



# Technologies TeraHertz

-

## COMET Mardi 30 novembre 2021



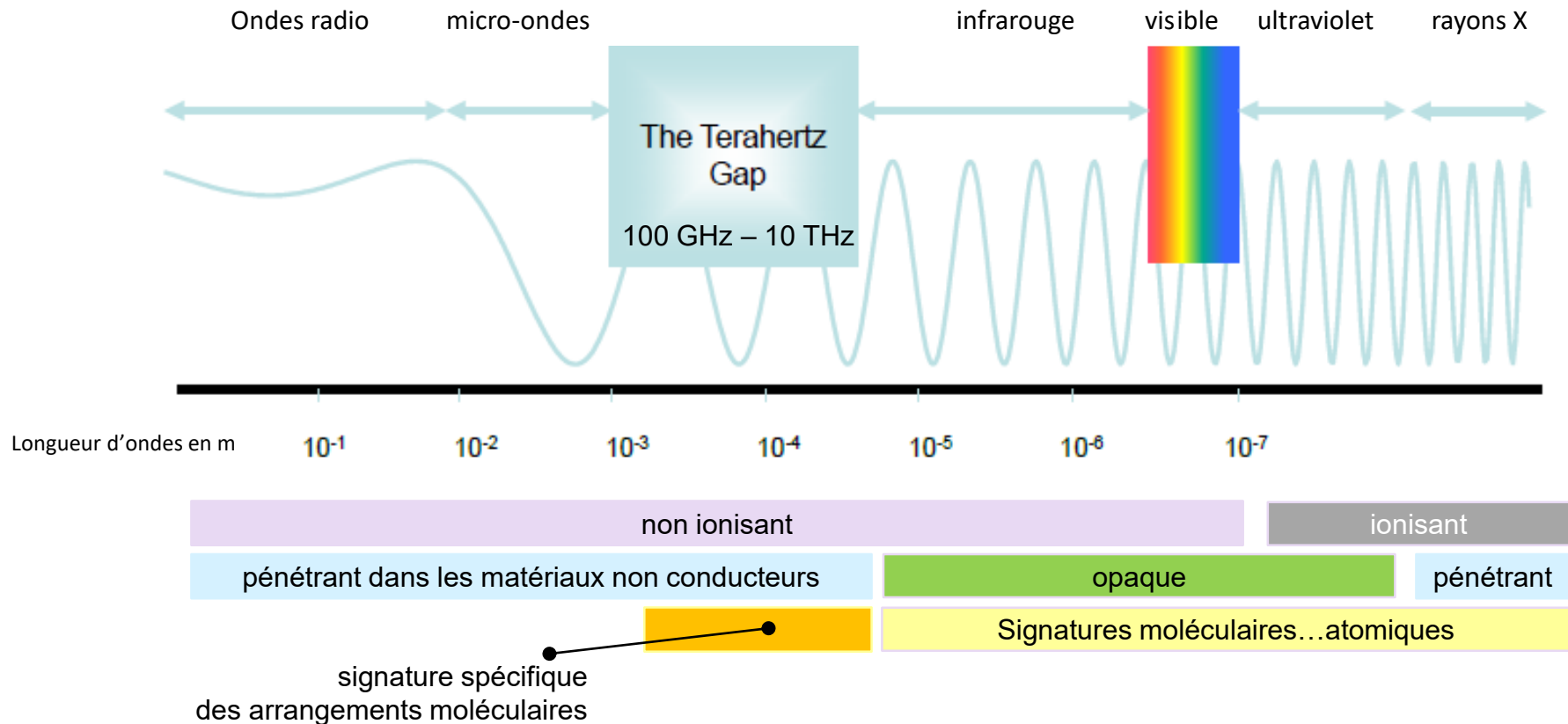
«Contrôle non destructif des propriétés internes des matériaux  
au service de leur recyclabilité»

*3D Insight into technical materials*



# Introduction

## Nouveau domaine d'ondes électromagnétiques

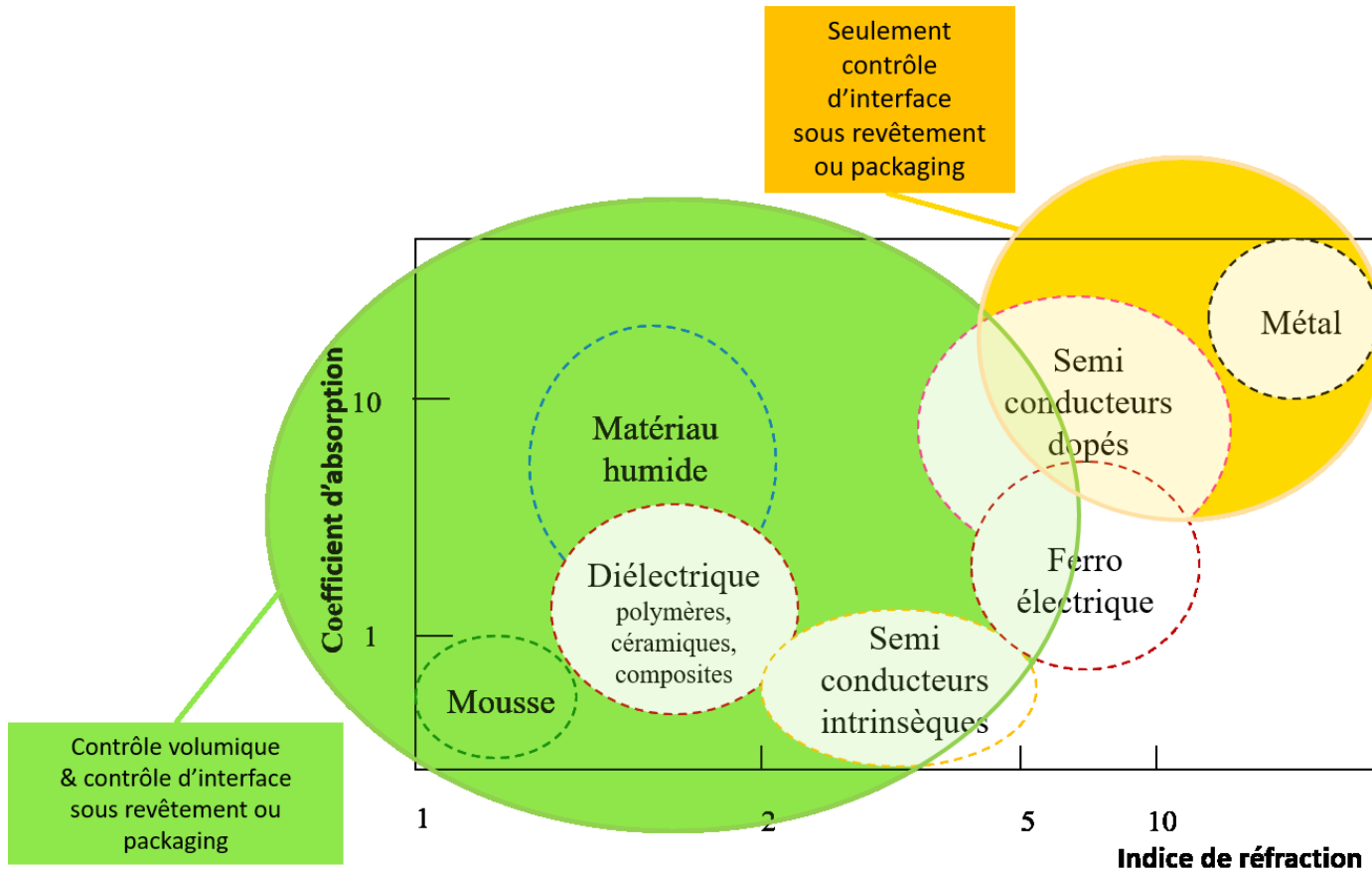


- Jusqu'à récemment, inaccessible par manque de sources et de détecteurs
- aux aptitudes remarquables: notamment haute sensibilité de détection



