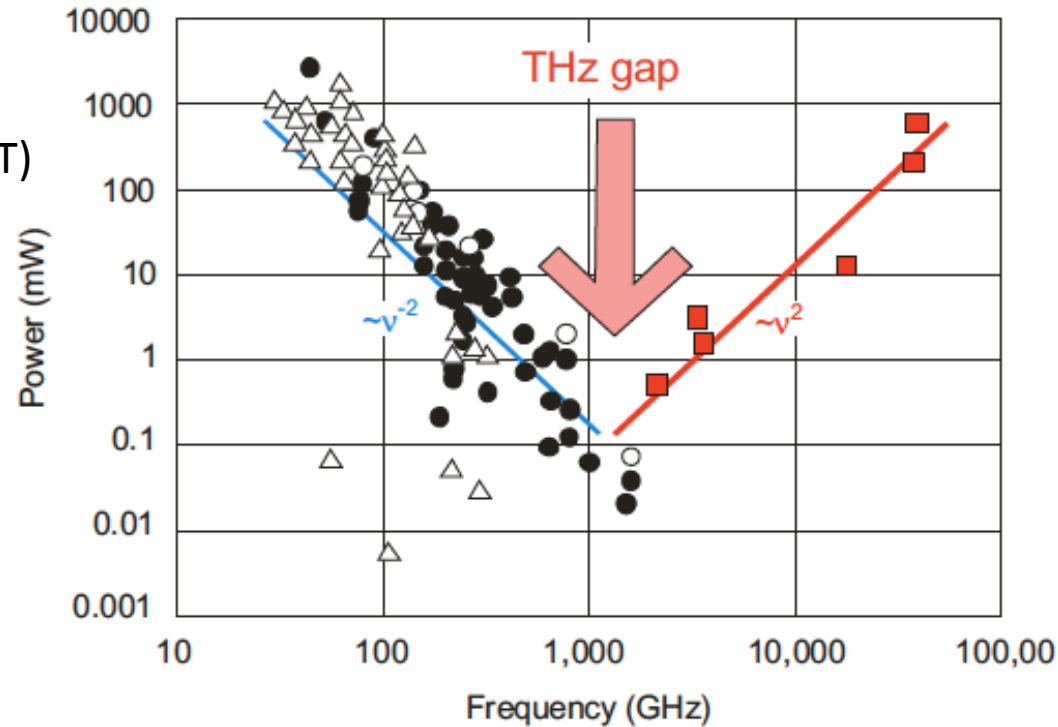
Rayonnements THz et Technologies associées

Electronique

- Diode Gunn
- Backward Wave Oscillator
- High elec. mobility transistor (HEMT)

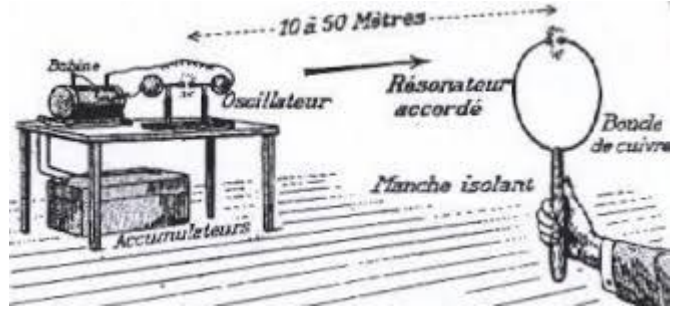
Optique

- Laser Ultrarapides
- Optique Non-Linéaire
- Plasma
- SemiConducteurs
- Lasers à Cascade Quantique (IR)

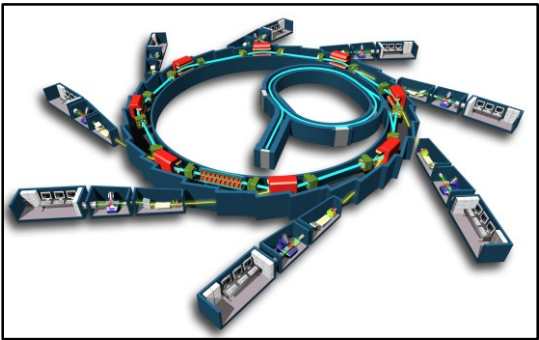


Energie de Photon $h\nu_{\text{THz}} \ll$ Fond Thermique $k_B T$
 Puissance / Efficacité de Conversion des Sources

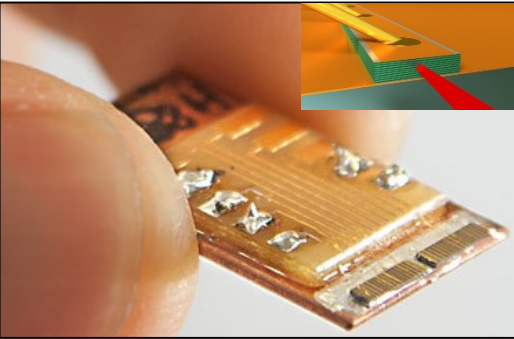
Principe physique de base



- Charge accélérée / Dipôle variable / Transitoire de courant \Rightarrow Onde é.m.

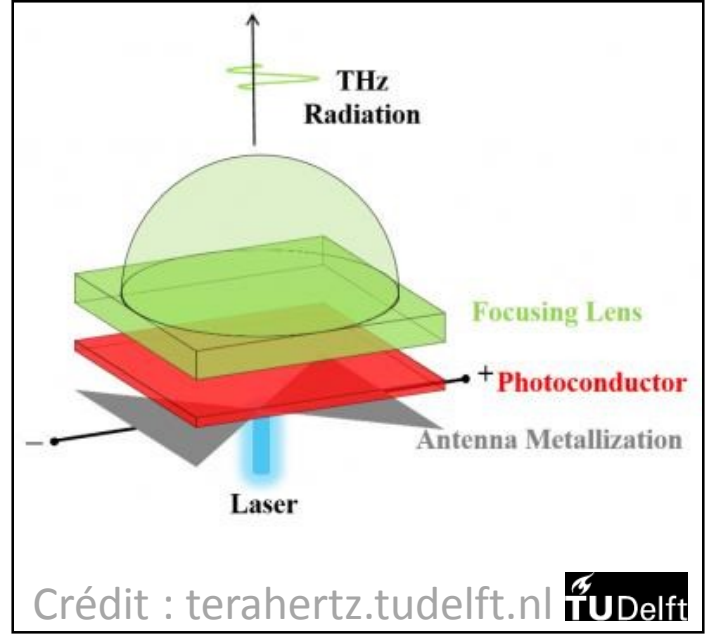


Bunches d'électrons



Laser à Cascade Quantique

Antennes THz



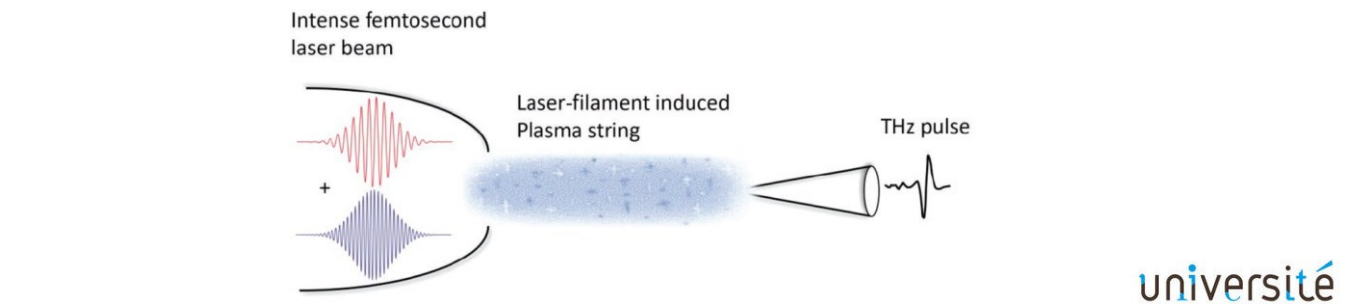
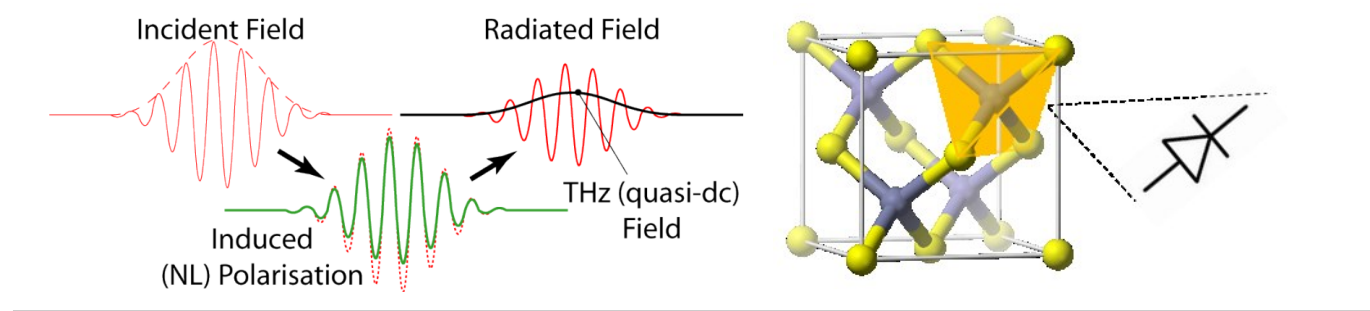
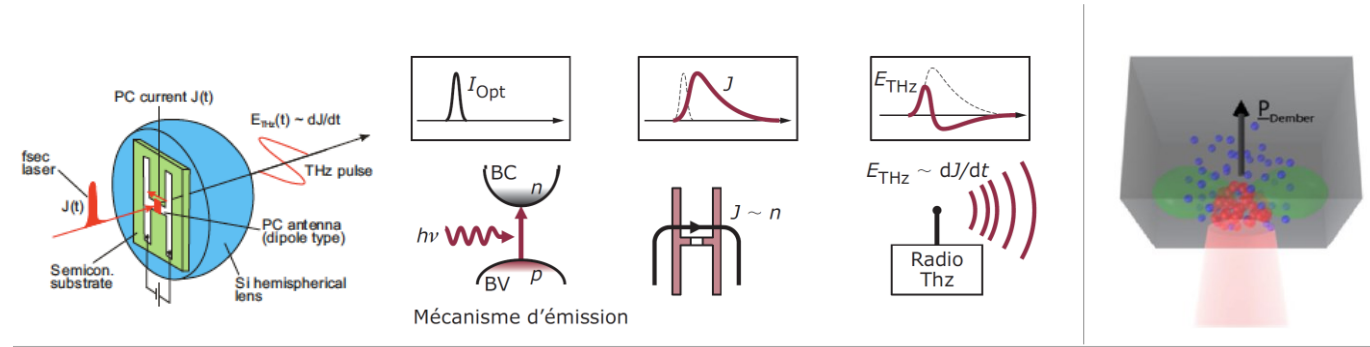
Oscillation Plasma

