



HAL
open science

Thermométrie ultrasonore sur des géométries variables dans le temps. Application à la fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre.

Marie Palla, Florian Le Bourdais, Jean-Paul Garandet

► To cite this version:

Marie Palla, Florian Le Bourdais, Jean-Paul Garandet. Thermométrie ultrasonore sur des géométries variables dans le temps. Application à la fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre.. CFA 2022 - 16ème Congrès Français d'Acoustique, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03848449

HAL Id: hal-03848449

<https://hal.science/hal-03848449>

Submitted on 29 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

The logo for CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) features the lowercase letters 'cea' in a white, rounded, sans-serif font. A horizontal green line is positioned below the letters.

16^{ème} Congrès Français d'Acoustique

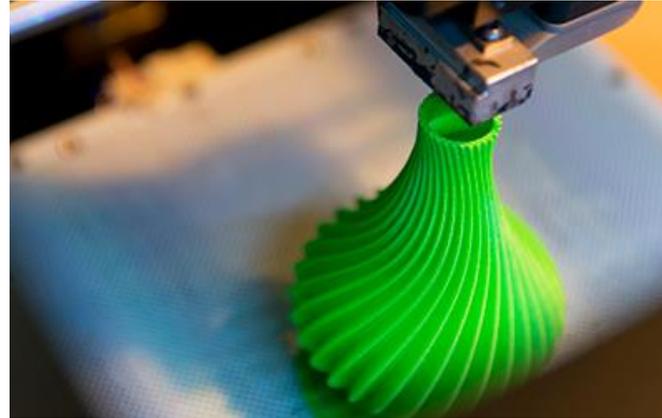
Thermométrie Ultrasonore en Fabrication Additive par fusion sur lit de poudre

Marie Palla, Florian Le Bourdais, Jean-Paul Garandet

Université Paris-Saclay, CEA, List, F-91120, Palaiseau, France

15 avril 2022

- **Fabrication Additive ou Impression 3D :** *Procédés permettant de fabriquer un objet par ajout de matière, couche par couche*

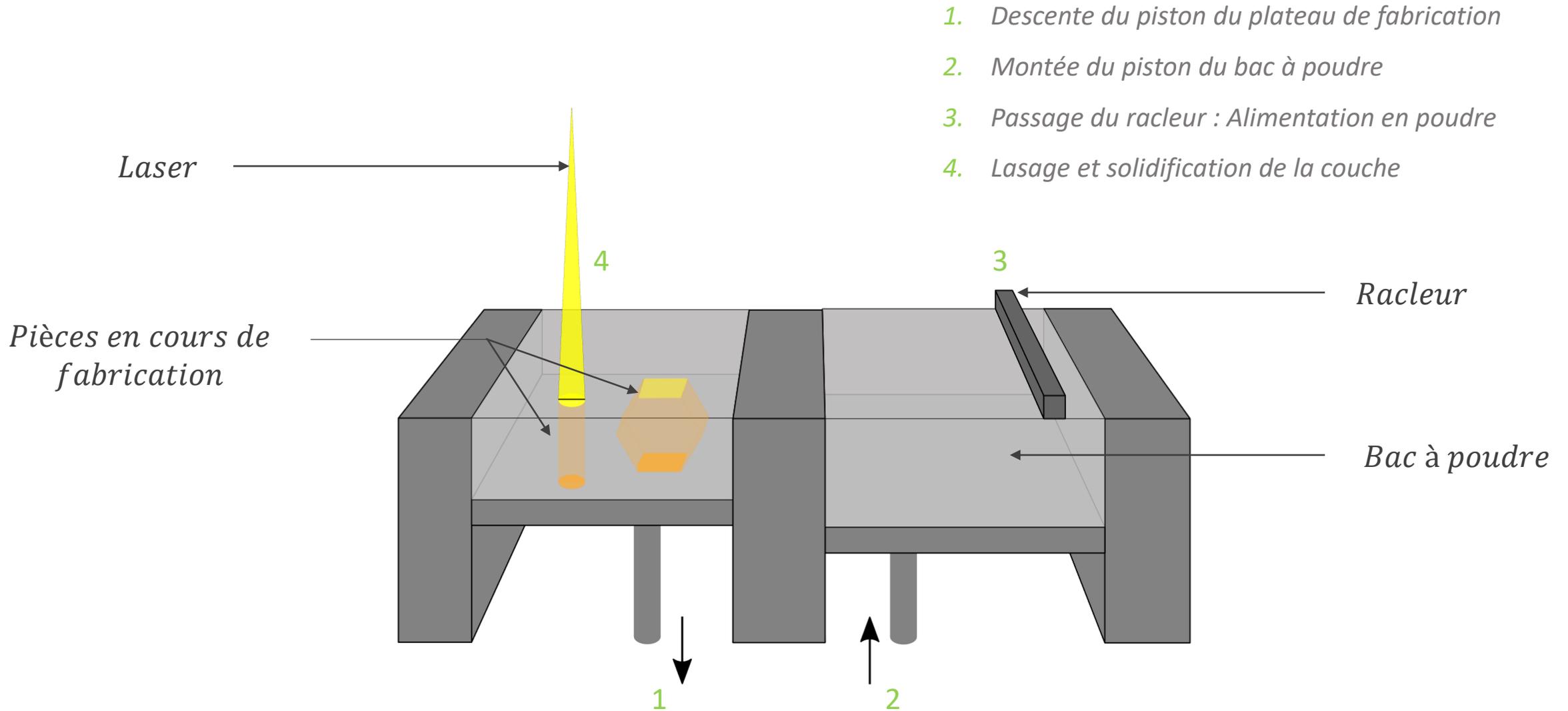
XtreeE[®]Ricoh[®]Irepa Laser[®]

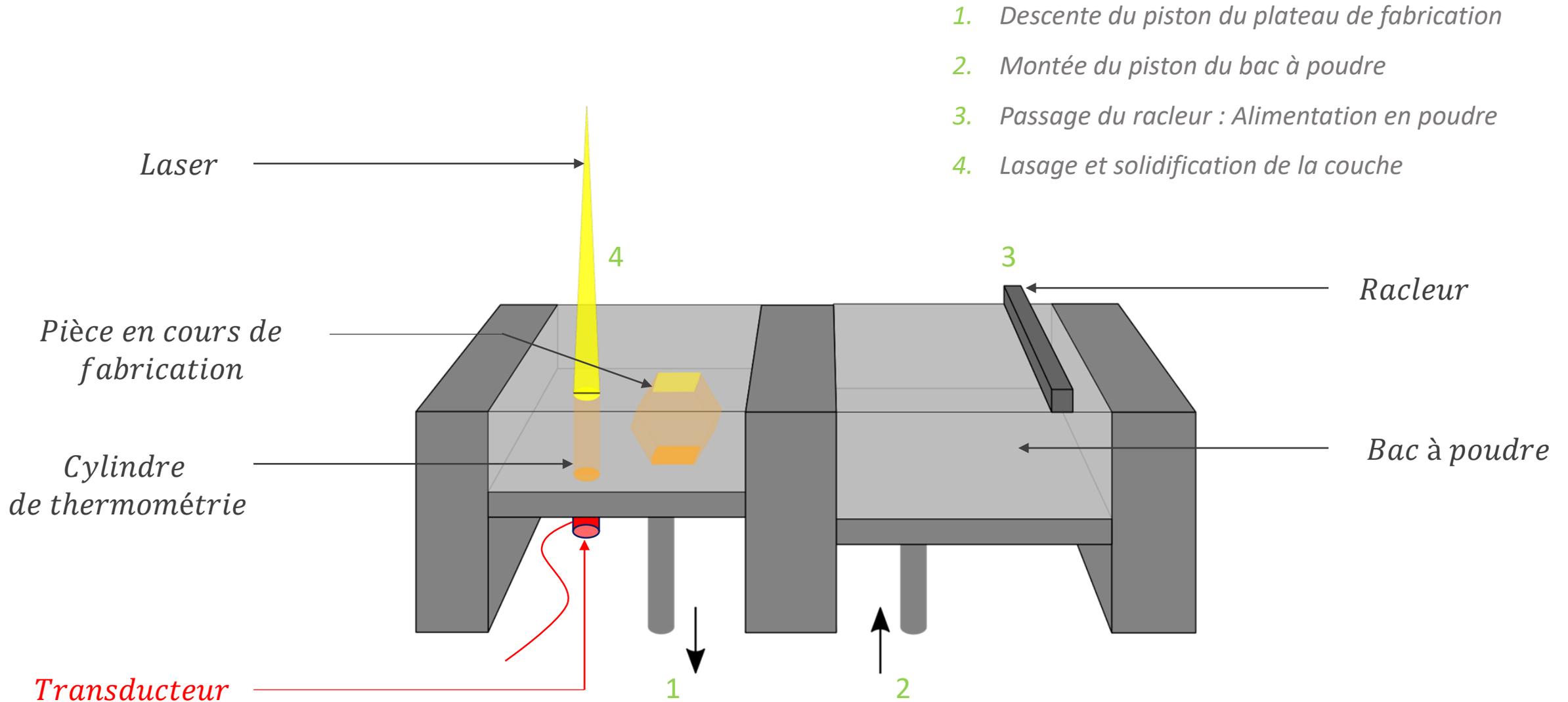
- **Instrumentation des machines lit de poudre métallique (FLLP) :**

