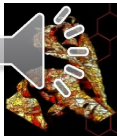


# Développement d'un fluxmètre imageur hyperspectral sans contact par thermographie infrarouge

**Abderezak AOUALI<sup>1</sup>, Stéphane CHEVALIER<sup>1</sup>, Alain SOMMIER<sup>1</sup>, Jean-Christophe BATSALE<sup>1</sup>, Christophe PRADERE<sup>1</sup>,**

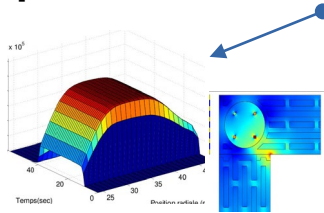
<sup>1</sup> I2M TREFLE, UMR 5295 CNRS-UB-ENSAM, 351 Cours de la Libération, 33400 Talence, France



# Contexte :



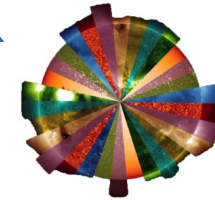
Développement d'un capteur de flux basé sur la technologie EMIR [1] en utilisant un papier en carbone fin et homogène comme thermoconvertisseur



Imageur



Quantitatif



Hyperspectral

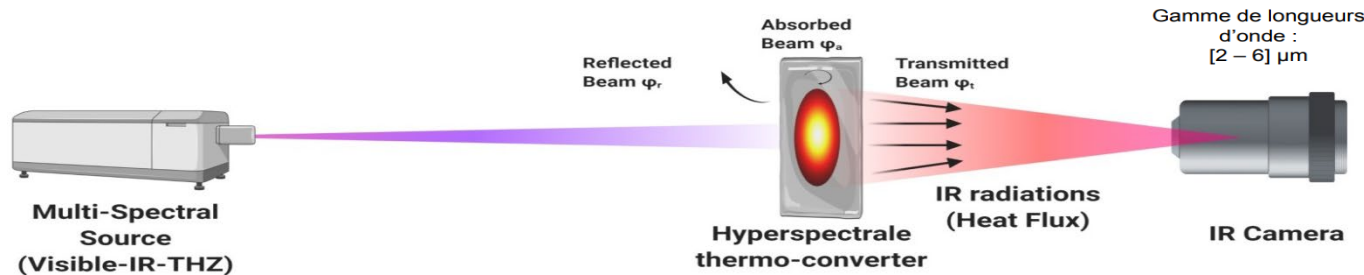
## Avantages :

- Absorption des ondes électromagnétiques dans une très large gamme spectrale. (100% de l'infrarouge proche à l'infrarouge lointain, et 61% dans le domaine millimétrique).
- Échauffement dû à l'absorption des ondes électromagnétiques, ce qui permet de visualiser et d'étudier les phénomènes de transfert à l'aide d'une caméra IR.
- Similaire à un corps noir dans l'IR (émissivité proche de 1).
- Il n'y a pas lieu de s'inquiéter de la limitation de la bande spectrale de la caméra IR.

[1] D. L. Balageas, P. Levesque, and A. A. Deom, "Characterization of electromagnetic fields using a lock-in infrared thermographic system," in *Thermosense XV: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications*, vol. 1933 (International Society for Optics and Photonics, 1993), pp. 274–285

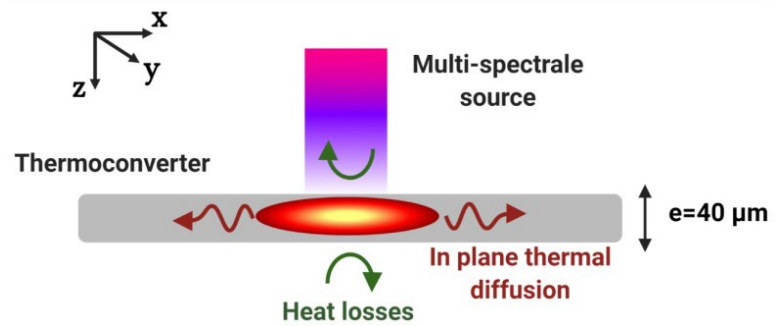
# Problème du Thermoconvertisseur :

