Interaction laser/matière: étude physique et simulation numérique

Les effets thermiques d'un laser femtoseconde sur un métal

TIPE 2017-2018

Milieux: interactions, interfaces, homogénéité, ruptures

Plan

Introduction

I. Principe du laser

II. Effets thermique sur une plaque métallique

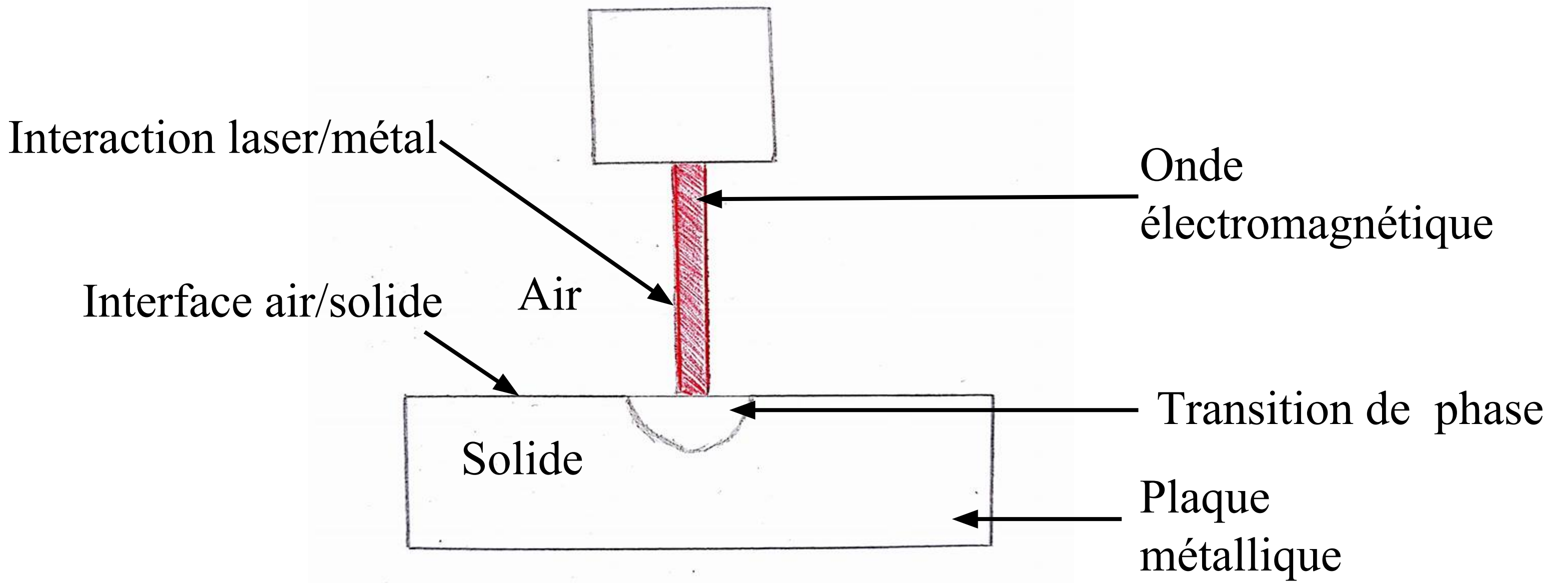
1. Processus d'ablation
2. Modélisation
3. Résolution analytique
4. Résolution numérique

Conclusion

Contributions

- Prise de contact avec des usines et laboratoires en Tunisie
- Rencontre avec un physicien, créateur de la start-up Laboratoire Laser Afrique, travaillant le laser.
- Implémentation de codes python traduisant la diffusion de chaleur dans de l'aluminium.
- Implémentation d'un code python permettant de visualiser la résolution analytique de l'équation de la chaleur par transformée de Fourier.

