



UNIVERSITE
CHAMBERY ANNECY
DE SAVOIE



Introduction et généralités sur les ondes THz

Le phénomène physique THz au sein des RNI

Jean-Louis Coutaz

IMEP-LAHC, UMR CNRS 5130

Université de Savoie au Bourget du Lac

coutaz@univ-savoie.fr



Les ondes THz

Ondes térahertz, rayons T...

Nouveaux termes « à la mode »

Ondes électromagnétiques

Ancienne dénomination « **infrarouge lointain** »

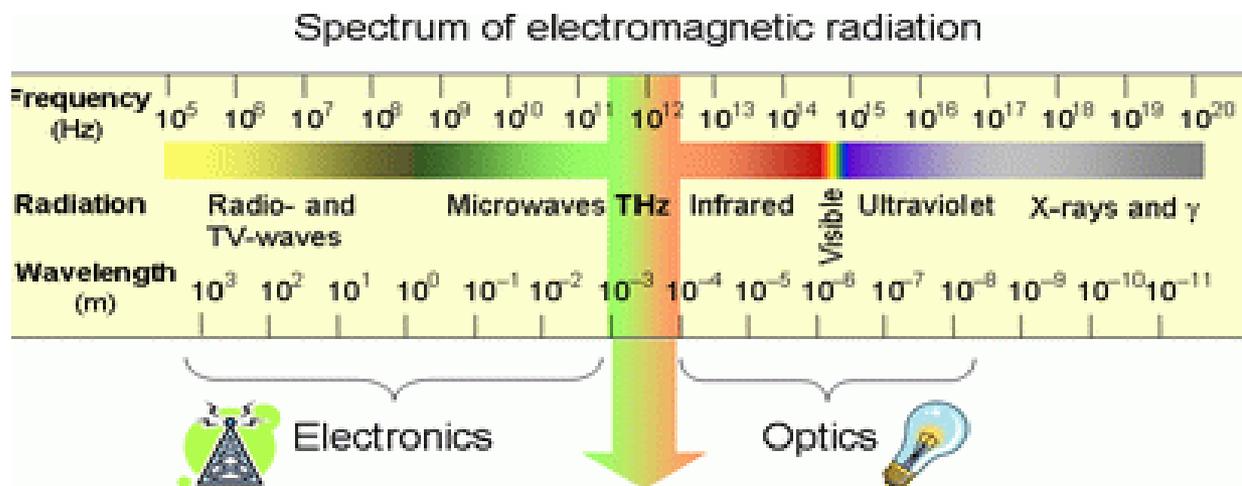
mais de nouvelles technologies qui permettent d'envisager des applications

Plan de cet exposé introductif

- spectre électromagnétique et domaine THz
- quelques propriétés physiques des THz
- comment ces ondes THz interagissent avec la matière
- technologie : sources, détecteurs...
- applications visées

Les ondes THz

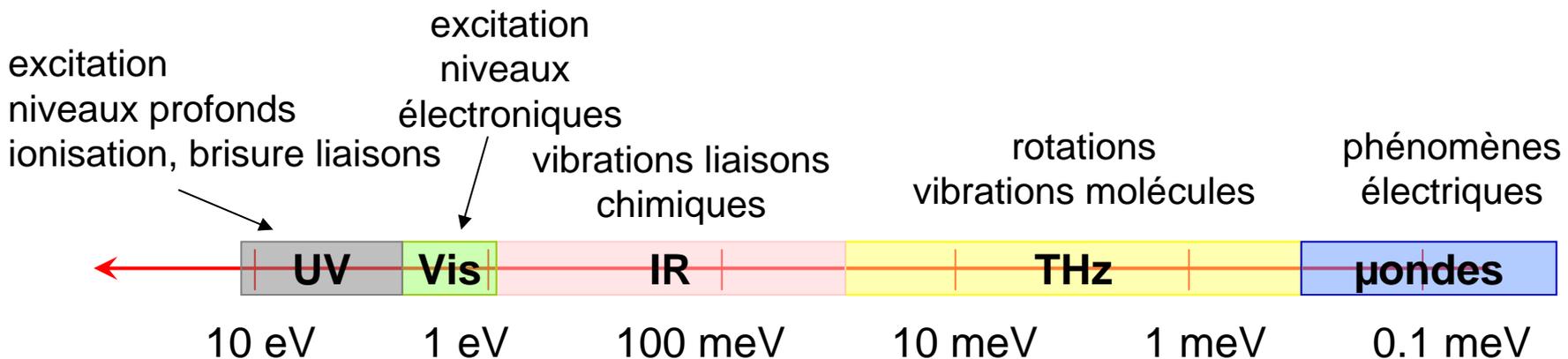
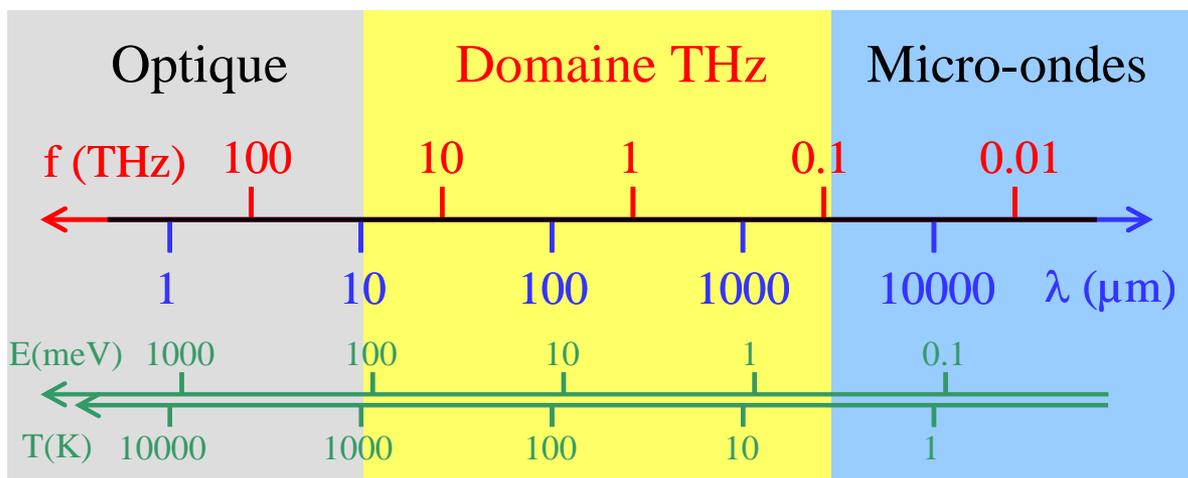
Téra = 10^{12} Hz



