

Applications industrielles et militaires

Détection des liquides et solides dans le domaine THz

F. GARET

IMEP-LAHC, UMR CNRS 5130,

University of Savoy, 73376 Le Bourget du Lac, France



Introduction

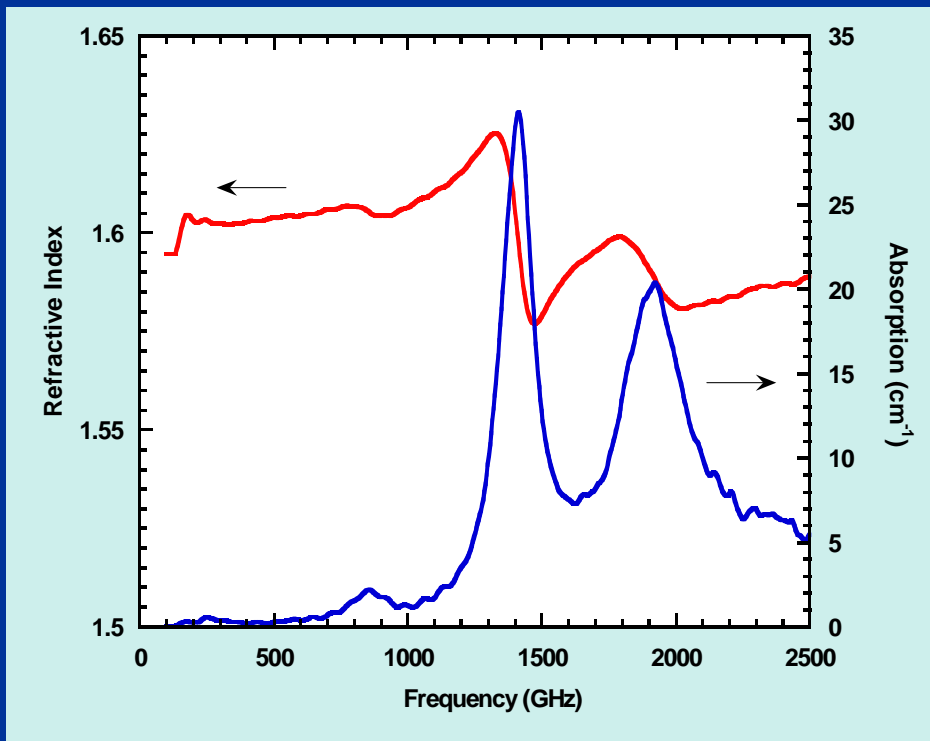
- Optoélectronique THz à l'IMEP+LAHC
 - Depuis 1995
 - Spectroscopie THz dans le domaine temporel (THz-TDS)
Caractérisation précise (métrologie) de matériaux et dispositifs
- Les applications THz
 - « Nouveau » domaine de fréquences
 - Interactions ondes-matière
 - Grand nombre d'applications « potentielles » :
détection, imagerie (militaire, sécurité), astronomie mm, physique du solide, chimie ultrarapide, ...

Les grandes lignes

- Comportement THz des matériaux
 - Matériaux « sensibles »
 - Matériaux de « dissimulation »
 - Quelques liquides
- Les Applications et Systèmes aujourd'hui ...
 - La Sécurité / défense
 - Pharmacie
 - Contrôle non destructif dans « l'industrie »
 - Le THz et l'archéologie
- Les limites de la technique aujourd'hui
- Conclusion

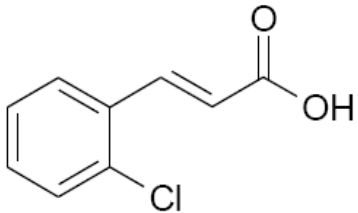
Identification de composés Chimiques

- Energie d'un photon THz : $\text{meV} \sim$ Energie de vibration moléculaire
- “Signatures THz” typiques \longrightarrow Identification Chimique

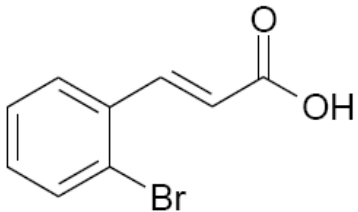


*Bromocinnamic
Acid
(o-Br)*

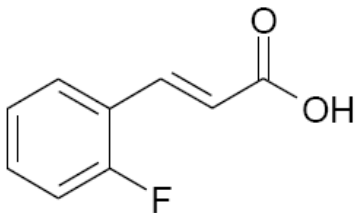
Identification de différents acides cinnamiques (molécules proches)



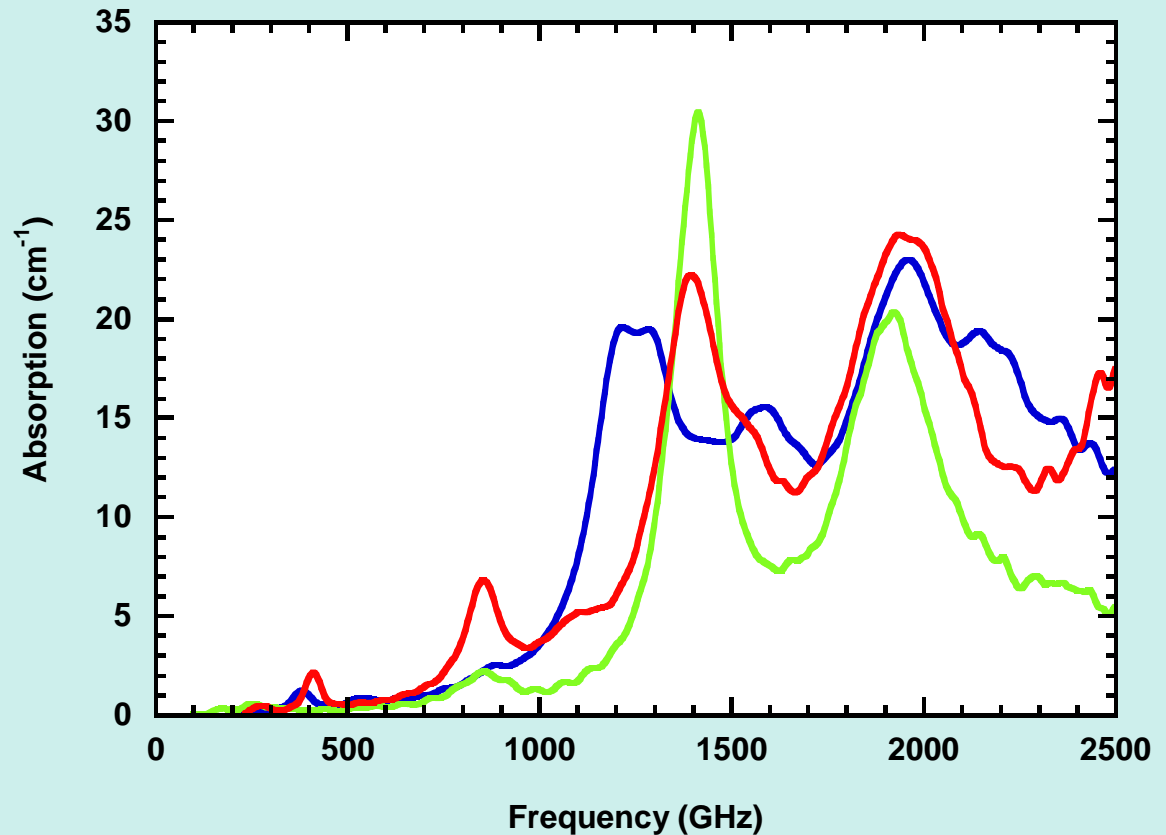
o-Cl



o-Br



o-F



Comportements THz des matériaux

■ Matériaux solides

Exemple de matériaux à détecter

- Explosifs
- Drogues

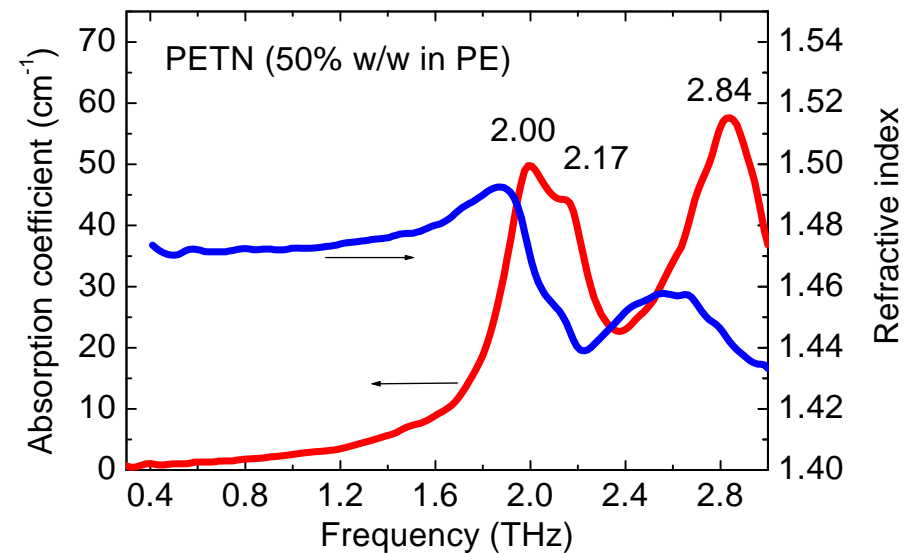
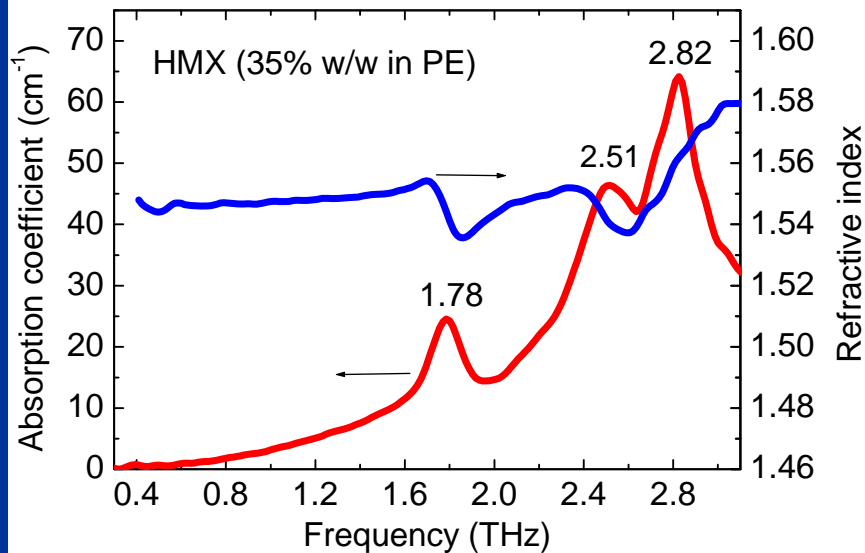
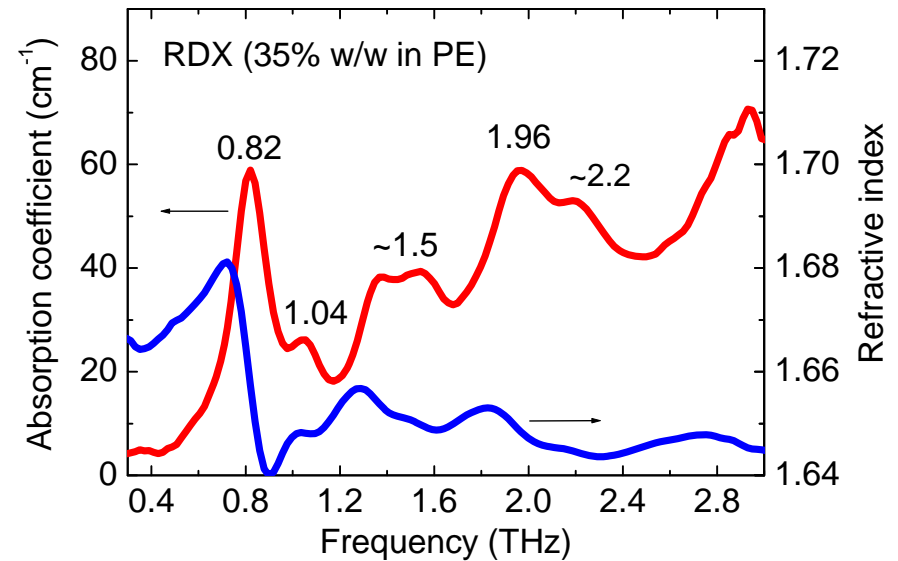
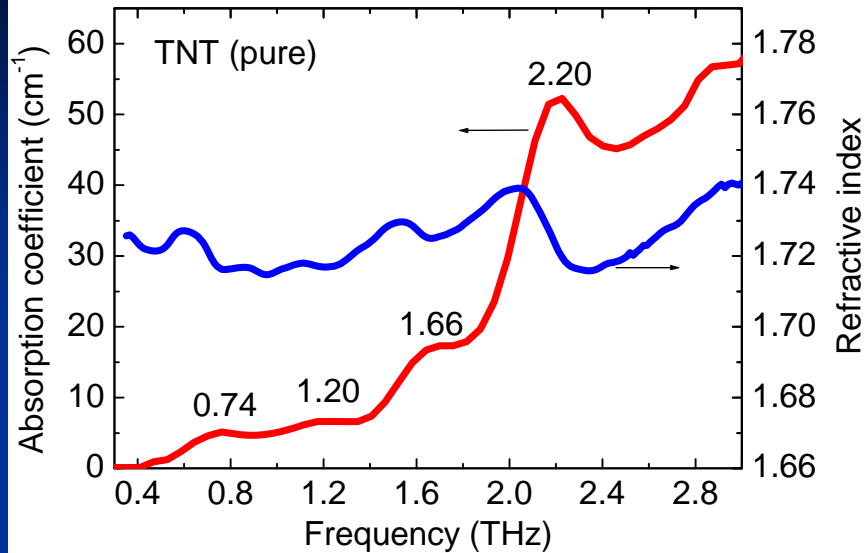
Matériaux de « dissimulation »