Radiation Smith-Purcell

Emission d'Ondes THz (par voie optique)

Emission

- Continu
 - Battement Optique
- Pulsé
 - Transitoire de courant
 - Antenne THz
 - Emission de Surface
 - Optique Non-Linéaire
 - Cristaux χ^2 non-centrosymétrique (Redressement Optique ou DFG)
 - Plasma



Détection d'Ondes THz (par voie optique)

Emission

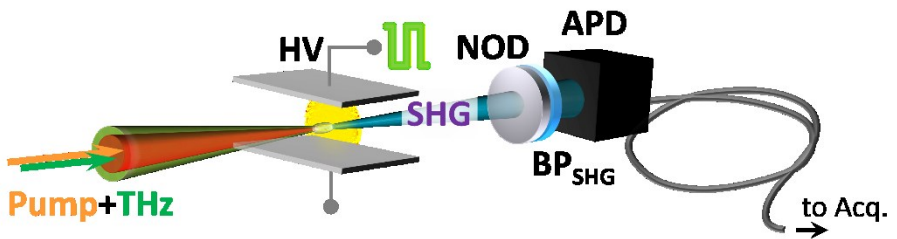
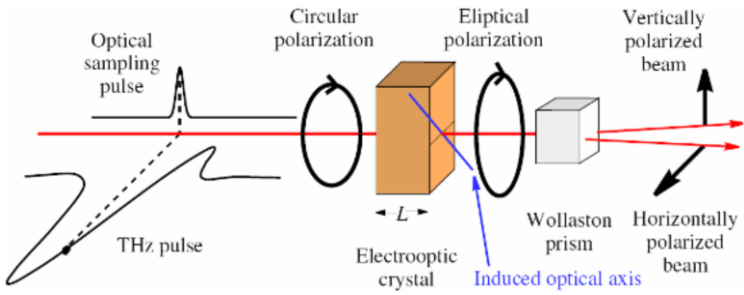
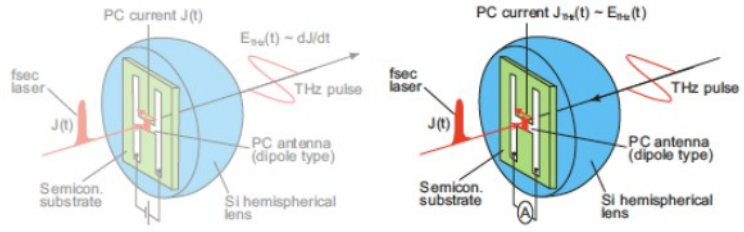
- Continu
 - Battement Optique
- Pulsé
 - Transitoire de courant
 - Antenne THz
 - Emission de Surface
 - Optique Non-Linéaire
 - Cristaux χ^2 non-centrosymétrique (Redressement Optique ou DFG)
 - Plasma



Détection

- Continu
 - Battement Optique
- Pulsé
 - Transitoire de courant
 - Antenne THz
 - Optique Non-Linéaire
 - Cristaux χ^2 non-centrosymétrique (Effet Pockels)
 - SHG Plasma

Détection d'Ondes THz (par voie optique)



Détection

- Continu
 - Battement Optique
- Pulsé
 - Transitoire de courant
 - Antenne THz
 - Optique Non-Linéaire
 - Cristaux χ^2 non-centrosymétrique (Effet Pockels)
 - SHG Plasma

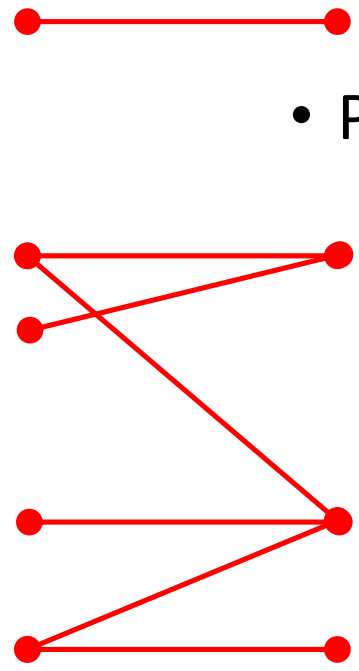
Détection d'Ondes THz (par voie optique)

Emission

- Continu
 - Battement Optique
- Pulsé
 - Transitoire de courant
 - Antenne THz
 - Emission de Surface
- Optique Non-Linéaire
 - Cristaux χ^2 non-centrosymétrique (Redressement Optique ou DFG)
 - Plasma

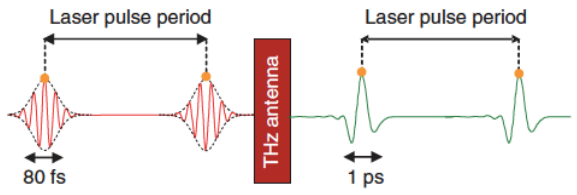
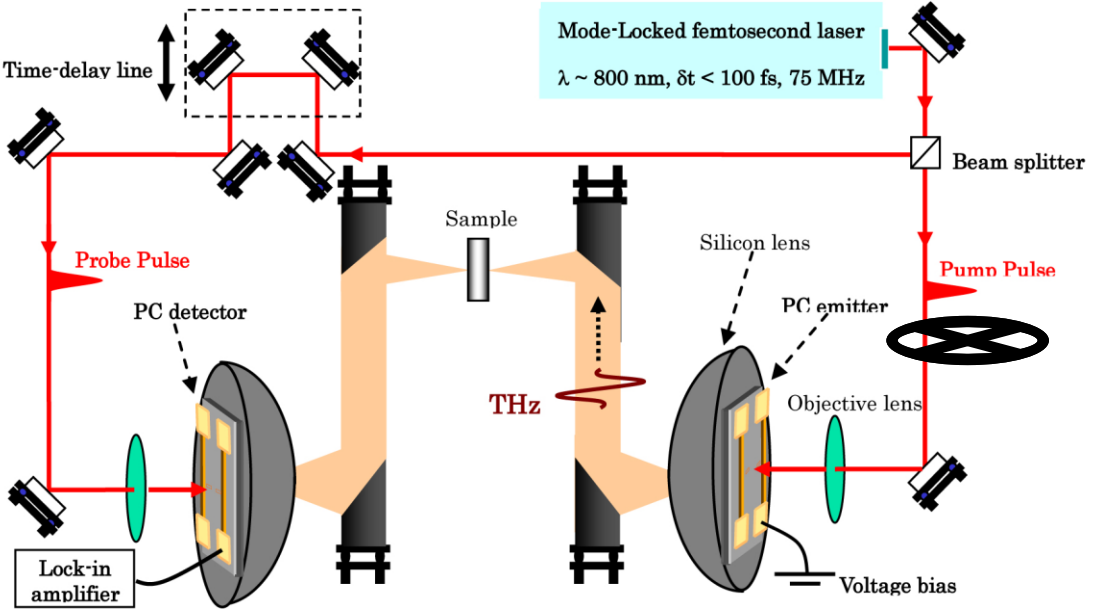
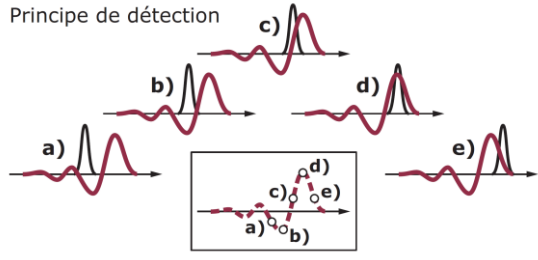
Détection

- Continu
 - Battement Optique
- Pulsé
 - Transitoire de courant
 - Antenne THz
- Optique Non-Linéaire
 - Cristaux χ^2 non-centrosymétrique (Effet Pockels)
 - SHG Plasma



Emission & Détection d'Ondes THz

Principe de détection



Principe THz-TDS :

- Emission/Détection synchrones et déclenchées (\nearrow SNR)
- Hacheur optique (Chopper)
- **Echantillonnage temporel** (reconstruction à temps équivalent) « à la pompe –sonde) puis TF du signal

Ingrédients clés :

- **Source optique** impulsionnelles **durée < ps** (>THz) typ. Ti:Sa
- Transduction Opt \Leftrightarrow THz Large Bande (**Antenne THz, Cristal NL**)
- Niveau de bruit (Capteur + Détection synchrone)
- Résolution (Impulsion d'échantillonnage fs + Ligne à retard optique) et course max.