Longueur d'onde : 30 μm \rightarrow 3 mm
 Fréquence : 100 GHz \rightarrow 10⁴ GHz=10 THz
 Energie des photons : 0,4 \rightarrow 40 meV
 Température équivalente : 5 \rightarrow 500 K

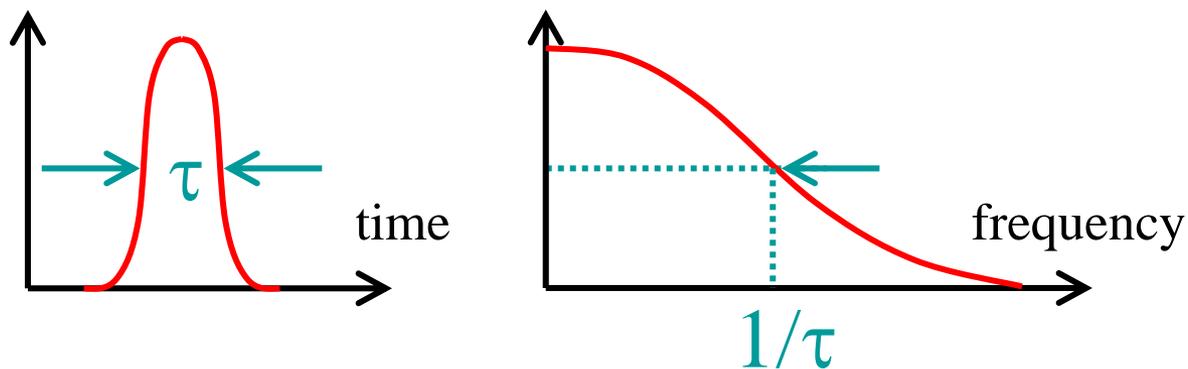


Rayonnement THz faiblement énergétique : le domaine du meV





Temps/fréquence pour les THz : le domaine de la picoseconde

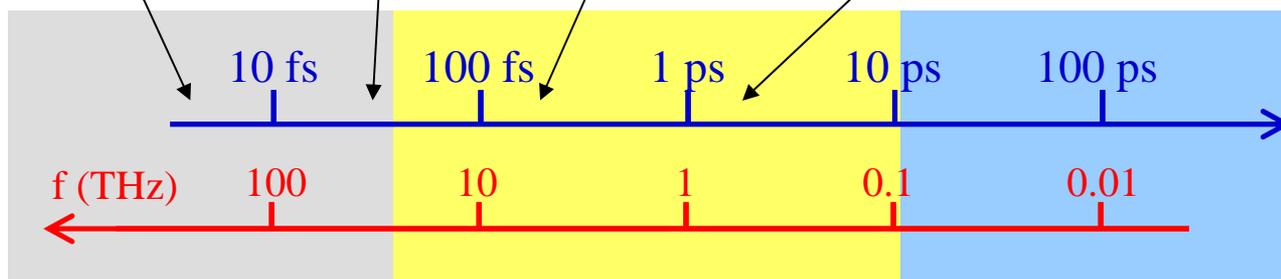


temps d'excitation d'un niveau électronique

temps entre 2 collisions des e- dans les métaux

temps de thermalisation de l'énergie (phonon)

temps d'une réaction chimique (petites molécules, ex : H₂O)





Coincées en l'optique et l'électronique

Equation de Maxwell-Ampère

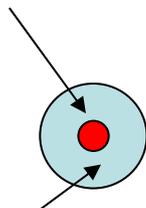
$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

source
du champ EM

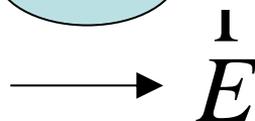
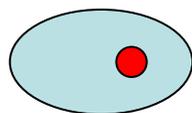
courant de
déplacement :
optique

