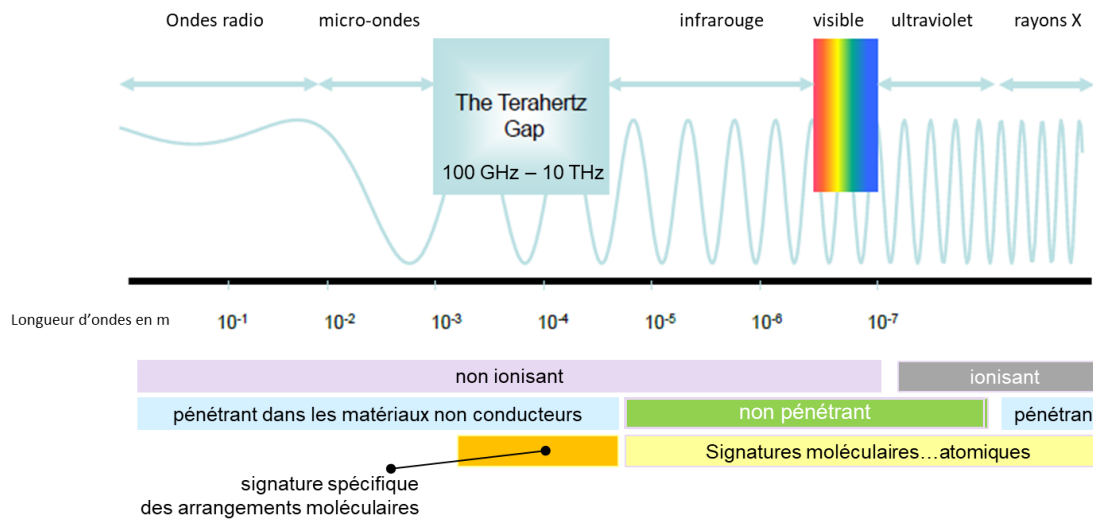


**ANALYSE & CONTRÔLE  
NON DESTRUCTIFS  
AU CŒUR DE LA MATIÈRE**

**PRINCIPES, SYSTÈMES  
& APPLICATIONS**

## ► Un nouveau domaine d'ondes électromagnétiques aux propriétés distinctes



## ► Des aptitudes intéressantes pour analyser la matière sous différentes phases



- SOLIDES**
- Jusqu'à 1 THz, relative transparence des matériaux diélectriques (ex. plastiques 80 - 90% de transmission).
  - Entre 1 et 10 THz, vibrations caractéristiques des liaisons intermoléculaires.

- GAZ**
- < 9 THz, rotations de la molécule ou d'une partie ou suivant la taille, vibrations de l'ensemble de la molécule.
  - Bonne transmission dans l'air, même humide.

- LIQUIDES**
- Transparence relative des liquides non-polaires.
  - L'absorption est proportionnelle à l'intensité du moment dipolaire.
  - Très forte sensibilité à la présence d'eau.

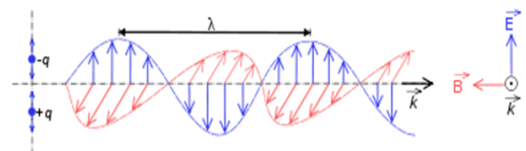
- ELECTRONS PLASMAS**
- Excitation collective des gaz d'électrons libres (fréquence plasma) du matériau.
  - La différence entre niveaux d'énergies quantifiées se situe dans le domaine des THz.

## ► Les systèmes de mesure TeraHertz pour le contrôle non destructif et en cœur de la matière

Ces systèmes actifs consistent en une source émettrice et un capteur; ils permettent de mesurer l'amplitude, la phase et l'état de polarisation des ondes TeraHertz. Cette mesure peut être ponctuelle, linéaire ou matricielle, en fonction de l'analyse de la distribution spatiale requise.

