

Identification de propriétés thermophysiques par inversion dans l'espace de Hankel

Damien LEGAIE*, Hervé PRON et Christian BISSIEUX

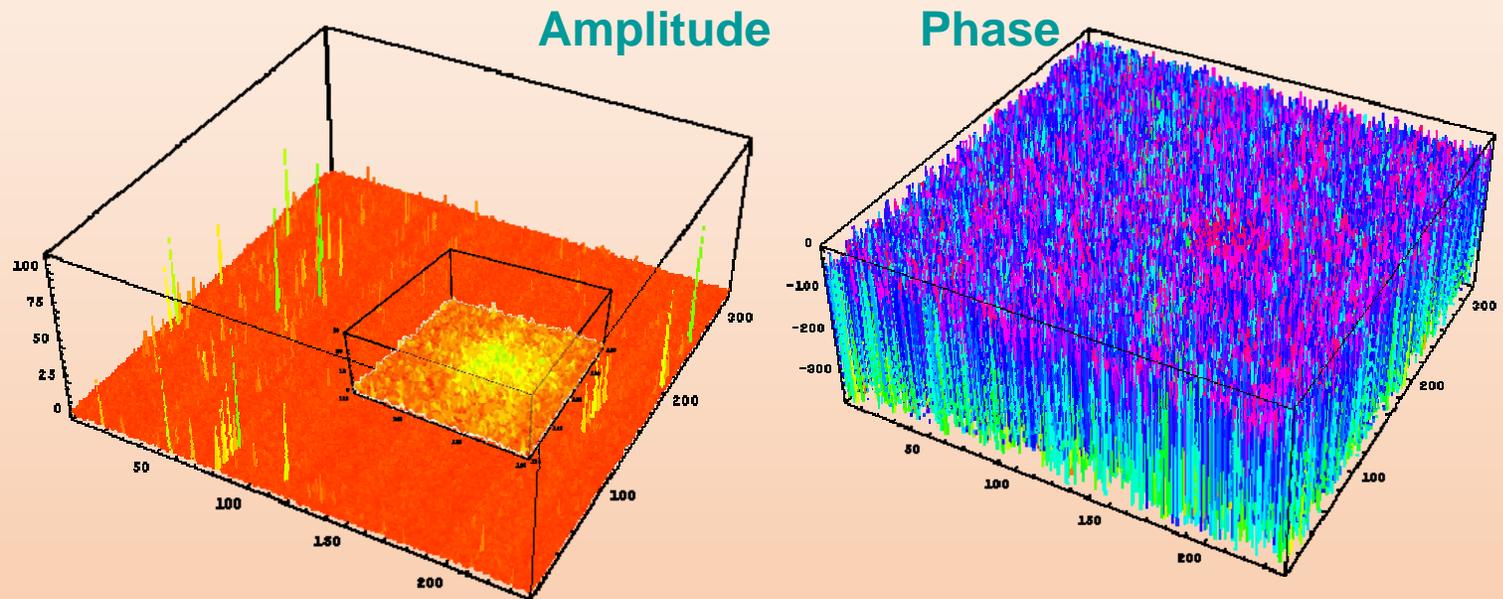
Université de Reims Champagne-Ardenne,
Unité de Thermique et Analyse Physique (EA 3802),
Laboratoire de Thermophysique (URCA/UTAP/LTP)

Damien LEGAIE : damien.legaie@univ-reims.fr

Objectif :

- mesurer les propriétés thermophysiques des métaux (principalement k)

Difficulté :

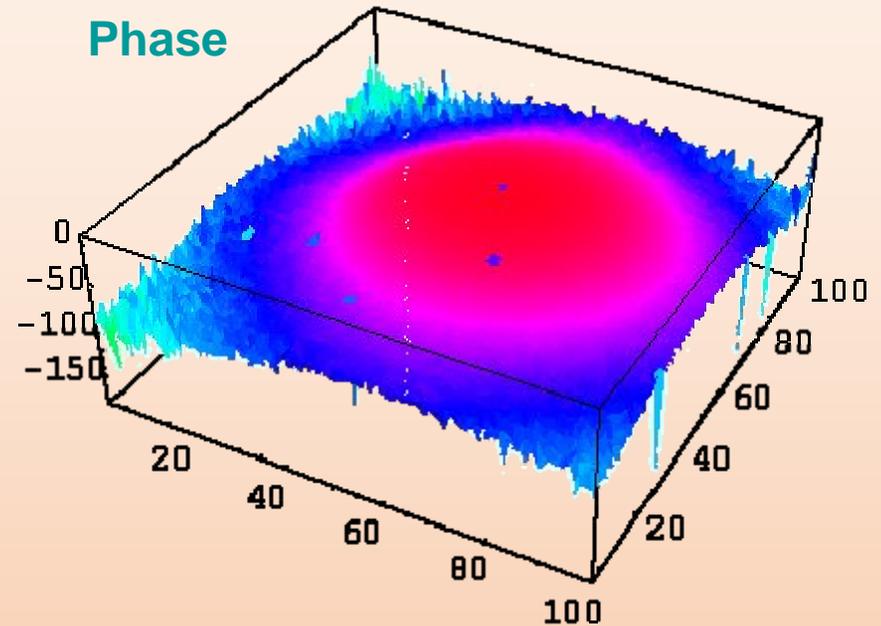
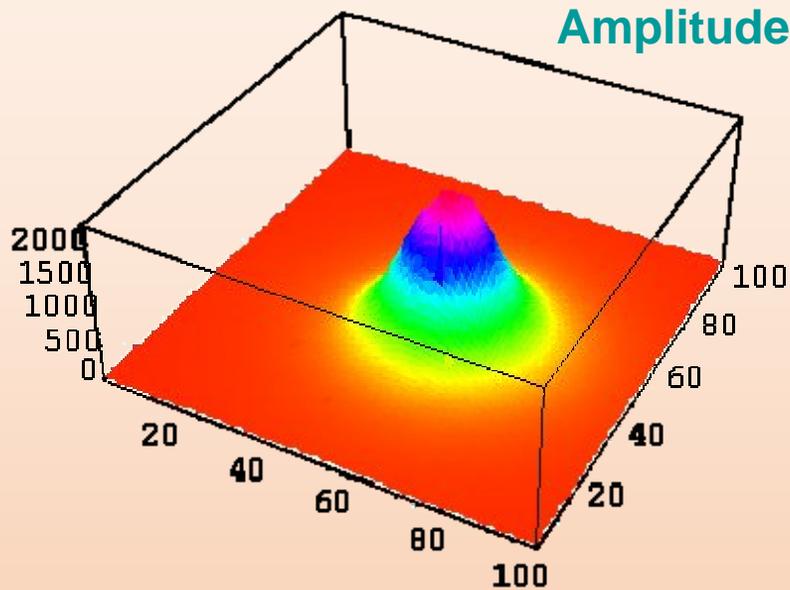