courant de
conduction :
électronique

noyau

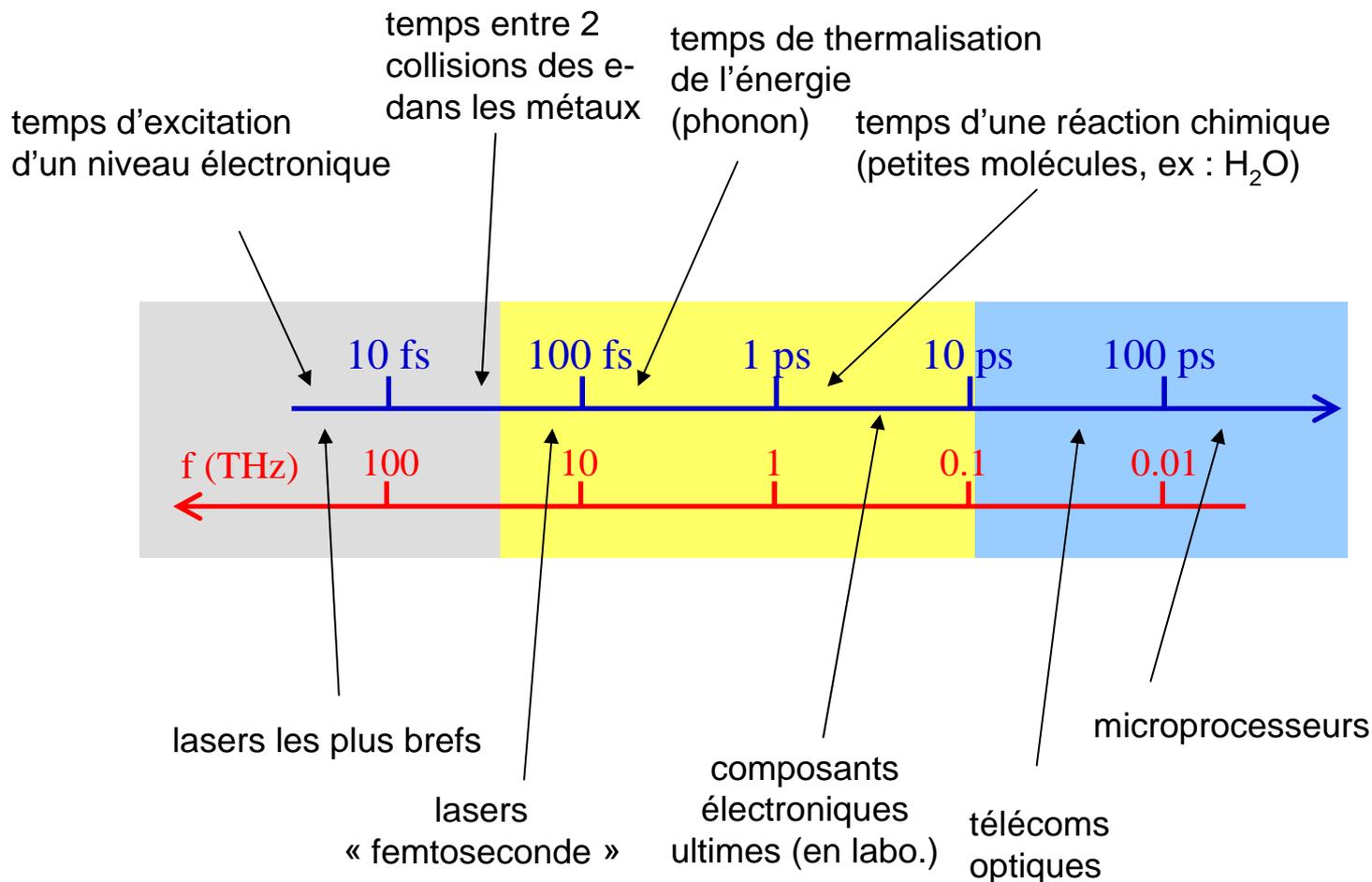


nuage
électronique

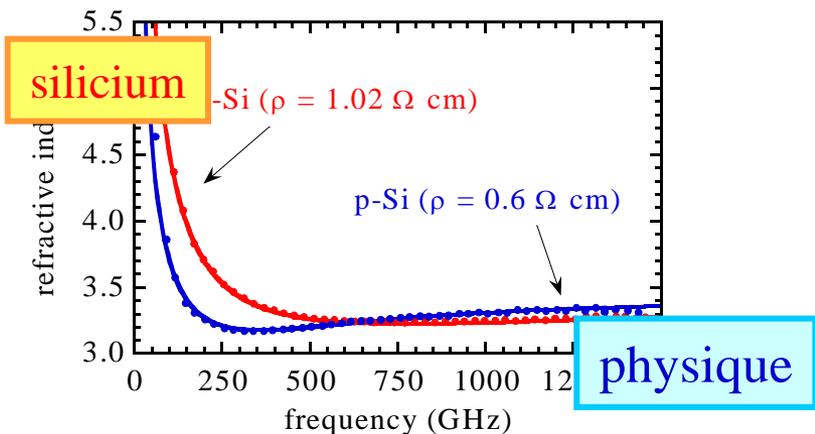




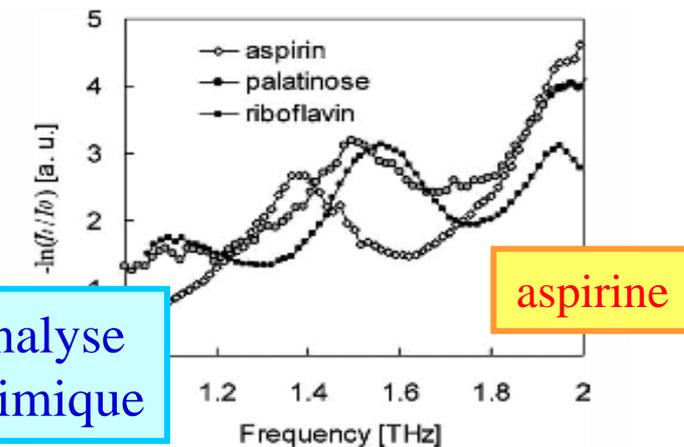
Le domaine de la picoseconde vu par les chercheurs et par les ingénieurs



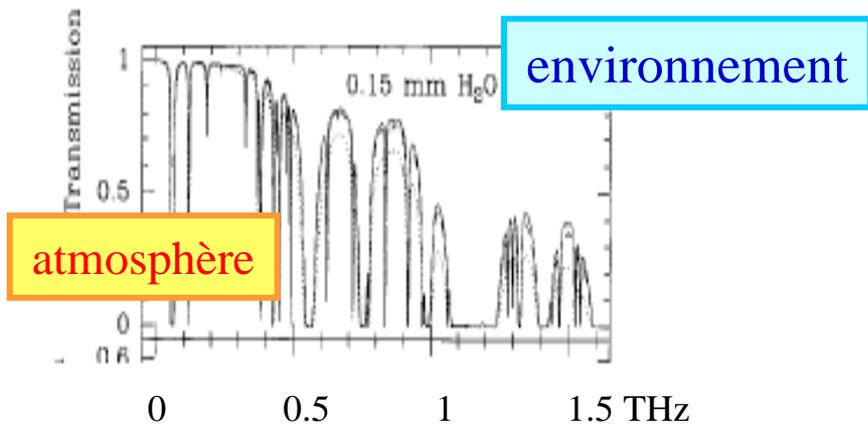
Pourquoi étudier le domaine THz ?



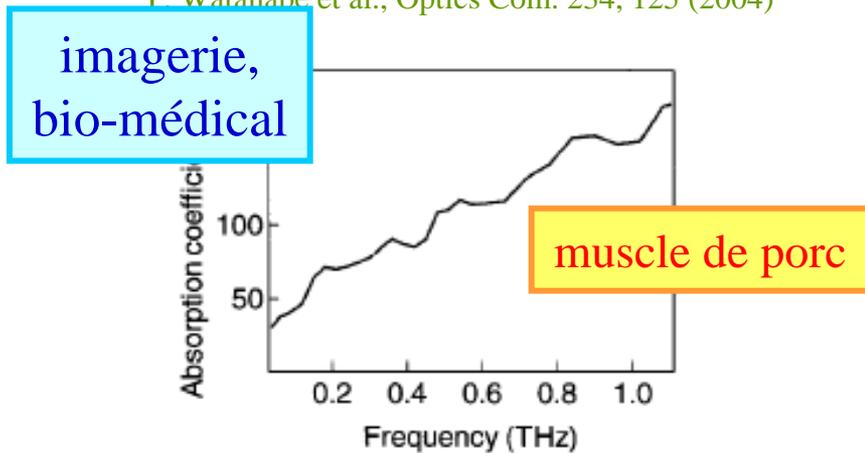
J.L. Coutaz et al. SPIE 3795, 457 (1999)