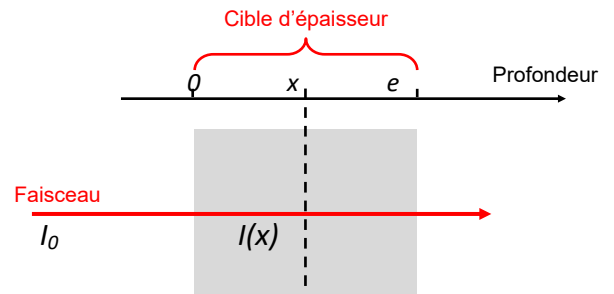
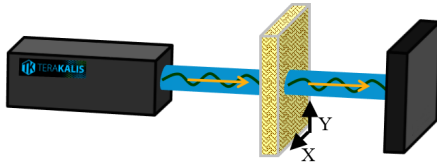
La configuration du système opto-mécanique doit être adaptée au type de problème de contrôle à résoudre ainsi qu'au niveau de performances attendu en termes de résolution spatiale, de temps d'acquisition et de détection ou la sensibilité de caractérisation. Des paramètres tels que la fréquence d'émission, l'état de polarisation, la distance focale, la taille du faisceau d'analyse, l'angle d'incidence doivent être sélectionnés pour optimiser l'efficacité du système.

Il existe deux modes d'analyse principaux: la transmission et la réflexion, en fonction du contexte matériel et de l'application ciblée.



## ► 1<sup>er</sup> principe : atténuation de l'amplitude de l'onde

⇒ Exemple du mode transmission :



L'atténuation de l'amplitude de l'onde TeraHertz, à travers un matériau, est influencée par plusieurs phénomènes d'interaction: réflexion à chaque interface, diffusion et absorption interne. Les hétérogénéités locales du matériau créent des variations d'amplitude de l'onde transmise en fonction de leurs types et de leurs dimensions.

Loi d'atténuation simplifiée :

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

$x$  = profondeur de l'échantillon

$I_0$  = Intensité du faisceau incident

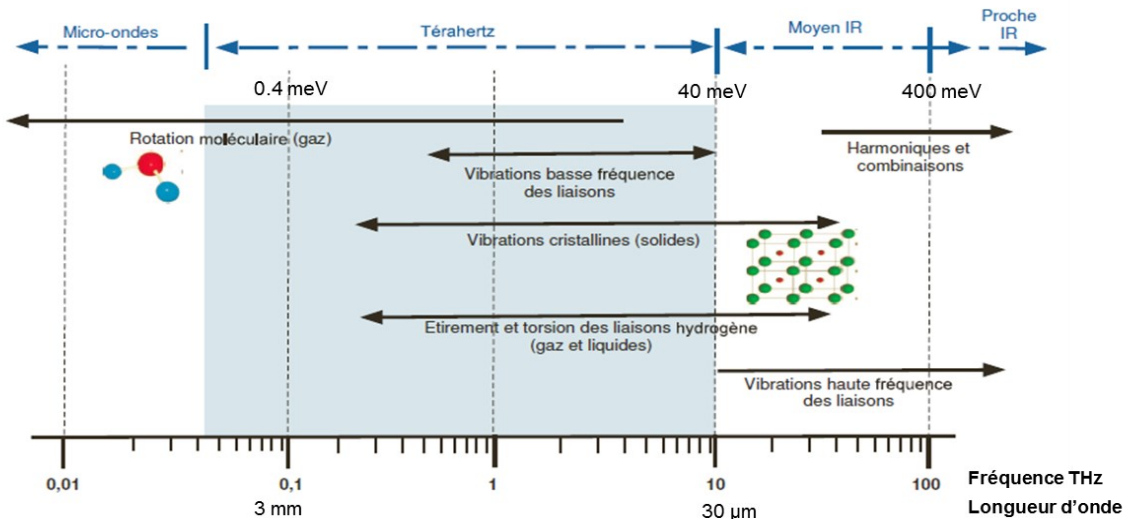
$I(x)$  = Intensité du faisceau à la profondeur  $x$