- Vêtements
- Matériaux de construction
- Matériaux d'emballage

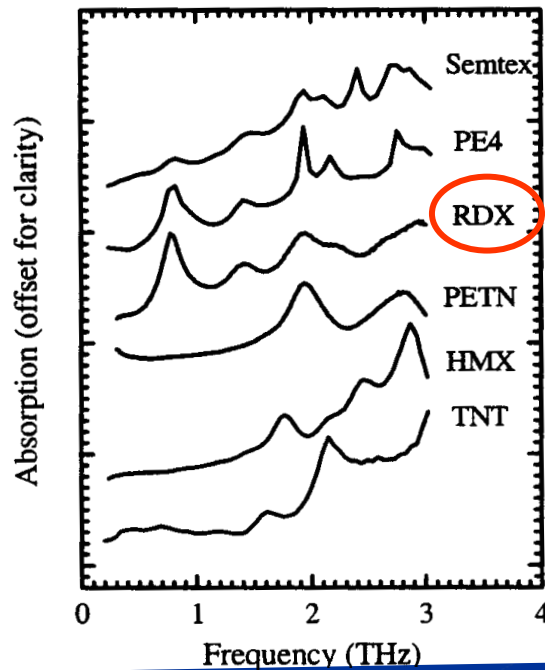
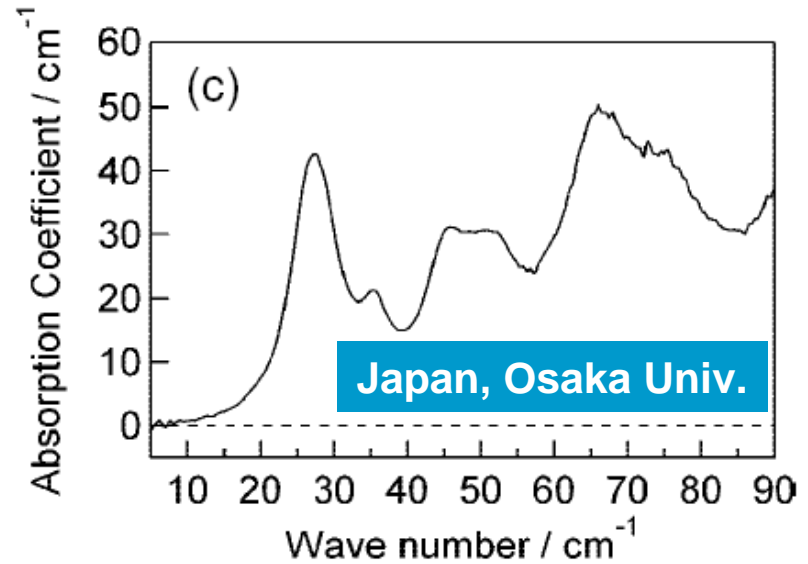
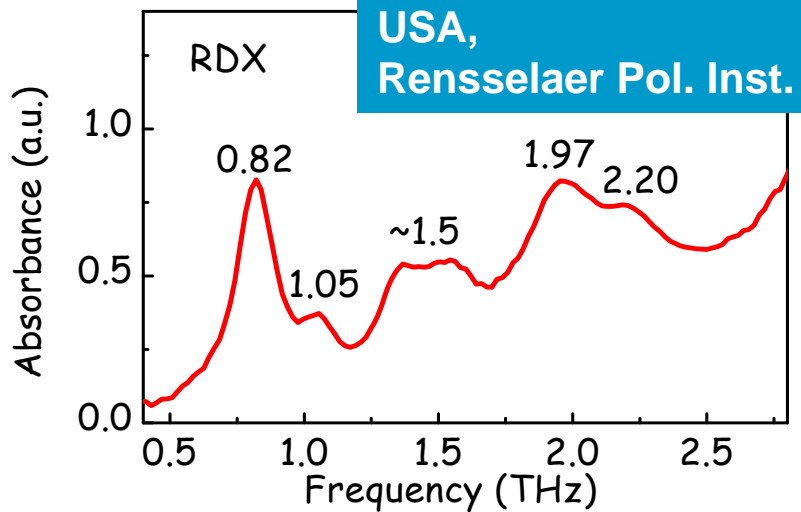
■ Matériaux liquides

- Milieux aqueux
- Liquides polaires
- Autres exemples : des huiles

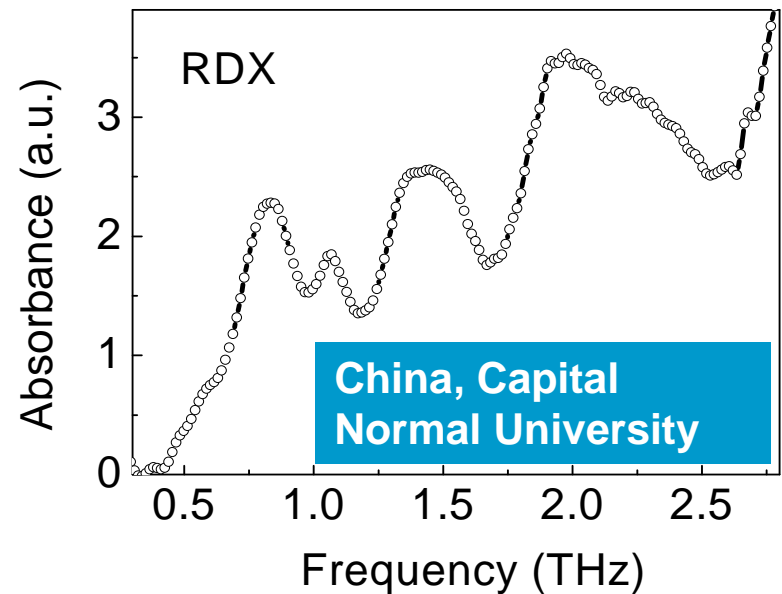
Signatures de substances pyrotechniques*



■ Comparison suivant provenance (RDX+liant-C4)



UK, TeraView, Inc



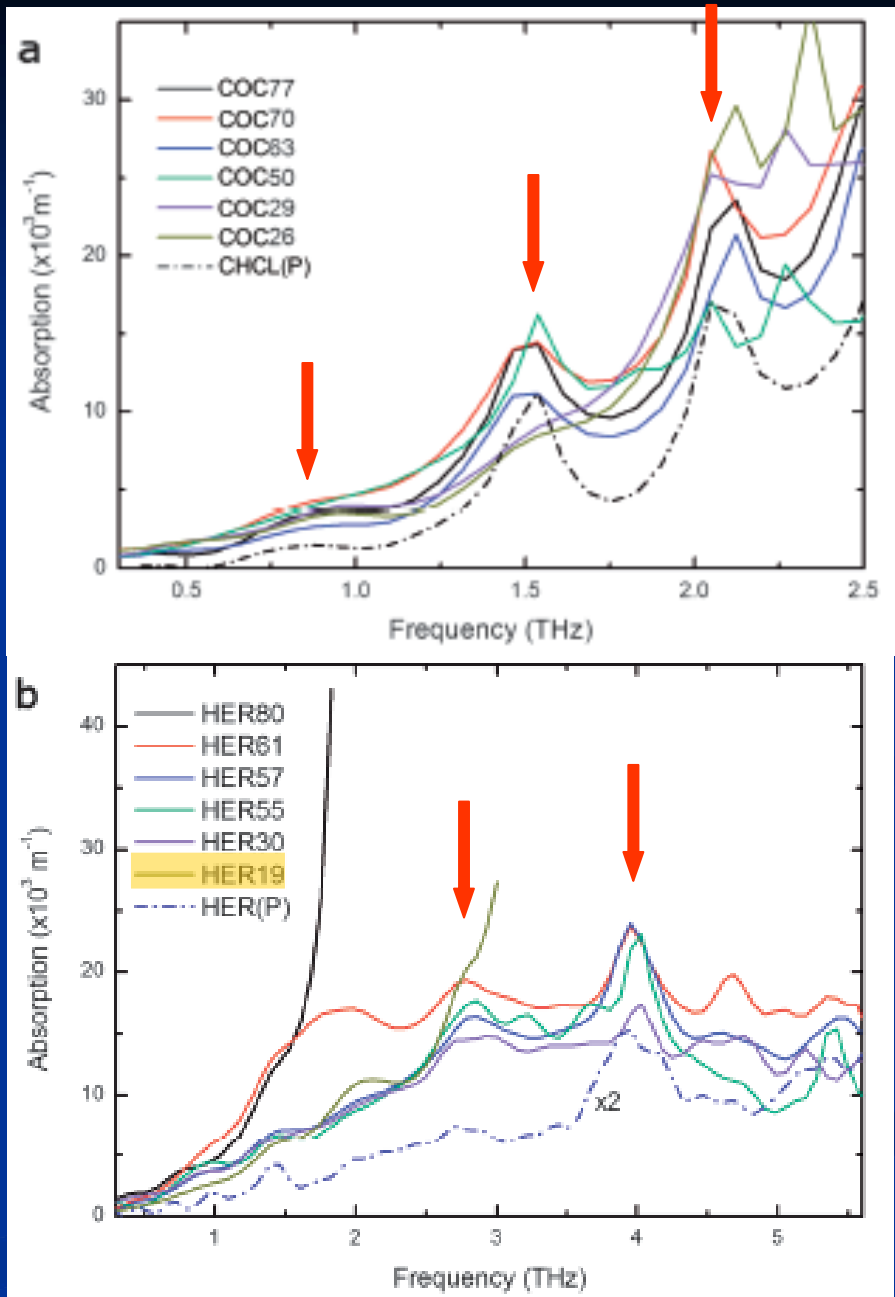
■ Les raies d'absorption des principaux explosifs

Explosive & Related Compounds	Measured Absorption Peak Position (THz)
TNT	1.66, 2.20, 3.70, 4.45, 5.55, 8.27, 9.14, 9.78, 10.64, 11.01, 13.86, 15.15, 16.95, 17.36, 19.17, 19.87
RDX	0.82, 1.05, 1.50, 1.96, 2.20, 3.08, 6.73, 10.34, 11.34, 12.33, 13.86, 14.54, 17.74, 18.12, 20.13
HMX	1.78, 2.51, 2.82, 3.42, 5.32, 6.20, 11.30, 12.00, 12.56, 12.96, 13.75, 14.55, 18.18, 18.51, 18.60, 19.40
PETN	2.0, 2.84
Tetryl	5.97, 10.11, 11.28, 14.67, 16.14, 18.36
2-amino-4, 6-DNT	0.96, 1.43, 1.87, 3.96, 5.07, 6.27, 8.49, 9.87, 10.77, 12.15, 13.44, 16.68
4-amino-2, 6-DNT	0.52, 1.24, 2.64, 3.96, 5.04, 5.82, 7.53, 9.30, 10.20, 11.13, 13.86, 14.97, 17.70
4-NT	1.20, 1.37, 1.86, 6.75, 8.85, 10.83, 14.04, 15.66, 18.51
1,3,5-TNB	4.17, 4.62, 10.05, 11.19, 13.80, 15.75, 19.05
1,3-DNB	0.94, 1.19, 2.37, 10.56, 12.18, 15.33, 17.13
1,4-DNB	3.24, 3.96, 5.55, 10.38, 12.45, 13.29, 15.21, 15.54
2,4-DNT	0.45, 0.66, 1.08, 1.38, 2.51, 4.96, 8.86, 10.58, 11.62, 12.81, 14.34, 15.74, 19.05, 20.00
2,6-DNT	1.10, 1.35, 1.56, 2.50, 5.61, 6.75, 9.78, 11.43, 13.32, 13.89, 15.39, 17.25
3,5-dinitro aniline	0.96, 1.20, 3.18, 4.62, 5.04, 5.91, 7.44, 10.62, 10.98, 14.46, 16.41, 18.18
2-nitro diphenyl anine	2.19, 2.58, 2.88, 3.45, 5.13, 6.18, 7.56, 10.08, 12.33, 13.05, 15.00, 15.60, 16.29, 17.34