Performances typiques :

- Bande : 0,1 à 5 THz
- Résolution : 10's GHz
- Dynamique : 30 à 50 dB (à vide)

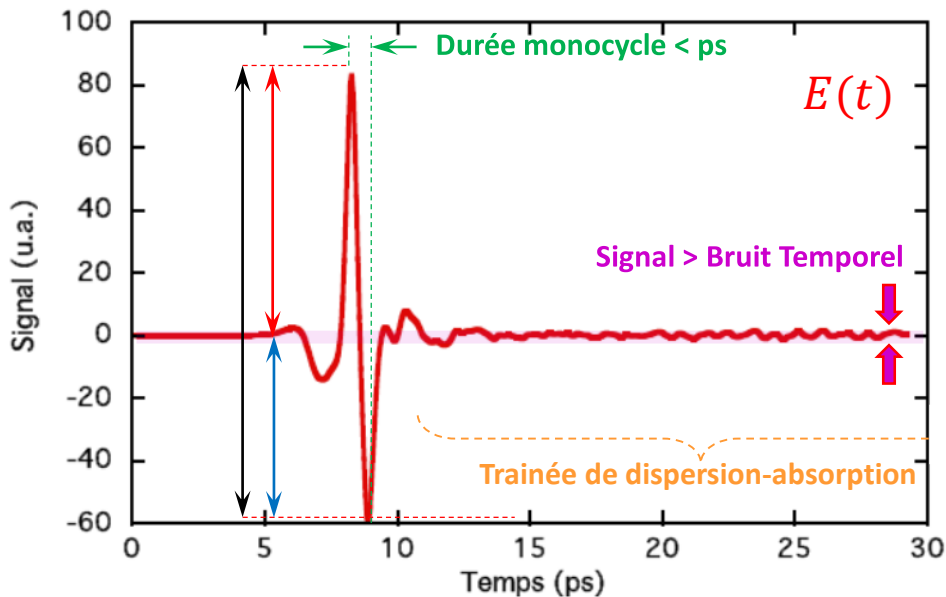
Problèmes usuels :

- **Claquage des antennes**
- **Alignement des optiques, Retour laser** (vs solution fibrée)
- **Atténuation et déclin du signal**

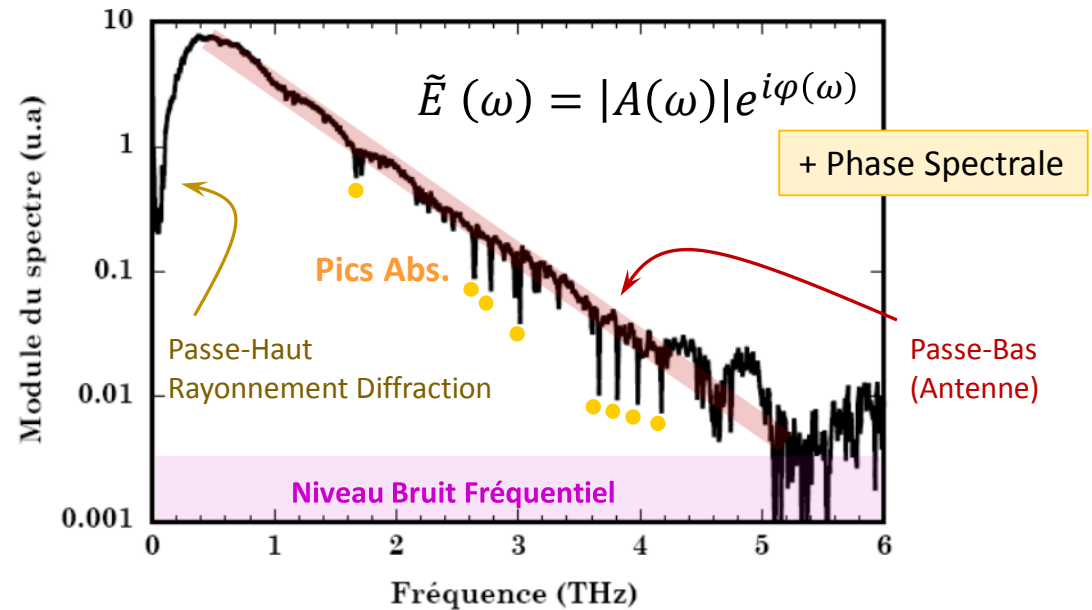
Caractéristiques d'une impulsion THz

Dans le domaine temporel

Calibration !



Dans le domaine spectral



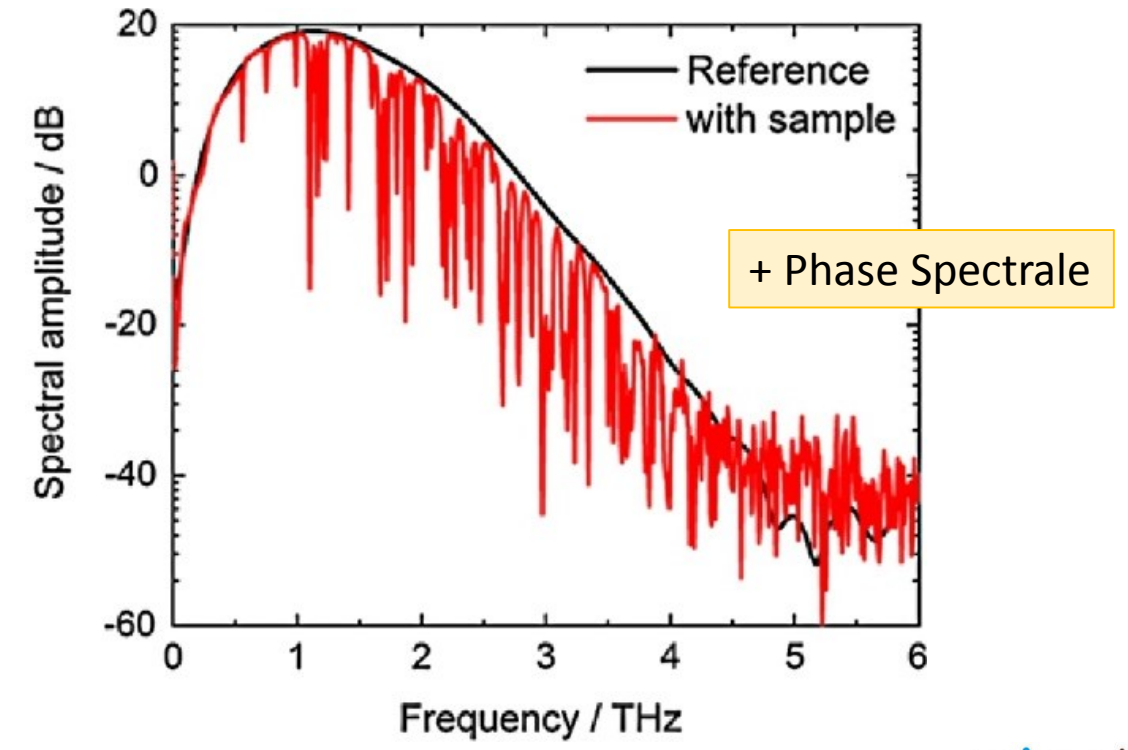
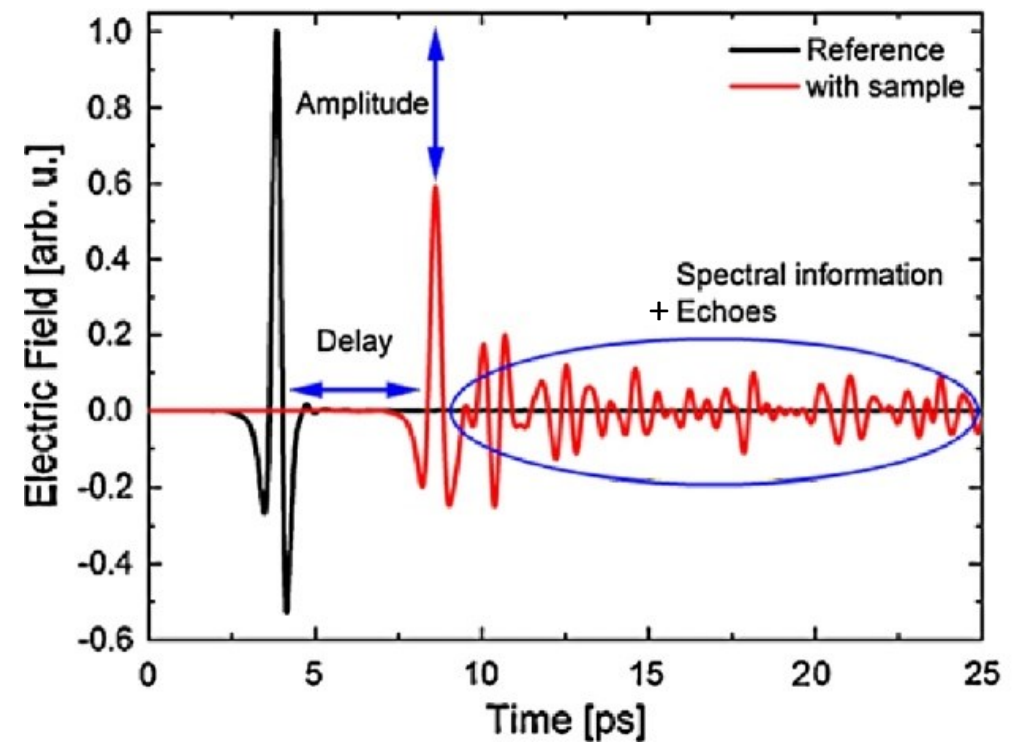
- Typiquement **monocycle**
- Information spectrale : trainée de dispersion-absorption (**free induction decay**)
- Déclin du signal vs. **niveau de bruit**
- Analyse des lobes +/- ou Crête-à-crête