$\sigma$  = Coefficient d'absorption

**Détectes/caractérises les hétérogénéité de la matière**

*porosités, délaminations, ruptures de fibres, inclusions, contaminations ...*

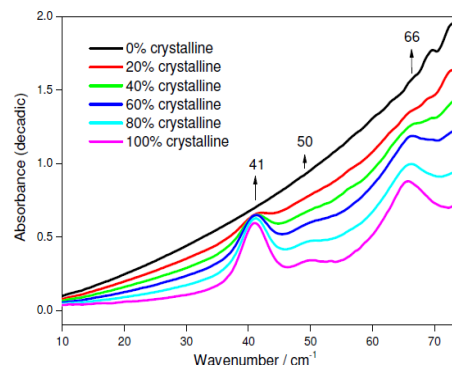
## ► 2<sup>ème</sup> principe : résonance de la matière à des fréquences caractéristiques



Selon la fréquence, l'onde TeraHertz interagit avec la matière en fonction des différents modes d'excitation décrits dans le graphique ci-dessus ; le niveau des valeurs de l'onde absorbée ou réfléchie indique les propriétés structurales de la matière, telles que la cristallinité, affichées dans le graphique à droite.

**Caractérises la structure de la matière**

*cristallinité, polymorphisme, type de liaisons intermoléculaire*

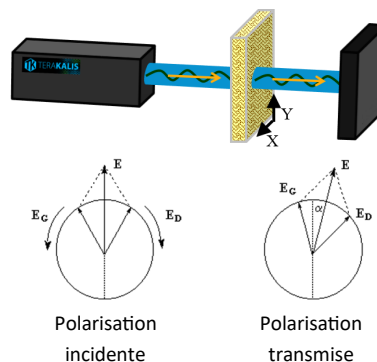


### ▶ 3<sup>ème</sup> principe : Réflectivité sur les interfaces entre deux matériaux

L'activité optique d'un matériau est la propriété que possède une structure moléculaire dissymétrique d'interagir avec un rayonnement électromagnétique.

Elle se manifeste notamment par l'existence de la pouvoir rotatoire (PR), le phénomène de dispersion optique (DRO). et le dichroïsme circulaire (DC).

La mesure de la variation de l'état de polarisation entre l'onde incidente et celle transmise permet de caractériser certaines propriétés structurales de la matière telles que l'anisotropie ou la pureté énantiomérique. Les états de polarisation à considérer peuvent être de type linéaire, circulaire ou elliptique.



**Pouvoir rotatoire :**

$$\alpha = \pi l * \frac{(nG - nD)}{\lambda}$$

$\alpha$  = angle de rotation du plan de polarisation  
 $l$  = épaisseur de substance active traversée  
 $\lambda$  = longueur d'onde de la lumière  
 $nG, nD$  = indices du matériau.

#### Caractériser La structure de la matière

*distribution et orientation des charges ou des fibres, arrangements spatiaux des molécules, chiralité, biréfringence, stress des matériaux...*

### ▶ 4<sup>ème</sup> principe : réflectivité sur les interfaces entre deux matériaux

Les ondes TeraHertz pénètrent dans les matériaux non conducteurs et se réfléchissent sur l'ensemble des matériaux.

La mesure du temps de vol est utilisée sur la base de l'émission d'une impulsion TeraHertz.

Dans le cas d'un matériau mono ou multicouche, chaque interface entre deux matériaux d'indices distincts ou entre un matériau et l'air est le lieu d'une réflexion de l'onde.

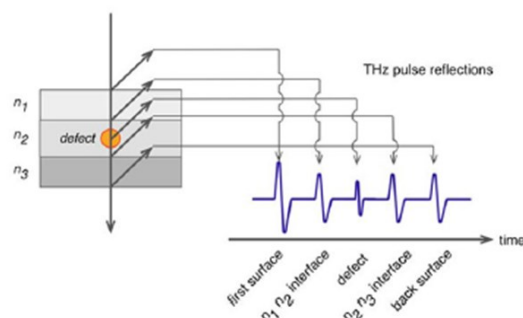
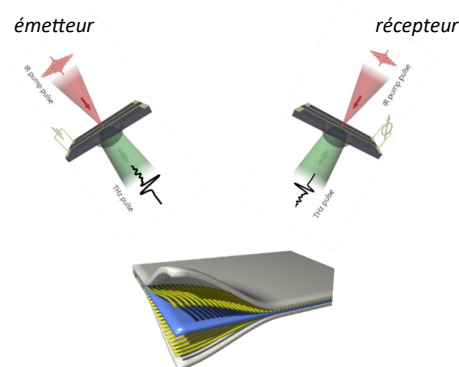
Après une phase de calibration caractérisant les indices optiques de chaque couche (index  $n_i$ ), la mesure des retards temporels  $\Delta t$  entre deux impulsions fournira la valeur de la distance entre deux interfaces selon la formule :