■ Les Drogues

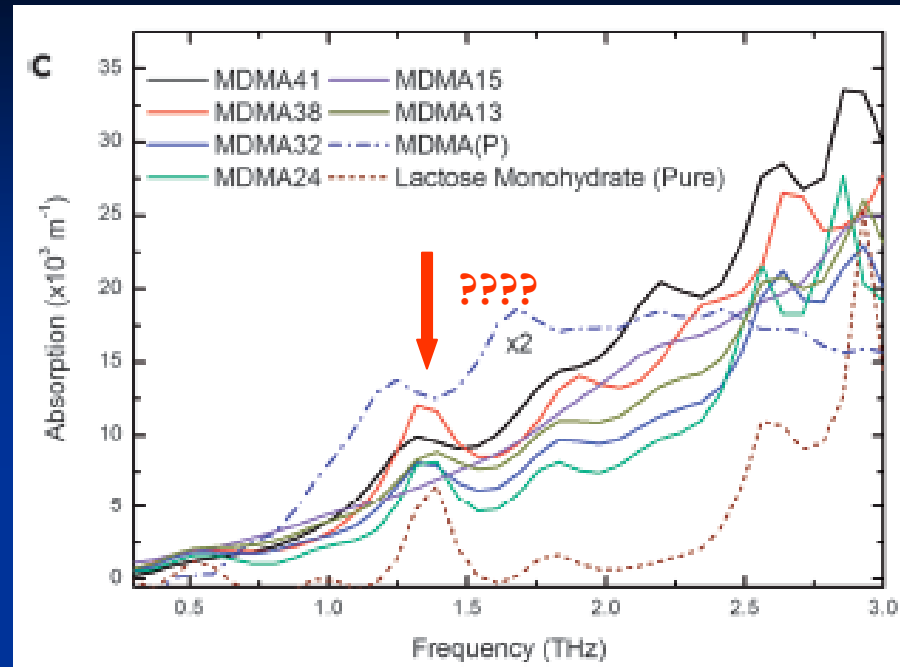
Droque + diluents

Sample label	Drug percentage	Adulterants
Cocaine hydrochloride		
COC77	77	Caffeine
COC70	70	Caffeine, hydroxyzine
COC63	63	Lactose, diltiazem
COC50	50	Diltiazem
COC29	29	Lidocaine, benzocaine
COC26	26	Lidocaine, tetramisole
Heroin		
HER80	80	Unknown
HER61	61	Caffeine, griesofulvin
HER57	57	Caffeine
HER55	55	Unknown
HER30	30	Caffeine
HER19	19	Caffeine, paracetamol
MDMA		
MDMA41	41 (Mickey Mouse)	Unknown
MDMA38	38 (Playstation)	Lactose
MDMA32	32 (Euro)	Lactose
MDMA24	24 (Dolphin)	Lactose
MDMA15	15 (Iron Cross)	Trace of MDE
MDMA13	13 (Smiley Face)	Lactose



* A.D. Burnett *et al.*, *Analyst* (The Royal Society of Chemistry), vol. 134, 1658-1668 (2009)

■ Les Drogues



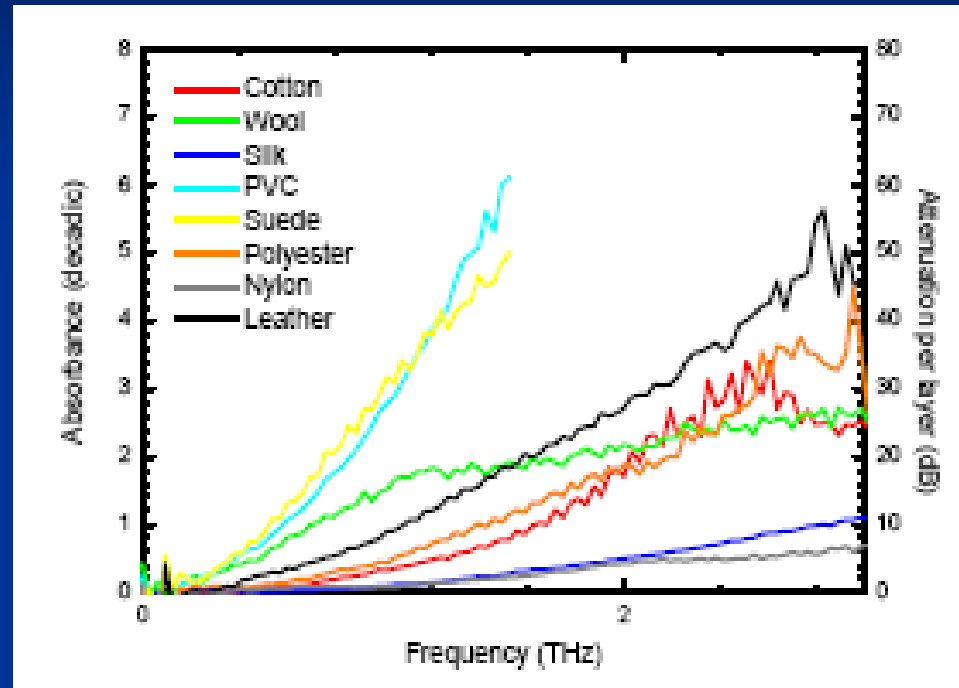
-Faible transmission ... mais des signatures spectrales spécifiques !

Précautions :

- Identification de la signature spectrale ... du diluant (MDMA)
- L'additif/diluant cache les pics d'absorption (héroïne)

Caractéristiques de matériaux de dissimulation

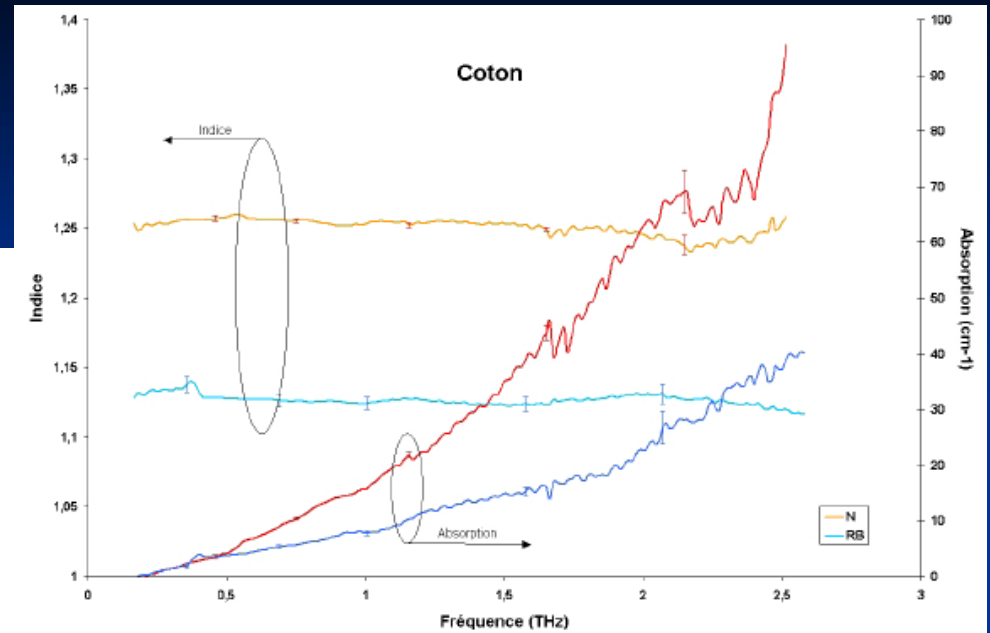
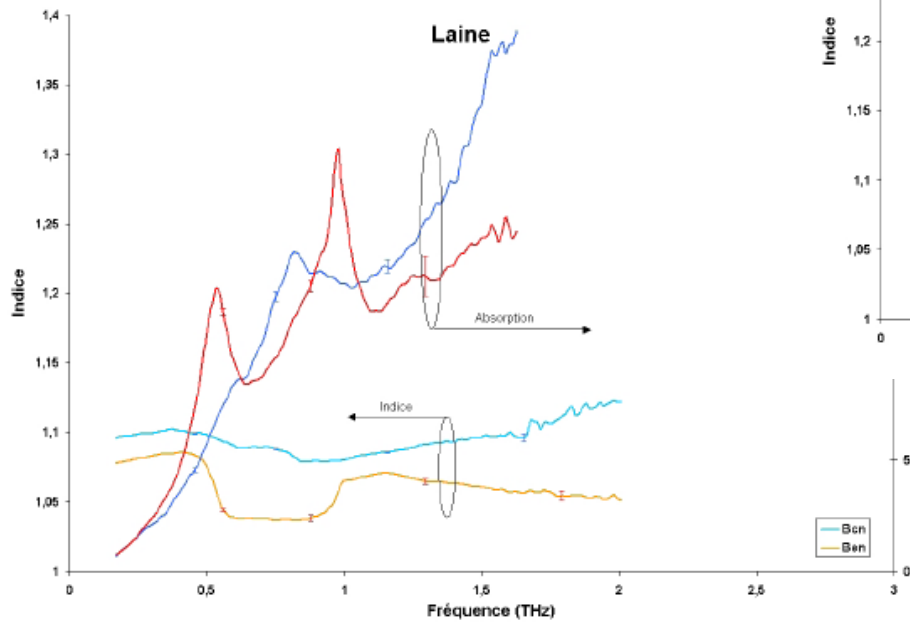
■ Vêtements *



Pas de signature spectrale particulière !

* M.C. Kemp, Proc. Of SPIE, vol. 64024 (2006)

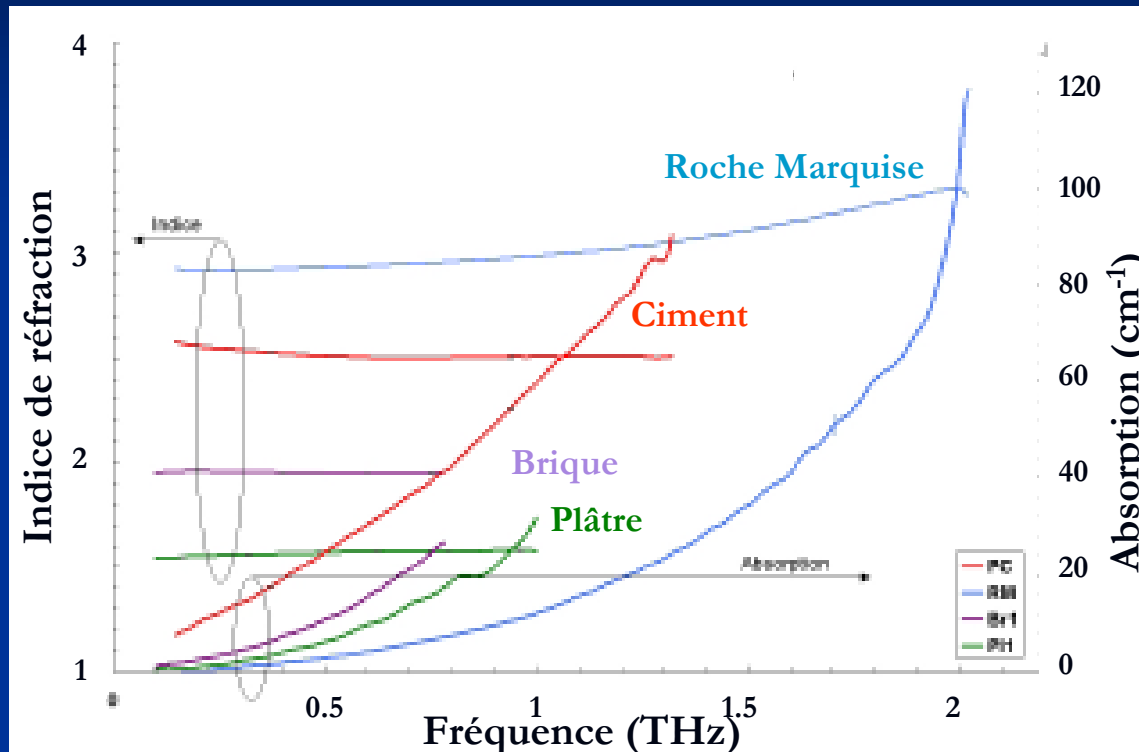
■ Vêtements



Comportements très peu prévisibles

Transparents aux épaisseurs usuelles !

