

« Modélisation Thermo-Optique Semi-Quantique du procédé d'ablation USPL sur des aciers électriques à Grains Orientés »

SGE – Symposium de Génie Electrique



6 Juillet 2023 à Lille – 10h50 – 4 / id452577



**Olivier MALOBERTI^{a,b}, Manar NESSER^{b,a}, Prescillia DUPONT^a, Julien DUPUY^c,
Anne HENROTTIN^d, Jean-Pierre BIRAT^e, Camille PINEAU^f, Stéphane PANIER^b**

^aUNILASALLE Amiens - SYMADE, 14 quai de la Somme, 80080 Amiens, France / ^bLTI – UPJV, Laboratoire LTI, IUT d'Amiens Avenue des Facultés – Le Bailly, Amiens, 80025, France / ^cMULTITEL a.s.b.l., 2 rue Pierre et Marie Curie, Parc Initialis, Mons, 7000, Belgique / ^dLASEA, 31 rue Louis Plescia, 4102, Seraing, Belgique / ^eIFSTEELMAN, 5 rue du Gate-Chaux, 57280, Semecourt, France / ^fIRT – M2P, 4 rue Augustin Fresnel, Metz, 57070, France



SOMMAIRE

- 1. Contexte du travail – Le projet ESSIAL**
- 2. Etat de l'Art et Présentation du Procédé USPL**
- 3. Modélisation Numérique Eléments Finis (EF)**
- 4. Modèle Analytique Moyen – Calcul d'Ablation**
- 5. Discussion, Conclusion et Perspectives**

1. Contexte et Etat de l'Art

PROJET ESSIAL

Procédés laser de structuration de domaines magnétiques



Réduction des pertes > 20%



Réduction du bruit > 20%

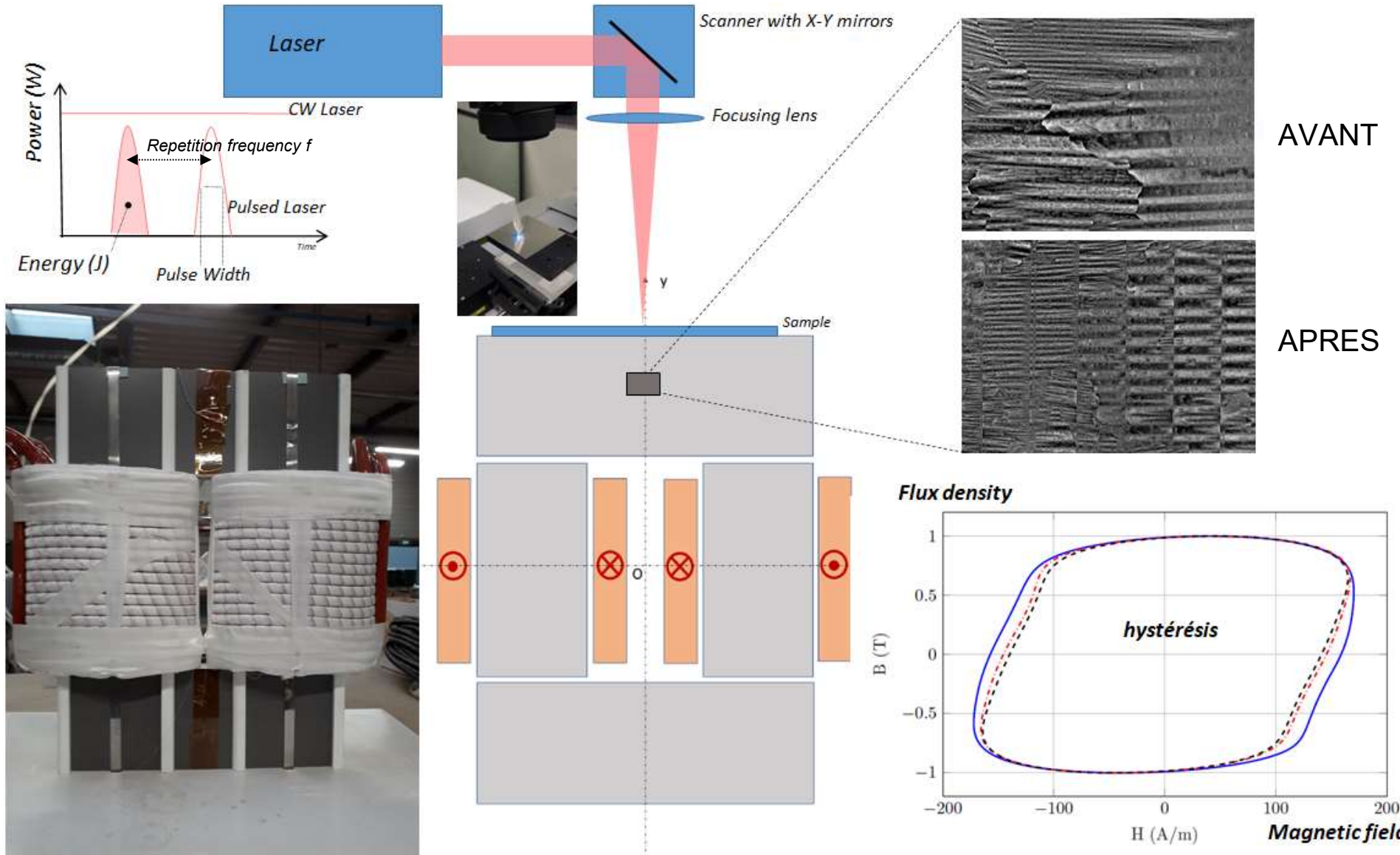
Procédés laser de texturisation et assemblage



