



JOURNEE TECHNIQUE
NOUVELLES TECHNOLOGIES CND
23 novembre 2017

Contrôle et analyse par Térahertz impulsionnels

Dr. Uli Schmidhammer

TeraTronics S.A.S.
Avenue Jean Perrin, bat. 350, 91400 Orsay, France
www.teratonics.com





Advanced Terahertz Photonics for Enhanced Productivity and Reliability

- Foundation of Teratronics in 2017
- Competence "Measuring + Testing" (> 25 years), Terahertz (> 20 years) ...
- Technology based on international patents (University Paris Sud, CNRS)
- **Online production control and inspection tools,
including automated and customized analysis software**
- **Non-destructive testing as laboratory service**

TeraTonicS S.A.S.

Avenue Jean Perrin, bat. 350, 91400 Orsay, France

www.teratronics.com



Outline

- Le rayonnement THz pour le Contrôle non-destructif
- La spectroscopie THz dans le domaine temporel (TDS)
 - Son potentiel pour le CND
 - Principe de mesure répétitive + ses limites

« Pulsed THz »

➤ TDS avec la technique ultrarapide STRIPP

- Principe de mesure monocoup + avantages
- Illustration de la méthode



➤ Exemple d'applications industrielles, Contrôle de

- Collages avec différents types de défauts
- Composites 3D de fibre de verre
- Processus de production de composites de fibre de carbone
- Hybrides plastique-métal

➤ Conclusions

Energie et Effet de Serre – des enjeux industriels majeurs

“Light weight revolution”



Les industries du transport et de l'énergie
sous pression :

composants légers, durables, stables, rentables



Nouveaux matériaux

(céramiques, mousses, polymères, composites)

et processus de fabrication

(collages, moulages, soudages de plastiques,
revêtements)



“ Uncertainty drives weight and costs ”

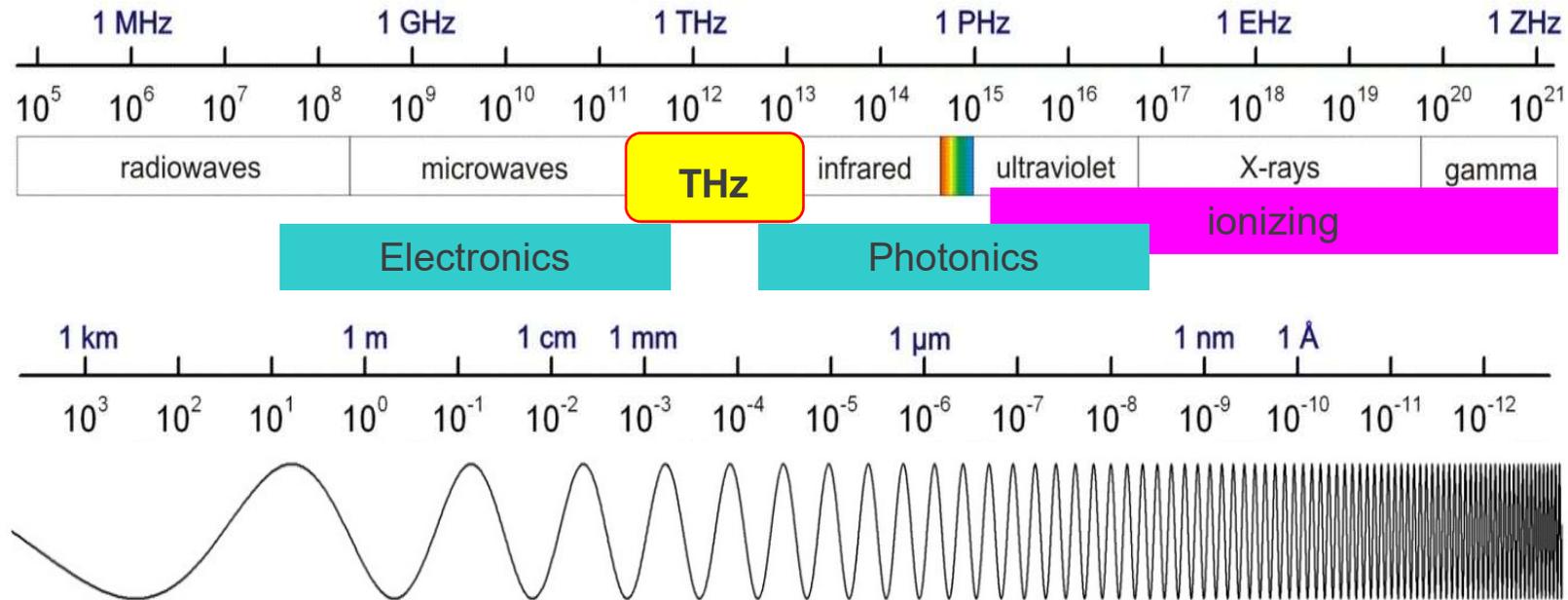
Besoin accru de contrôle non-destructif (CND)



qui est sans contact,
non-ionisant,
pénétrant, précis
et rapide.



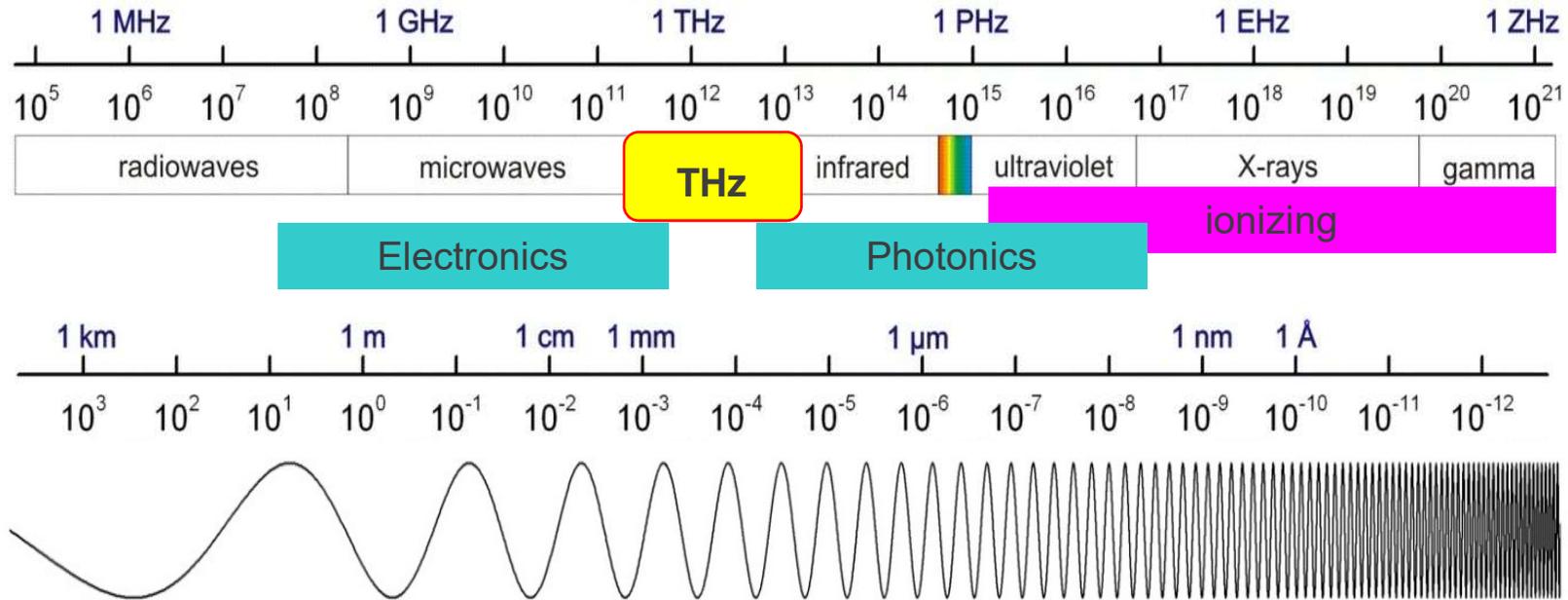
Le rayonnement TéraHertz : de “nouvelles” fréquences pour le CND



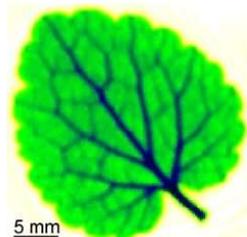
Propriétés physiques des ondes THz : photons de basse énergie, longueur d'onde (sub-) millimétrique

- Forte réflexion sur les métaux : **analyse des surfaces**
- Transmission dans les **matériaux diélectrique** : **analyse des volumes** (plastiques, céramiques, papier, vêtements, bois, etc.)
- Sensible au polymorphisme, à la polymérisation : interactions intermoléculaires
- Très sensible aux liquides polaires
- “Empreinte digitale” en absorption de nombreux matériaux : identification spectrale

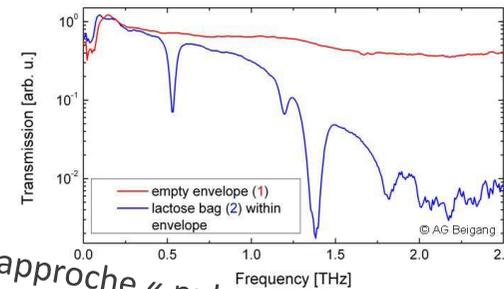
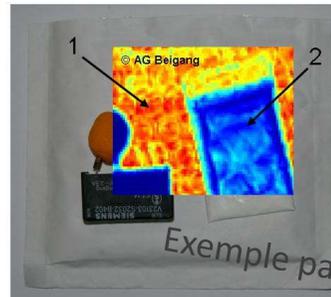
Le rayonnement TéraHertz : de “nouvelles” fréquences pour le CND



Analyse sans contact, non ionisante et non-destructive des milieux optiquement opaques



Adrian Dobroiu et al. Meas. Sci. Technol. 17 (2006) R161–R174



Le potentiel unique des impulsions TéraHertz : Un comparatif des méthodes CND

Par : Air Force Research Laboratory + Air Force Institute of Technology

Composites
de fibre de verre
avec divers
endommagements

Thickness
Variation

4 min, 830° F
Burn

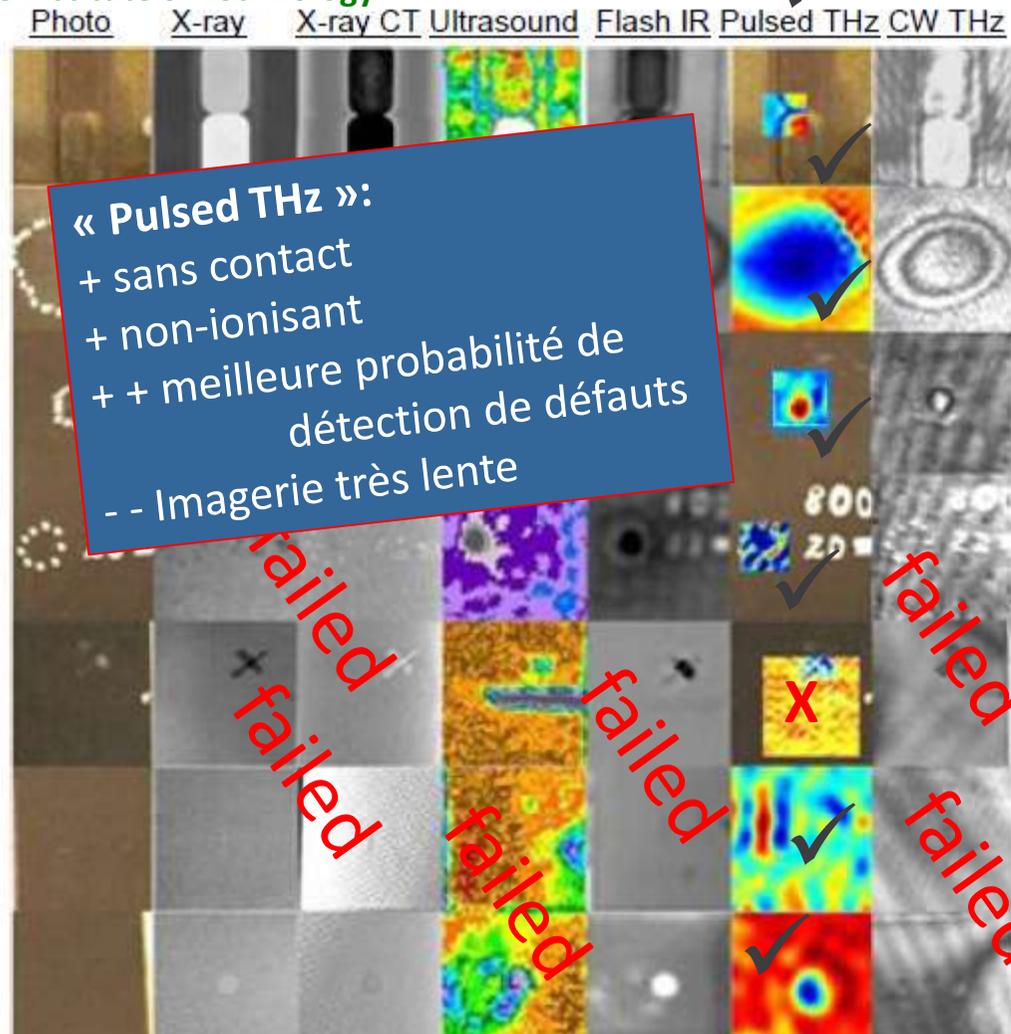
6 min, 810° F
Burn

20 min, 800° F
Burn

Bending
Damage

Sub-surface
Slit Void

Sub-surface
Circular Void



« Pulsed THz »:
+ sans contact
+ non-ionisant
+ + meilleure probabilité de
détection de défauts
- - Imagerie très lente