## Description et mise en équation du problème :



### Diffusion de la chaleur dans le thermoconvertisseur :

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q, \\ -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm \frac{L_x}{2}} = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\pm \frac{L_y}{2}} = 0, \\ -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\frac{e}{2}} = +\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=-\frac{e}{2}} = hT, \end{cases}$$



### Linéarisation des pertes :

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = a_x \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} - \underbrace{\frac{2h}{\rho C_p e}}_{1/\tau} T(x, y, t) + \frac{Q(x, y, t)}{\rho C_p}$$

### Résolution de l'équation :

$$\Theta(\alpha_n, \beta_m, p) = \frac{\phi(\alpha_n, \beta_m, p)}{\rho C_p (p + K)}$$

Pour :  $Q(x, y, t) = \delta(x, y, t)$ , alors :

$$\mathcal{H}(\alpha_n, \beta_m, t) = \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{\psi \cdot \delta(\alpha_n, \beta_m)}{(p + K)} \right) = \psi \cdot \delta(\alpha_n, \beta_m) \exp(-Kt).$$

### Réponse impulsionnel du thermoconvertisseur

Coefficient de calibration qui sera déterminé par la suite

## Description de la méthode inverse :

En se basant sur la solution analytique du problème du thermoconvertisseur, on peut écrire :

$$T(x, y, t) = Q(x, y, t) \otimes \mathcal{H}(x, y, t), \quad \longrightarrow \quad T(x, y, t) = \int_0^{+\infty} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} Q(x - x_0, y - y_0, t - t_0) \times \mathcal{H}(x_0, y_0, t_0) \, dx_0 \, dy_0 \, dt_0$$

Après passage dans l'espace de Fourier :

$$\theta(\alpha_n, \beta_m, t) = \int_0^{+\infty} \phi(\alpha_n, \beta_m, t - t_0) \times \mathcal{H}(\alpha_n, \beta_m, t_0) \, dt_0 \quad \longrightarrow \quad \theta(\alpha_n, \beta_m, t) = \phi(\alpha_n, \beta_m, t) \otimes_t \mathcal{H}(\alpha_n, \beta_m, t)$$

Finalement, la source est déduite grâce à l'équation suivante :

$$\phi(\alpha_n, \beta_m, t) = \theta(\alpha_n, \beta_m, t) \otimes_t \frac{1}{\mathcal{H}(\alpha_n, \beta_m, t)}$$

Pour chaque mode, on applique une inversion par MCL avec régularisation de Tikhonov :

$$\phi(\alpha_n, \beta_m, t) = (S'_{i,j,t \times t} S_{i,j,t \times t} + \mu D'_{t \times t} D_{t \times t})^{-1} S'_{i,j,t \times t} \times \theta(\alpha_n, \beta_m, t)$$