Y. Watanabe et al., Optics Com. 234, 125 (2004)



J. Pardo et al., IEEE Antennas and Propag. 49, 1683 (2001)

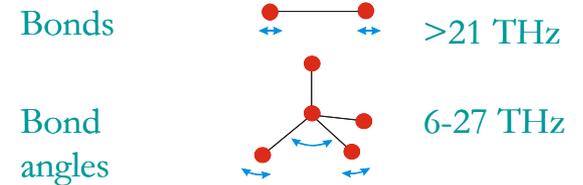


P. Han et al., Opt. Lett. 25, 242 (2000)

Interaction THz/matière

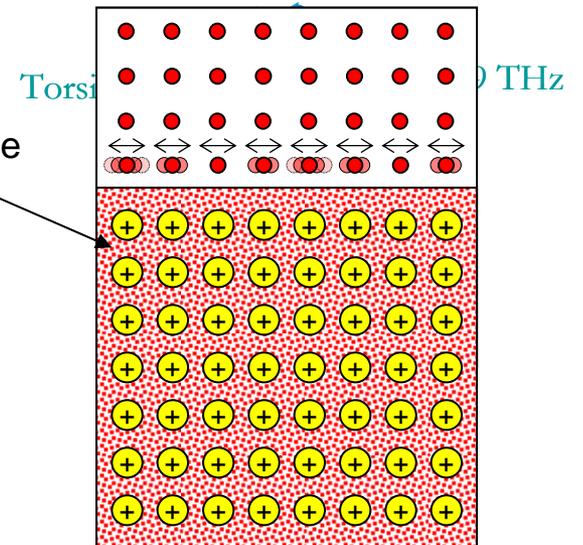
Energie \sim meV \rightarrow excitation de: Vibrations of

- rotations moléculaires (gaz, liquides)
 - en particulier des molécules polaires (ex: eau)

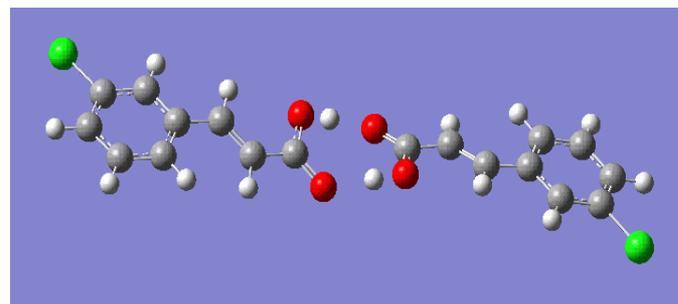
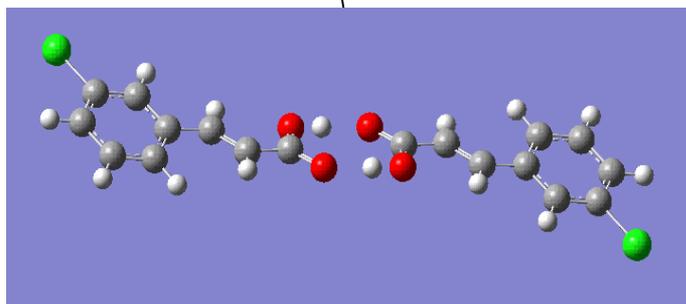
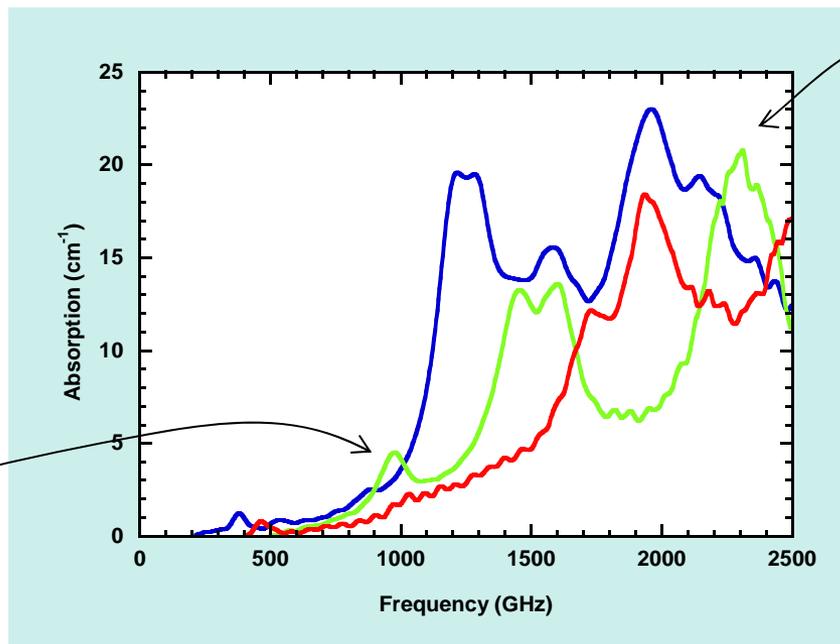
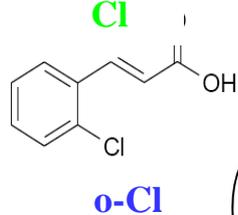
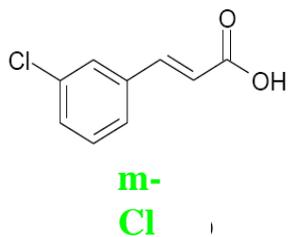
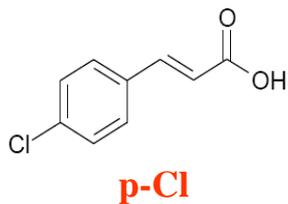


- Phonons (solides)
- Charges libres (métal, SC dopés, polymères)
- Etc. (supraconducteurs, puits quantiques...)

gaz électronique



Isomères de l'acide chlorocinnamique





A retenir !