failed
failed
failed
failed
failed



Le potentiel unique des impulsions Terahertz : Un comparatif des méthodes CND

Par : Air Force Research Laboratory + Air Force Institute of Technology

Composites
de fibre de verre
avec divers
endommagements

Thickness
Variation

4 min, 830° F
Burn

6 min, 810° F
Burn

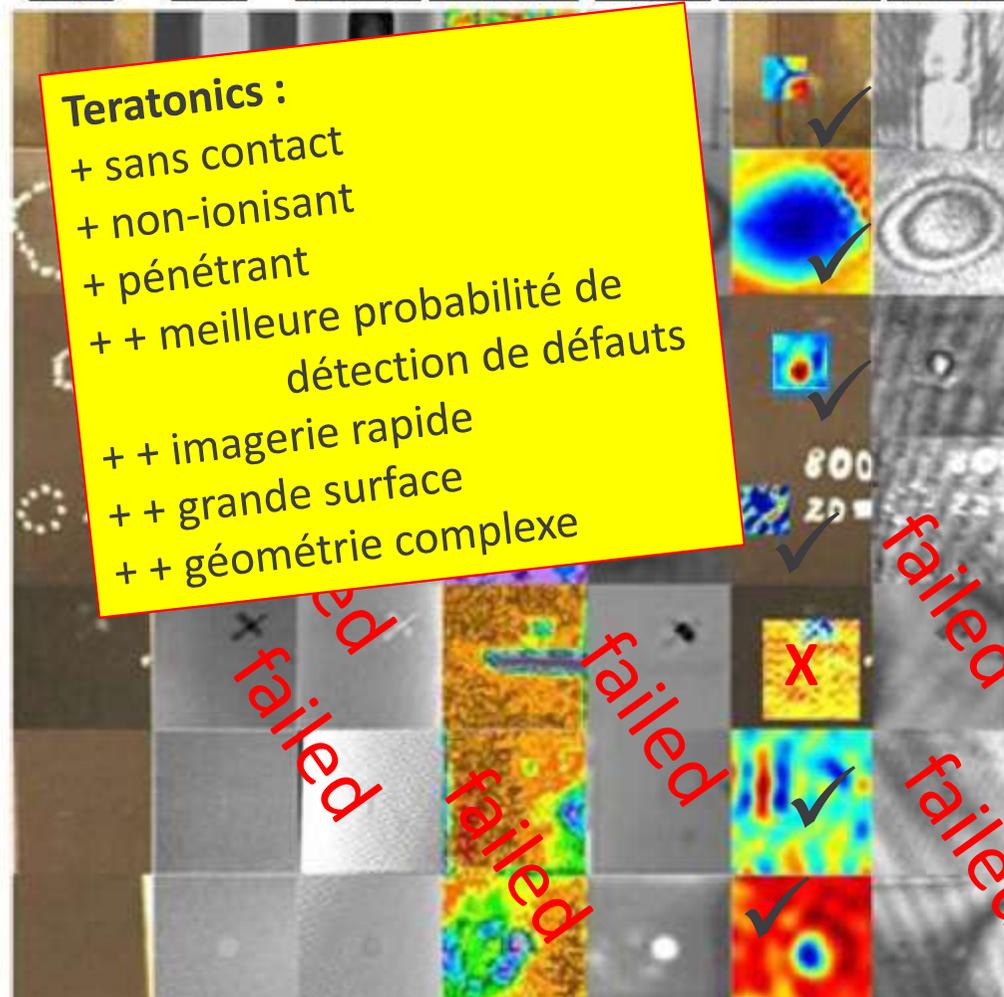
20 min, 800° F
Burn

Bending
Damage

Sub-surface
Slit Void

Sub-surface
Circular Void

Photo X-ray X-ray CT Ultrasound Flash IR Pulsed THz CW THz



Contrôle ultrarapide par impulsions THz

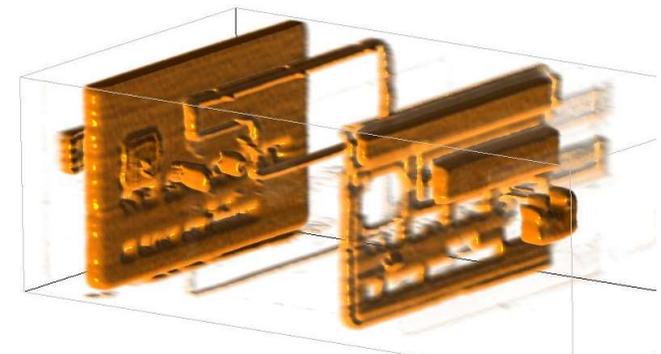
L'innovation « STRIPP »

« *Single Shot THz Sensing for Rapid Industrial Product and Process Control* »

- est basée sur la détection monocoup d'impulsions THz ultracourtes
- représente une rupture technologique pour le CND dans un environnement industriel
- réduit le temps d'acquisition par un facteur $> 10\ 000\ 000$ par rapport à l'état de l'art, à $< 10^{-10}$ s
- permet l'intégration dans le cycle de production, pour le contrôle de 100% de la production
- permet une inspection efficace et rapide sur site, et hautement automatisée



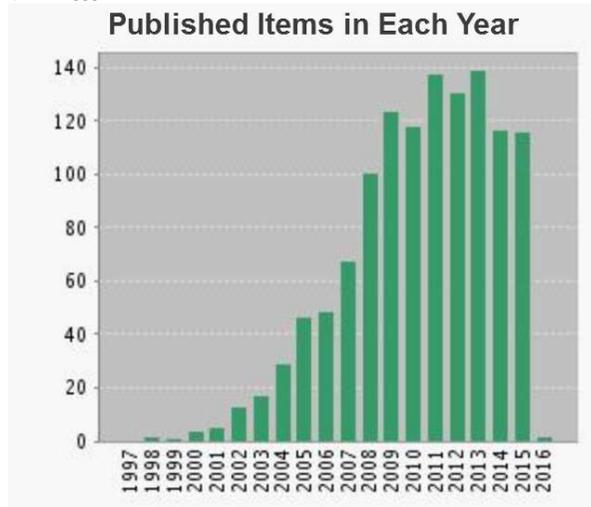
Analyse d'une carte bleue (2D et 3D) par Teratronics



THz-Time Domain Spectroscopy : son potentiel

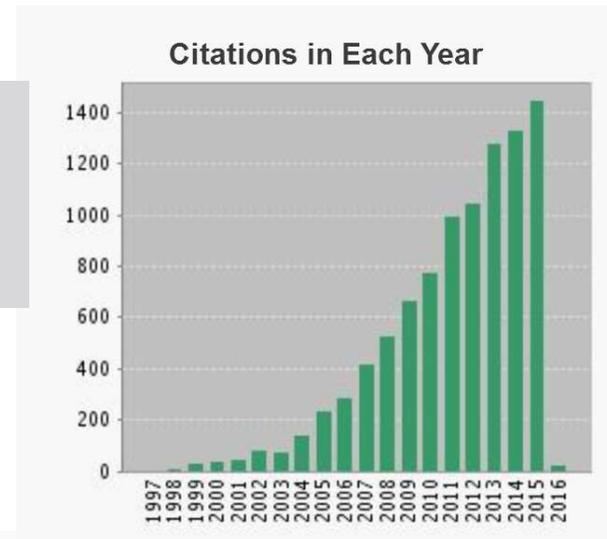
Contrôle et inspection sans contact et non ionisante de...

- **Dépôts, peinture et structures multicouches**
(sur les ailettes de turbine, céramiques réfractaires, vernis sur véhicules etc. également pour couches minces telles que couches de nanotubes)
- **Processus de séchage, polymérisation**
- **Structure de matériaux composites, câbles, fibres optiques**
(délamination, fissures, inclusions d'air, impuretés)
- **Liaison adhésive, soudure de plastiques ou de céramiques**
- **Structures et objets recouverts ou cachés par des diélectriques**
(corrosion sous peinture, céramiques sous de la mousse etc.)
- ...



Web of Science
Publications sur 20 ans
Sujet « THz TDS and
Industrial »

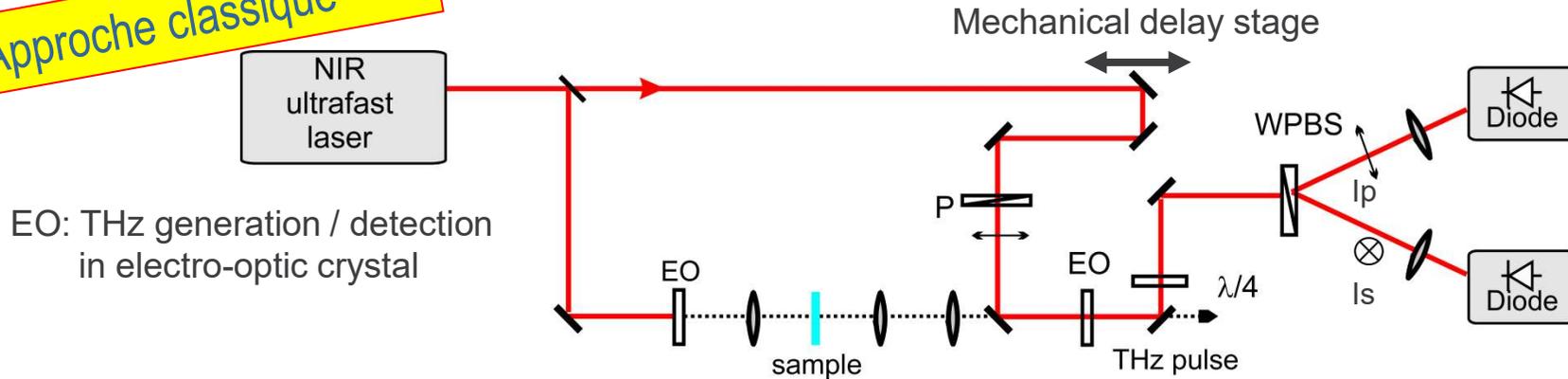
« Pulsed THz »