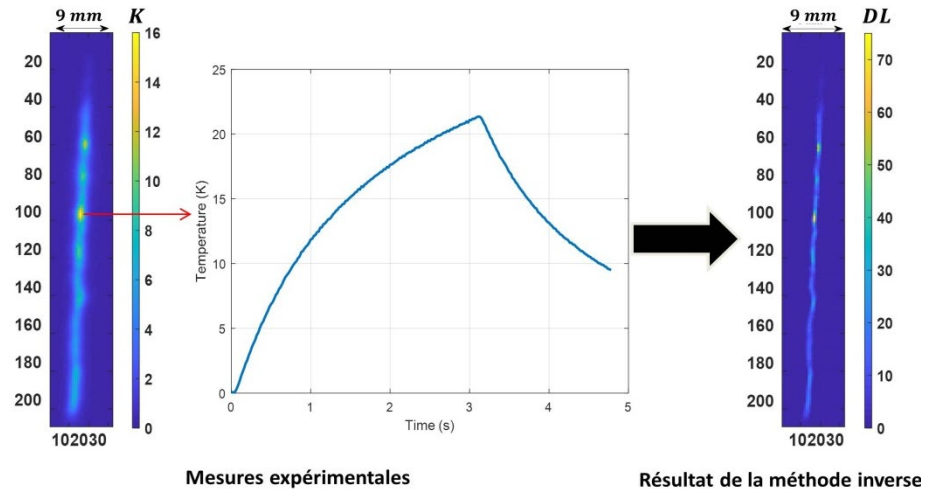
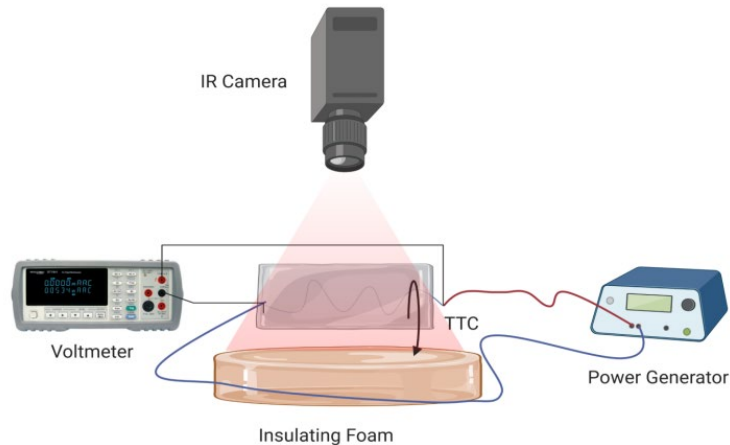
- S : matrice de Toeplitz (matrice des réponses impulsionnels) de taille  $(t \times t)$ ,
- D : Matrice de Dérivation de taille  $(t \times t)$ ,
- $\mu$  : Coefficient de régularisation.

Dans le but de retrouver ensuite la distribution spatiale de la source, deux transformée inverse en cosinus sont nécessaires :

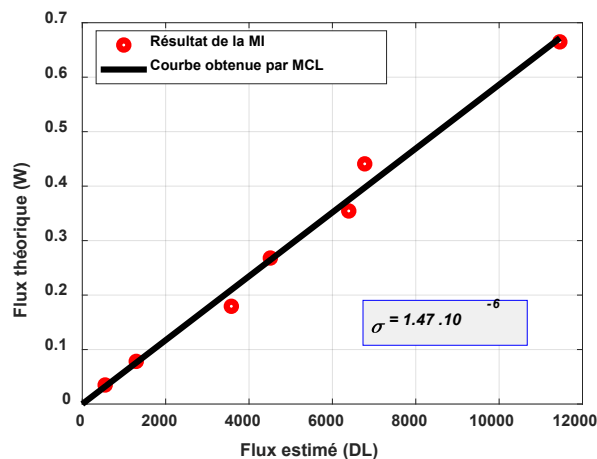
$$Q(x, y, t) = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \phi(\alpha, \beta, t) \cos(\alpha.x) \cos(\beta.y) \, d\alpha \, d\beta$$

# Calibration du thermoconvertisseur

Propriétés thermo-physique du thermoconvertisseur sont inconnues == on procède à une calibration par effet joule.



Le coefficient de calibration à pour but de prendre en compte le  $\rho C_p$  dans l'estimation du flux.