# Technologies *téra*hertz

## Interaction onde-matière - solides



### Métal:

Absorbe et réfléchit la totalité du signal

- ✓ Bonne détection
- ✓ Bon contrôle sous revêtements

### Eau et liquides polaires :

Absorbe et réfléchit la totalité du signal

- ✓ Bonne détection
- ✓ Taux d'humidité
- ✓ Suivi de reprise en eau ou séchage

### Composites carbone:

Absorbe et réfléchit le signal

- ✓ Fibres unidirectionnelles
- ✓ Taux de charges de carbone dans la matière



# Notre *société*

## Profil et partenariat



- **Création** : 2013, Montpellier.
- **Equipe pluridisciplinaire** : 19 personnes

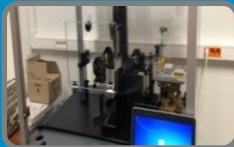
### Nos partenaires :

- **Collaboration** : spin-off du CNRS
- **Activité** : spécialiste du domaine TéraHertz



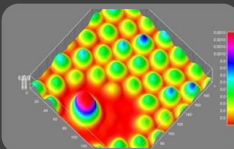
#### Collaboration R&D

- Caractérisation de matériaux, Contrôle de procédés, Prototypage de systèmes



#### Ingénierie de Systèmes de CND TeraHertz

- mesure de teneur, imagerie, tomographie, spectrométrie, mesure d'épaisseur



#### Services sur plateforme ou site

- Analyse de matériaux, études de faisabilité sur des échantillons ou des pièces



UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER



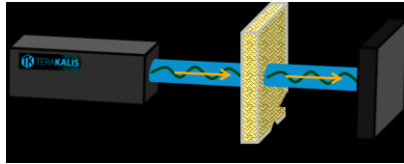
Les Business Angels des Grandes Ecoles



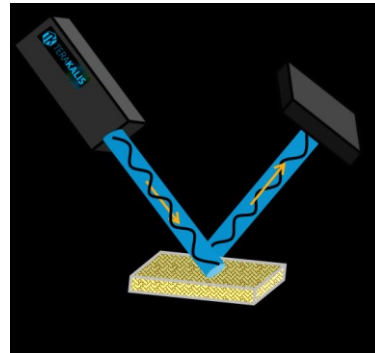


# Technologies TeraHertz

Systèmes de mesure TeraHertz pour les tests non-destructif au cœur de la matière



Transmission



Réflexion

La configuration du système opto-mécanique doit être adaptée :

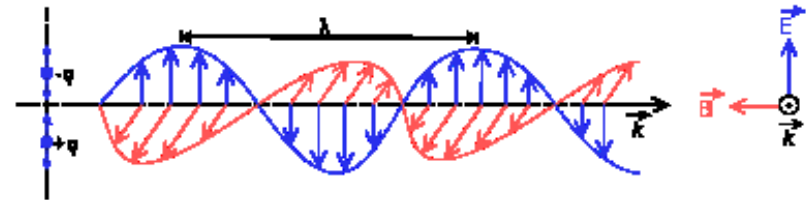
- ✓ aux types de problèmes de contrôle à résoudre
- ✓ aux performances attendues en termes de résolution spatiale, de temps d'acquisition et de détection ou de sensibilité de caractérisation.

Ces systèmes actifs sont constitués d'une source émettrice et d'un capteur.

Il existe deux principaux modes d'analyse:

- ✓ la transmission
- ✓ la réflexion,

Dépendant du contexte matériel et de l'application visée.



**Grandeurs mesurées :**

amplitude, phase et polarisation de l'onde

**Paramètres variables :**

gain d'amplification, polarisation de l'onde, plan focal, longueur d'onde, angle d'incidence

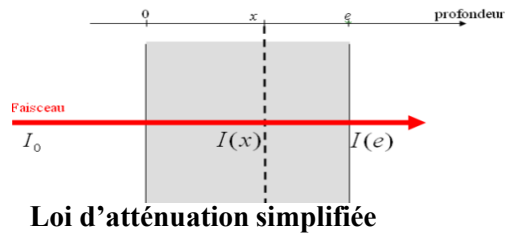


# Technologies *téra*hertz

4 principes sur lesquels se repose les différents systèmes de contrôle développés par Terakalis

1er principe :

atténuation dans la gamme 0.1 à 0.6 THz

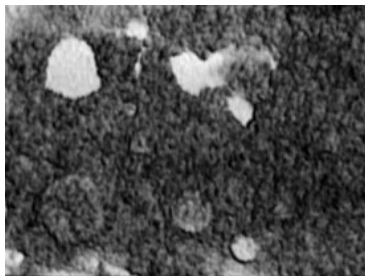


Loi d'atténuation simplifiée

$$I(x) = I_0 e^{-\sigma n x}$$

Détecte les **HETEROGENEITES** de la matière

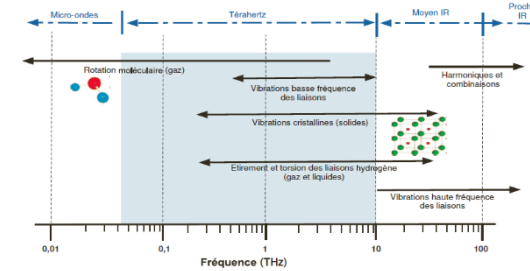
porosités, délaminations, rupture de fibres,  
inclusions, contaminations ...



Ex : Image 2D Interface  
métal/mousse

2ème principe :

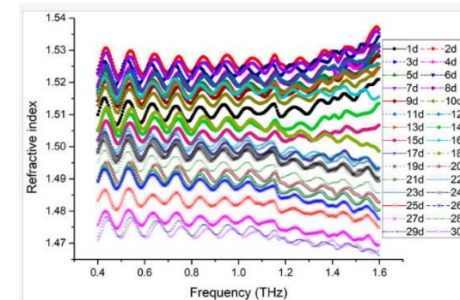
résonance dans la gamme 0.6 à 10 THz



Potentiel intéressant pour l'analyse des changements  
morphologiques internes

Caractérise la **CONFORMATION** de la matière

crystallinité, type d'arrangement moléculaire,  
polymorphisme, polymérisation, dégradation



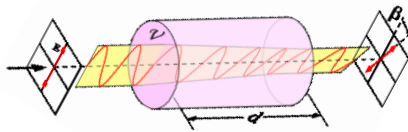
Ex: Vieillesse aux Ultraviolets  
(PolyPropylène)



# Technologies *téra*hertz

4 principes sur lesquels se repose les différents systèmes de contrôle développés par Terakalis