Acier URB25
sans peinture

- Absorptivité et émissivité faibles et inhomogènes
 - ⇒ Nécessité d'utiliser un revêtement émissif
 - ⇒ Nécessité de caractériser le revêtement

Avantage :

- Meilleur rapport signal / bruit



Problèmes :

- Maîtrise de l'épaisseur du revêtement (valeur et uniformité)
- Évaluation de ses propriétés thermophysiques

Acier URB25
avec peinture

Dispositif expérimental

- Excitation :
laser DPSS 120mW modulé à
1 Hz par cellule acousto-optique
- Détection :
camera CEDIP (IRC 320-4LW)
Objectif G1 ; pixels de 30 μ m



+ Analyse des séquences IR par détection synchrone numérique (sous Labview™) avec prise de référence

Modélisation par Transformée de Hankel et retour inverse

Réponse thermique utilisant des fonctions de Green Harmoniques :

$$\frac{d^2 H(\delta, z|z')}{dz^2} - \sigma_i^2 H(\delta, z|z') = -\frac{\delta(z-z')}{k}$$

avec : $\sigma_i^2 = \delta^2 + \frac{j\omega}{a_i}$

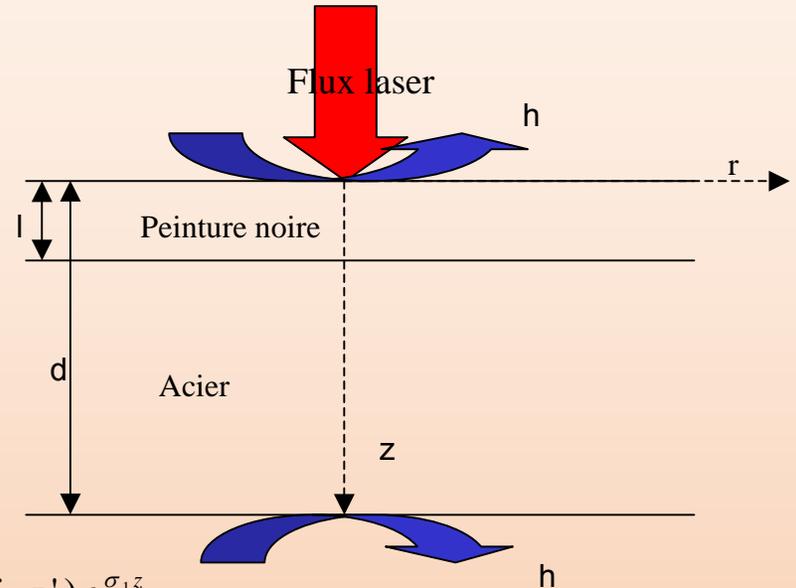
ici :

$$H_{11}(\delta, z|z') = \frac{1}{2k_1\sigma_1} e^{-\sigma_1|z-z'|} + A(\delta, z')e^{-\sigma_1 z} + B(\delta, z')e^{\sigma_1 z}$$