TéraHertz Time Domain Spectroscopy



Approche classique

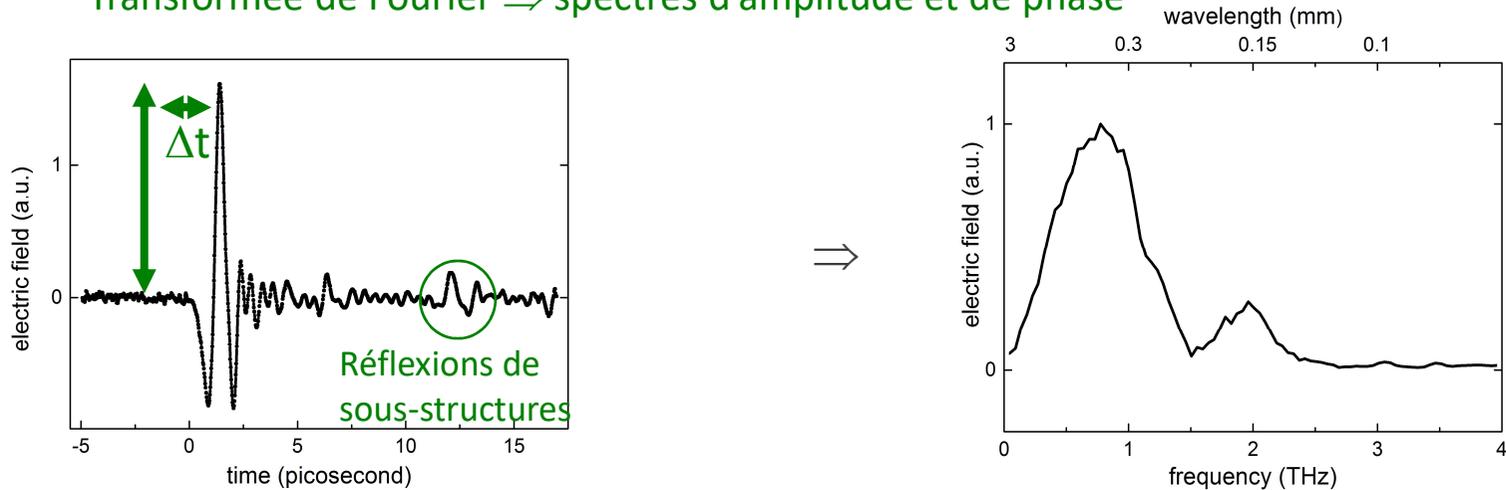


EO: THz generation / detection in electro-optic crystal

- Génération d'impulsion THz ultracourte avec un laser ultracourt
- Détection du champ électrique THz avec une impulsion retardée par une ligne à retard

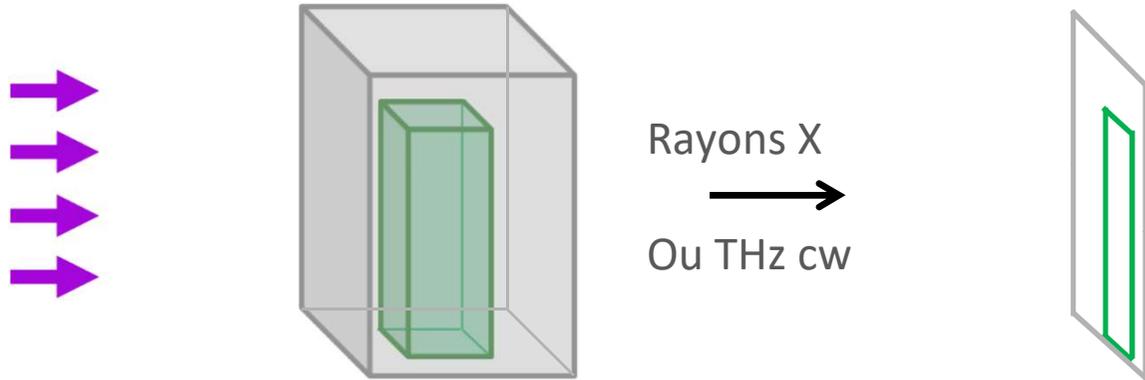
Domaine temporel \Rightarrow amplitude et temps de vol Δt de l'impulsion

Transformée de Fourier \Rightarrow spectres d'amplitude et de phase



CND classique : Image de projection

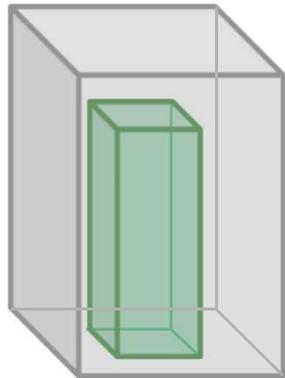
Continuous Wave (cw)



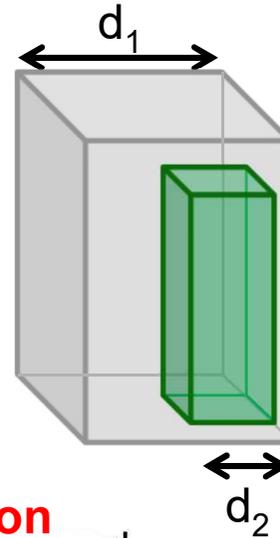
“Pulsed THz Sensing” : Configurations de mesure

En transmission

Impulsions THz



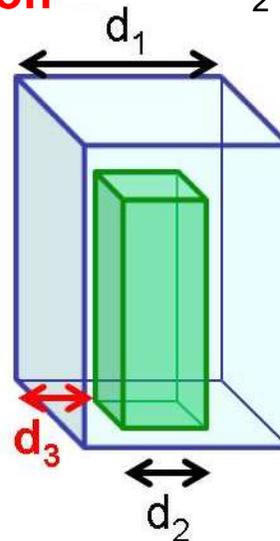
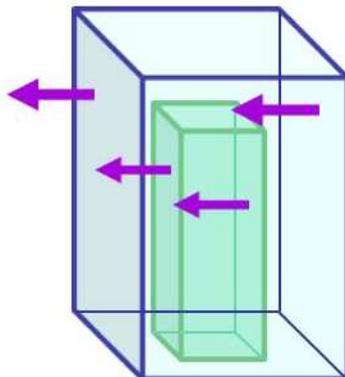
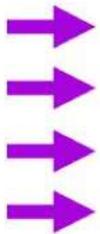
Impulsions THz:
- Amplitude
- Δt
→
- Spectre THz



Caractérisation de volumes diélectriques et de sous-structures, Identification des matériaux possible

En réflexion

Impulsions THz



+ position axiale

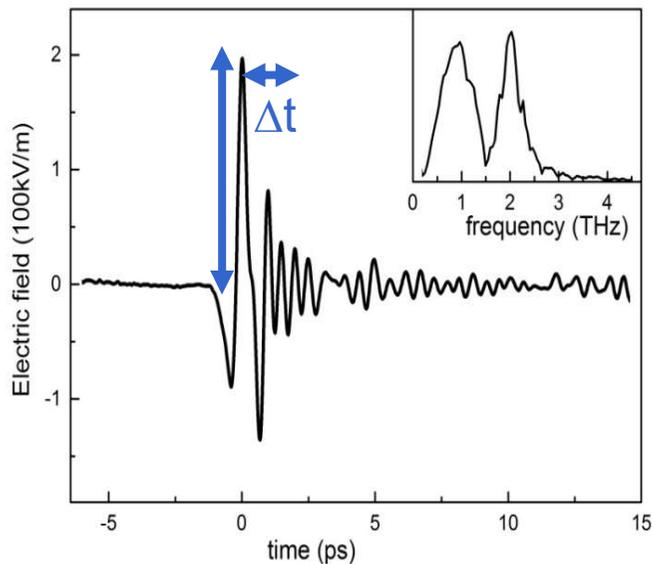
Ex : revêtements diélectriques sur surface métallique

Contrôle ultrarapide par impulsions TéraHertz

Single Shot THz Time Domain Spectroscopy

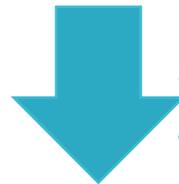


L'approche très performante du THz, avec couplage imagerie et spectroscopie



Approche classique

Scan répétitif lent, point par point, par des centaines d'impulsions laser



Innovation brevetée

Temps d'acquisition $< 10^{-10}$ s
Réduit par un facteur $\sim 10^7$ / état de l'art
Taux d'acquisition > 1 kHz

Approche Teratronics

Une seule impulsion sonde suffisante
Solution très rapide et stable

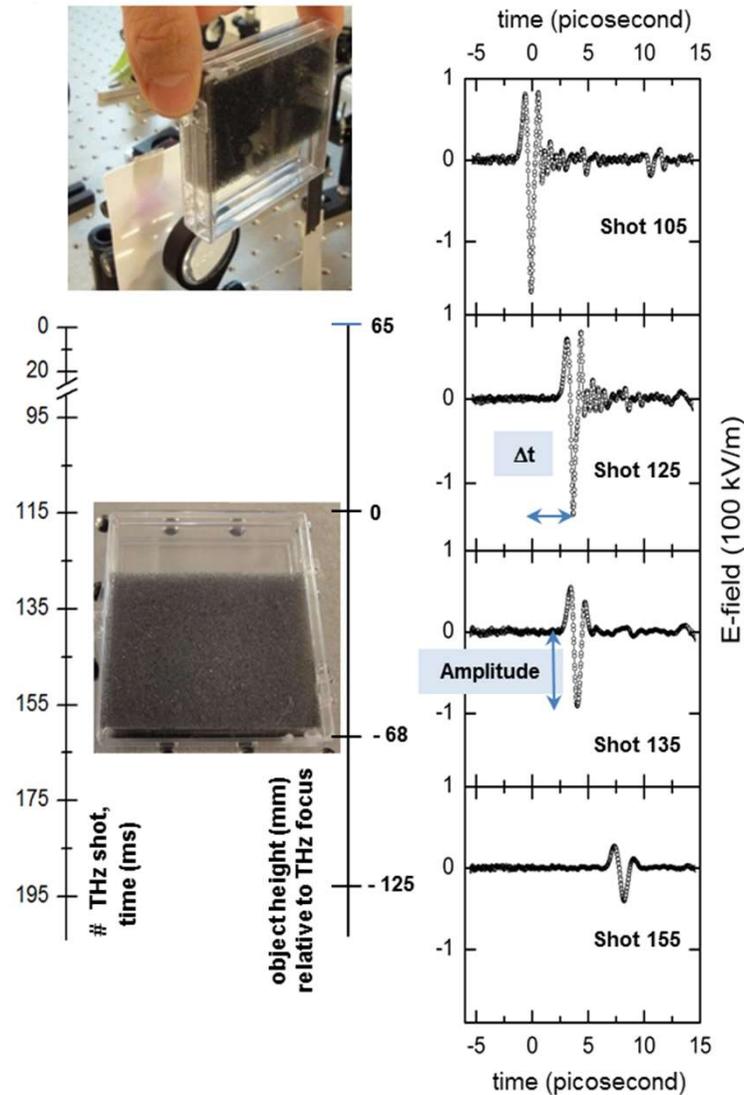
Création de nouvelles solutions :

- Inspection sur site, rapide et automatisé
- Adaptées aux sites industriels pour le contrôle de produits et de procédés
- Scans sur des objets en mouvement possible
⇒ **Contrôle en ligne** dans le cycle de fabrication

Analyse rapide de structures composites en chute libre

« Structure composite » :
Boîte en plastique rigide
contenant un verre
protégé par
deux morceaux de mousse

Mesure pendant
la chute :
vitesse $\sim 1\text{m/s}$,
fréquence d'acquisition
kHz