$$\Delta e = (c * \Delta t) / n_i$$

$c$  = célérité de la lumière

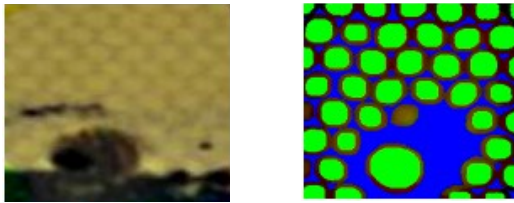
#### Mesure de distance

*Position en Z d'un défaut dans un matériau, épaisseur de couches*

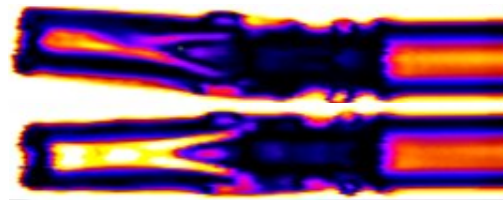


► Exemples d'applications d'imagerie TeraHertz sur des cas concrets de matériaux industriels

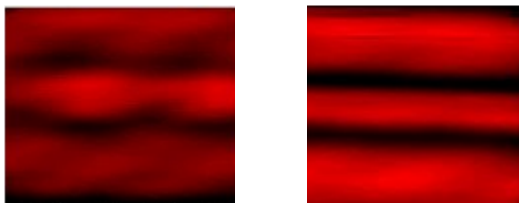
Défaut interne



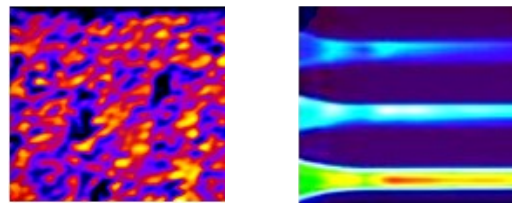
Défaut sous packaging



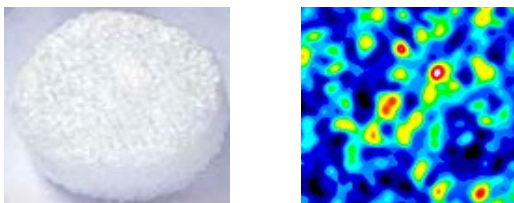
Défaut de soudure



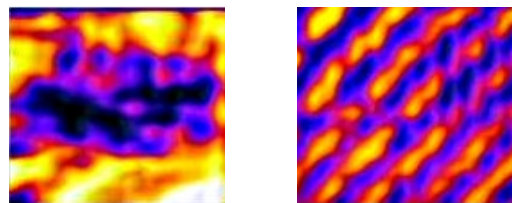
Hétérogénéité



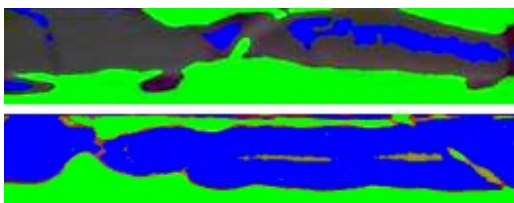
Porosités



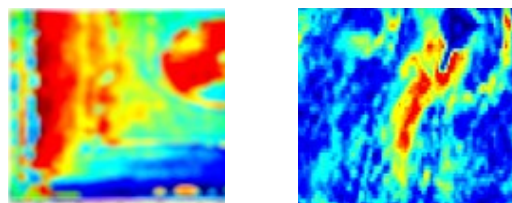
Délamination



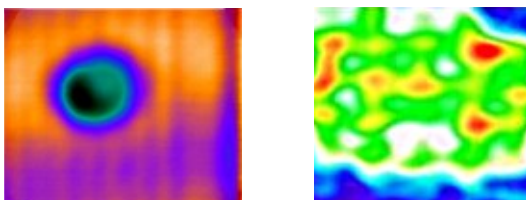
Défaut de collage



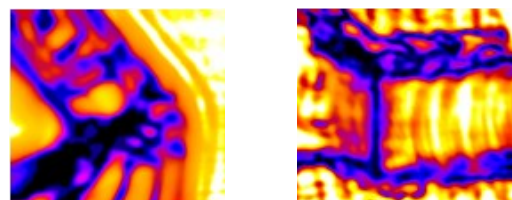
Orientation des fibres



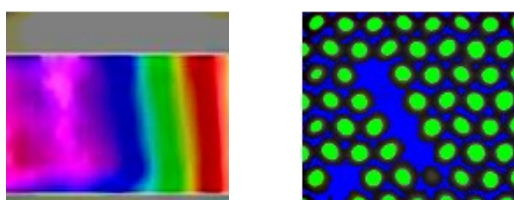
Pollution



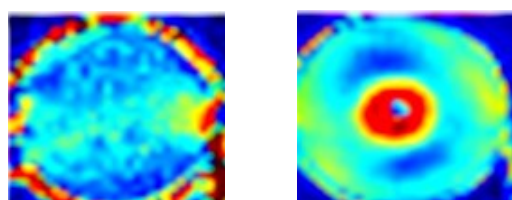
Ruptures de fibres



Teneur en eau



Stress



## ► NOS COMPÉTENCES

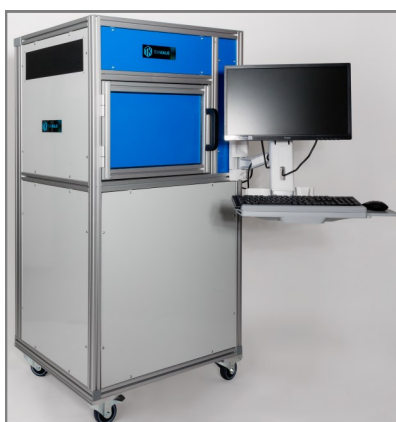
- Opto-électronique
- Mécanique