- Large utilisation de ce procédé par les industriels
- Nécessité de contrôler les pièces construites par suivi in situ
- En particulier : la température interne → **Difficile à évaluer par techniques conventionnelles**

- **Objectif :** *Développer une technique de thermométrie temps réel d'une pièce en cours de fabrication, par mesure de temps de vol ultrasonore*

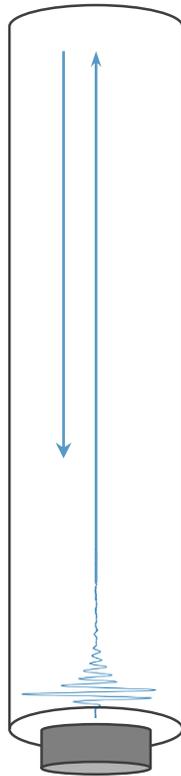
- ▶ **Partie I : Contexte et Principes de thermométrie par ultrasons**
- ▶ **Partie II : Mesures expérimentales en machine FLLP**
- ▶ **Partie III : Développement du modèle thermique**





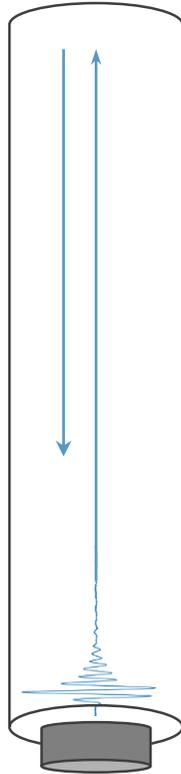
Propagation d'une
impulsion ultrasonore

$$t_L = 2 \int_0^L \frac{dz}{v(z, T)}$$



Propagation d'une
impulsion ultrasonore

$$t_L = 2 \int_0^L \frac{dz}{v(z, T)}$$

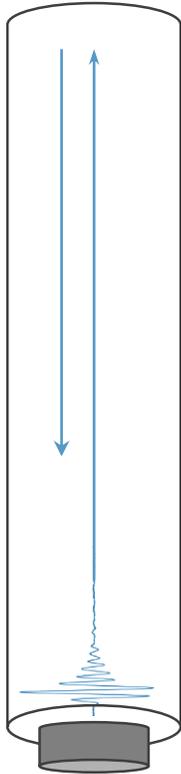


$$v(z, T) = -a T(z) + b \quad [1]$$

[1] T.-F. Chen et al., *Measurement Science and Technology*, Vol. 10, 1999

Propagation d'une
impulsion ultrasonore

$$t_L = 2 \int_0^L \frac{dz}{v(z, T)}$$



$$v(z, T) = -a T(z) + b \quad [1]$$



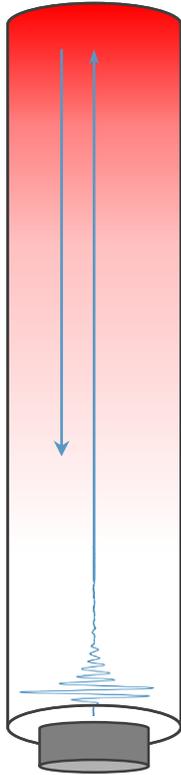
Modèle de transfert
de la chaleur

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \Delta T$$

[1] T.-F. Chen et al., *Measurement Science and Technology*, Vol. 10, 1999

Propagation d'une
impulsion ultrasonore

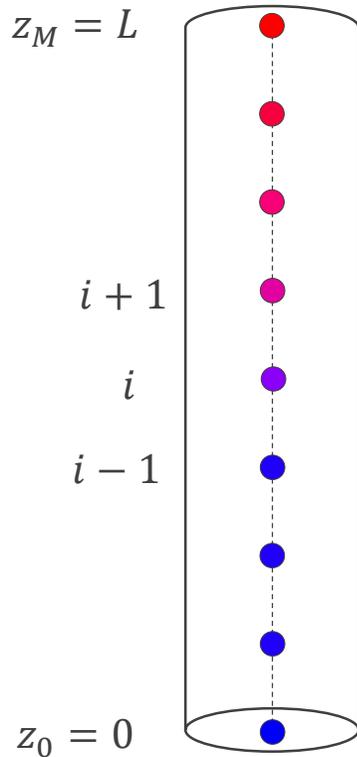
$$t_L = 2 \int_0^L \frac{dz}{v(z, T)}$$



$$v(z, T) = -a T(z) + b \quad [1]$$

[1] T.-F. Chen et al., *Measurement Science and Technology*, Vol. 10, 1999

Modèle de la littérature [2] : Suivi in situ de T sur plaque et cylindre



Modèle Direct :

- Discrétisation 1D de l'espace et de l'équation de diffusion de la chaleur
- Résolution numérique par différences finies [2] :

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{k}{\rho c_p} \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) \Rightarrow \text{Mesure de } t_L$$

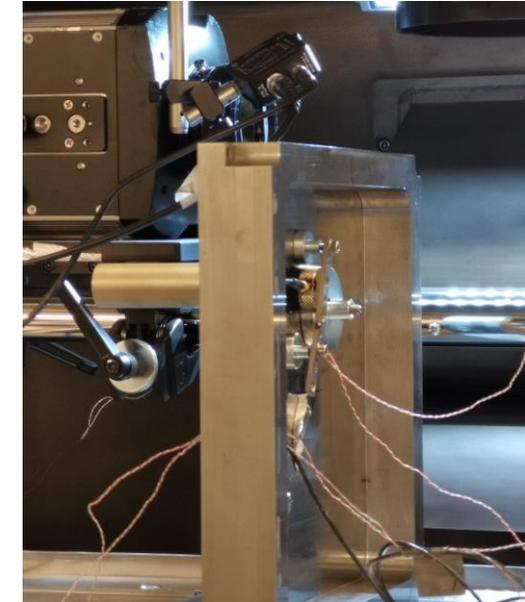
Modèle Inverse : $T(z = L, t)$ à partir de t_L

$$t_L^{n+1} = 2 \int_0^L \frac{dx}{v(z, T)} \Rightarrow t_L^{n+1} \approx \Delta x \left(\frac{1}{v_0^{n+1}} + \frac{1}{v_M^{n+1}} + 2 \sum_{i=1}^{M-1} \frac{1}{v_i^{n+1}} \right)$$