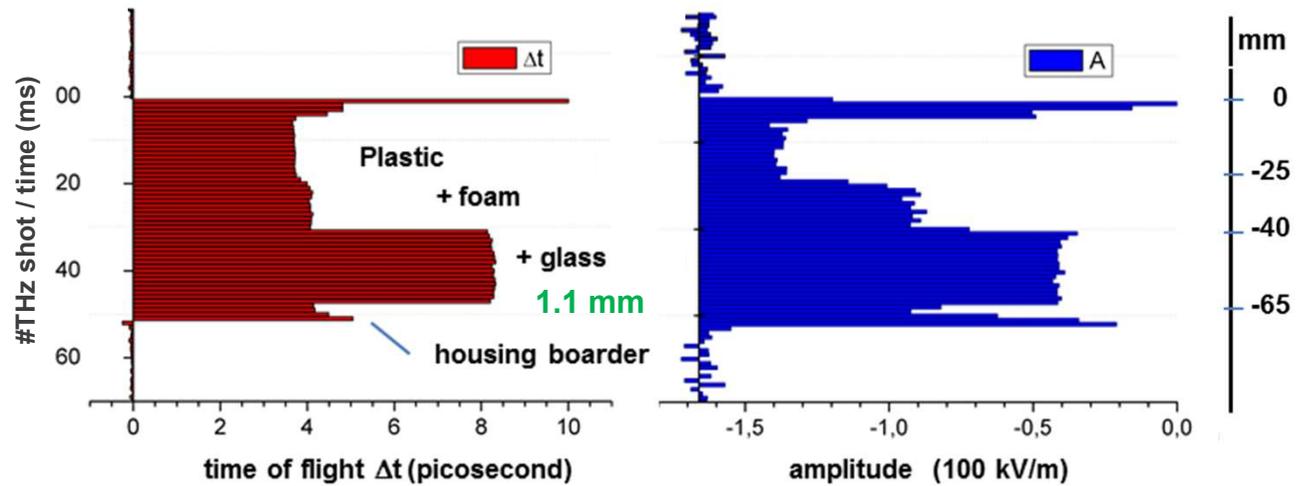
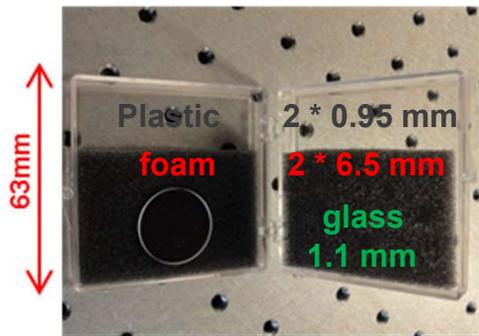


plateforme
THZ
2012

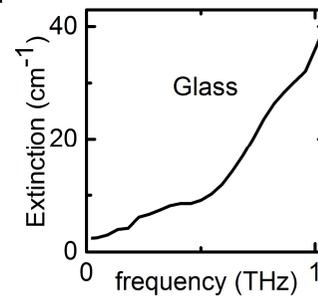
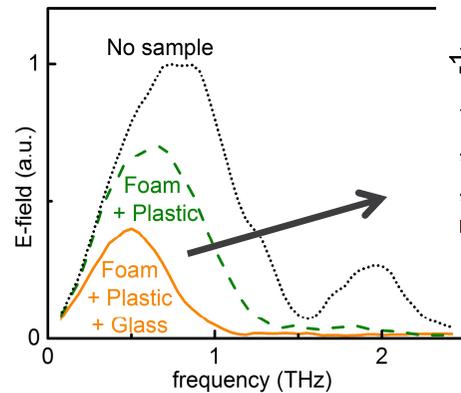
Analyse rapide de structures composites en chute libre

Mesure pendant la chute : durée d'acquisition de 100 millisecondes

Informations issues du domaine temporel



Transformation de Fourier →

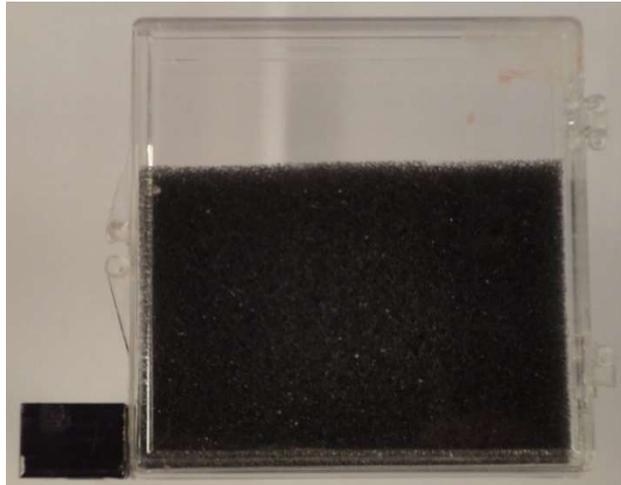


Soda lime with $n_{\text{THz}} = 2.1$

$$d = c * \Delta t / (n_{\text{THz}} - 1) = 1.1 \text{ mm}$$

Cf. IEEE Sensors Journal, Special Issue on THz Sensing 13: 44 - 49 (2013)

Imagerie et détection d'un verre à travers sa protection



Boîte en plastique rigide contenant un verre protégé par deux morceaux de mousse

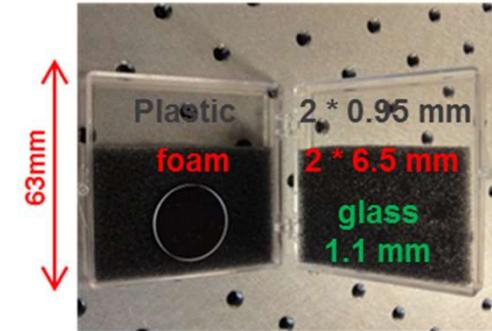
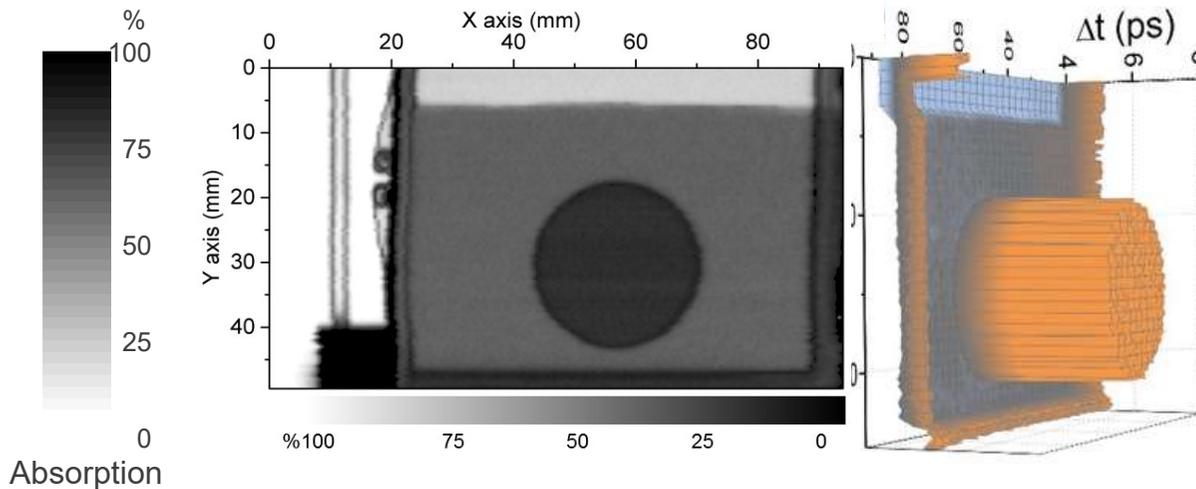


Image 2D en pic d'amplitude

3D par Δt



* Par rapport à la transmission dans l'air

Mesure par balayage pendant le déplacement

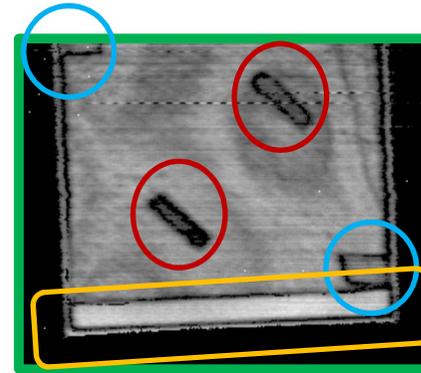
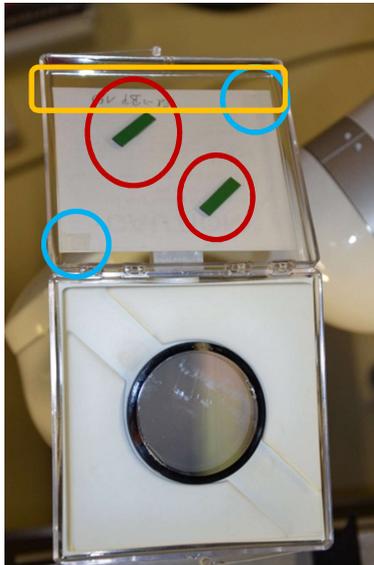
Ici vitesse 0.5 m/sec :

Durée d'acquisition 30 sec
pour 5000 mm²

leader sur le marché :
25mm x 25mm in 20 minutes

Détection des composants
Identification des matériaux
Mesures dimensionnelles

Pellicule de 2 μm dans une boîte en plastique

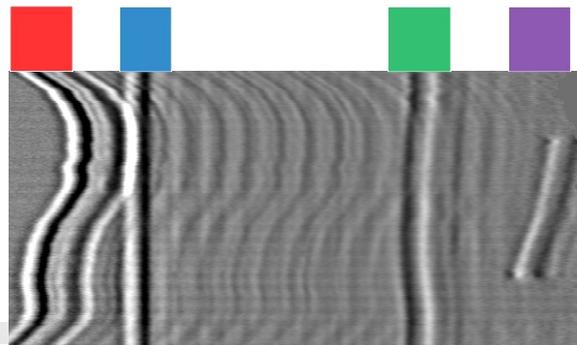
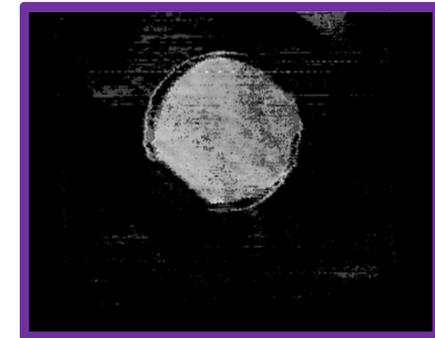
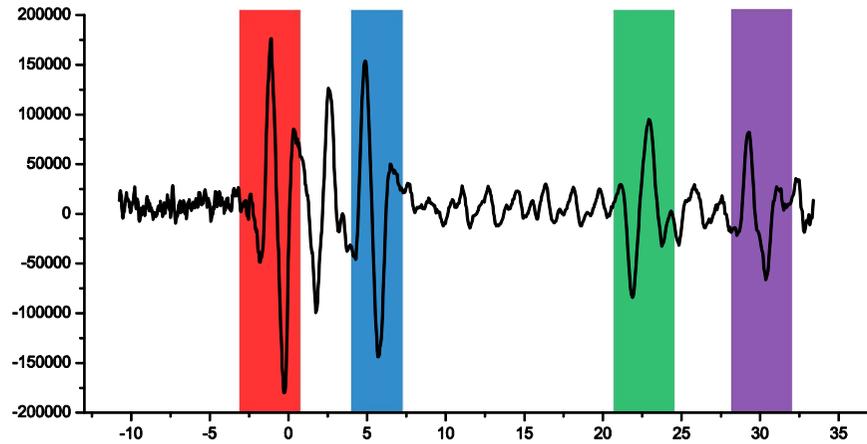


En réflexion

Element de fixation

Scotch

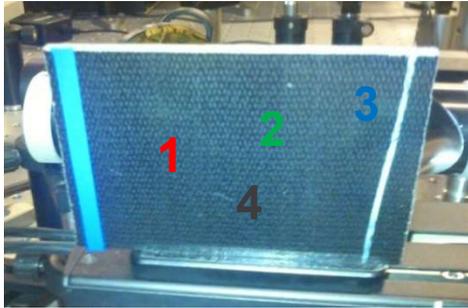
Pas de papier



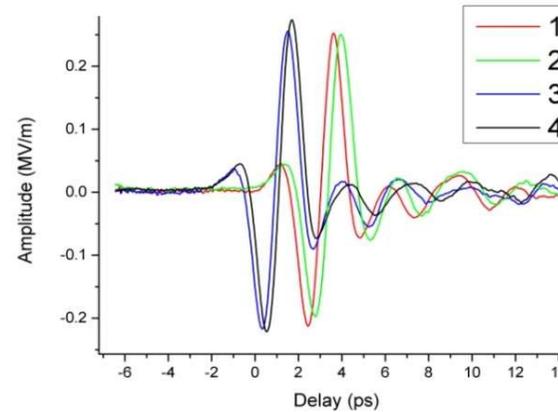
Détection et imagerie des composants, même très fins
Identification des matériaux
Mesures dimensionnelles