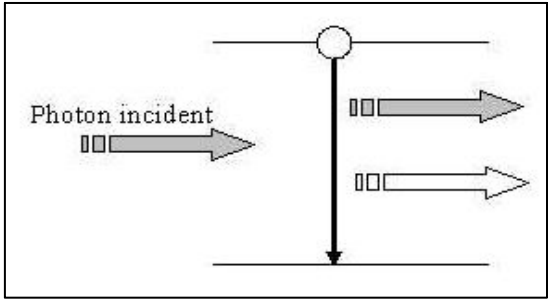
Introduction



Le Laser ?

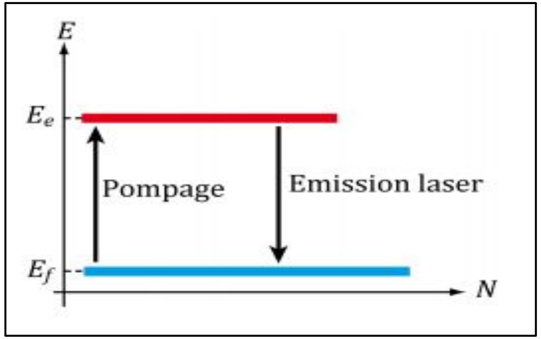
I) Principe du laser

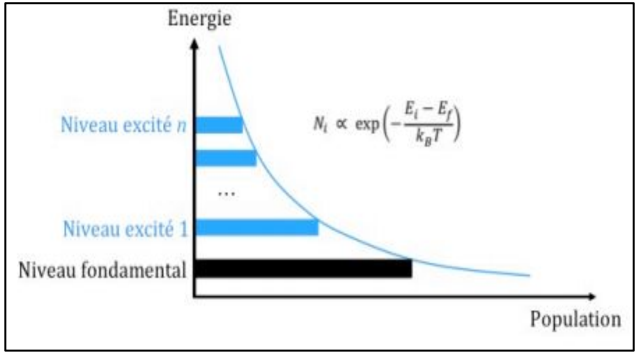
Emission stimulée

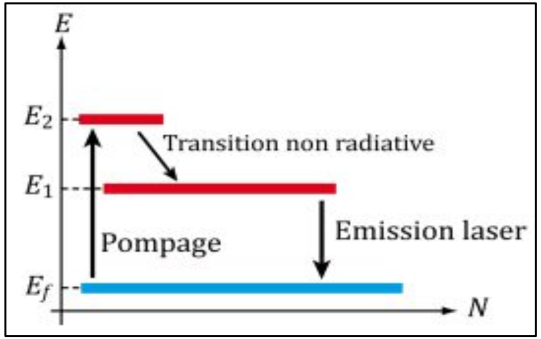


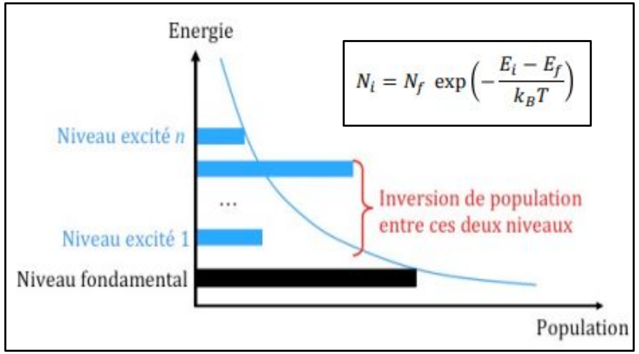
⇨ Amplification de la lumière

Inversion de population







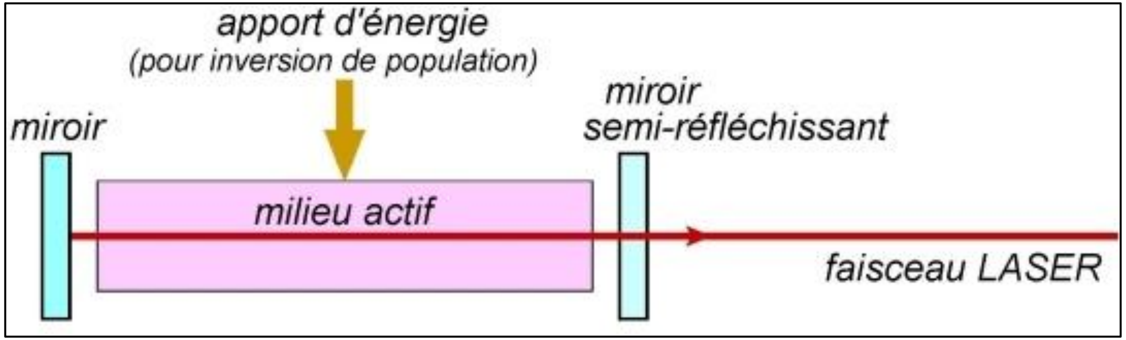


Un système à 3 niveaux :