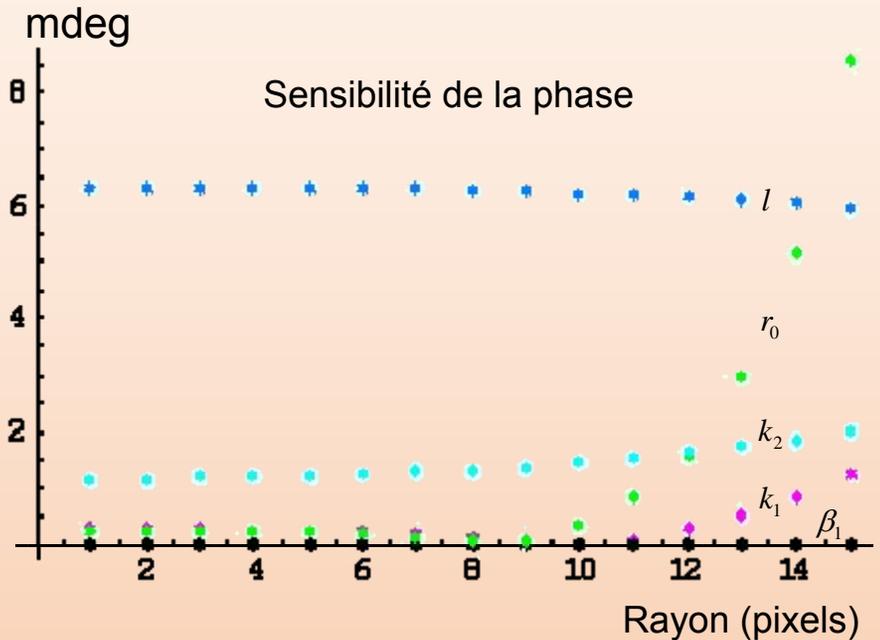
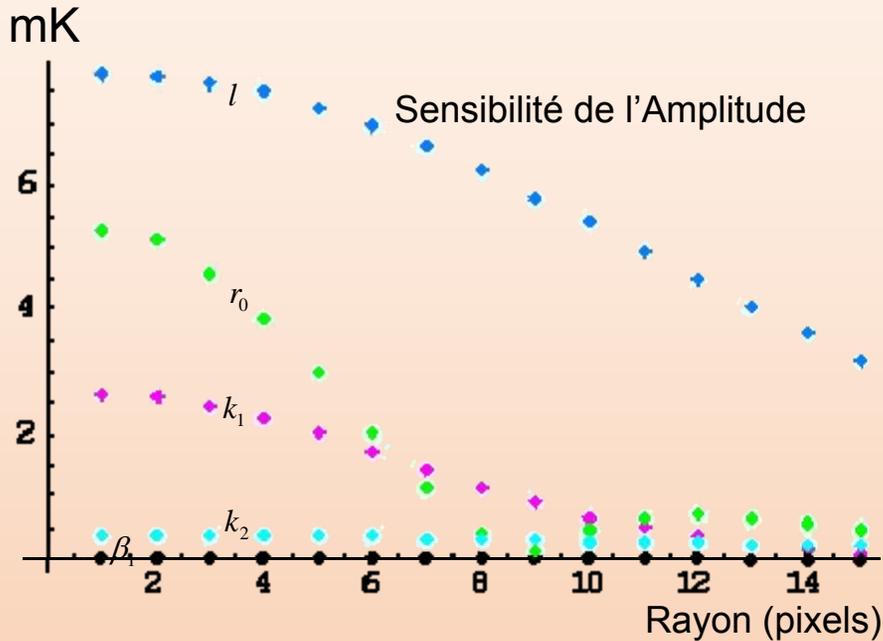
$$H_{21} = E(\delta, z')e^{-\sigma_1 z} + F(\delta, z')e^{\sigma_1 z}$$

L'expression de la température dans le milieu 1 est finalement :

$$T_1(r, z) = \int_0^\infty \left\{ \int_0^l H_{11}(\delta, z|z') \overline{q_1}(\delta, z') dz' + \int_l^d H_{21}(\delta, z|z') \overline{q_2}(\delta, z') dz' \right\} J_0(\delta r) \delta d\delta$$



Étude de sensibilité



$$S = \xi \frac{\partial T}{\partial \xi}$$

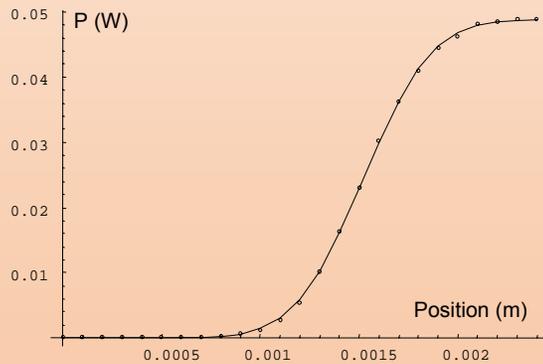
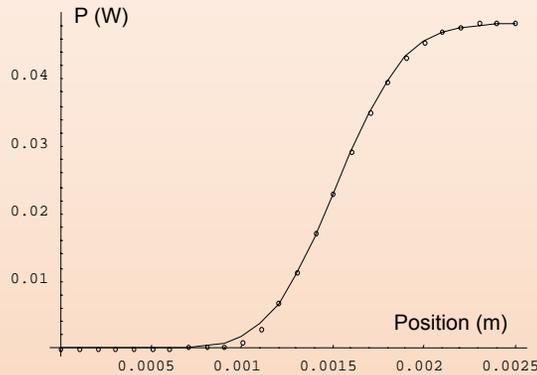
(Calcul réalisé pour
0,1% de variation
du paramètre ξ)

Sensibilités à :