3<sup>ème</sup> principe :  
optique

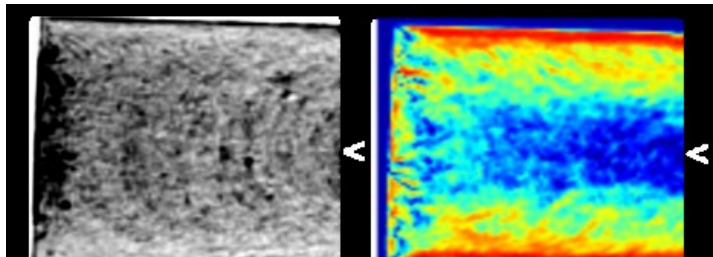


Loi du pouvoir rotatoire

$$\alpha = \pi l \frac{(n_G - n_D)}{\lambda}$$

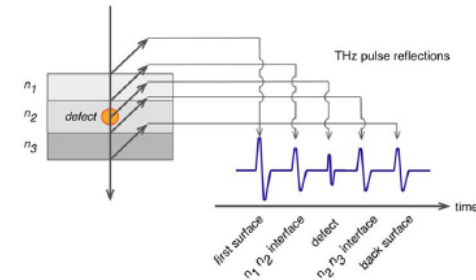
**Caractérise l'ANISOTROPIE de la matière**

orientation des fibres, arrangements spatiaux des molécules, bi-réfringence, stress



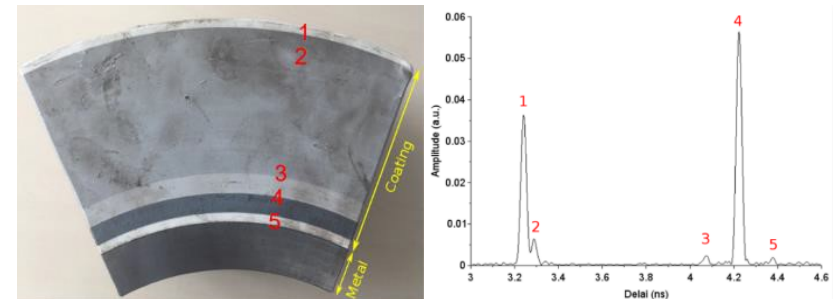
Ex: Alignement de fibres dans un composite

4<sup>ème</sup> principe :  
réflexion sur interface entre 2 matériaux



**Caractérise les EPAISSEURS de la matière**

épaisseur de couches, multicouches, position en z d'un défaut...

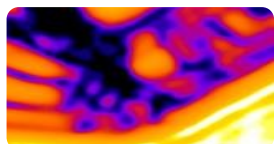


Ex: Mesure d'épaisseur d'un revêtement multicouche forte épaisseur sur substrat métallique



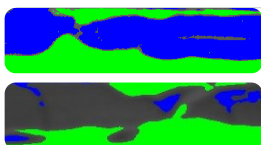
# Notre *société*

Nos références, +200 études démonstratives



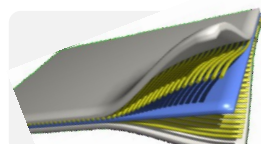
## Inspection de défauts structurels

*porosité, contamination, inclusion d'eau, stress interne*



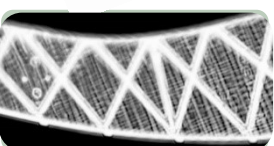
## Contrôle de cordons de soudure / collage

*interruption, dimensions, porosité, défaut cohésif et adhésif*



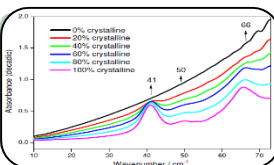
## Contrôle de matériaux multicouches

*corrosion, défauts d'interface, épaisseurs individuelles, faibles ou fortes épaisseurs, substrats rugueux ou courbes*



## Contrôle de matériaux composites

*Porosités, défauts d'impregnation, délamination, taux d'alignement et orientation des fibres*



## Contrôle avancé de transformation de matières

*Cristallisation, polymérisation, dégradation*

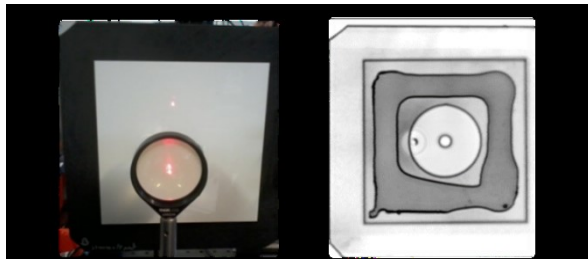
**R&D**



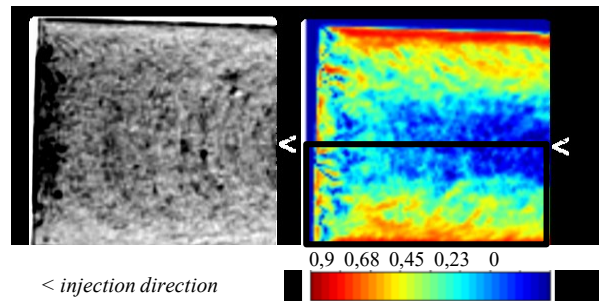


# Les applications cibles

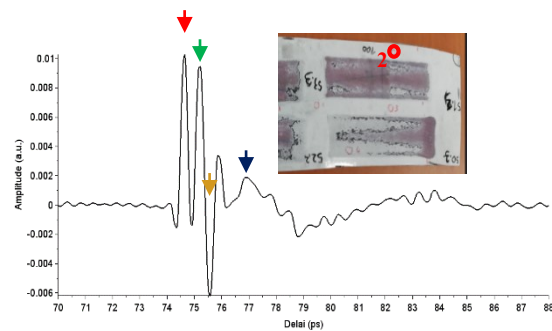
## Exemples d'analyses et contrôle par ondes TeraHertz



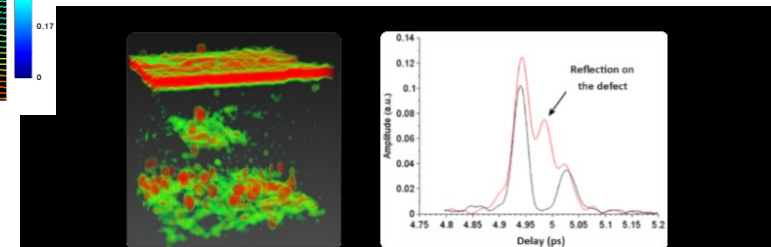
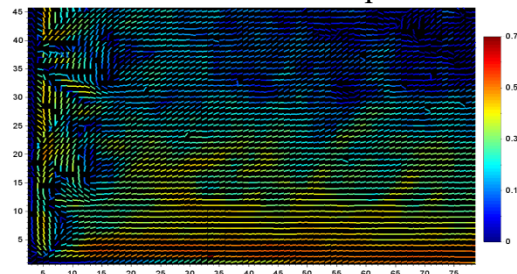
Contrôle d'un assemblage collé polymère-composite



Taux d'alignement des fibres dans un matériau composite



Mesure de l'épaisseur d'un revêtement multicouche sur substrat composite



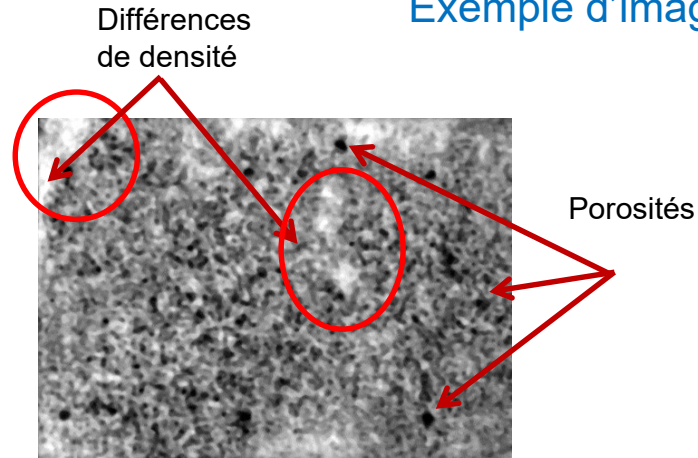
Cartographie d'une délamination en profondeur d'un patch composite