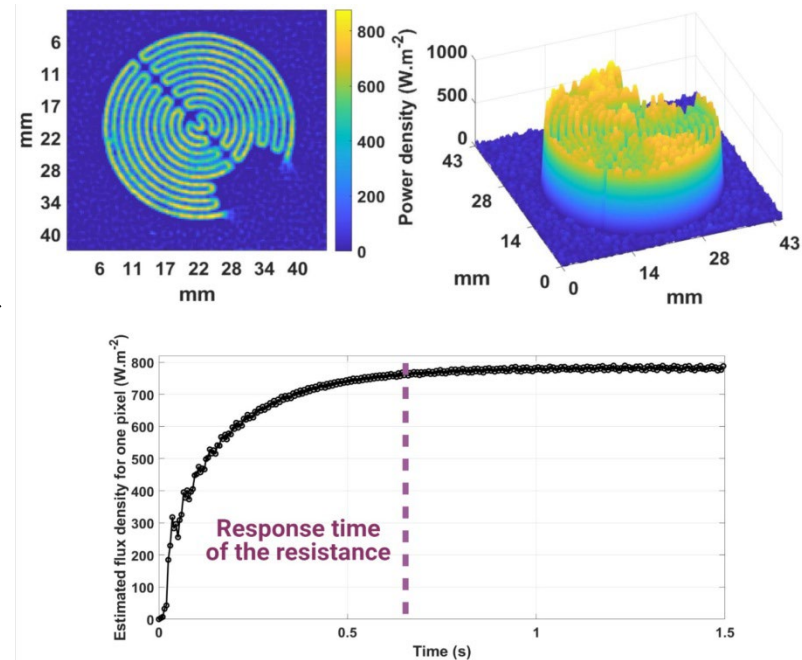
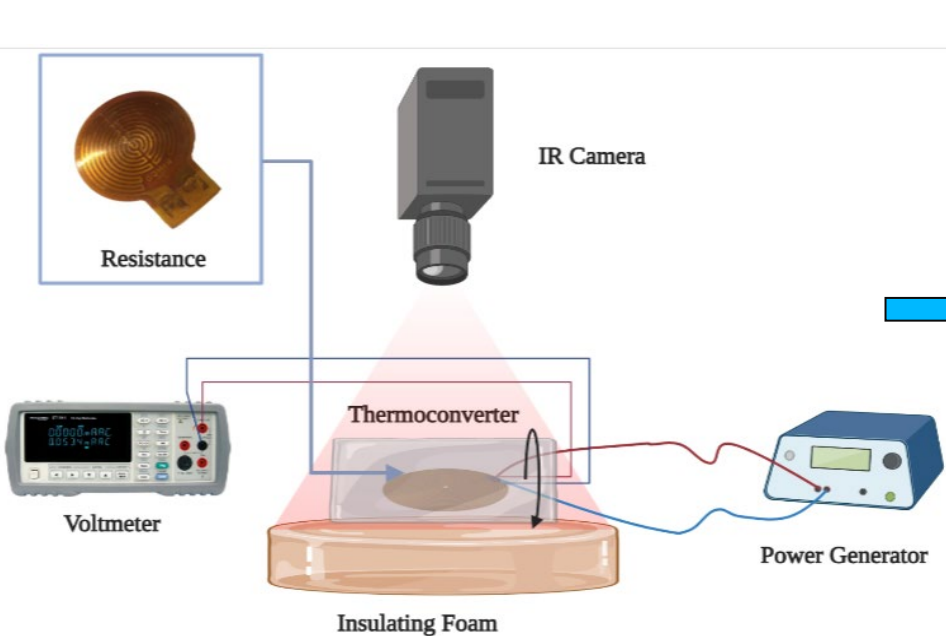


- Coefficient de calibration :  $\psi = 5,8 \cdot 10^{-5}$
- L'écart-type est égale à  $1,47 \cdot 10^{-6}$  avec une erreur de  $114 \mu W$  sur la valeur du flux estimée

# Validation sur une résistance

Résistance chauffante :  $R=73 \Omega$  ;  $U=4,93 \text{ V}$  ;  $P=333 \text{ mW}$