- r_0 en vert
- k_1 en rose
- k_2 en bleu clair
- β_1 en noir
- l en bleu foncé

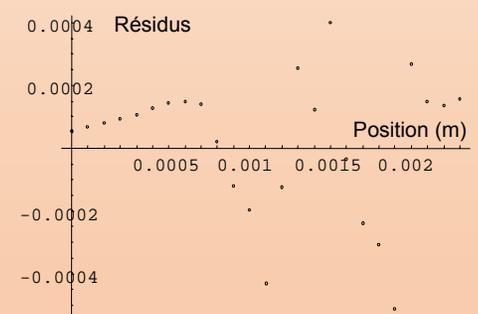
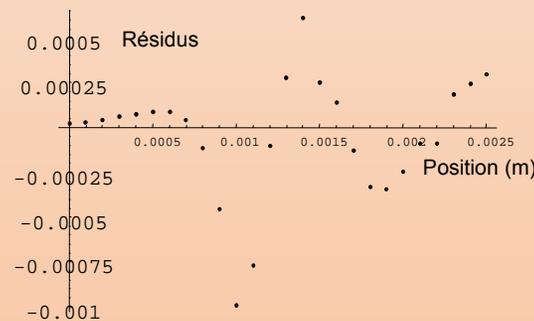
Mesure du rayon du faisceau

Méthode du rasoir + identification paramétrique

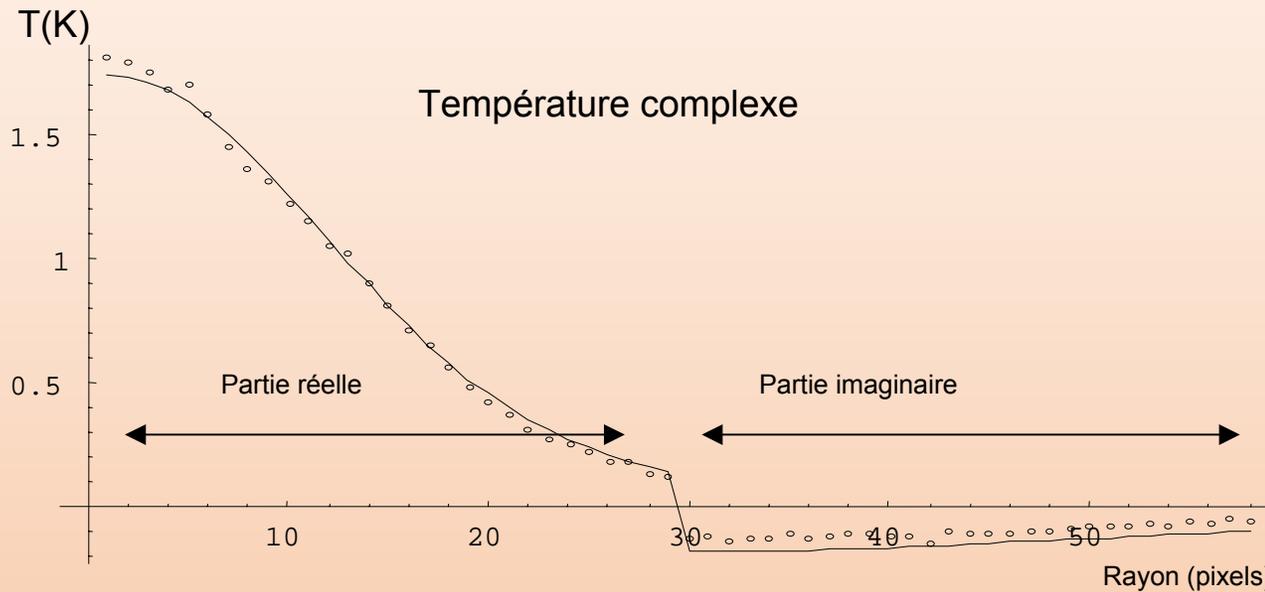


Résultats :

	P_0 (mW)	Centre (μm)	r_0 (μm)
x	$48,23 \pm 0,35$	1521 ± 6	420 ± 11
y	$48,77 \pm 0,24$	1521 ± 4	387 ± 7



Identification dans l'espace direct, sur un profil radial :