■ Matériaux de construction



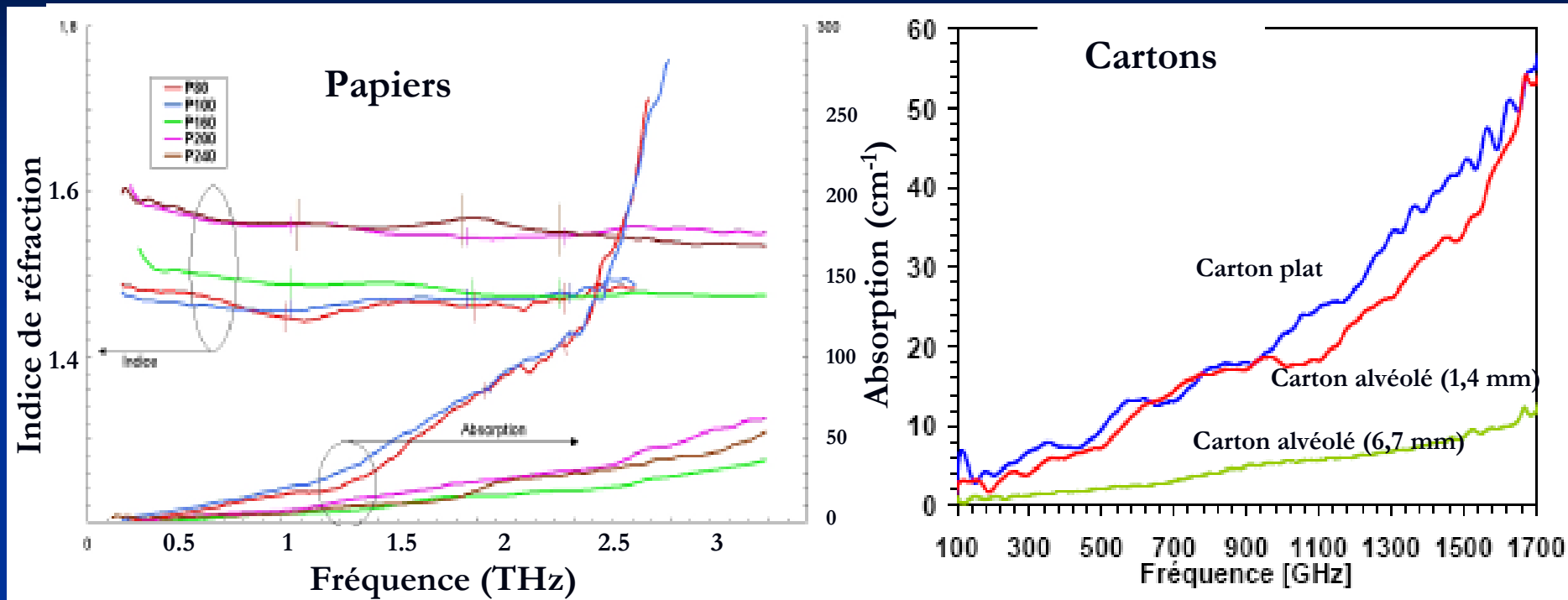
Absorption = 50 cm^{-1}

$\Rightarrow 1 \text{ mm} \equiv -22 \text{ dB}$

Béton = ciment + sable + gravier + métal (?) + eau en surface

\Rightarrow Transmission ??????

■ Matériaux d'emballage (Papiers et Cartons)



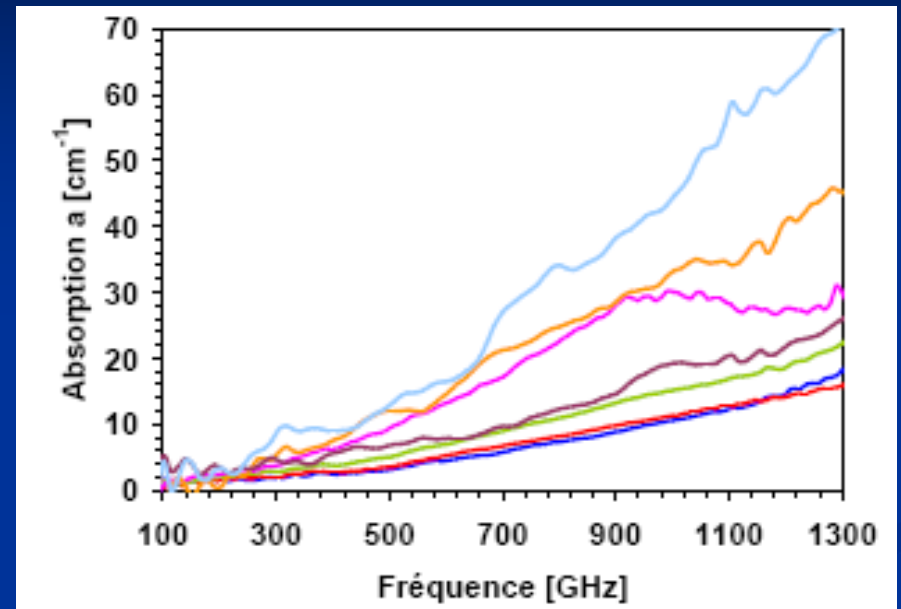
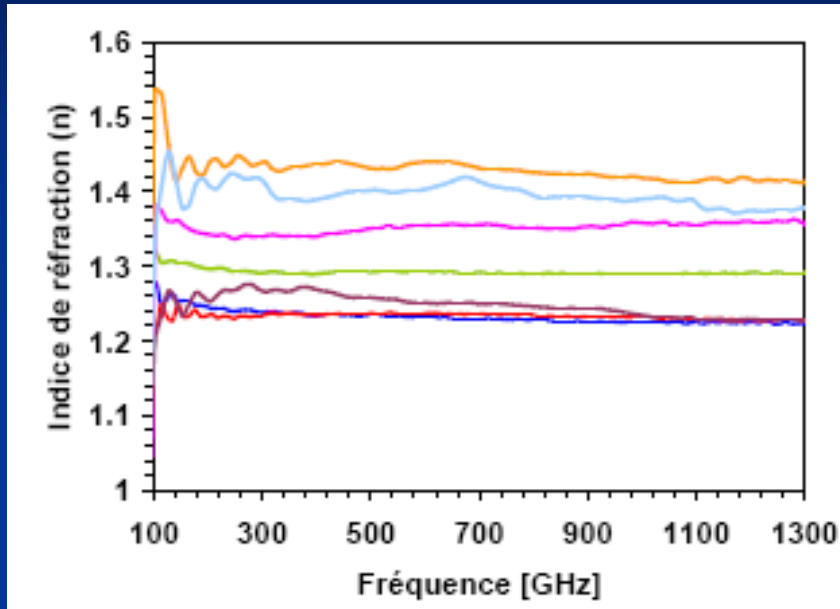
$n, \alpha = f(\text{densité, taux d'humidité, ...})$

Absorption x épaisseur = 1 (1 mm x 10 cm⁻¹, 0.1 mm x 100 cm⁻¹)

=> Pertes = -10 dB

« Transparent » aux épaisseurs usuelles

■ Matériaux d'emballage (Bois)



$n, \alpha = f(\text{essence, configuration des fibres, ...})$











Absorption = $10 \text{ cm}^{-1} \Rightarrow 1 \text{ cm} \equiv -43 \text{ dB}$ (pertes)

Transparent aux épaisseurs usuelles

pour les « basses fréquences » !!!

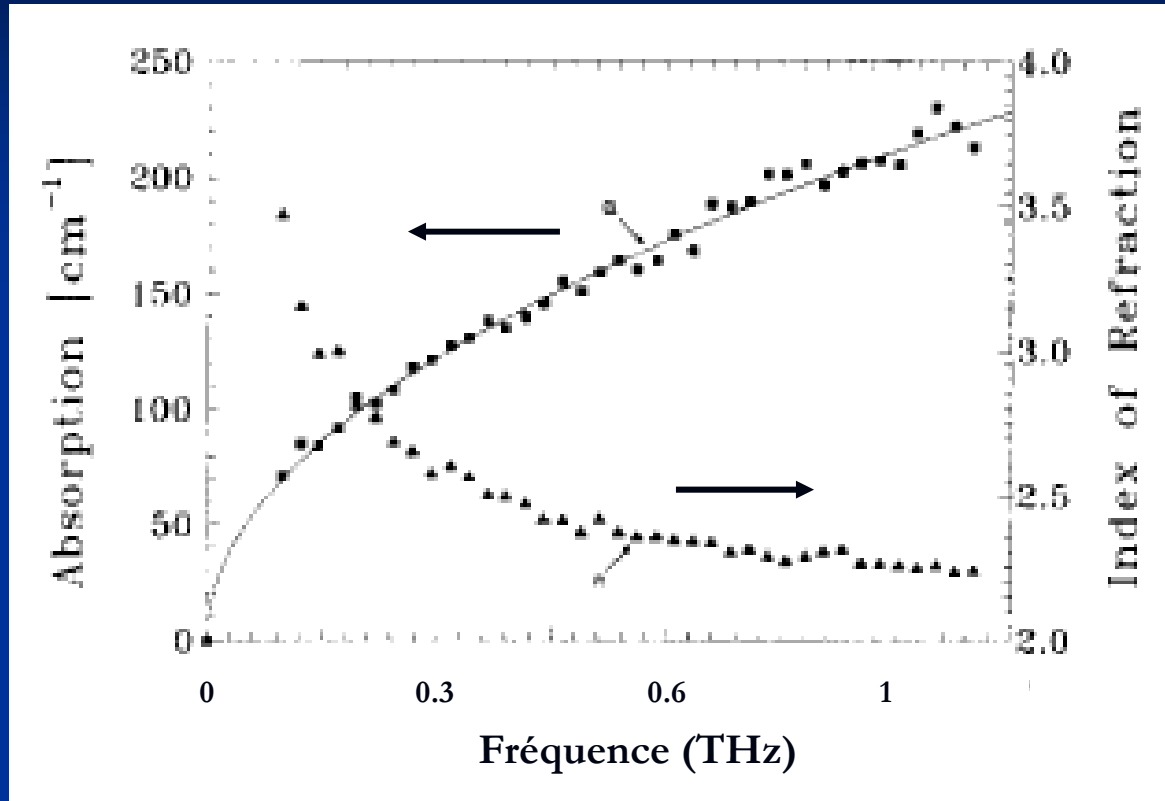
■ Comparaison matériaux de « dissimulation »

Transmission aux épaisseurs « usuelles »

Matériau	BF (< 0.5 THz)	HF (> 0.5 THz)	Épaisseur usuelle (mm)
Construction			> 10
Bois			~ 10
Cartons			~ 1
Papiers			~ 0.1
Vêtements			qq. X 1

■ Les liquides polaires

H₂O « liquide »



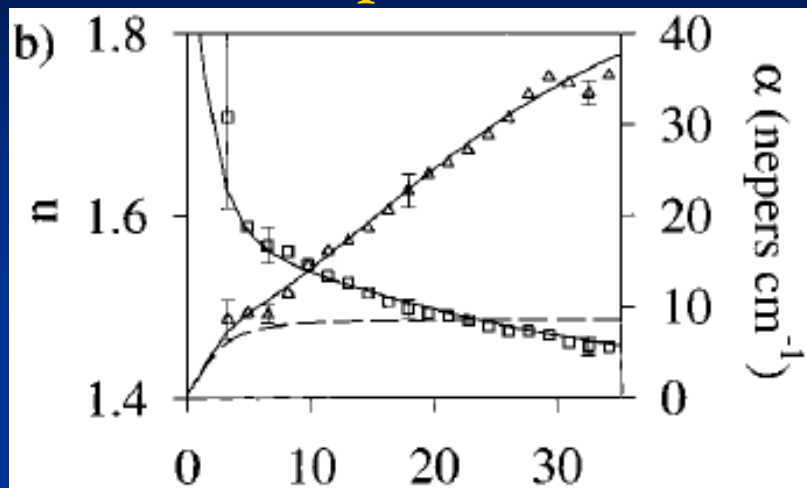
Milieu Peu Transparent aux épaisseurs usuelles (≥ 1 mm)

« Bon » miroir !!!