- Physique, chimie des matériaux
- Développement de logiciels
- Traitement du signal et des images
- Ingénierie des systèmes

## ► NOS SOLUTIONS

- Mesure de teneur en eau
- Mesure de teneur en charge
- Imagerie d'hétérogénéité
- Imagerie d'anisotropie
- Mesure d'épaisseur
- Spectrométrie

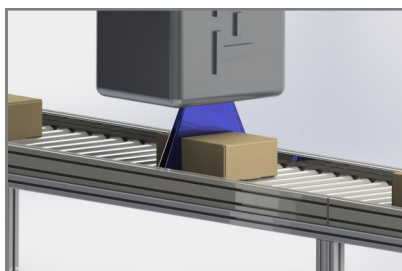
## ► NOS EQUIPEMENTS D'ANALYSE ET DE CONTRÔLE

### APPROFONDI



GAMME TK-LAB

### RAPIDE



GAMME TK-LINE

### PORTATIF



GAMME TK-FIELD

## ► NOS SERVICES

- Étude de faisabilité - Essais sur échantillons
- Élaboration de spécifications techniques
- Prototypage
- Conception & fabrication
- Assistance à la mise en service
- Formation

## ► NOS MOYENS TECHNIQUES

- Équipe multidisciplinaire
- Plateforme de caractérisation des matériaux
- Logiciel de simulation des ondes TeraHertz
- Bancs d'analyse multimodale TeraHertz
- Chambre pour environnement humide et à haute température

## ► CONTACT



**TERAKALIS**

Montpellier, France

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

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

04.11.93.73.67