Formule des trapèzes

$$\Rightarrow T_M^{n+1} = \frac{b}{a} - \frac{1}{a} v_M^{n+1}$$

[2] I. Ihara, T. Tomomatsu et al., *Advancement in Sensing Technology: New Developments and Practical Applications*, 2013

Essais de juin 2021 : Dispositif

→ Transducteur :

- Onde longitudinale
- Fréquence 5 MHz, \varnothing 25 mm
- Fréquence acquisition : 10 Hz
- Ajout de gain pendant fabrication

→ Autres instruments :

- 2 Thermocouples
- Photodiode
- Caméra thermique

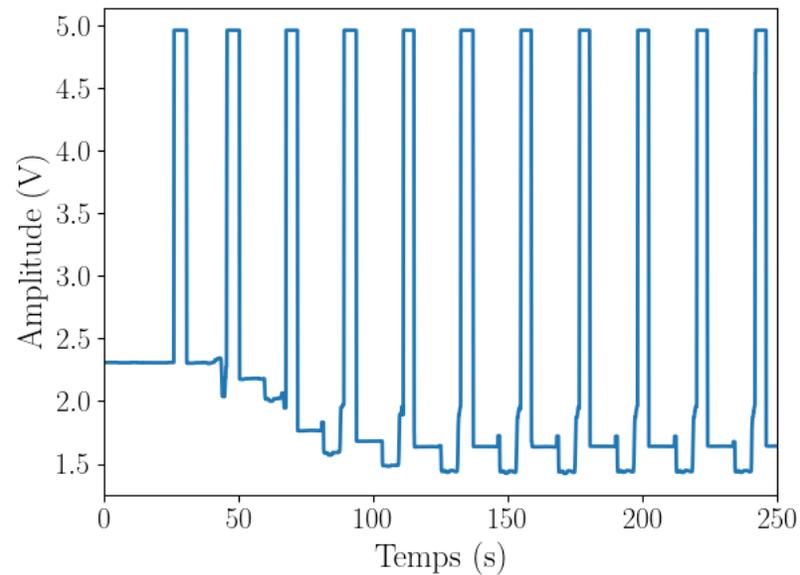
Essais de juin 2021 : Données acquises

- Signaux ultrasonores
- Températures des thermocouples
- Photodiode
- Caméra thermique

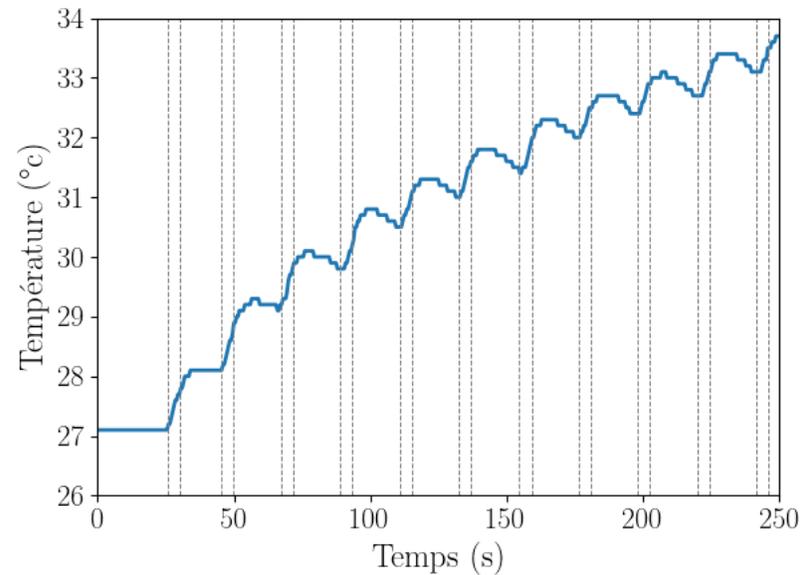
Essais de juin 2021 : Données acquises

- Signaux ultrasonores
- Températures des thermocouples
- Photodiode
- Caméra thermique

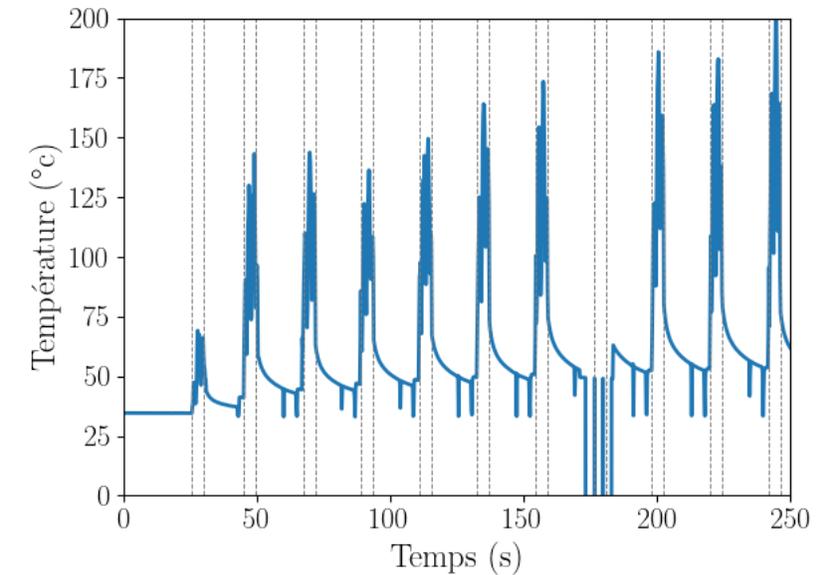
► Photodiode



► Thermocouple



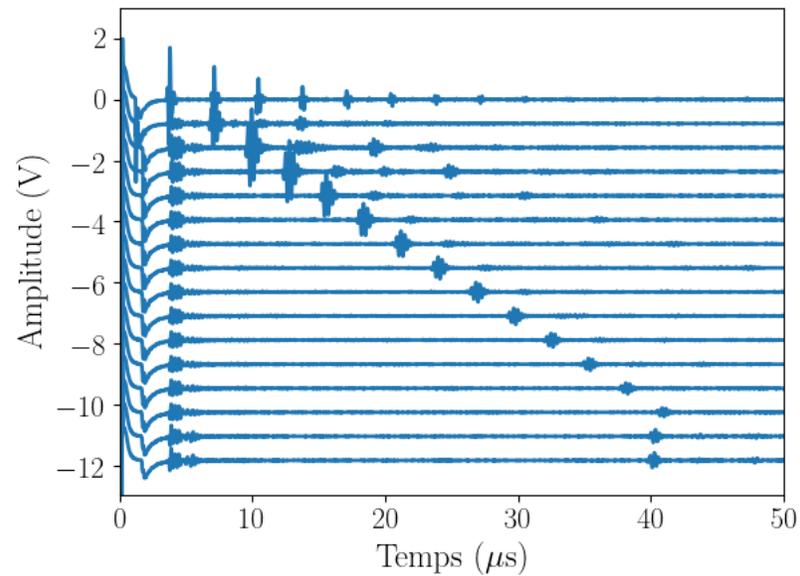
► Caméra thermique



Essais de juin 2021 : Données acquises

- Signaux ultrasonores
- Températures des thermocouples
- Photodiode
- Caméra thermique