# Les *applications cibles*

## Contrôle de dégradation de barrières thermiques

### Exemple d'imagerie 2D de défauts dans les mousses



Mousse isolante  
Renfort structuraux

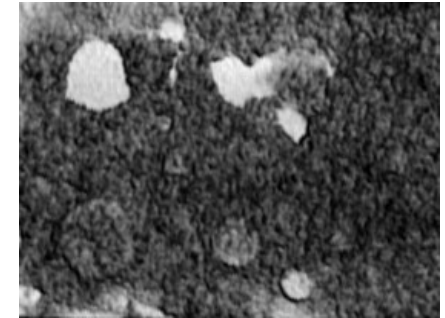
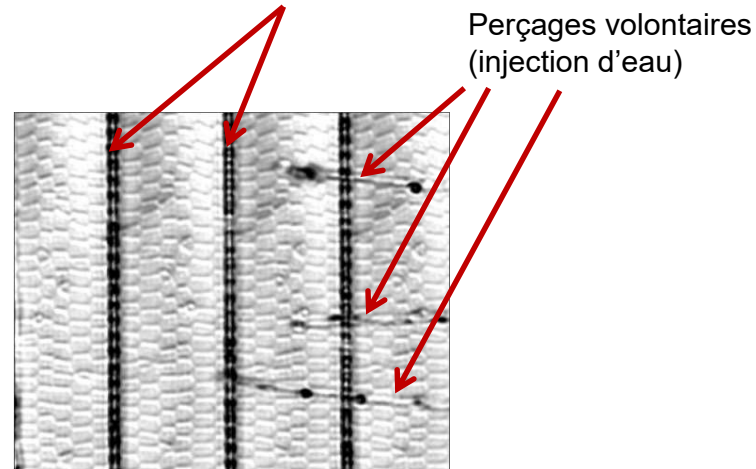
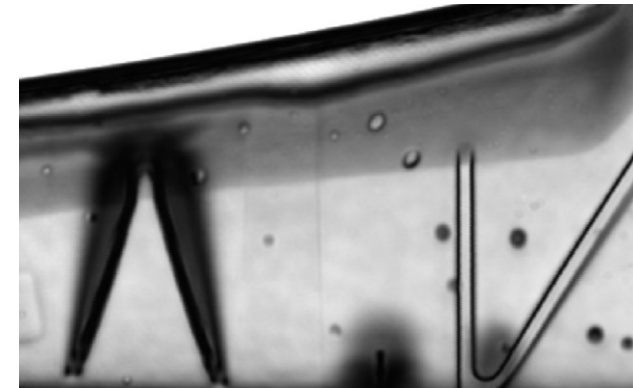


Image 2D Interface métal/mousse  
Défauts de collage



Mousse isolante structurée



Porosités dans un composite  
PU/Mousse/PU



# Les applications

## Industrie Aéronautique

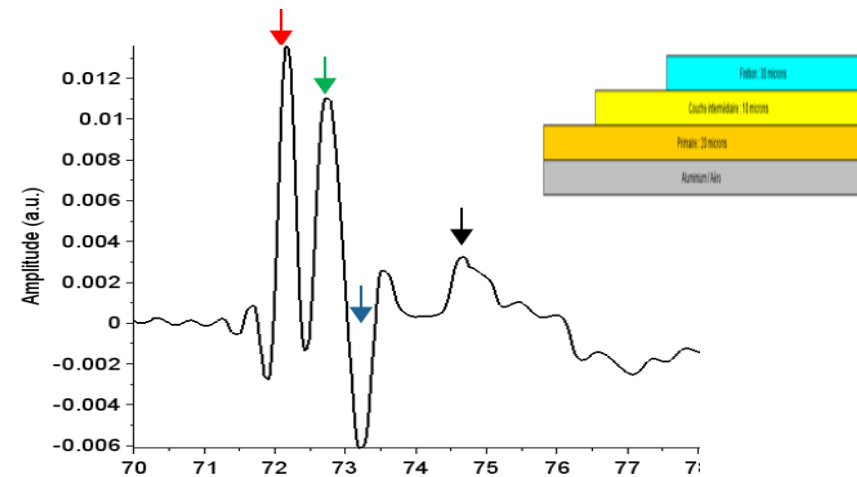
### Production de matériaux multicouche



Revêtement Aéronautique



Profile THz en réflexion  
Revêtement de peinture multicouche



Critères	Valeur (1)
Gamme d'épaisseur	15µm – 10 mm
Taille du Spot	2 mm à 500µm
Précision	+/- 2µm avec calibration
Vitesse d'acquisition	10 Hz
Discrimination	Mono et multicouche
Distance de travail	2 mm à 5cm