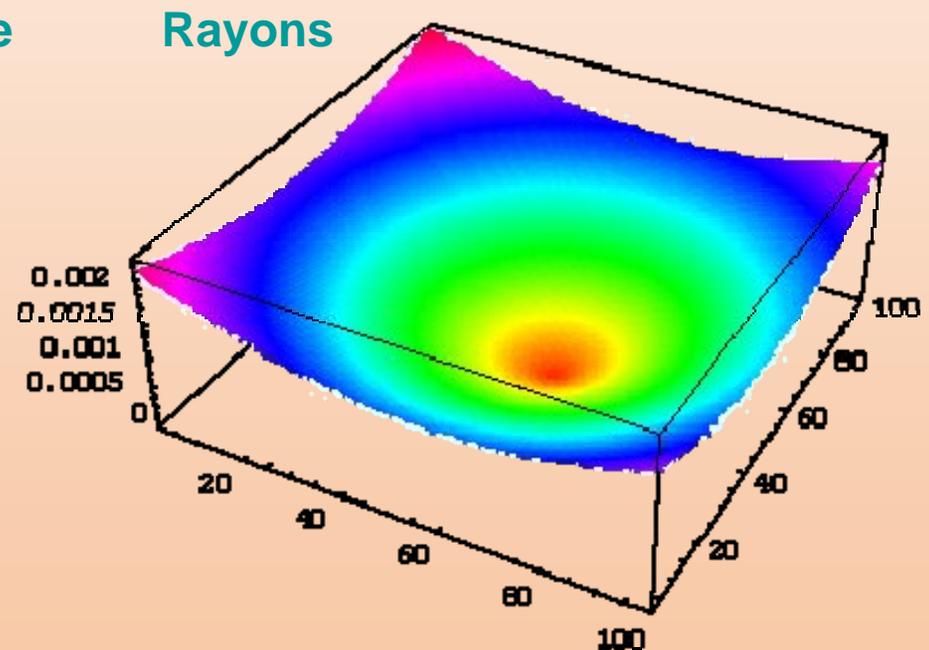
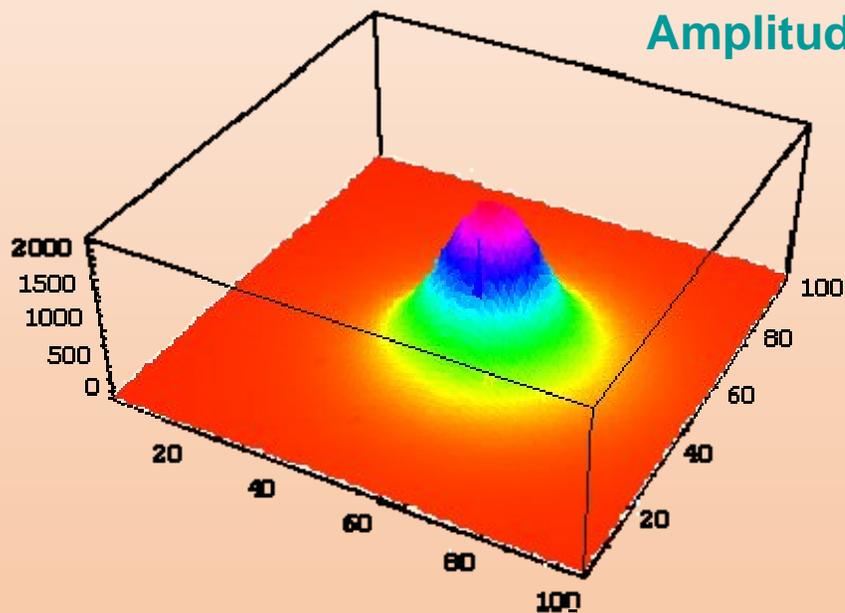
$$k_2 = 13,2 \pm 0,2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

- Peinture Krylon

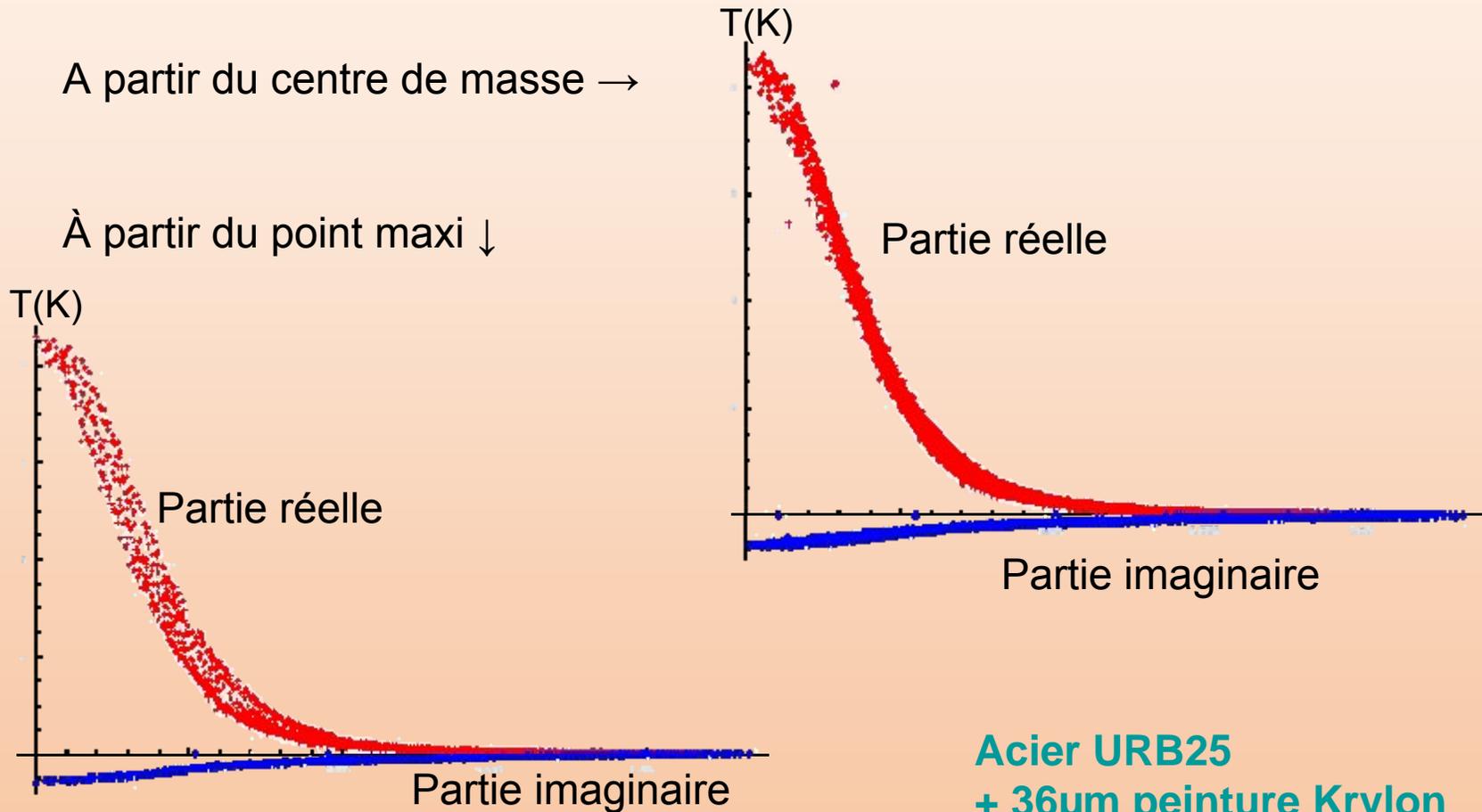
$l = 18\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$