Contrôle d'assemblages par collage I)

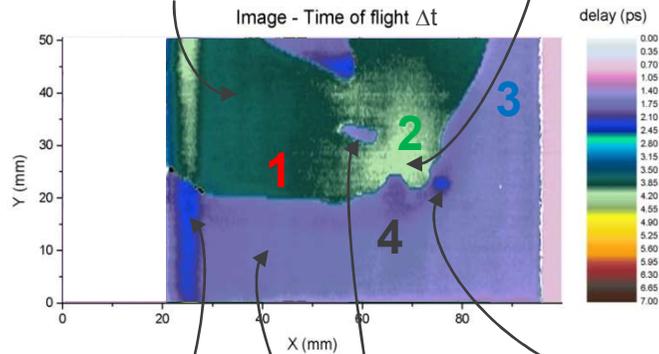
Deux plaques de composites (fibre de verre) collées par du méthacrylate de méthyle
 Temps d'acquisition ~40 seconds (état 2014)



Sample automobile



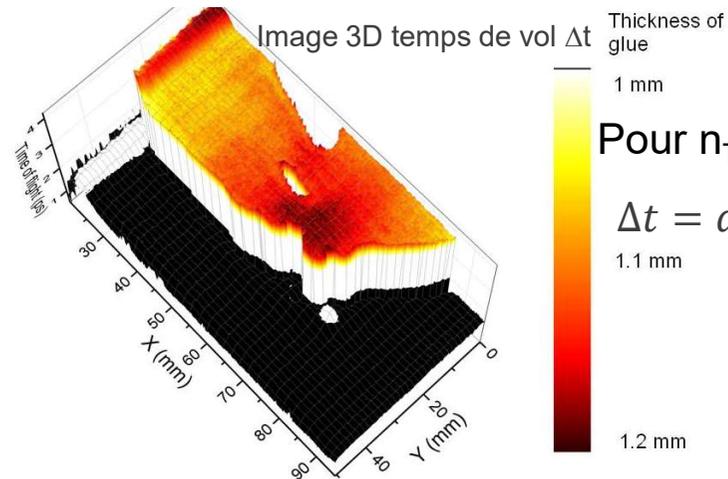
2 plaques + colle Surplus de colle



scotch
référence
spatiale

2 plaques + air
gap (sans colle)

Goutte de
colle



Pour n_{THZ} constant :

$$\Delta t = d \times \frac{n_{THZ} - 1}{c}$$

Représentation d'un seul jeu de données
avec différents paramètres d'affichage

- Distribution de la colle (épaisseur avec précision micrométrique)
- Localisation des zones sans colle

Contrôle d'assemblages par collage II)

Echantillon rétroéclairé



Assemblage:

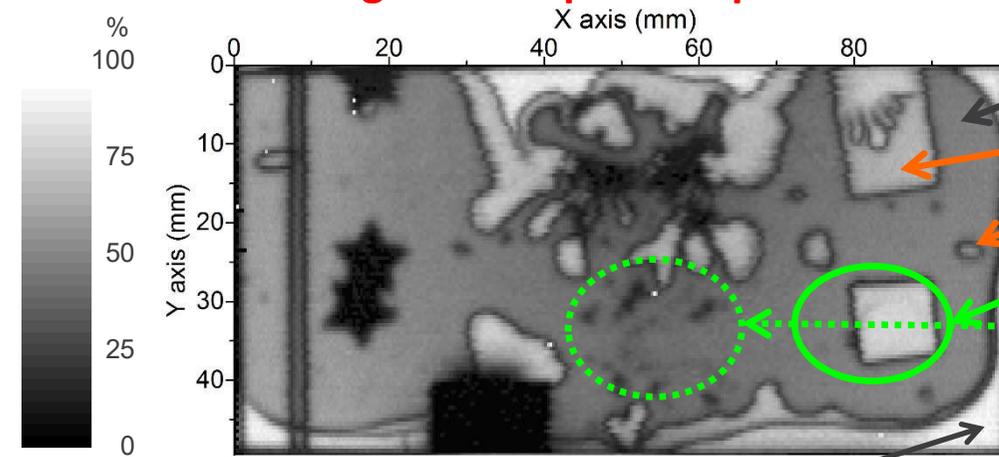
**Plaques de PEHD collées,
avec des inclusions artificielles**

*Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IEEE Xplore)
DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2014.6956127 (2014)*

Temps d'acquisition ~40 sec

**Détection et dimensionnement
des défauts
POD 100%**

Image THz en pic d'amplitude



Colle (araldite)

Air

Téflon, d = 0.5 mm

Particules de PA6

Étoile métallique

Transmission %* * Relative to transmission in pure HDPE (2*2 mm)

Contrôle d'assemblages par collage II)

Echantillon rétroéclairé



Transmission à 2 THz / $\lambda = 0.15$ mm

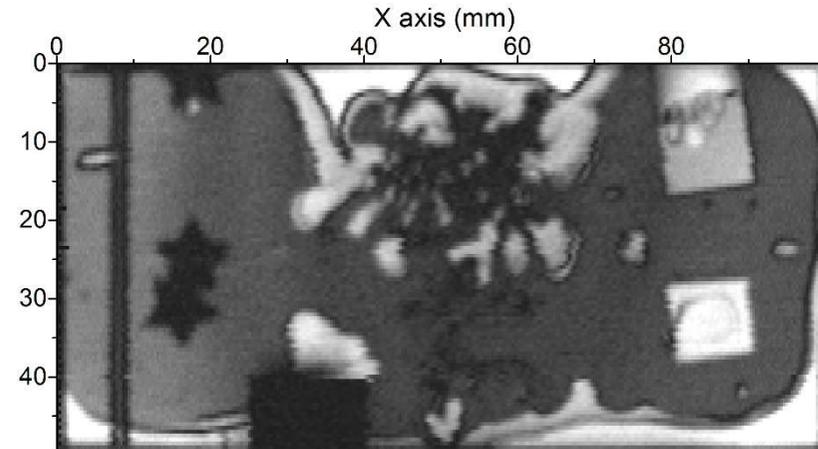
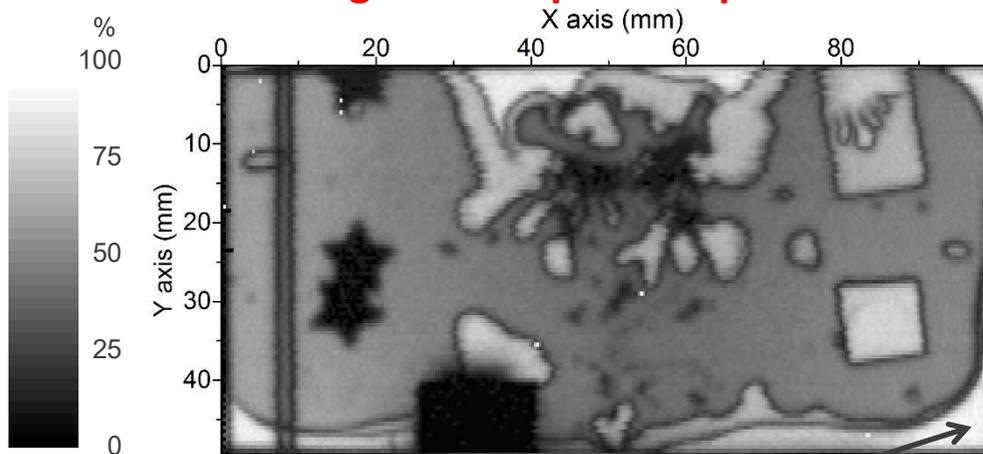
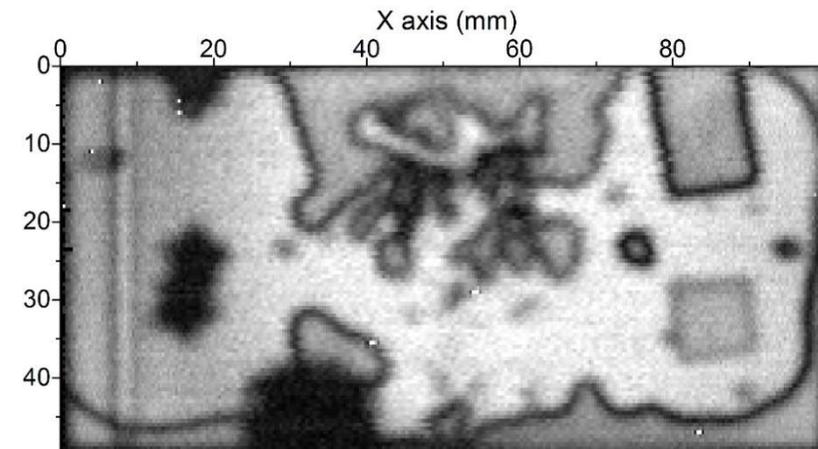


Image THz en pic d'amplitude



Transmission à 0.2 THz / $\lambda = 1.5$ mm



Transmission %* * Relative to transmission in pure HDPE (2*2 mm)

Contrôle d'assemblages par collage II)

- Résolution transversale de quelques 0.1 mm (\propto longueur d'onde) : meilleure résolution aux hautes fréquences
- Meilleure pénétration aux basses fréquences (dépendant du matériau)
- **Identification** de matériaux / différenciation avec des **informations spectrales** additionnelles (Téflon, PA6, colle araldite)

Transmission à 2 THz / $\lambda = 0.15$ mm

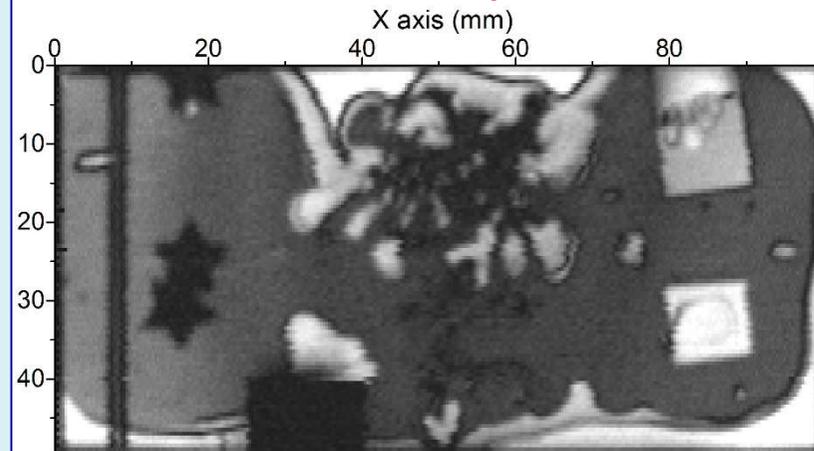
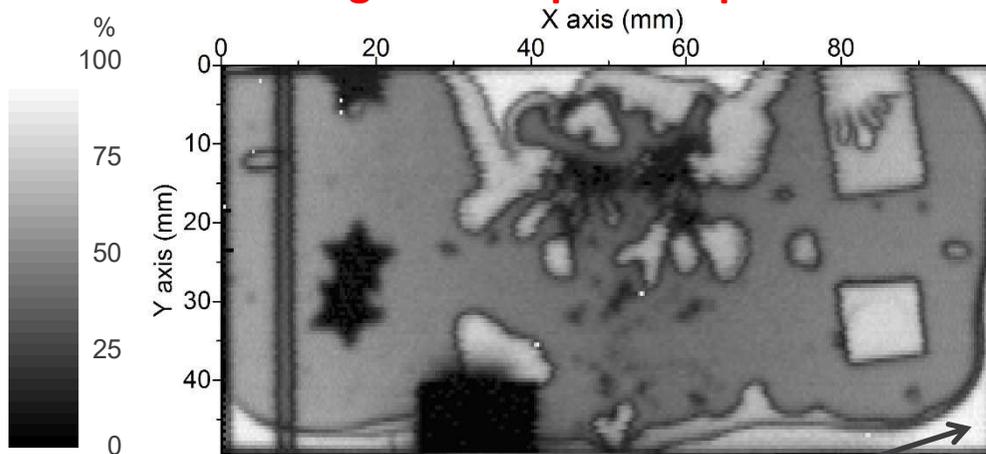
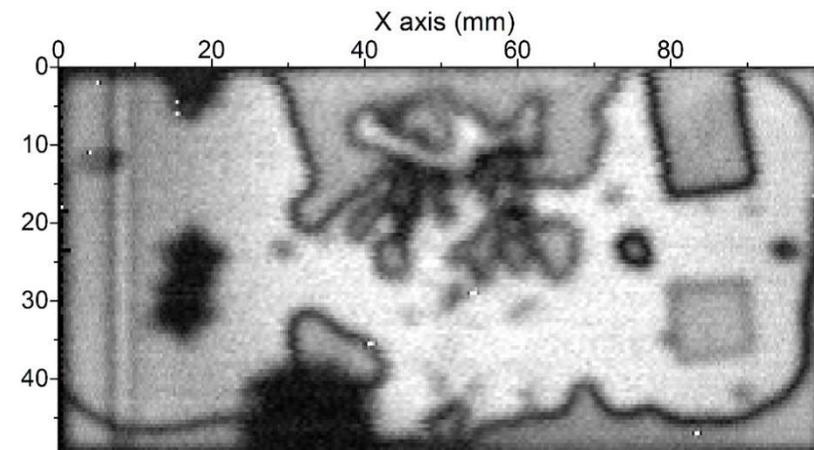


