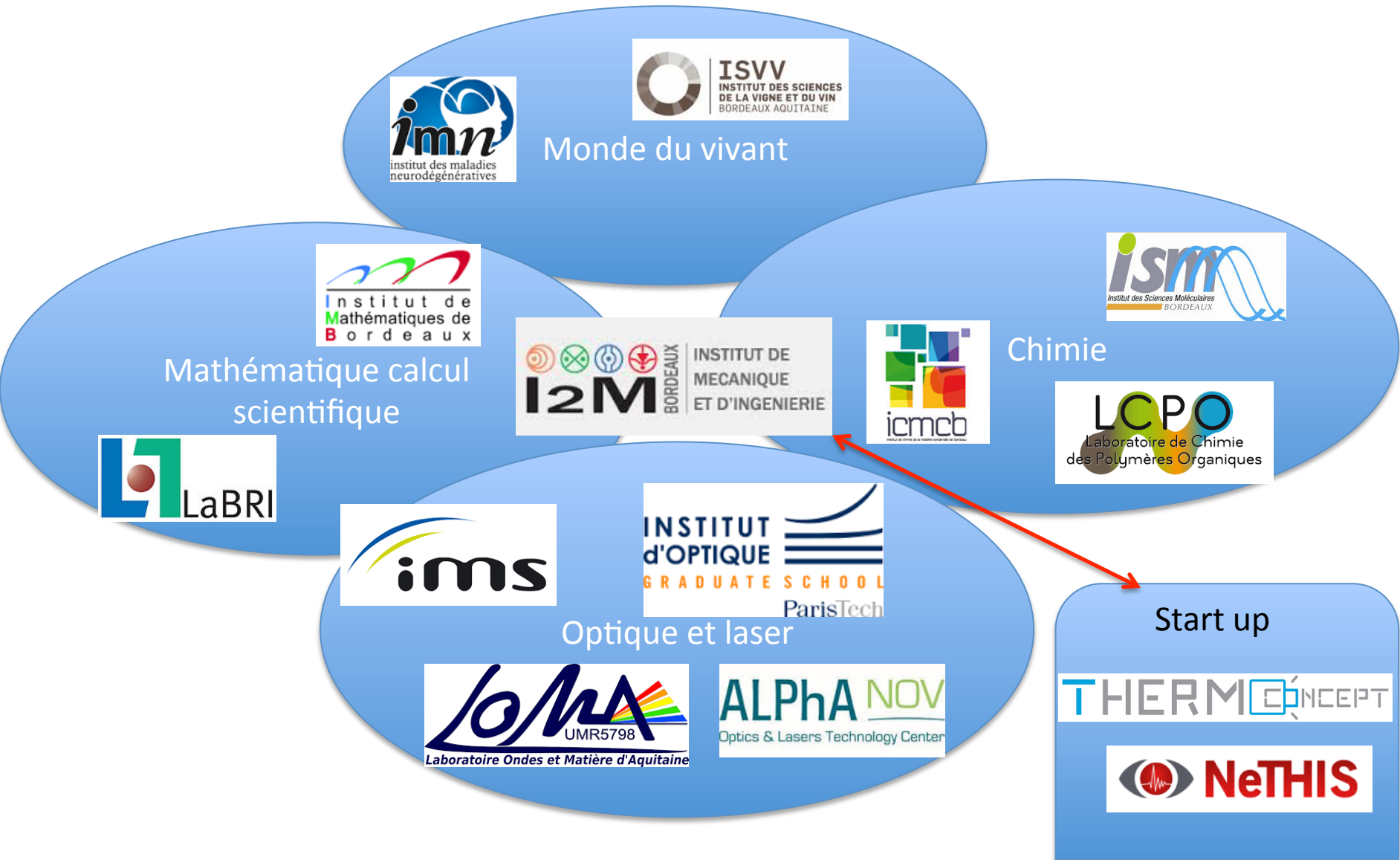


# Imagerie IR et THz, principes et applications

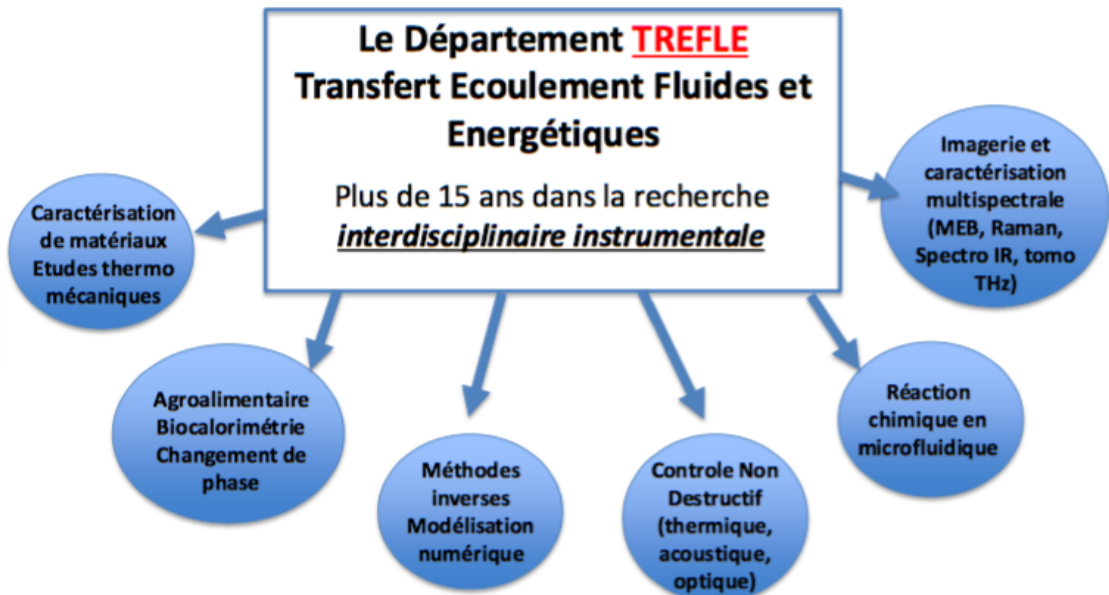
Alain Sommier, Christophe Pradere, Mohamed Bensalem, S. Kirshner, Ludovic Gaverina, Jean Christophe Mindeguia, Jean Christophe Batsale



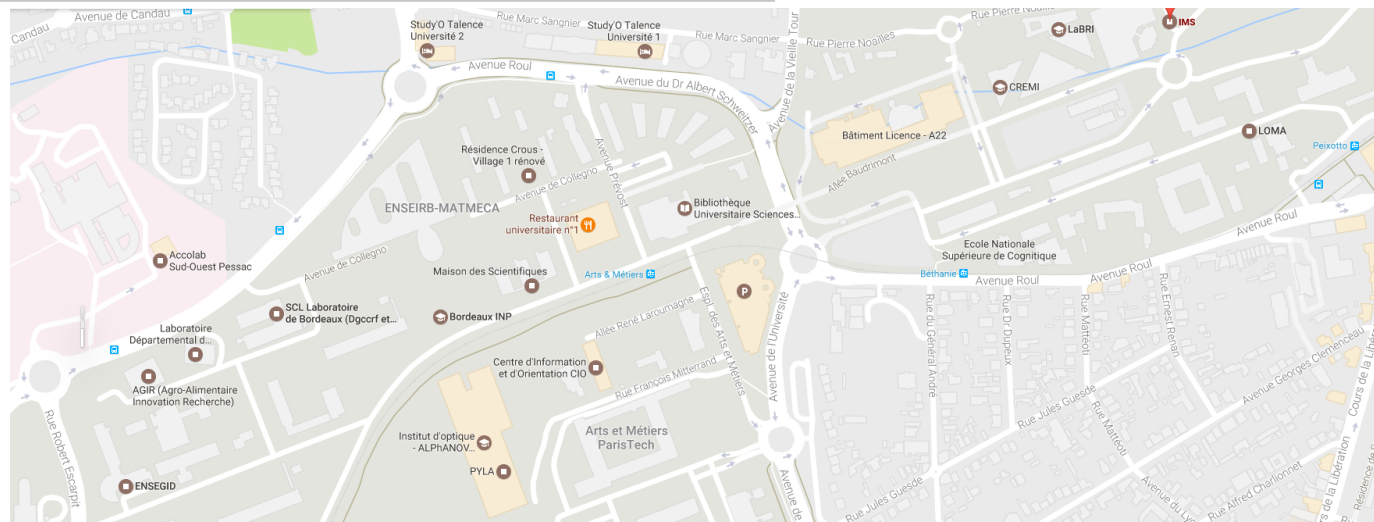
# Un contexte Bordelais favorable pour Ingénierie, la mécanique et la thermique



L'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M, 300 personnes) est une unité mixte (UMR 5295) multitutelles : CNRS, Université Bordeaux 1, Institut Polytechnique de Bordeaux et ENSAM Talence.



Des liens forts et une proximité sur le campus Bordelais

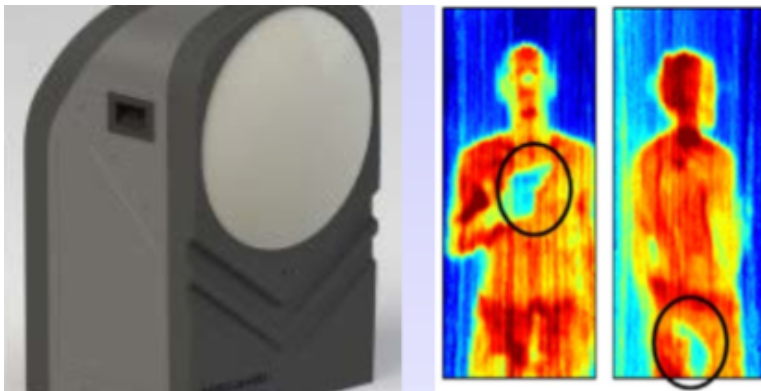


# Sommaire

- Définition de l'imagerie
- Problématique mesure IR
  - Matériel méthode développée
  - Principaux résultats
  - Conclusion partielle
- Mesure Thz
  - historique/généralité
  - interaction faisceau/matière : ce qui modifie le signal en mode transmis ou réfléchi
  - Les sources & détecteurs
  - Application: sécurité/pharmacie/ oeuvre d'art/
  - Imagerie multispectrale pour l'étude de transferts
- Conclusions.

# Définition de l'imagerie

- **Imagerie passive** : capture de l'émission naturelle des matériaux (pas de source d'illumination). Facile en IR (caméra) plus compliqué en Thz (nécessite capteur refroidi cryogénique à 4K) pour détecter les petite variation de température entre le corps et un objet (finalité sécurité)



- Lorsque ce rayonnement est trop faible ou bien est noyé dans un bruit de fond ambiant on a recours à **l'imagerie active**.  
EN IR on excite thermique la scène (lampe flash, laser...) en Thz on illumine la scène (imagerie active) un détecteur mesure la perturbation du rayonnement (amplitude, phase, spectre ...).

# Problématique et enjeux des mesures IR



*Composites thermostructuraux pour les propulseurs*



*Isolation des corps de rentrée pour les véhicules hypersoniques*

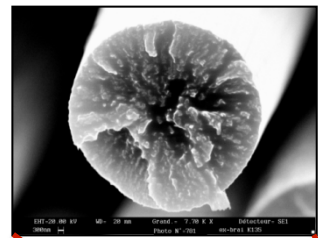
***Enjeux pour EPSILON et la région :  
Caractériser des matériaux hétérogènes et anisotropes tels que les matériaux composites***

- ⇒ Maîtriser la **caractérisation thermique (quantitative)**
- ⇒ Vérifier l'intégrité d'une structure (**contrôle non destructif**)

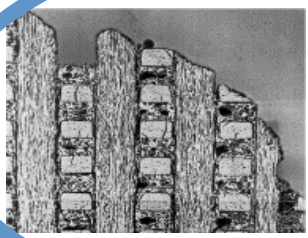


*Composites carbone/carbone pour le freinage*

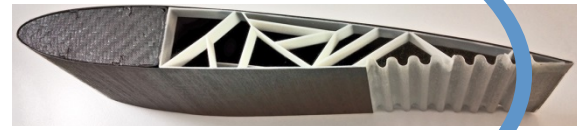
Fibre de carbone Ex-BRAI  
Diamètre  $d \approx 10 \mu\text{m}$



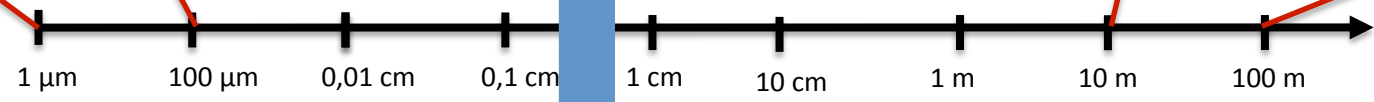
Composite non stratifié 3D  
épaisseur  $e \approx 1 \text{ cm}$



Aile d'avion  
 $L \approx \text{qq m}$

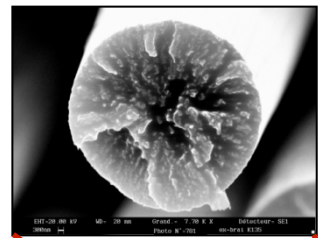


Navette  
 $L \approx \text{qq} 10 \text{ m}$

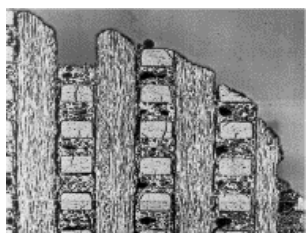


Estimer des cartographies de diffusivité thermique dans le plan et dans l'épaisseur

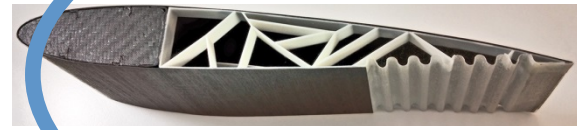
Fibre de carbone Ex-BRAI  
Diamètre  $d \approx 10 \mu\text{m}$



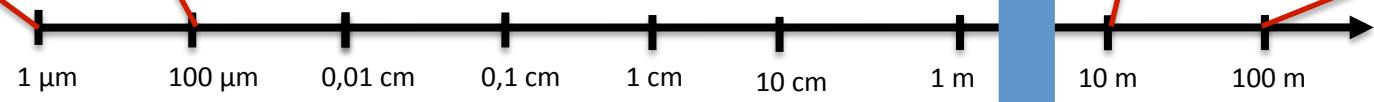
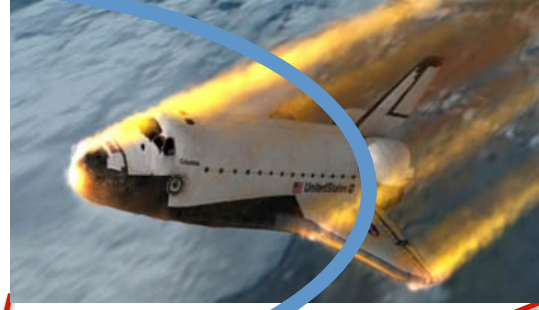
Composite non stratifié 3D  
ortho CC  $e \approx 1 \text{ cm}$



Aile d'avion  
 $L \approx \text{qql m}$



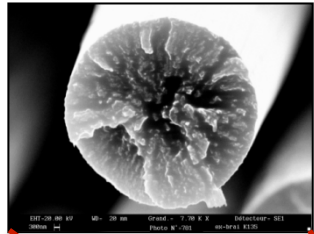
Navette  
 $L \approx \text{qql } 10 \text{ m}$



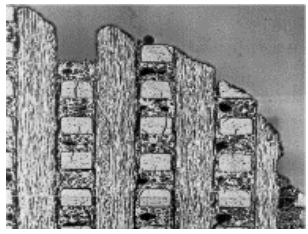
Vérifier l'intégrité de la structure :  
dé laminage, décollement, fissure



Fibre de carbone Ex-BRAI  
Diamètre  $d \approx 10 \mu\text{m}$



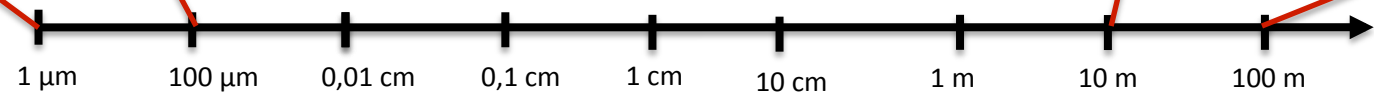
Composite non stratifié 3D  
ortho CC  $e \approx 1 \text{ cm}$



Aile d'avion  
 $L \approx \text{qq} \text{ m}$



Navette  $L \approx \text{qq} \text{ } 10 \text{ m}$

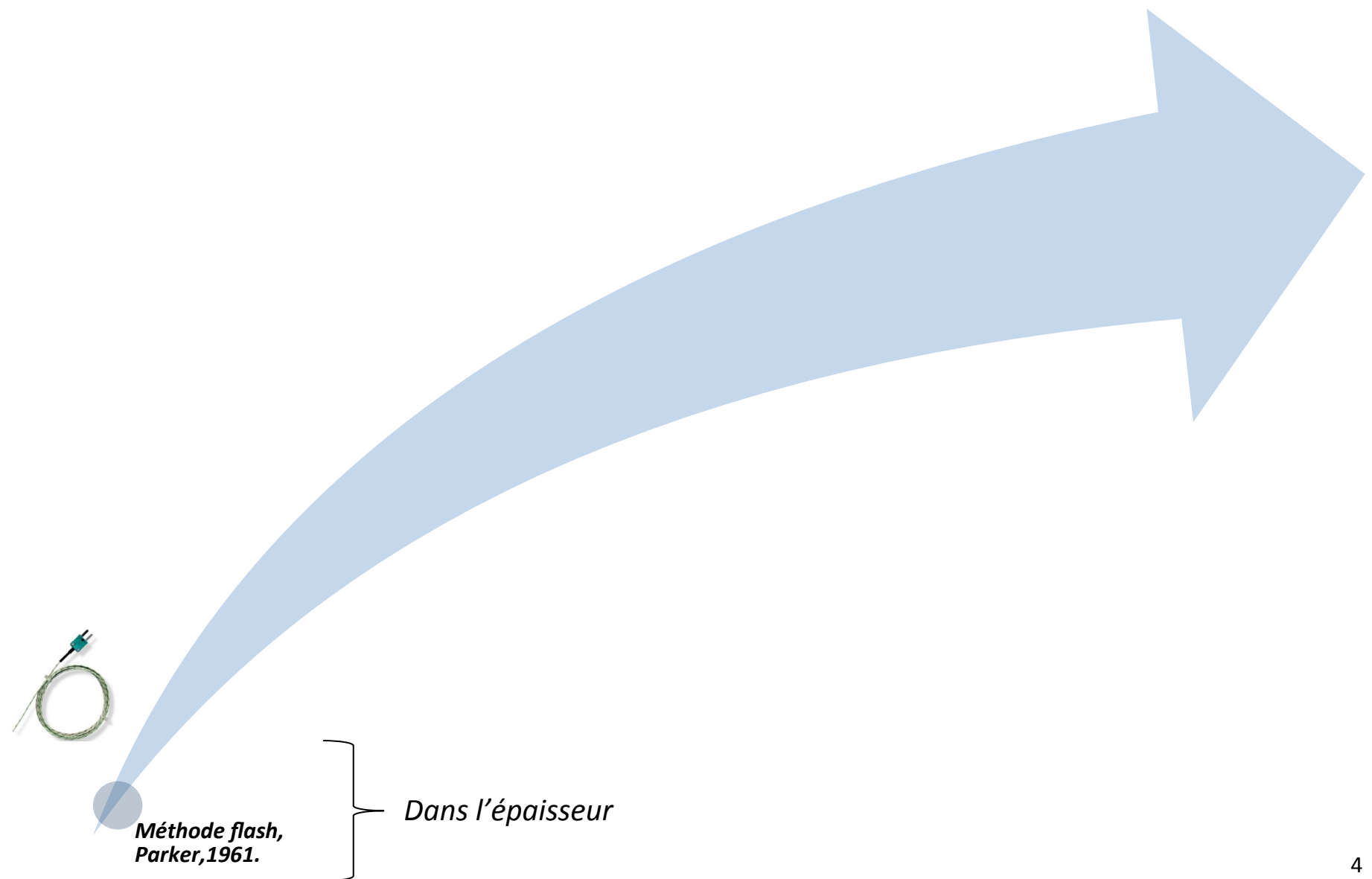


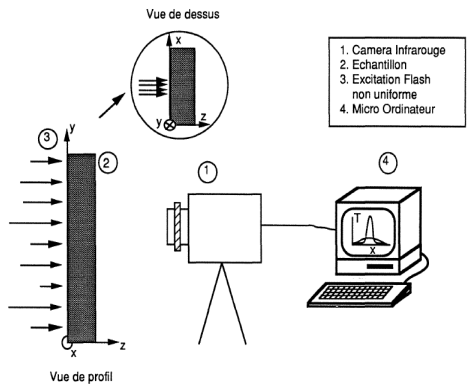
Estimer des cartographies de diffusivité thermique dans le plan et dans l'épaisseur

Vérifier l'intégrité de la structure : Délaminage, décollement, fissure

**Difficultés : Réaliser des mesures quantitatives et qualitatives de matériaux anisotropes, hétérogènes et multiéchelle**

**Demande industrielle de méthodes et d'outils**



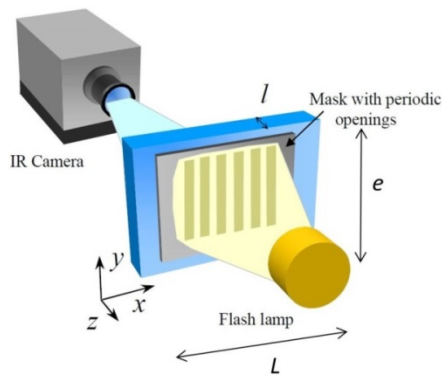
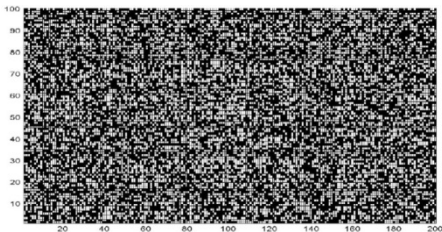


Flash face arrière

Méthode flash, Parker, 1961.

Dans l'épaisseur

- Avantages :**
- *Mesure des diffusivités thermiques dans le plan*
- Inconvénients :**
- *Faible énergie déposée par la lampe flash et peu de gradient de température*



Flash face arrière

Flash avec des gradients de température

Dans l'épaisseur

Méthode flash, Parker, 1961.

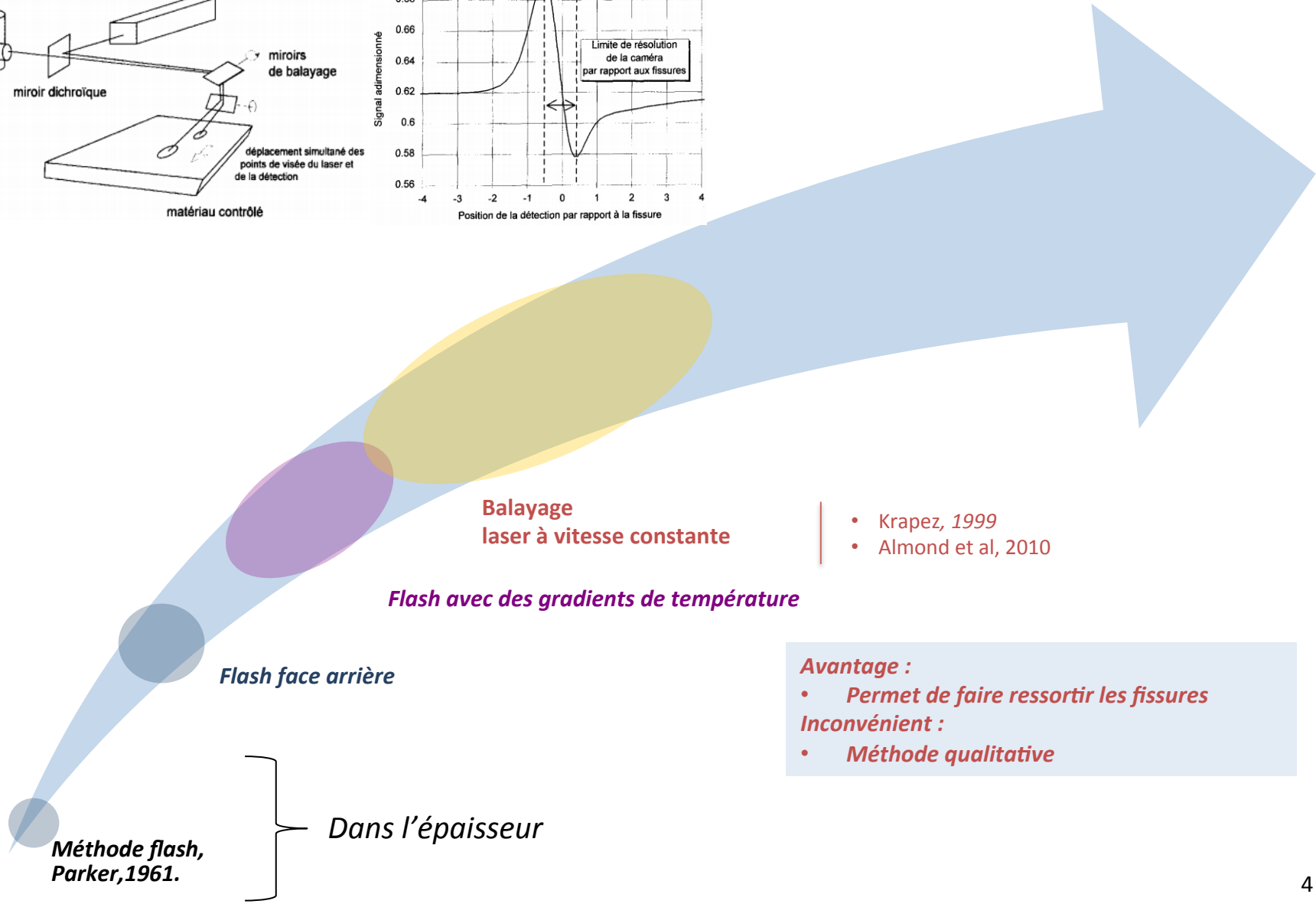
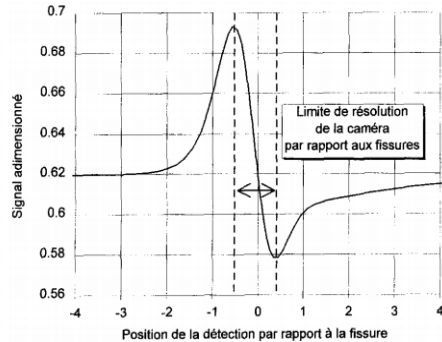
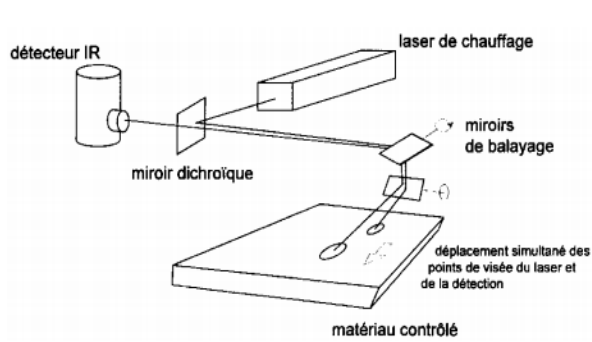
- Krapez et al, 2000
- Batsale et al, 2004

**Avantages :**

- Mesure de propriétés thermiques dans le plan

**Inconvénients :**

- Faible énergie déposée par la lampe flash



**Balayage laser à vitesse constante**

- Krapez, 1999
- Almond et al, 2010

**Flash avec des gradients de température**

**Flash face arrière**

**Méthode flash, Parker, 1961.**

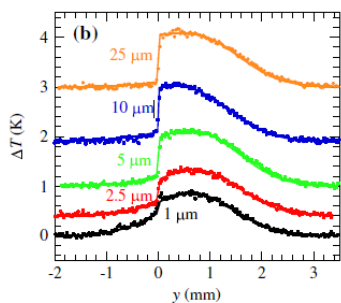
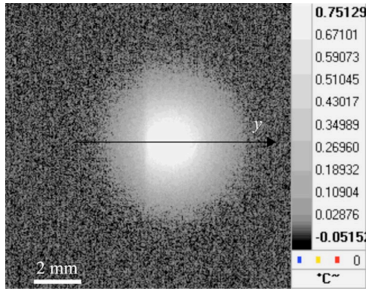
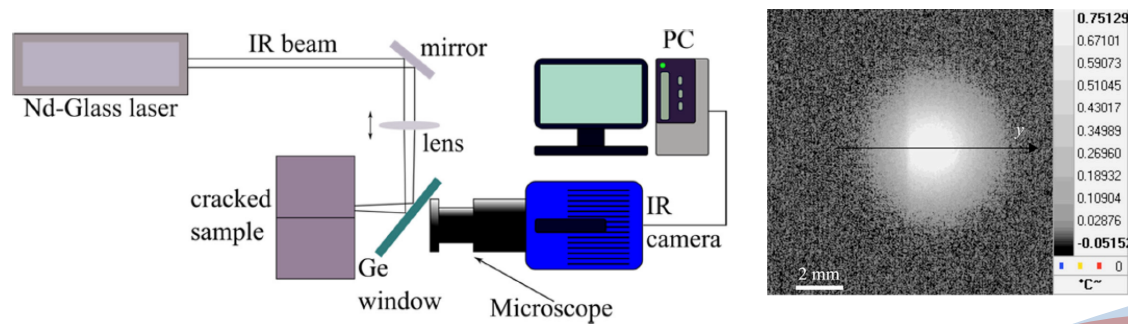
**Dans l'épaisseur**

**Avantage :**

- *Permet de faire ressortir les fissures*

**Inconvénient :**

- *Méthode qualitative*



**Laser impulsionnel**

**Balayage laser à vitesse constante**

**Flash avec des gradients de température**

**Flash face arrière**

- Bison *et al*, 2008
- Pradere *et al*, 2011
- Kruczek *et al*, 2015
- Salazar *et al*, 2016

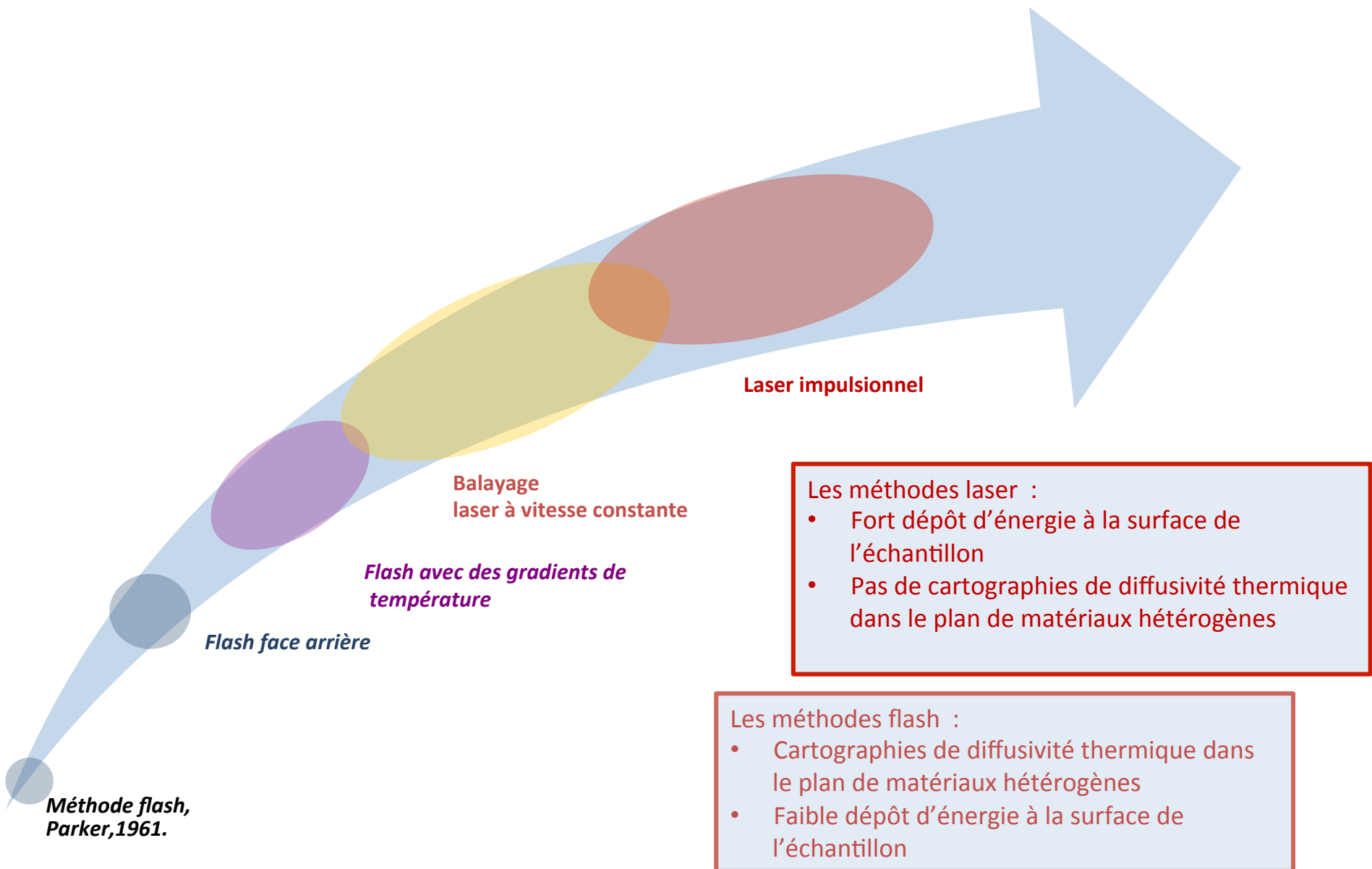
**Avantages :**

- Grande énergie déposée par le faisceau laser

**Inconvénients :**

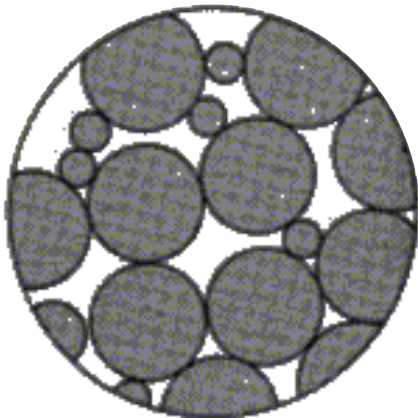
- Estimation des diffusivités thermiques dans le plan de matériaux homogènes

Méthode flash, Parker, 1961. } Dans l'épaisseur

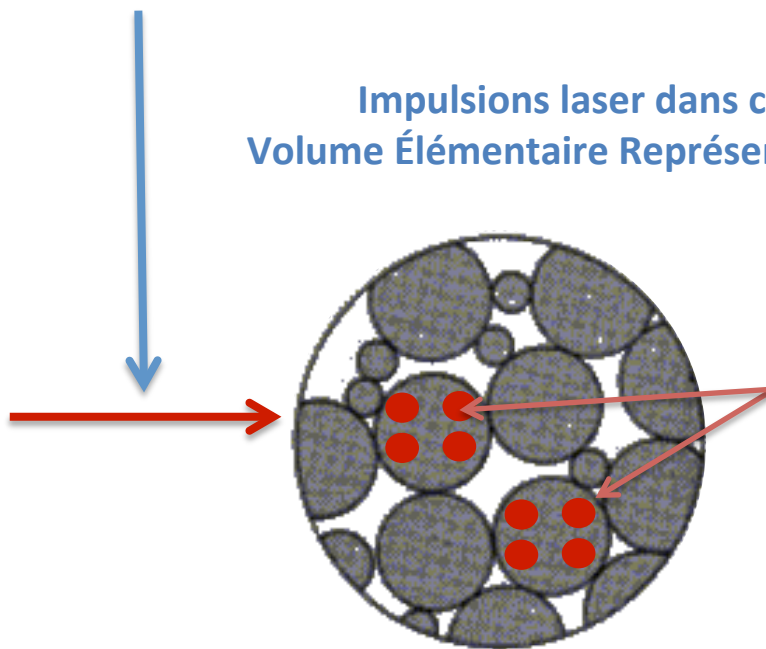


## Se placer dans des milieux homogènes par parties

Milieu hétérogène et anisotrope



Impulsions laser dans chaque Volume Élémentaire Représentatif (V.E.R)



Des gradients de température importants à la surface de l'échantillon via un scanner optique laser

Développer un banc de mesure composé d'un :

- scanner optique laser pour se placer dans des VER ;
- caméra Infrarouge pour le multiéchelle ;
- méthodes analytiques basées sur des solutions séparables.