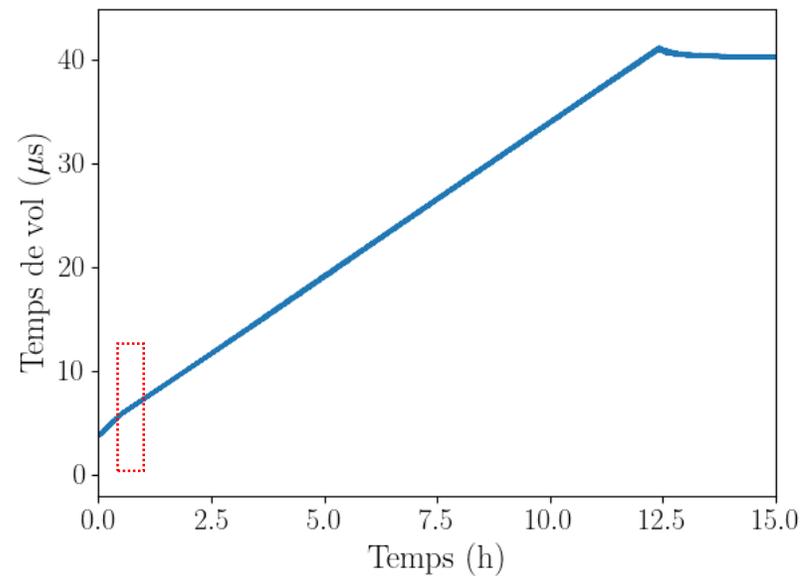
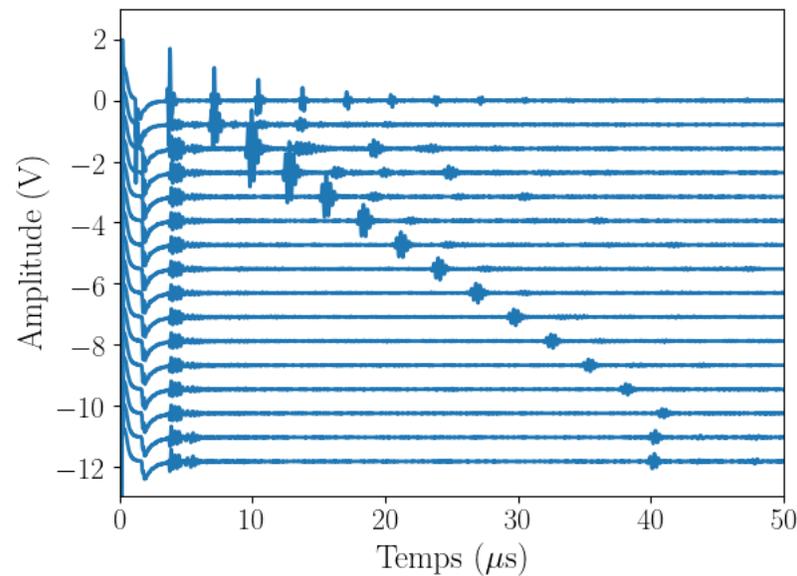
► Signaux ultrasonores



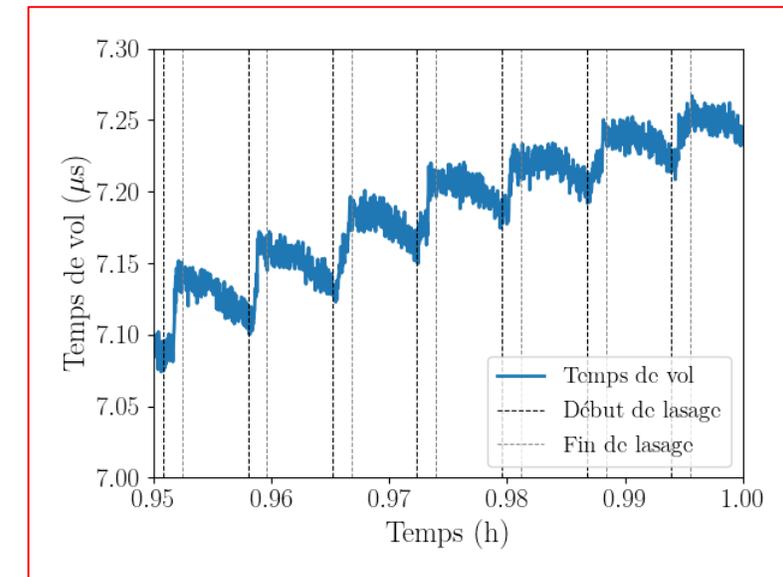
Essais de juin 2021 : Données acquises

- Signaux ultrasonores
- Températures des thermocouples
- Photodiode
- Caméra thermique

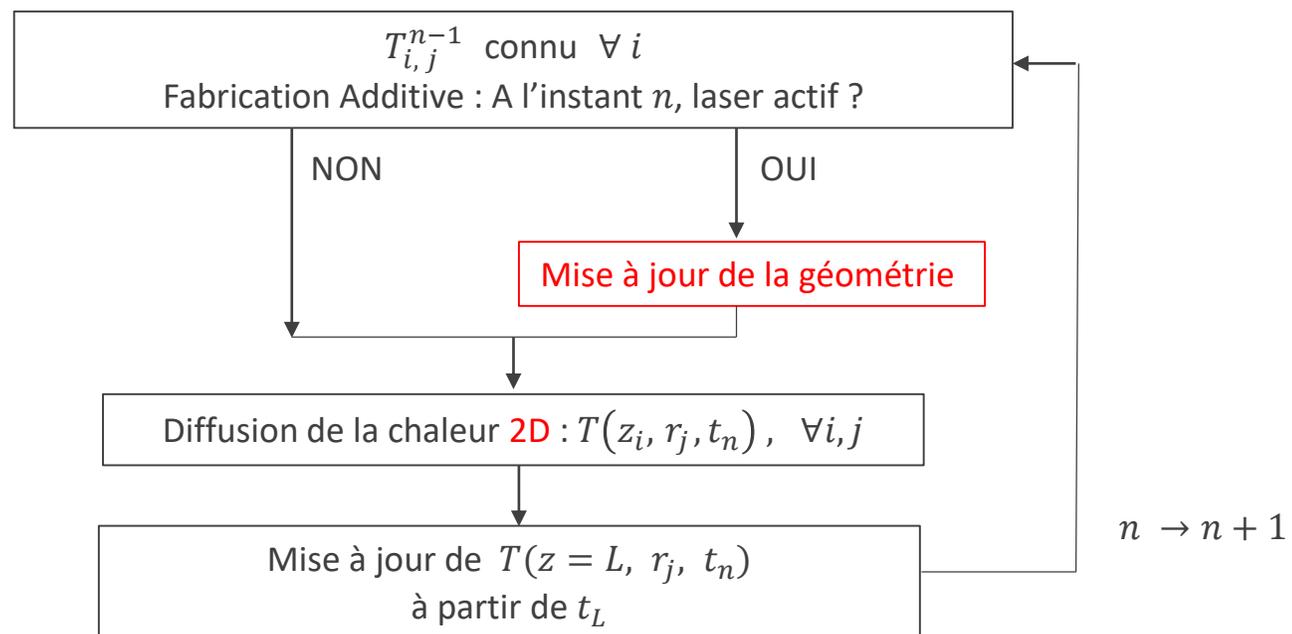
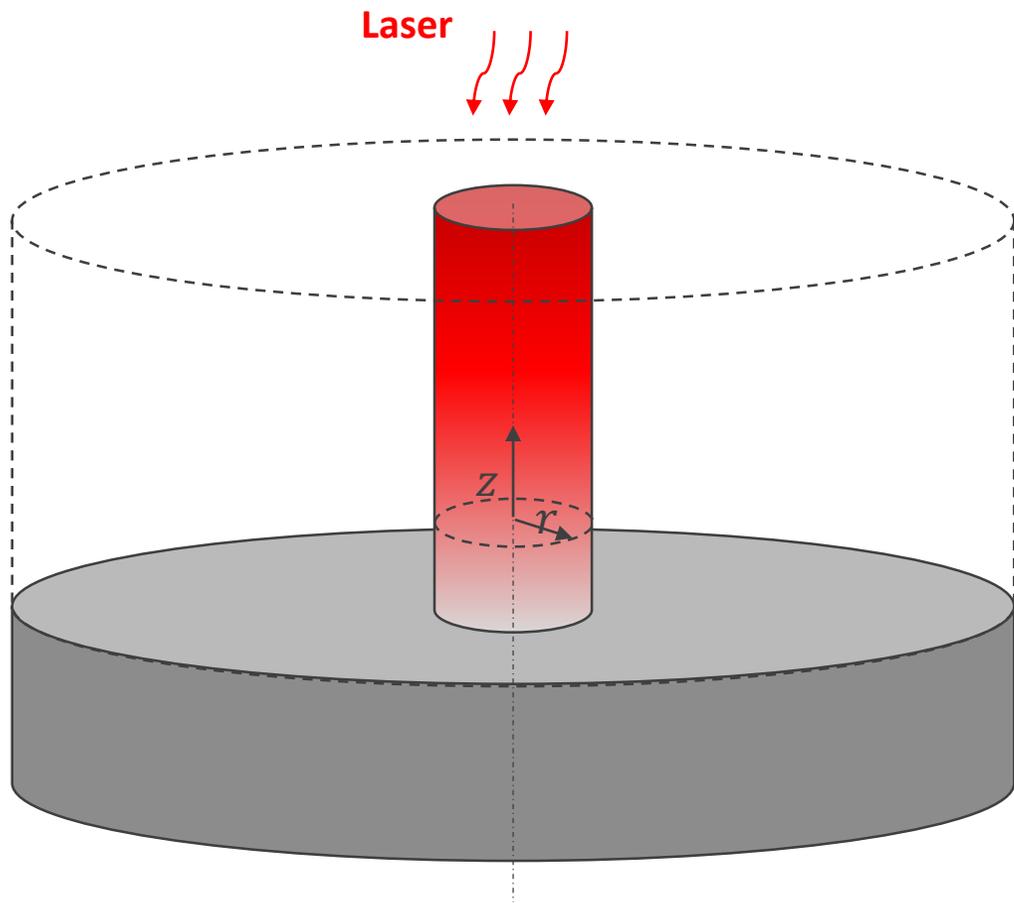
► Signaux ultrasonores : Calcul du temps de vol