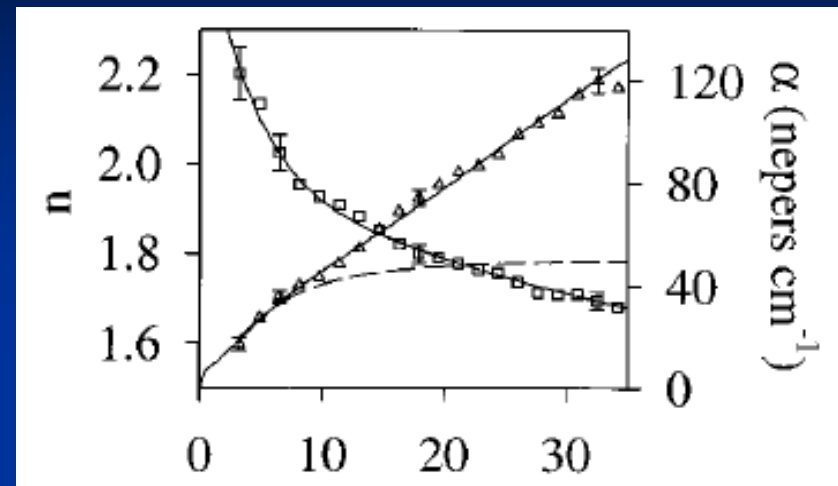
* L. Thrane et. al., Chem. Phys. Lett., vol. 240 (1995)

Alcools *

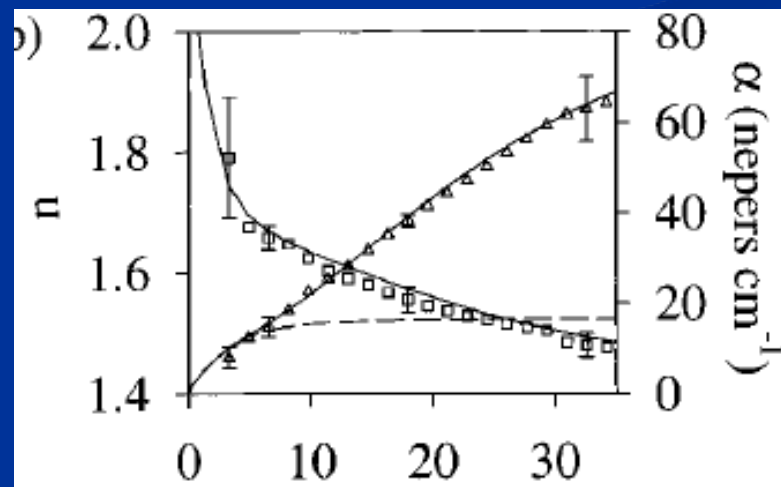
Propanol



Méthanol



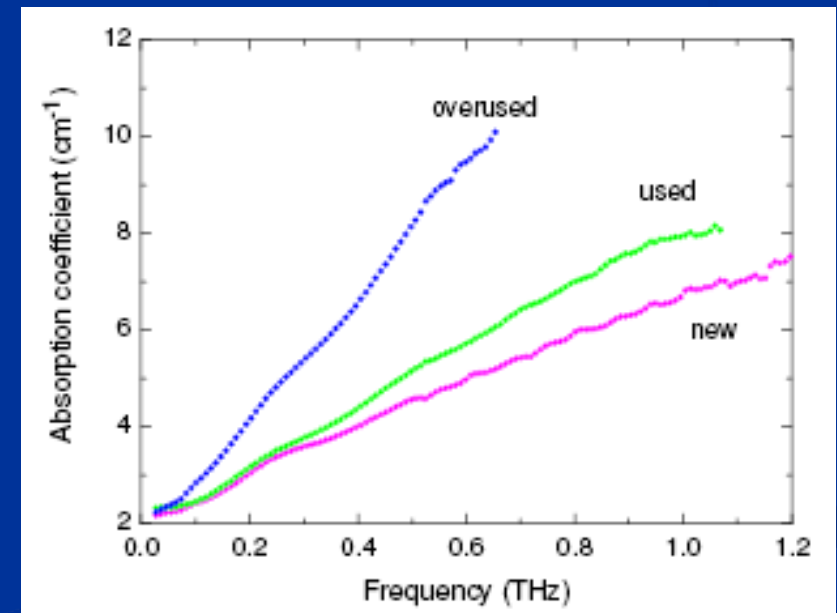
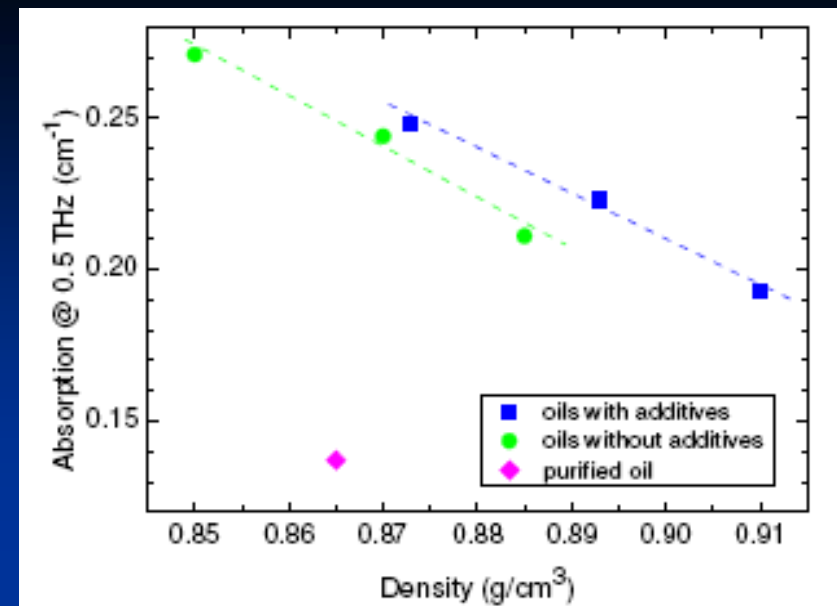
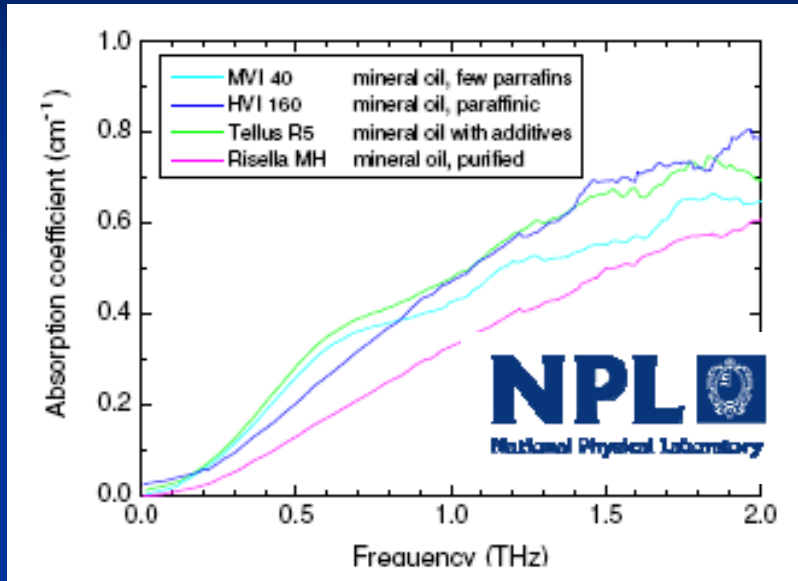
Ethanol



* J.T. Kindt et. al., J. Phys. Chem., vol. 100 (1996)

Huiles *

Huiles moteur (Shell)



Faible absorption

* NPL, http://www.npl.co.uk/upload/pdf/091217_terahertz_naftaly.pdf

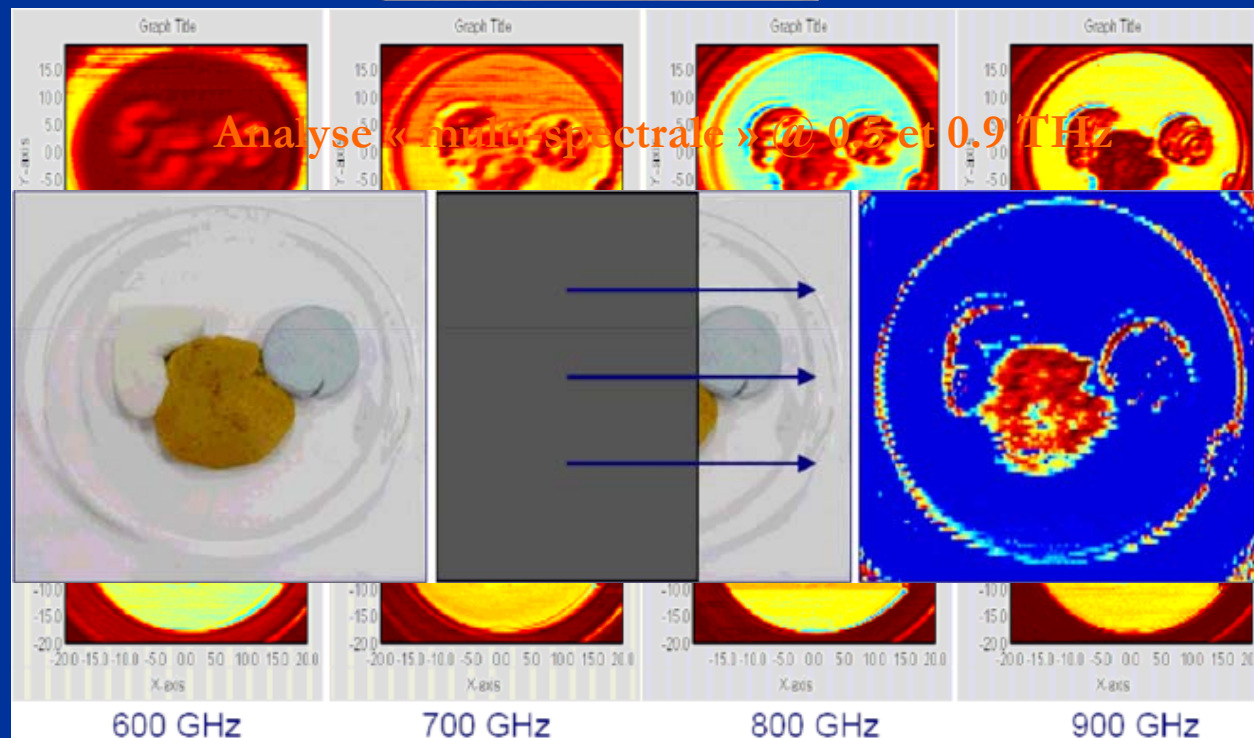
■ Exemple de discrimination d'explosifs *

Chewing-gum



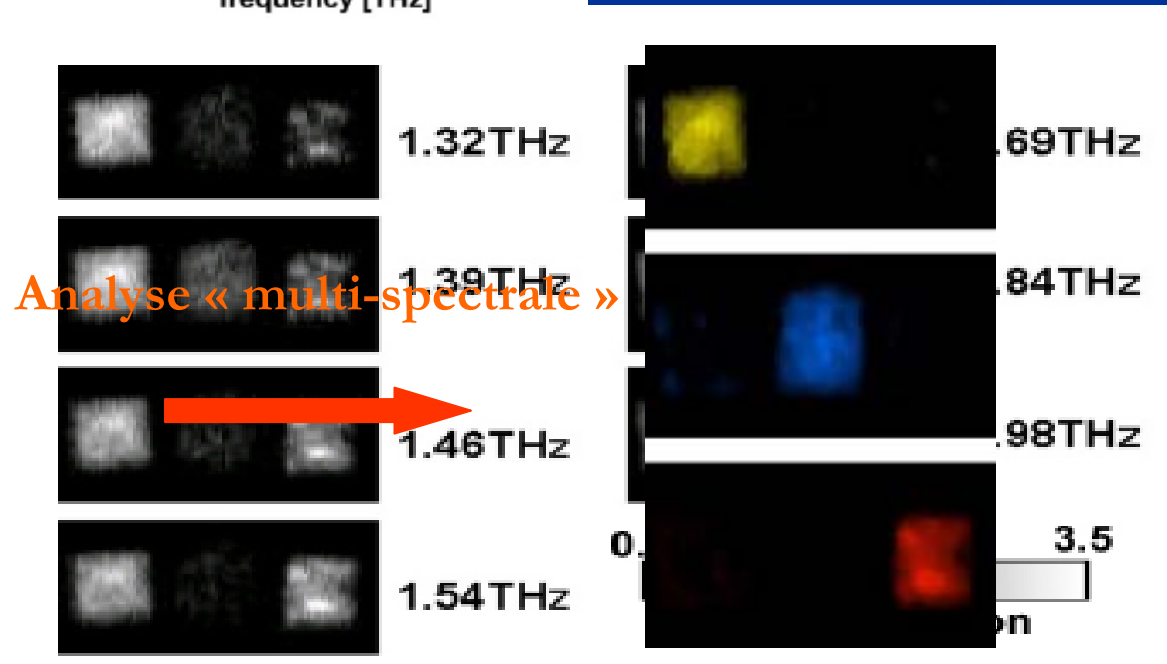
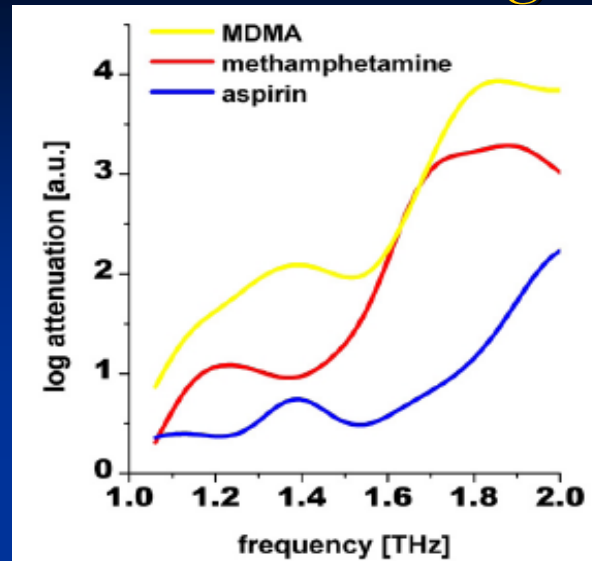
Pâte à joint