Caméra Infrarouge



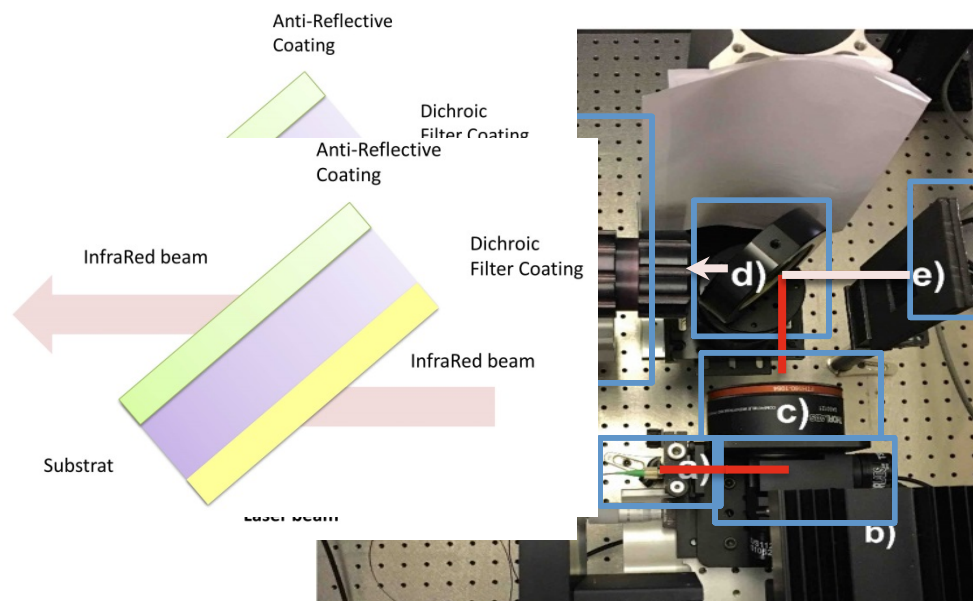


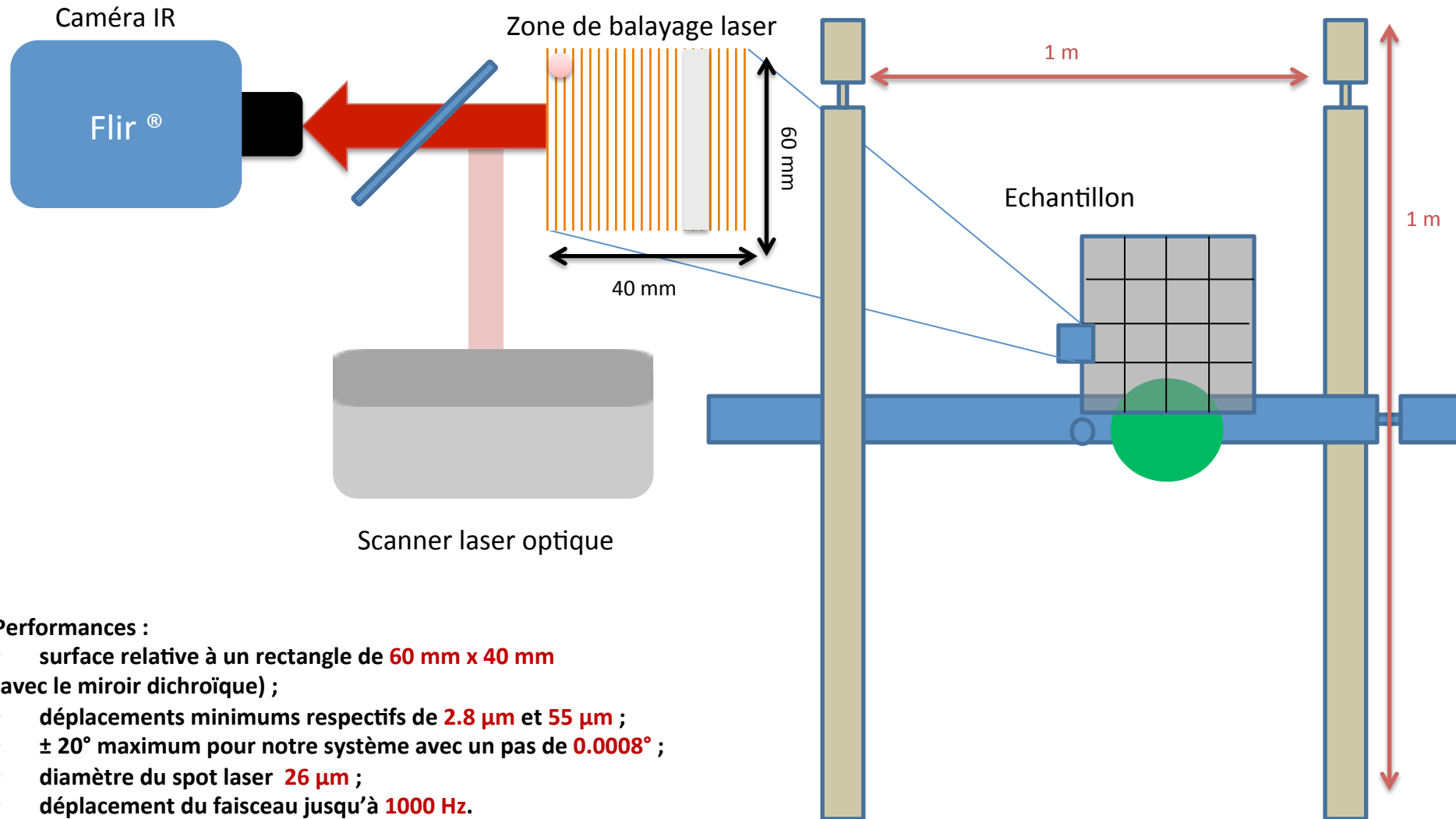
# *Développement d'un scanner optique laser*

## Matériel

- a) Diode laser IR : 976 nm et 330 mW
- b) Miroirs galvanométriques
- c) Lentille F-theta
- d) Miroir dichroïque
- e) Porte - échantillon
- f) Caméra Infrarouge MCT (FLIR SC7000, 320\*256 pixels, pitch 30  $\mu\text{m}$ , spectral band from 7 to 14  $\mu\text{m}$ )

## Photographie du système d'excitation et de détection



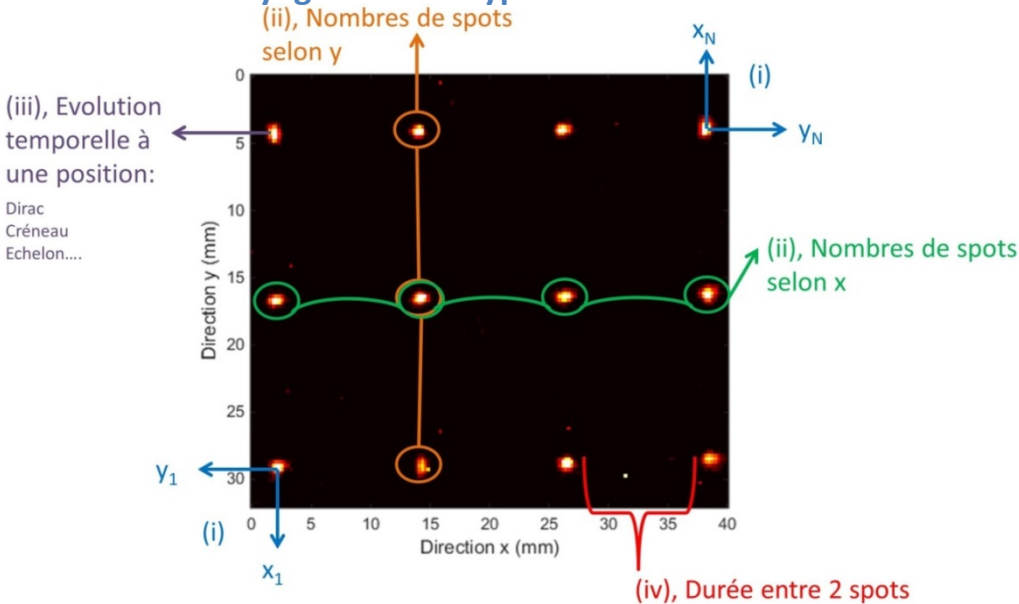


## Performances :

- surface relative à un rectangle de **60 mm x 40 mm** (avec le miroir dichroïque) ;
- déplacements minimums respectifs de **2.8  $\mu\text{m}$**  et **55  $\mu\text{m}$**  ;
- $\pm 20^\circ$  maximum pour notre système avec un pas de **0.0008°** ;
- diamètre du spot laser **26  $\mu\text{m}$**  ;
- déplacement du faisceau jusqu'à **1000 Hz**.

## Une infinité de balayage : cartésien, polaire, ...

### Balayage laser de type cartésien



Les différents paramètres clés d'un déplacement spatio-temporel de type Flying Spot:

- la définition de la zone à scanner;
- le nombre de positions selon les directions x et/ou y;
- la forme temporelle de l'excitation à une position donnée;
- la fréquence de déplacement entre 2 positions;
- le nombre de cycles ou répétitions des phases.

Ainsi, il est possible de réaliser différents types d'excitations thermique.

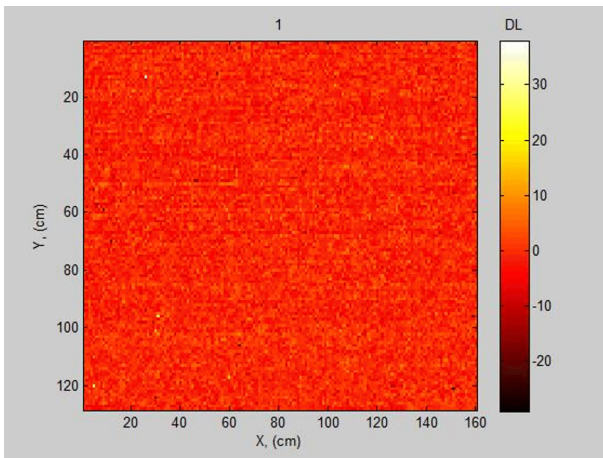
*Formule traduisant l'ensemble des conditions aux limites imposées au système à la surface de l'échantillon*

$$Q(x, y, t) = Q_0 \sum_{k=1}^{N(I*J)} \left( \sum_{j=1}^J \left( \sum_{i=1}^I \delta(x - i\Delta x) \right) \delta(y - j\Delta y) \right) \delta(t - k\Delta t)$$

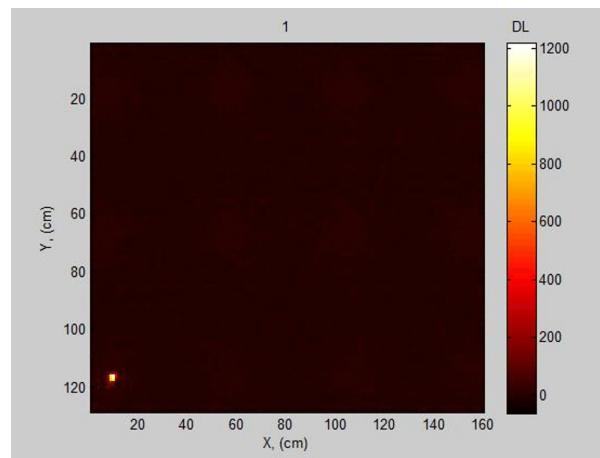
### 3 paramètres majeurs:

- le nombre de sollicitations thermiques selon les directions x et y ;
- la durée ;
- la puissance du laser.

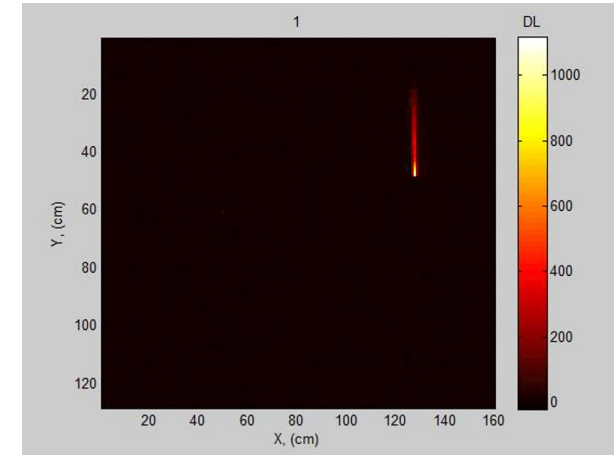
### Pulsed spot



### Grid Pulsed Flying Spot laser



### Constant Velocity Flying Spot



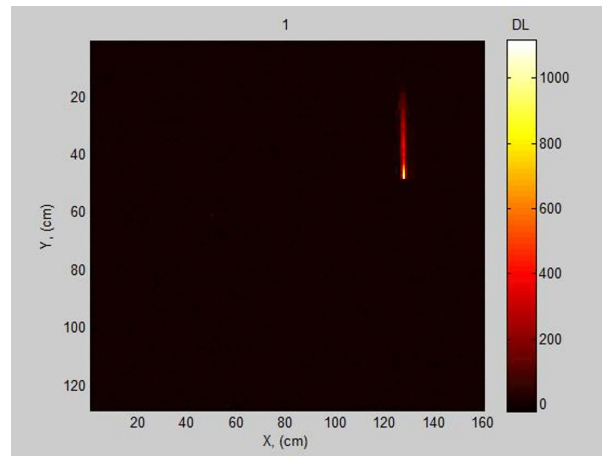
Quel type de méthode faut-il utiliser avec ces balayages ?

## Balayage de l'échantillon à vitesse constante

Tableau



Film IR



Méthode qualitative (CND) permettant de déterminer la position et les dimensions d'une fissure.

Image représentant la moyenne des gradients du film IR

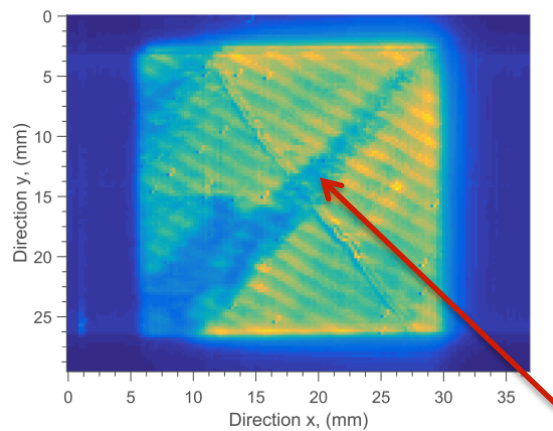
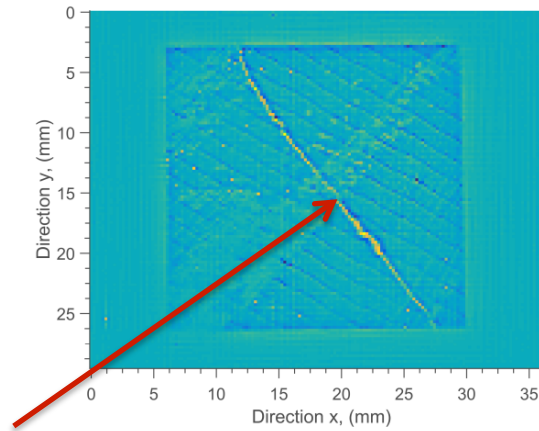


Image représentant la moyenne des Laplaciens du film IR



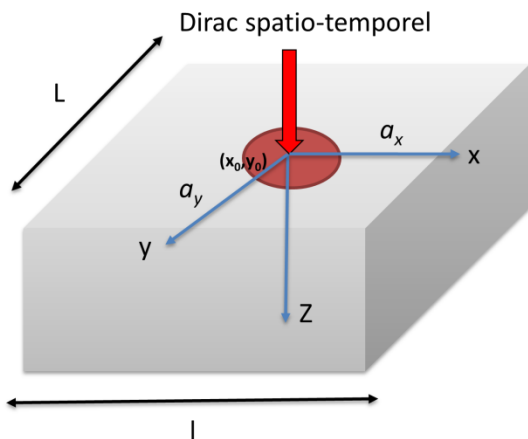
fissure

Comment peut-on passer du qualitatif au quantitatif dans le cas d'un balayage laser continu?

En développant des méthodes permettant d'estimer les diffusivités thermiques dans le plan.

# ***D'un dispositif qualitatif vers un outil quantitatif***

Dans le cas d'un Pulsed Spot



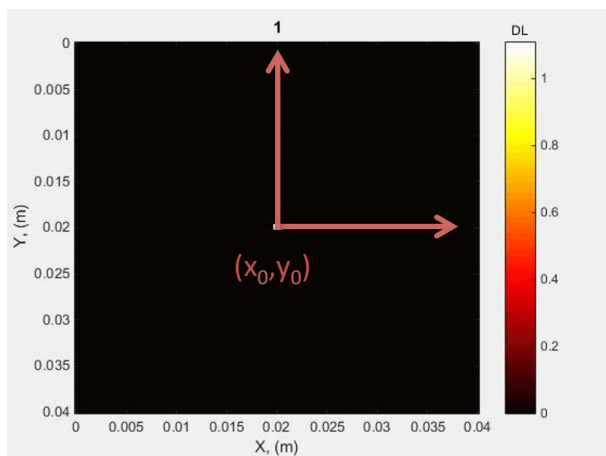
Expression analytique du champ de température à la surface de l'échantillon <sup>[1]</sup>

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{4a_{xx}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{xx}t}} \frac{\exp\left(\frac{-(y-y_0)^2}{4a_{yy}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{yy}t}} \frac{\exp\left(\frac{-z^2}{4a_{zz}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{zz}t}}$$

**Séparabilité de la solution selon x, y et z**

$$T(x, y, z, t) = T_x \cdot T_y \cdot T_z$$

Film Infrarouge de la simulation numérique



**Développer une méthode utilisant la séparabilité**

<sup>[1]</sup> Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959).



Expression analytique du champ de température à la surface de l'échantillon

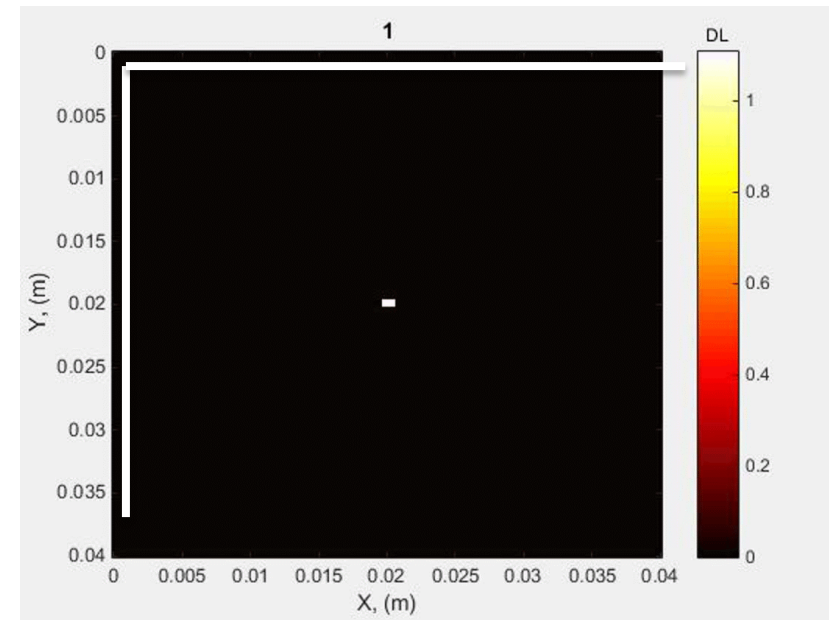
$$T(x, y, z = 0, t) = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{4a_{xx}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{xx}t}} \frac{\exp\left(\frac{-(y-y_0)^2}{4a_{yy}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{yy}t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{zz}t}}$$



Moyennes marginales selon les directions x et y

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{T}_y = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{4a_{xx}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{xx}t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{yy}t}} \\ \bar{T}_x = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(\frac{-(y-y_0)^2}{4a_{yy}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{yy}t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{xx}t}} \end{array} \right.$$

Champ de température



Expression analytique du champ de température à la surface de l'échantillon

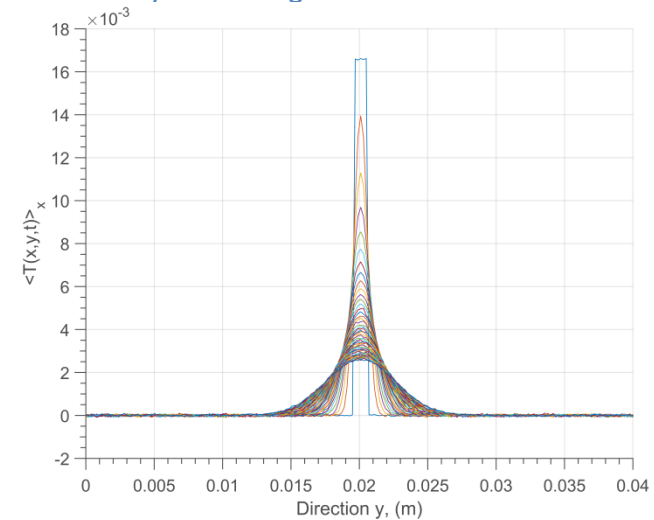
$$T(x, y, z = 0, t) = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{4a_{xx}t}\right) \exp\left(\frac{-(y-y_0)^2}{4a_{yy}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{xx}t} \sqrt{\pi a_{yy}t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{zz}t}}$$



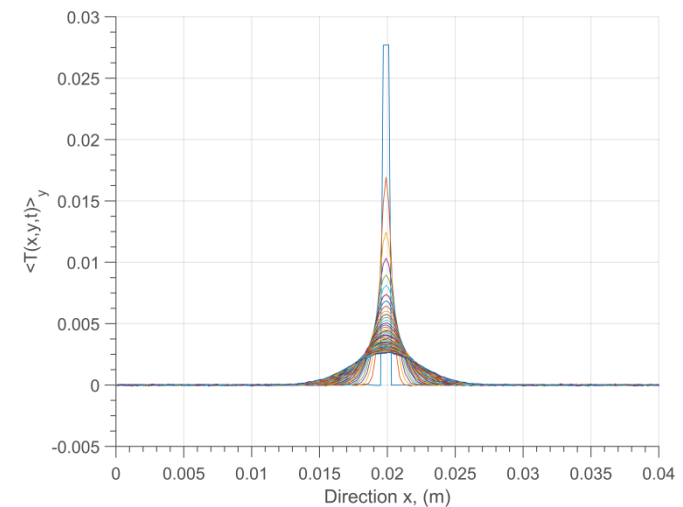
Moyennes marginales selon les directions x et y

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{T}_y = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{4a_{xx}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{xx}t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{zz}t}} \\ \bar{T}_x = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(\frac{-(y-y_0)^2}{4a_{yy}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{yy}t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{zz}t}} \end{array} \right.$$

Moyenne marginale selon x



Moyenne marginale selon y



Moyennes marginales selon les directions x et y

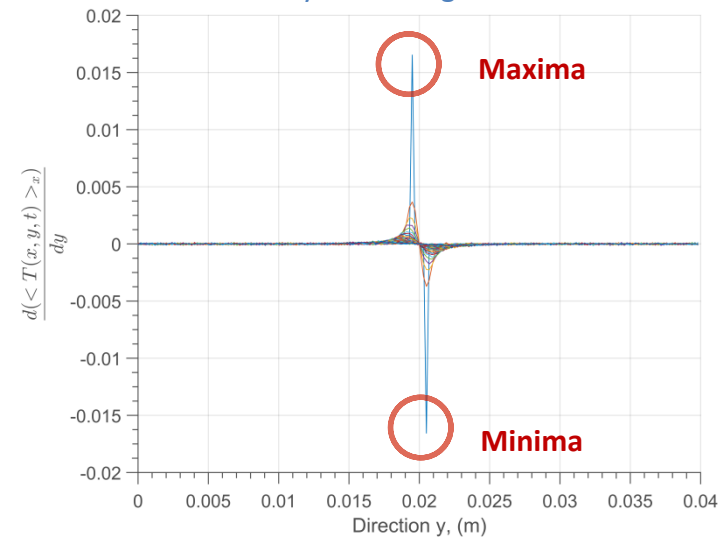
$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{T}_y = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{4a_{xx}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{xx}t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{zz}t}} \\ \bar{T}_x = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(-\frac{(y-y_0)^2}{4a_{yy}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{yy}t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{zz}t}} \end{array} \right.$$

Seuillage de la gaussienne du bruit de mesure au cours du temps

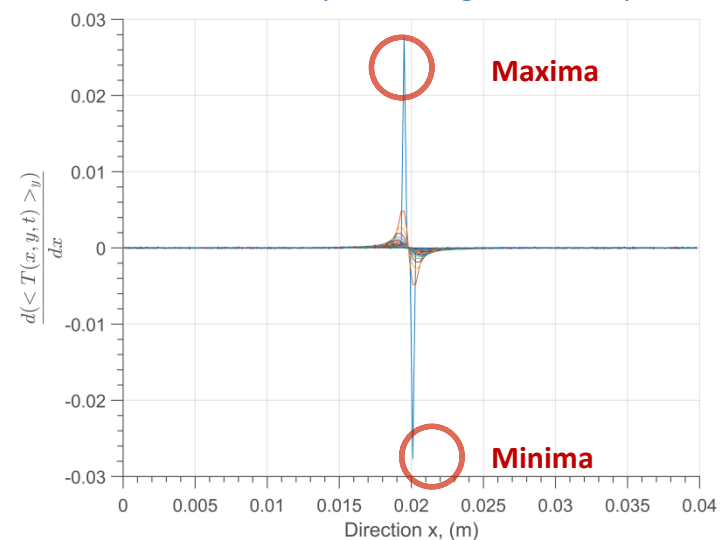
Borne max  $\left\{ \begin{array}{l} \max\left(\frac{d\bar{T}_y}{dx}\right) \\ \max\left(\frac{d\bar{T}_x}{dy}\right) \end{array} \right.$

Borne min  $\left\{ \begin{array}{l} \min\left(\frac{d\bar{T}_y}{dx}\right) \\ \min\left(\frac{d\bar{T}_x}{dy}\right) \end{array} \right.$

Dérivée de la moyenne marginale selon x



Dérivée de la moyenne marginale selon y



Moyennes marginales selon les directions x et y

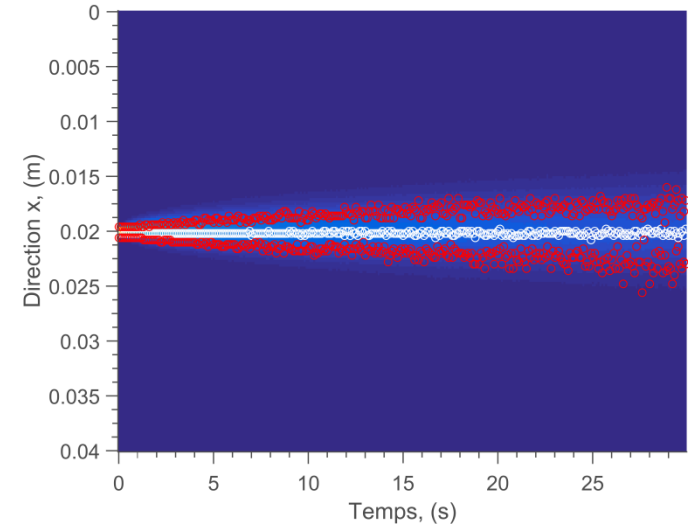
$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{T}_y = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{4a_{xx}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{xx}t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{zz}t}} \\ \bar{T}_x = \frac{Q}{\rho c} \frac{\exp\left(-\frac{(y-y_0)^2}{4a_{yy}t}\right)}{\sqrt{\pi a_{yy}t}} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{zz}t}} \end{array} \right.$$

Seuillage de la gaussienne du bruit de mesure au cours du temps

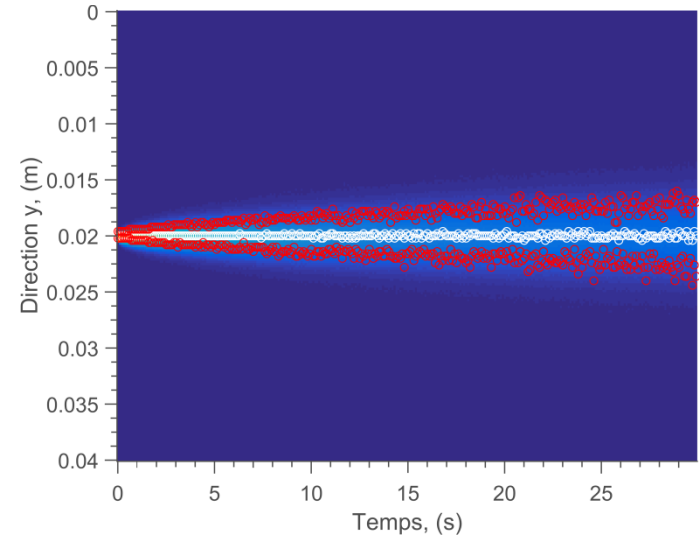
Borne max  $\left\{ \begin{array}{l} \max\left(\frac{d\bar{T}_y}{dx}\right) \\ \max\left(\frac{d\bar{T}_x}{dy}\right) \end{array} \right.$

Borne min  $\left\{ \begin{array}{l} \min\left(\frac{d\bar{T}_y}{dx}\right) \\ \min\left(\frac{d\bar{T}_x}{dy}\right) \end{array} \right.$

Seuillage de la zone d'intérêt selon x



Seuillage de la zone d'intérêt selon y



## Décomposition logarithmique

$$\begin{cases} \ln(\bar{T}_y) = \ln\left(\frac{Q}{\rho c \sqrt{\pi a_{zz}}}\right) - \ln(t) - \frac{(x - x_0)^2}{4a_{xx}t} \\ \ln(\bar{T}_x) = \ln\left(\frac{Q}{\rho c \sqrt{\pi a_{zz}}}\right) - \ln(t) - \frac{(y - y_0)^2}{4a_{yy}t} \end{cases}$$

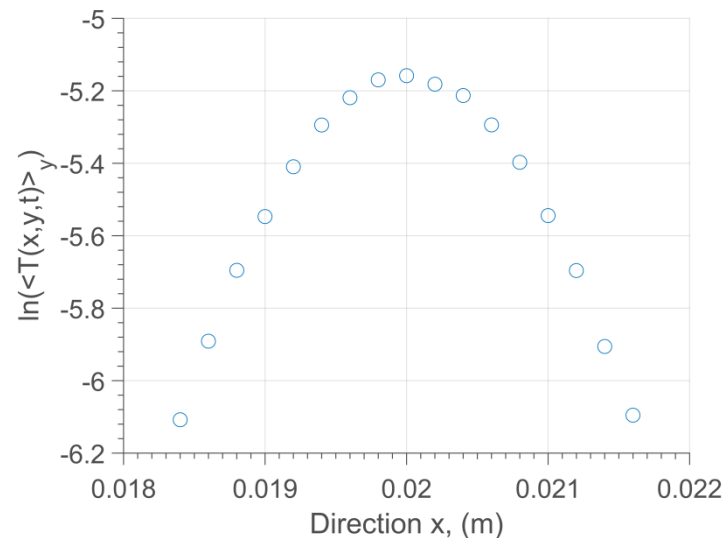
## Équation d'une parabole

$$\begin{cases} \ln(\bar{T}_y) = \beta_0(t) + \beta_1(t)x + \beta_2(t)x^2 \\ \ln(\bar{T}_x) = \beta_0(t) + \beta_1(t)y + \beta_2(t)y^2 \end{cases}$$

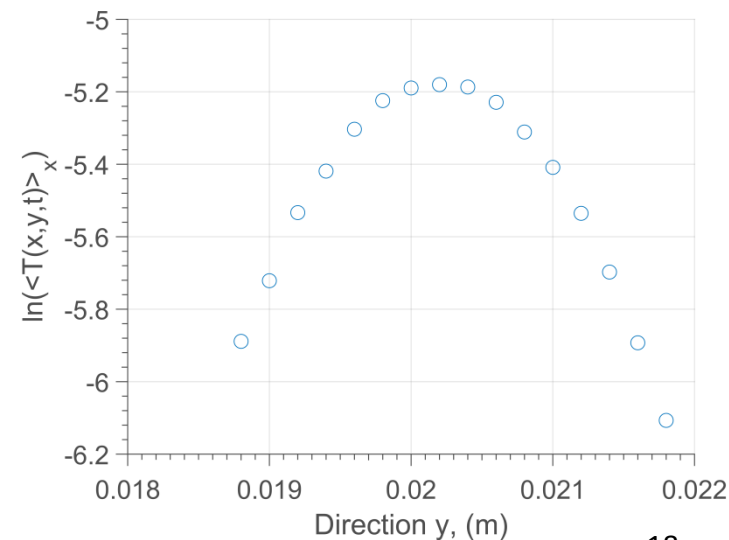
## Coefficients de la parabole

$$\begin{cases} \beta_2(t) = -\frac{1}{4a_{xx}t} \text{ ou } -\frac{1}{4a_{yy}t} & \text{Premier coefficient} \\ \beta_1(t) = \frac{x_0}{2a_{xx}t} \text{ ou } \frac{y_0}{2a_{yy}t} & \text{Deuxième coefficient} \\ \beta_0(t) = -\frac{x_0^2}{4a_{xx}t} + \ln\left(\frac{Q}{\rho c \sqrt{\pi a_{zz}}}\right) - \ln(t) & \\ \text{ou } -\frac{y_0^2}{4a_{yy}t} + \ln\left(\frac{Q}{\rho c \sqrt{\pi a_{zz}}}\right) - \ln(t) & \text{Troisième coefficient} \end{cases}$$

## Logarithme de la moyenne marginale selon x



## Logarithme de la moyenne marginale selon y



## Equation d'une parabole

$$\begin{cases} \ln(\bar{T}_y) = \beta_0(t) + \beta_1(t)x + \beta_2(t)x^2 \\ \ln(\bar{T}_x) = \beta_0(t) + \beta_1(t)y + \beta_2(t)y^2 \end{cases}$$

## Coefficients de la parabole

$$\begin{cases} \beta_2(t) = -\frac{I}{4a_{xx}t} \text{ ou } -\frac{I}{4a_{yy}t} \\ \beta_1(t) = \frac{x_0}{2a_{xx}t} \text{ ou } \frac{y_0}{2a_{yy}t} \\ \beta_0(t) = -\frac{x_0^2}{4a_{xx}t} + \ln\left(\frac{Q}{\rho c \sqrt{\pi a_{zz}}}\right) - \ln(t) \\ \text{ou } -\frac{y_0^2}{4a_{yy}t} + \ln\left(\frac{Q}{\rho c \sqrt{\pi a_{zz}}}\right) - \ln(t) \end{cases}$$