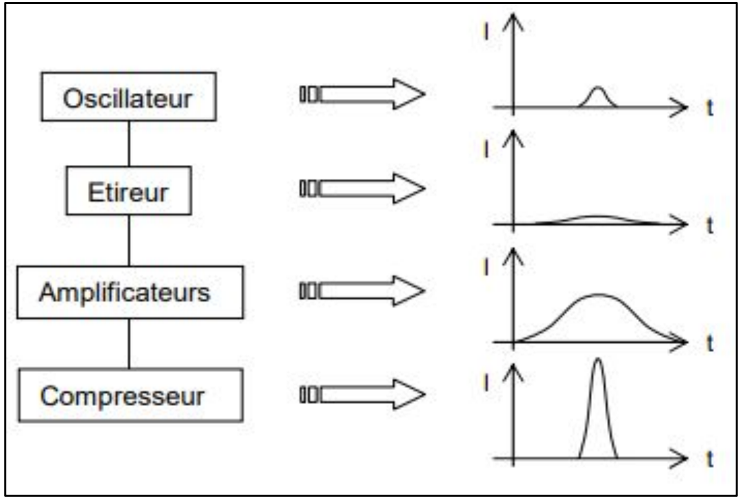
- Etat fondamentale E_f
- 2 états excités E_1 et E_2 avec $E_1 < E_2$

Milieu actif

Cavité optique



Principe de génération d'impulsions ultra-brèves:
<u>amplification à dérives de fréquences</u>



II. Effets thermiques sur une plaque métallique

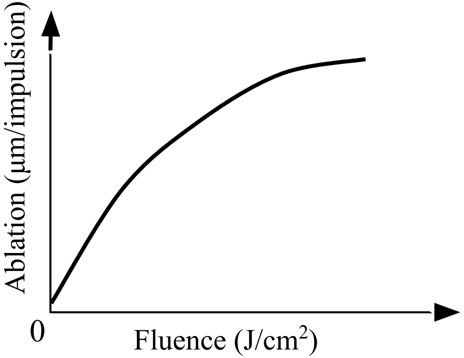
1) Processus d’ablation

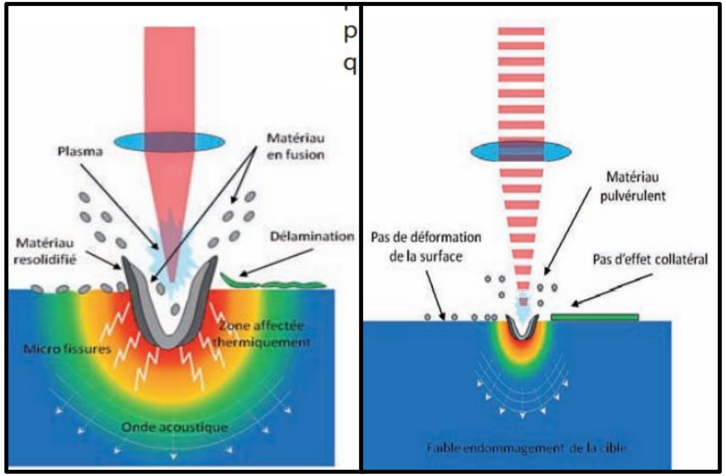
- Dépend des propriétés du métal (conductivité), de la fluence et de la puissance du laser
- Cassure des structures du réseau
- Apparition d’une <u>ZAT</u>