Semtex



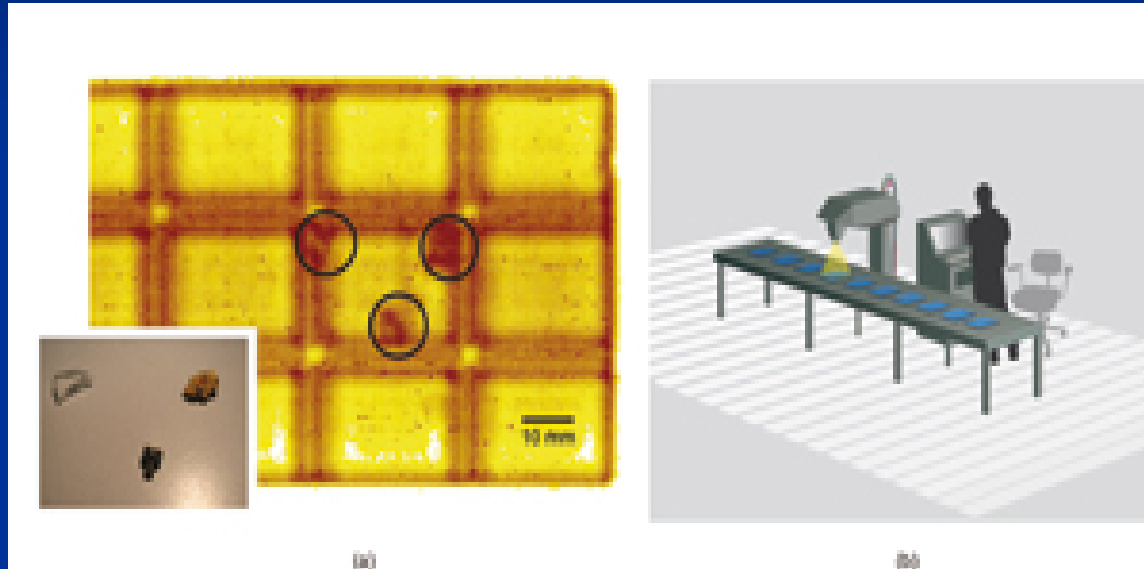
* Riken - K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, Opt. Exp., 11, 2549-2554 (2003)

■ Exemple de discrimination de drogue *

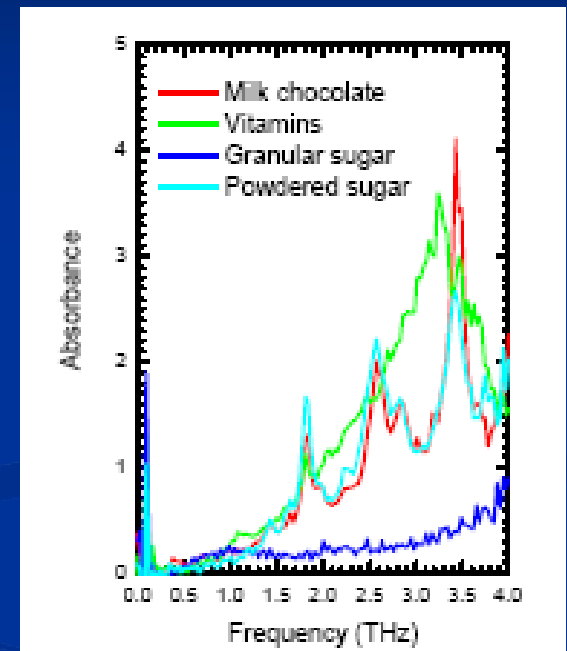


* Riken - K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, Opt. Exp.11, 2549-2554 (2003)

■ Exemple d'application dans le domaine alimentaire



Détection de particules métalliques dans du chocolat *



Signatures spectrales

de substances alimentaires **

* Jördens C and Koch M. , Opt. Eng. 2008; 47: 037003

** M.C. Kemp, Proc. Of SPIE, vol. 64024 (20063)

Les applications et systèmes disponibles aujourd'hui ...

- Sécurité / Défense
- Domaine pharmaceutique
- Le contrôle non destructif
- Le THz et l'archéologie

Les Techniques THz

Temporelle / CW



Spectroscopie

- Réponses ém spécifique
- Large bande

Imagerie

- Passive / active
- 1 D (temps de vol)
- 2D
- 2D + temps de vol (2,5 – 3 D)
- Multi-Spectrale

La plus répandue !

La Sécurité – La défense

■ Scanner Corporel : Brijot BIS-WDS

- Bande passante : 0.09 THz (90 GHz)
- Imagerie 4-10 images/sec
- Capteur 16 pixels
- Distance cible : 3-10 m
- Résolution spatiale : 5 cm



* Brijot - <http://www.brijot.com>

■ Scanner Corporel : Thruvision T5000

- Bande passante : 0.250 THz
- Imagerie 1-3 image/sec
- Résolution spatiale : 3 cm
- Distance de détection : > 10m

Distance de détection : 10 m



Téléphone mobile

* Thruvision - <http://thruvision.com>

■ Le Scanners Corporels : comparaison

Name	L3 SafeView Provision 100	Agilent	Qinetiq	Qinetiq SPO 20	Smiths Tadar	Sago Trex ST150	Sago Trex Real Time Imager	Brijot BIS-WDS	ThruVision T4000
Application	Portal	Portal	Portal	Stand-off 8-30m	Portal	5m Stand-off	Stand-off	3-10m Stand-off	Stand-off
Active/Passive	Active	Active	Passive	Passive	Passive	Passive	Passive	Passive	Passive
Frequency	24-30GHz	24GHz	35GHz	94GHz	94GHz	75.5-93.5GHz	75.5-93.5GHz	90GHz	c250GHz
Bandwidth					>10GHz			20GHz	
Imaging System	source & receiver array rotates around subject	Active antenna array: programmable Fresnel zone-plate		Folded Schmidt camera: conical scan, off-axis rotating mirror	Mechanical : Tilted rotating mirrors	Frequency scanned antenna and reflector	Phased array of freq scanned antennas		
No. of receivers		1	64	64	24	1	232	16	
Receiver technology				InP MMIC	InP Direct detection	InP HEMT MMIC			GaAs Schottky mixer
System NETD				5K	1K	1-3K	6K	1K	1-1.5K (receivers)
Spatial resolution	0.5cm lateral 1.5cm depth	0.5cm	0.75cm 2cm	0.3degree	10mm	6mrad	6mrad 128*192 pixels	5cm	3cm
Refresh rate	6 views in 3 secs	15Hz		15Hz	10Hz (24 receivers)	0.5Hz variable	30Hz	4-10Hz	1-3 Hz
Aperture		90cm		80cm	60cm			18cm	12cm
Dimensions L x W x H cm	150 x 150 x 270	90 x 10 x 90			250 x 160 x 220			71 x 33 x 48	

■ Contrôle du contenu de colis/bagages *

■ Bande passante :

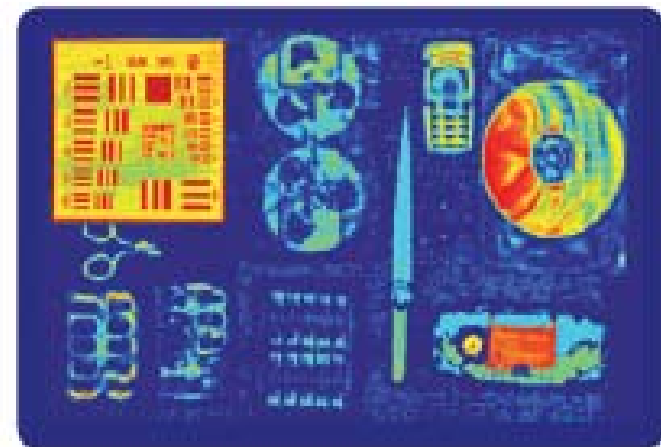
- 0.07-0.11 THz
- 0.23-0.32 THz
- 0.84-0.87 THz



Photography:



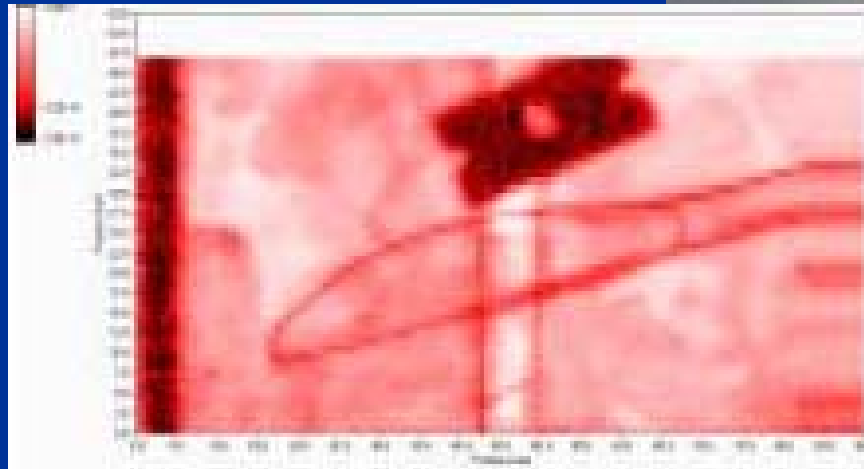
Terahertz Image:



* Synview - <http://synview.de>

■ Contrôle du contenu de colis/bagage *

Fréquence > 1 THz



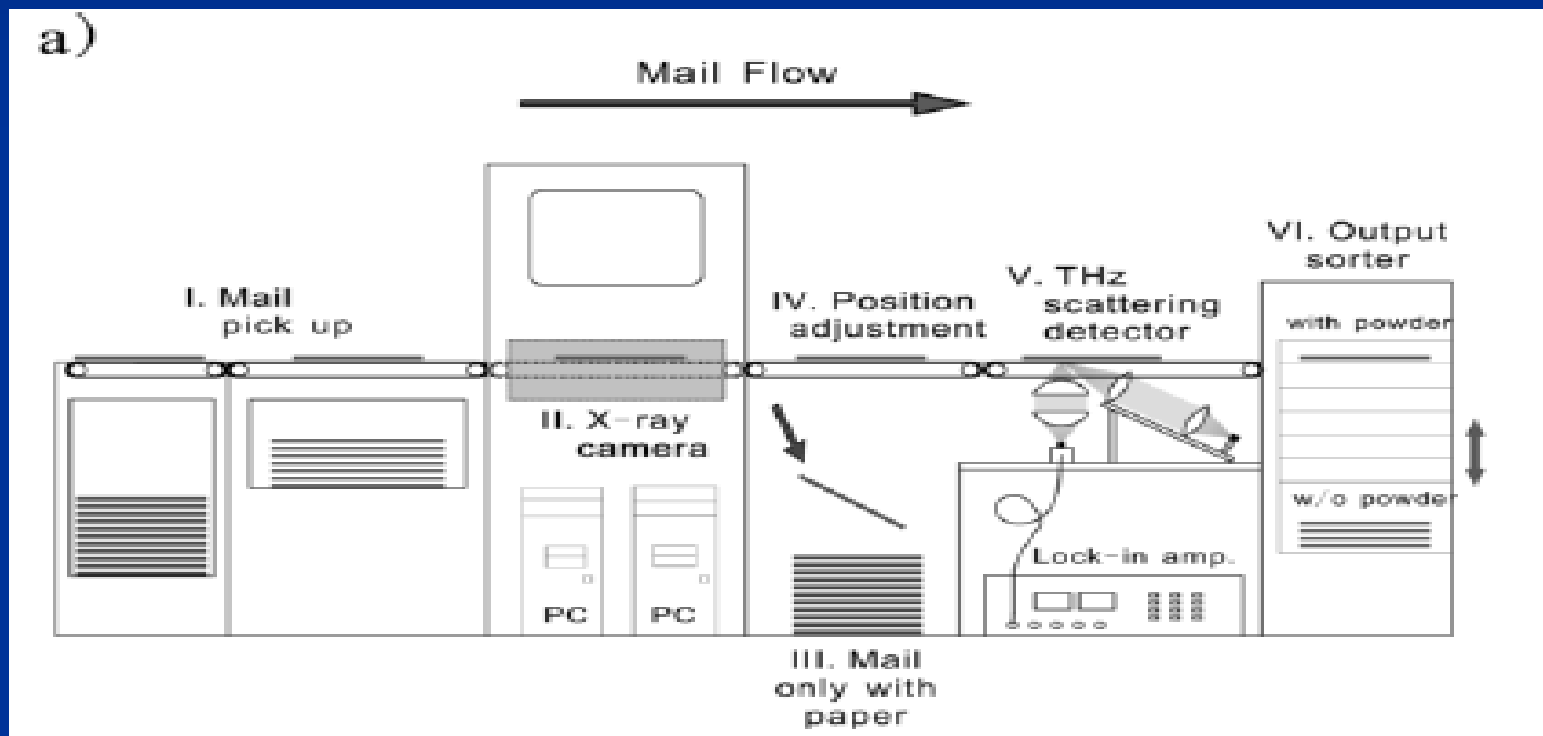
Lame de rasoir

* Picometrix - <http://www.picometrix.com>

■ Contrôle du contenu du courrier *

1^{ère} étape : Système RX + THz rapide (CW @ 0.54THz) – 10⁵ lettres / jour

➔ détection de particules diffusantes ($\lambda \geq 100\mu\text{m}$)