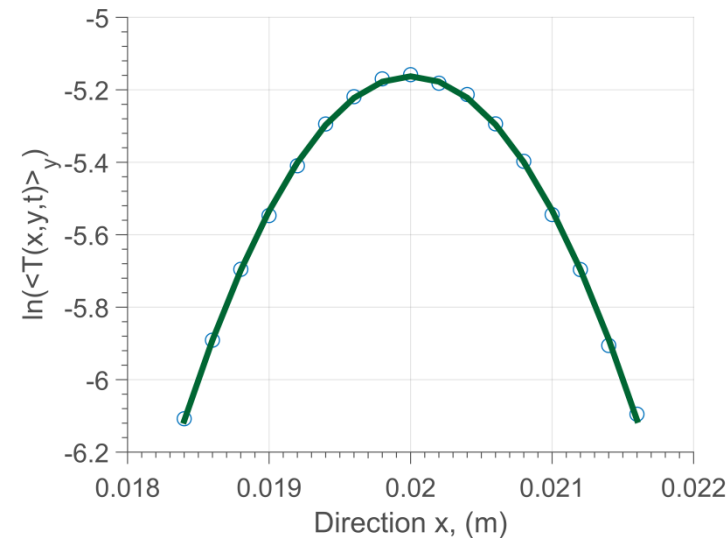


**Théorème de Gauss-Markov**

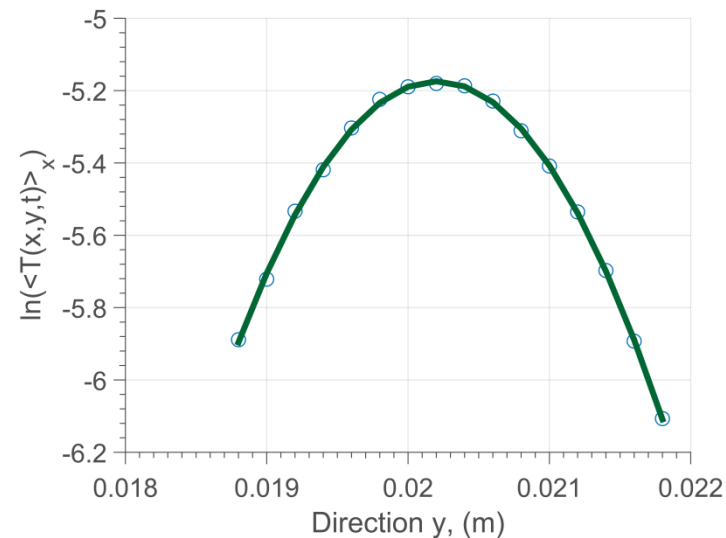
## Estimations des coefficients de la parabole

$$\hat{\beta} = (X^T W X)^{-1} X^T W \ln(\bar{T}_\xi)$$

## Estimations des coefficients de la parabole selon x à un instant t



## Estimations des coefficients de la parabole selon y à un instant t



Estimation du tenseur de diffusivité thermique ( $a_{xx}$ ,  $a_{yy}$ ) à partir de la pente du tracé

$$-\frac{l}{4\beta_2(t)} = a_{xx}t \quad \text{et} \quad -\frac{l}{4\beta_2(t)} = a_{yy}t$$

erreur sur  $a_{xx}$  : 0,64 %  
 erreur sur  $a_{yy}$  : 0,64 %

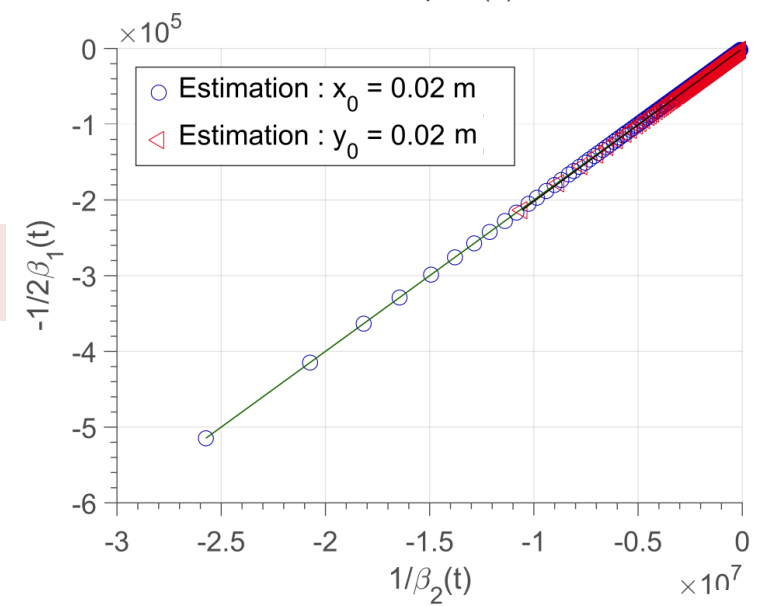
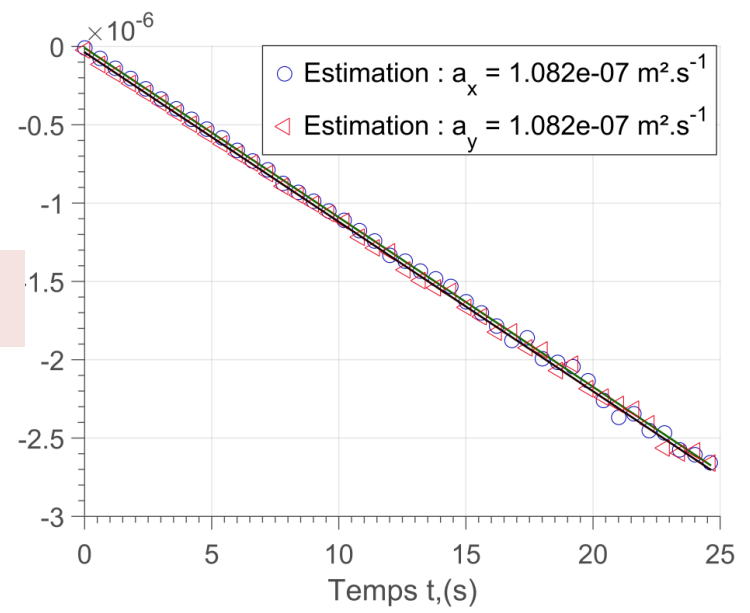
Estimation de la position du spot laser  $x_0$  et  $y_0$  à partir de la pente du tracé

$$\left. \begin{aligned} \beta_1(t) &= \frac{x_0}{2a_{xx}t} \text{ ou } \frac{y_0}{2a_{yy}t} \\ \beta_2(t) &= -\frac{l}{4a_{xx}t} \text{ ou } -\frac{l}{4a_{yy}t} \end{aligned} \right\} -\frac{1}{2\beta_2(t)} = \frac{x_0}{\beta_1(t)} \text{ ou } -\frac{1}{2\beta_2(t)} = \frac{y_0}{\beta_1(t)}$$

erreur sur  $x_0$  : 0 %  
 erreur sur  $y_0$  : 0 %

Suite à une sollicitation thermique, il est possible d'estimer deux paramètres :

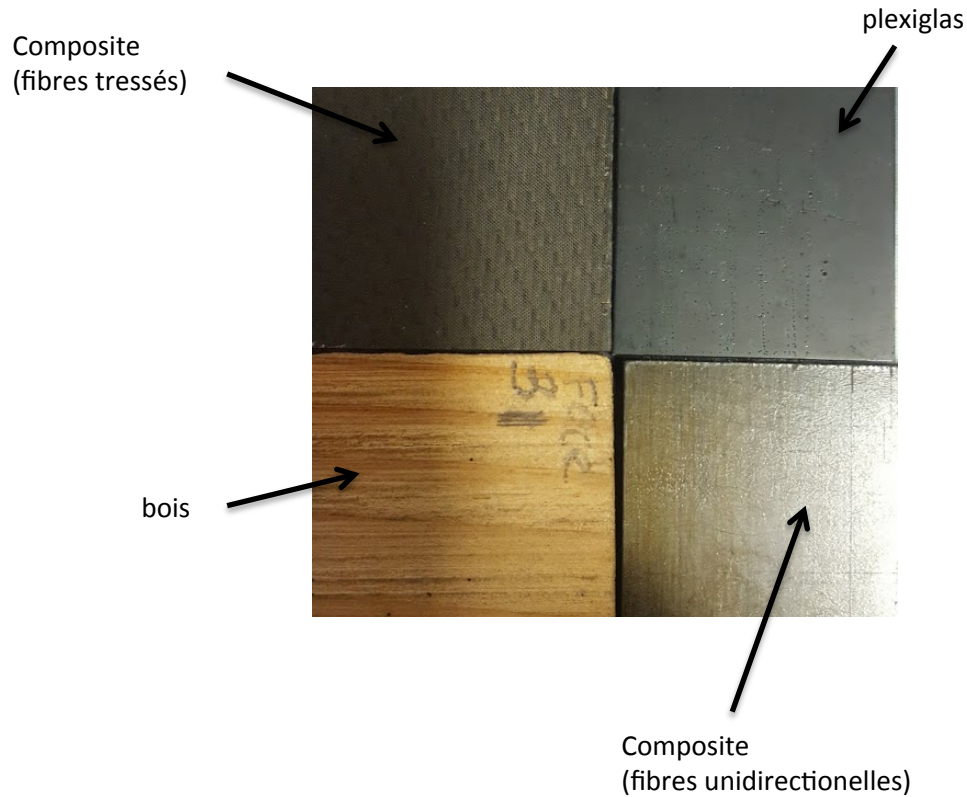
- la position du spot laser
- le tenseur de diffusivité thermique



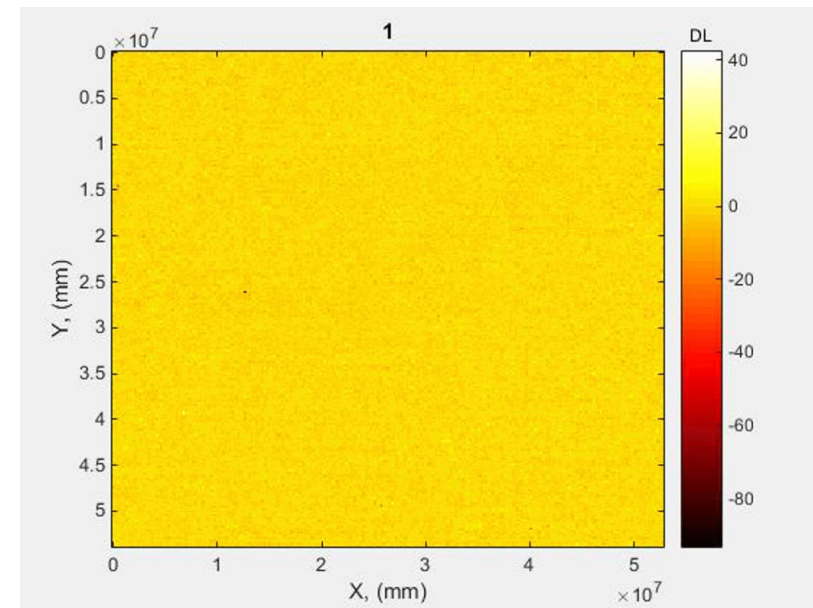
**Balayage laser de type GPFS**

**Objectif : avoir de nombreux spots laser pour appliquer la méthode des paraboles à chacun des spots lasers**

Echantillon hétérogène

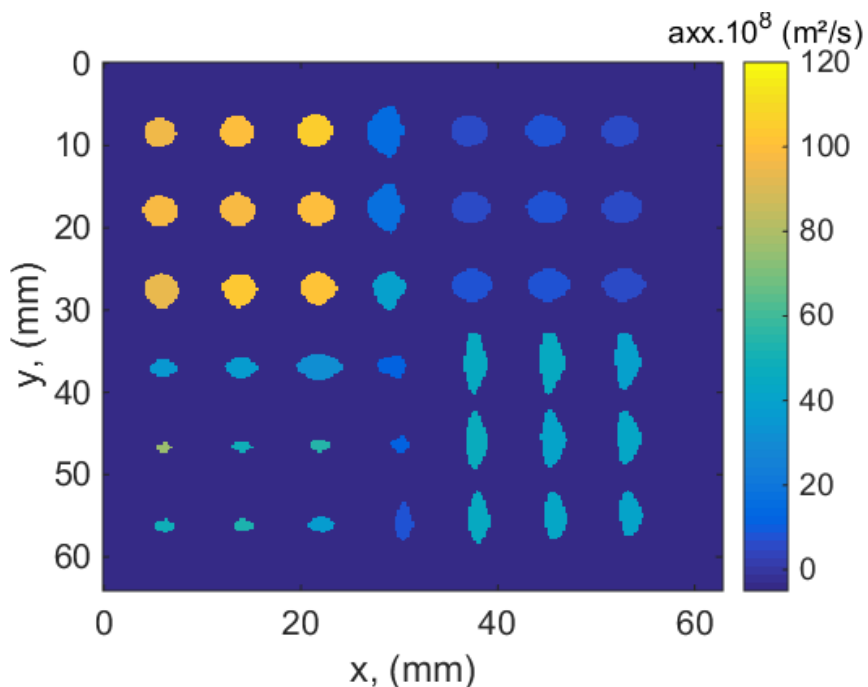


Grid Pulsed Flying Spot laser





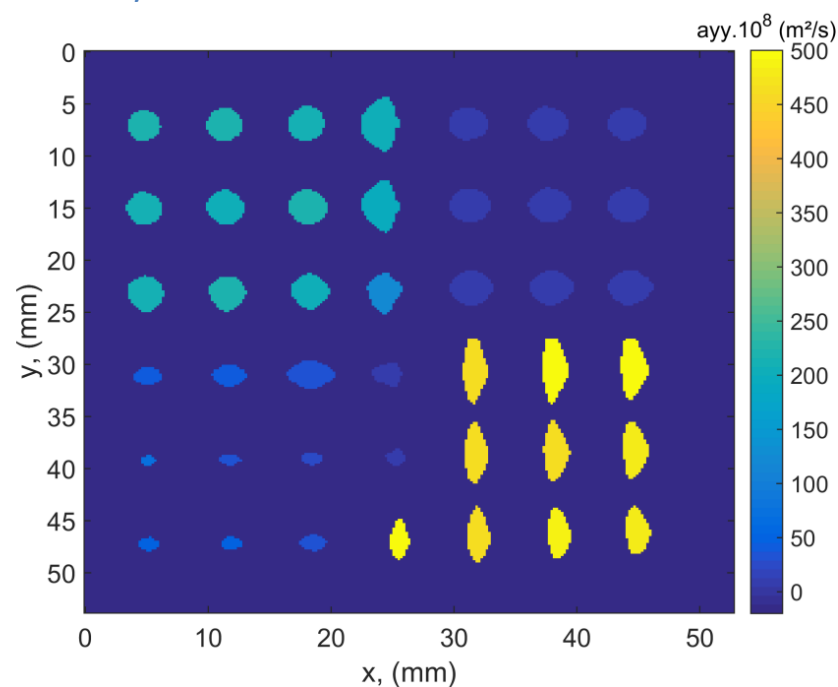
## Estimation des diffusivités thermiques dans le plan selon x



Pour le plexiglas, un écart de 2 % avec la littérature

Pour le composite à fibres unidirectionnelles, un écart de 1,92 % pour  $a_x$  et de 3,45 % pour  $a_y$  par rapport à la littérature

## Estimation des diffusivités thermiques dans le plan selon y

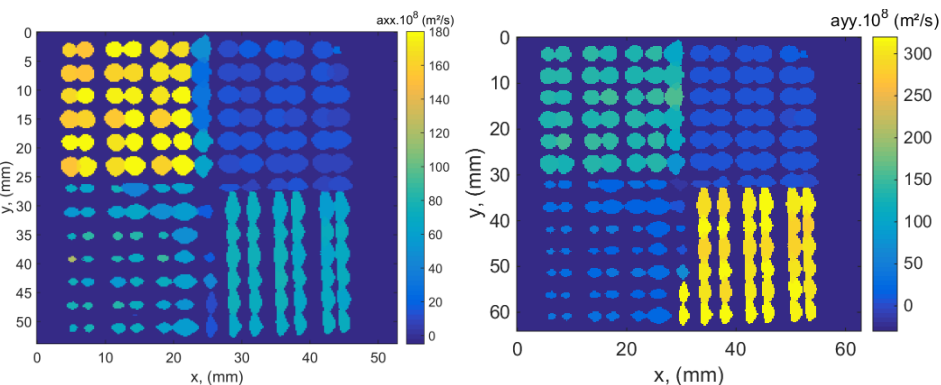


Cartographie de diffusivité thermique dans le plan d'un matériau hétérogène suite à un 1<sup>er</sup> balayage laser de type GPFS

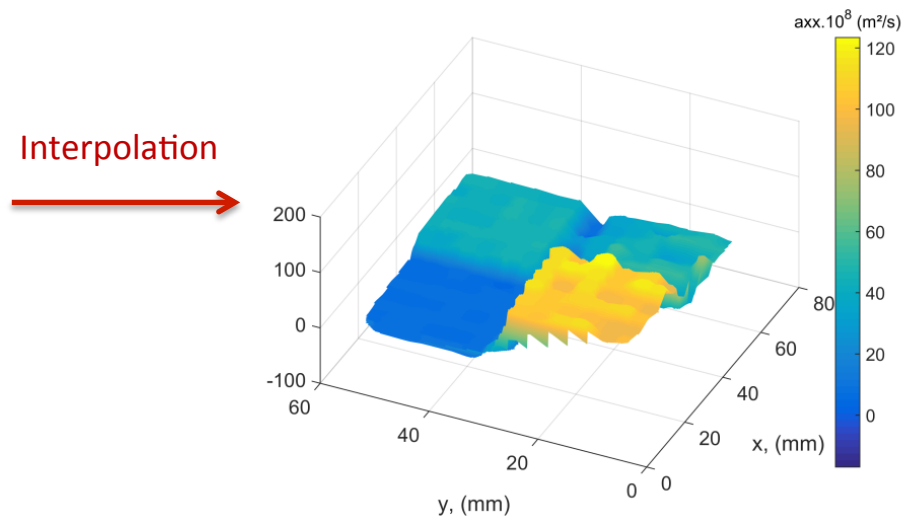
2<sup>ème</sup> étape :

Augmenter le nombre de spots laser pour affiner les cartographies de diffusivité thermique

Cartographie de diffusivité thermique dans le plan après un 4<sup>ème</sup> balayage



Cartographie de diffusivité thermique dans le plan selon x

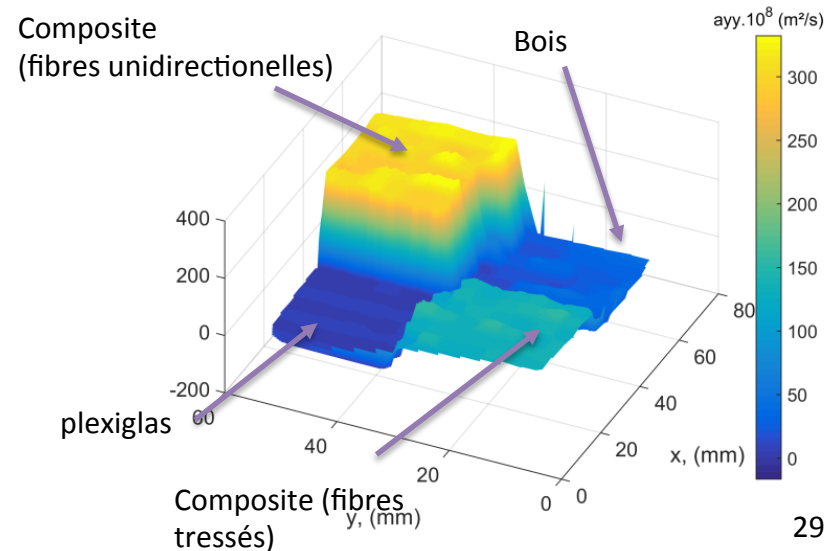


Temps écoulé pour réaliser 4 passages : 10 s

Temps de calcul : 1 min

Estimations des diffusivités thermiques dans le plan : 196

Cartographie de diffusivité thermique dans le plan selon y



Cartographie de diffusivité thermique dans le plan d'un matériau hétérogène suite à une balayage laser de type GPFS

# Conclusion

## *Avantages*

---

- *Traitement automatique et rapide*
- *Estimation locale des propriétés thermiques*
- *Peu sensible à la résolution de la caméra (3 pixels suffisent)*
- *Localement une grande énergie*
- *Méthode basée sur un modèle analytique*

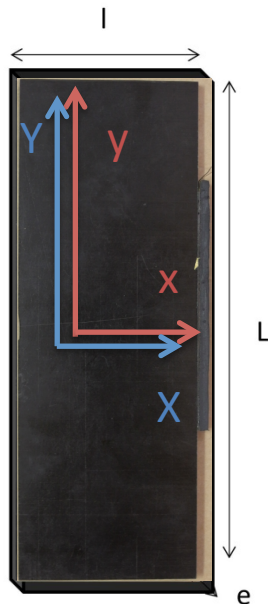
## *Inconvénients*

---

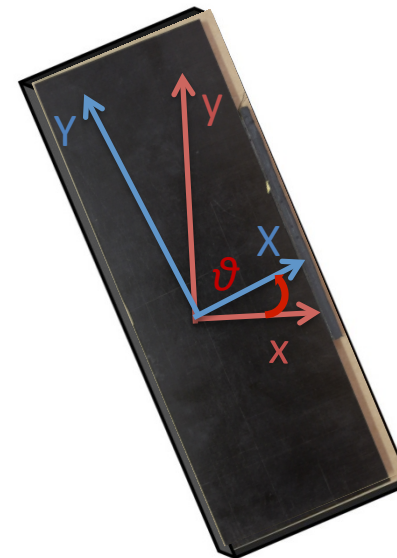
- *Pas d'estimation en temps réel*
- *Axes d'anisotropie colinéaires aux axes du repère de l'image*

**Que se passe-t-il si l'échantillon est orienté hors des axes du repère de l'image?**

Echantillon dans les axes  
d'anisotropie



Echantillon hors des axes du repère  
de l'image



Rotation d'un angle  $\theta$  de  
l'échantillon de composite

Ce qui se traduit sous la forme matricielle

$$\begin{pmatrix} a_{xx} & a_{xy} & 0 \\ a_{yx} & a_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & a_{zz} \end{pmatrix} = PDP^{-1} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & a_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & a_{ZZ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Deux termes croisés  $a_{xy}$ ,  $a_{yx}$  apparaissent dans le tenseur de diffusivité thermique

Expression du champ de température hors axes du repère de l'image <sup>[1]</sup>

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q}{4\pi\rho c_p t} \cdot |a^{i,j}|^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{|a_{i,j}|} \left( \frac{a_{yy}(x-x_0)^2}{4t} - \frac{a_{xy}(x-x_0)(y-y_0)}{2t} + \frac{a_{xx}(y-y_0)^2}{4t} \right)\right) \cdot f_z(t)$$



Expression du logarithme du champ de température hors axes du repère de l'image

$$\ln(T(x, y, z, t)) = \beta_0(t) + \beta_1(t)x + \beta_2(t)y + \beta_3(t)x^2 + \beta_4(t)xy + \beta_5(t)y^2$$



Ellipse centrée à l'origine d'un système de coordonnées

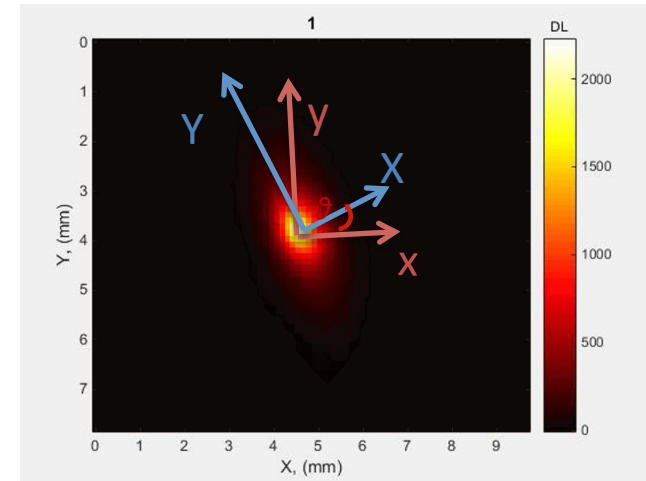
$$\ln(T(x, y, t)) = \beta_3(t)x^2 + \beta_4(t)xy + \beta_5(t)y^2$$



Equation cartésienne sous forme matricielle

$$q(x, y) = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}^t A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad \text{avec la matrice associée}$$

$$A = \begin{pmatrix} \beta_3(t) & \frac{\beta_4(t)}{2} \\ \frac{\beta_4(t)}{2} & \beta_5(t) \end{pmatrix}$$



<sup>[1]</sup> Chang, et al. (1973).

## 1. Valeurs propres de la matrice associée A :

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\frac{l}{4a_{xx}t} \\ \lambda_2 = -\frac{l}{4a_{yy}t} \end{cases}$$

## 2. Estimation du tenseur de diffusivité thermique ( $a_{xx}$ , $a_{yy}$ ) à partir de la pente du tracé :

$$a_{xx} = -\frac{l}{4\lambda_1 t} \quad \text{et} \quad a_{yy} = -\frac{l}{4\lambda_2 t}$$

## 3. Vecteurs propres de la matrice associée A

$$\begin{cases} AX_1 = \lambda_1 X_1 \text{ avec } X_1 = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{21} \end{pmatrix} \\ AX_2 = \lambda_2 X_2 \text{ avec } X_2 = \begin{pmatrix} x_{12} \\ x_{22} \end{pmatrix} \end{cases}$$

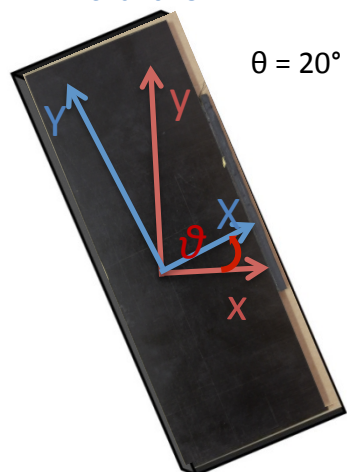
Possibilité d'estimer deux paramètres en même temps :

- Tenseur de diffusivité thermique
- Orientation des isothermes

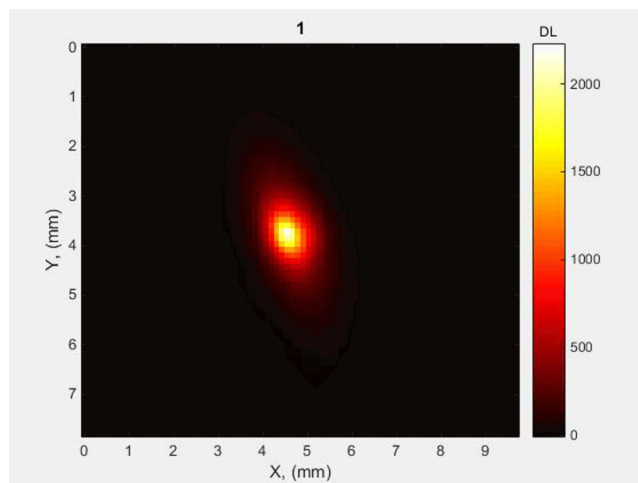
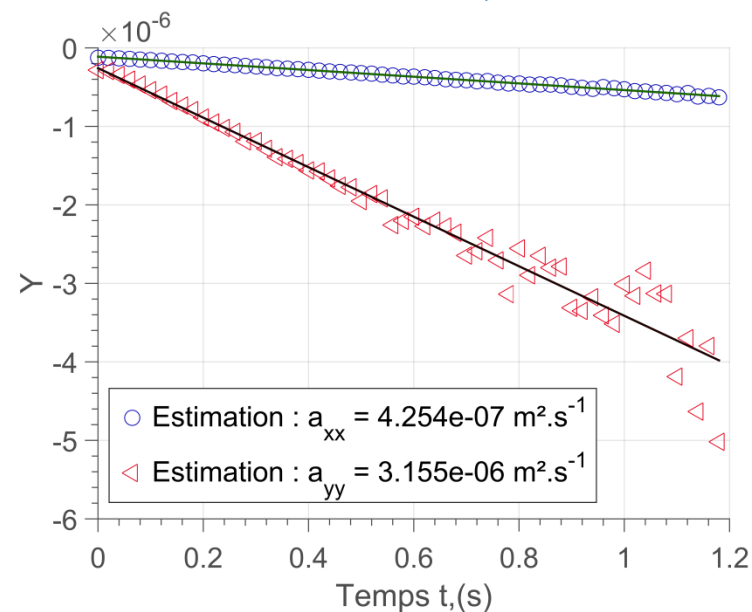
## 4. Estimation de l'angle d'orientation de l'ellipse à partir de :

$$\theta = \text{Arctan}\left(\frac{x_{21}}{x_{11}}\right) = \text{Arctan}\left(-\frac{x_{12}}{x_{22}}\right)$$

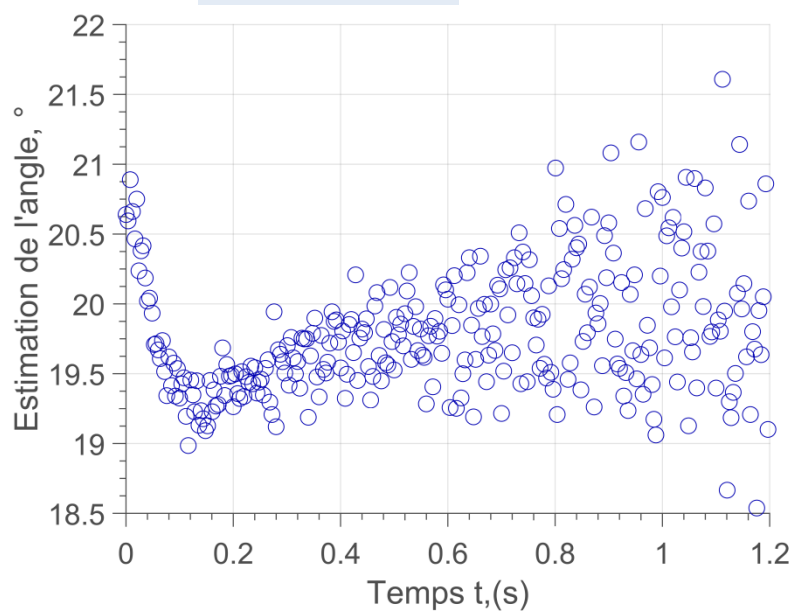
Echantillon



Film infrarouge

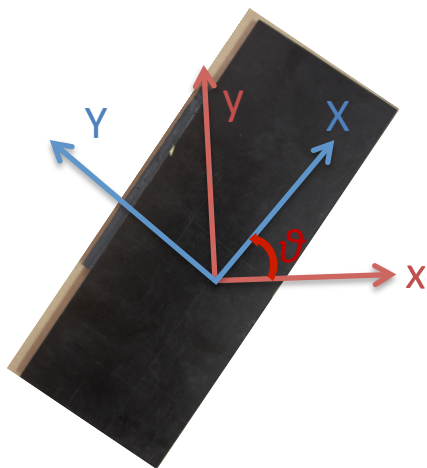
Estimation de  $a_x$  et  $a_y$ 

composite : carbone / époxy

Estimation de  $\vartheta$ 

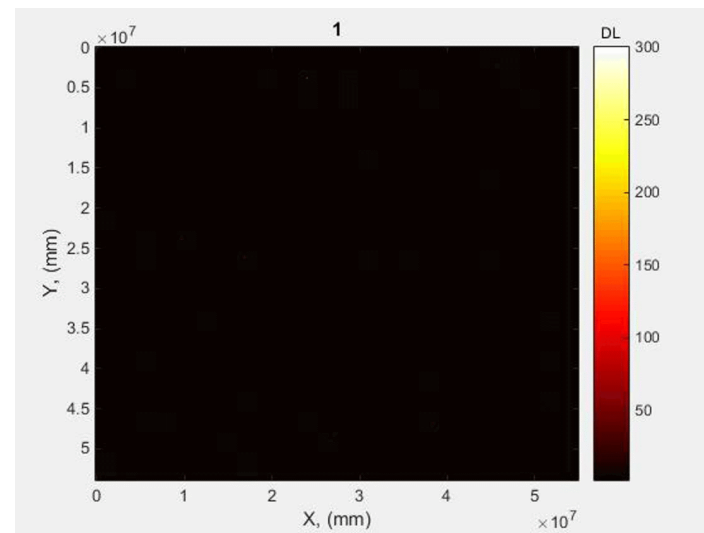
Estimation simultanée des diffusivités et des angles d'anisotropie  
Écart < 10 %

Echantillon de composite orienté à 45 °

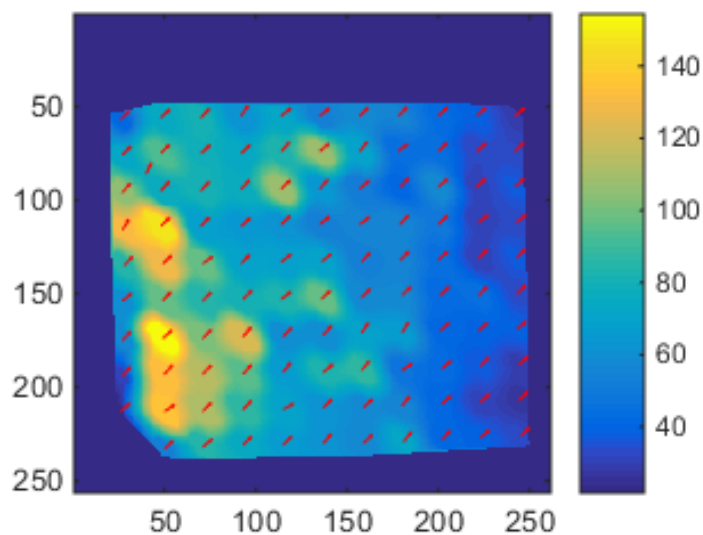


110 spots laser  
+ traitements  
en moins de 1 minute

Grid Pulsed Flying Spot laser

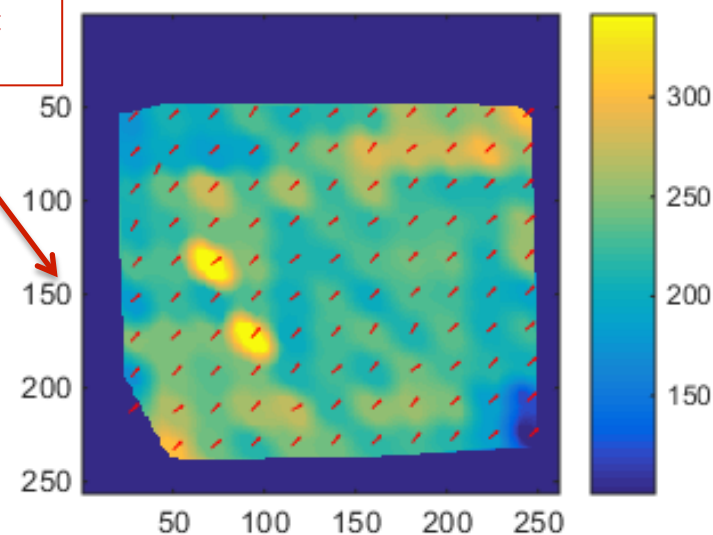


Cartographie de diffusivité thermique selon x et les angles estimés (flèches rouge)