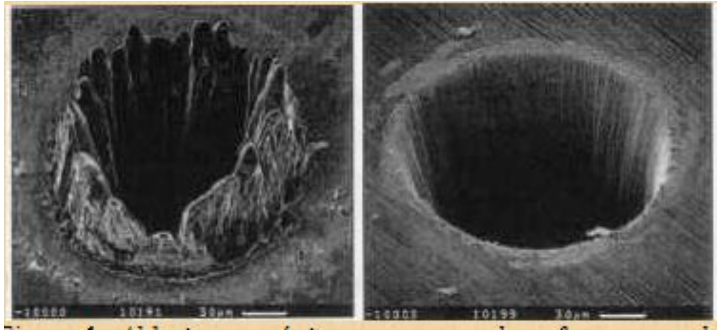
Laser Nd:Yag (ns)	3,1 µm
Laser Ti:saphir (fs)	0,22 µm

ZAT sur une plaque d’aluminium après 1 impulsion

Représentation qualitative de la profondeur d’ablation selon la fluence du laser







Ablation avec un laser nanoseconde et un laser femtoseconde

2) Modélisation

Hypothèses:

Loi de Fourier: $\vec{j} = -\lambda \overrightarrow{grad} T$

Equation de la chaleur: $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -div \vec{j}$

On considère l'influence de l'air comme négligeable sur l'évolution de la température

Pas de pertes par conduction et de convection

D= λ/ρc , avec λ le coefficient de conductivité thermique, c la capacité thermique et ρ la masse volumique.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = div(\lambda \overrightarrow{grad} T)$$

$$\Rightarrow \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial T}{\partial t} = D \Delta T} \quad (*)$$

Matériau	λ (W.m^{-1}.K^{-1})	ρ (J.kg^{-1}.K^{-1})	c (kg.m^{-3})	D (m^2.s^{-1})	T(°C) de fusion	T(°C) d' évaporation
Aluminium	238	900	270	9,794.10^{-5}	660,32	2056

3) Résolution analytique

On résout l'équation de la chaleur en considérant les paramètres constants et un chauffage unidimensionnelle.

On applique à l'équation (*) une transformée de Fourier (T.F) et son inverse avec $\tilde{f}(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx$

Avec pour condition initiale une impulsion de Dirac T(x,0)=δ(x) :

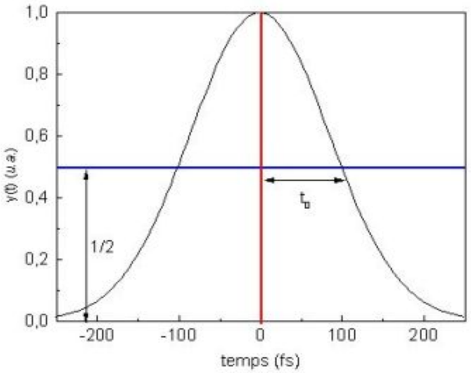
$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Rightarrow \tilde{T}(k,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-Dk^2 t} \Rightarrow T(x,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi D t}} e^{\frac{-x^2}{4Dt}}$$

Ne représente pas vraiment un phénomène physique, on utilise alors une gaussienne comme condition initiale:

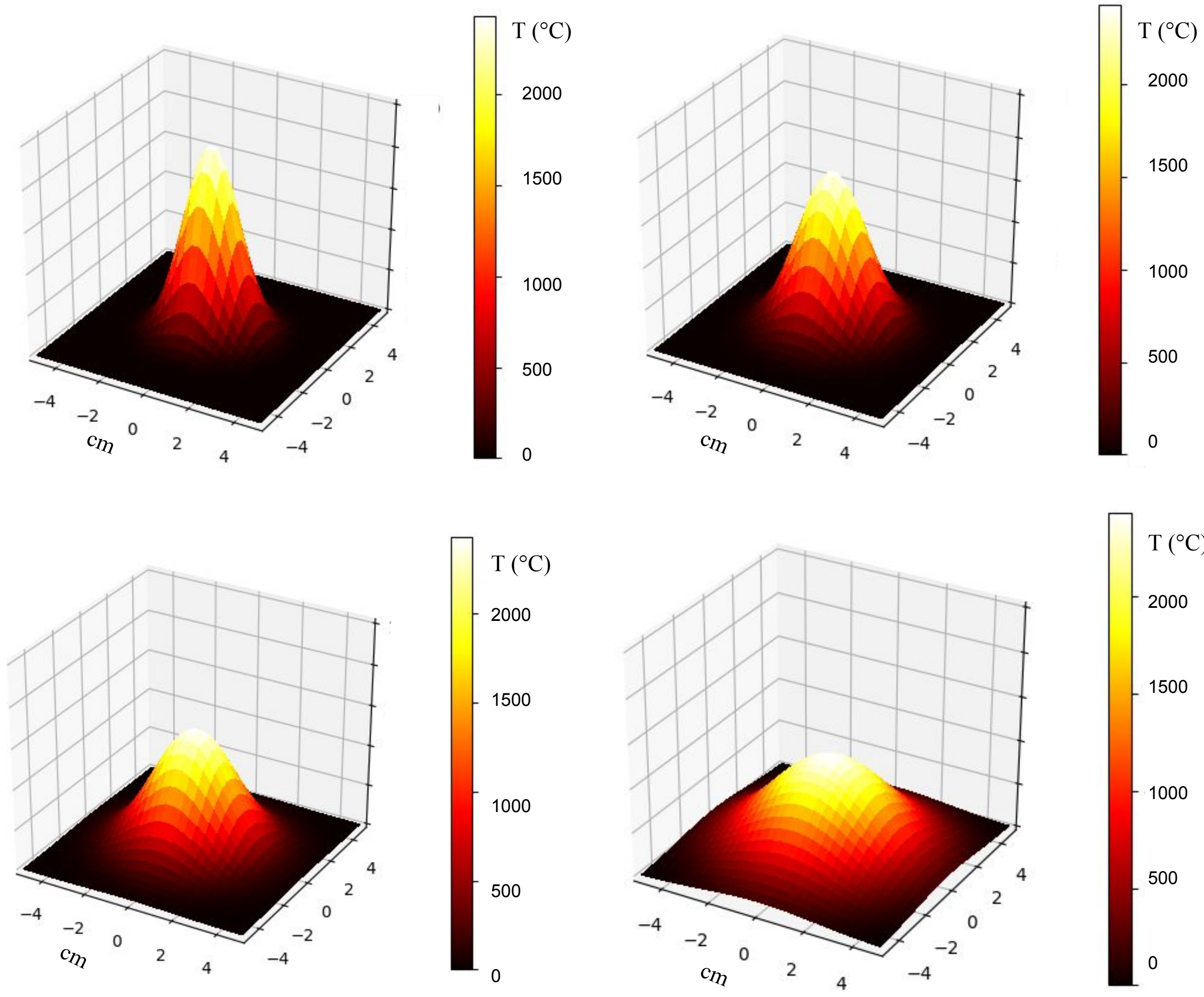
$$\tilde{T}(k,t) = \sqrt{\sigma} e^{\frac{-k^2 \sigma}{2}} e^{-Dk^2 t} \Rightarrow \boxed{T(x,t) = \frac{\sqrt{2\sigma}}{\sqrt{4Dt + 2\sigma}} e^{\frac{-x^2}{4Dt+2\sigma}}}$$

Conditions initiales et aux limites :

- T(0,t)=0 $\forall$ t
- T(∞,t)=0 $\forall$ t
- $T(x,0) = \frac{e^{-x^2}}{2\sigma}$ $\forall$ x



Forme temporelle de l'impulsion femtoseconde (200 fs)



Visualisation de la solution avec Python

4) Résolution numérique

On résout l'équation de la chaleur à 2 dimensions en utilisant la méthode des différences finies.