**Absorbance = 100%**

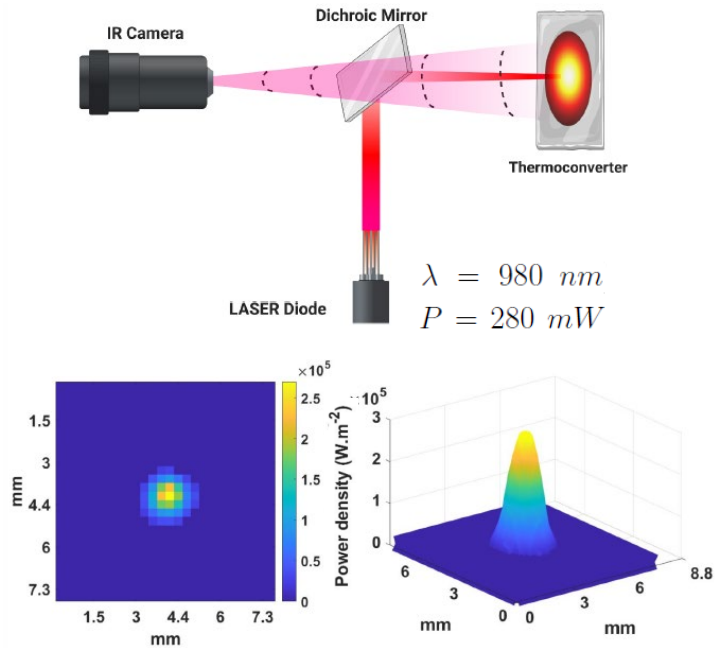


$$P_{\text{estimée}} = \iint \phi_{\text{estimée}} = 331.5 \pm 1.9 \text{ mW}$$



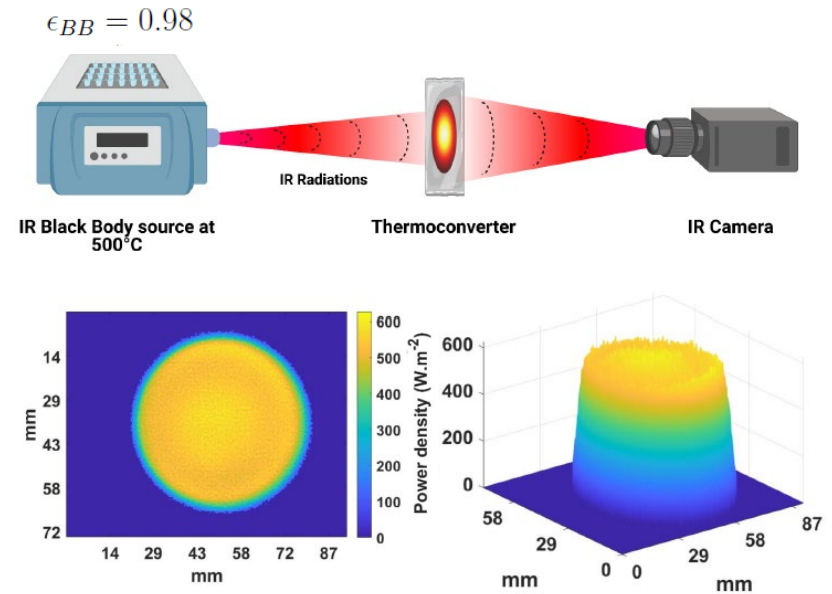
# Application pour des sources IR

Source Laser NIR: **Absorbance = 100%**



$$P_{\text{estimée}} = \iint \phi_{\text{estimée}} = 285.3 \pm 3.7 \text{ mW}$$

Source IR Corps noir : **Absorbance = 100%**



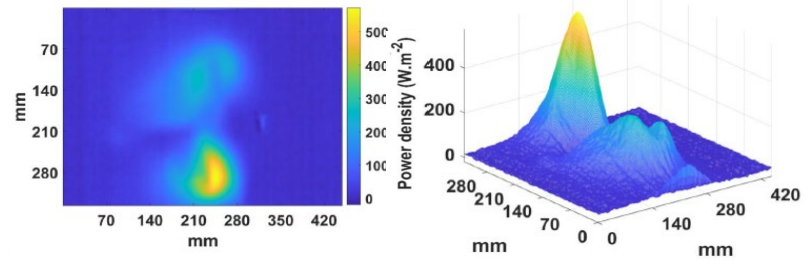
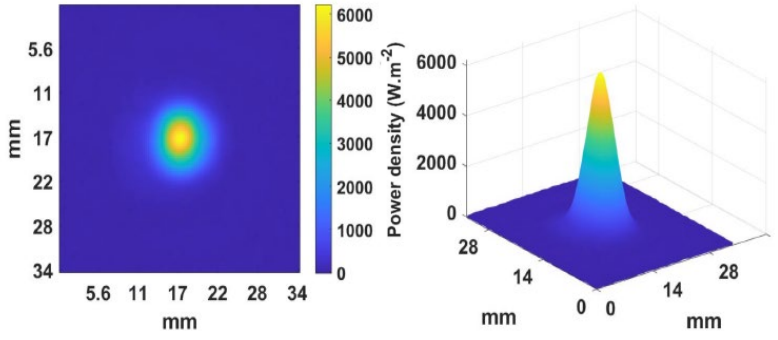
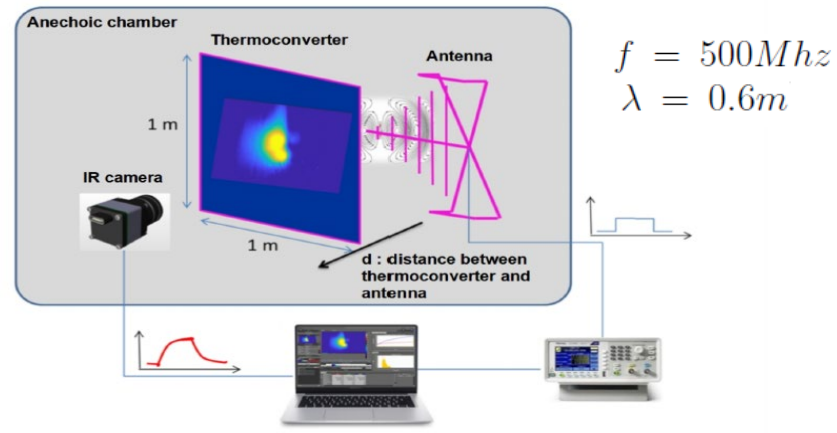