$k_1 = 0,10 \pm 0,02 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (identifié sur 316L $k_2 = 15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

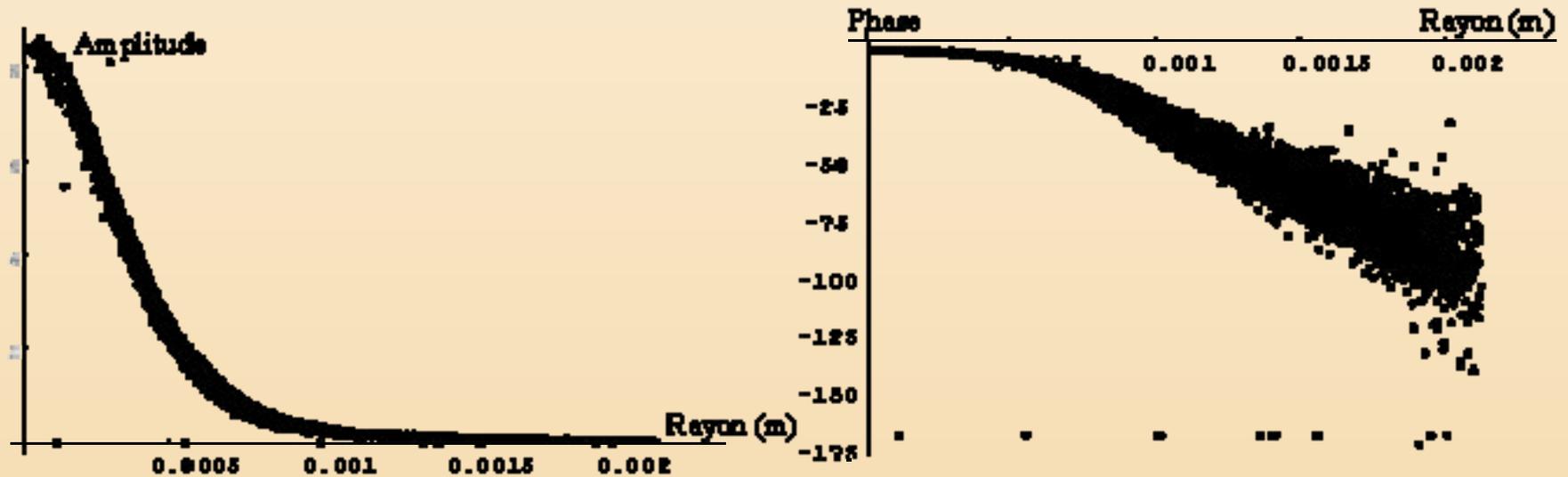
- Utilisation de la carte entière
 - Suppression de la subjectivité dans le choix du profil
 - Utilisation de toute l'information
- Position des pixels par rapport au centre du faisceau
 - Centre de masse déterminé à partir de la carte d'amplitude
 - Calcul de la carte des rayons



Reconstruction d'un profil unique à partir de la carte entière (100x100)



Utilisation des cartes entières dans l'espace direct :



- Difficultés :
 - nombre de points rapidement important : 100x100
 - région étudiée restreinte par rapport à l'image (320x240)
 - retour par TH inverse numérique

Ajustement sur les cartes entières dans l'espace de Hankel :

Normation des données :
$$T^*(\delta, z) = \frac{\int_0^\infty T(r, z) J_0(\delta r) r dr}{\int_0^\infty e^{-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2} r dr} = \frac{2}{r_0^2} \int_0^\infty T(r, z) J_0(\delta r) r dr$$

- **Avantages :**

- nombre de points réduit pour l'identification
- pas de retour par TH inverse
mais une TH discrète du profil expérimental :

$$T^*(\delta, z) = \frac{2}{r_0^2} \sum_i T(r_i, z) J_0(\delta r_i) r_i \Delta r_i$$