- Spectre sur plusieurs octaves (>3)
- Comportement Passe-Bande
- Pics ou bandes d'absorption + Phase spectrale (indice de réfraction)
- Dynamique 30 à 40 dB

Applications

Spectroscopie

- Principe : Spectroscopie THD-THz à référence



Applications

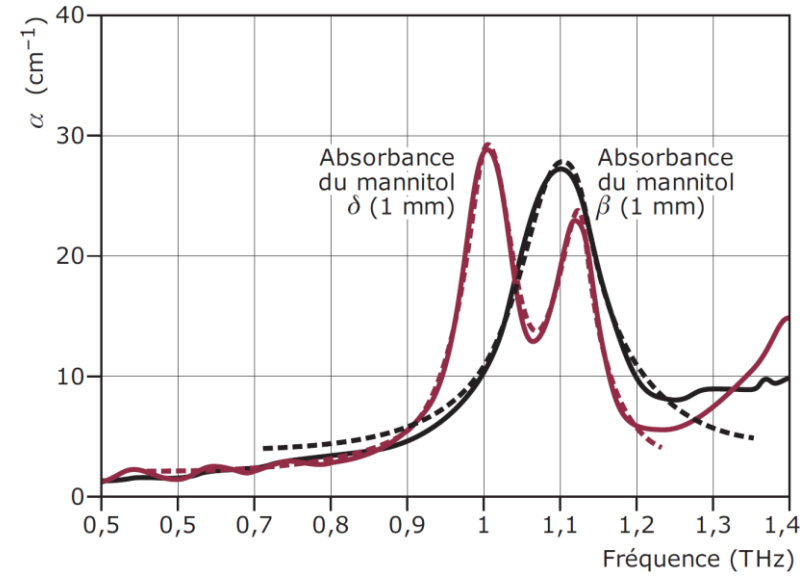
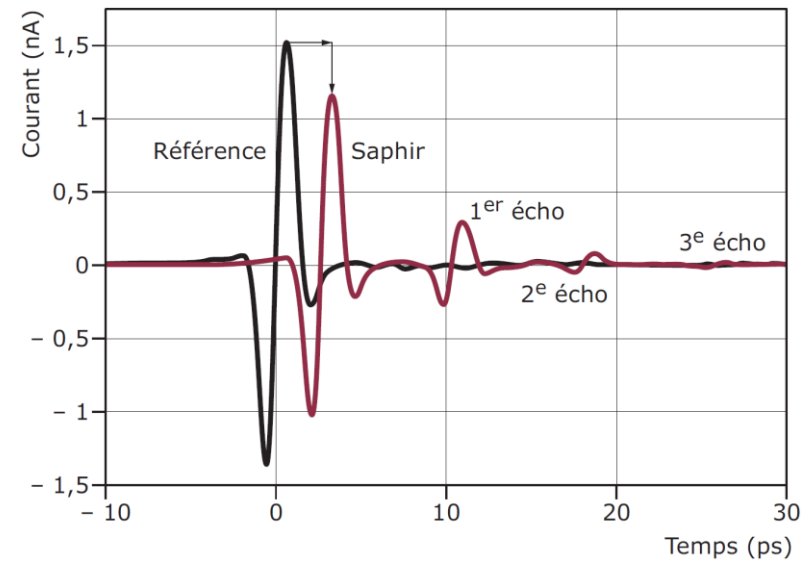
Spectroscopie

- Indice de réfraction :
 - Délai, Echo(s)
 - Pertes de Fresnel

- Absorption :
 - Position (fréquence) des raies/bandes
 - Atténuation, Intensité (section eff.) raies

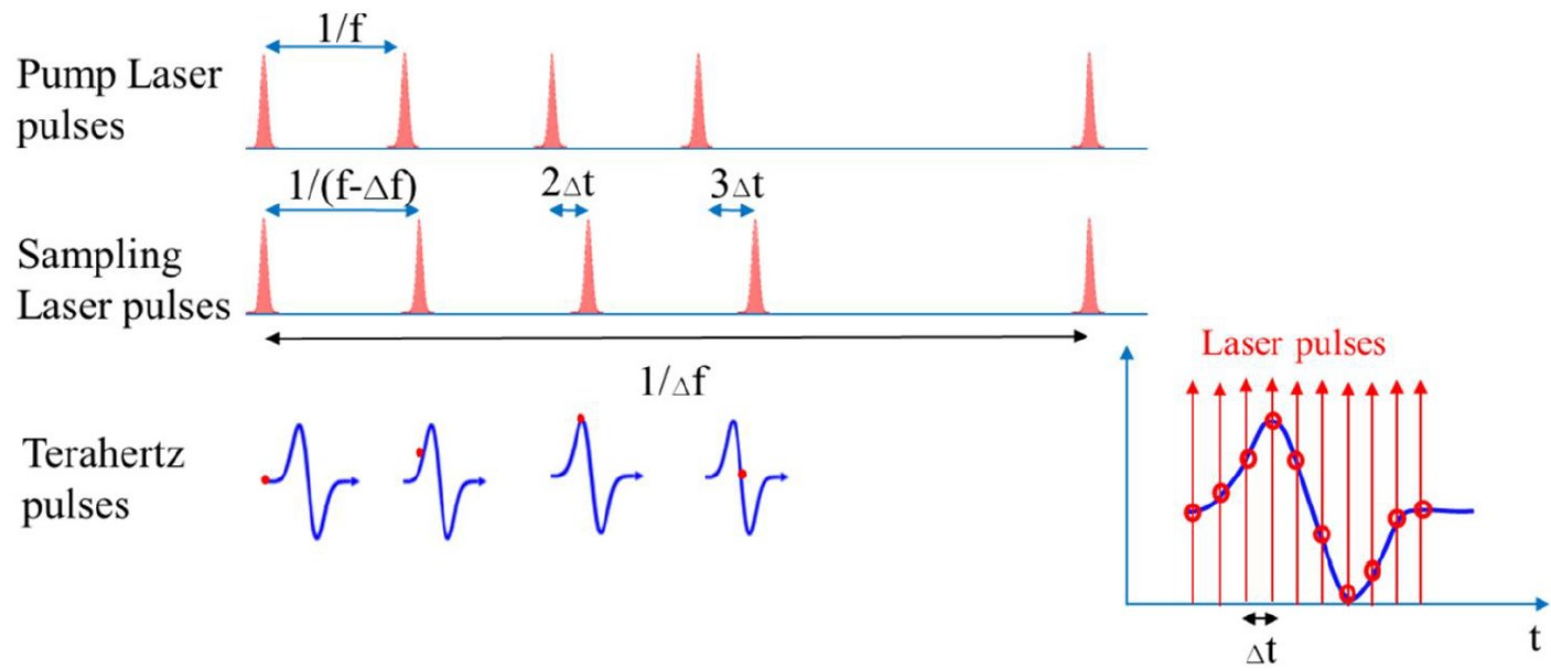
- Emission (Profil temporel/Spectre)

Etalon Fabry-Pérot/Multicouche ▼



Acquisition Rapide

- ASOPS (ASynchronous OPTical Sampling)



- 😊 Pas de ligne à retard mécanique
- 😊 Acquisition Rapide
- 😞 Résolution fixe
- 😞 Excursion temporelle limitée
- 😞 Deux Lasers Femtoseconde

Exemples de systèmes commerciaux

MenloSystems



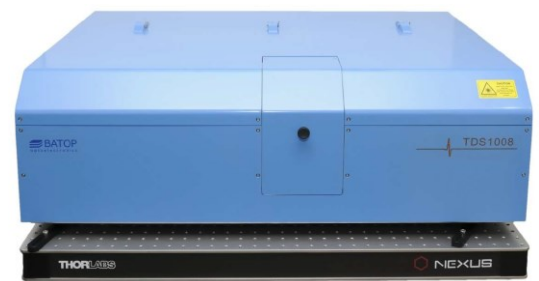
TERAVIL



TOPTICA PHOTONICS



BATOP optoelectronics



Applications

Spectroscopie

- Indice de réfraction :
 - Délai, Echo(s)
 - Pertes de Fresnel

- Absorption :
 - Position (fréquence) des raies/bandes
 - Atténuation, Intensité (section eff.) raies