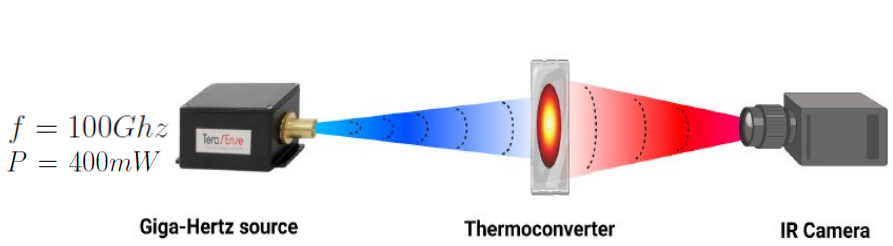
$$P_{\text{estimée}} = \iint \phi_{\text{estimée}} = 1.357 \pm 0.015 \text{ W}$$



# Application pour d'autres sources (Ghz-RF)

Source giga-Hertz : **Absorbance = 62%**

Source RF :  $P = ?$ , **Absorbance = ?**



$$P_{\text{estimée}} = \iint \phi_{\text{estimée}} \times \frac{1}{\mathcal{A}} = 404.8 \pm 5 \text{ mW}$$

$$P_{\text{estimée}} = \iint \phi_{\text{estimée}} \times \frac{1}{\mathcal{A}} = 6.5 \pm 0.17 \times \frac{1}{\mathcal{A}} \text{ W}$$



# Conclusion