Image THz en pic d'amplitude



Transmission %* * Relative to transmission in pure HDPE (2*2 mm)

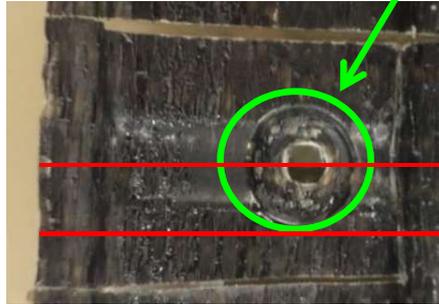
Transmission à 0.2 THz / $\lambda = 1.5$ mm



Contrôle d'un composite GFRP

usiné et endommagé par la réalisation d'un perçage

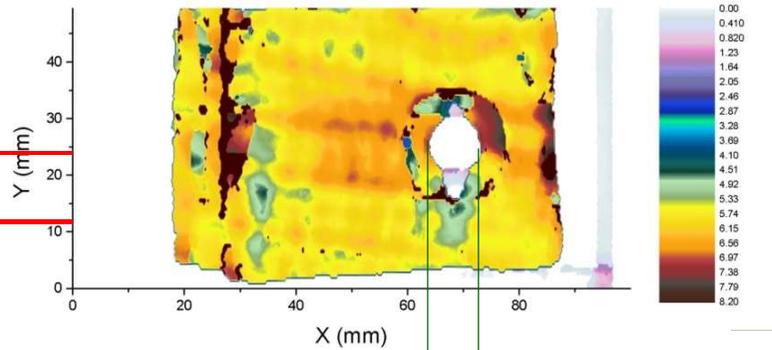
Trou embouti



Sample automobile



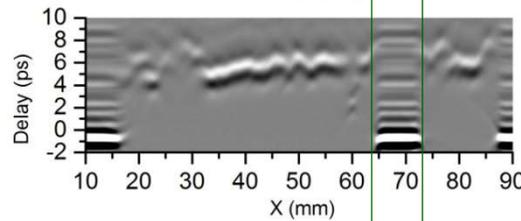
Image - time of flight



Images du C-Scans
(pour 3 délais fixés)

B-Scans (ligne fixée)

Y = 25 mm



Y = 13 mm

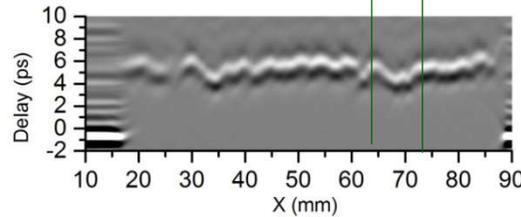
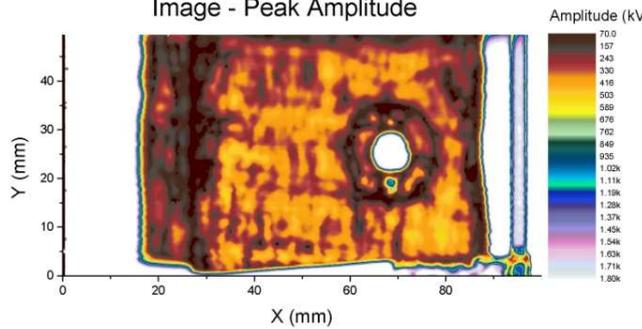


Image - Peak Amplitude



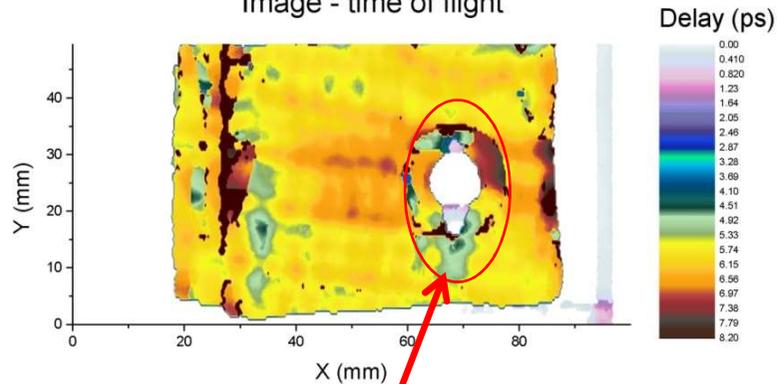
Contrôle d'un composite GFRP

usiné et endommagé par la réalisation d'un perçage

Trou embouti

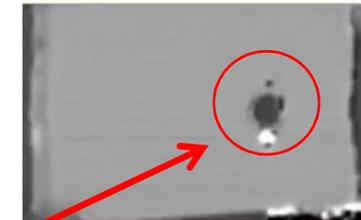


Image - time of flight



Localisation +
caractérisation
de défauts cachés

C-Scans (fixed time)



- Destruction (partielle) de la structure du composite, même au-delà de l'impact direct

- 2 cavités, matériau restant ~360 et 250 μm d'épaisseur

- Perte en densité du matériau, correspondant à ~1 couche

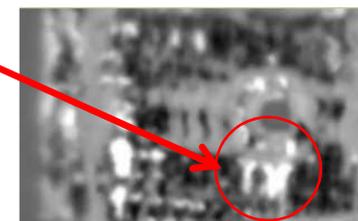
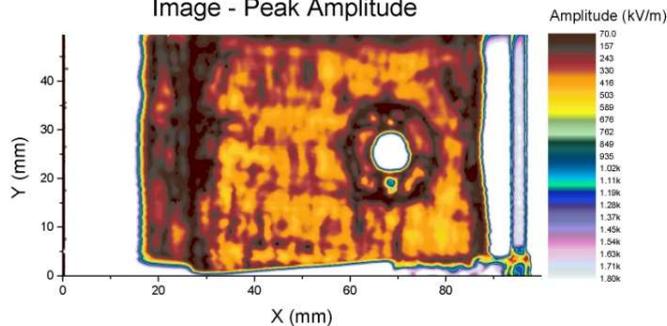


Image - Peak Amplitude



Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IEEE Xplore)

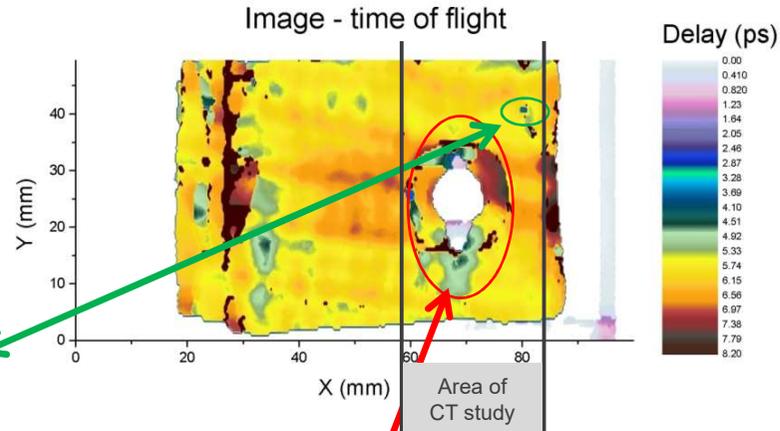
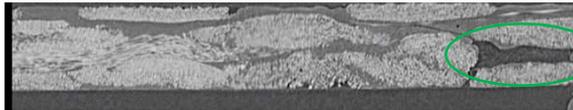
DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2015.7327395 (2015)

Contrôle d'un composite GFRP

usiné et endommagé par la réalisation d'un perçage

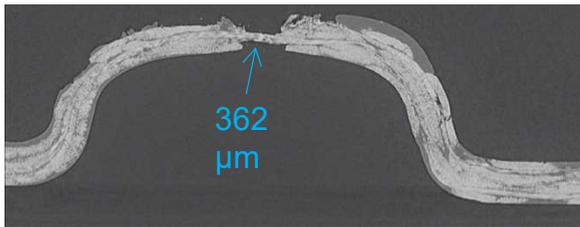
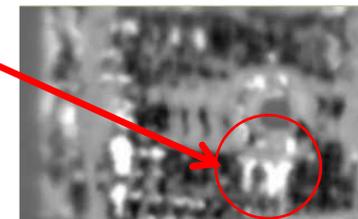
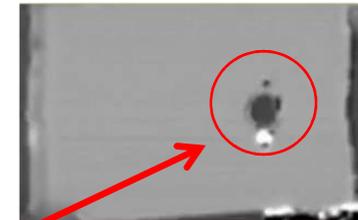
acquisition time ~40 seconds ($5 * 10 \text{ cm}^2$)

Confirmation of the results with CT X-Ray par Novitom (synchrotron Grenoble, ~15 minutes acquisition time)

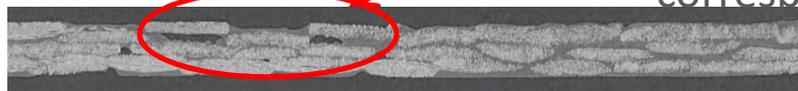


Localisation + caractérisation de défauts cachés

C-Scans (fixed time)

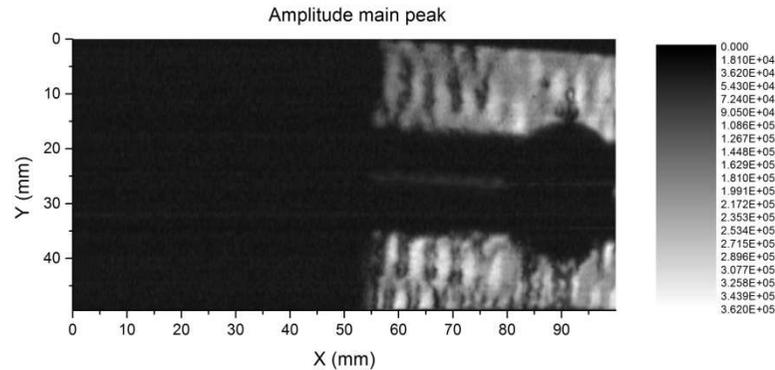


- Destruction (partielle) de la structure du composite, même au-delà de l'impact direct
- 2 cavités, matériau restant ~360 et 250 μm d'épaisseur
- Perte en densité du matériau, correspondant à ~1 couche