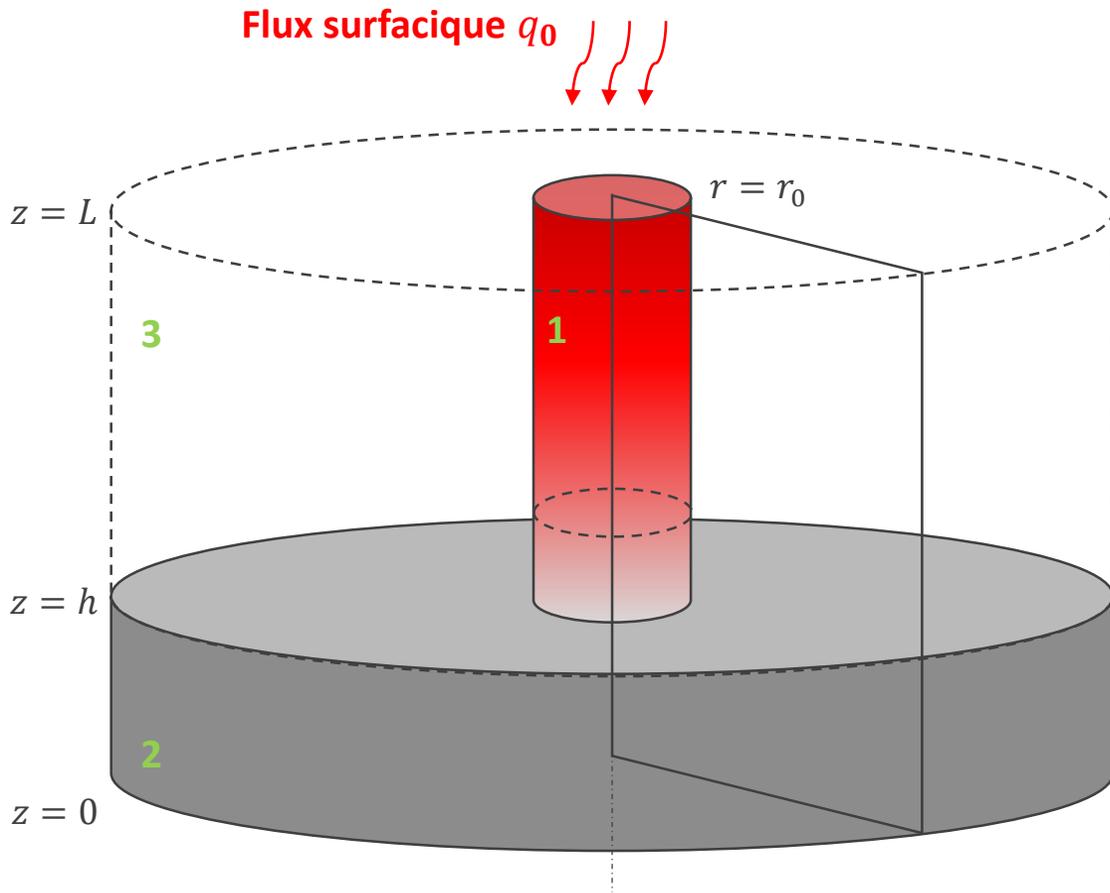
→ Evolution du temps de vol sur une couche



Modèle Direct développé : Suivi *in situ* de T en Géométrie Variable, 2D axisymétrique



Modèle Direct développé : Suivi in situ de T en Géométrie Variable, 2D axisymétrique



- Hypothèses :
 - Solides homogènes et isotropes
 - Pas de convection, rayonnement
- λ, ρ, c_p connus pour chaque matériau :
 - 1 : Inconel 625 solidifié, 2 : Acier, 3 : Inconel 625 poudre

- Domaines 1 – 2 – 3 :
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]$$

- Interfaces : Egalité des flux

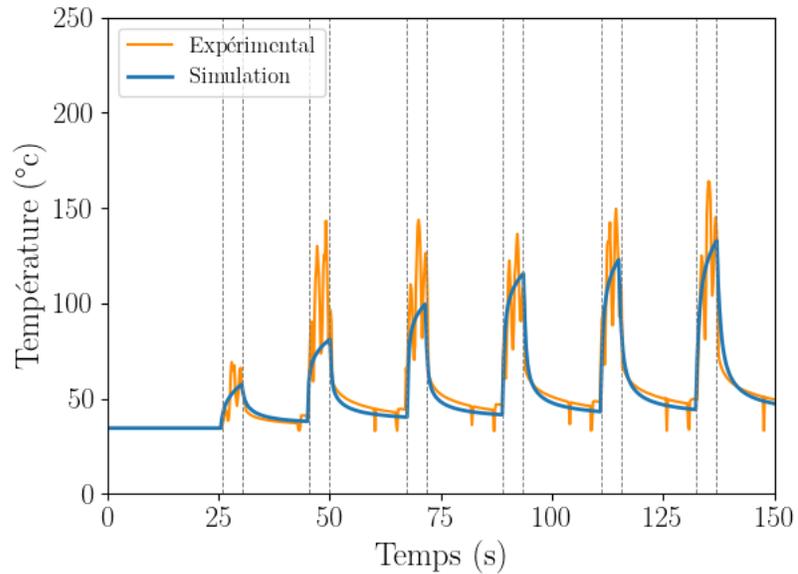
- Conditions aux bords :

→ Laser : $\forall r < r_0, \lambda \frac{\partial T}{\partial z} (z = L) = \alpha \cdot q_0(t)$