On définit d'abord les pas x_i, y_j et t_k: $x_i = x_0 + i\triangle x$, $y_j = y_0 + j\triangle y$, $t_k = t_0 + k\triangle t$

On détermine ensuite $\frac{\partial T}{\partial t}, \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} et \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ en appliquant Taylor respectivement à l'ordre 1 en t_k et à l'ordre 2 en x_i et y_j. On pose $T^k_{i,j} = T(x,y,k)$.

$$T(x_i + \triangle x, y_j, t_k) = T(x_i) + \triangle x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\triangle x^2}{2}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + O(\Delta x^3)$$

$$T(x_i - \triangle x, y_j, t_k) = T(x_i) - \triangle x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\triangle x^2}{2}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + O(\Delta x^3)$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \simeq \frac{T^k_{i+1,j} + T^k_{i-1,j} - 2T^k_{i,j}}{\triangle x^2}}$$

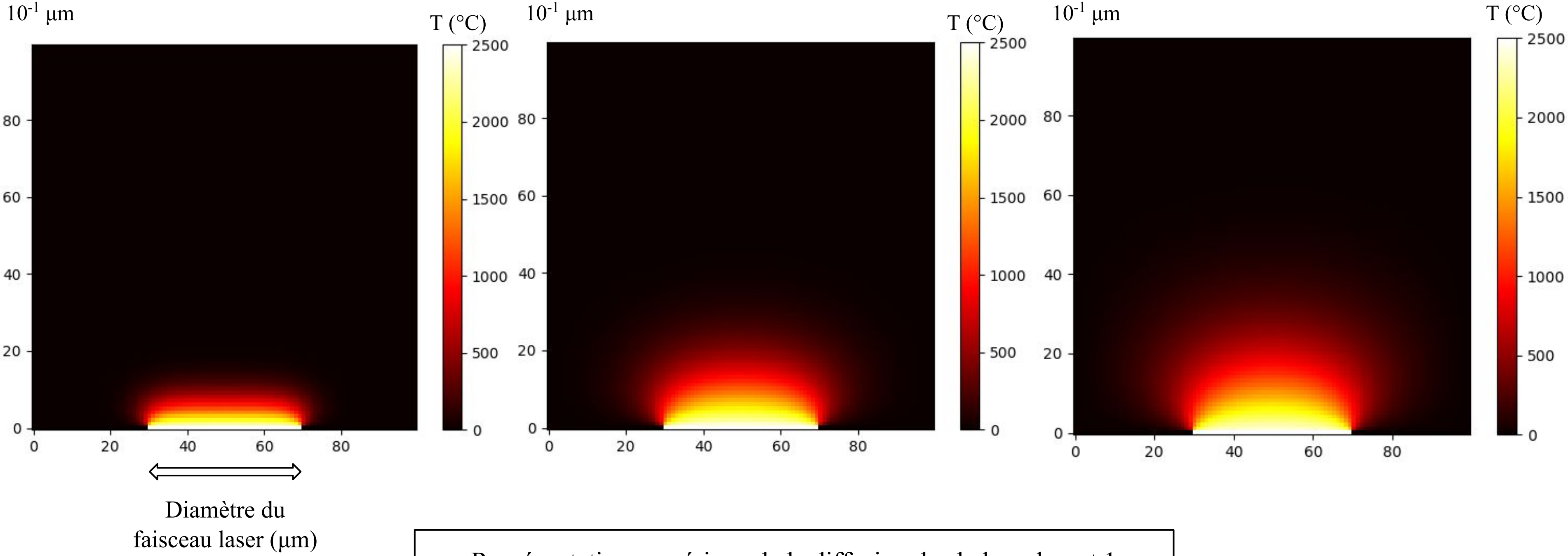
De la même manière on a $\boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \simeq \frac{T^k_{i,j+1} + T^k_{i,j-1} - 2T^k_{i,j}}{\triangle y^2}}$

$$T(x_i, y_j, t_k + \triangle t) = T(x_i, y_j, t_k) + \triangle t \frac{\partial T}{\partial t} + O(\triangle t^2) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{\partial T}{\partial t} \simeq \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k}}{\triangle t}}$$