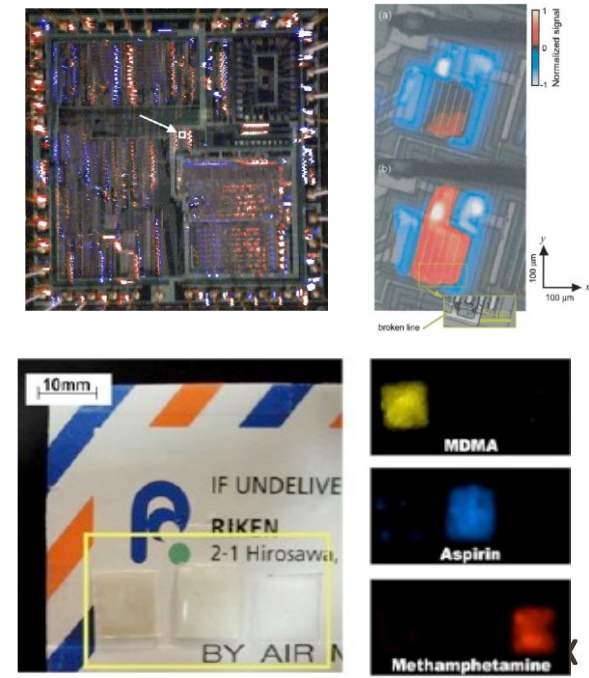
- Emission (Profil temporel/Spectre)

Imagerie

- Passive (scanner corporel), Active :
 - Opacité
 - Forme

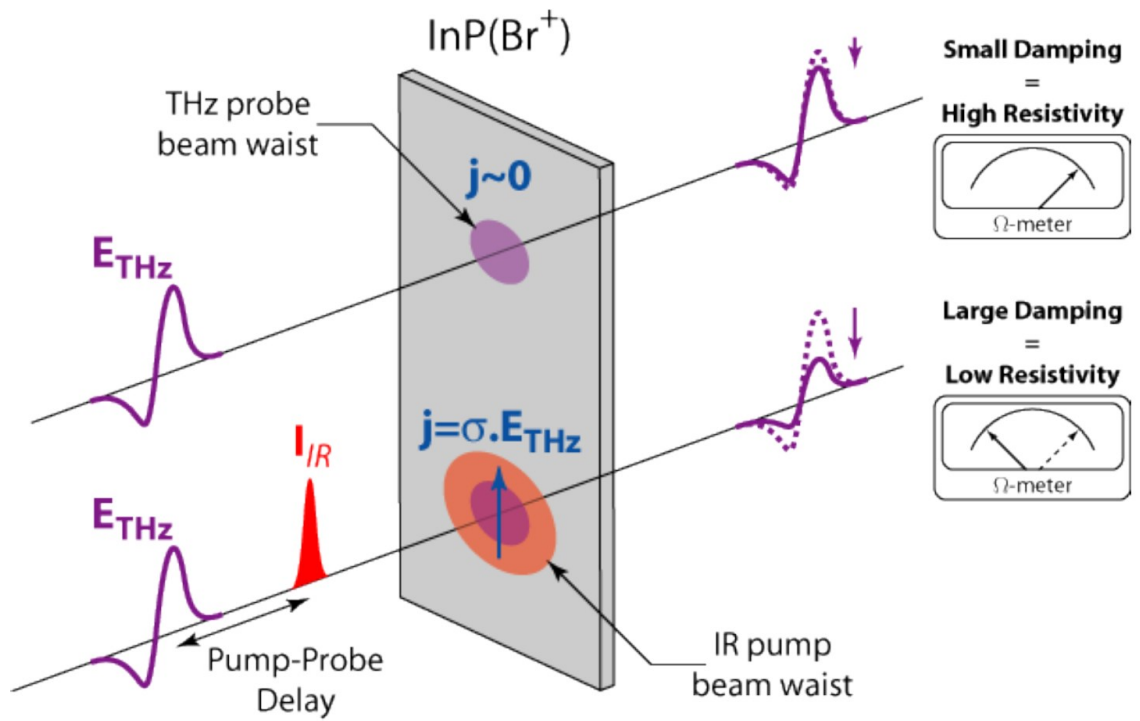
- Emission :
 - Intensité ▶
 - Profil

- Spectro-imagerie ▶



Méthodes Avancées

Spectroscopie POST – « Ohmmètre » subpicoseconde



Spectroscopie THz-TDS (stationnaire)

Mesure de la **conductivité** (statique)

Ex : Lentille Si HR, Séparatrice Si

Spectroscopie Pompe Optique – Sonde THz (POST)

Mesure dynamique de la résistivité sans contact

Accès aux **temps caractéristiques** ultrarapides de collision, diffusion, piégeage, ... **des porteurs**

Ex : Matériaux semiconducteurs pour composants électroniques ultrarapides

Spectroscopie d'Emission

Accès aux **temps de transfert/diffusion**

Ex : Matériaux semiconducteurs / organiques

Applications

Imagerie (détecteurs matriciels)

[10.1016/j.optcom.2009.04.054](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.04.054)

- Pas de détection « Photonique » (type photodiode / Band Gap) → HEM HétéroStruct.
- Utilisation des **effets thermiques induits** par les rayonnements THz
- Transduction directe (**microbolomètre**)/indirecte (caméra InGaAs)
- 🖐️ Fond thermique ⇒ **Imagerie Active** (avec source THz)



320 × 240 pix
100 GHz – 5 THz



384 × 288 pix
90 GHz – 5 THz



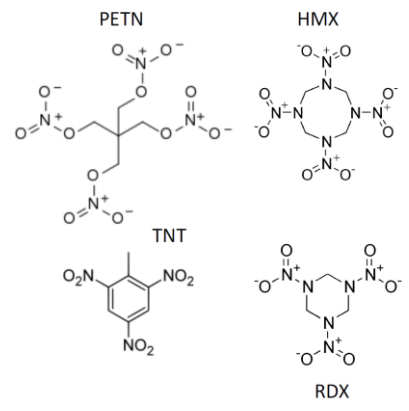
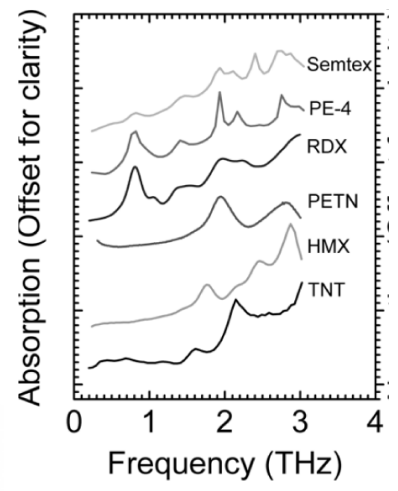
Tera/Ense



HEM GaAs
64 × 64 pix
50 GHz – 700 GHz

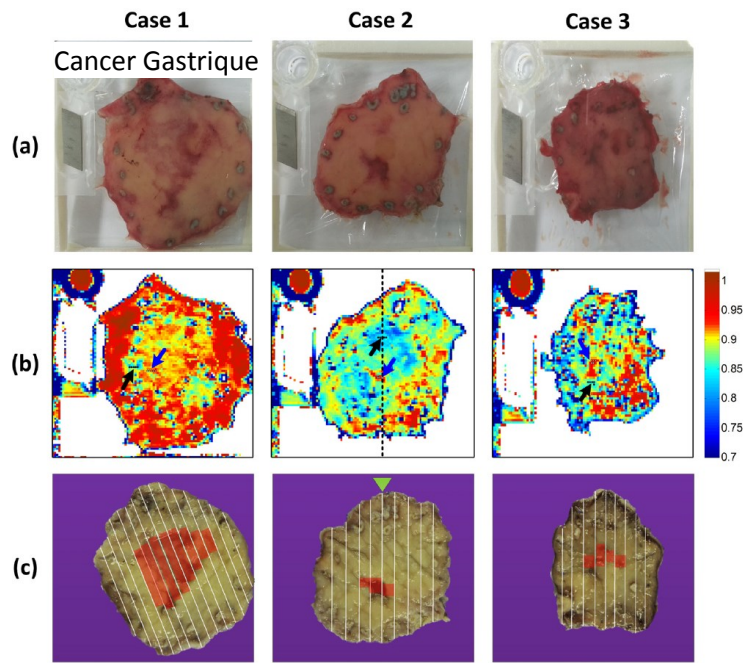
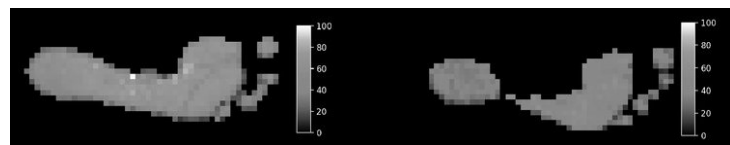
Applications : Sécurité/Imagerie Médicale

- Sécurité



- Imagerie Médicale

Diabète, G. G. Hernandez-Cardoso SPIE (2018)