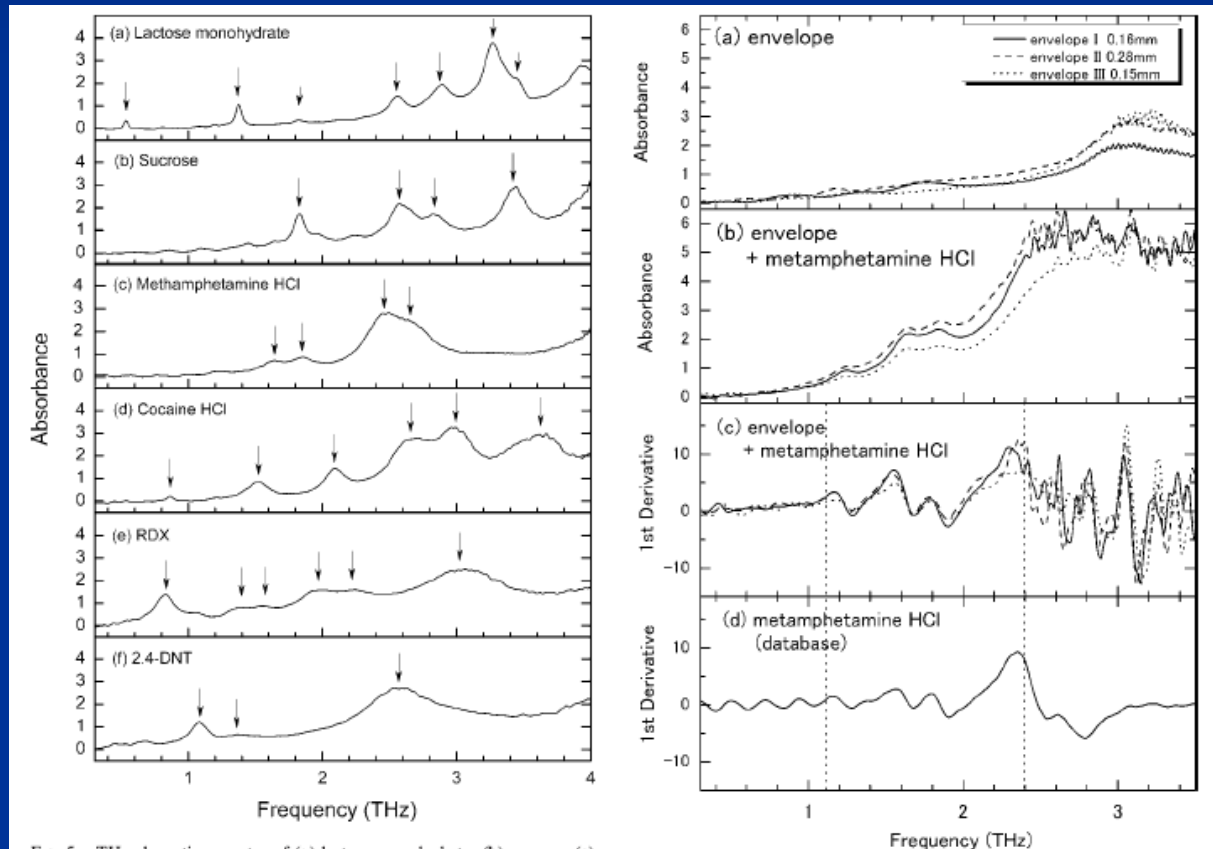


* H. Hoshina et al, Applied Spectroscopy, vol 63, n°1 (2009)
RIKEN, Sendai, Japan

■ Contrôle du contenu du courrier

2^{ème} étape : THz-TDS (0.1-3 THz) – 2 minutes/scan

➔ spectroscopie du contenu de l'enveloppe



Pharmacie

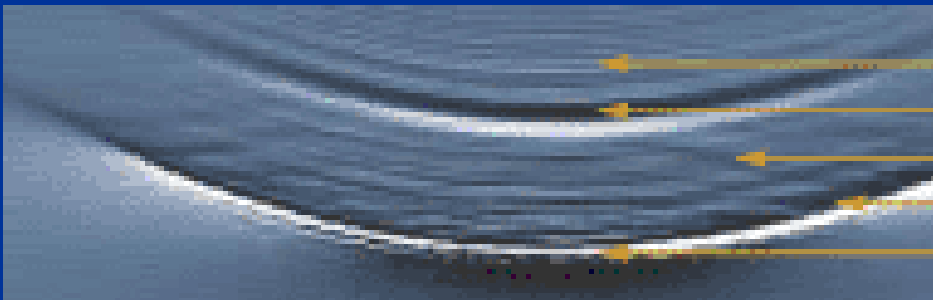
Analyse de comprimés médicamenteux*

Analyse du Cœur (substance active)

- Agglomération de particules
- Variation de densité
- Présence de « défaut »
- Identification de Polymorphes

(@Teraview)

Imagerie THz 3D



Analyse

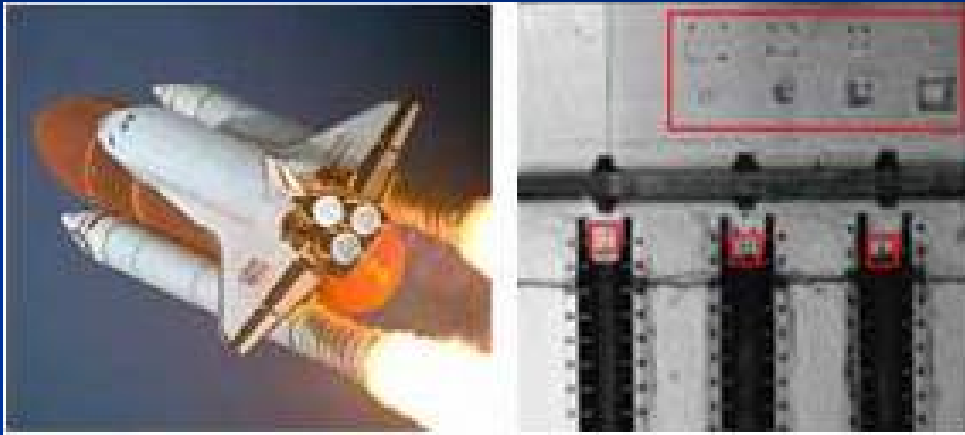
- Unifo
- Epais
- Rugos

(ice)

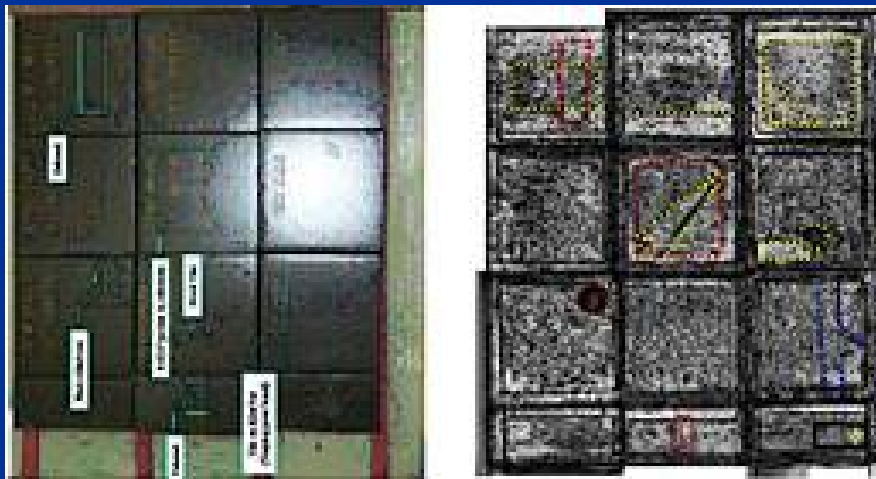


Contrôle non destructif

- Contrôle des tuiles et mousses (navette spatiale US – NASA)*



Délamination de mousse isolante – réservoir navette
(2003)

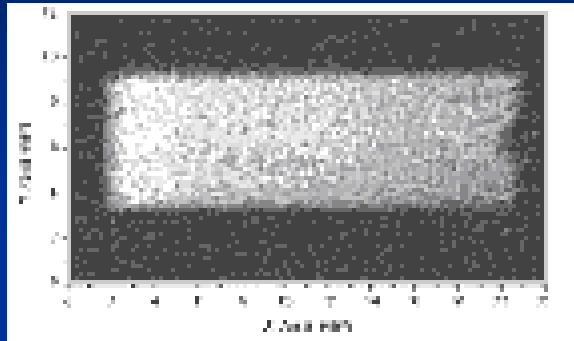


Examen des tuiles du bouclier thermique – recherche de corrosion

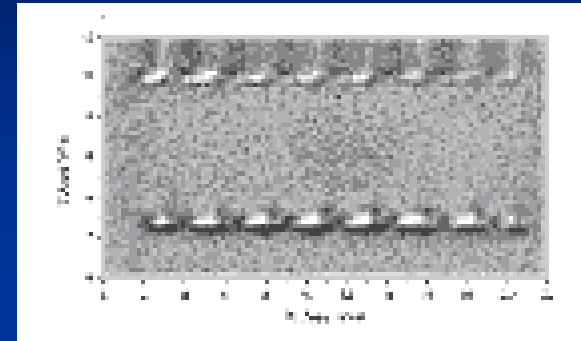
* Picometrix - <http://www.picometrix.com>

■ Contrôle de circuit intégrés*

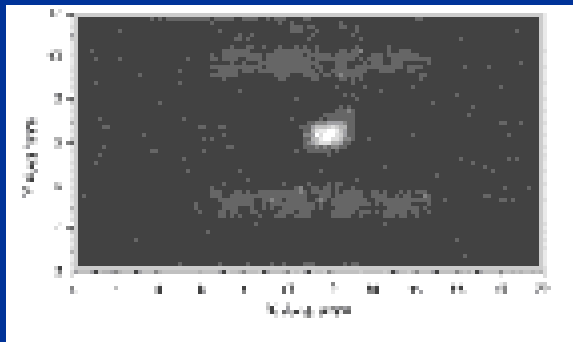
Imagerie 3D (2,5D)



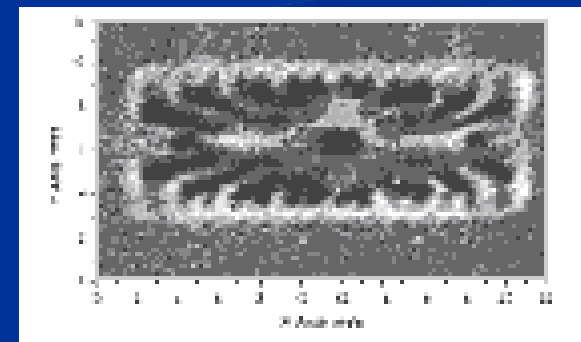
Surface



Profondeur 1mm (pins)