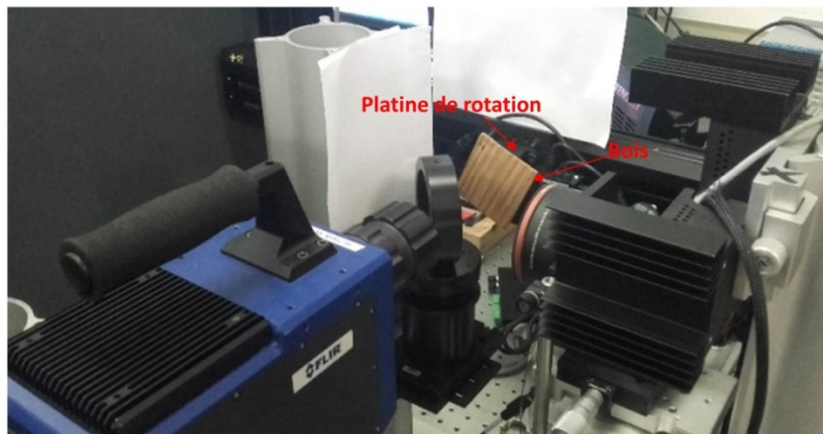
Milieu homogène et  
anisotrope ( $a_x < a_y$ )

Cartographie de diffusivité thermique selon y et les angles estimés (flèches rouge)

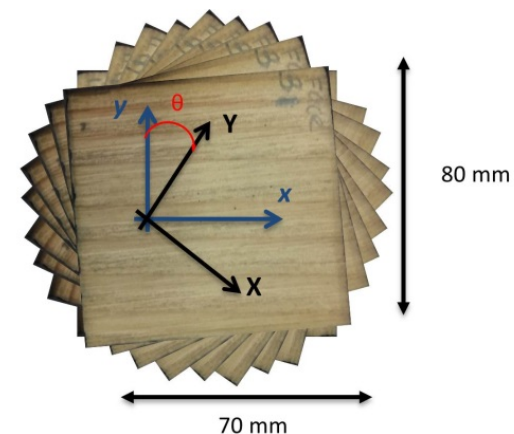




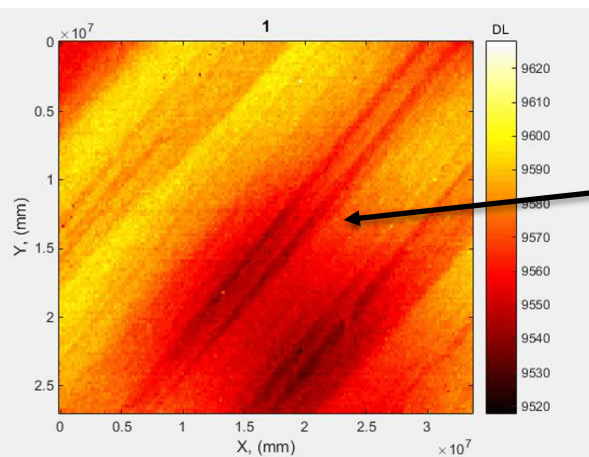
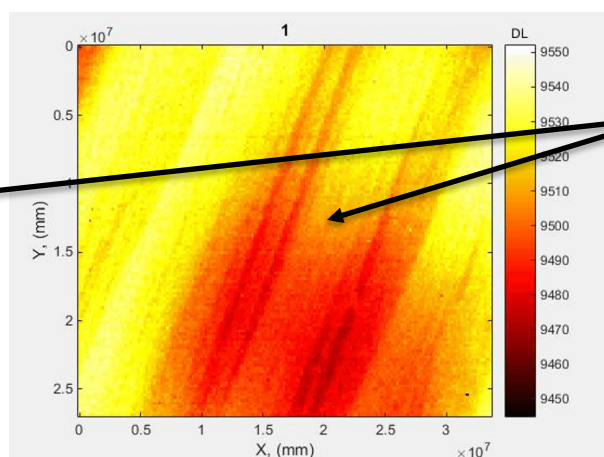
## Montage expérimental



## Echantillon de pin maritime orienté selon différentes positions angulaires



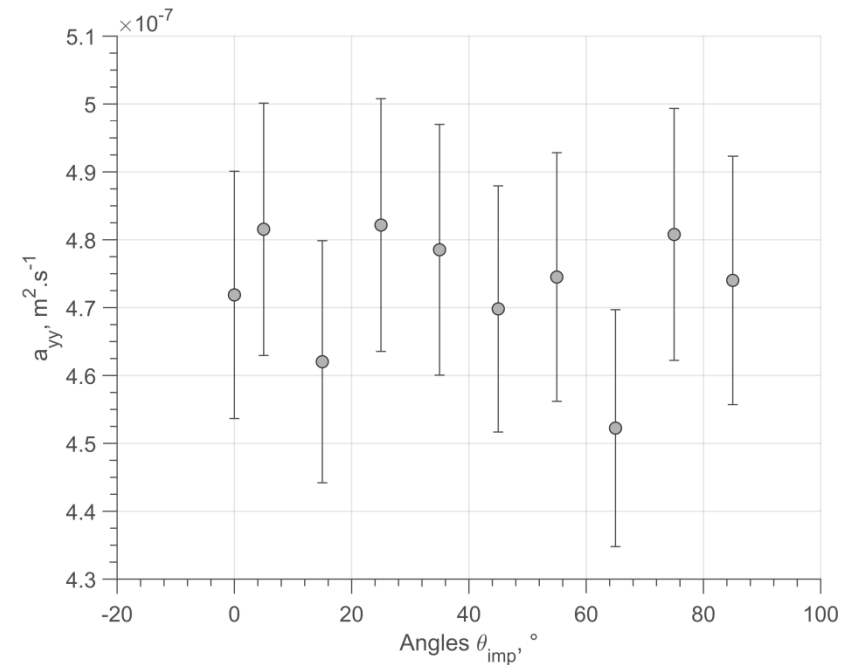
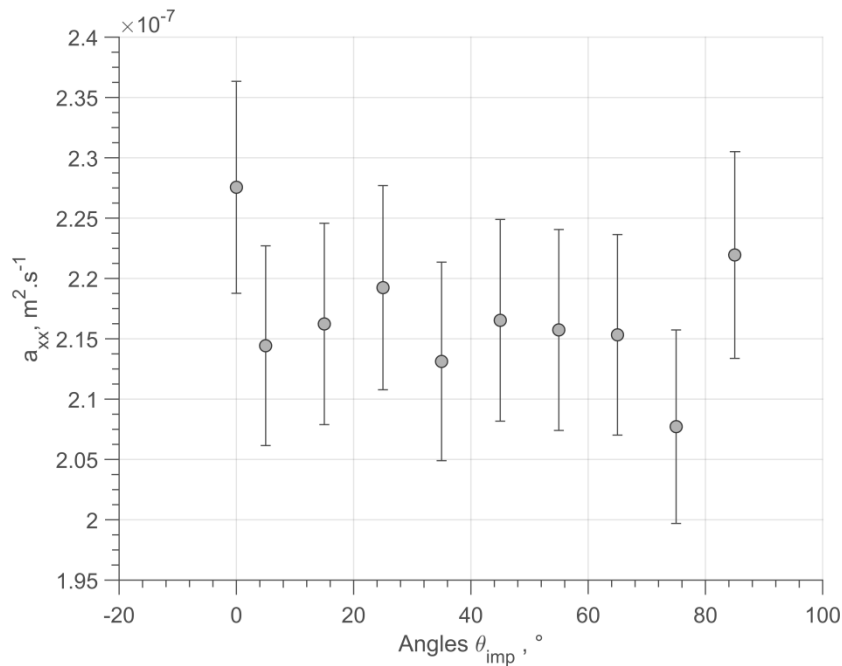
## Thermogrammes après l'impulsion laser pour deux positions angulaires

 $\theta = 45^\circ$  $\theta = 65^\circ$ 

Le champ de température se propage le long d'une fibre du pin maritime

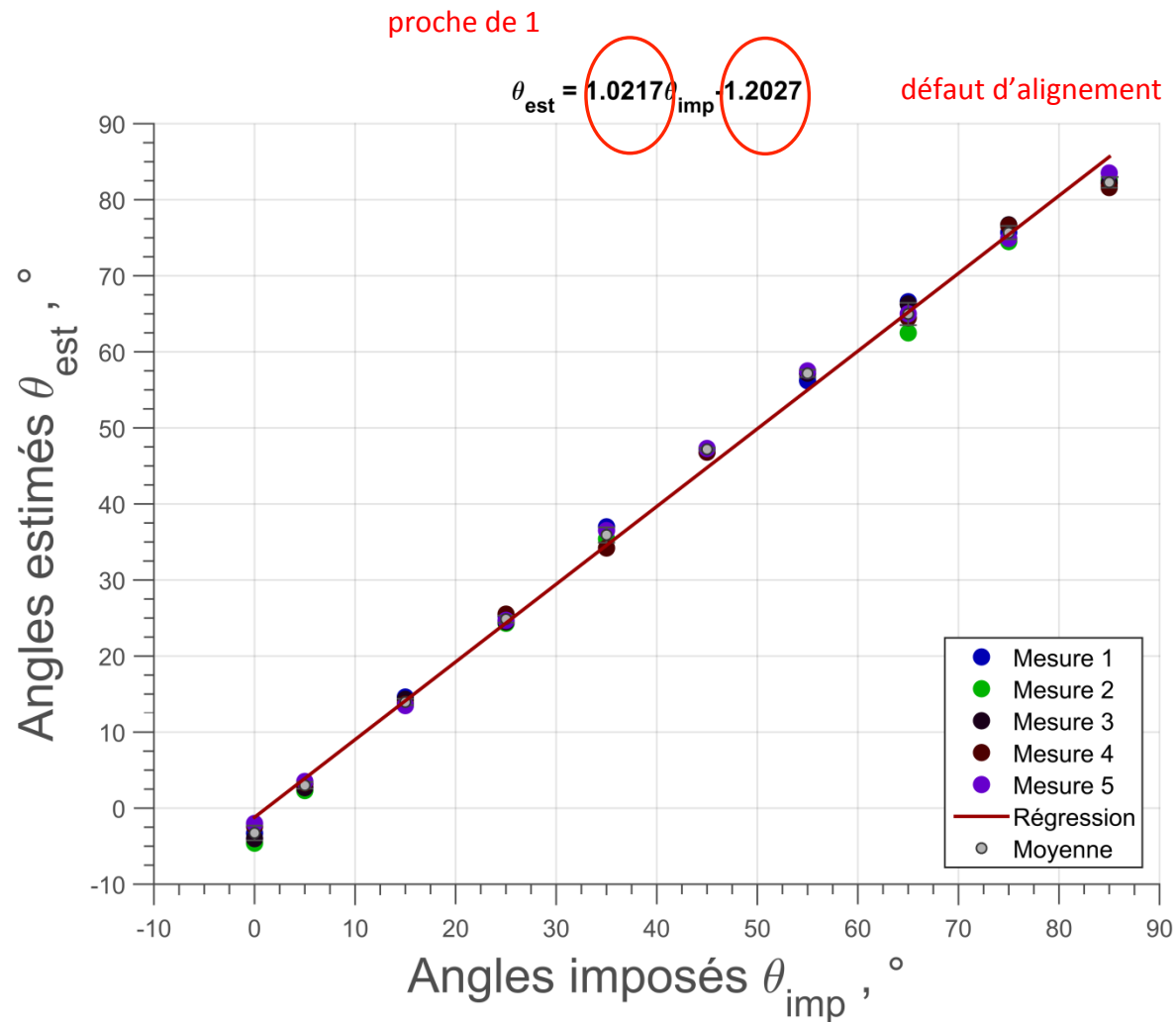
Mais est-ce que c'est la même fibre entre deux rotations ?  
Vérification via l'estimation du tenseur de diffusivité thermique

Diffusivités thermiques moyennes pour 5 essais de selon la direction x et y en fonction des angles d'orientation de la fibre de bois



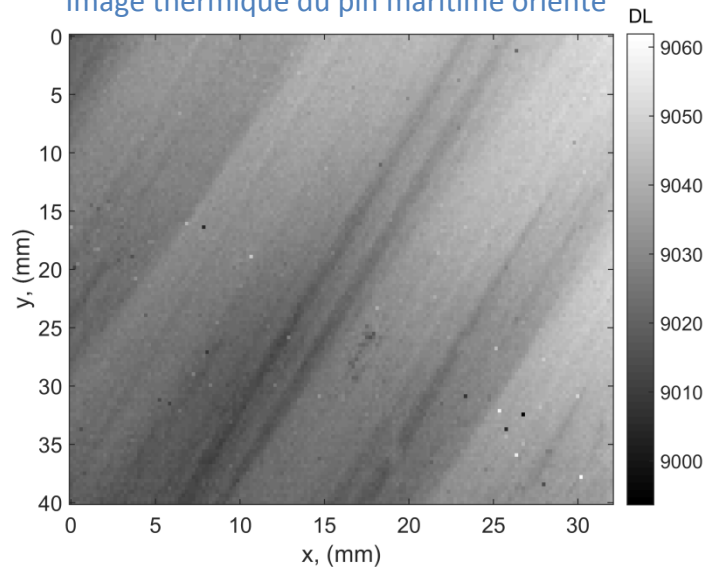
« Même diffusivité » quelque soit l'angle imposé.  
=> A chaque rotation l'impulsion laser est réalisée sur la même fibre de bois !

## Angles estimés en fonction des angles imposés

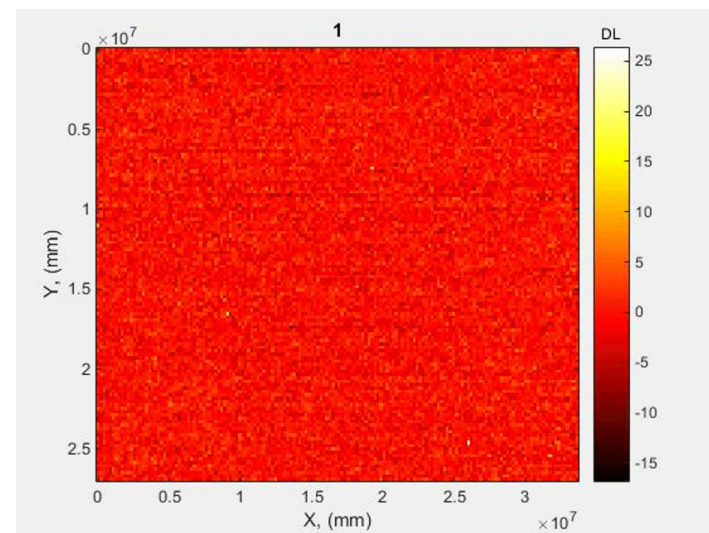


Estimation des angles d'anisotropie =>  
Banc de mesure répétable

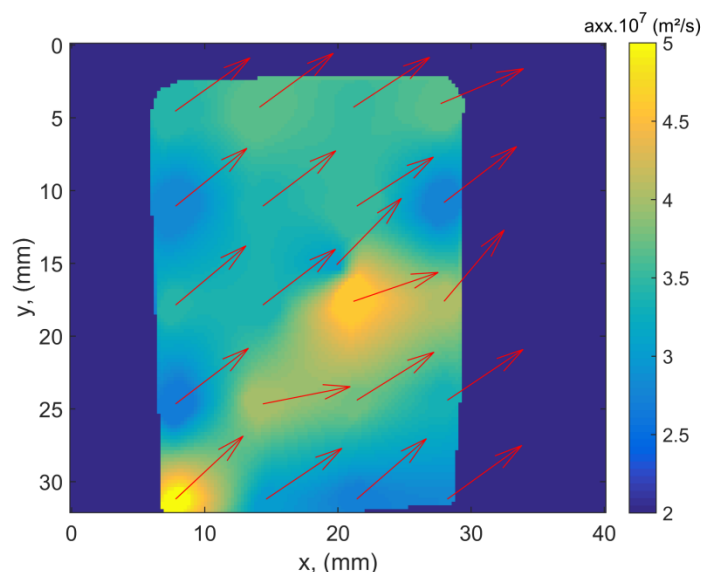
Image thermique du pin maritime orienté



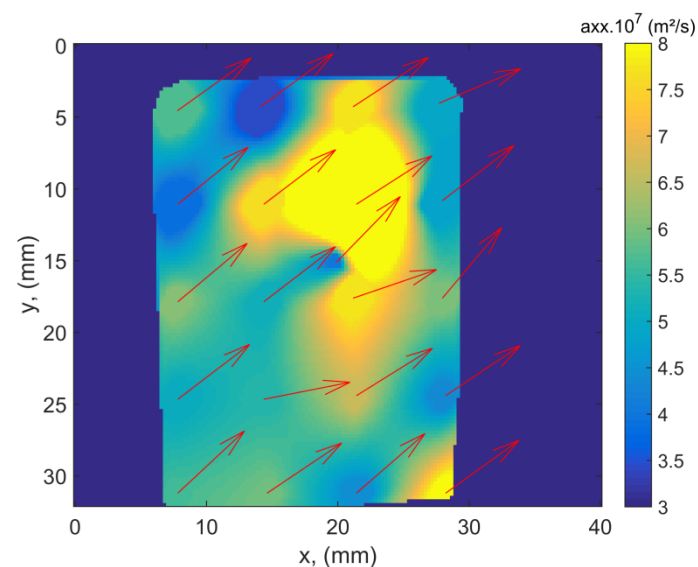
Grid Pulsed Flying Spot laser



Cartographie de diffusivité thermique selon x et les angles estimés (flèches rouges)



Cartographie de diffusivité thermique selon y et les angles estimés (flèches rouges)



# Conclusion

## *Avantages*

---

- *Traitement automatique, rapide*
- *Méthode basée sur un modèle analytique*
- *Mesure de champs de tenseur de diffusivité thermique en milieu hétérogène anisotrope orienté*
- *Mesure de l'orientation des isothermes*

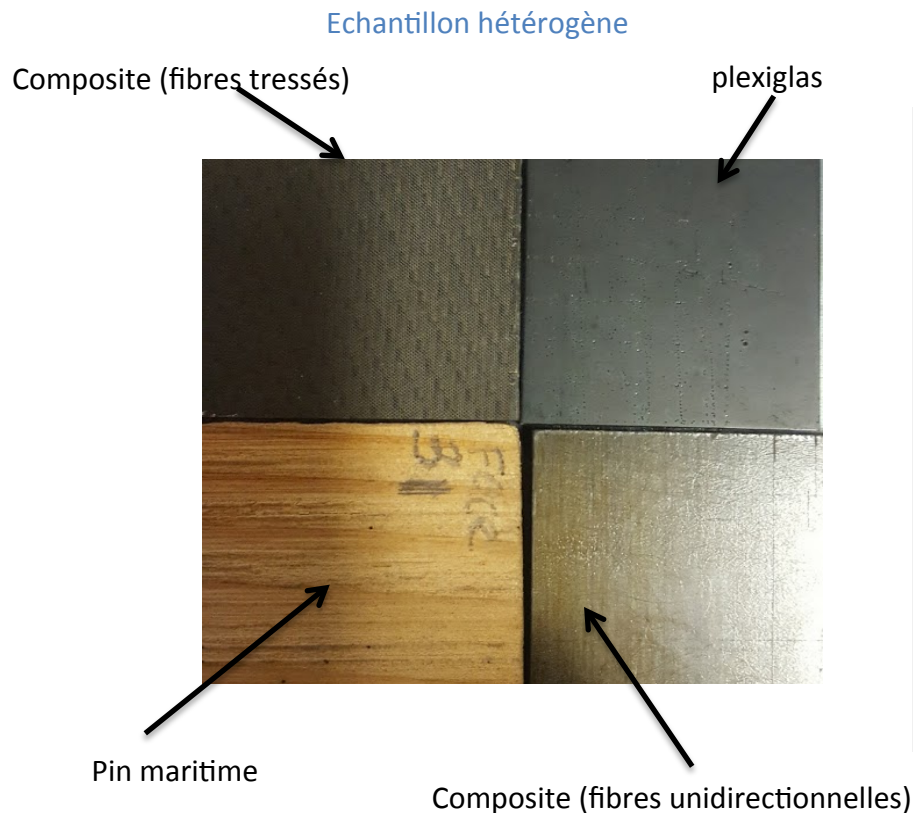
## *Inconvénients*

---

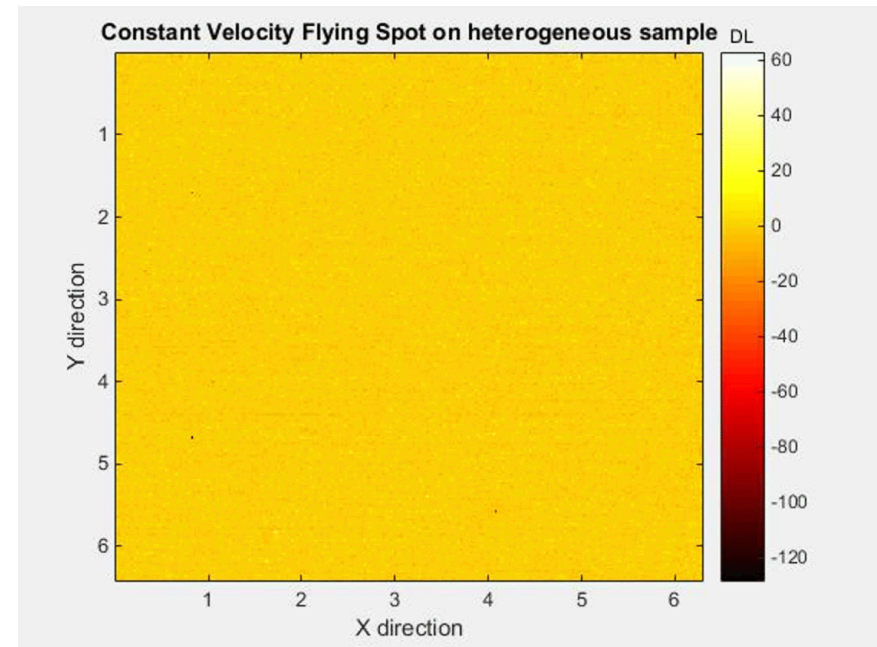
- *Pas d'estimation en temps réel*

## ***Du GPFS au balayage continu***

## Enjeux industriel : des estimations du tenseur de diffusivité thermique en temps réel



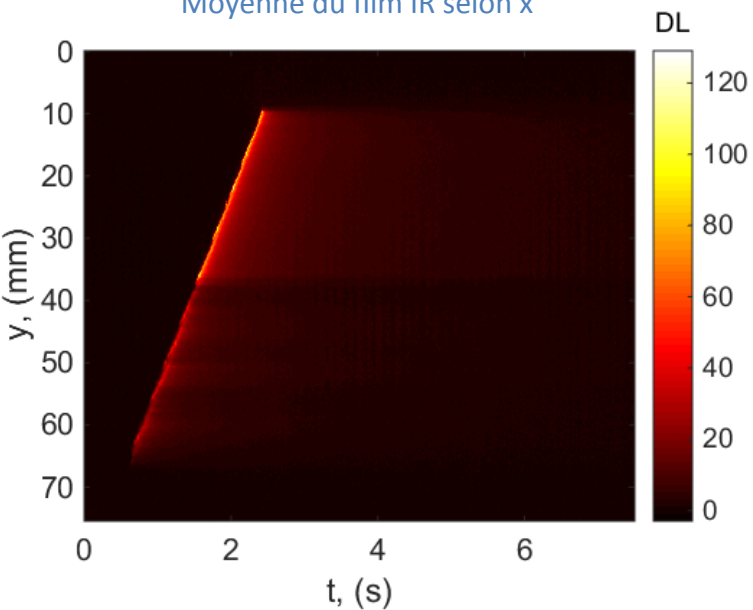
Film infrarouge dans le repère du spot laser



**Comment estimer les propriétés thermiques  
dans le plan d'un matériau hétérogène avec un terme de  
vitesse ?**

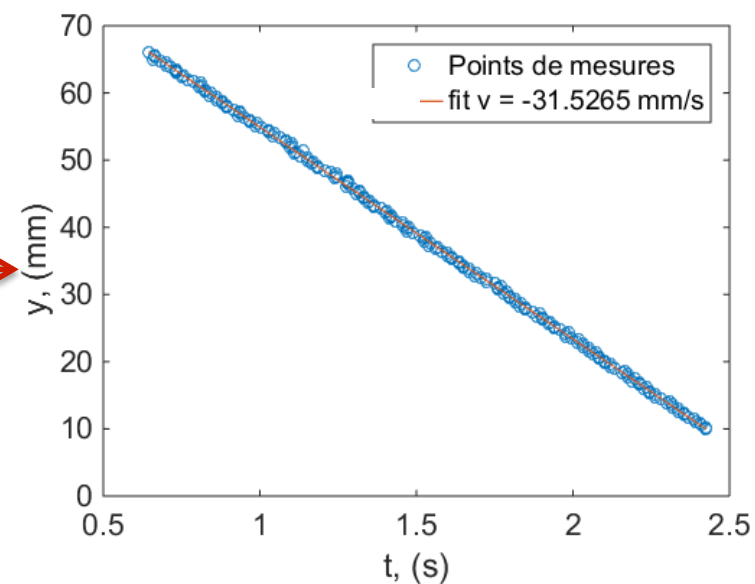
## Comment estimer la vitesse du faisceau laser ?

Moyenne du film IR selon x



Extraction des maxima  
de chacune des lignes

Estimation de la vitesse moyenne du faisceau laser





Équation d'avection-diffusion

$$\frac{v}{a} D \frac{\partial T}{\partial y^*} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{avec} \quad y^* = \frac{y}{D}$$

pour v

Se placer dans le repère du faisceau suite à un changement de variable  $t = \frac{y}{v}$

$$T(x, y, z) = \frac{Q}{\rho c e} \frac{\exp\left(-\frac{v(x-x_0)^2}{4a_{xx}y}\right) \exp\left(-\frac{vz^2}{4a_{zz}y}\right)}{\sqrt{\frac{\pi a_{xx}y}{v}} \sqrt{\frac{\pi a_{zz}y}{v}}}$$

Appliquer la méthode des paraboles logarithmiques

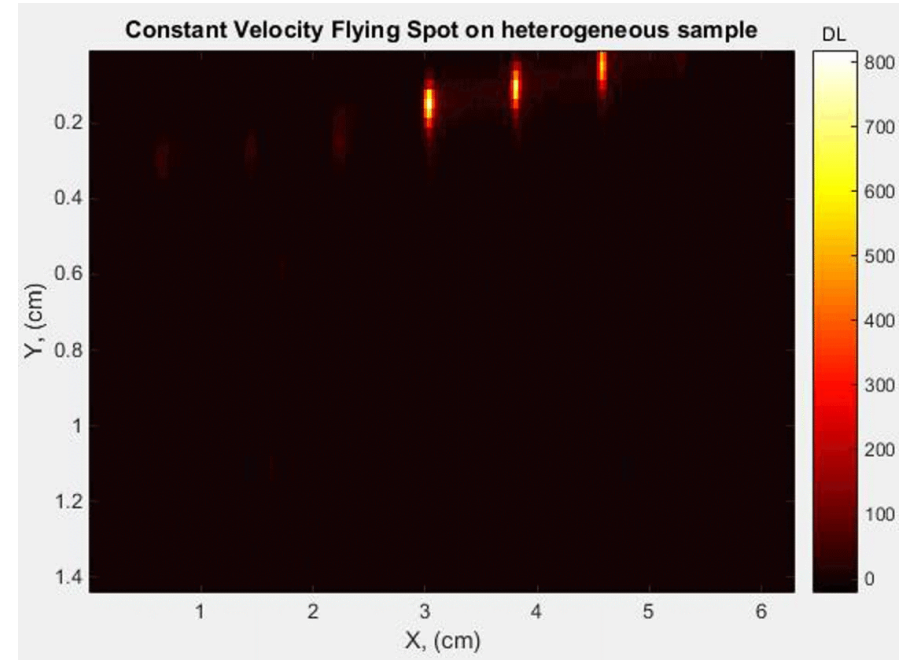
$$\ln(T(x, y)) = \ln(K) - \frac{v(x-x_0)^2}{4a_{xx}y}$$



$$\ln(T(x, y)) = \beta_{v0}(y) + \beta_{v1}(y)x + \beta_{v2}(y)x^2$$

Equation d'une parabole

Film infrarouge dans le repère du spot laser

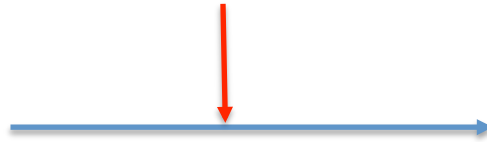


Coefficients de la parabole

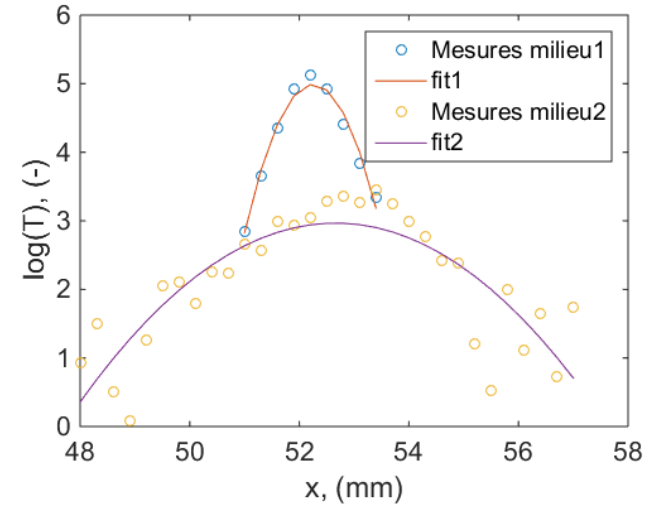
$$\text{où} \quad \begin{cases} \beta_{v2}(y) = -\frac{v}{4a_{xx}y} \\ \beta_{v1}(y) = \frac{vx_0}{2a_{xx}y} \\ \beta_{v0}(y) = -\frac{vx_0^2}{4a_{xx}y} + \ln(K) \end{cases}$$

Coefficients de la parabole

$$\begin{cases} \beta_{v2}(y) = -\frac{v}{4a_{xx}y} \\ \beta_{v1}(y) = \frac{vx_0}{2a_{xx}y} \\ \beta_{v0}(y) = -\frac{vx_0^2}{4a_{xx}y} + \ln(K) \end{cases}$$

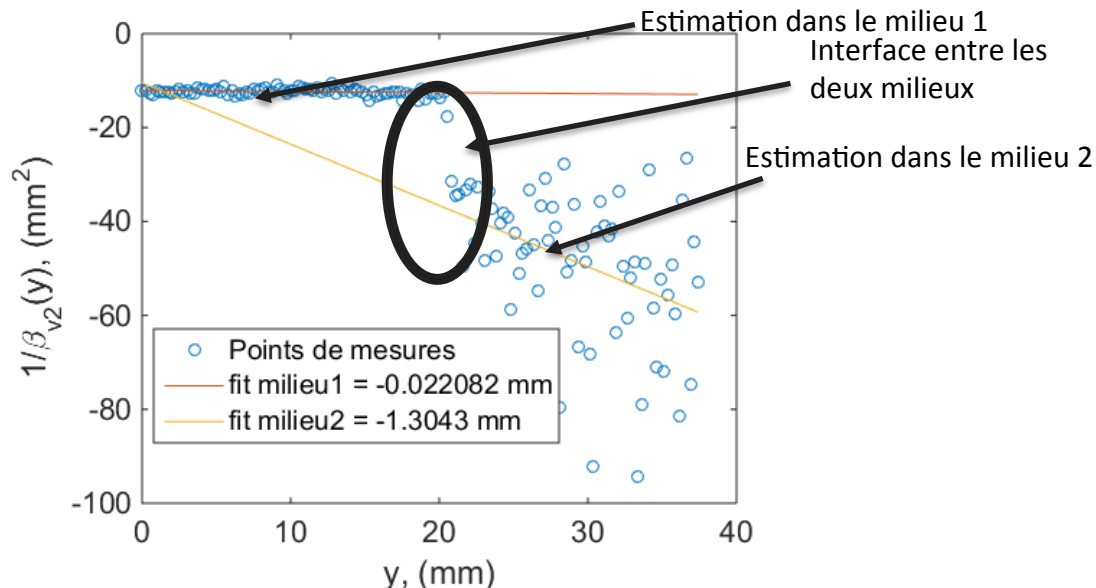
**Théorème de Gauss-Markov**

Estimation des coefficients de la parabole de deux milieux.



Estimation dans deux milieux en temps réel

$$\frac{l}{\beta_{v2}(y)} = -\frac{4a_{xx}}{v}y$$



Mesure du tenseur de diffusivité thermique dans un milieu hétérogène, anisotrope via un balayage continu du faisceau laser

Vers des cartographies de diffusivité thermique en temps réel

# ***Conclusions & Perspectives***

- **Développement d'un banc de caractérisation thermique versatile**
- **Méthode basée sur des solutions analytiques séparables**
- **Cartographies de diffusivités thermiques dans le plan pour des matériaux hétérogènes, anisotropes et orientés**
- **Utilisation du flying spot non plus comme outil quantitatif mais comme un outil qualitatif pour obtenir des cartographies de diffusivité thermique dans le plan en temps réel**

## Amélioration des méthodes proposées :

- **Des cartographies de diffusivités thermiques en temps réel**
- **Vers des traitements aux nanoéchelles AFM thermique (thèse de D. Indrayush, 2017)**
- **Vers des problématiques aux interfaces via un microscope optique permettant d'augmenter la résolution spatiale**

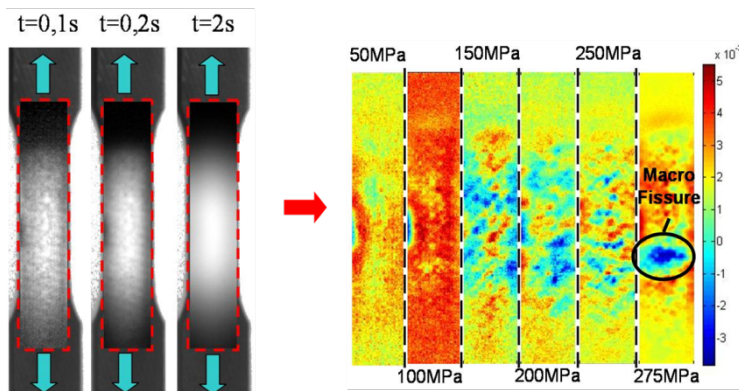
## De nombreuses applications !

- **Thermomécanique:**

Étendre ce travail au domaine de la thermomécanique avec comme objectif une mesure simultanée des champs de déformations et de propriétés thermiques des matériaux soumis à des sollicitations mécaniques (traction, compression...).