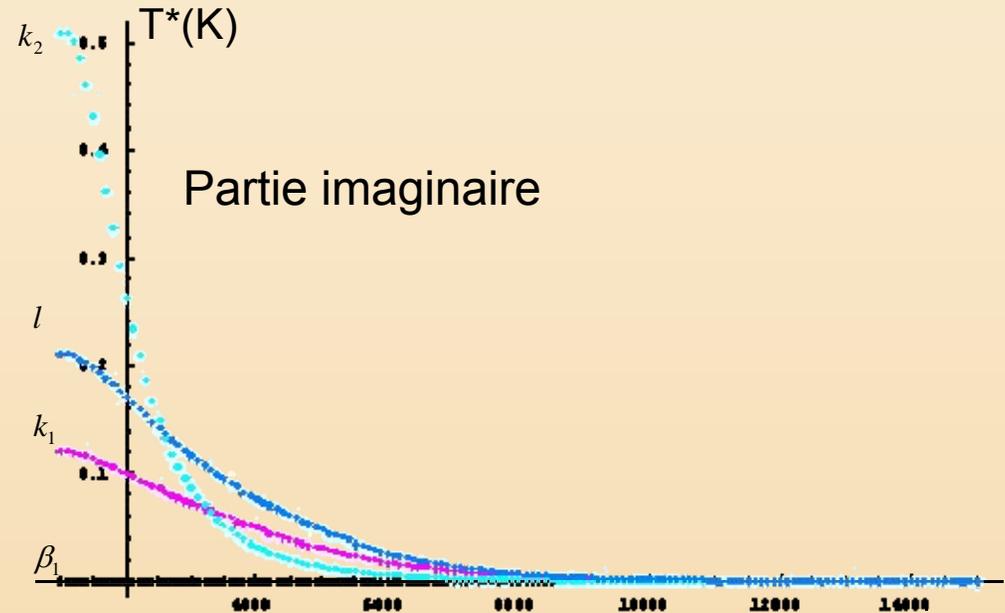
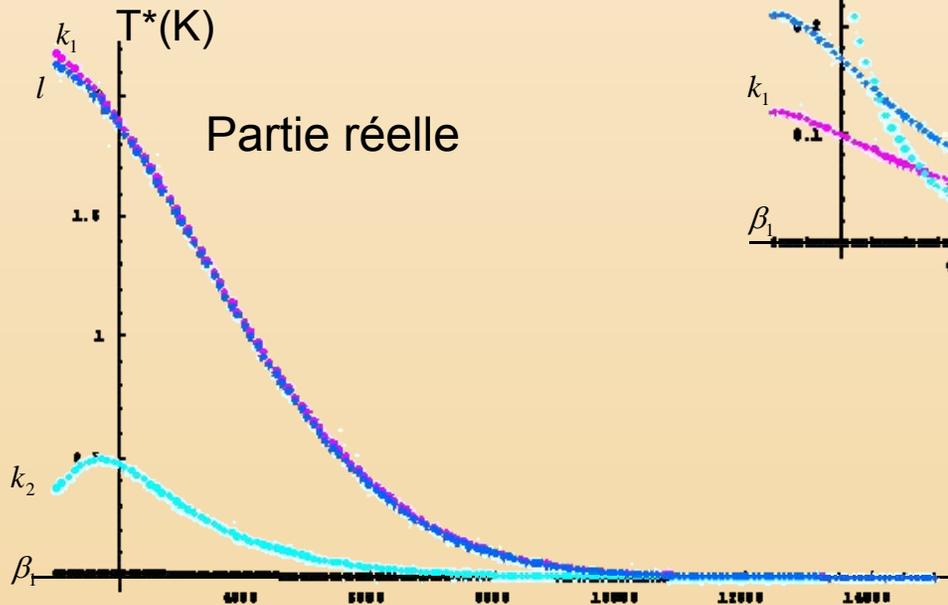
- **Référence :**

D. Maillet, J.-C. Batsale, A. Bendada, A. Degiovanni, "Méthodes intégrales et contrôle non destructif en thermographie infrarouge stimulée", Rev Gen Therm (1996) 35, pp. 14-27

Étude de sensibilité dans l'espace de Hankel

Sensibilités à :

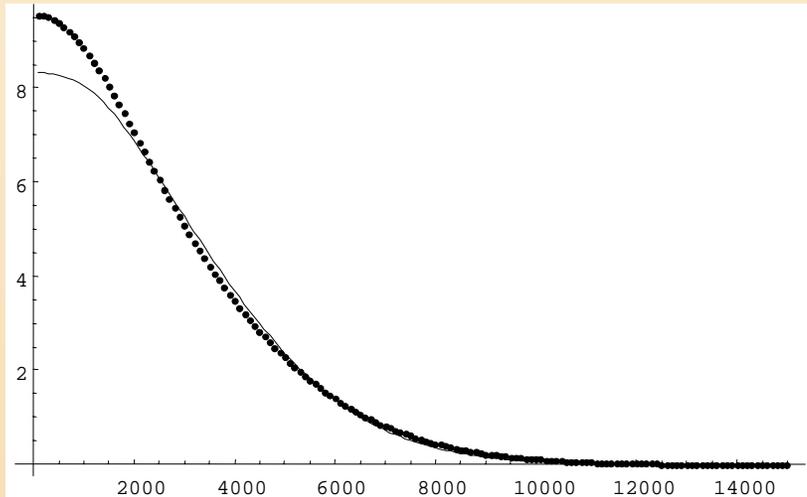
- k_1 en rose
- k_2 en bleu clair
- β_1 en noir
- l en bleu foncé



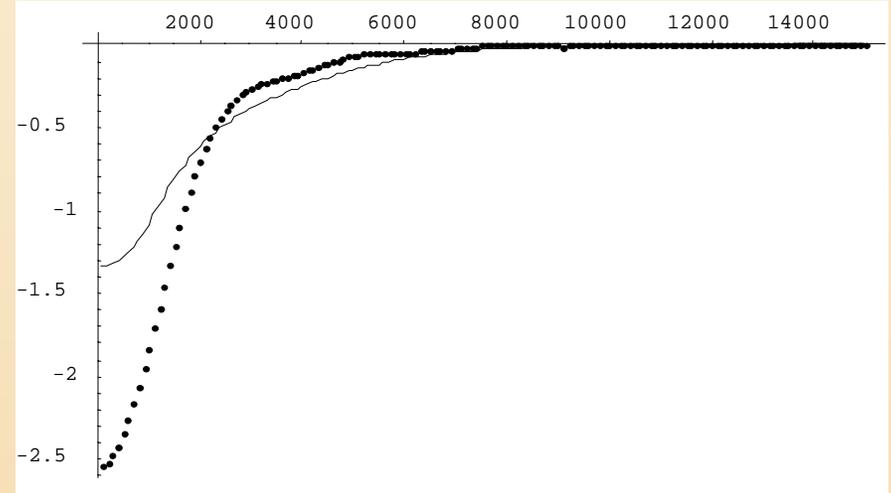
(Calcul réalisé pour
0,1% de variation
du paramètre)