Signatures spectrales spécifiques
gaz ET solides

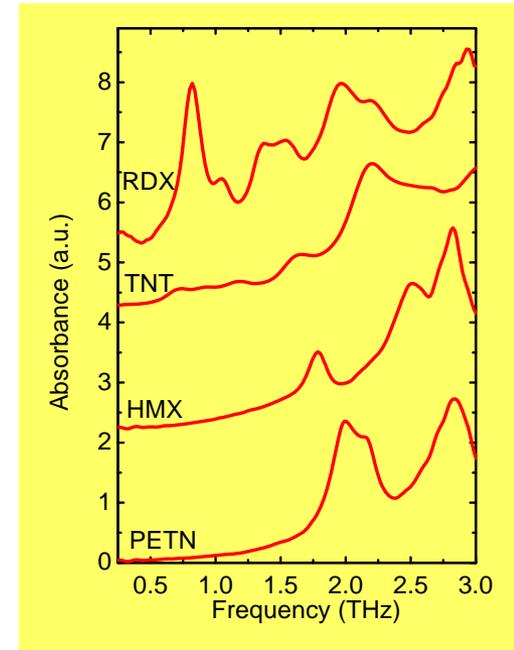
Spectroscopie

- capteurs
- environnement
- sécurité

Absorption

molécules polaires : eau
charges libres : métaux

Milieux diélectriques = transparents



Imagerie

- industrie
- médical
- sécurité

Exemple : détecter des tissus cancéreux

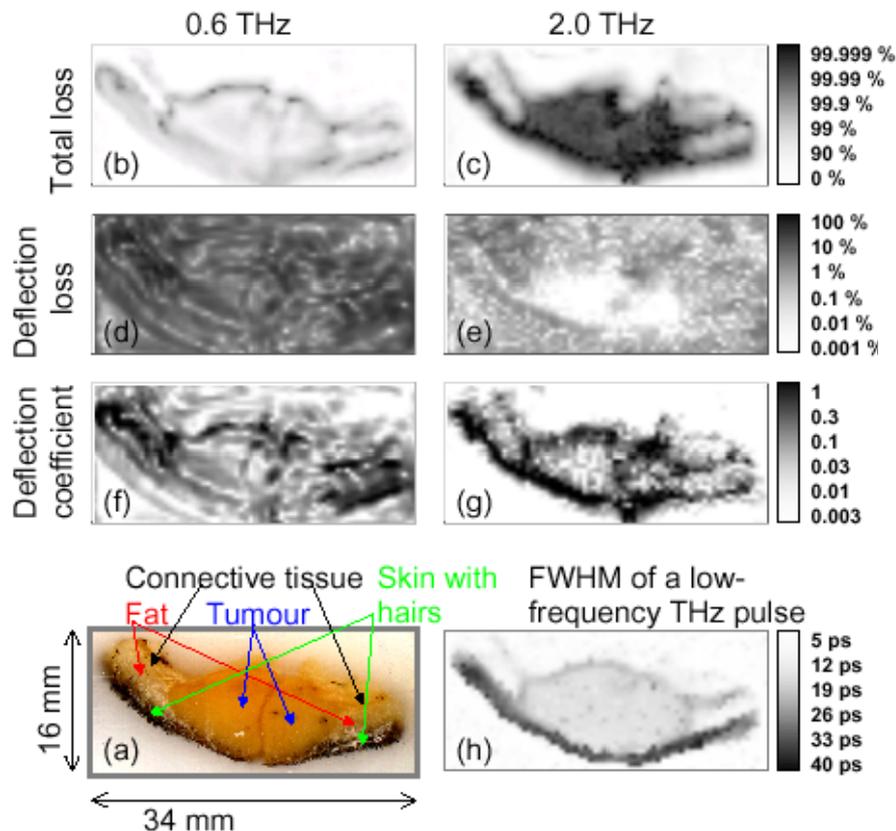


Fig. 3. (a) Optical image of the sample; (b) and (c): Total loss in transmission, (d) and (e): Loss induced by deflection; (f) and (g): Deflection coefficient. (h) Pulse duration (FWHM) of a low-frequency THz pulse. Click on Fig. 3(b,d,f) to see the data as a function of the frequency. (426 kB QuickTime movie)

T. Löffler et al.,
3 December 2001 / Vol. 9, No. 12 /
OPTICS EXPRESS 616

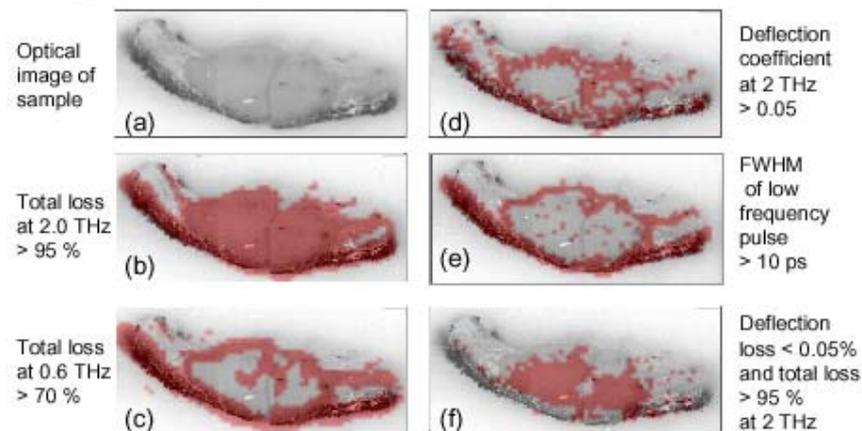


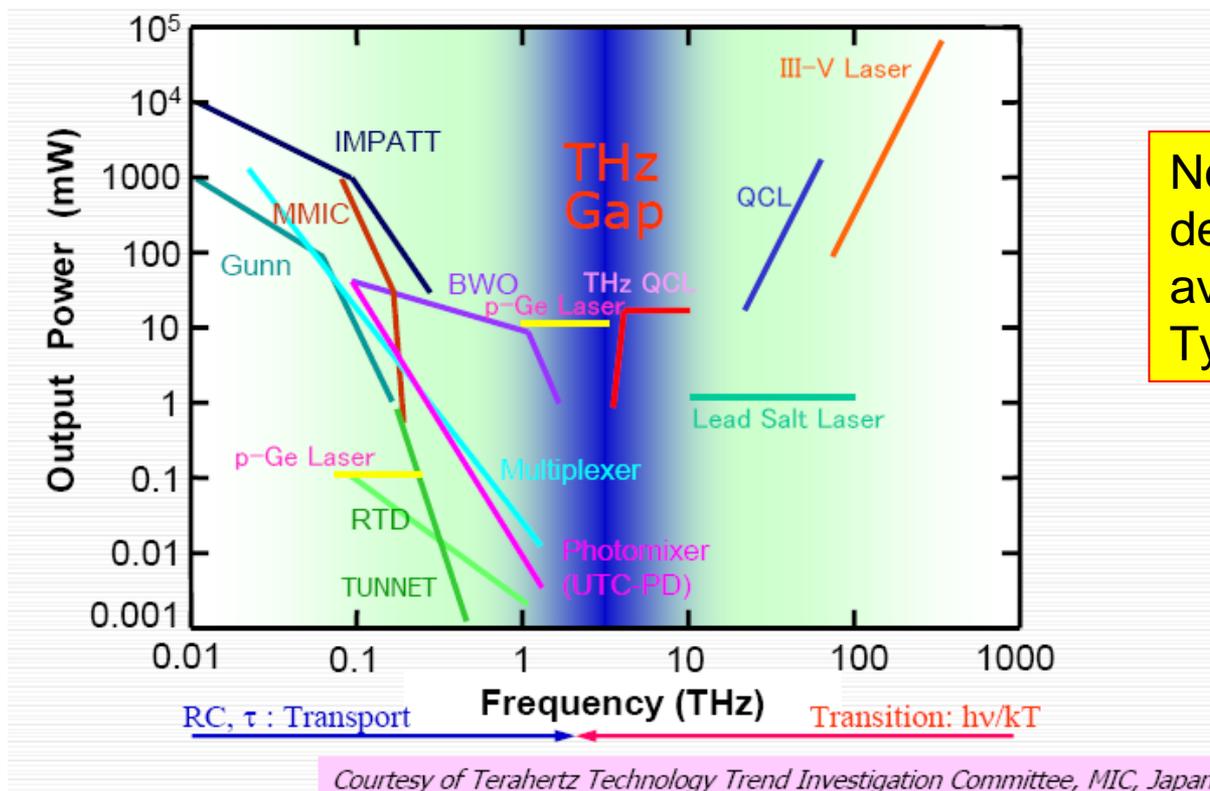
Fig. 4. Optical image of the sample (a) overlapped in (b) – (f) with a red mask generated by applying a threshold on various parameters derived from the THz data.