- **Chimie :**

Estimation du coefficient de diffusion massique via la méthode des paraboles logarithmique



*Diffusion:  
Acide – Base dans une puce  $\mu$ fluidique*



# Ondes TéraHertz :

## Définitions, histoire & généralités

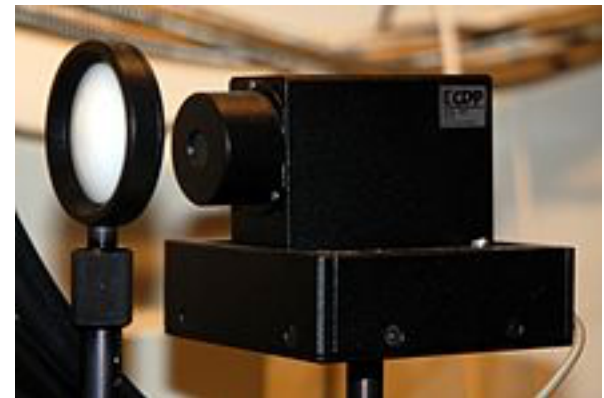


# Historique (1/2) les ondes T...

- Parfois nommées rayons T, les ondes TéraHertz sont, comme les ondes radio ou la lumière, des ondes électromagnétiques. Aussi appelé lointain infra rouge ...
- Elles appartiennent à une gamme de fréquences qui est longtemps restée peu accessible et peu utilisée (rayonnement orphelin), faute de sources et de détecteurs adéquats.
- Première émission THz découverte en 1911 mais peu de sources (corps noirs type lampe à mercure, quelques étoiles lointaines) et de détecteurs (bolomètre ou cellule de Golay, changement de résistance ou de volume lié à l'augmentation de température engendré par l'absorption du rayonnement) .



Elliott Brothers Bolomètre



Cellule de Golay utilisé en détecteur Thz

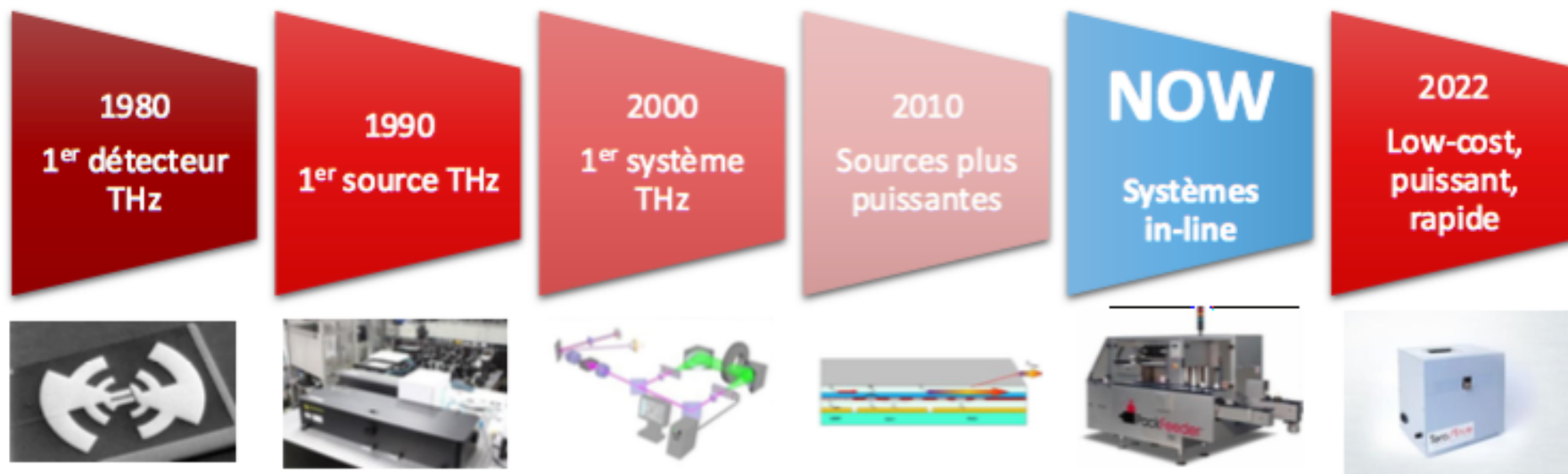


# Historique (2/2)

- Domaine en friche abordé par quelques chercheurs jusque dans les années 1990.
- Révolution lié aux lasers femtosecondes associés à un redressement optique (Cristaux type ZnTe, GaAs ) qui permet de transposer les fréquences optiques de l'impulsion laser au domaine THz.
- Vers les année 2000 on voit apparaître les lasers à cascade quantique (Pb : la faible énergie des photons THz, inférieure à l'énergie thermique à température ambiante, les oblige à fonctionner à des températures cryogéniques). Enfin les diodes Schottky simples facilement utilisables parfois accordables.
- 2010 source de plus en plus puissante.
- Aujourd'hui croissance du marché à 2 chiffres (60Million€ 15 à 20%)



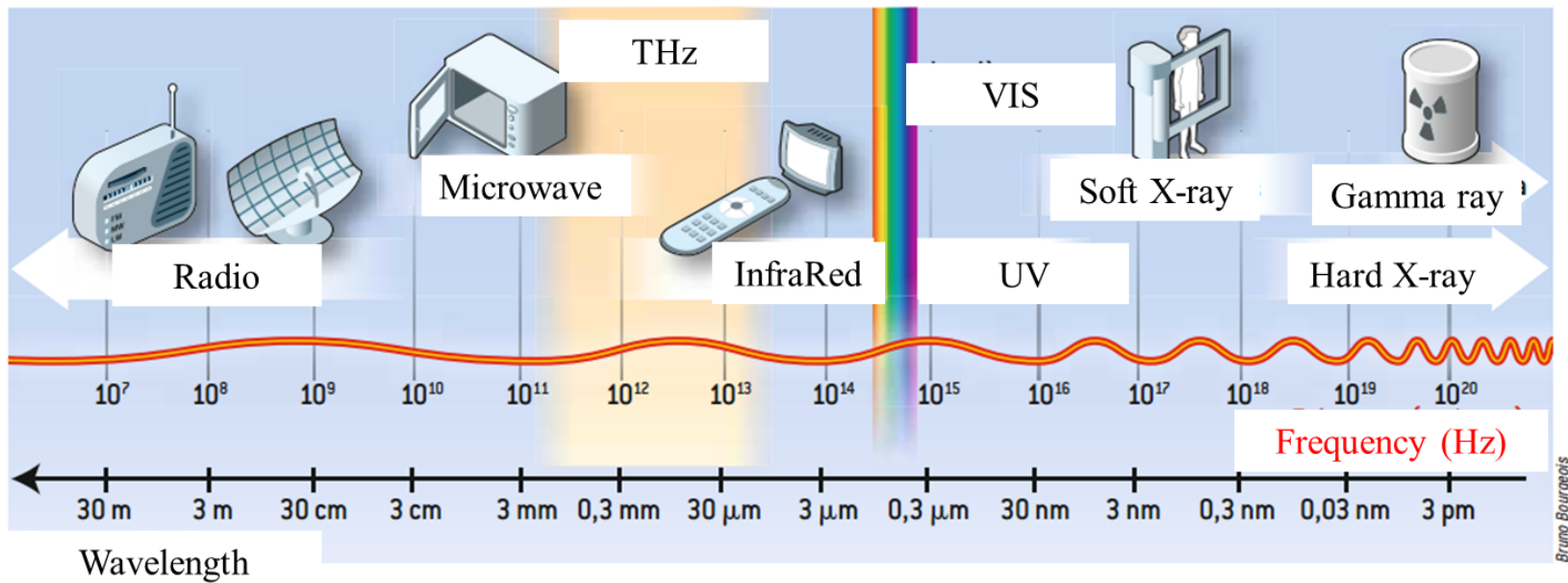
# Verrous technologiques



- Peu de sources et de détecteurs permettaient d'atteindre cette gamme de longueurs d'onde.
- Diminution des coûts de fabrication.
- Miniaturisation et mobilité

# Généralités

THz est défini pour 100 GHz à 30 THz longueur d'onde de 15  $\mu\text{m}$  à 3 mm



*Onde non ionisante*

*Propriétés élémentaires :*

- *Traverse des matériaux isolants (plâtre, bois, plastique..) souvent opaques dans le visible*
- *absorbée par l'eau*
- *réfléchi par les métaux*

*Large spectre avec signatures marquées*



Spectroscopie

Imagerie

Spectro-imageur

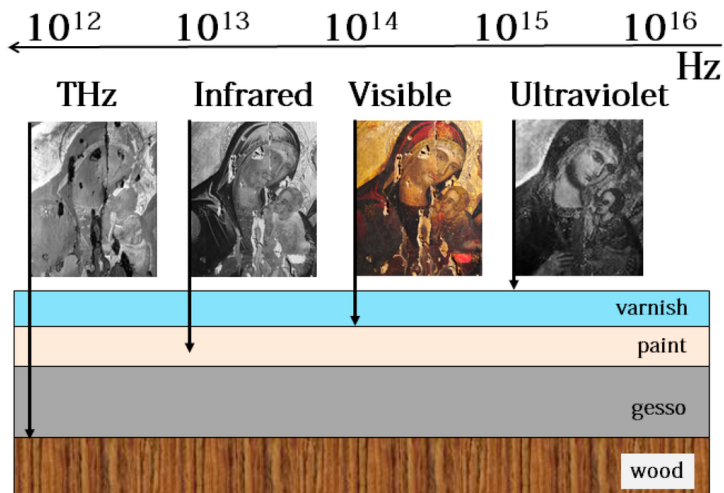
# Propriétés des ondes T..



© IEMN

Visuel qui illustre le composant principal, à savoir le composant qui permet de "passer" du monde des fibres optiques (en bas à gauche) au monde des térahertz (la spirale) pour les télécoms (petites formes en haut à droite).

- Non ionisant donc sans danger les rayons T préservent la matière et les organismes
- Interaction Thz-matière très riche en informations spectrales.
- Pénétration dans les matériaux non polaires (plastique, bois, textiles..)
- Les photons Téraherz possèdent de faibles énergies (1THz= 4meV, soit un million de fois plus faibles que les rayons X)
- Excellente pénétration et résolution intéressante (dépendante de la longueur d'onde)
- Très haut débit pour communicationTHz (entre 220 et 350 GHz)



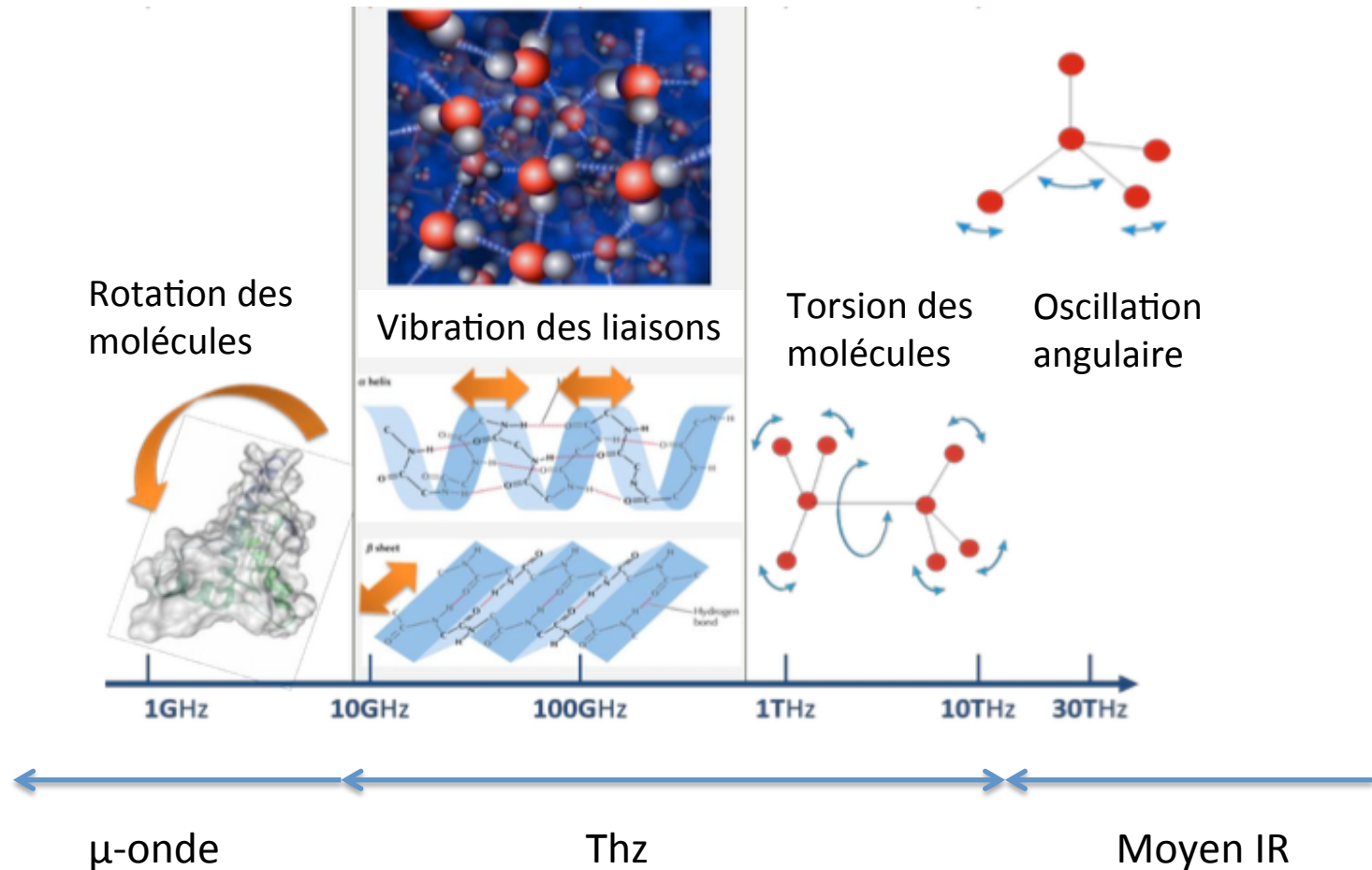
Antonino Cosentino, *Terahertz and Cultural Heritage Science: Examination of Art and Archaeology*, *technologies* **2016**, 4(1), 6; doi: [10.3390/technologies4010006](https://doi.org/10.3390/technologies4010006)

T. Nagatsuma, G. Ducournau and C.C. Renaud, *Advances in terahertz communications accelerated by photonics*, *Nature Photonics* – 10, 371-379 (2016) DOI: [10.1038/NPHOTON.2016.65](https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2016.65)

# Intéraction faisceau matière



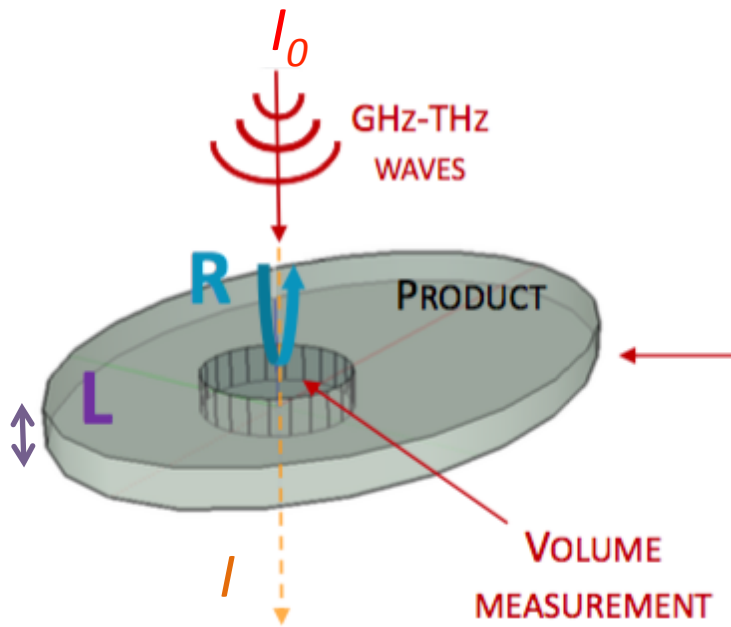
# Interactions rayonnement matière (1/2)



Domaine de fréquence de résonance des molécules  
***Nombreuses signatures dans le domaine Thz***

# Interactions rayonnement matière (2/2)

Atténuation du faisceau : Loi de Beer-Lambert



$$I(\lambda, L) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\alpha \cdot L} \quad \alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

Avec :

$I_0$  est l'intensité du rayonnement incident.

$I$  est l'intensité du rayonnement sortant.

$\alpha$  est le coefficient d'absorption (en  $\text{mm}^{-1}$ ). Il dépend à la fois de la longueur d'onde et de *la partie imaginaire de l'indice de réfraction de réfraction  $n$  encore appelé « constante optique »*.

En réalité  $n$  dépend **de la température, la pression, la densité, la nature du matériau...**

$L$  est la longueur du trajet optique (en mm).

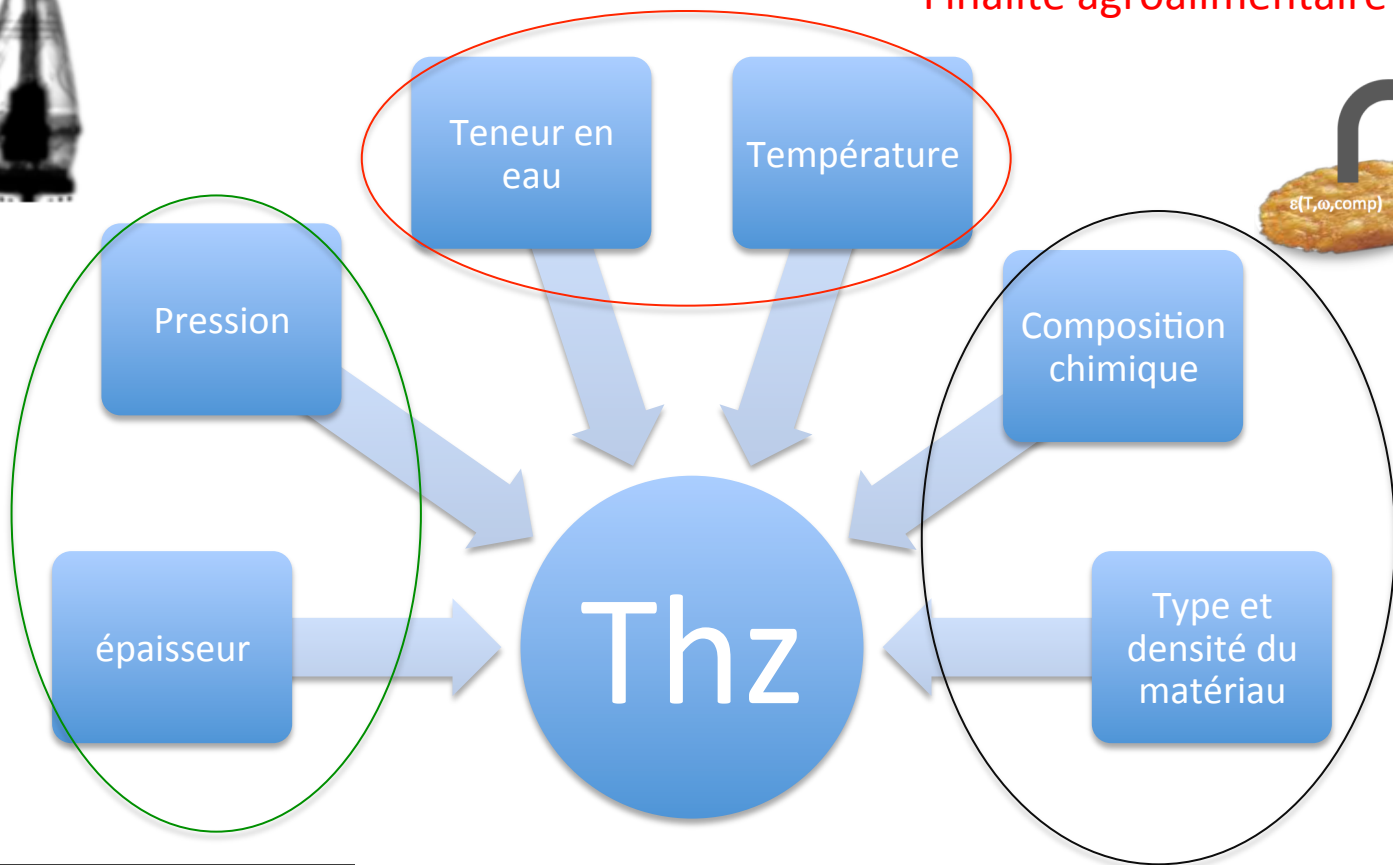
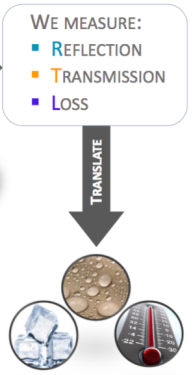
# Atténuation du faisceau (3/3)

- Les molécules polaires, peuvent présenter des spectres d'absorption plus ou moins complexes dans la gamme 100Ghz-3Thz.
  - la molécule d'eau, montre des raies d'absorption intenses au environ de 500 GHz. Donc opacité de l'air au voisinage de ces raies, à cause de la vapeur d'eau.
  - De même, les ondes THz ne se propagent pas dans l'eau liquide et dans les milieux aqueux ou humides comme le corps humain. (profondeur de pénétration dans l'eau ou dans un tissu biologique environ 100  $\mu\text{m}$ ).
  - les grosses molécules organiques : aliments, explosifs, médicaments ont une signature spectrale caractéristique dans le domaine THz alors qu'ils sont transparents dans l'IR.





# Finalité agroalimentaire



# Finalité CND

# Finalité sécurité / défense, biomédical

*Défauts internes détectés dans un composite par impulsions Terahertz*

Photo      Temps de vol

Images C-Scan pour 2 délais fixés

Perte en densité du matériau, correspondant à 1 couche

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

© CNRS / LCP

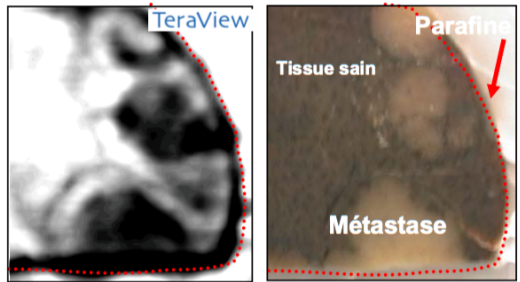
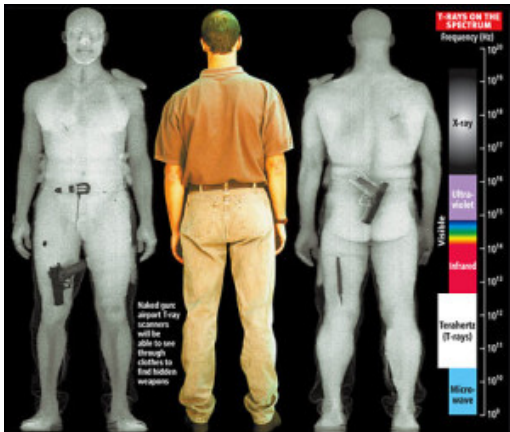


Image 0.2 - 0.5 THz

# Sources, détecteurs & système clé en main



# Les sources...



corps noir	toute la gamme	pW à 1 THz $\mu$ W à 10 THz	simplicité, large bande	puissance, incohérent
diode Gunn	0,1 → 1	100 mW à 0,1 THz 1 mW à 1 THz	compacte	fréquence limitée
diode IMPATT	→ 0,3	10 mW	compact	fréquence limitée
diode TUNETT	→ 0,4	10 $\mu$ W	compact	fréquence limitée
Smith-Purcell	toute la gamme	100 nW	accordable	gros appareil
Free Electron Laser	toute la gamme	très puissants → 100 W CW	puissance, spectre	grand instrument
BWO	→ 0,2	10 $\mu$ W	compact, accordable	bruyant, fréquence limitée
lasers moléculaires	lignes spectrales	ex: CH <sub>3</sub> OH 100 mW@2,52 THz	pureté spectrale	stabilité, volumineux
lasers QCL	1 ←		compact, rendement	cryogénie

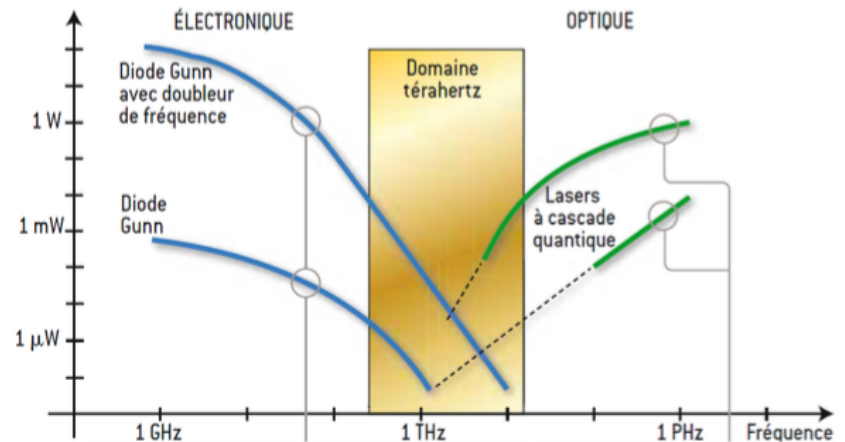
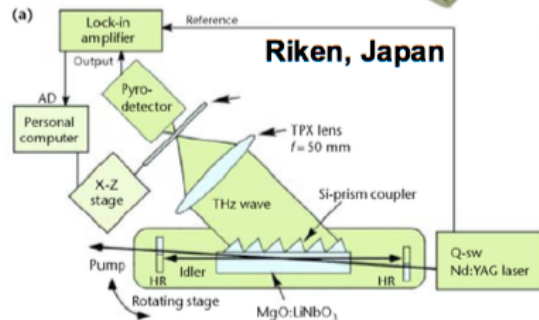
Coherent



Alpes Laser



MicroTech

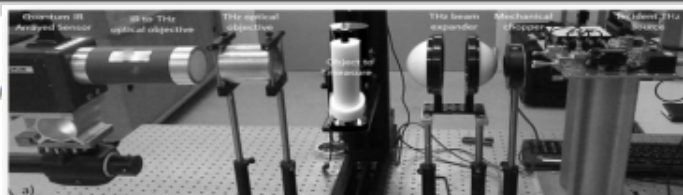


# Détecteurs THz





	THz Detector Type	THz Detection Technique	Technology
Photonic Detectors	Direct Detection	Thermal effect	Golay cells
			Microbolometer Arrays
			Pyroelectric Detectors
			Hot Electron Bolometers (HEB)
			Transition-Edge Sensors (TES) based on superconductors
	Quantum detectors	Extrinsic photoconductors (Ge:Ga, Si:As, Ga:As)	
		Other photoconductors (QWIP, ...)	
Electro-Optics Heterodyne	Photomixing	Photoconductive Antennas (Photomixers)	
	Detectors with probe pulse	PCA (or Photodiodes) with fs lasers	
		Electro-Optic sampling with fs lasers	
Electronic Detectors	Direct Detection	Rectifying diodes	Schottky diodes
		Transistors	Compound or Si-CMOS
	Mixing	Heterodyning Mixing with local oscillators	SIS Devices
			Superconducting Hot Electron Bolometers
			Schottky Diodes @ <1THz

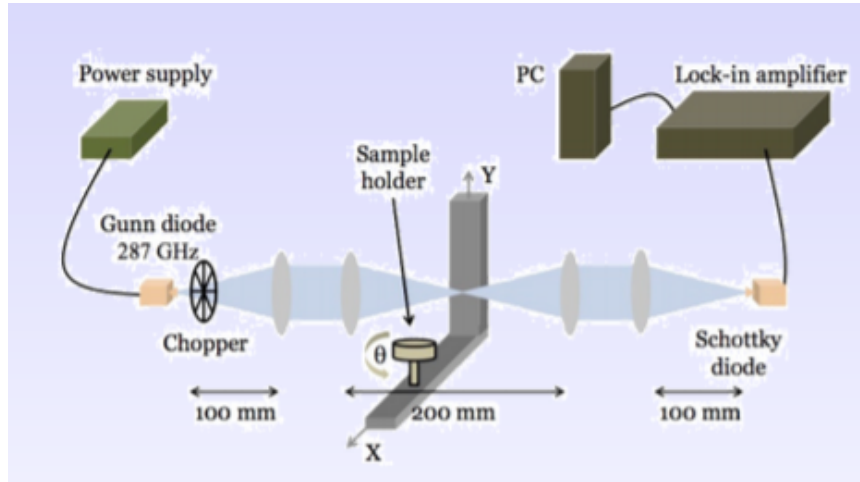
Mono point  
Caméra



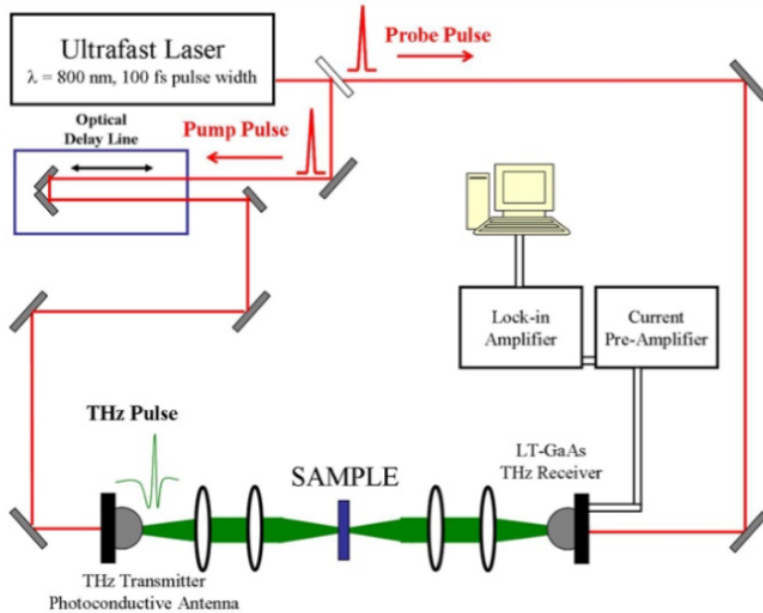
# Deux types de signaux

Time Domain System (TDS)	Continuous Waves (CW)
Pulses Femtosecond	diodes gunn, laser à cascade quantique (principalement haute fréquences >é, 5Thz)..
Larges bandes de fréquence	Mono fréquence ou modulé
 A graph showing a single, smooth, bell-shaped pulse signal centered on a horizontal baseline.	 A graph showing a continuous, periodic wave signal with multiple cycles, oscillating above and below a horizontal baseline.
Mesures d'épaisseur, localisation de défauts, analyse d'ouvrage d'art, inspection en ligne..	télécommunication, imagerie, agroalimentaire, CND

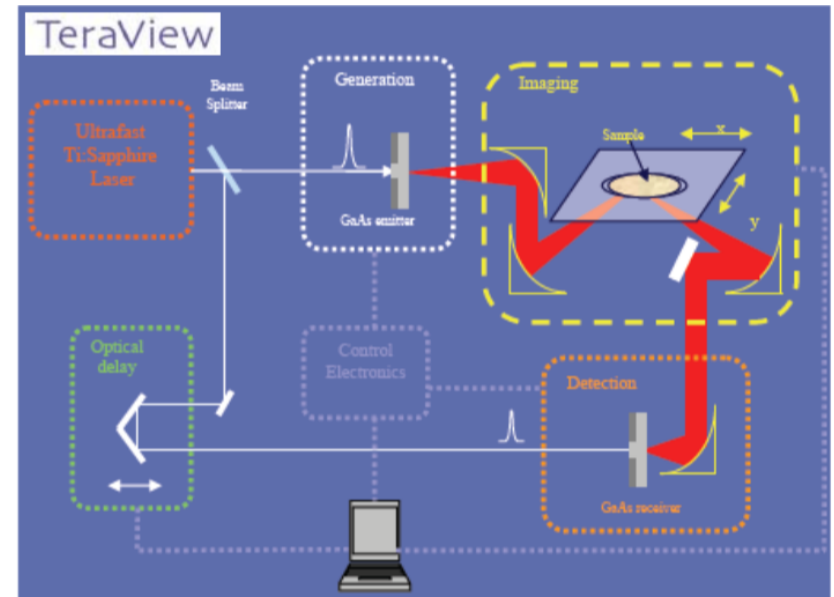
Solutions nombreuses parfois intégrées  
 Très souvent basées sur mesure point par point



PICOMETRIX  
 an API company



Transmission



Réflexion

# Un pulse pour diverses applications

< 500 femtosec THz pulse



Time domain

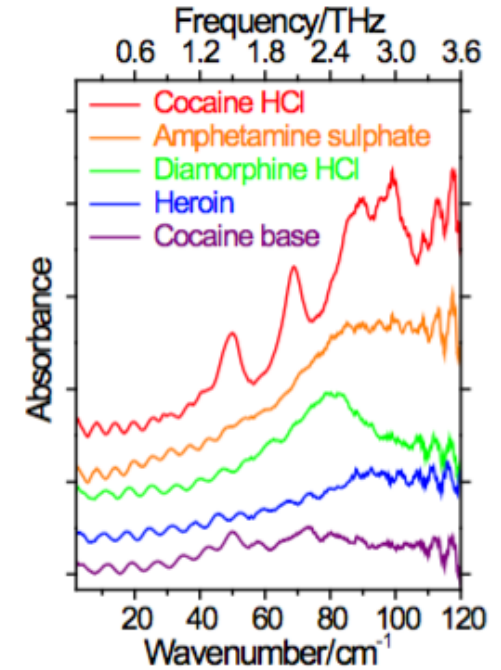
Fourier Transform

Reflect off buried layers  
Build up an image

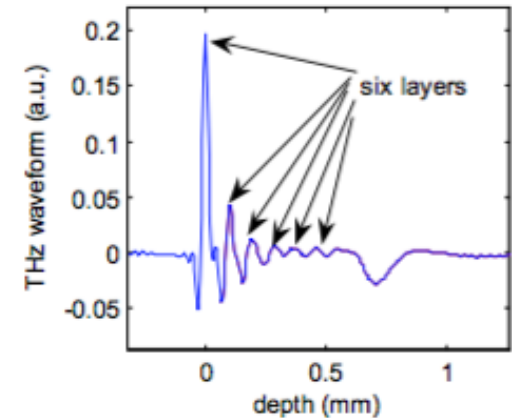
**Electro-Optical Terahertz Pulse Reflectometry**

Détection de défaut sur cartes électroniques

## Spectroscopie

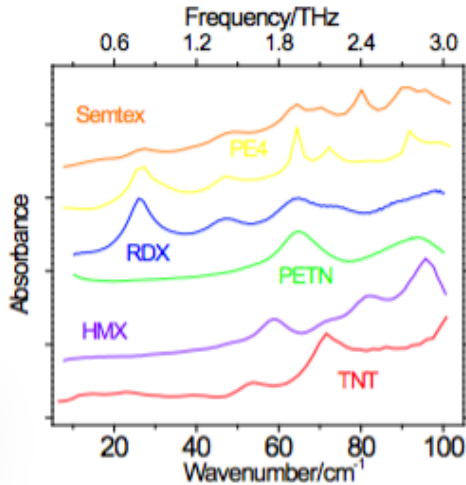


## imagerie

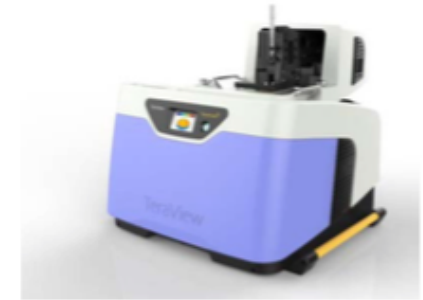
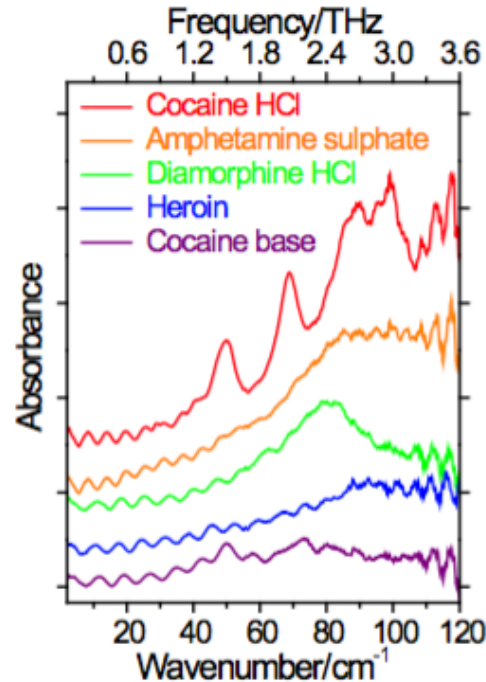