Identification brute dans l'espace de Hankel :

Re(T*) (K)



Im(T*) (K)



- Conductivité thermique identifiée :

$$k_1 = 0,082 \pm 0,012 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

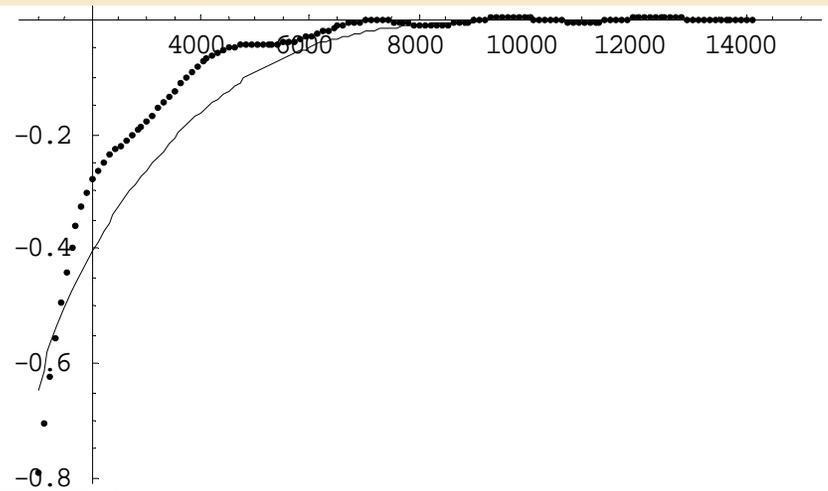
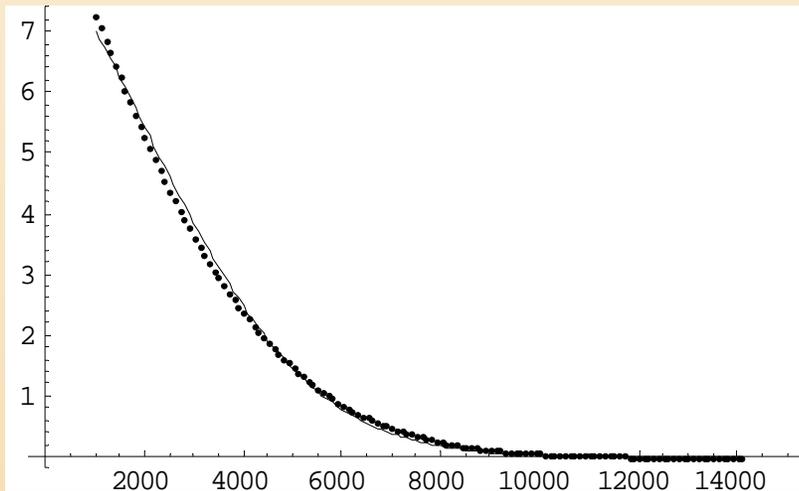
Première correction

Filtrage passe-bas :

- échantillonnage spatial $30 \mu\text{m} \leftrightarrow 33\,333 \text{ m}^{-1}$
- critère de Shannon

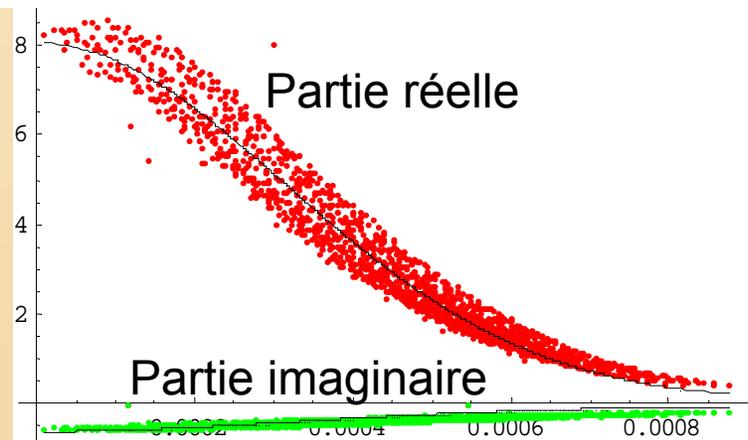
Filtrage passe-haut :

- dimensions fines de l'échantillon $2 \text{ cm} \leftrightarrow 50 \text{ m}^{-1}$
- fenêtrage par la camera $3 \text{ mm} \leftrightarrow 333 \text{ m}^{-1}$



- Conductivité thermique identifiée :

$$k_1 = 0,084 \pm 0,010 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$



Conclusions et perspectives

Le bruit haute fréquence est supprimé

⇒ Amélioration de la convergence

Mais le spectre est altéré :

Fenêtrage ↔ convolution

Échantillonnage ↔ repliement

Peinture mal maîtrisée :

- erreurs sur l

- k_1 faible

⇒ recherche d'un autre revêtement, plus mince et plus homogène