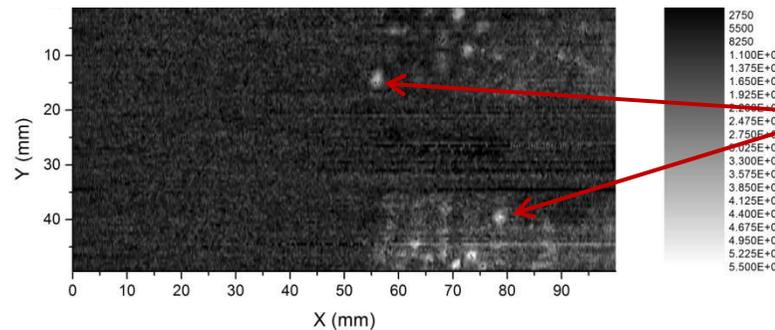


Contrôle d'un composite GFRP

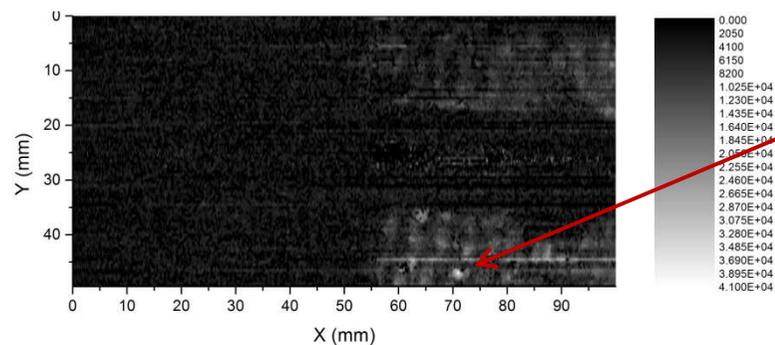
En réflexion : informations additionnelles



Première réflexion :
Face avant



Réflexions ~5 et 7 ps après la 1^{ère} réflexion :
points blancs = delamination,
inclusion ou manque de fibres (air gap)

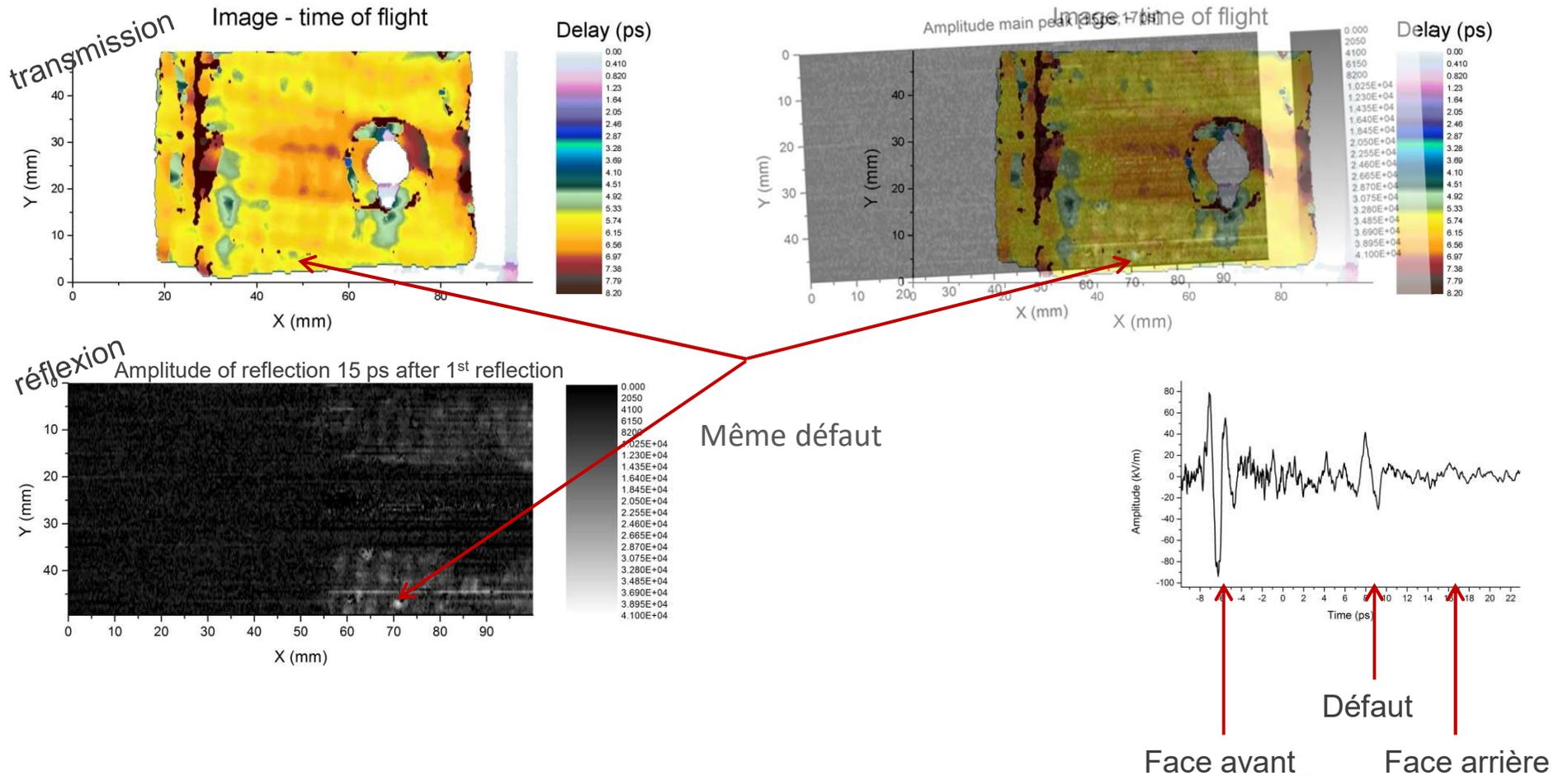


Réflexion ~15 ps après la 1^{ère} réflexion :
points blancs = delamination,
inclusion ou manque de fibres (air gap)

Contrôle d'un composite GFRP

En réflexion: informations sur la position et le type de défauts - Exemple

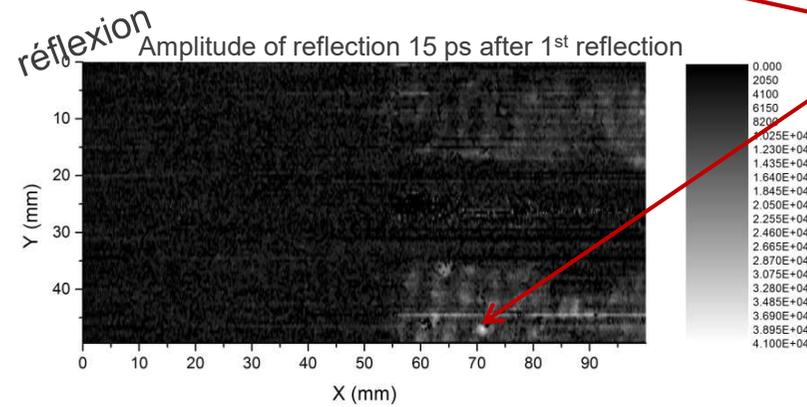
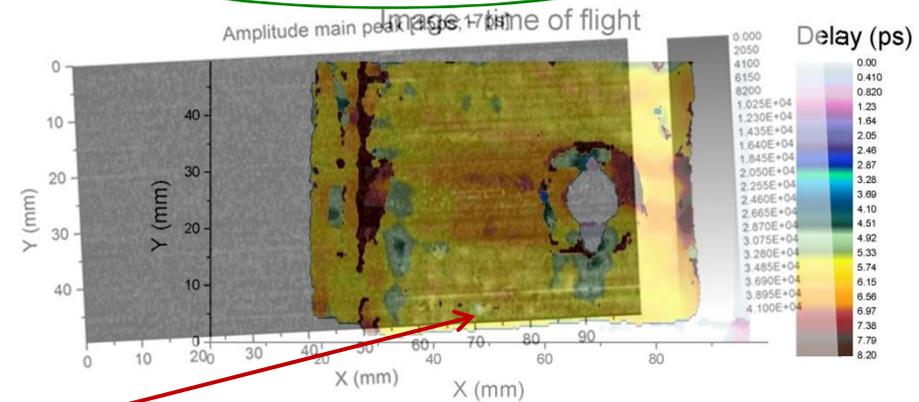
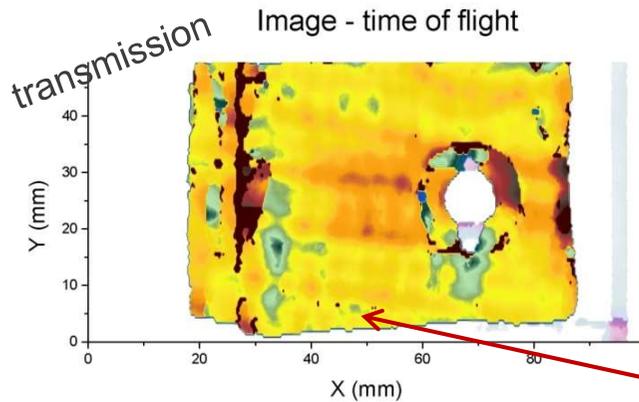
délamination, inclusion ou manque de fibres (=air gap)?



Contrôle d'un composite GFRP

En réflexion: informations sur la position et le type de défauts - Exemple

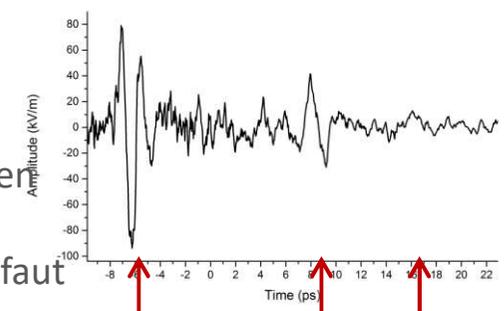
délamination, inclusion ou manque de fibres (=air gap)?



Même défaut

L'information en temps de vol en réflexion donne accès à :

- position en profondeur du défaut **0.97mm après la face avant**
- type et épaisseur du défaut **0.2 mm air (simulation)**

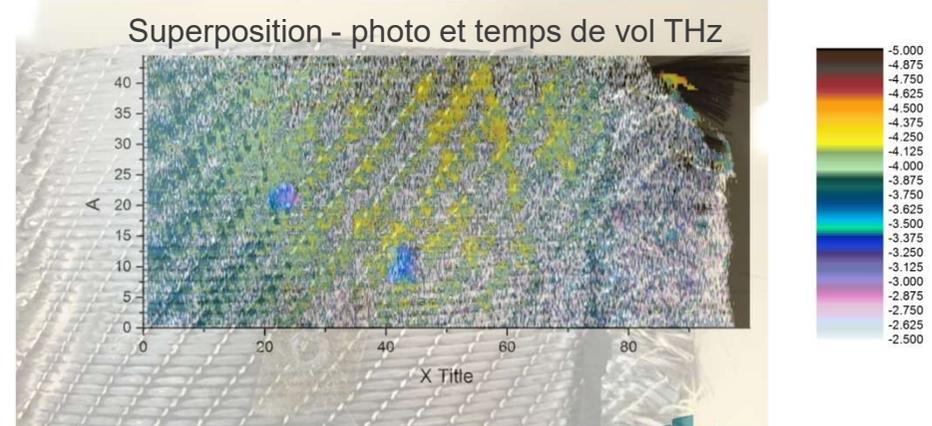
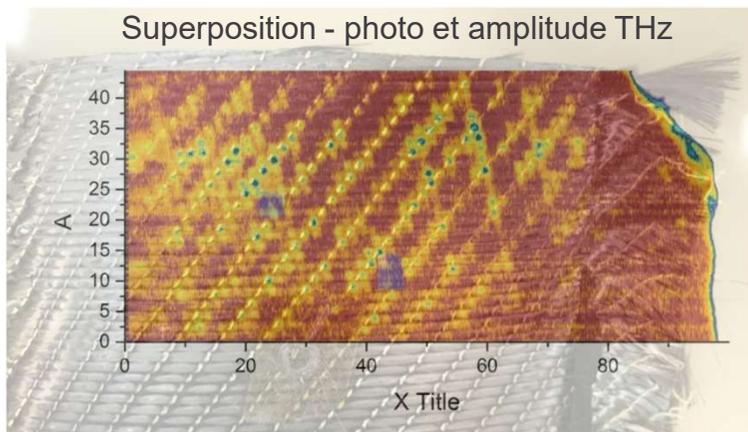
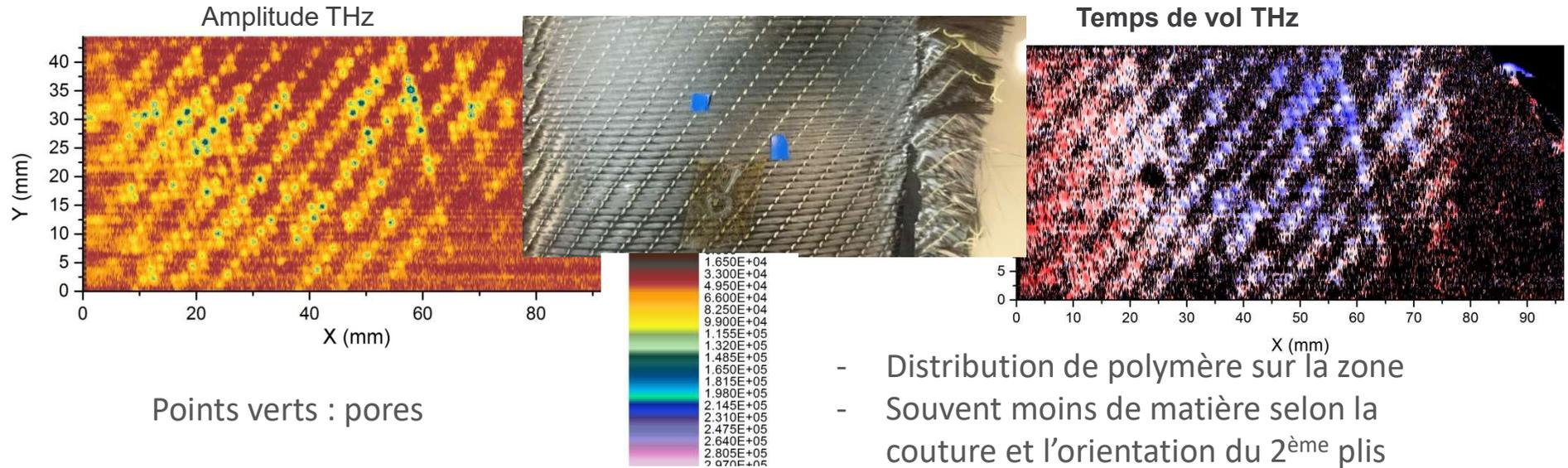