# Spectroscopic Analysis

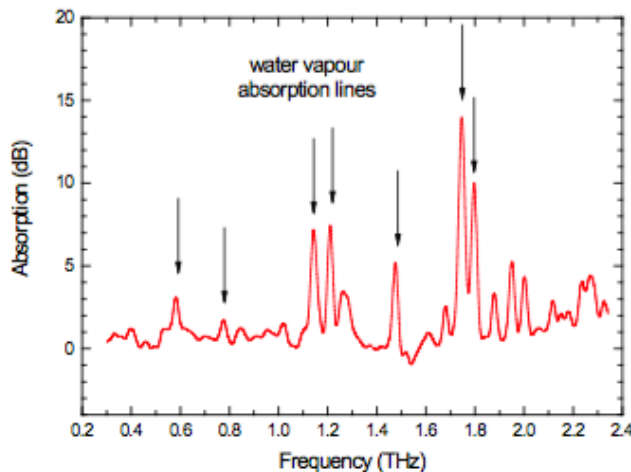
## Explosives detection & analysis



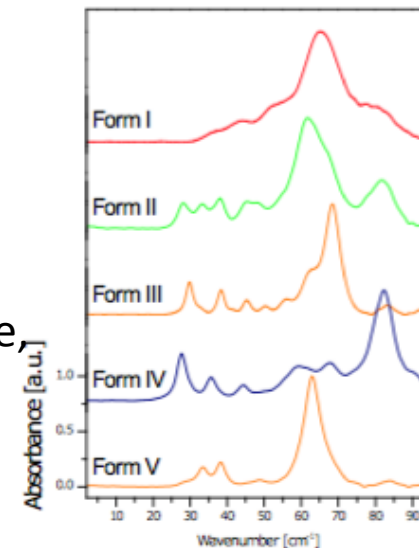
## Illicit drugs



## Airborne agents



## Pharmaceutical drugs: crystalline and amorphous

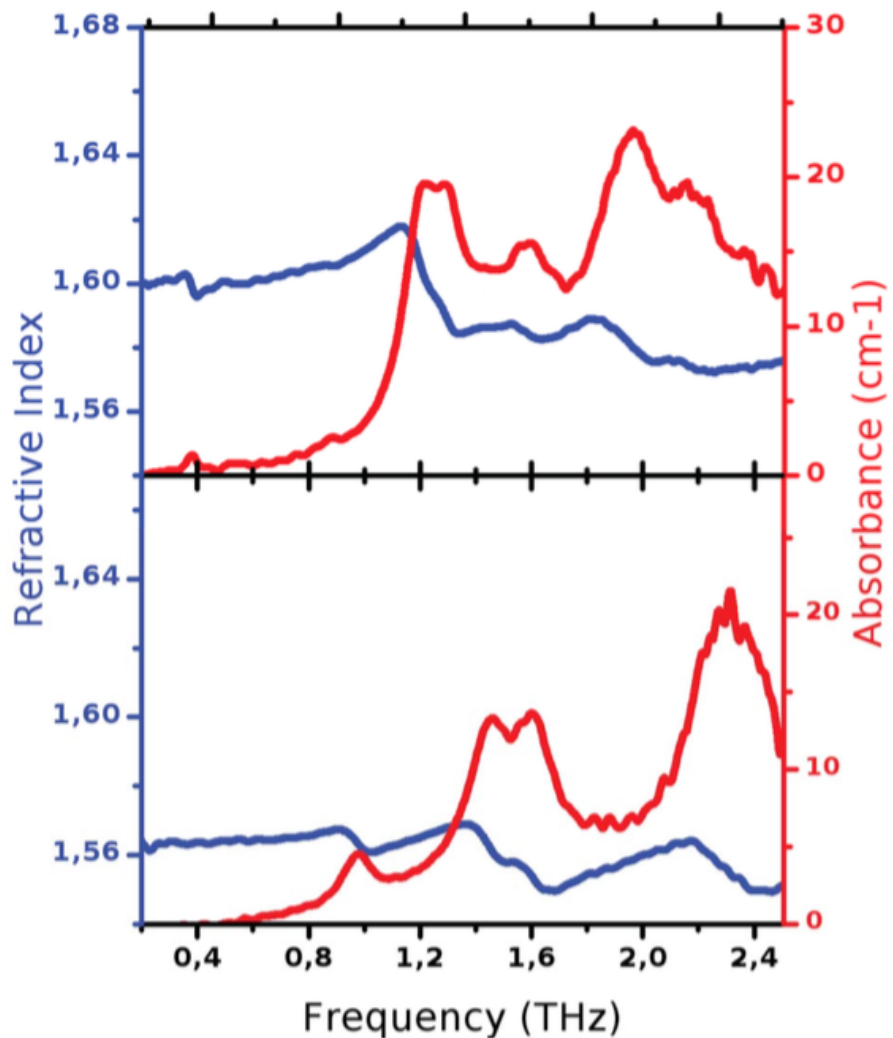
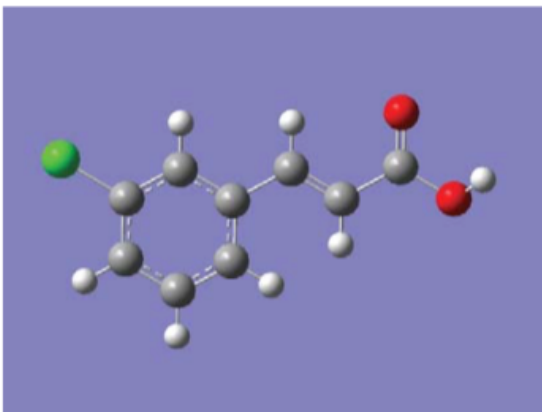
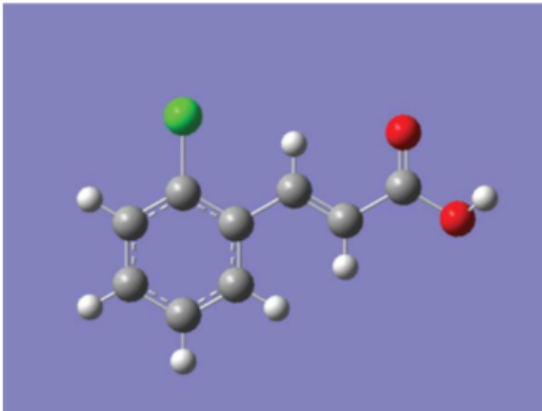


Dans le domaine de la sécurité et de la défense, on cherche à détecter à distance des gaz ou des agents chimiques et biologiques.



**Discrimination d'isomères sur les étapes de fabrications intermédiaires**

**Acide bromo-cinnamique**



**Des modifications mineures amènent des modifications majeures sur le spectre THz**

# Delamination in Glass Fiber Composites

- Quantitative measurement of size, location, and depth of delamination
- 3D imaging of delaminations
- THz-Ultrasound comparative study

J. Dong , B. Kim, A. Locquet, P. McKeon, N. Declercq, D.S. Citrin, Composites Part B **79**, 667 (2015)

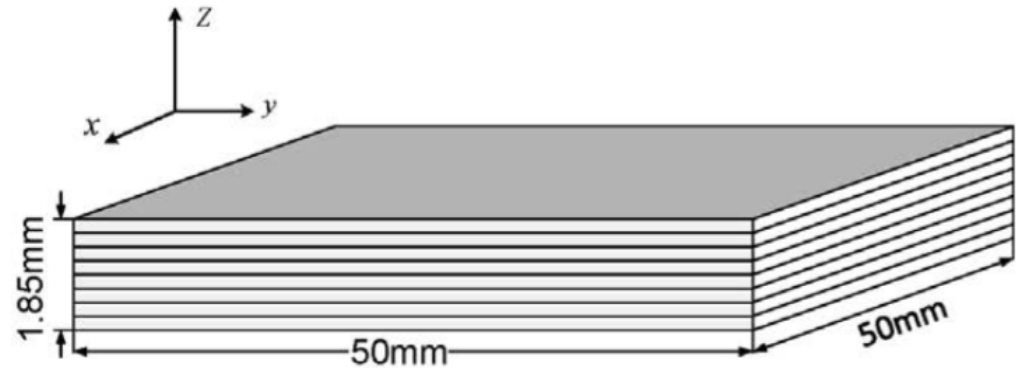
J. Dong, A. Locquet, D. S. Citrin, J Infrared Milli Terahz Waves **37**, 289 (2016)

Plan-view: optical micrograph eight-harness-stain fabric **glass fiber polyetherimide matrix laminate**

70 coupons, delamination not superficially evident

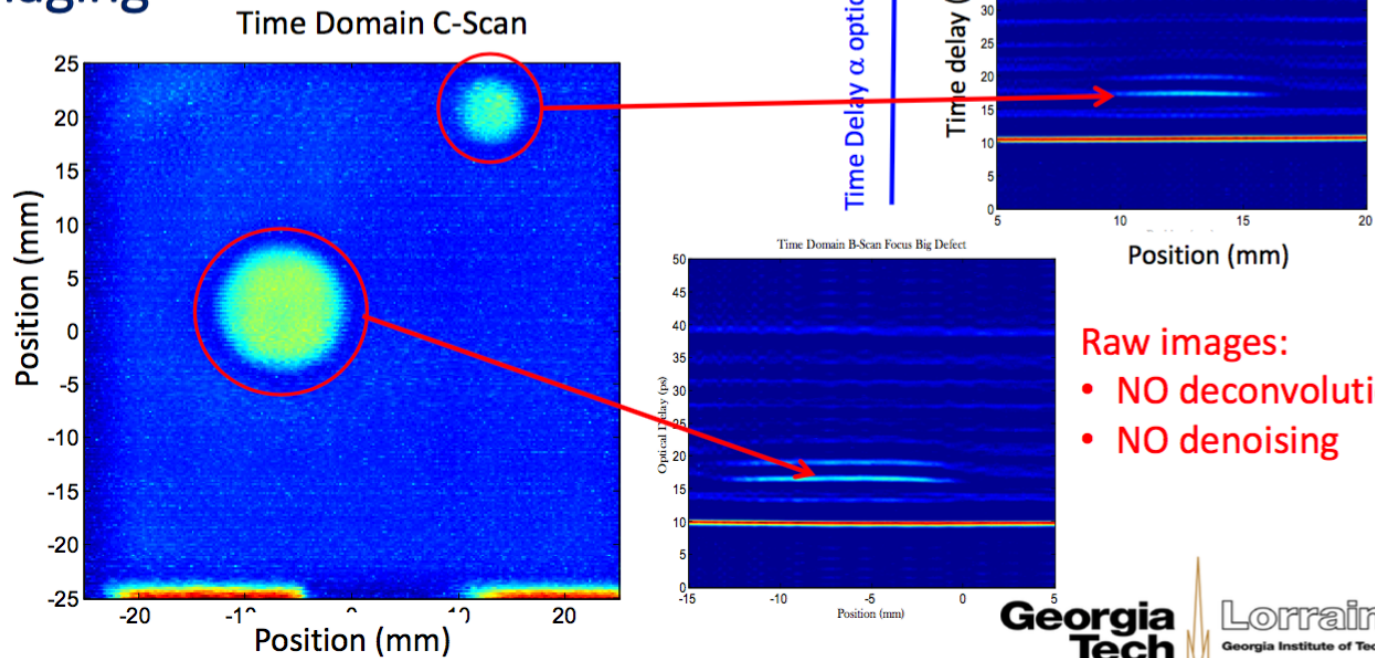


Schematic showing sample dimensions

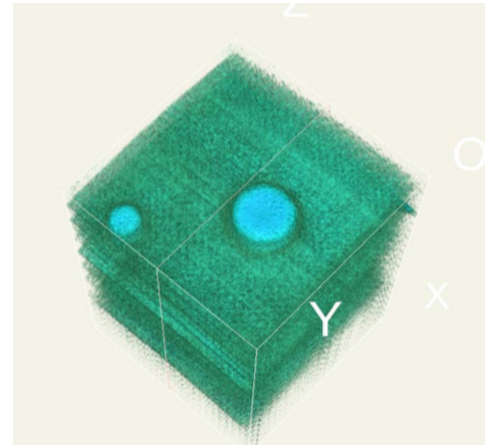
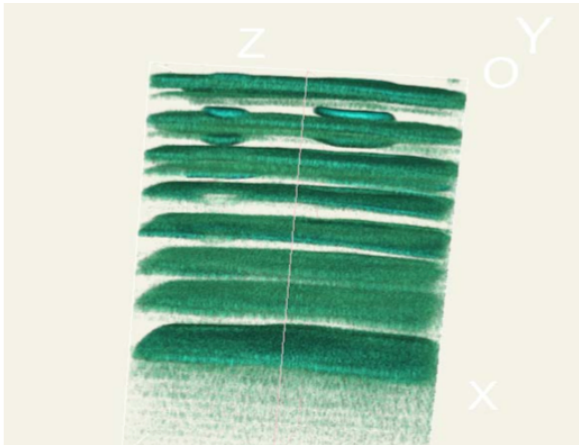


J Dong, B Kim, A Locquet, P McKeon, N Declercq, DS Citrin, "Nondestructive evaluation of forced delamination in glass fiber-reinforced composites by terahertz and ultrasonic waves," *Composites Part B* **17**, 667 (2015).

# Glass/PEI Sample : Time Domain Imaging



Glass fiber composite laminates in polyurethane resin. C-scan: contrast: peak amplitude in specified time window



# Electro-Optical Terahertz Pulse Reflectometry: Customer Case Study

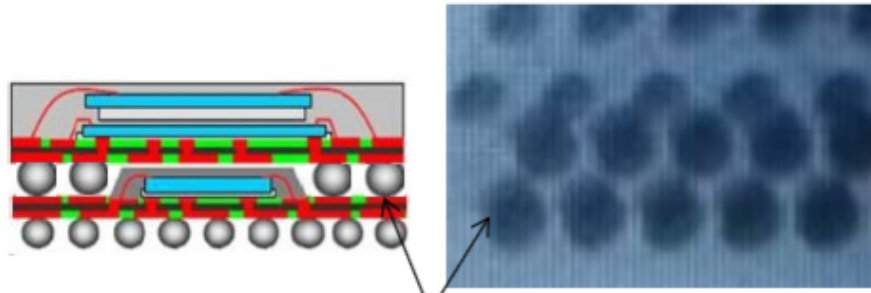
## •Industry issue

- Head In Pillow (HIP) defect detection has become a major issue for customer. HIP occurs when two solder balls do not connect properly,
- Existing X Ray in-line inspection systems take too long & miss many defects.
- Customer currently uses 250 2D X-Ray in-line units to inspect solder ball quality

Visible image of solder balls

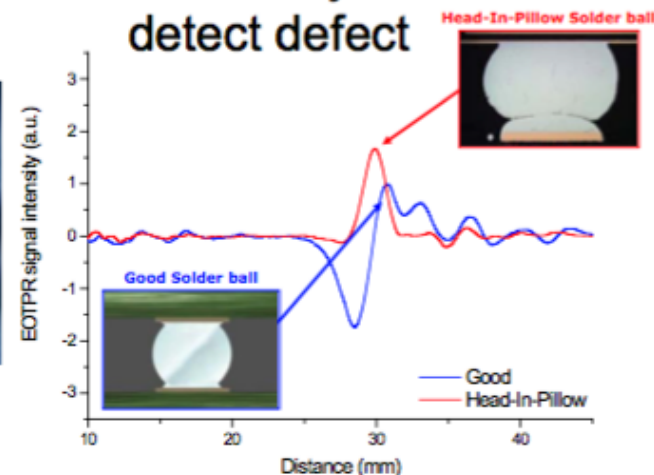


X-Ray: difficult to detect HIP defect



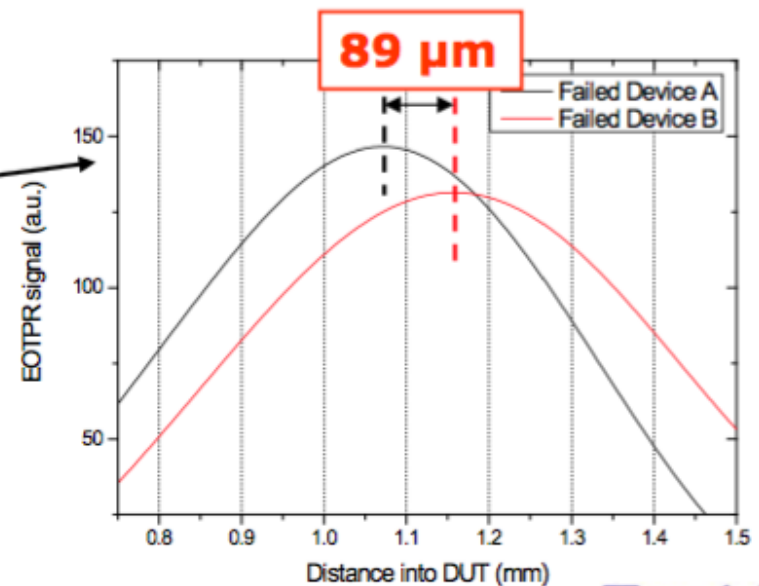
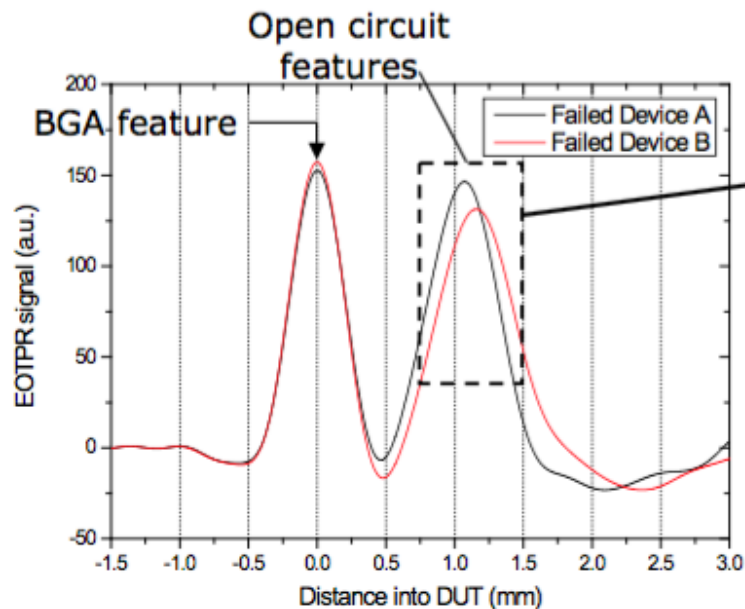
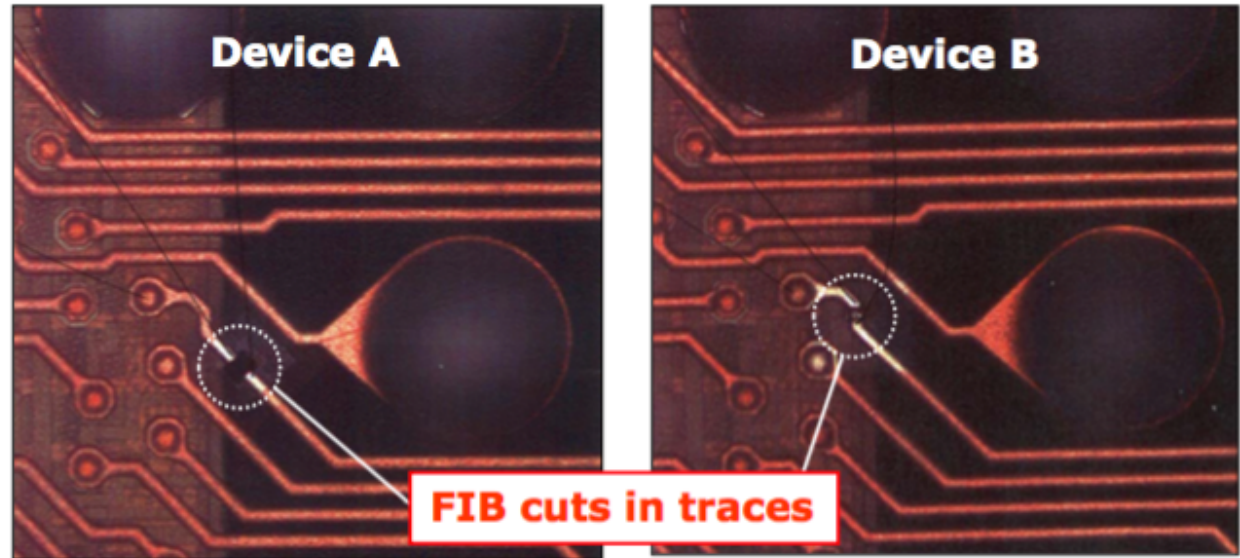
Defect location

THz: easy to detect defect



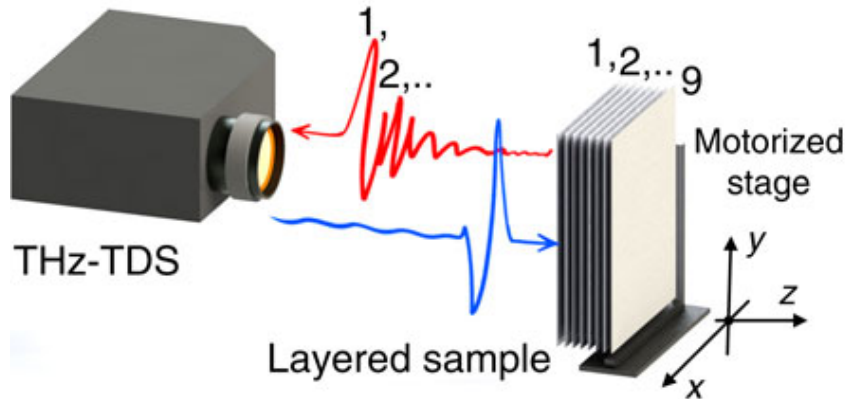
# Customer Case Study: Open in Package Substrate

- Device A and B both have a focussed ion beam (FIB) cut in an identical trace
- The position of the cut is separated by  $89\ \mu\text{m}$  in the devices (measured from BGA to start of the FIB cut)
- **EOTPR can clearly identify the difference in location of the open circuit in the two devices**

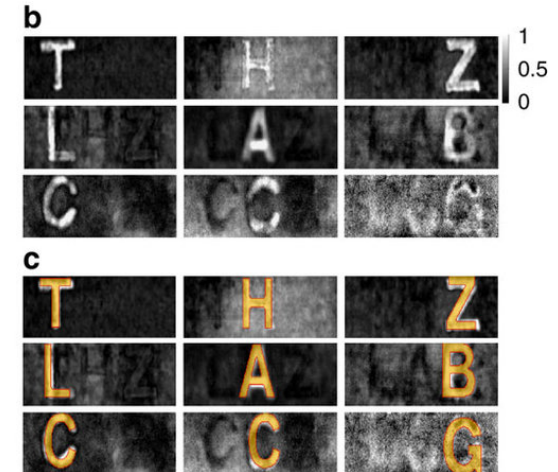
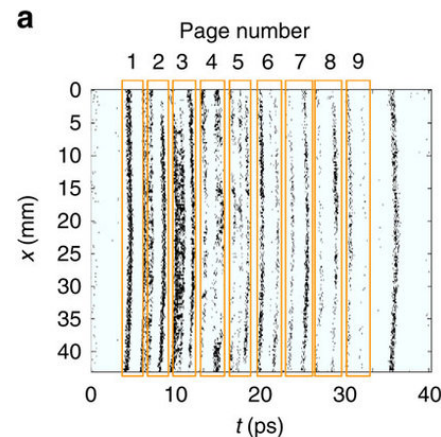
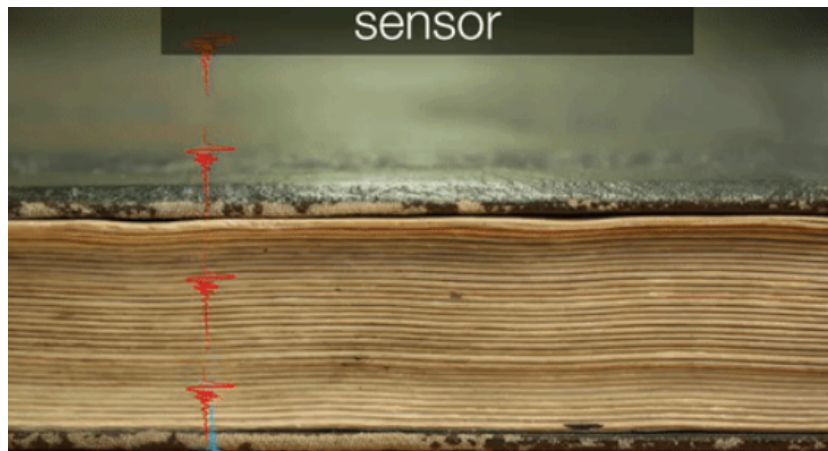
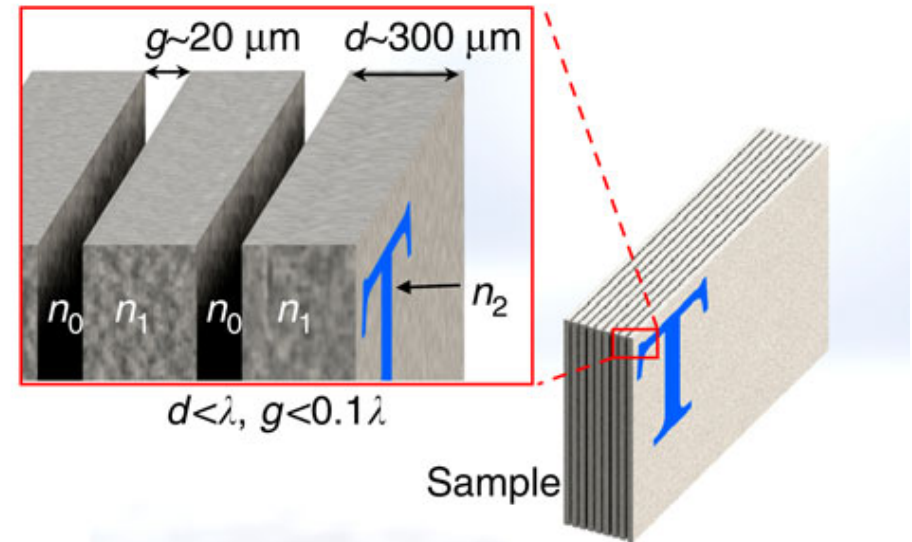


# Analyse œuvre d'art, agroalimentaire

a



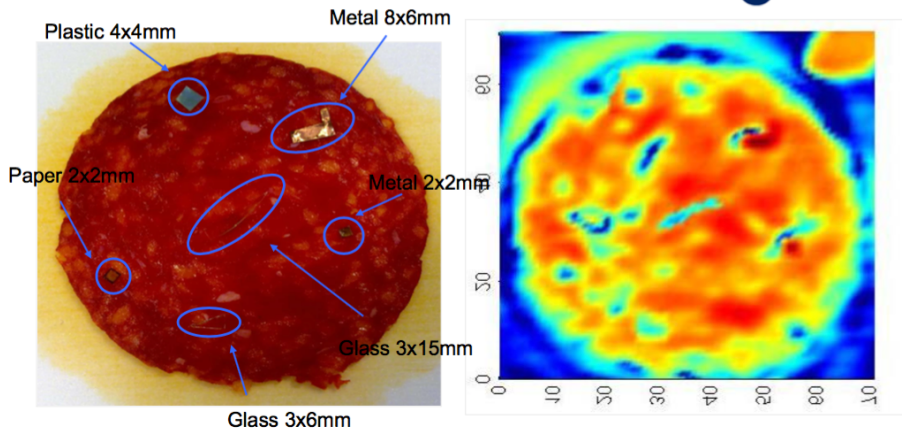
b



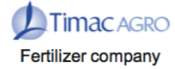
[Clément Solym](#) *Les rayonnements térahertz numérisent un livre sans même l'ouvrir*

2016, [Lecture numérique - Usages - livre ancien couverture - scientifiques scanner ouvrage - OCR manuscrits numérisation](#)

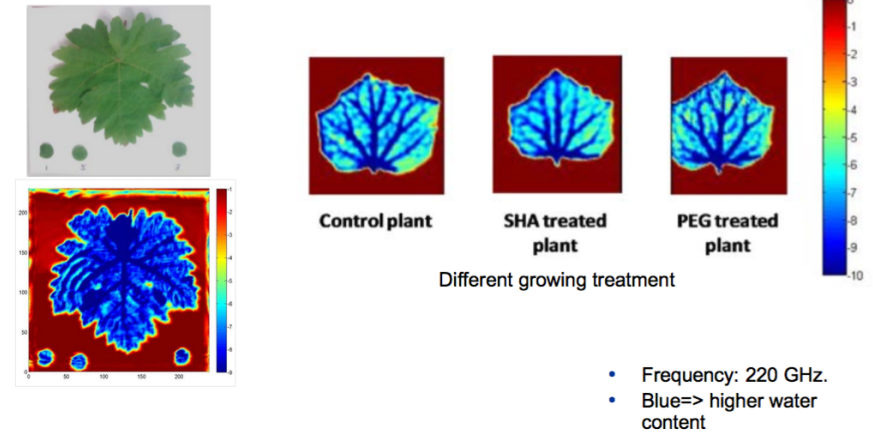
## Chorizo slice with metal, glass, paper and plastic



## Water content in leaves



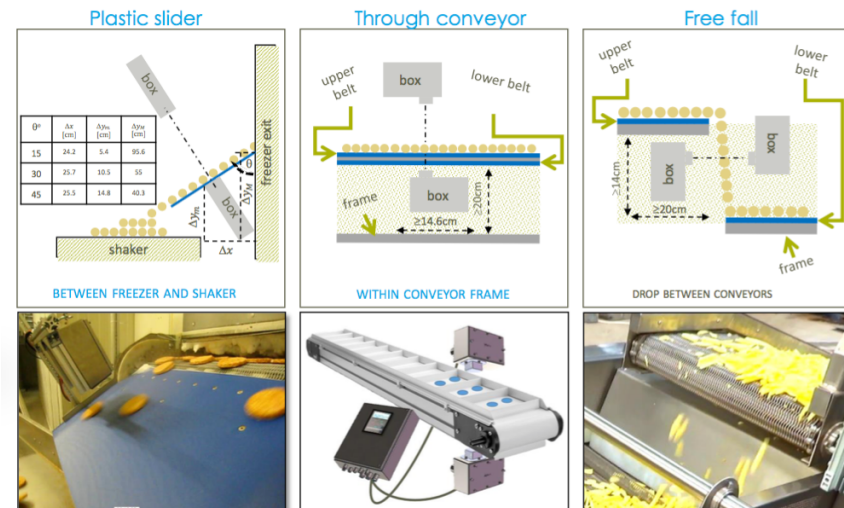
Active system: transmission results



- Frequency: 220 GHz.
- Blue=> higher water content



## THE FREE SPACE SENSOR – MOST COMMON CONFIGURATIONS





# Multispectral « THz » imaging for heat and mass transfer studies in multiphysics problems



# Context of the study (1/3)

Drying process is one of the most ancient techniques used to hang alimentary products. The dehydration of a porous media leads to water movement.

To perform the monitoring of fluid phase in non-transparent media many techniques use harmful radiation to humans (X or gamma radiation in particular)

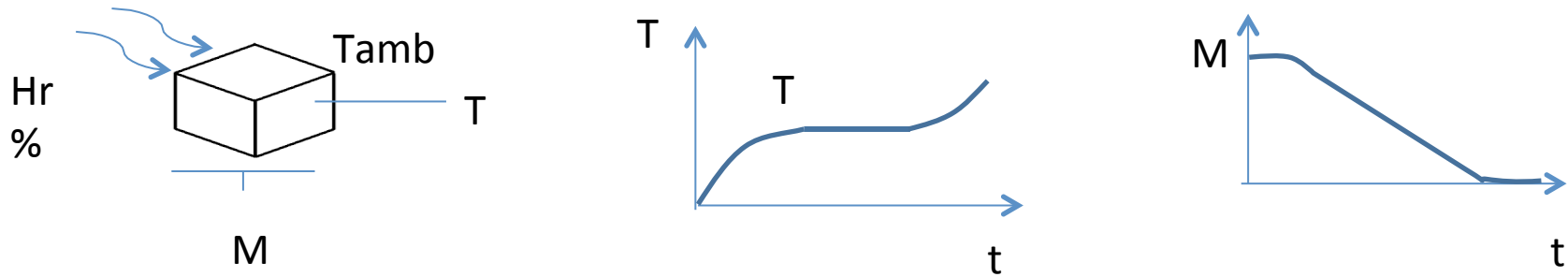
However, the monitoring of product quality is crucial, especially for important porous products such as paper, wood or alimentary products



# Context of the study (2/3)

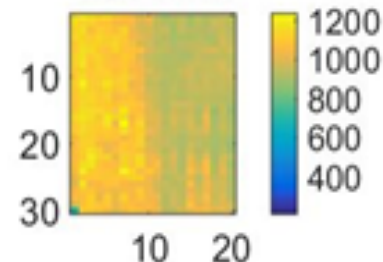
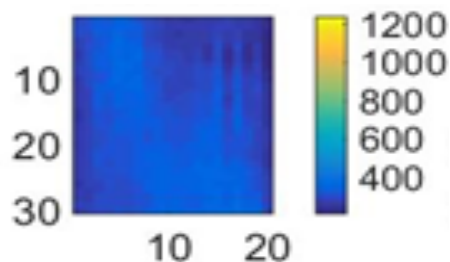
**Drying** : remove water, final product is a solid or a gaz.