La technologie : gros problème !

Comment générer, détecter et manipuler ces ondes ?

Ex: sources



Nouvelles sources !
depuis ~1990
avant : corps noirs
Typ. 0.1~1 nW



Les sources

Aujourd'hui, sources "compactes" (~~laser à électrons, etc.~~)

Puissance ~ μW - mW

Rayonnement continu

- $< 0.3\sim 0.5$ THz électronique
 - sources 10-40 GHz et multiplicateurs de fréquence (diodes Schottky)
- $0.5\sim 2$ THz battement de fréquences optiques
- $> 2\sim 3$ THz lasers à cascade quantique

Rayonnement impulsionnel

- laser femtoseconde et redressement optique
 - optique non linéaire, photoconducteurs

Les sources



source	gamme spectrale (THz)	puissance	avantages	inconvénients
corps noir	toute la gamme	pW à 0,1 THz μ W à 10 THz	simplicité large bande	puissance incohérent
Gunn	0,1→1	100 mW CW 1 mW CW	compact	fréquence limitée
Impatt	→0,3	10 mW	compact	fréquence limitée
Tunett RTD	→0,4	10 μ W	compact	puissance fréquence limitée
Smith-Purcell	toute la gamme	100 nW	accordable	gros appareil
FEL	toute la gamme	très puissants → 100 W CW	puissance spectre	grands instruments
BWO	→0,2	10 μ W	compact accordable	bruyant fréquence limitée
lasers moléculaires	lignes spectrales	ex : CH ₃ OH 100 mW à 2,52 THz	pureté spectrale	stabilité, volumineux
lasers QCL	1,9 ←	10 mW	compact, rendement	cryogénie puissance
optoélectronique				
impulsionnel	0,1 → 60	μ W	spectre cohérent, aspect temporel	puissance limitée, résolution spectrale
CW battement optique	→ 3	μ W	compact, pureté spectrale	puissance faible



Les détecteurs

Signaux trop "hautes fréquences" pour être "observables" directement
(oscilloscopes...)

- *techniques d'échantillonnage (laboratoire)*

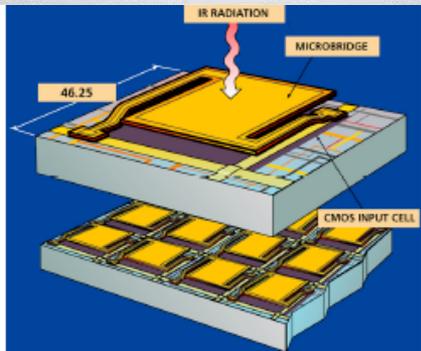
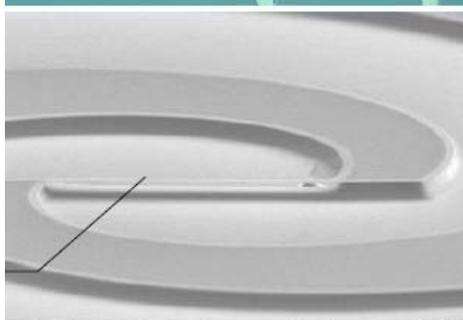
Signaux très faibles : intégration nécessaire

- *mesure du champ électrique (laboratoire)*

- techniques optoélectroniques

- *mesure de l'intensité-énergie (bolomètres)*

Exemple de bolomètres



Type	Domaine spectral (μm)	Temps de réponse	Réponse (V/W)	NEP (W/\sqrt{Hz})
extrinsèques [Blan]				
GeGa	30-160	100 ns	10^7	6×10^{-14}
SiAs	100-500	1 ns	2×10^3	10^{-11}
GaAs	100-350	10 ns	10^7	4×10^{-14}
bolomètres [Qmci]				
Ge 4,2 K	30-1000	10 ms	2×10^4	2×10^{-11}
Ge 1,5 K	30-1000	1 ms	2×10^4	5×10^{-13}
Si 4,2 K	2-2000	1 ms	$1,5 \times 10^4$	2×10^{-12}
InSb 4,2 K	200-2000	10 μs	10^3	10^{-12}
InSb 1,5 K	200-2000	10 μs	2×10^3	5×10^{-13}
InSb 4,2 K champ magnét.	100-2000	1 μs	5×10^3	2×10^{-12}
bolomètres HEB				
Nb, NbN	large bande	ns		$10^{-12} \sim 10^{-14}$
cellule de Golay optoélectronique	large bande	ms-s	10^{-4}	$\times 10^{-10}$
photo-commutateur	large bande → 30 THz	sub-ps	$0,5-1 \times 10^3$	$\sim 3 \times 10^{-10}$
cristal EO	très large bande → 60 THz	sub-ps		



Les applications

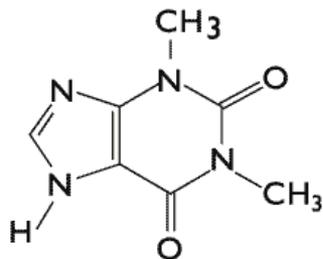
Liste non exhaustive

Panorama rapide (voir autres exposés au cours de cette journée)