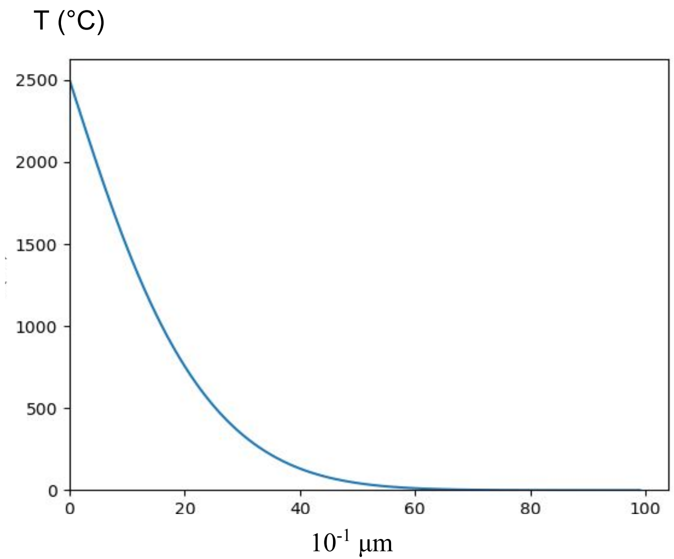
On remplace ensuite dans l'équation (*)

$$\frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k}}{\triangle t} = D\left(\frac{T_{i+1,j}^{k} + T_{i-1,j}^{k} - 2T_{i,j}^{k}}{\triangle x^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k} + T_{i,j-1}^{k} - 2T_{i,j}^{k}}{\triangle y^2}\right)$$

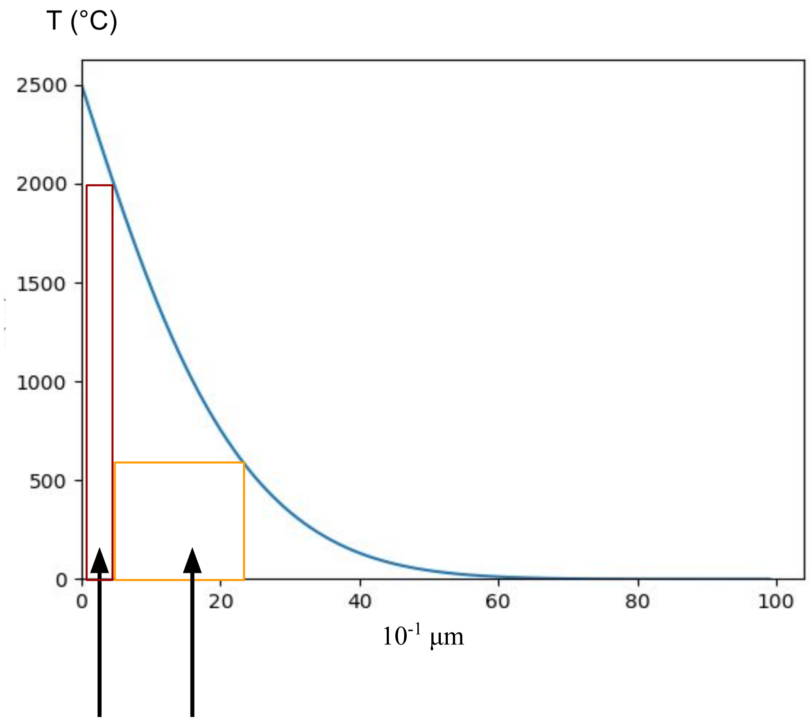
$$\Rightarrow \quad \boxed{T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^{k} + \triangle t D\left(\frac{T_{i+1,j}^{k} + T_{i-1,j}^{k} - 2T_{i,j}^{k}}{\triangle x^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k} + T_{i,j-1}^{k} - 2T_{i,j}^{k}}{\triangle y^2}\right)}$$



Représentation numérique de la diffusion de chaleur durant 1 <u>impulsion longue</u> dans une plaque d'aluminium de 10 µm d' épaisseur



Représentation graphique de la diffusion de chaleur dans une plaque d’aluminium de 10 µm pendant 1 pulsation longues



Processus d’ablation du métal (aluminium) lorsqu’il atteint sa température de d’ évaporation

Zone de fusion

Conclusion