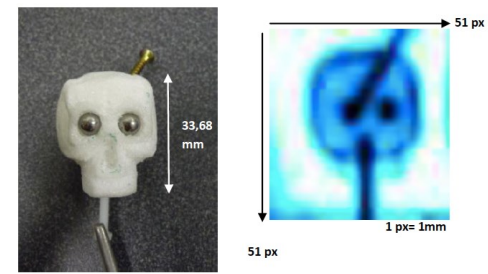
Pénétration du THz
Limité par l'eau

TeraView

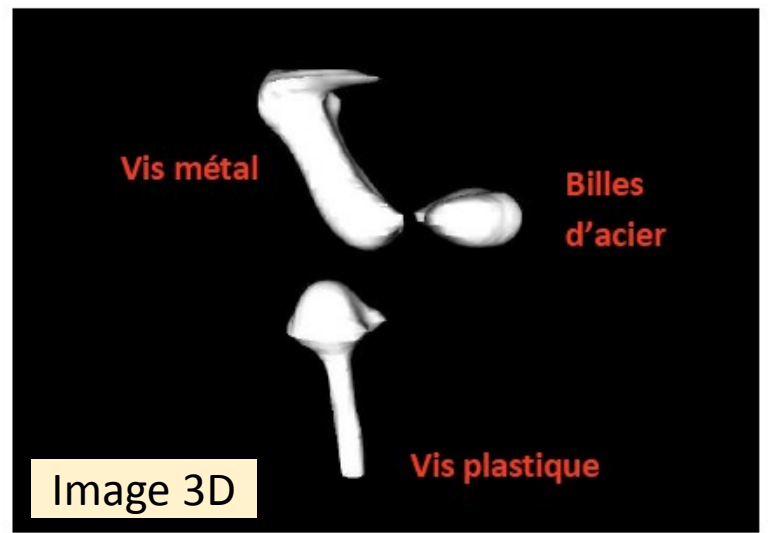
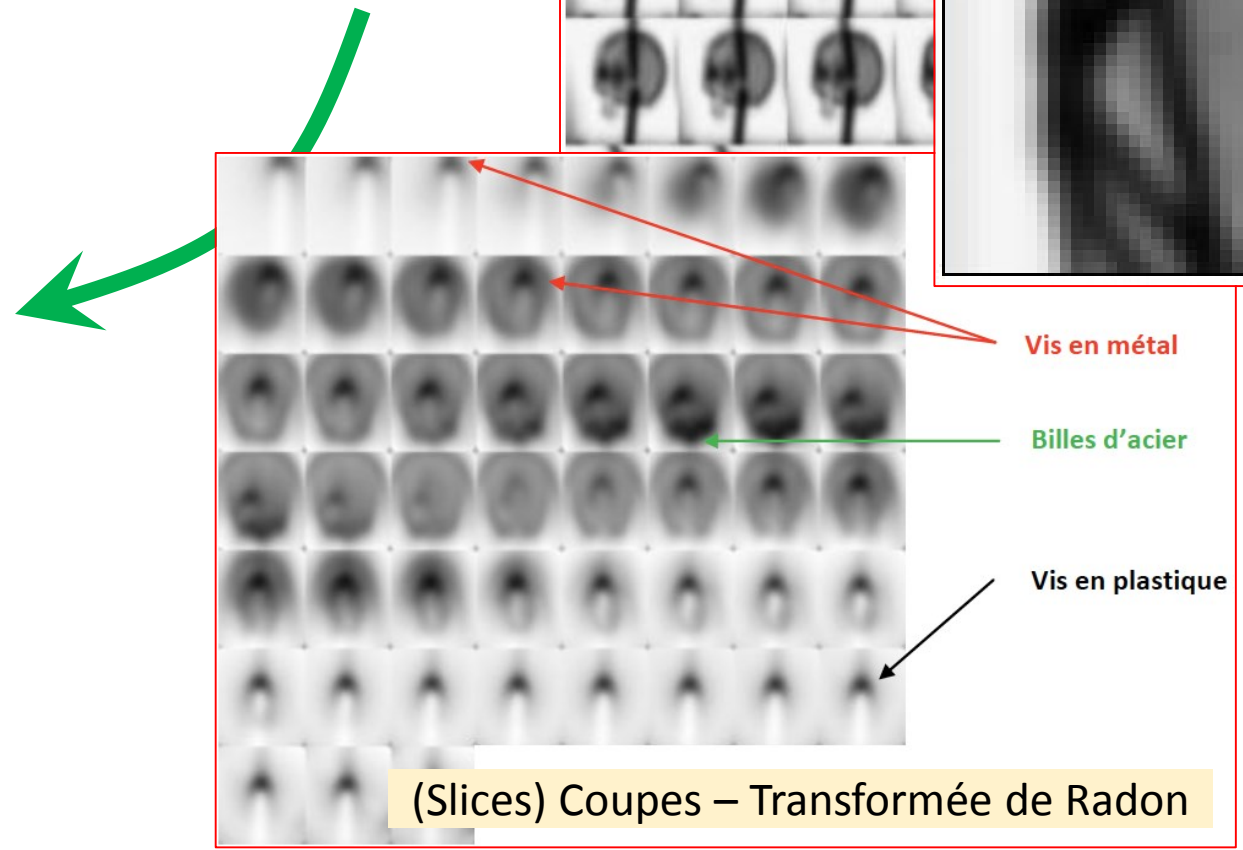
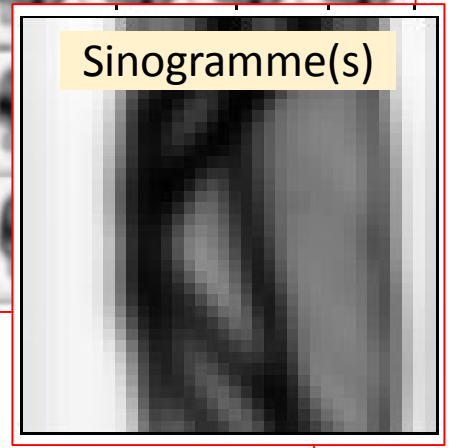
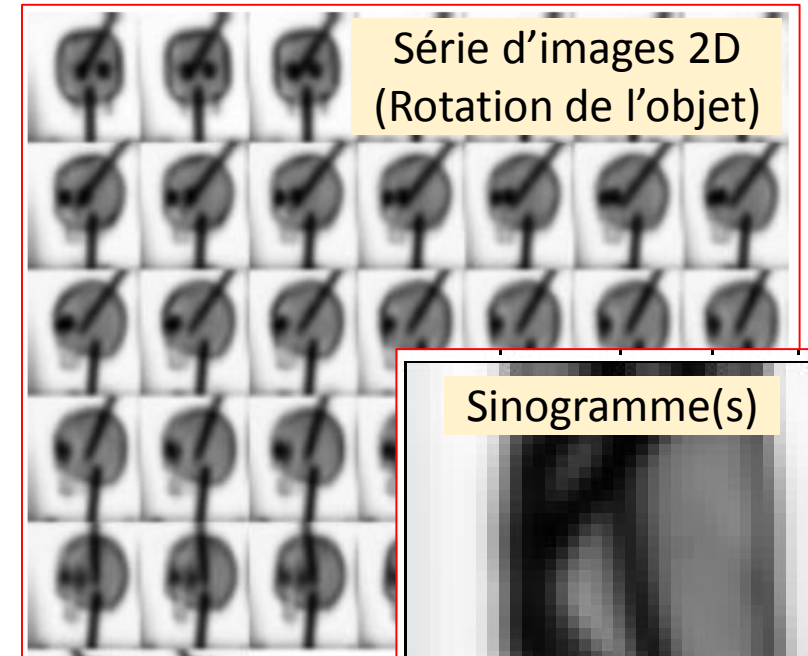
Applications

Imagerie (détecteurs matriciels)

- Caractérisation de faisceau
- CND (Contrôle non destructif)
- Imagerie Hyperspectrale
- (Computed) Tomographie



Objet à analyser



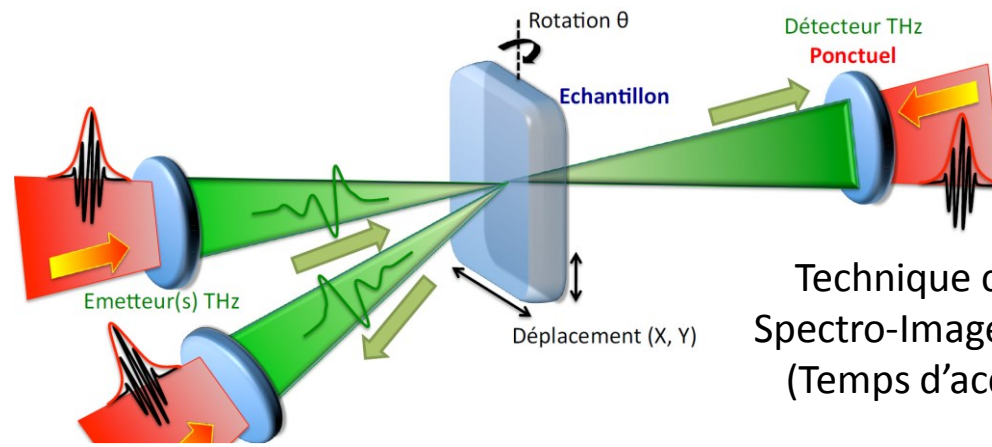
Applications – Résumé

Spectroscopie(s)

- **Organiques, semiconducteurs**
- **Empreinte spectrale** : Composition qualitative (nature), **quantitative** (abondance, structure)
- TDS : Structures **multicouches** (échostratigraphie)
- Techniques avancées, Cinétiques et Dynamiques rapides, **Transport et Transfert de charge, ...**

Imagerie(s)

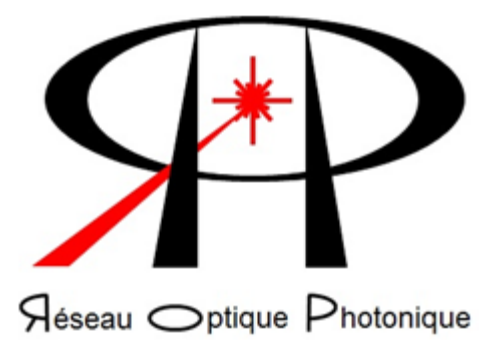
- **Imagerie Active/Passive**
- Pénétrant (organique) - attention à l'eau, aux conducteurs (y compris graphite)
- Réponse « binaire » présence/absence
- **Analyse de forme** (2D ou CTomo)
- Imagerie Hyperspectrale ↗ (source accordable et/ou filtres sélectifs)



Technique complète :
Spectro-Imagerie THz-TDS
(Temps d'acquisition !)