Face avant Défaut Face arrière

Contrôle d'un composite CFRP

Imprégnation de deux plis à +45°/-45°

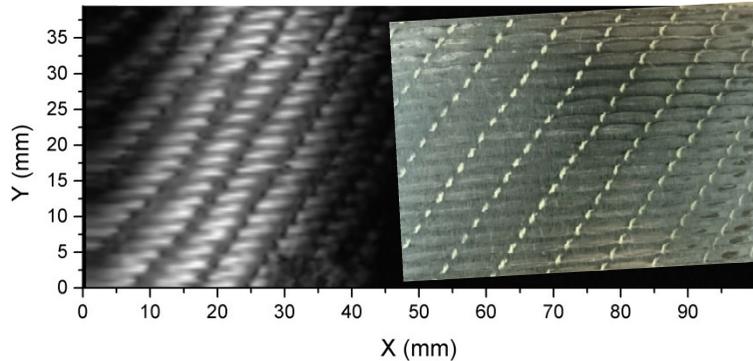
En transmission : localisation de variations / défauts, densité d'ensemble



Contrôle d'un composite CFRP

En réflexion

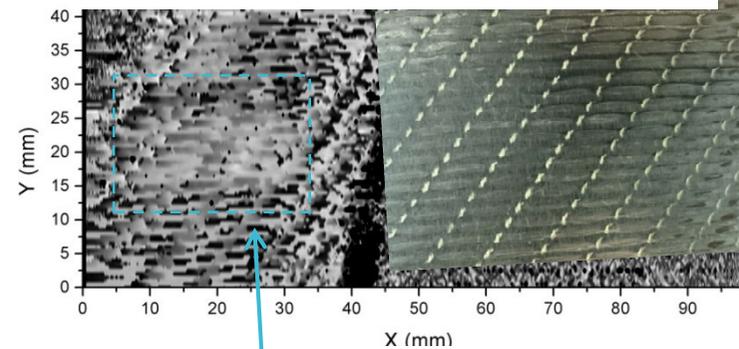
Amplitude de la première impulsion réfléchie



Première réflexion:
face avant, premier plis

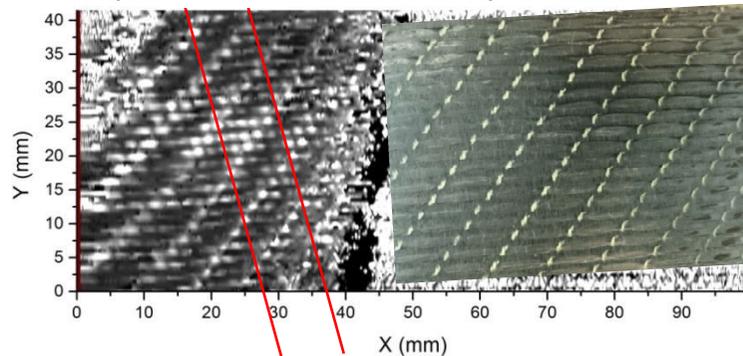
Seconde réflexion:
Information sur l'imprégnation
et la position du 2^{ème} plis

Temps de vol de la 2^{ème} impulsion réfléchie



Région avec plus de
polymère entre les
couches de fibres

Amplitude norm. de la 2^{ème} impulsion réfléchie

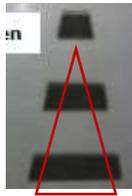


Orientation et position de la 2^{ème} couche de
fibres, à l'intérieur du composite

Liaison tôle – plastique (1)

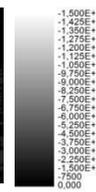
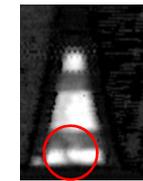
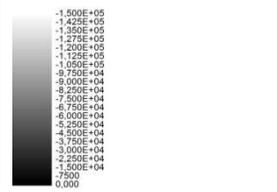
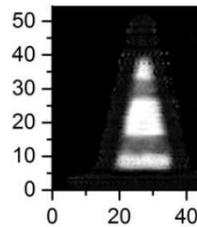
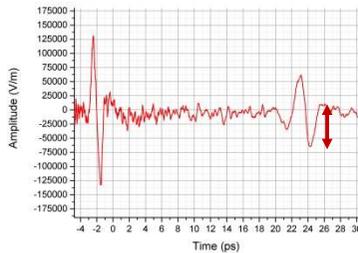
En réflexion

- Echantillon : plastique sur métal dont la surface est traitée par laser



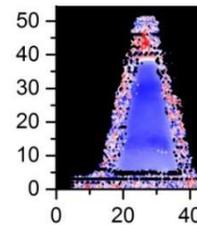
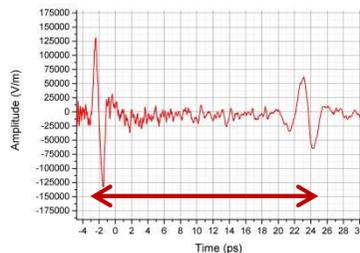
Structuration laser sous le plastique

- L'image en amplitude de l'interface métal/plastique révèle la structuration laser



Some defect or contamination between plastic and steel can be revealed

- Le délai entre la surface et le métal donne accès à l'épaisseur de polymère et révèle un possible « air gap »



Moins de délai pour la zone structurée



Exemple d'un échantillon **decollé**

1ps = 90 µm de plastique
1ps = 150 µm d'air

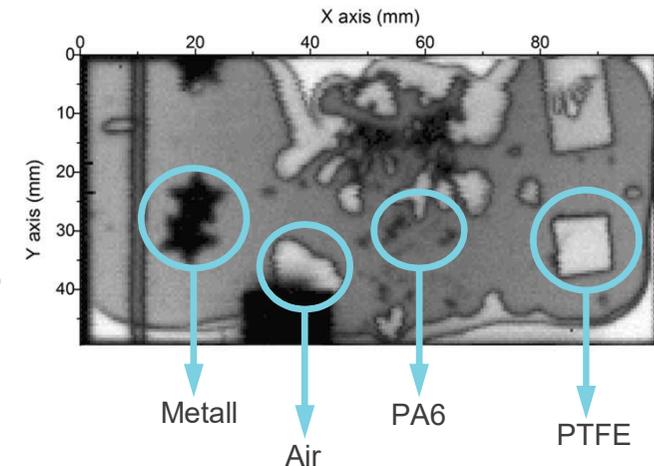
Contrôle ultrarapide par impulsions THz

Single Shot THz Sensing for Rapid Industrial Product and Process Control

- Méthode sans contact ni stress pour l'objet
- Sans danger pour la santé
- Détection et localisation de différents défauts (délamination, inclusion, fissure...)
- Caractérisation de matériaux et défauts (contraste élevé entre différents plastiques)
- Cartographies d'épaisseur, Reconstructions 3D
- Scan d'une zone de 100 cm² en quelques secondes
- Intégration dans le cycle de production, pour le contrôle à 100% de la production
- Inspection efficace et rapide sur site, et hautement automatisée



Bonding of HDPE plates with various defects



Position and identification of inclusions, glue distribution

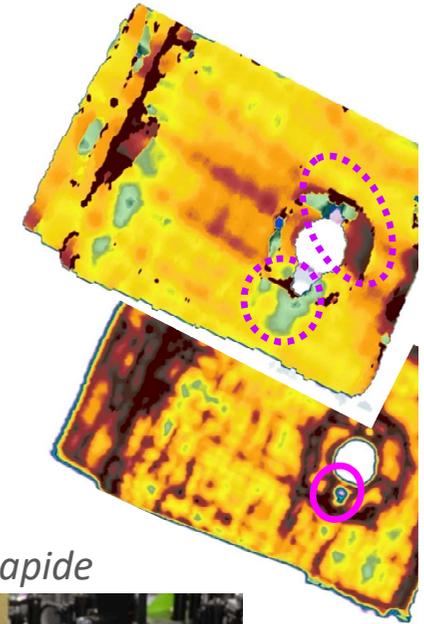
© CNRS / LCP

Conclusion + offre

THz-TDS, une méthode précise et informative

- Observables dans le domaine temporel et spectral
- Méthode directe : Ici pas d'algorithmes ou de modèles complexes
- Structure interne accessible en transmission et en réflexion
- Temps de vol très sensible : épaisseur, densité, profondeur par réflexions
 - ⇒ **Contrôle dimensionnel (aussi 3D)**
 - ⇒ **Localisation et caractérisation des défauts**

« Pulsed THz »



THz-TDS monocoup STRIPP

Une technologie de rupture pour le CND en milieu industriel *10 000 000 plus rapide*

- Détection ultrarapide < 0,1 nanoseconde
- Pas de pièce mobile
- Cadence d'acquisition \geq kHz
- Imagerie rapide et stable sur des objets en déplacement rapide (m/s)



Teratonics offre

- Instruments pour le contrôle en ligne, pour l'inspection automatisée
- Service d'analyse pour R&D de nouveaux produits, test de fatigue, fin de vie...

Diverses publications sur STRIPP et ses applications

Applied Physics B **94**, 95 - 101 (2009)

Radiation Physics and Chemistry **78**, 1099-1101 (2009)

IEEE Sensors Journal, Special Issue on THz Sensing **13**: 44 - 49 (2013)

European Conference on NDT 2014

Infrared Millimeter and Terahertz Waves conference *2 (2014)

- (2015) et plus



Accompagnement / Soutien financier

- **ASTRE**

- **EuroFEL**



- **1^{er} Prix de la Valorisation de l'Université Paris Sud 2012**



Comprendre le monde,
construire l'avenir®



- **Laboratoire d'Excellence
Physics Atom Light Mater**



- **bpifrance**





Advanced
Terahertz Photonics
for Enhanced
Productivity and Reliability

Non-destructive testing as a laboratory service

Systems for online production control and inspection

TeraTronics S.A.S.
Avenue Jean Perrin, bat. 350, 91400 Orsay
www.teratonics.com