# Les *applications cibles*

## Détection de corrosion sous revêtement époxy

Imagerie par atténuation de signal

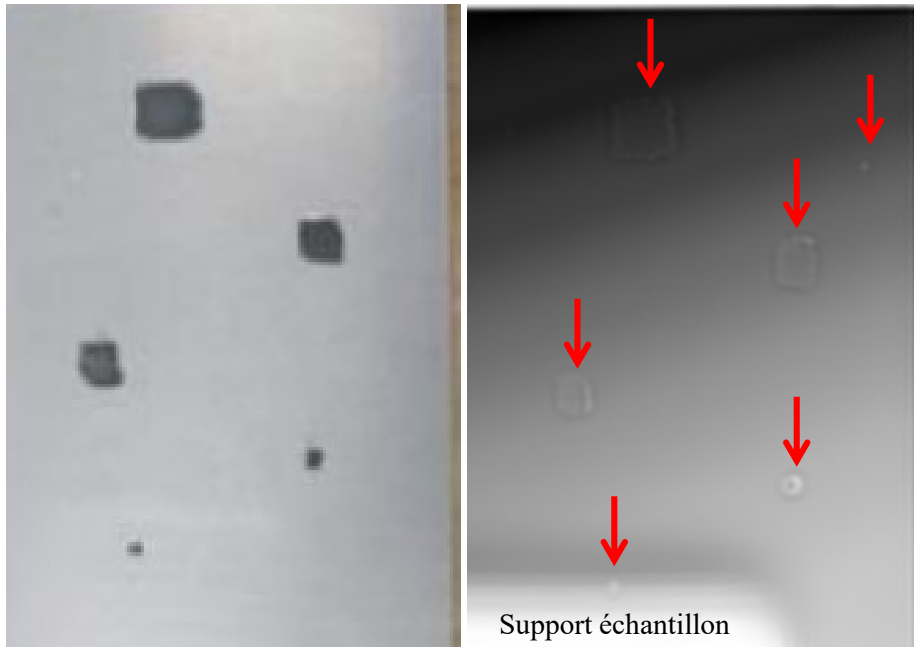
Métal Aluminium

Attaque acide

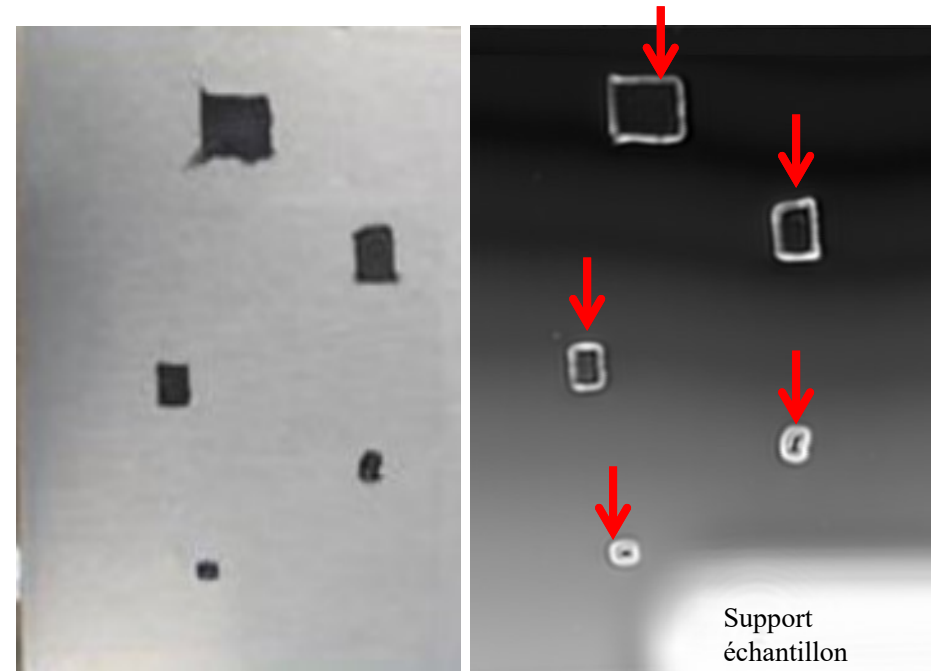
Les défauts vont environ de  $1\text{cm}^2$  à  $1\text{mm}^2$

Revêtement époxy 1mm

Défauts de corrosion attaque acide (temps 1min HCL)



Défauts de corrosion attaque acide (temps 1h HCL)

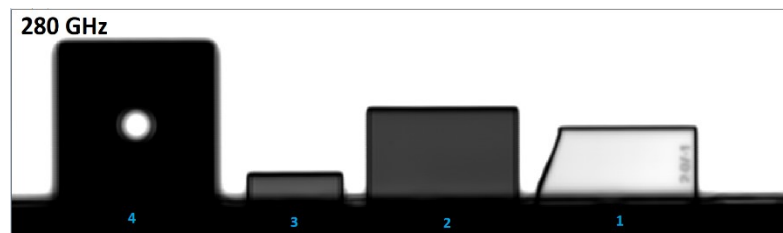


Cette étude permet de mettre en avant l'évolution de la signature de la corrosion au cours du temps dans le domaine THz  
Ceci nous permet d'envisager réaliser du suivi de vieillissement

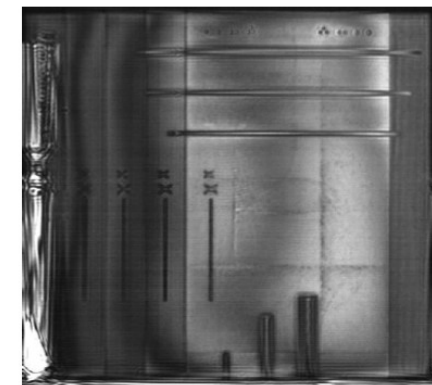


# Les applications cibles

## Contrôle de céramique



	100GHz	150GHz	300GHz
Résolution d'imagerie (mm)	4	2,6	1,2
Si3N4	>100mm	>100mm	70mm
SiC	15mm	10mm	5mm



Résolution spatiale <1,2mm  
 Taille minimale de défaut détectable 0,4mm  
 Epaisseur traversée 20mm

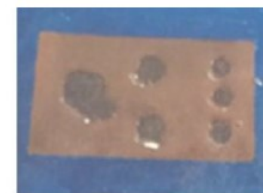
## Assemblage collage

Image THz d'éprouvette Si3N4, mode transmission,  
 339 pixels \* 166 pixels, pas 0.3 mm



Défaut créé

Image THz





# Les *applications cibles*

## Contrôle d'assemblage de céramique

### Assemblage collage

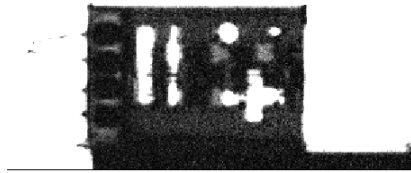
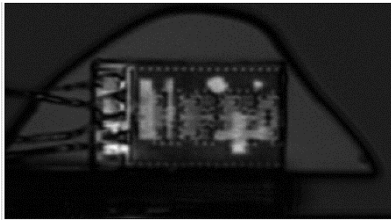
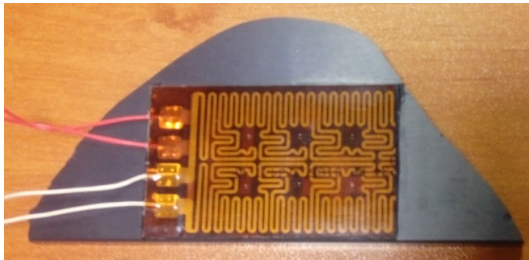
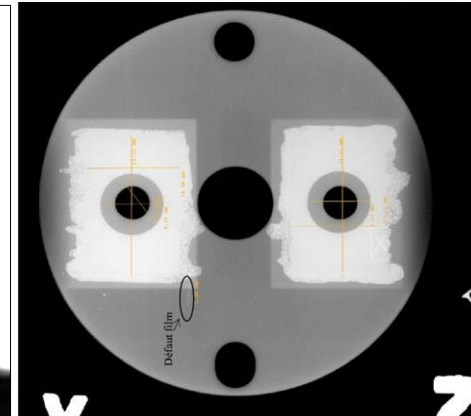
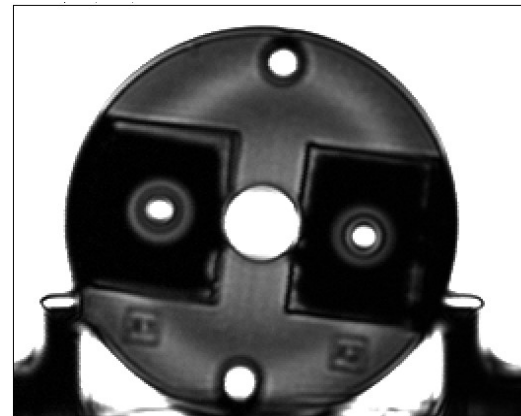
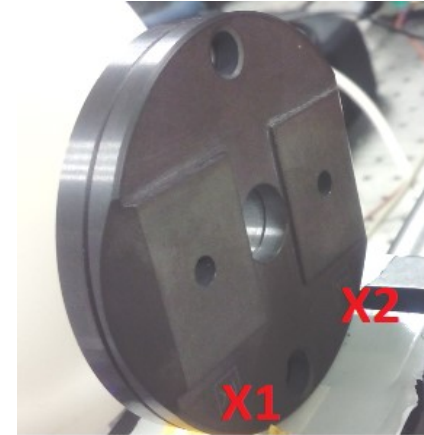


Image THz de l'éprouvette Si3N4 réchauffeur, avec 2 niveaux de contraste, mode transmission, 339 pixels \* 166 pixels, pas 0.3 mm

### Assemblage brasage



Images THz, santé brasage, 266 pixels \* 212 pixels, pas 0.3 mm. Résultat en configuration transmission, comparaison avec radio RX



# Les applications cibles

## Mesure de teneur volumique en charges et répartition

### Analyse d'un filtre céramique à particules (densité, distribution)

La céramique est relativement transparente.

Les dépôts carbonés (suie, cendre) sont mis en évidence par contraste.