Références

- Terahertz Spectroscopy, *Anal. Chem.* 2011, 83, 4342–4368, doi: 10.1021/ac200907z
- Laser-Driven Strong-Field Terahertz Sources, *Adv. Optical Mater.* 2020, 8, 1900681, doi: 10.1002/adom.201900681
- Industrial Applications of Terahertz Sensing: State of Play, *Sensors* 2019, 19, 4203, doi:10.3390/s19194203
- A Comprehensive Review on Food Applications of Terahertz Spectroscopy and Imaging, doi: 10.1111/1541-4337.12490
- Metrology State-of-the-Art and Challenges in Broadband Phase-Sensitive Terahertz Measurements, doi: 10.1109/JPROC.2016.2644108
- Terahertz based non-destructive testing (NDT), doi: 10.1515/teme-2019-0100
- Feasibility of terahertz reflectometry for discrimination of human early gastric cancers, doi: 10.1364/BOE.6.001398
- Continuous-wave terahertz imaging with a hybrid system, *Appl. Phys. Lett.* 90, 091111 (2007), doi: 10.1063/1.2711183

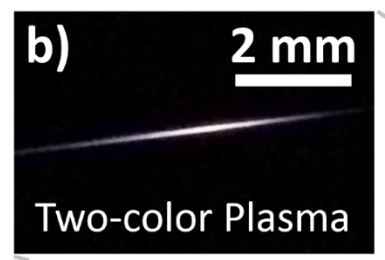


Merci de votre attention

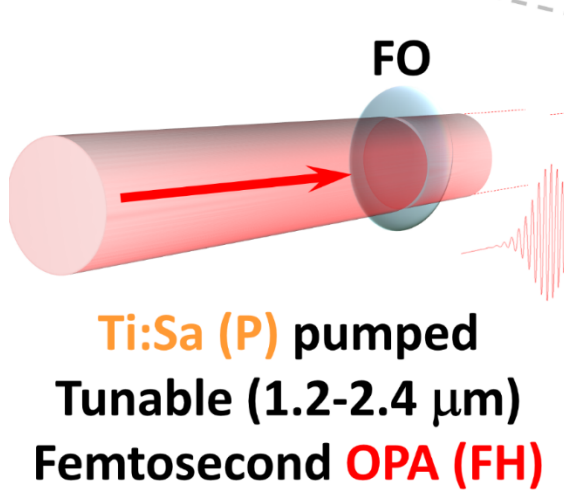
Posez toutes vos questions