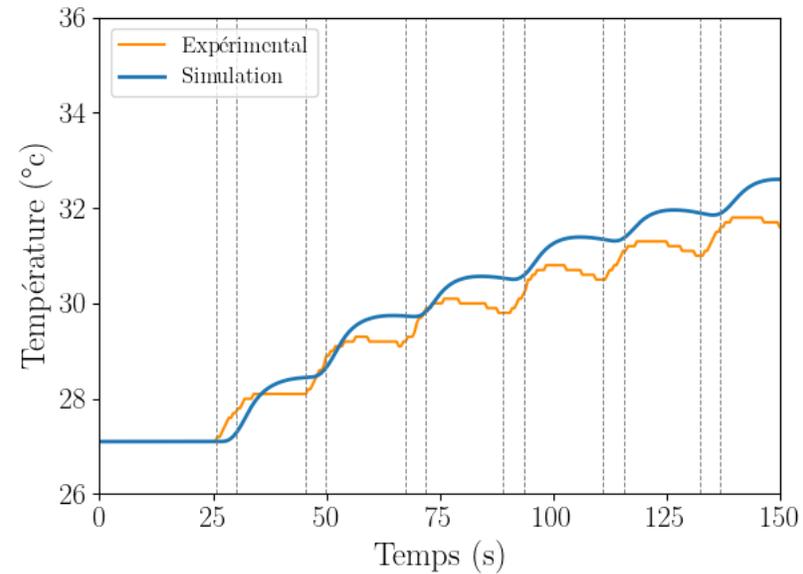
→ Sinon : $\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = 0$