Filtres à particules



Image THz colorisée en transmission

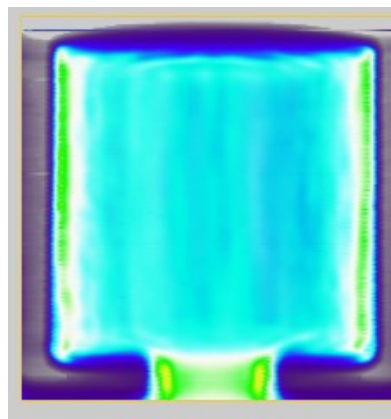
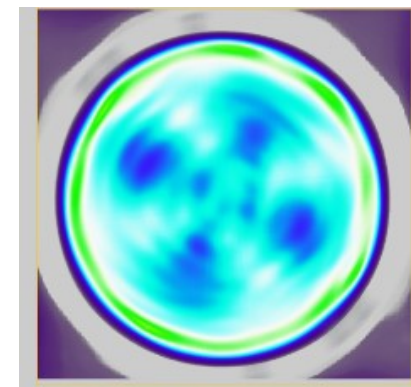
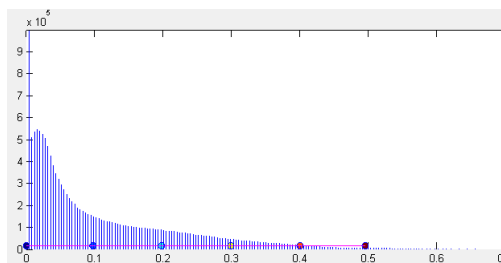


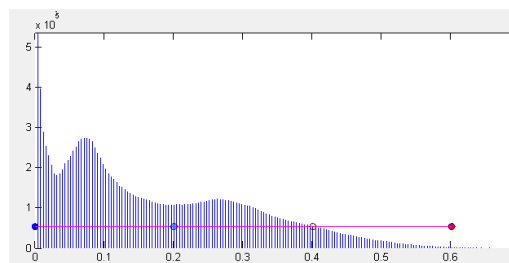
Image THz colorisée en transmission



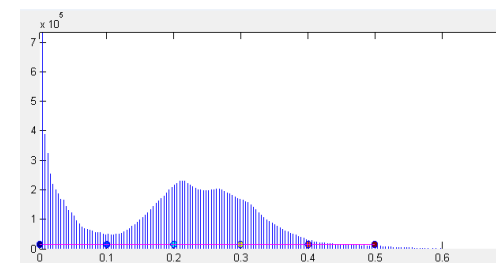
Histogramme des teneurs en suie



0 g/l de suie



0,4 g/l de suie



2,7 g/l de suie

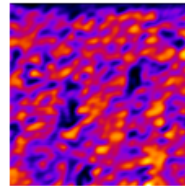
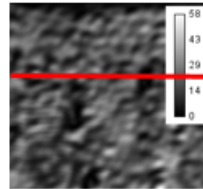
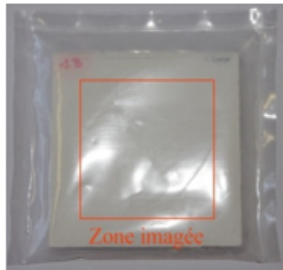


# Les applications cibles

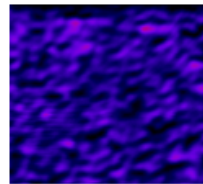
## Mesure de teneur volumique en charges et répartition

### Contrôle teneur volumique en eau

Plaque de gypse avec taux d'humidité variable



1B

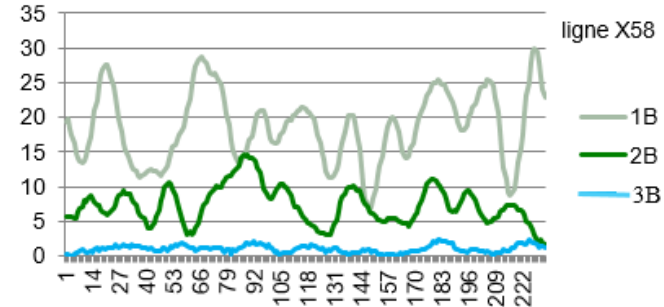


2B



3B

Profil linéaire suivant X de teneur en eau



Ech	1B	2B	3B
Teneur	1%	3%	5%

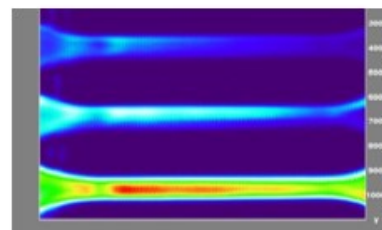
Plus il y a présence d'eau ou de charge plus le signal est atténué. Nous pouvons réaliser des cartographie de répartitions de taux d'humidité ou en charges en volume. Ici nous avons utilisé la méthode d'imagerie d'atténuation.

### Contrôle d'addition de charges

Peek chargé en nanotubes de carbone



Image THz colorisée



Gamme de variation

Teneur	Ech
0.5%	12
2%	17
4%	10





# Les *applications*

## Industrie Aeronautique

### Production de Composites

#### Inspection de Délamination

Image visible avec une  
délamination interne

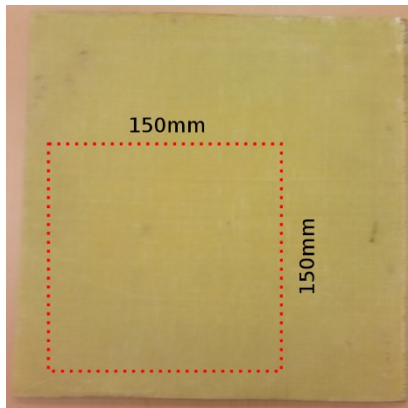
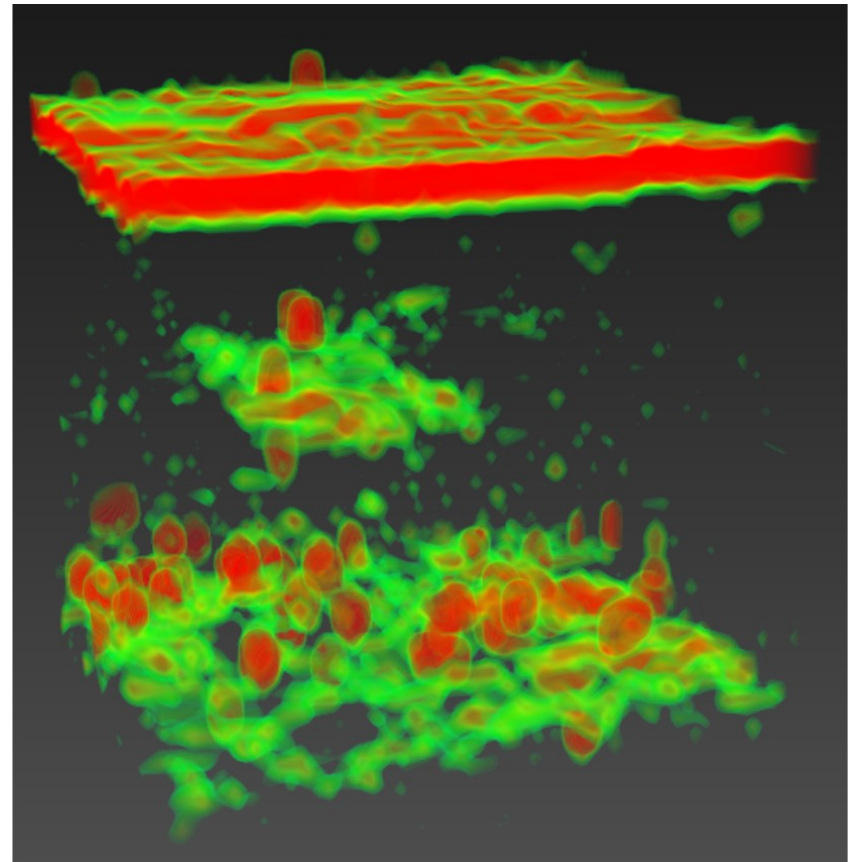