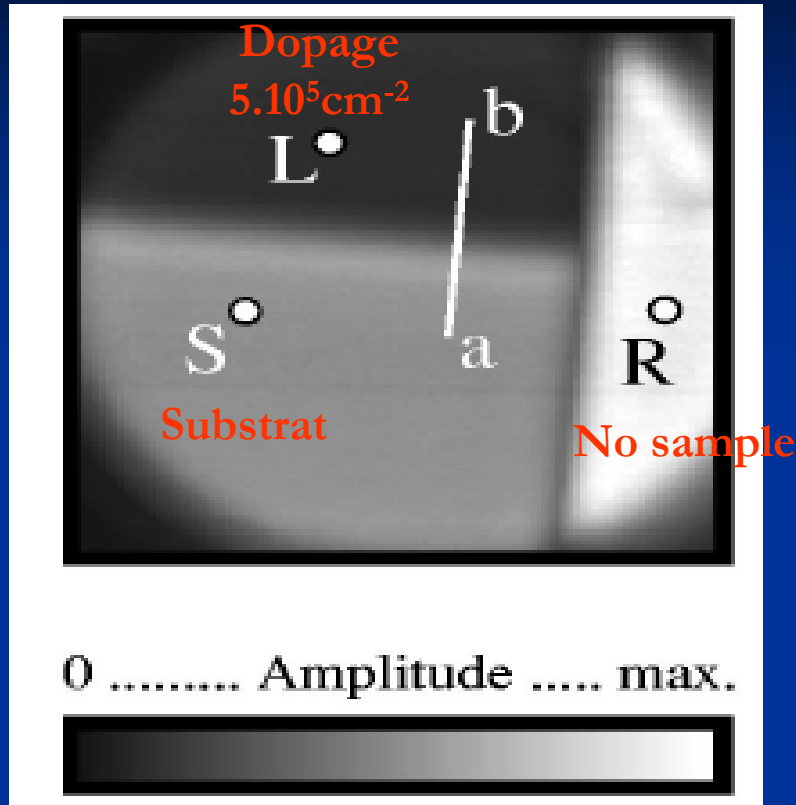
Profondeur 3mm
(composant)



Profondeur 4mm
(connexions)

* Teraview - <http://www.teraview.com>

■ Contrôle de circuit intégrés**



Cartographie de dopage
d'un wafer de silicium

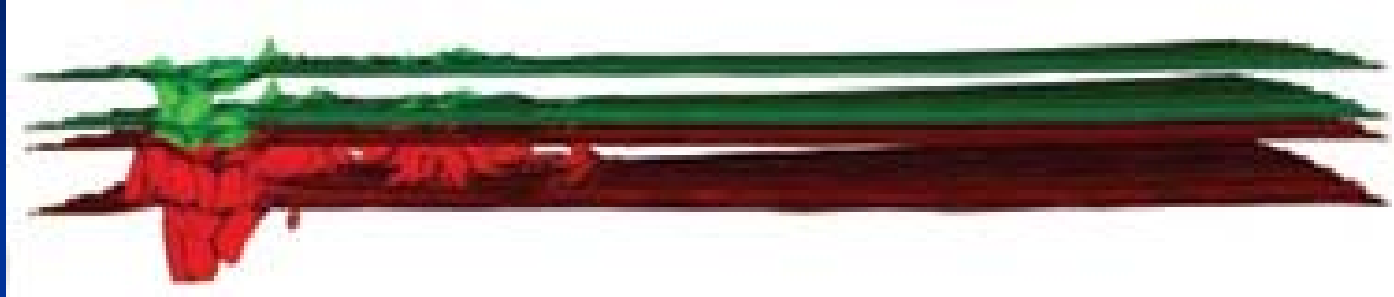
Imagerie temps réel (2003)



* M. Herrmann et al, J. of Applied Physics, vol 91, n°3 (2002)

** http://www.nikon.com/about/technology/core/optics/terahertz_e/index.htm

■ Contrôle des couches de peinture (Automobile)*



Imagerie 3D (2,5D)

- Mesure sans contact
- Détermination précise de l'épaisseur des couches
- Défaut d'épaisseur
- Pb. de séchage

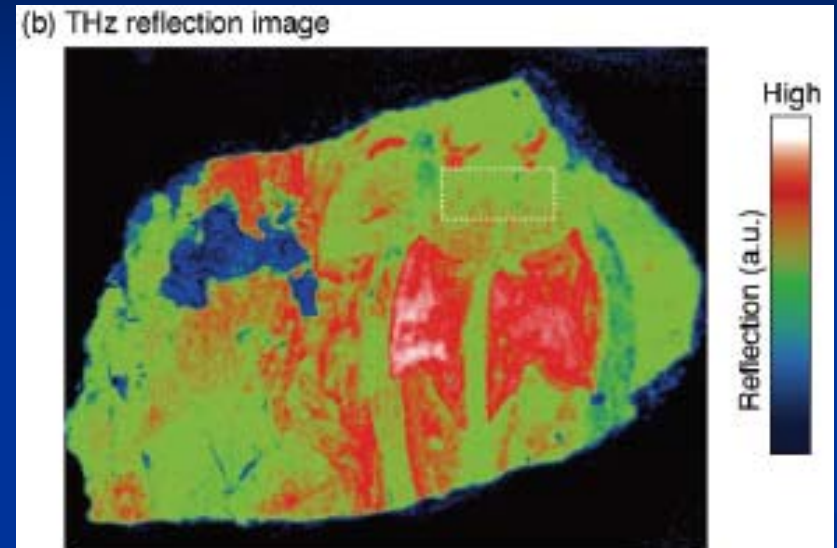
* Teraview - <http://www.teraview.com>

Le THz et l'archéologie ou l'art

■ Identification de pigments *



THz
→



Imagerie THz (associées à d'autres techniques visible, RX, ...)

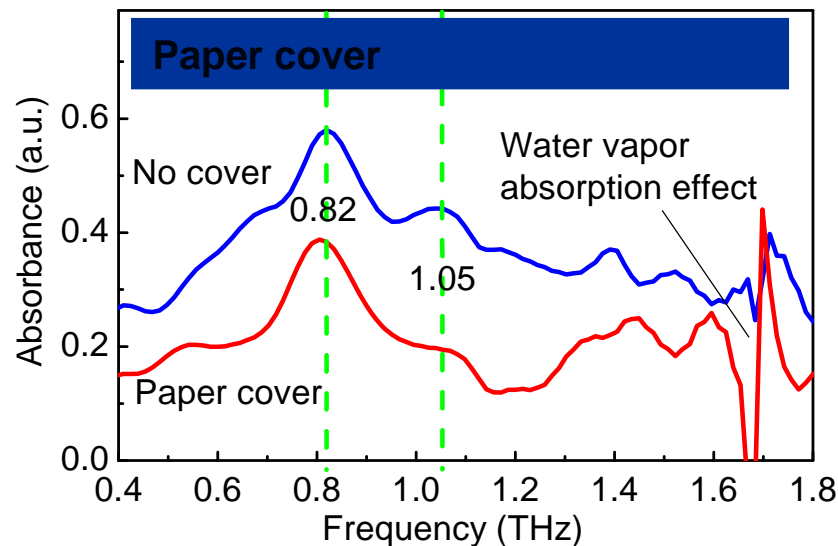
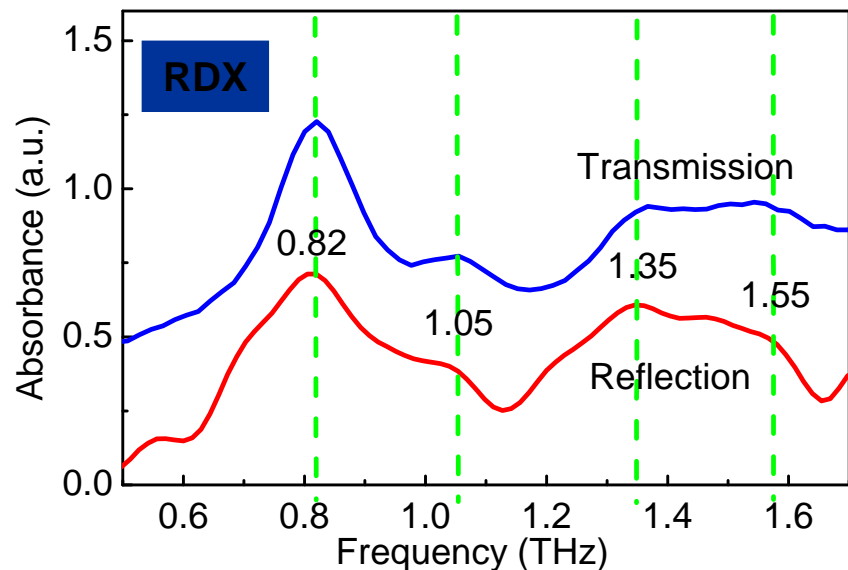
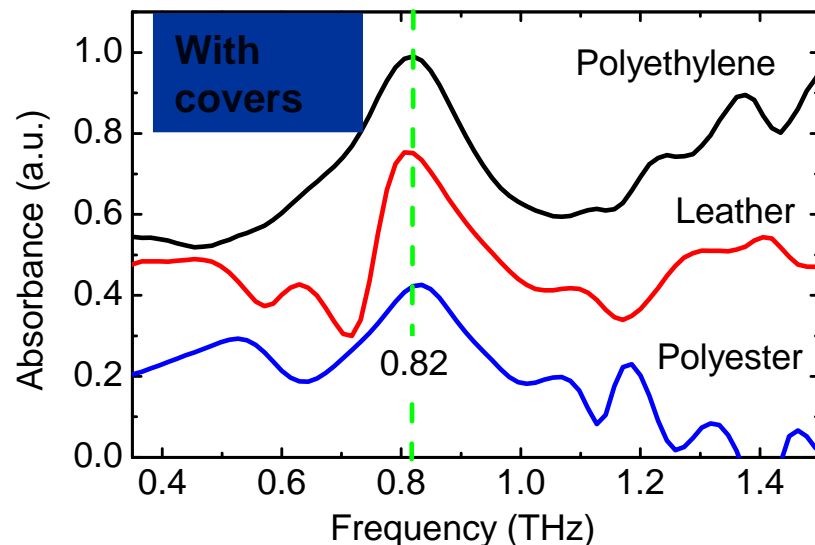
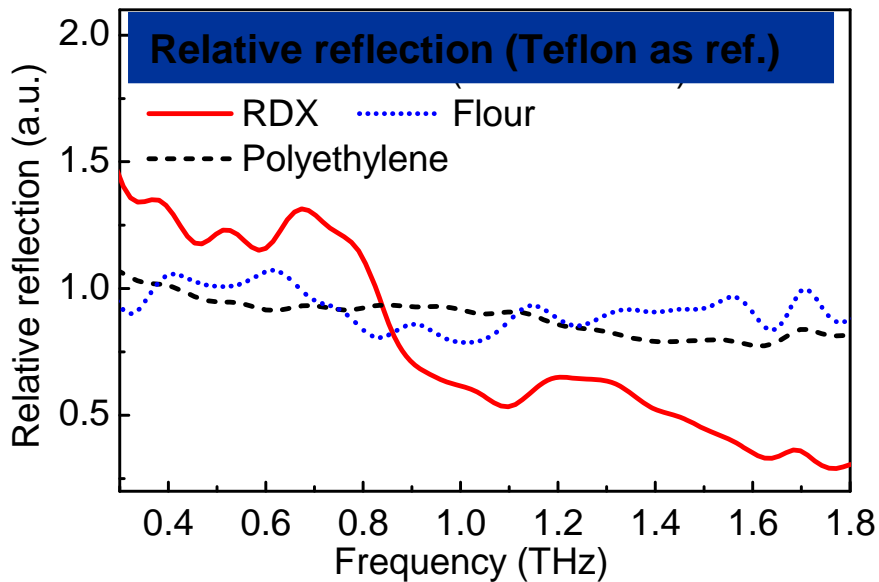
- Mesures non destructives
- Identification de substances contenu dans les pigments
- Contrôle d'épaisseur (peinture, couches de préparation, ...)
- Profondeur des fissures

* K. Fukunaga, J. of the European Society, 5, 10024 (2010)

Les principales limitations

- Pb. des sources et récepteurs @ $T=300\text{K}$
 - Performances (puissance, sensibilité, matrice,...)
 - Coût
 - Recherche en cours !!!!
- Les composants pour le THz
 - Mise en forme, guidage, ...
 - Recherche en cours !!!!
- Mesures en cas réel
 - Réflexion, diffusion, structure complexe (multicouches), ...

■ Détection THz en réflexion du RDX



Conclusion

Domaine THz :

- Fort potentiel applicatif pour la détection des solides ou le contrôle non destructif

 - Transparence de certains matériaux de dissimulation

 - Signatures spectrales spécifiques

 - Imagerie multi-spectrale

- et les liquides (?) : pb. des milieux aqueux (polaires) !

Les verrous à lever pour « la démocratisation du THz » :

 - Emetteurs et détecteurs « efficaces », « faible coût » ,

 - @ T ambiante, bande passante (-> 3-4 THz), ...

 - Guide d'ondes THz