## Global approach



**Goal of the study** : Revisit drying phenomena at a local scale using Terahertz tomography

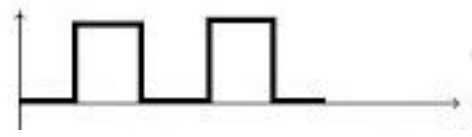
**Many study in Thz show a link between water content and attenuation of the wave : « it's blue, we have water in the sample » but how to make a quantitative measurement ?**



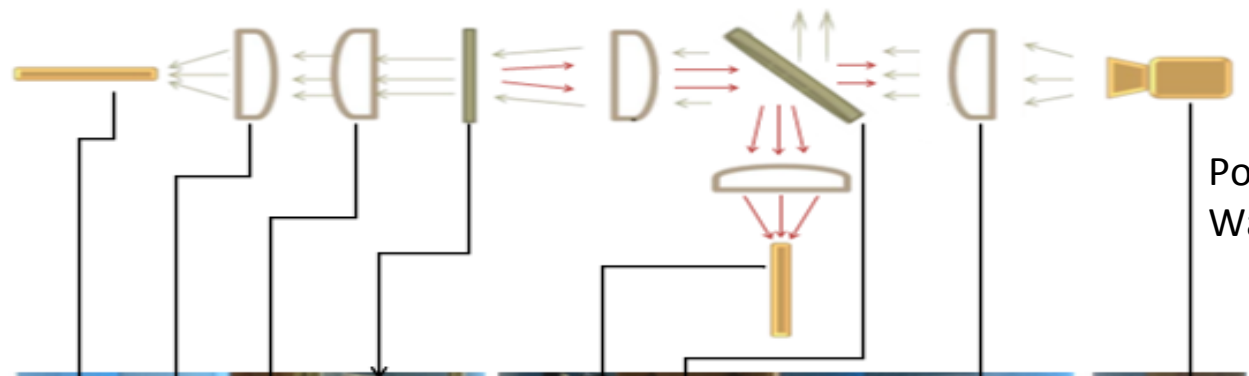
# Material and Methods (1/2)



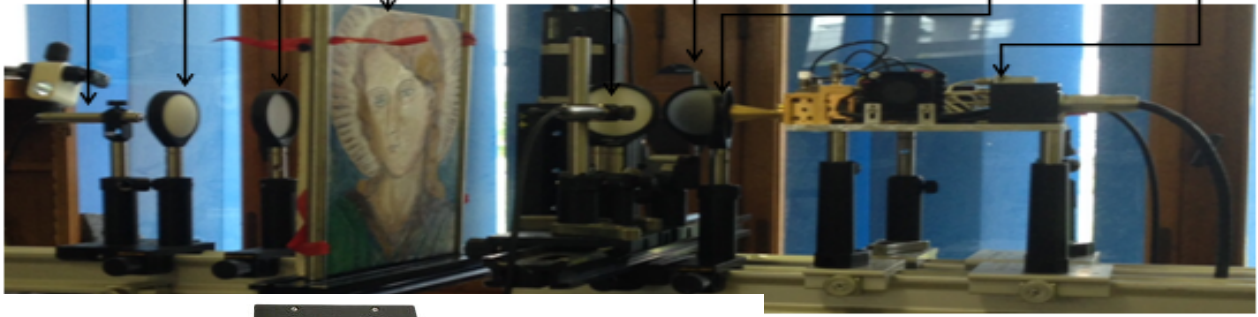
Lock-in



THz sensor      sample      dichroic mirror      lense      Thz source



Power = 100mW  
Wave lenght 220 Ghz



X,Y,  $\theta$  stages

# Material and Methods (2/2)

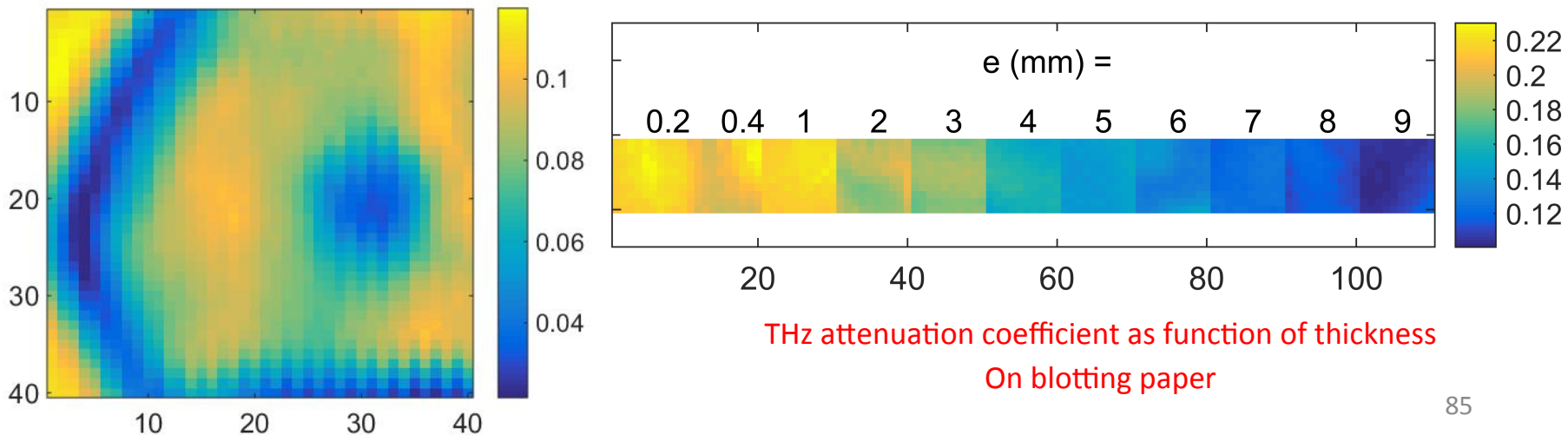
THz attenuation coefficient is based on Beer-lambert law

$$\frac{A(x, y, \lambda)}{l_s} = \mu_s(x, y, \lambda)$$

Dry Material only the thickness explain attenuation

$A(x, y, \lambda)$  is the absorbance,  
 $\mu_s(x, y, \lambda)$  and  $\mu_w(x, y, \lambda)$  are the absorption coefficient of solid and water,  $\rho_s(x, y, \lambda)$  and  $\rho_w(x, y, \lambda)$  are the density of solid and water,  
 $W(x, y, \lambda)$  is the local water content

Mass density variation at constant thickness and water content on apple slice

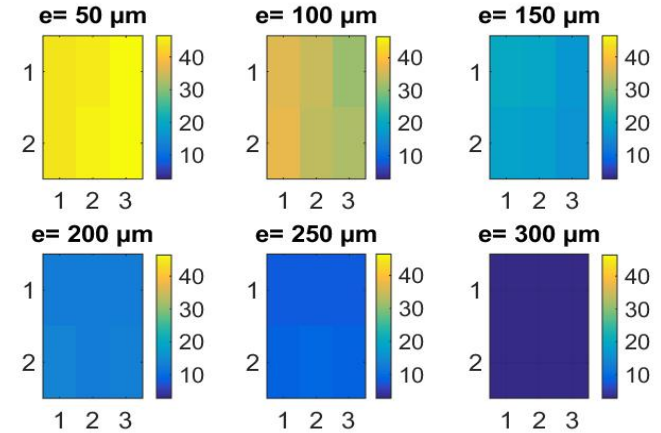
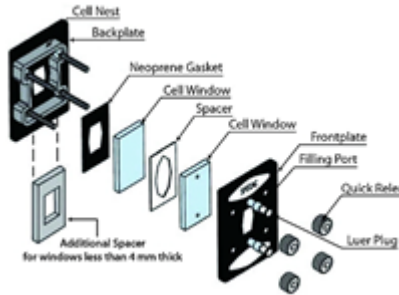
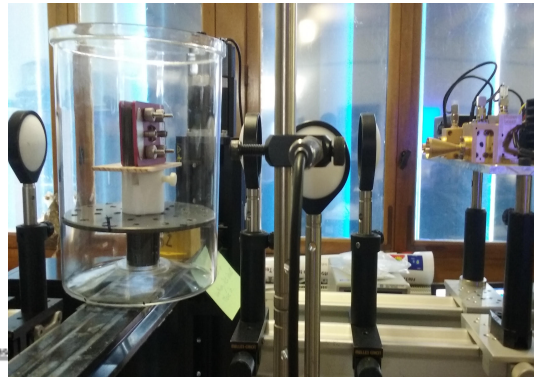


THz attenuation coefficient as function of thickness  
On blotting paper

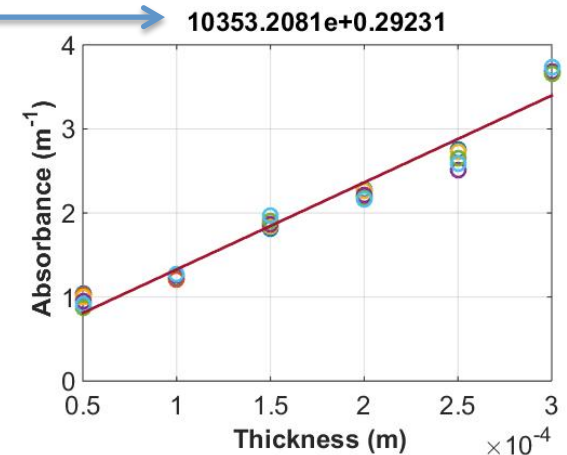
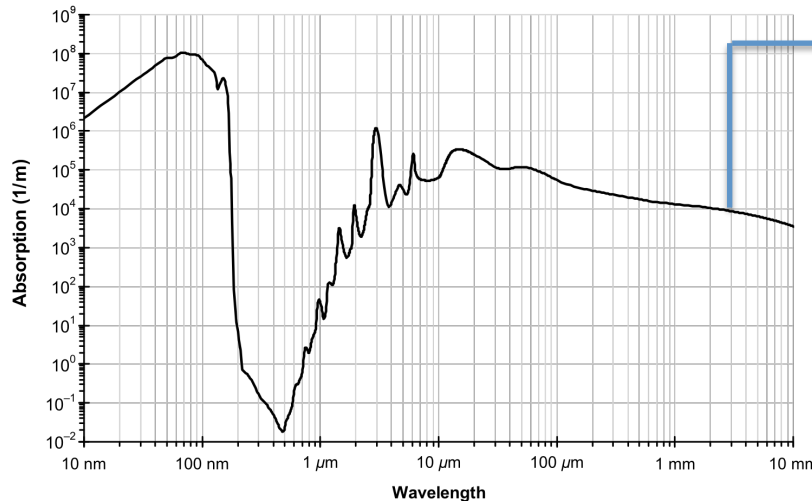
# Quantitative Water content measurement with contactless THz technique on homogeneous media (1/3)

Validation of sensitivity with pure water

different spacers



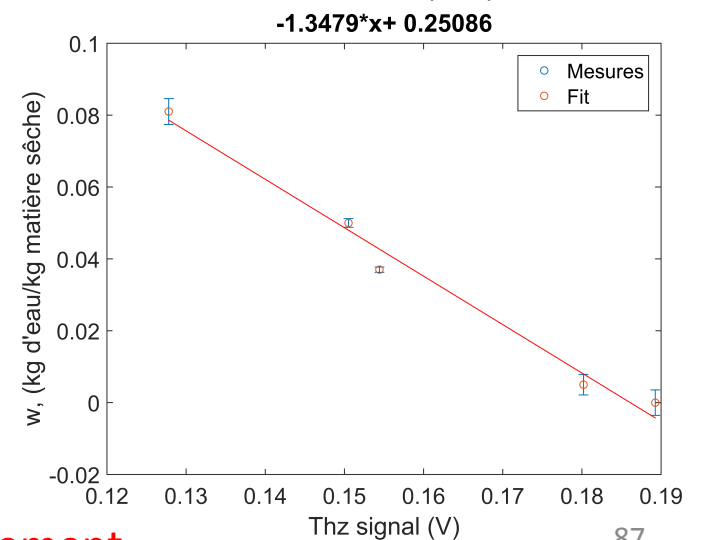
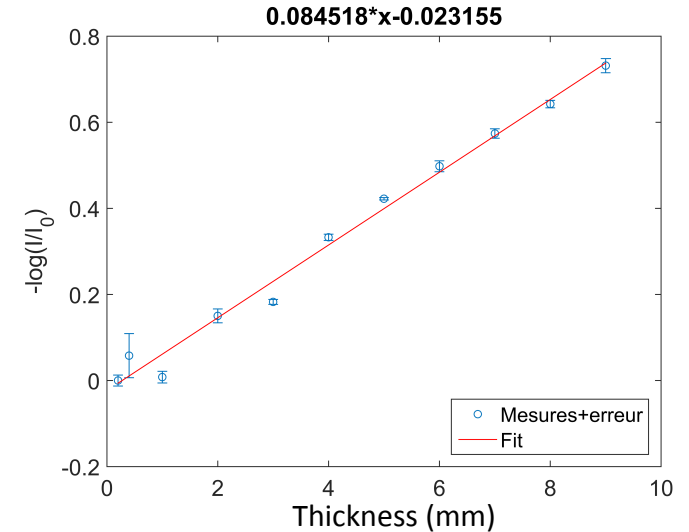
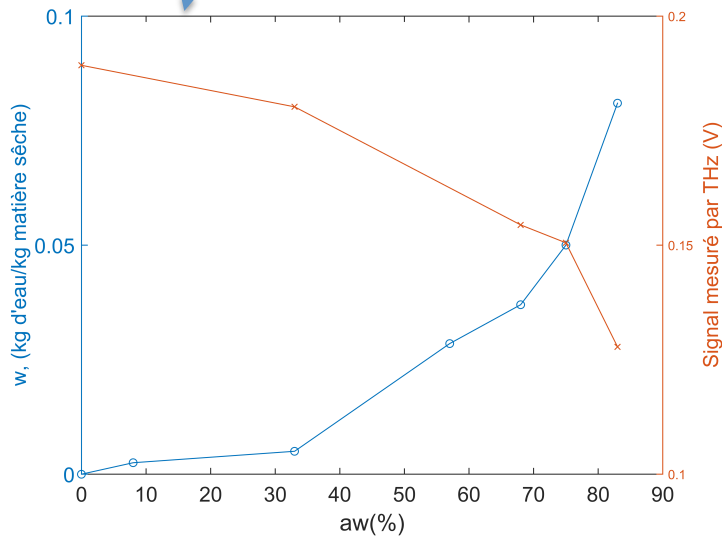
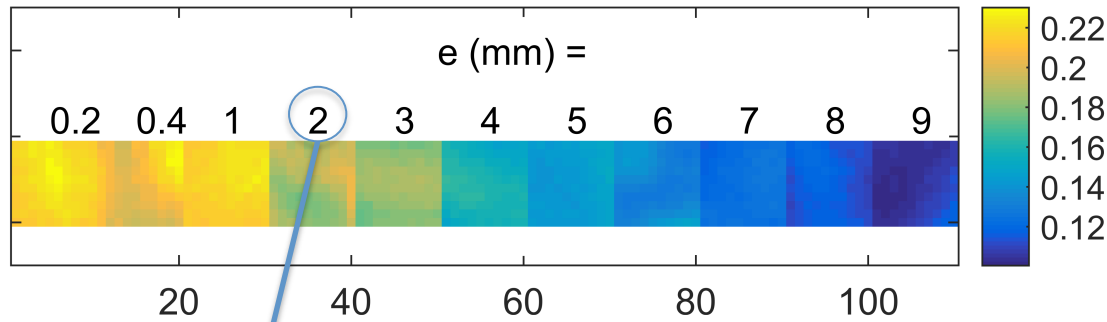
Up to 400  $\mu\text{m}$   
of water



# Quantitative Water content measurement with contactless THz technique on homogeneous media (2/3)

## Calibration of water content validity on blotting paper

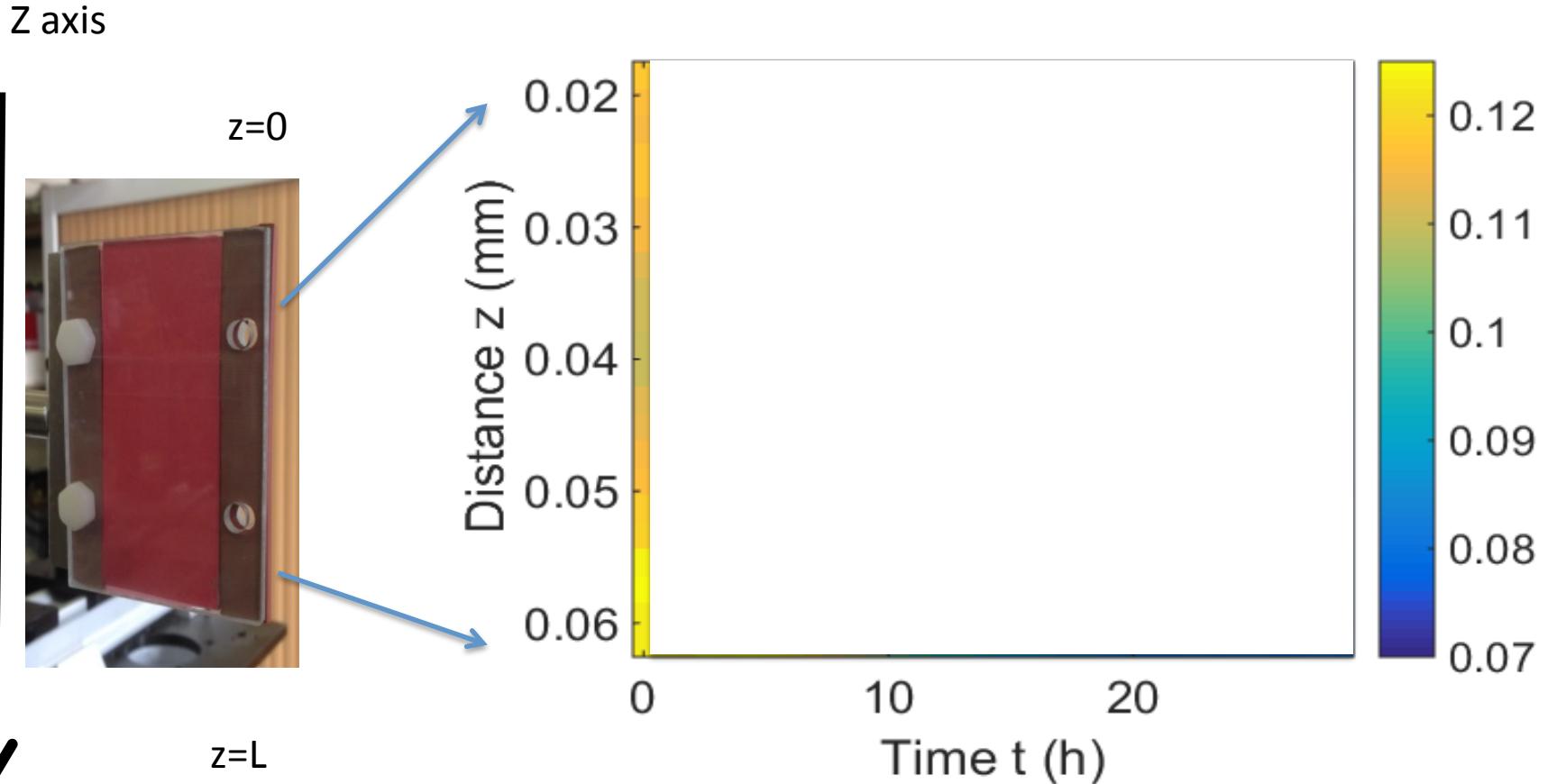
THz attenuation coefficient as function of thickness on blotting paper



**CONTACTLESS volumic water content measurement**

# Quantitative Water content measurement with contactless THz technique on homogeneous media (3/3)

Application on dynamic mass transfer diffusion problem



Suitable for measurement in a box/package



# 1D model estimation of Mass transfer coefficient (1/2)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial X}{\partial t} - D \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} = 0 \\ X(t=0, z) = X_0 \\ X(t, z=0) = X(t, z=L) = X_1 \\ X = \frac{w(z, t)}{w(z, 0)} \end{array} \right.$$

With :

w water content (kg of water / kg dry matter),

X, addimensioned water content,

D, mass transfer coefficient ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),

t, time ins,

z, distance in m,

$X_0$ , initial water content

$X_1$ , water content of ambient air.

This system can be solved with Fourier transformation respect to z

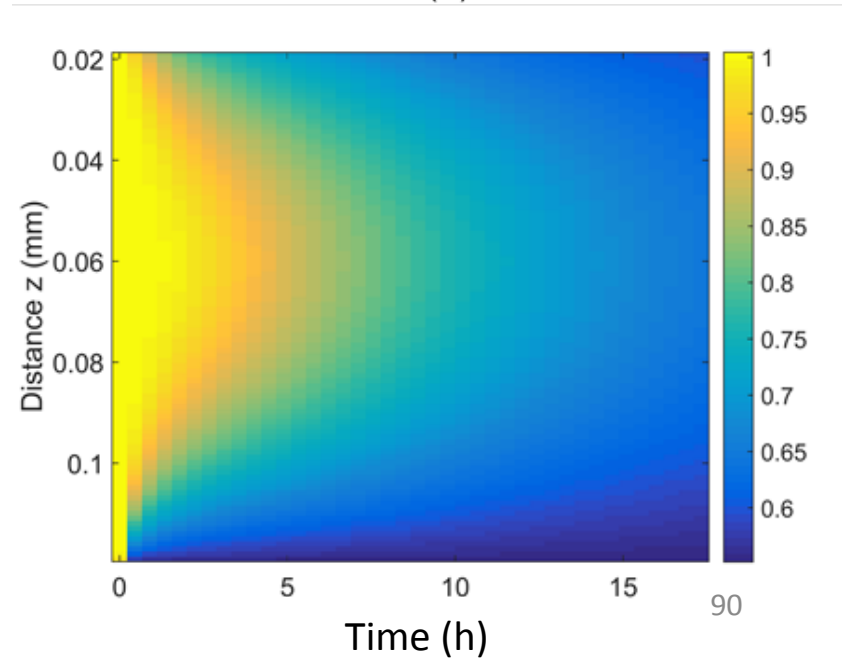
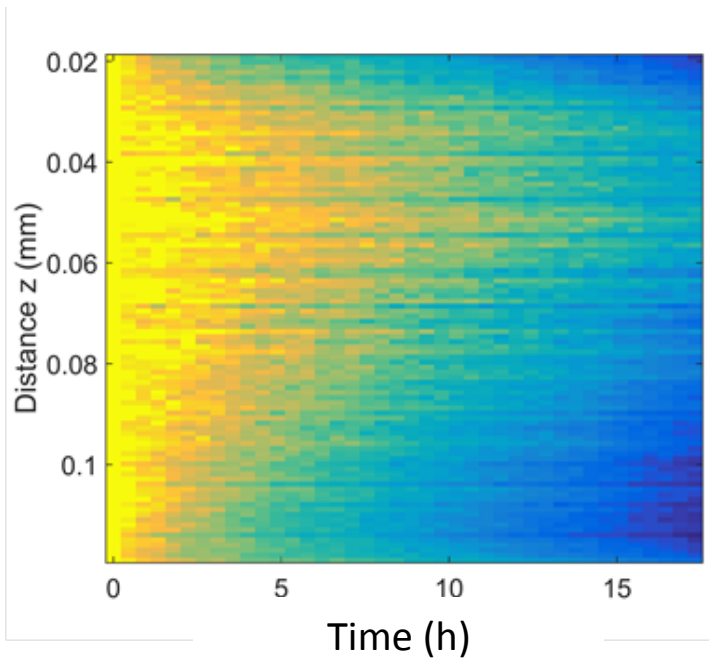
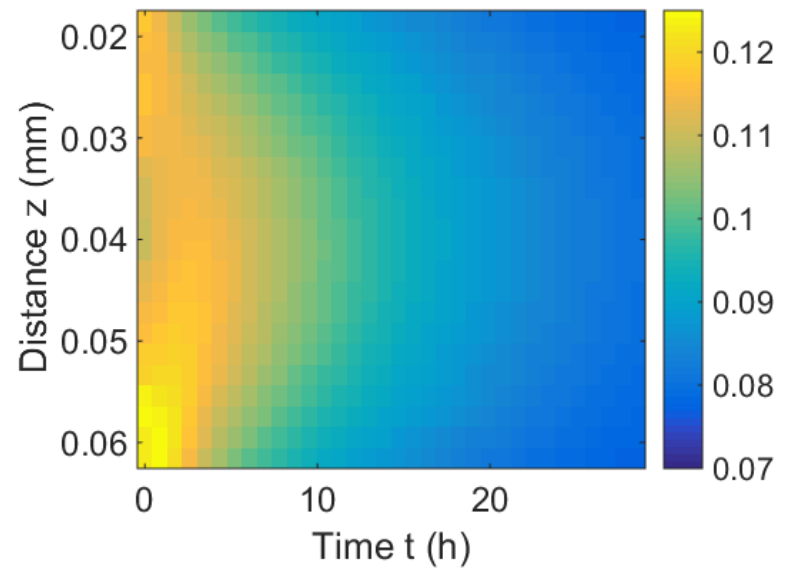
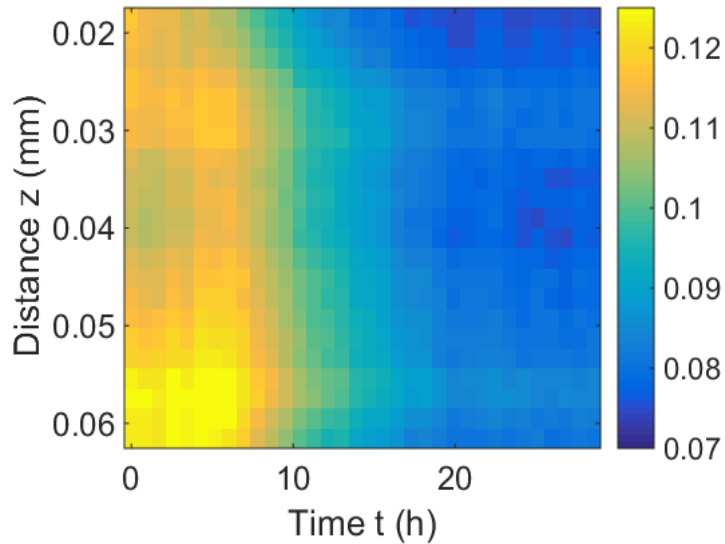
$$X(z, t) = X_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} \left[ (X_1 - X_0) F(\alpha_n, 0) \exp(-D\alpha_n^2 t) \sin(\alpha_n z) \right]$$

$$\text{avec: } \alpha_n = \frac{n\pi}{L}$$

Minimisation in the least square sense (Levenberg-Marquardt method) between experimental value and analytical solution to make a mass transfer coefficient

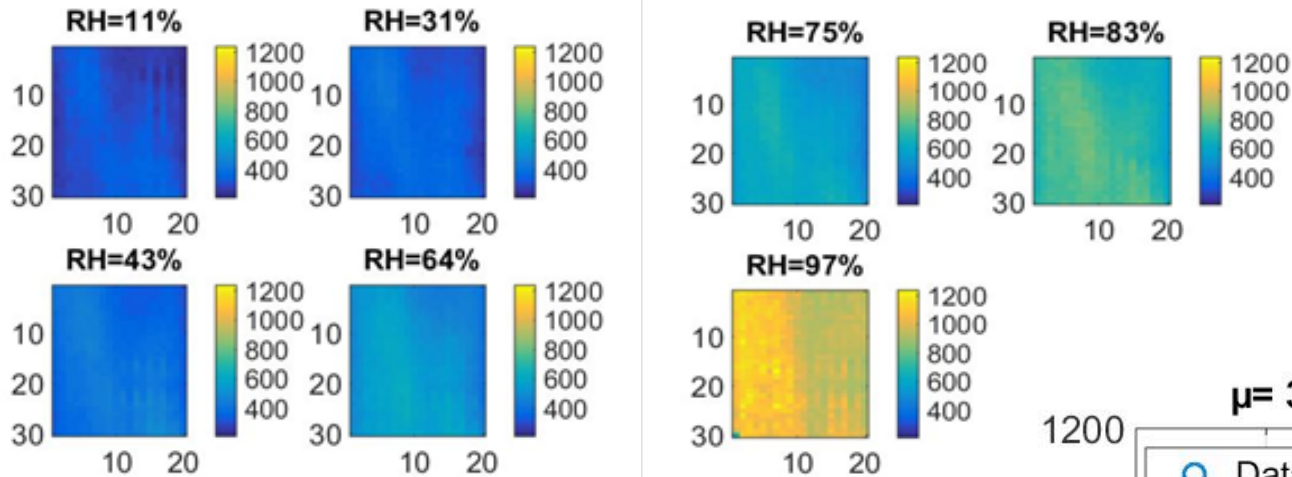
estimation  $D_{\text{est}} = 4.07 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Good agreement with literature  $D = 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

# 1D model estimation of Mass transfer coefficient (2/2)

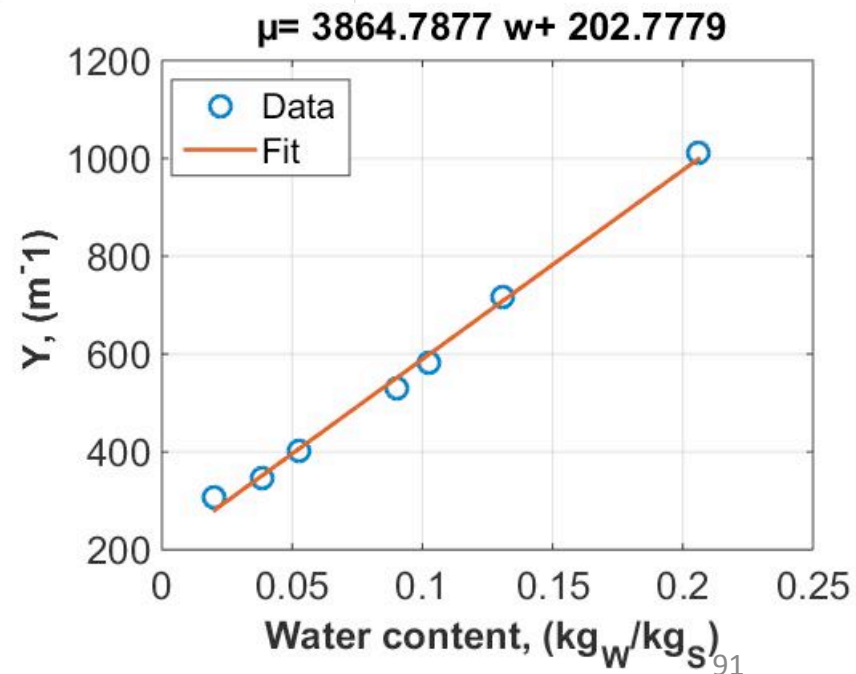


# Application on pin wood heterogeneous media

## Steady state



Mean absorbance with respect to water content



# Application on pin wood heterogeneous media

Transient state

Measurement area

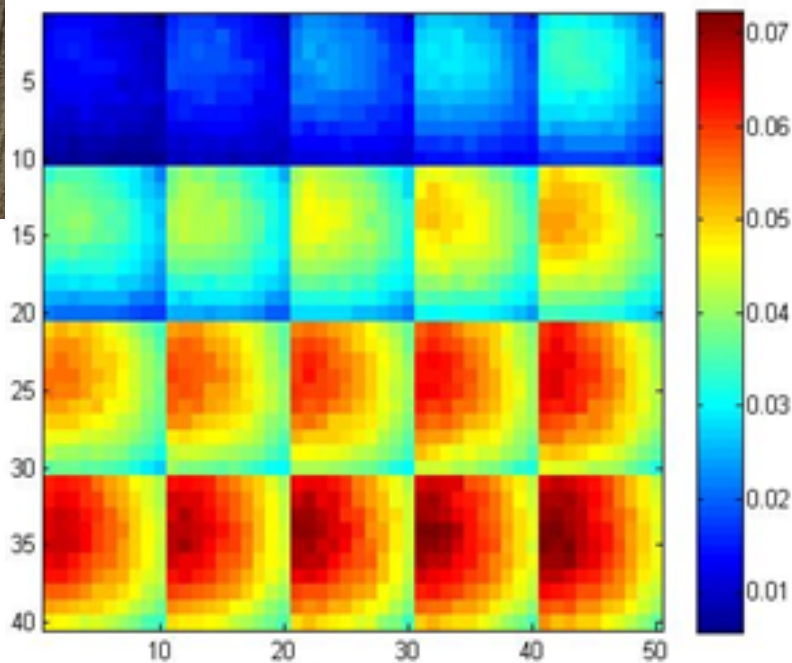


- Sample dimension 4 cm x 3 cm, thickness 3.4 mm
- Imbibition by water in order to obtain 1,082 kg of water/kg dry wood

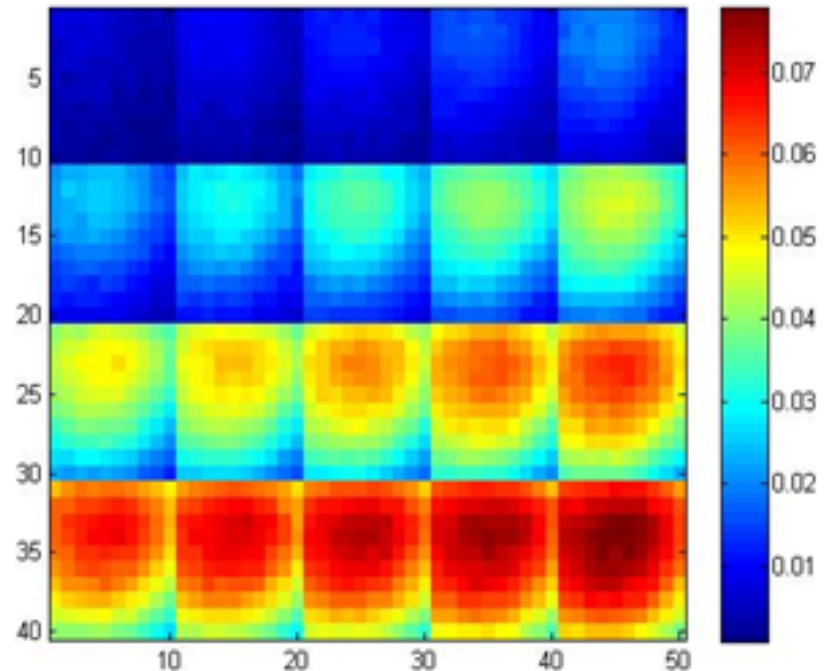
# Application on pin wood heterogeneous media

- Drying process 6h40mn for vertical position and 7h46mn for horizontal position of wood's ring (image each 6mn40s)
- We only present the last 20 images