Image THz d'un composite en fibre de verre – e : 4 mm



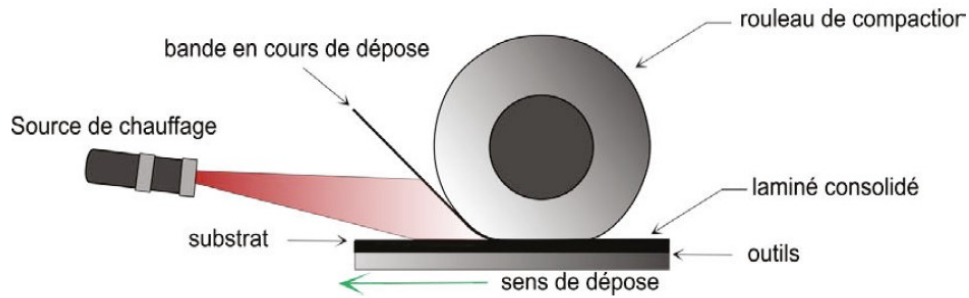
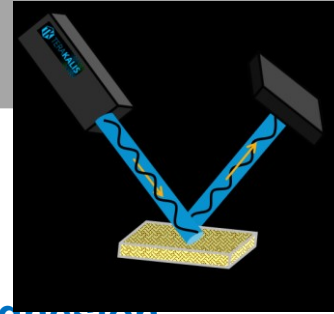
#### Imagerie de volume

- Résolution spatiale XY < 1 mm
- Capacité de pénétration qlq cms
- Haute vitesse > 1m/s
- Haute sensibilité hétérogénéités



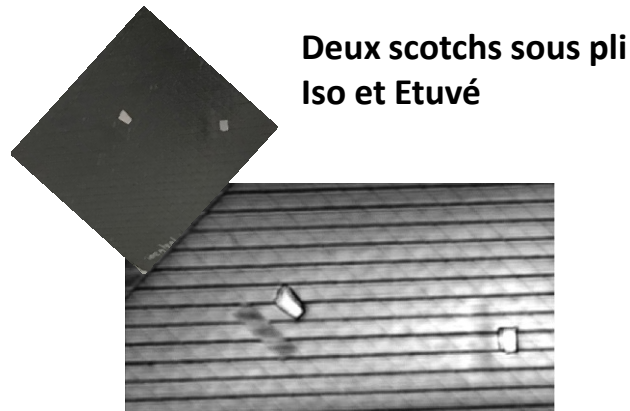
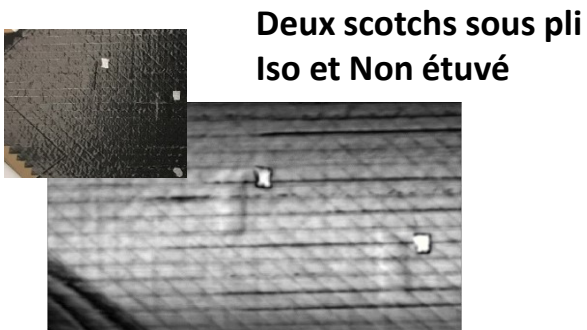
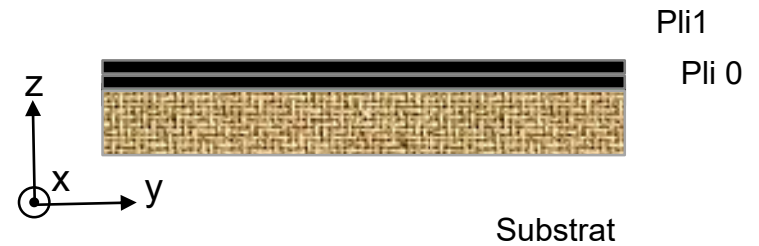
# Les applications