Premiers résultats

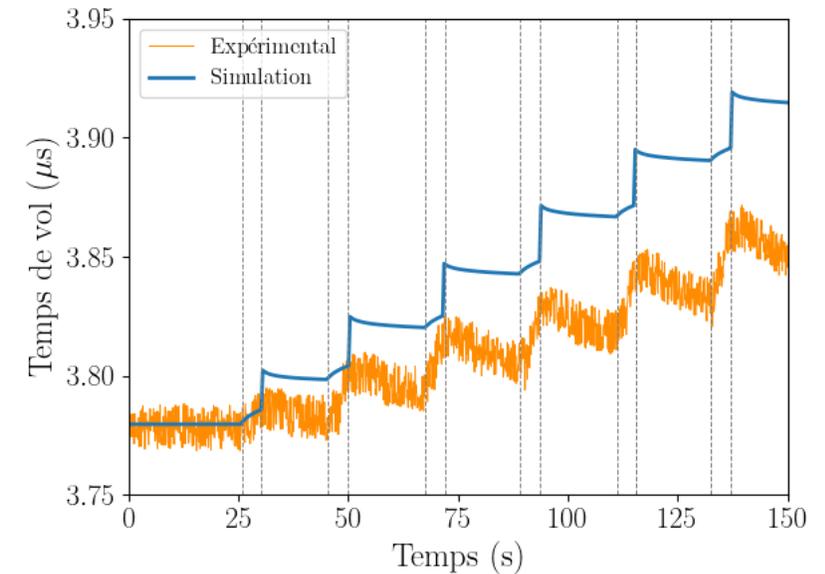
► Température bord chaud



► Température sous le plateau

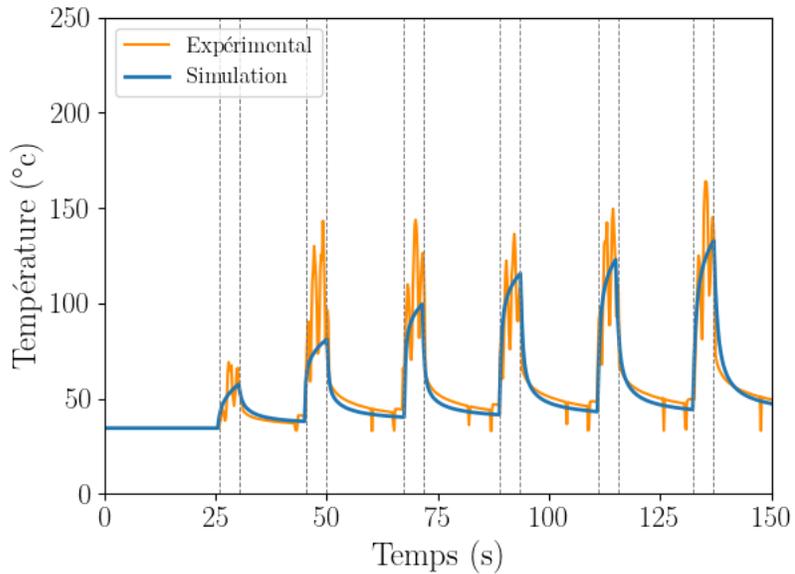


► Temps de vol

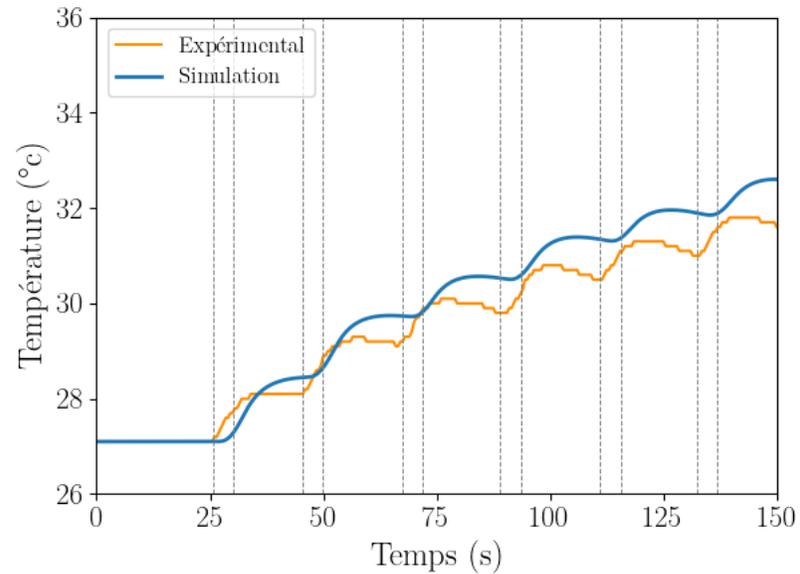


Premiers résultats

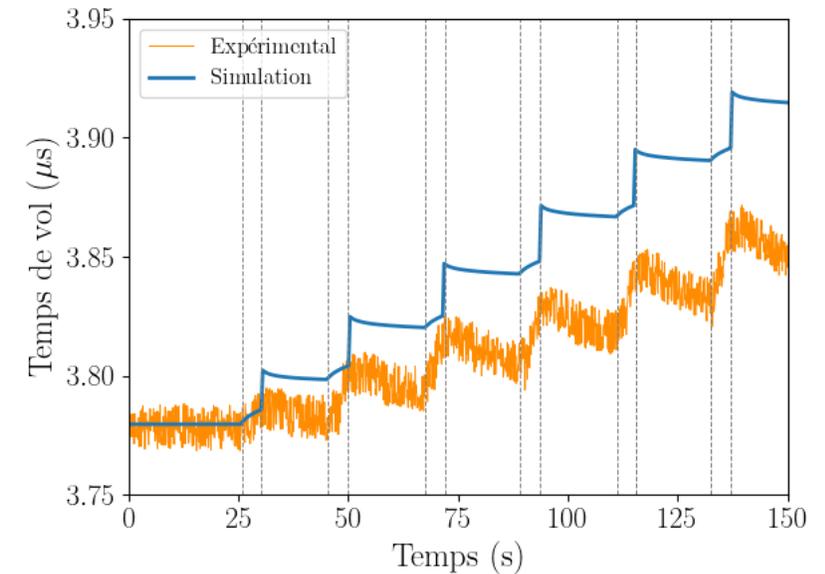
► Température bord chaud



► Température sous le plateau



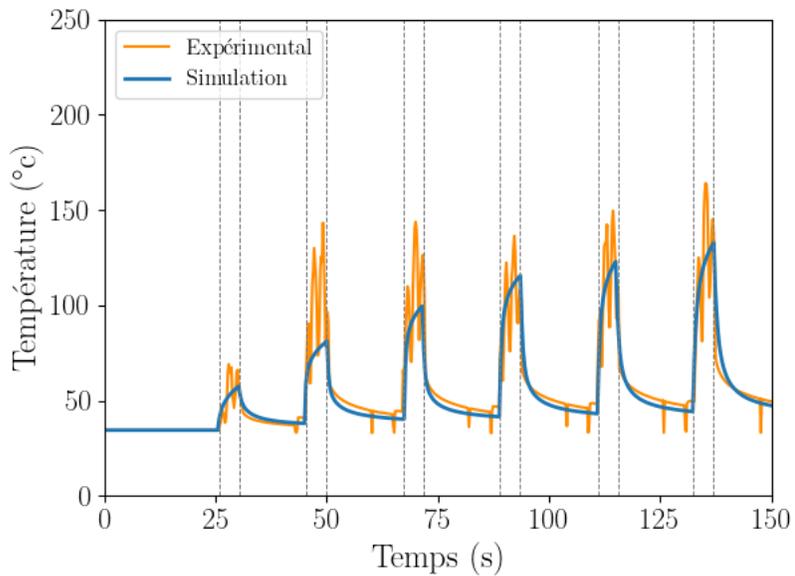
► Temps de vol



→ *Pentes de refroidissement assez similaires aux données expérimentales*

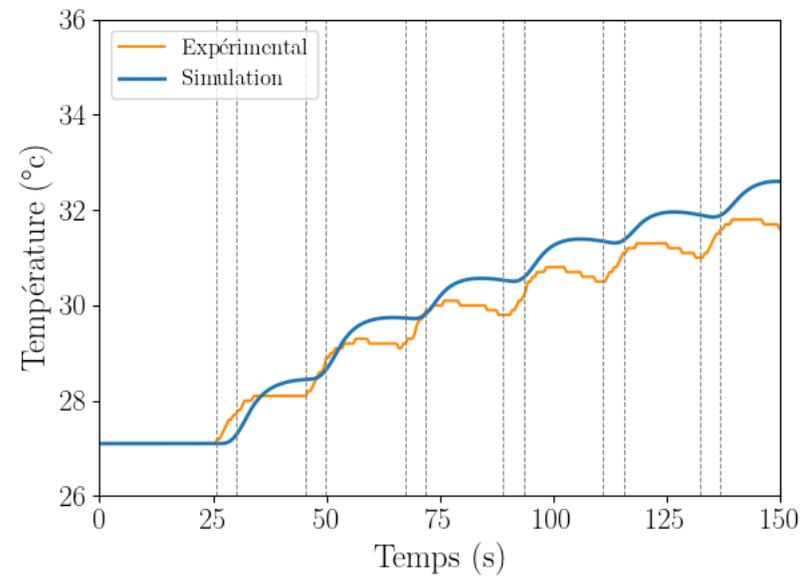
Premiers résultats

► Température bord chaud



→ *Pentes de refroidissement assez similaires aux données expérimentales*

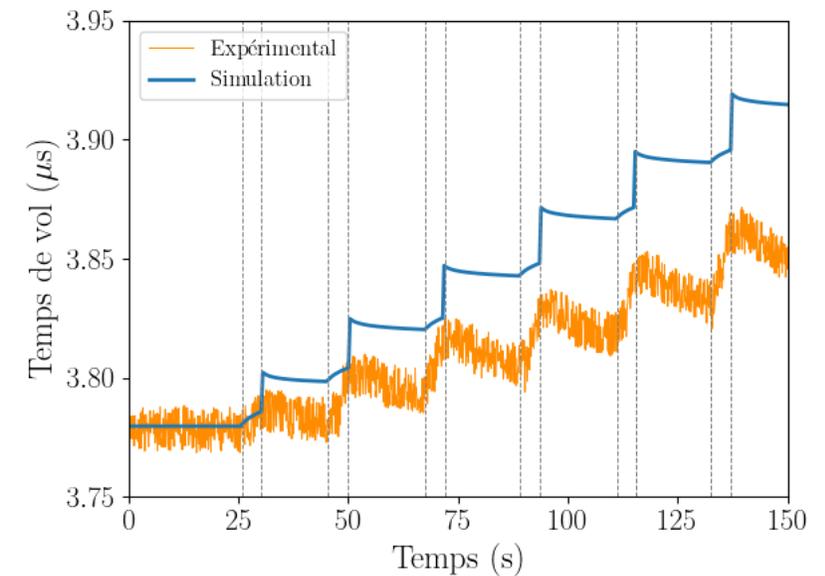
► Température sous le plateau



→ *Décalage : constante de diffusion pas assez élevée*

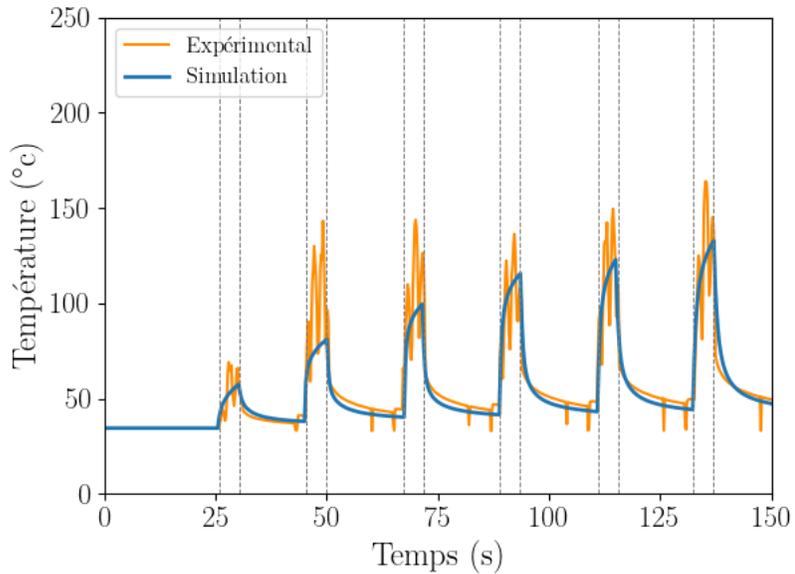
→ *Pentes de refroidissement pas assez élevées*