Jeudi 18 mars 2021

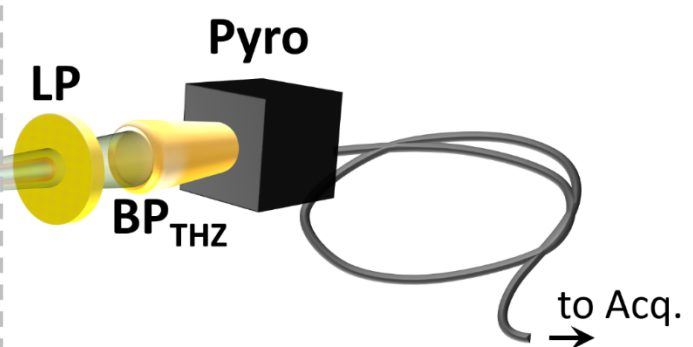
Génération / Détection par plasma



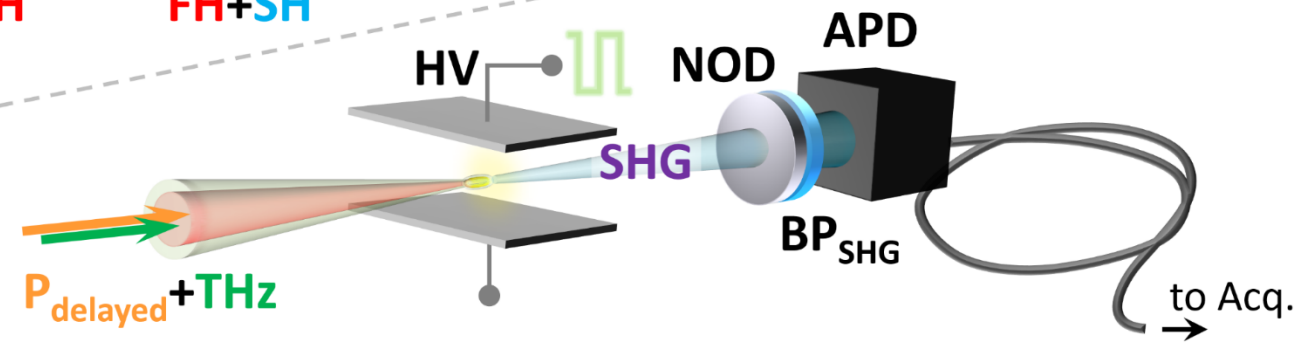
a) Generation Setup



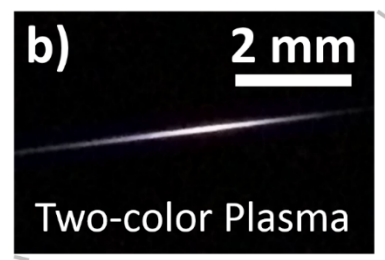
c) Pyroelectric (Incoherent) Detection



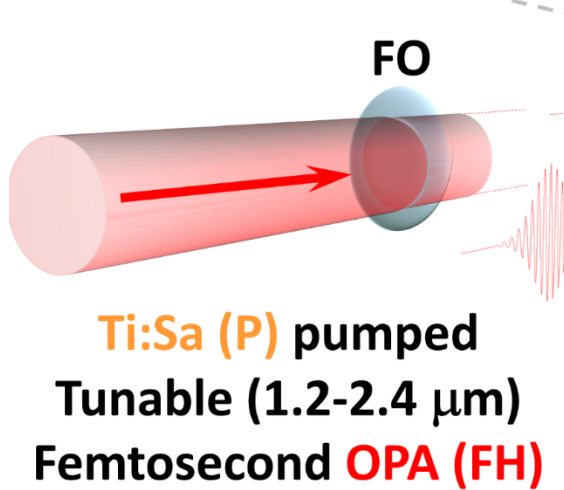
d) ABCD (Coherent) Detection



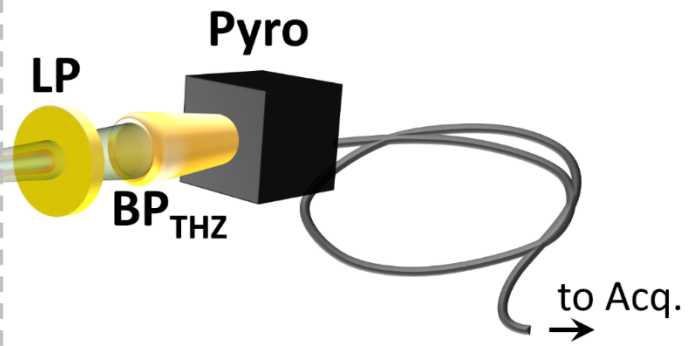
Génération / Détection par plasma



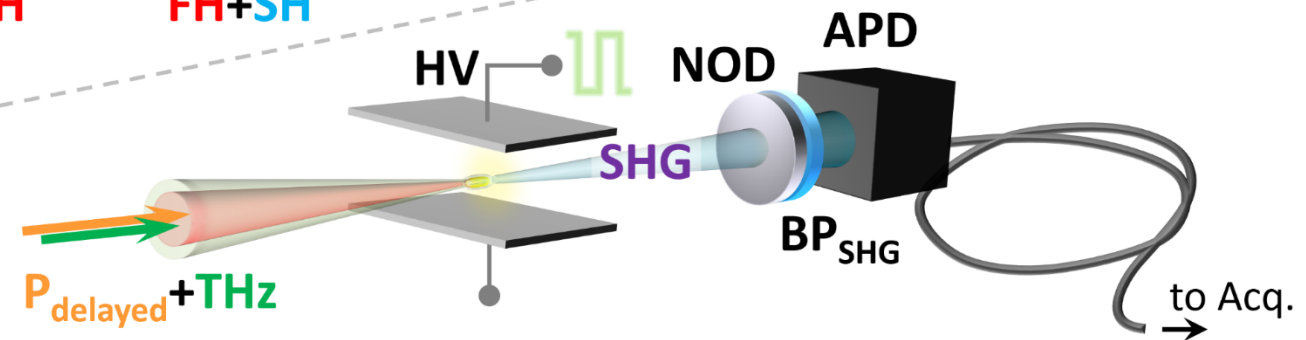
a) Generation Setup



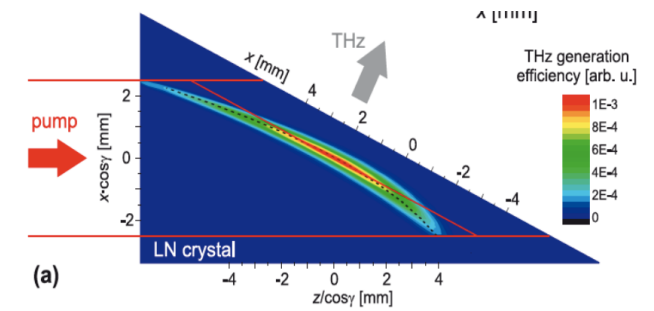
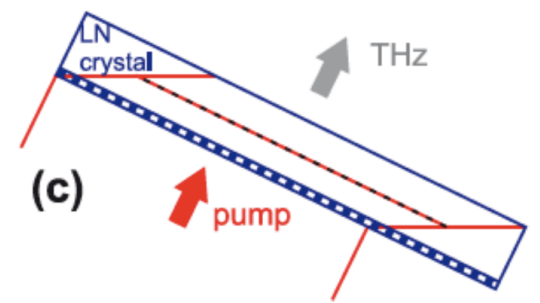
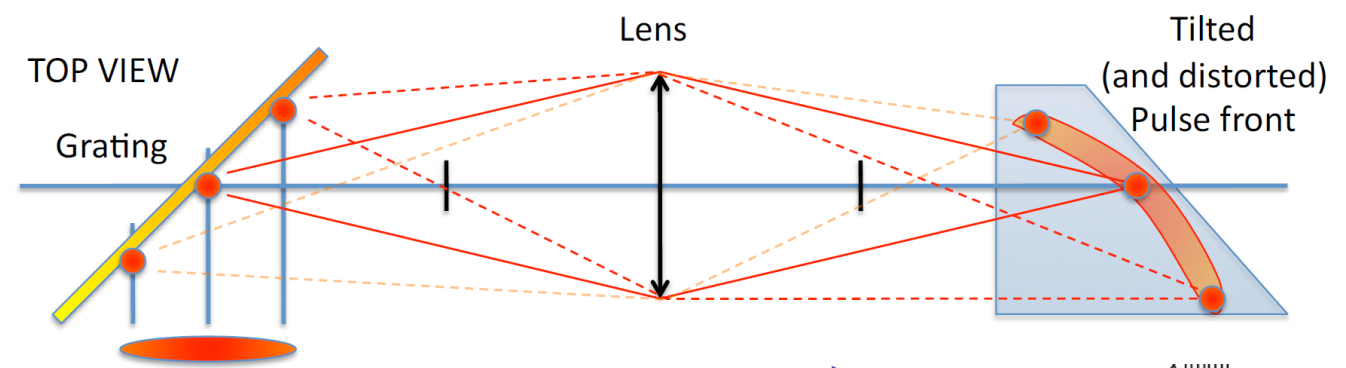
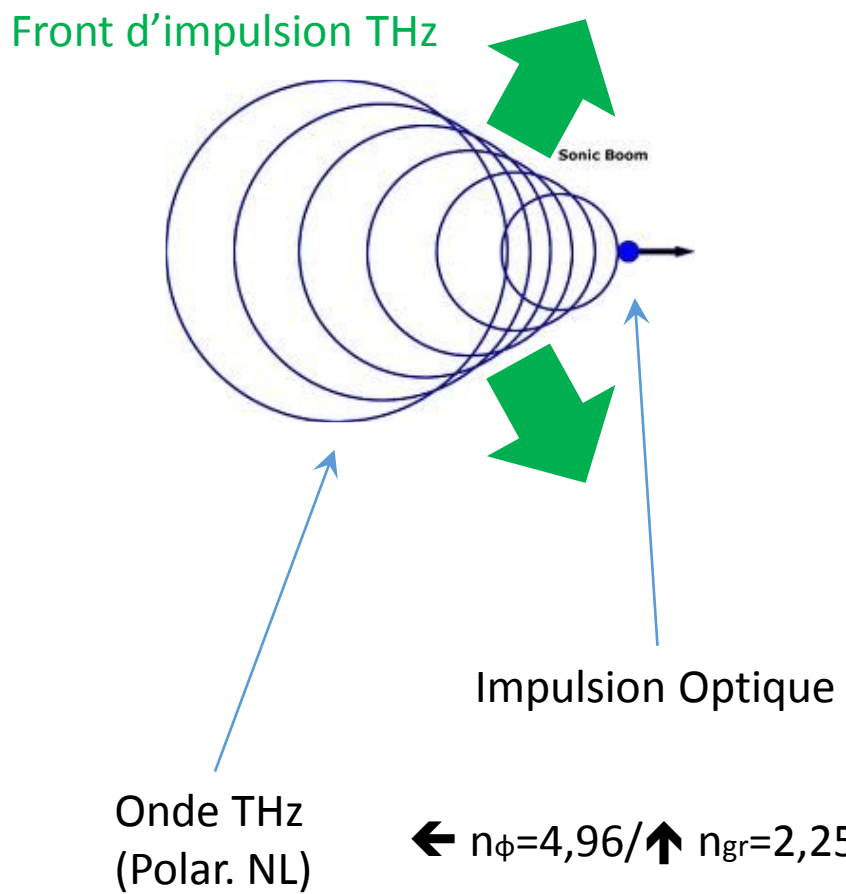
c) Pyroelectric (Incoherent) Detection



d) ABCD (Coherent) Detection

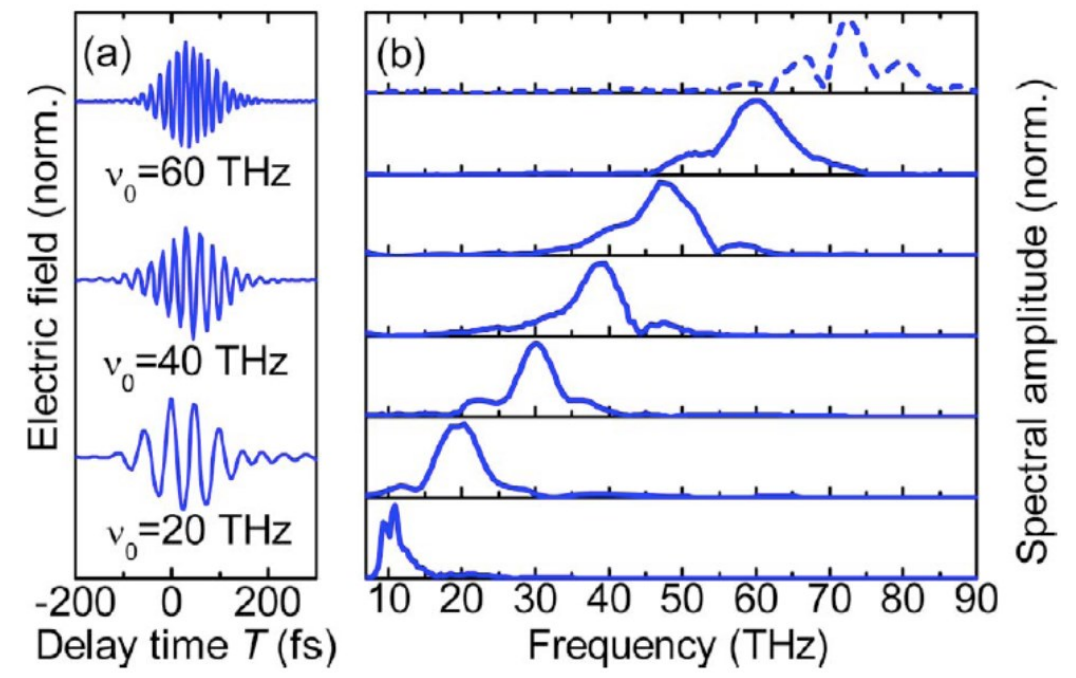
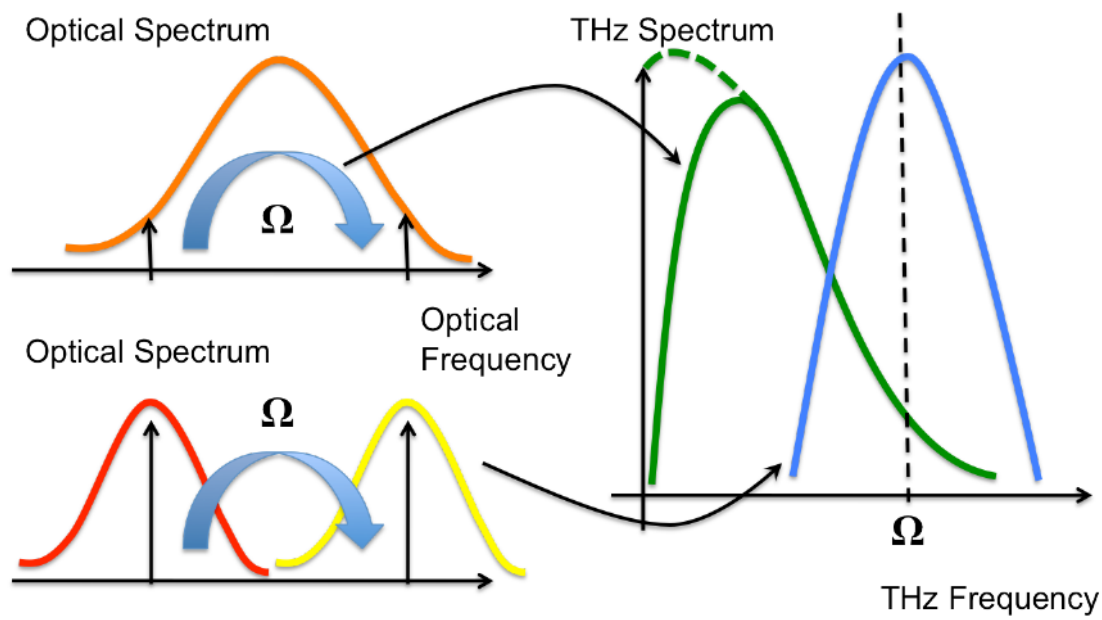


Vers les hautes énergies THz par impulsion



Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification, J. Hebling et al., Optics Express, 18 12311 (2010)

Accordabilité THz



Nécessite différents cristaux NL