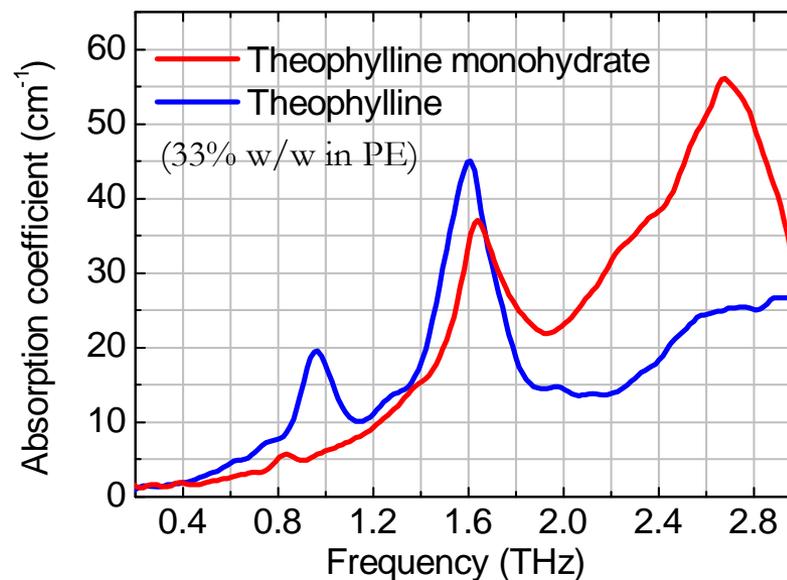
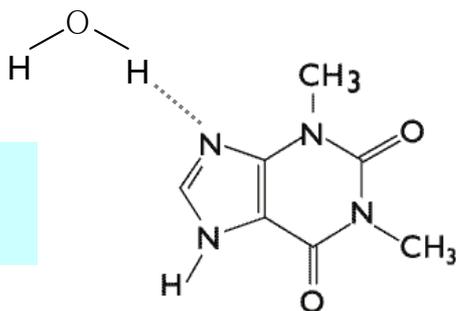
- Spectroscopie
- Sécurité
- Capteurs pour l'industrie
- Bio-médical ?
- Télécoms
- Etc.

Spectroscopie

Theophylline



Theophylline monohydrate



Theophylline is used as an oral bronchodilator for asthma therapy by millions of people everyday. However, it is always a difficulty to judge whether it is hydrated or anhydrous before companies sell it or patients take it (anhydrous drugs will transfer to hydrated ones when they are processed or stored in ambient air).

X.C. Zhang, NATO workshop, Spiez CH, 2006

Sécurité

Résolution

$\sim \lambda \sim 1 \text{ mm}$

Tissus, cartons, cuir...

- **transparents**

Eau, corps humain, objets humides

- **absorbants**

Métaux

- **réfléchissants**



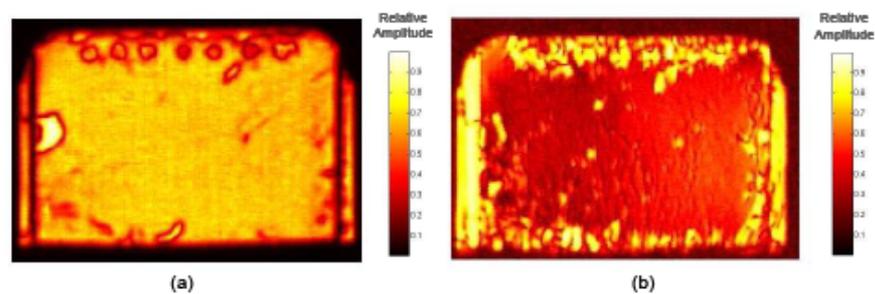
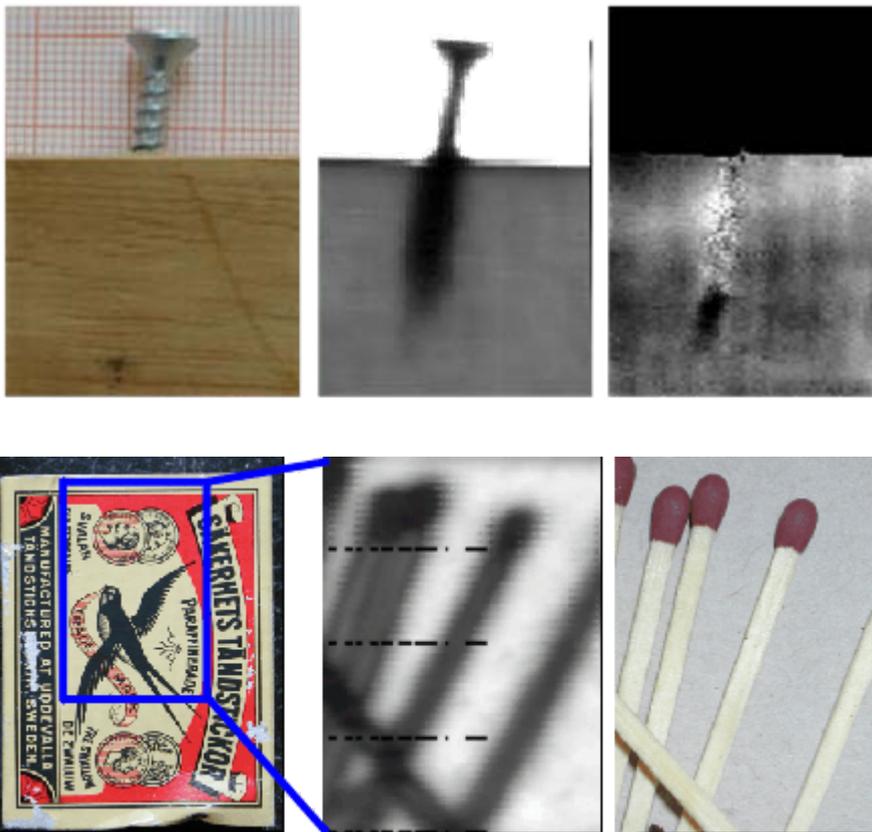