► Temps de vol



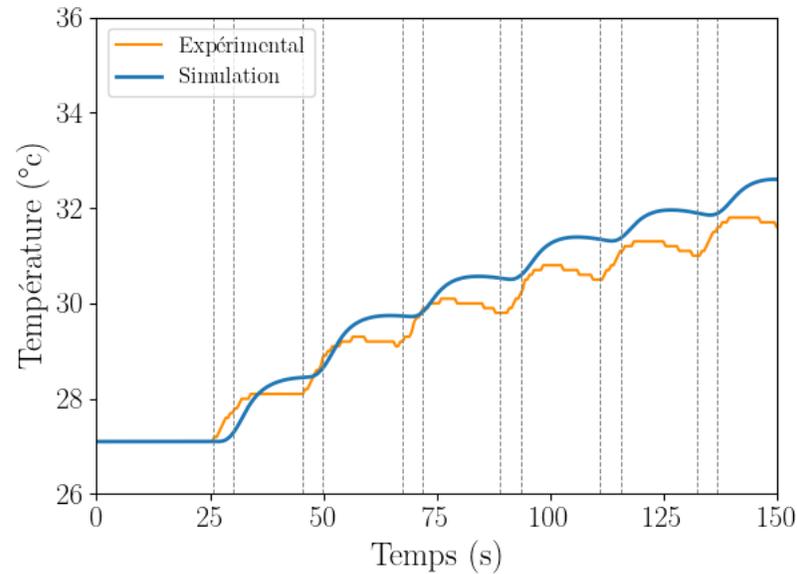
Premiers résultats

► Température bord chaud



→ *Pentes de refroidissement assez similaires aux données expérimentales*

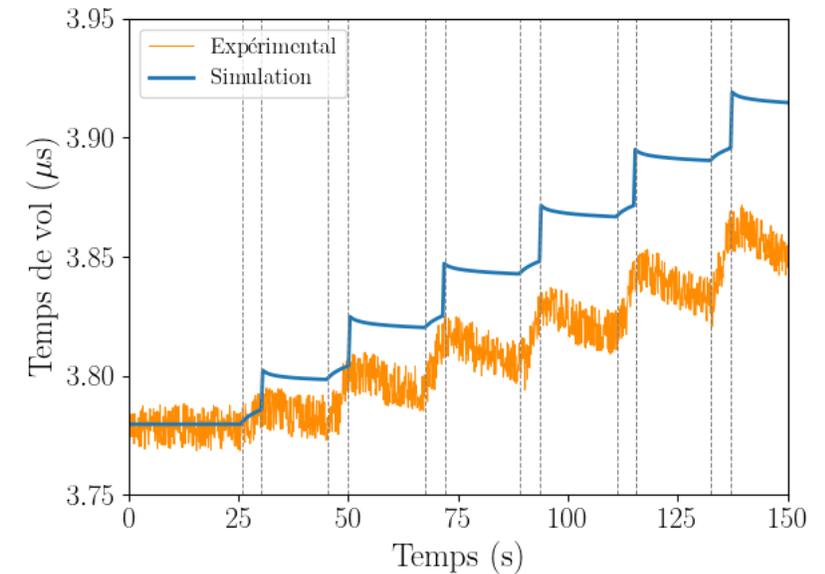
► Température sous le plateau



→ *Décalage : constante de diffusion pas assez élevée*

→ *Pentes de refroidissement pas assez élevées*

► Temps de vol



→ *Discontinuité due au changement de géométrie*

→ *Pentes de refroidissement pas assez élevées*

► A Retenir

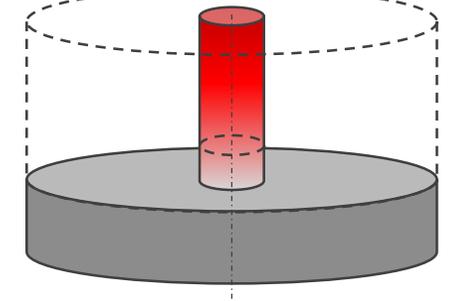
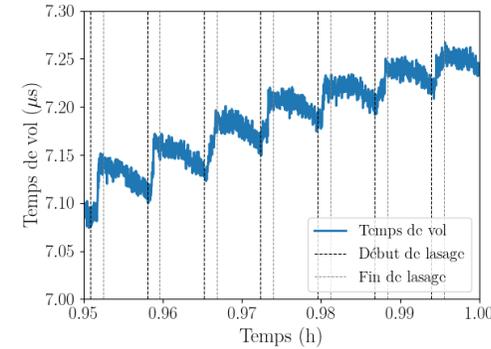
1. Instrumentation de la machine FLLP : Mesures exploitables
2. Modèle de la thermique en Fabrication Additive

► Perspectives

→ Amélioration du modèle direct

- Prise en compte Convection et Rayonnement
- Etude physique du changement de géométrie
- Dilatation thermique à prendre en compte ?

► A long terme : Suivi de T en temps réel par modèle inverse en machine !





Merci de votre attention !

marie.palla@cea.fr

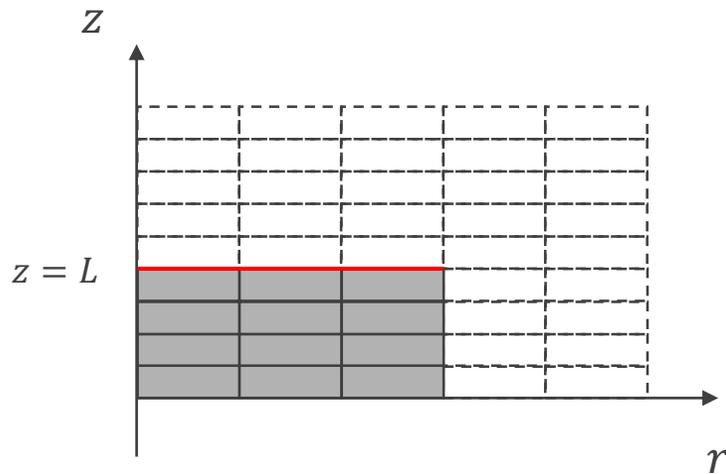
The logo for CEA (Commissariat à l'énergie atomique) is displayed in white lowercase letters 'cea' on a dark red square background. A thin green horizontal line is positioned directly below the text.

cea

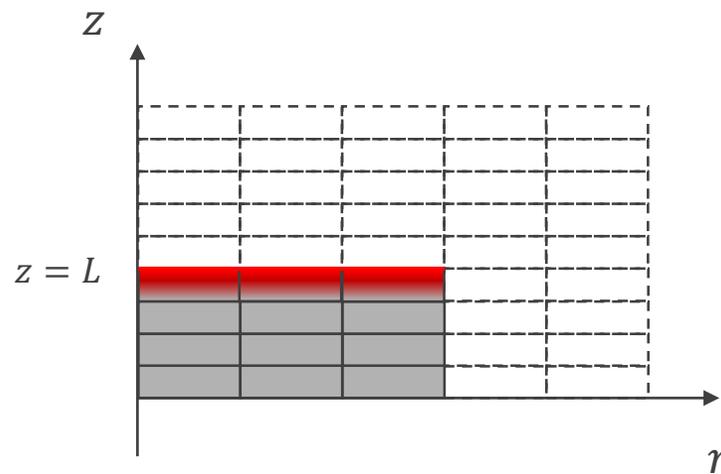
Annexes

Comment ? « Element birth and death method »

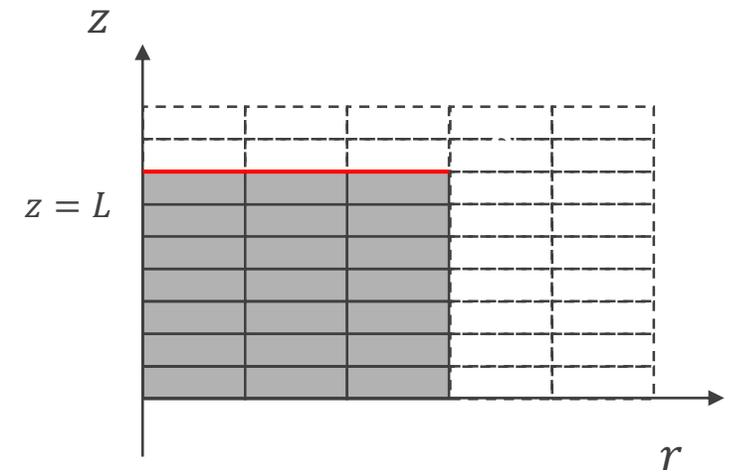
1. Grille en espace fixée à $t = 0$,
2. « Activation » des éléments en fin de lasage
3. Modification de la position de la source



Avant lasage



Début de lasage



Fin de lasage

Essais de juin 2021 : Données acquises

- Signaux ultrasonores → Calcul du Temps de Vol :
 1. Fenêtrage de l'écho d'intérêt
 2. Calcul de l'enveloppe
 3. Fit parabolique et interpolation autour du maximum
 4. Calcul du temps d'arrivée du maximum du fit