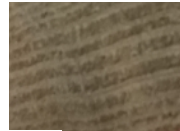
Tranmitted signal according to time



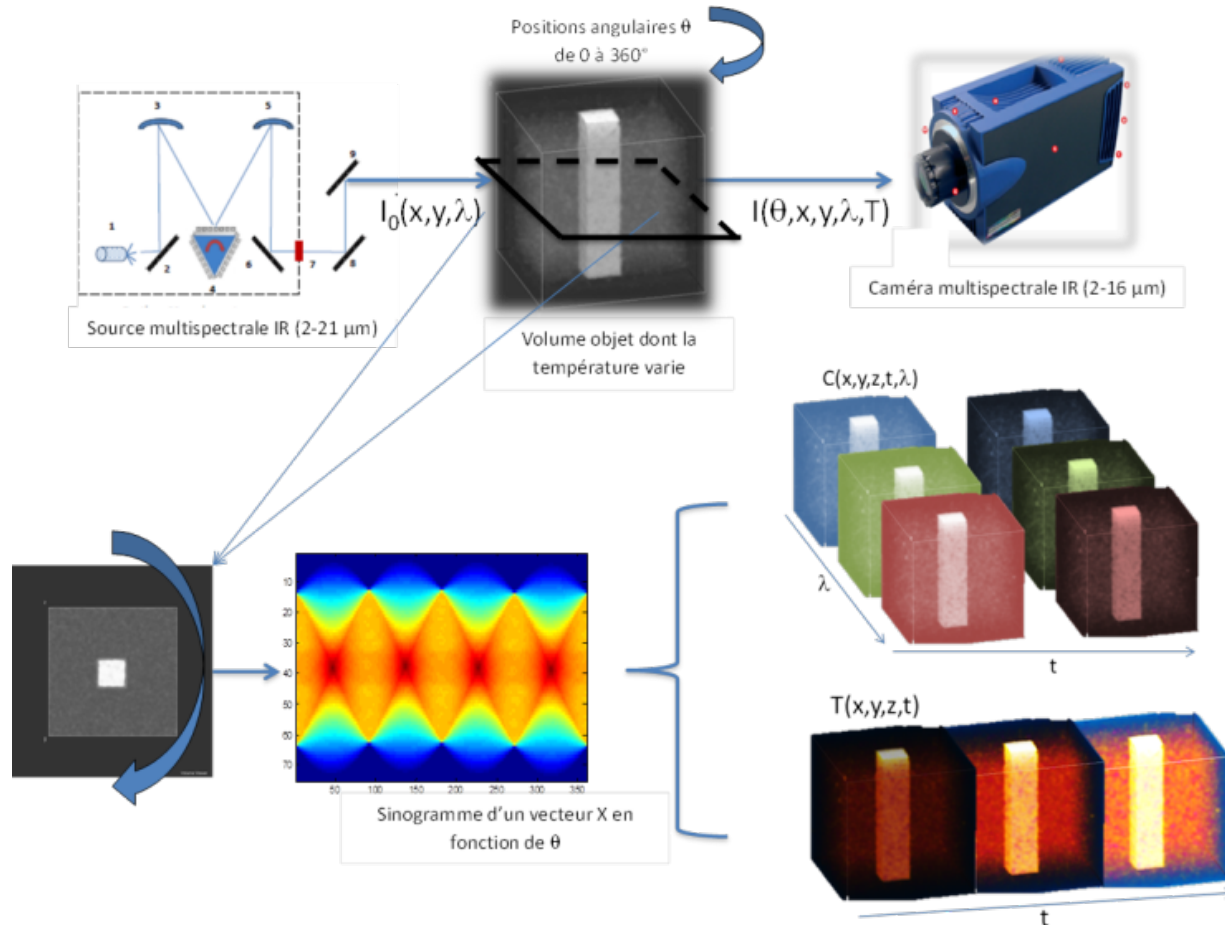
Position verticale



Position horizontale

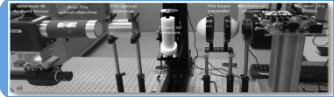


# From broadband THz camera

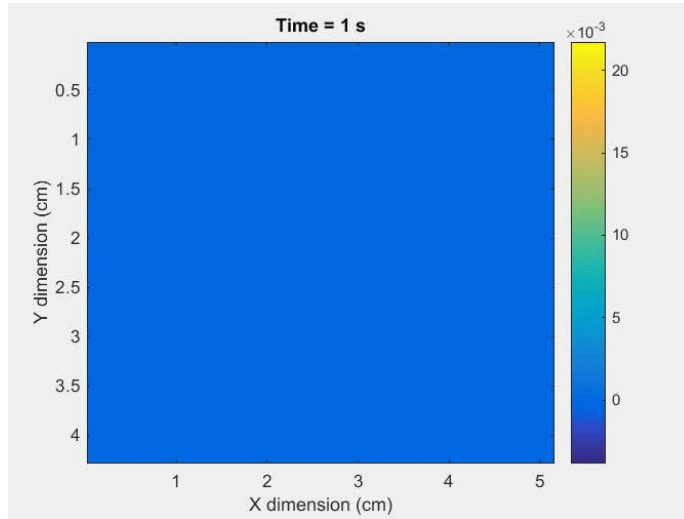
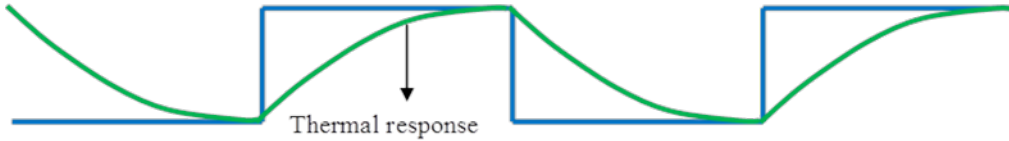


To 3D thermal imaging tomography

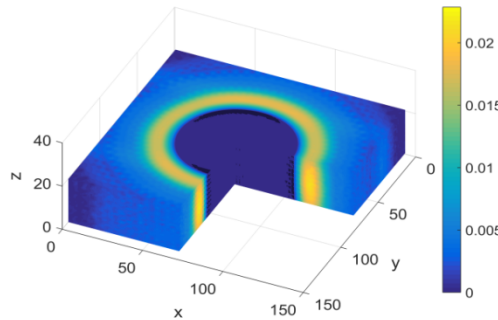
# First results of transient temperature tomography



## Experimental procedure

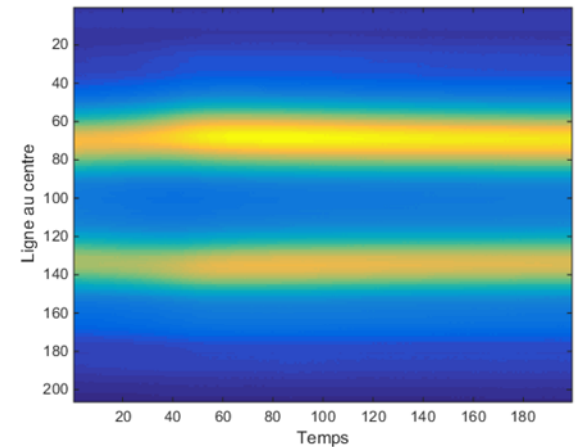
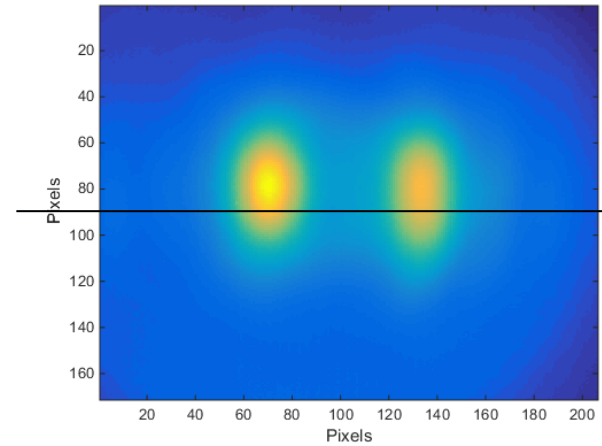


Measured images as function of time



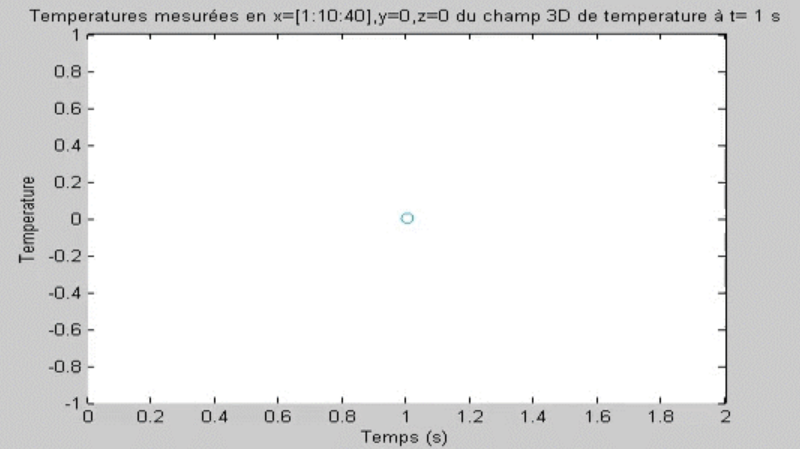
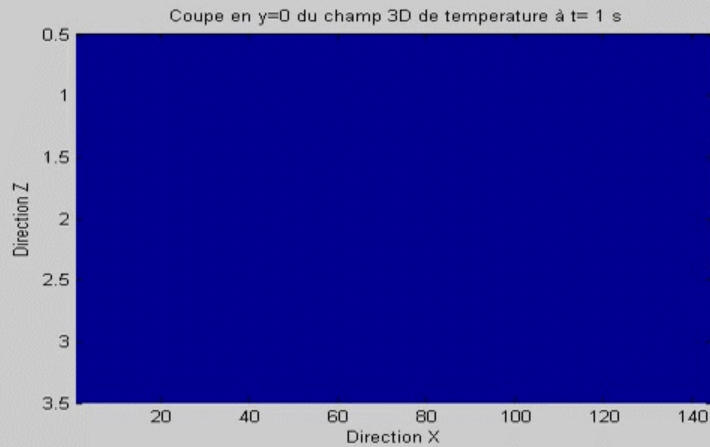
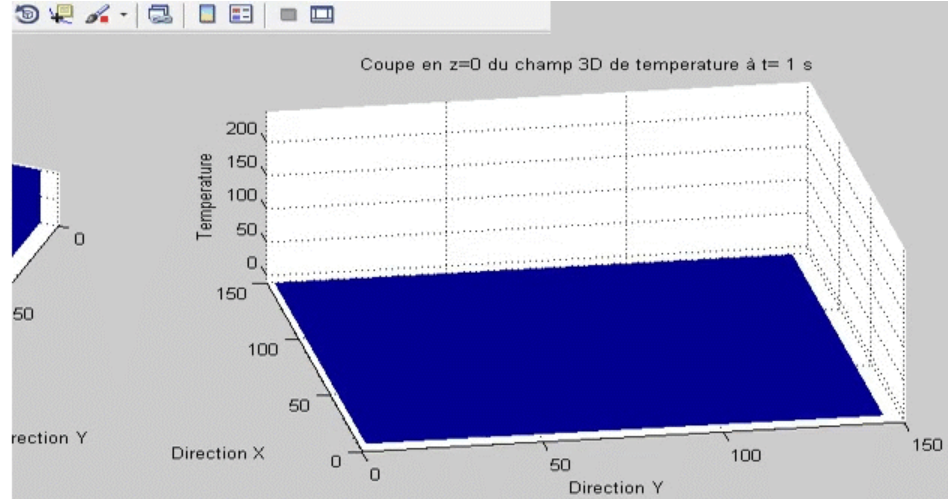
3D reconstruction after radon transform

Image at room temperature



Line as function of time

# First results of transient temperature tomography





# Conclusions and prospects

Up to 400  $\mu\text{m}$  of water

Suitable for  
measurement in a box/  
package

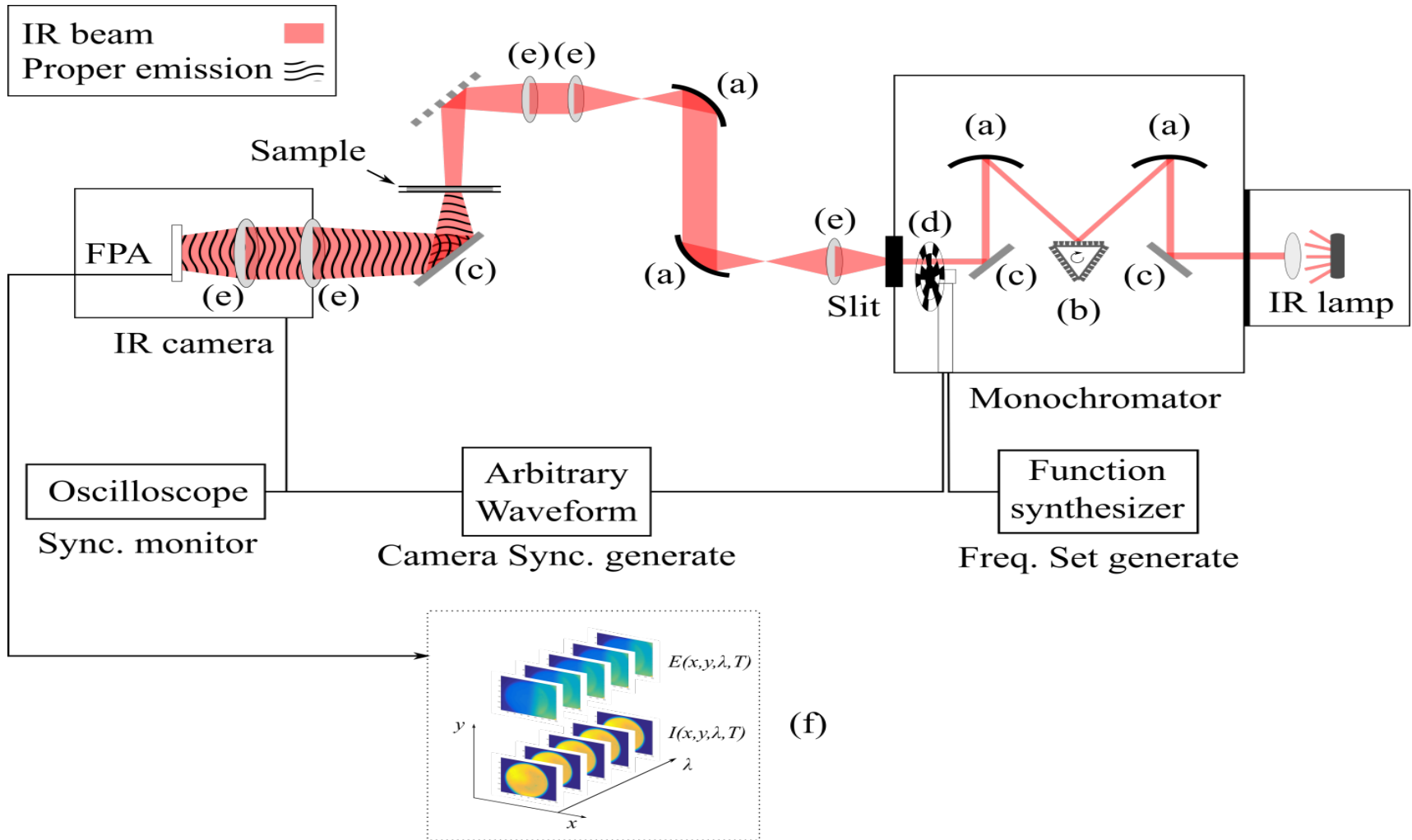
Quantitative Water content  
measurement  
with contactless THz waves

Towards fast measurement with IR camera and  
Thz converter (big data)

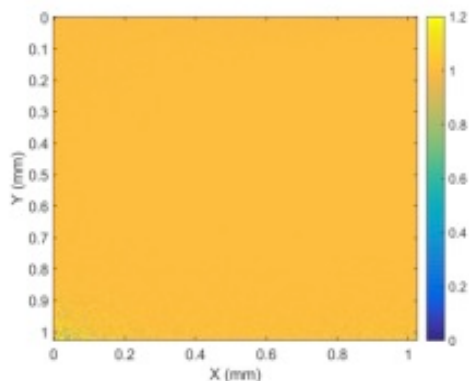
Many question are still open : how to do it in reflection mode or  
to deconvolute thickness and water content variation ?

Impact of temperature (TT) ?

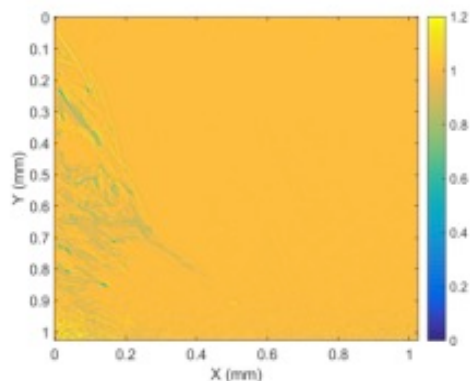
# Fast InfraRed imaging Spectroscopy Technique



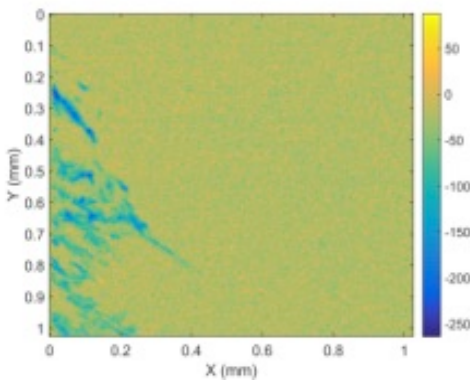
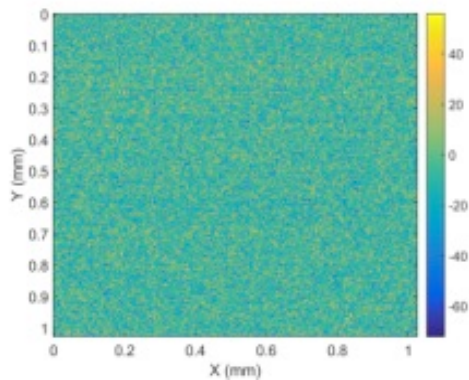
*Frame rate 200 images/s*



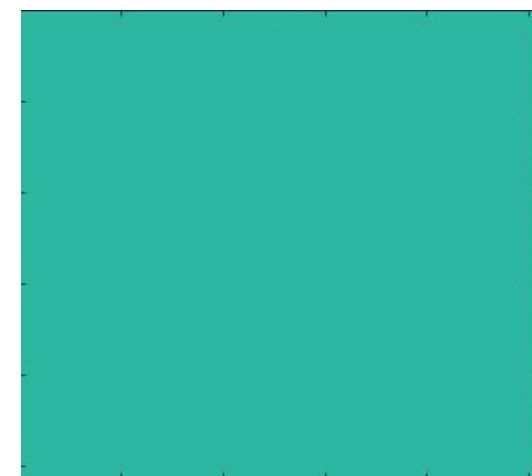
$t = 0$  s



$t = 5$  ms



Concentrations



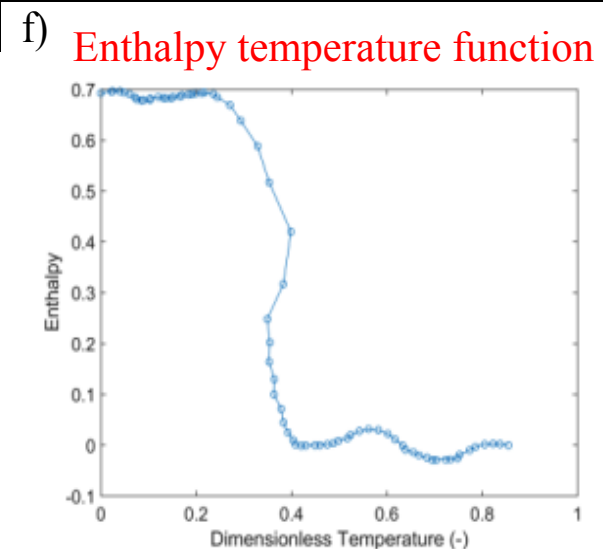
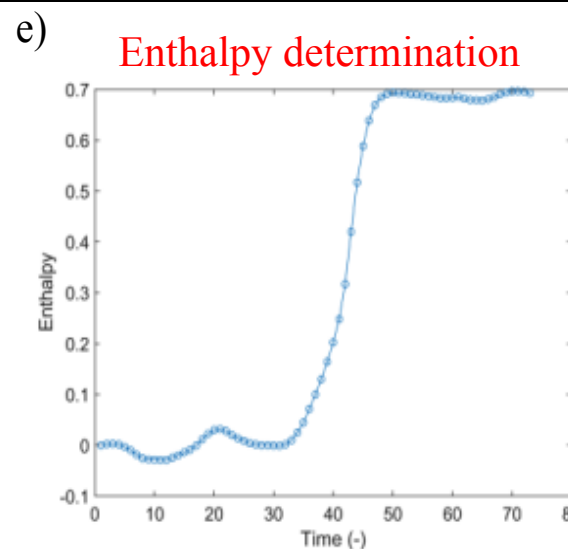
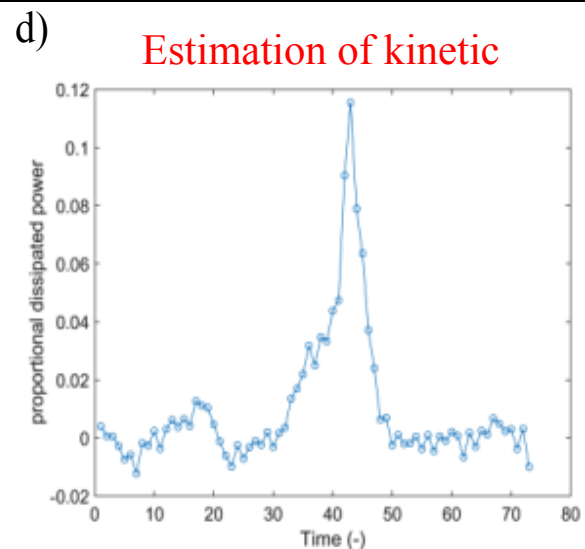
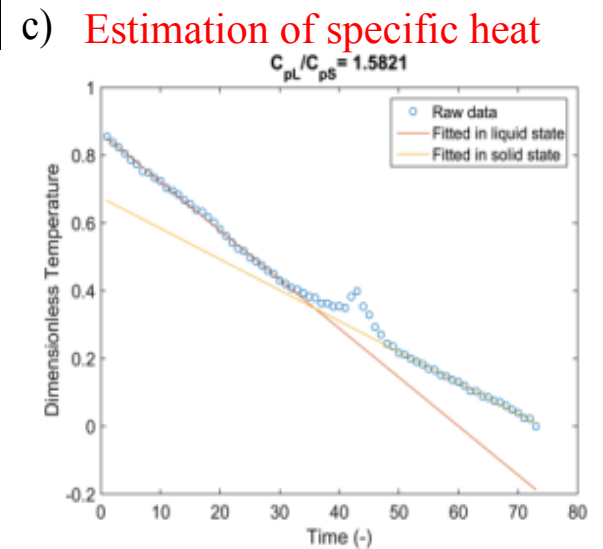
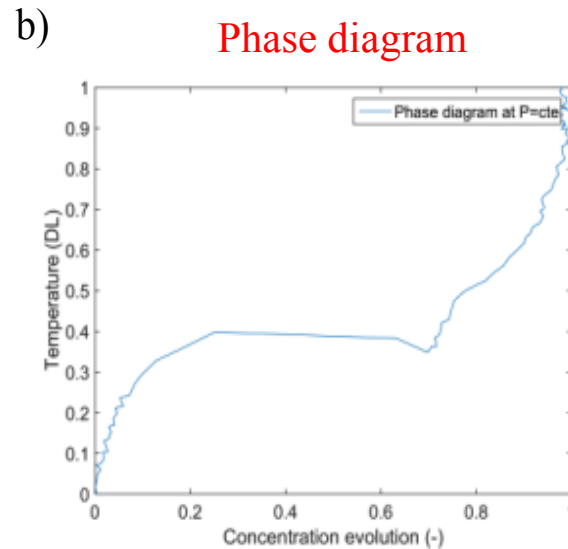
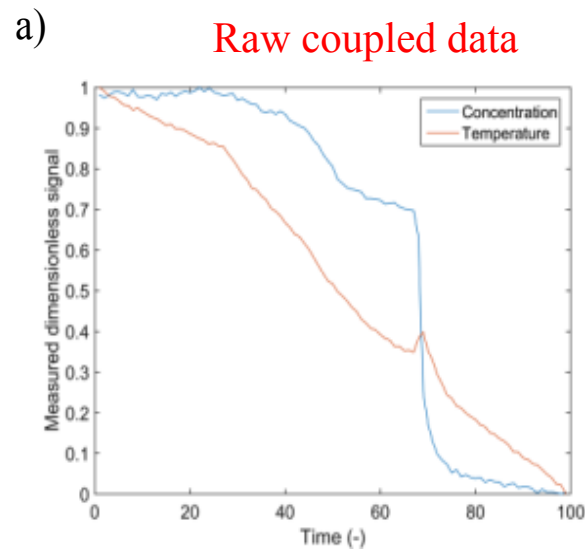
Temperatures

***Non contact calorimetry***

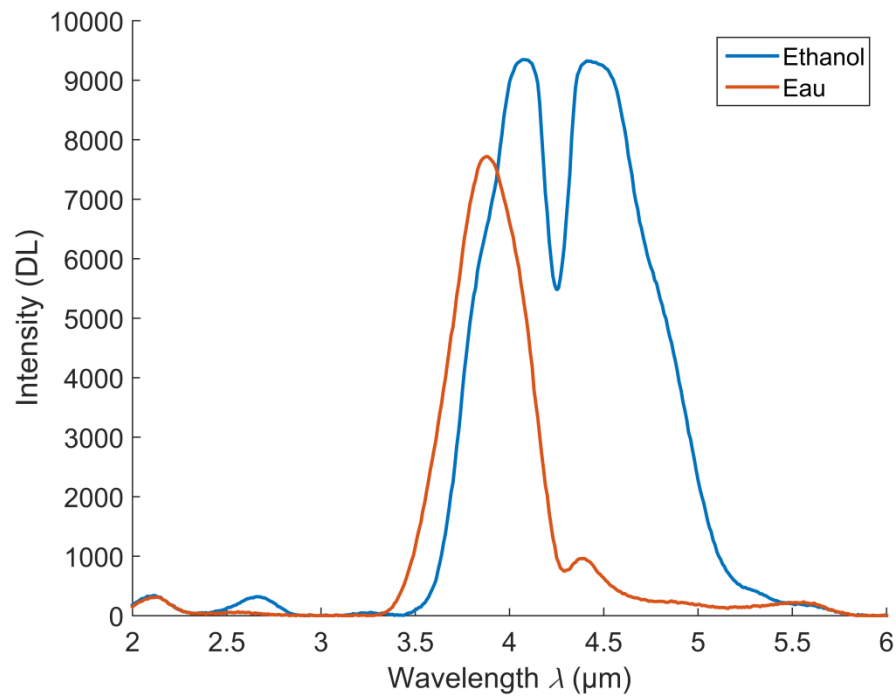
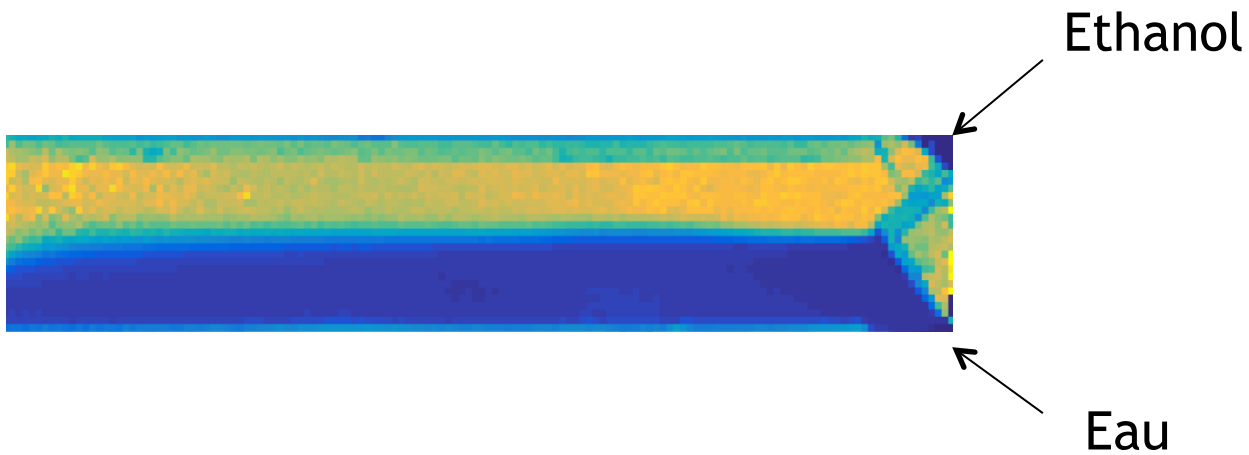
*Estimation of phase diagram, specific heat, enthalpy  
temperature function.....*

# Simultaneous measurement of C and T during phase change

Frame rate 200 images/s

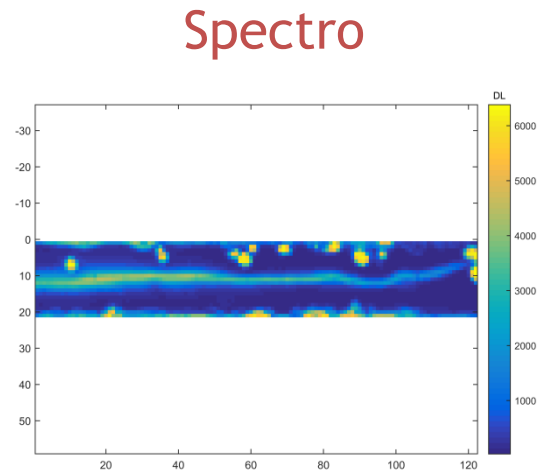


# Eau - éthanol

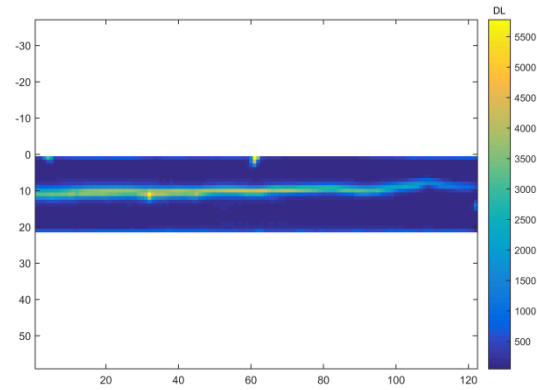


# Réaction acide base

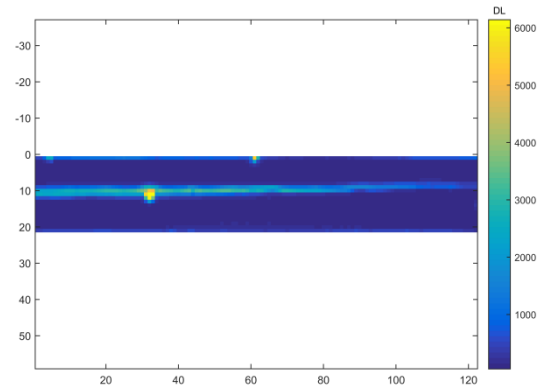
$Q = 10 \mu\text{l}/\text{min}$



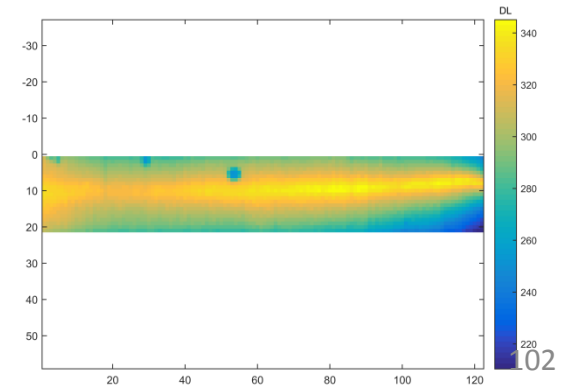
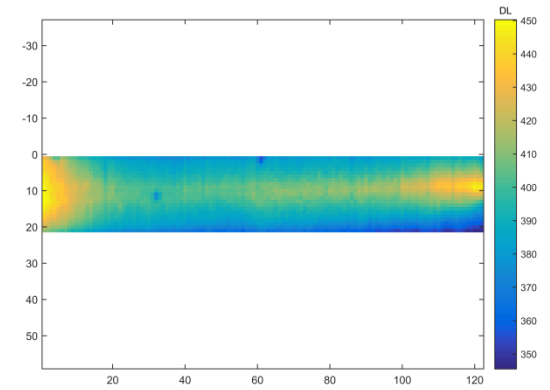
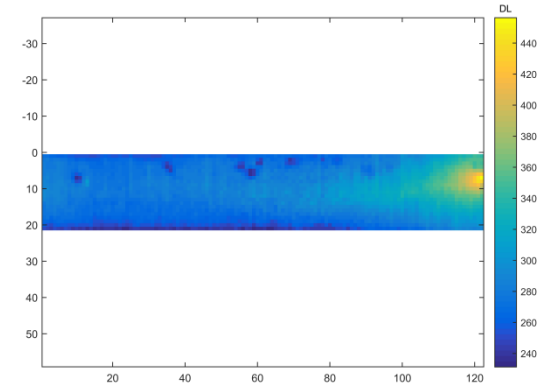
$Q = 20 \mu\text{l}/\text{min}$



$Q = 60 \mu\text{l}/\text{min}$



# Thermique



# Conclusion

## *Thz imaging and tomography*

*Development of a broadband multispectral camera*

*No obstacle to measure T and C variations inside materials*

*First temperature images on homogeneous media*

## *Improvements*

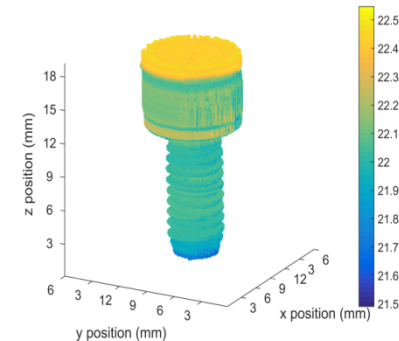
*Analysis of error sources (optics, environment...)*

*Extension to liquids or gas*

## *Applications*

*Dynamic study of Drying and wetting process in wood*

*Tools for 3D characterization of materials*



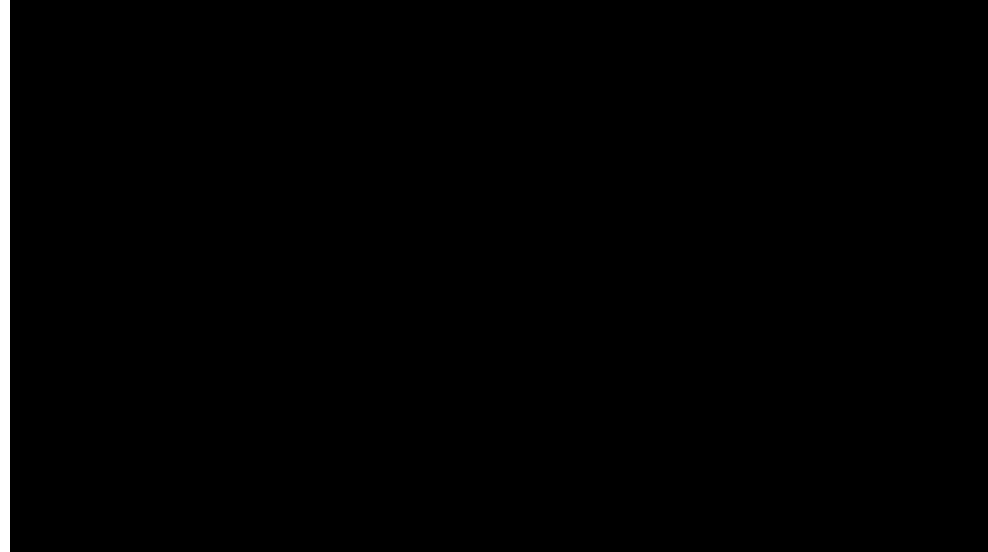
# Thank you for your attention

## *The team*

C. Pradere M. Romano A. Sommier J.C. Batsale



## *Pitch of our team*



A venir janvier 2019



<http://cirts.weebly.com/> 104



# Publications

- F. Ospald, W. Zouaghi, R. Beigang, C. Matheis, J. Jonuscheit, B. Recur, J.-P. Guillet, P. Mounaix, W. Vleugels, P. V. Bosom et al., “Aeronautics composite material inspection with a terahertz time-domain spectroscopy system,” *Optical Engineering*, vol. 53, no. 3, pp. 031 208–031 208, 2014.
- B. Recur, M. Paziresh, G. Myers, A. Kingston, S. Latham, and A. Sheppard, “Dual-energy iterative reconstruction for material characterisation,” *SPIE Optical Engineering+ Applications*, pp. 921 213–921 213, 2014.
- H. Balacey, B. Hugo, J. B. Perraud, J. Bou Sleiman, J. P. Guillet, and P. Mounaix , “Advanced processing sequence for 3D THz imaging,” *IEEE Tran. THz Sc. Tech.*, Feb 2016.
- *Optoélectronique térahertz*, édité sous la direction de J.-L. Coutaz, EDP Sciences, Paris (2008).
- F. Hindle *et al.* *Recent Developments of an Opto- Electronic THz Spectrometer for High-Resolution Spectroscopy*. *Sensors* 2009; 9: 9039-9057.
- D. Woolard *et al.* *Terahertz electronics for chemi- cal and biological warfare agent detection*. In *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* Anaheim, CA, June 13-19, 1999 : 925-928.
- *Rapport sur la sûreté aérienne, en particulier sur les scanners de sûreté, (2010/2154(INI))*, Commission des transports et du tourisme, Communauté euro- péenne, (Rapporteur : Luis de Grandes Pascual).
- K. Kawase, Y. Ogawa, and Y. Watanabe. *Non- destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints*. *Opt. Exp.* 2003; 11, 2549.