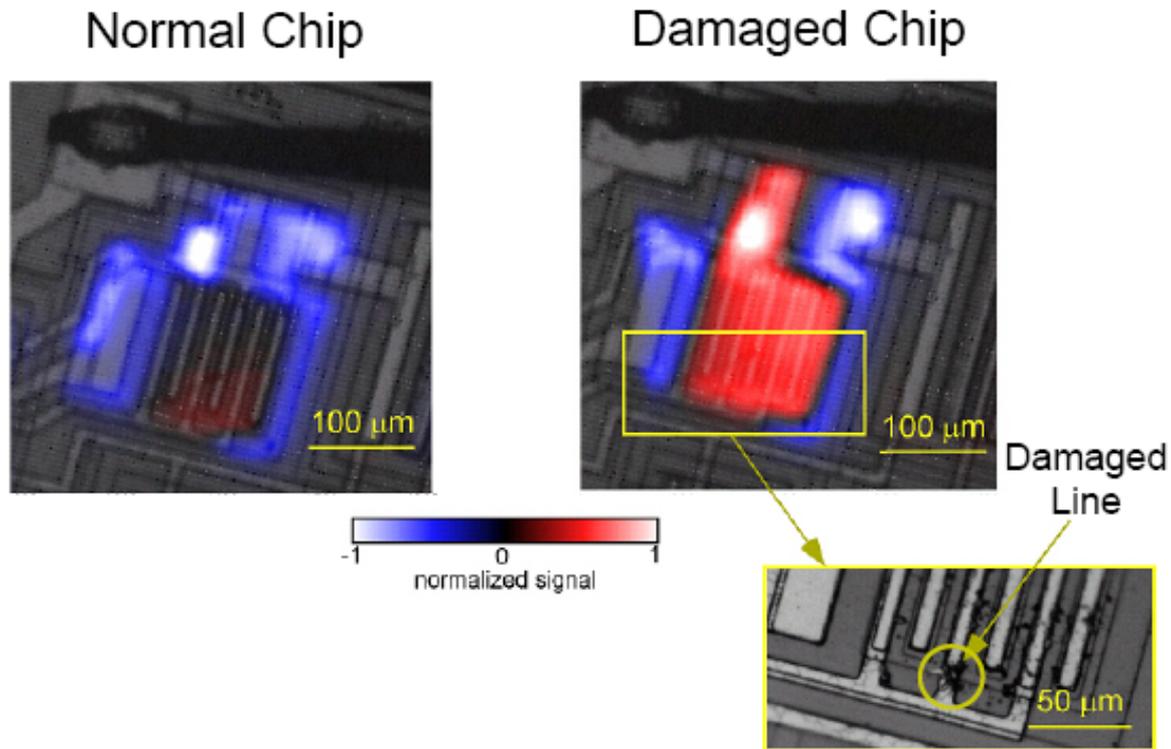
Figure 9. THz images of the Chinook Fuselage Step Door (a) maximum amplitude, normal inspection and (b) mean frequency amplitude between 0.62 and 0.68 THz, 10° angled inspection.



Imagerie pour l'industrie/sécurité



Imagerie : microélectronique



LTEM can locate the fault circuit blocks

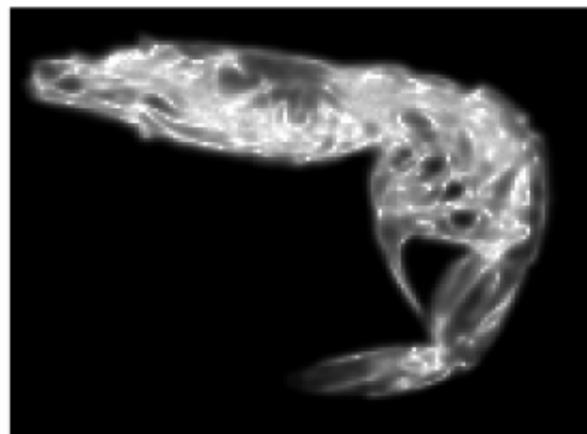
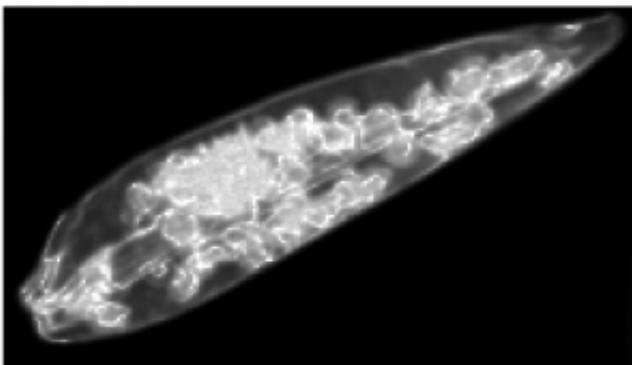


Imagerie : biologie

Red pepper



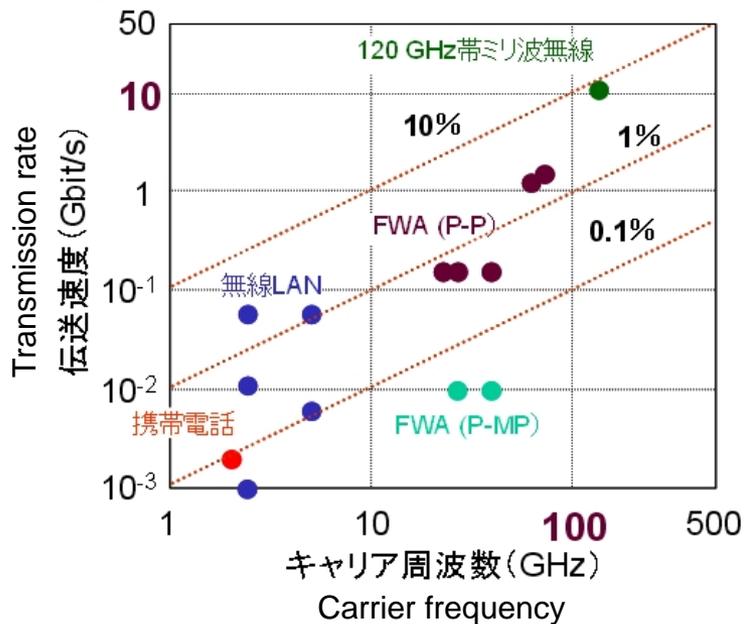
Prawn



@1THz

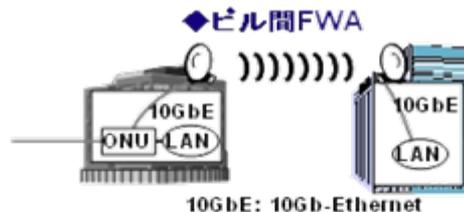
courtesy K. Kawase, Nagoya University

Les technologies du futur



Super Hi-Vision

- Available in 2025
- Scanning lines >4000
- Uncompressed at **24Gbps**
- Carrier freq. **~500GHz**



◆災害復旧



◆デジタルシネマ

4K Delivery System:
3~7.2 Gbit/s



◆イベント会場



◆実時間HDTV 信号伝送

非圧縮HDTV信号: 1.5 Gbit/s

放送中継



遠隔医療





Conclusion

Domaine des ondes THz

très intéressant (recherche fondamentale et appliquée)

des progrès nécessaires pour des applications grand public

Y-a-t-il danger pour les êtres humains ?



Merci de votre attention