## Nos solutions

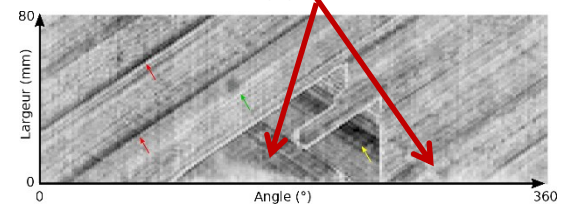


### Cartographie 2D de bonne adhesion du dernier pli posé

Résolution spatiale (plan x,y): de 0,3 à 5 mm



### Défauts d'adhésion du pli N sur le pli N-1 D'autres singularité apparaissent



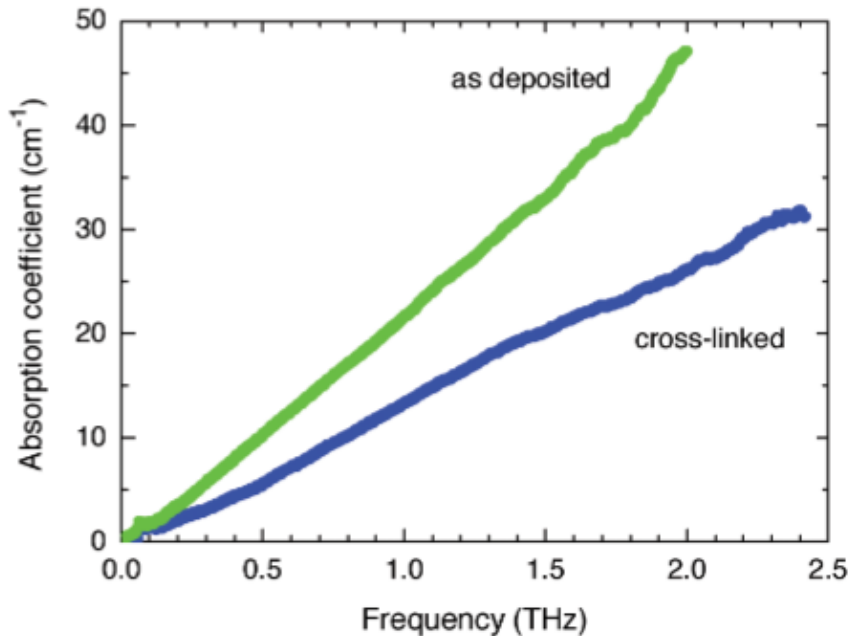


# Les applications cibles

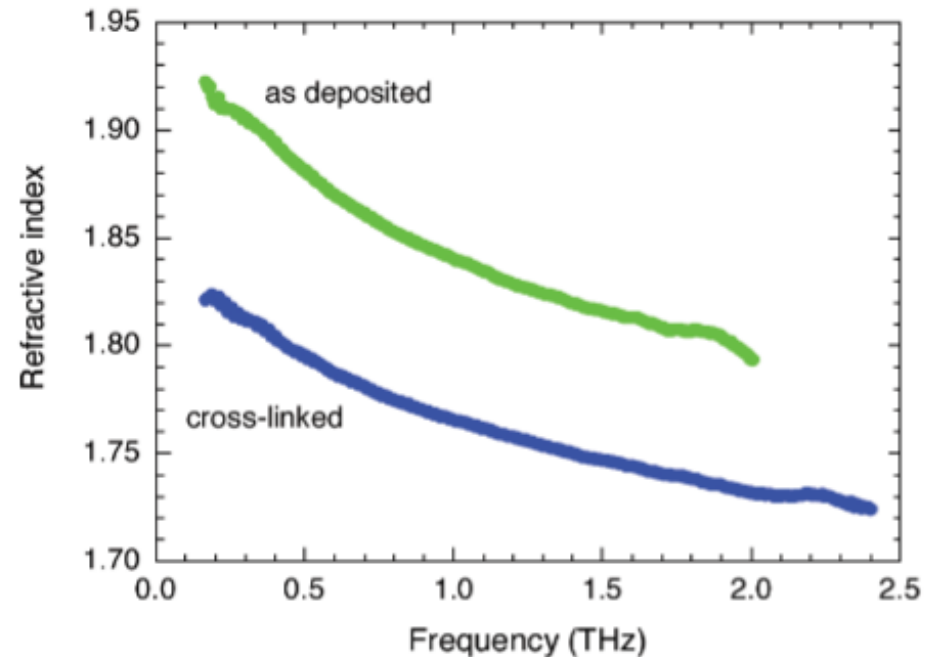
## Suivi de polymérisation

### Polymérisation

Décroissance significative des 2 indices (absorption, refraction) en lien avec le procédé de cuisson



Courbe d'absorption THz – résine durcie et non durcie



Courbe de réfraction THz – résine durcie et non durcie

Polymérisation UV

### Conclusion :

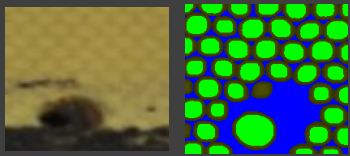
La **mesure THz** propose un potentiel intéressant pour **analyser les changements morphologiques internes** de structures **macromoléculaires** complexes.



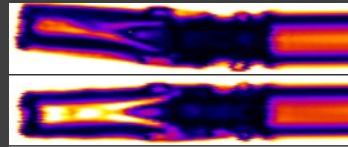
# Les *applications cibles*

Pour aller plus loin: +200 études démonstratives

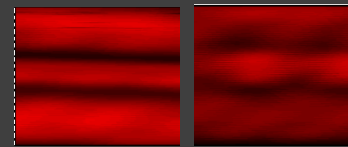
Endommagement



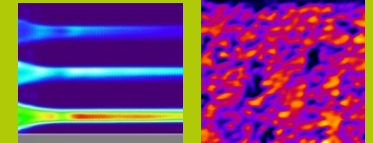
Défauts sous packaging



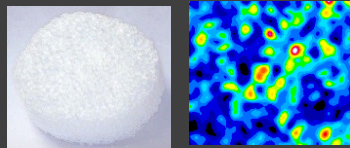
Défaut de soudure



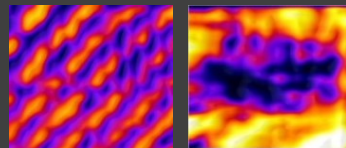
Homogénéité



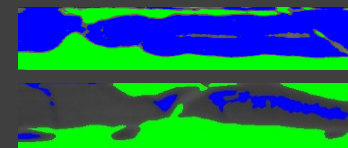
Porosités



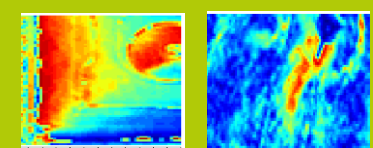
Délamination



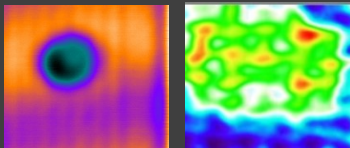
Défaut de collage



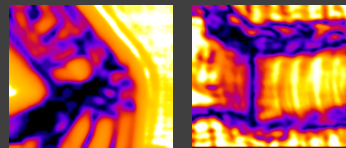
Anisotropie



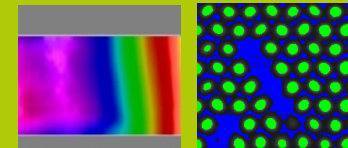
Pollution



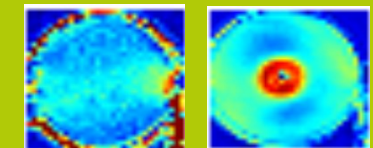
Rupture de fibres



Teneur en eau



Stress





# Nos offres

Systemes intégrés ou prototypes

Pour Laboratoires

Pour pièces 3D Grandes dimensions

Pour sites d'exploitation



multimodal



rapide



portable

Des outils pour améliorer les performances industrielles sur la base de nouvelles ondes électromagnétiques, ondes TeraHertz



# Nos offres

Systemes intégrables sur robots pour laboratoires ou la maintenance sur site

**Ecran de visualisation**

**Module de détection**

**Armature à contrôler**

**Traitement**

**Visualization**

**Command**

**Sensor**

**Motion**

Large\_Thickness



# La *synthèse*

## Potentiel de nos solutions TeraHertz

### Véritable innovation de rupture

#### Valeur ajoutée

Multifonctions : imagerie, mesure d'épaisseur, spectrométrie

Inspection des interfaces revêtement/métal sous de fortes épaisseurs

Haute sensibilité offrant une détection précoce

**Inspection non destructive des propriétés internes**

**Pénétrant matériaux isolants  
Sensible à la présence d'eau  
Sans contact Sans danger**

**Rapide pour cartographie**

**Portatif (2-30 Kg)**



# La *synthèse*

## Potentiel des technologies TeraHertz

### □ Perspectives

- Des adaptations vs cas applicatifs en production et exploitation
- Développement de contrôle en ligne de fabrication de semi produit en cours
- Des développement en automatisation/robotisation en cours (acquisition d'un robot industriel)
- Des développement logiciels pour l'identification et la classification des défauts (IA)
- Des applications en devenir :
  - Meilleure compréhension des matériaux: matrices, fibres, composites...
  - Meilleure compréhension des procédés: pultrusion, imprégnation, cuisson, soudure...
  - Contrôle 100% de la qualité de fabrication sur un ligne de production de tape
  - Contrôle 100% de la fabrication de pièces composites en TP in-situ





## SIÈGE

Montpellier

Tel : +33.(0)4.11.93.73.67

Email : [contact@terakalis.com](mailto:contact@terakalis.com)

## BUREAU COMMERCIAL OUEST

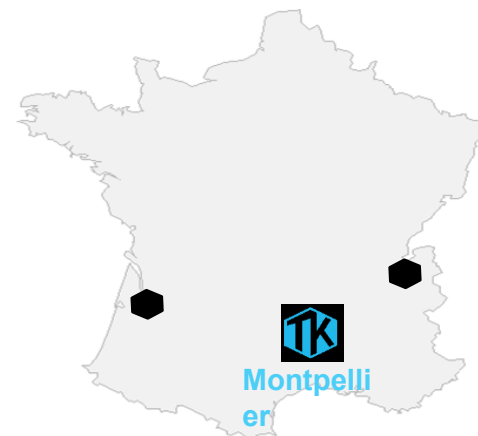
**Sabri Ben Khemis**



*Ingénieur commercial*

Mob : +33.(0)6.03.21.03.47

Email : [s.benkhemis@terakalis.com](mailto:s.benkhemis@terakalis.com)

Siège de Montpellier



 Bureau commercial  
 Siège, Plateforme  
technologique et SAV

[www.terakalis.com](http://www.terakalis.com)