Ecoconception, recyclage, re-use



Réduction du coût global de 20%



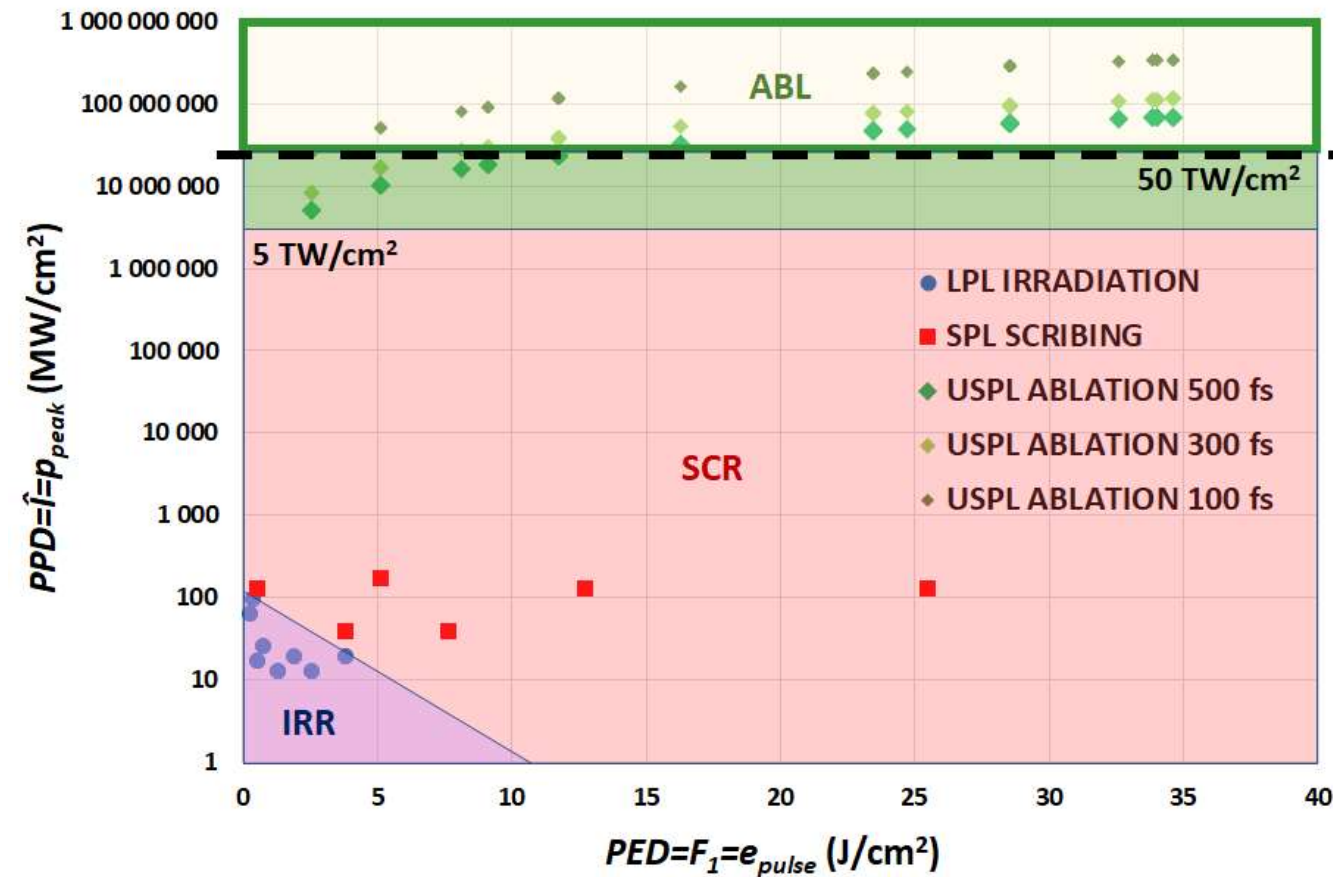
AVANT

APRES

2. Procédé USPL d'ablation

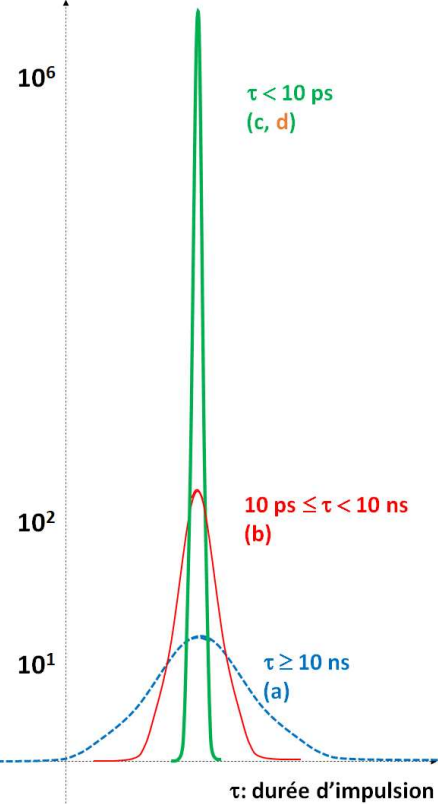
ETAT DE L'ART

SPL IRRADIATION-SCRIBING vs USPL ABLATION

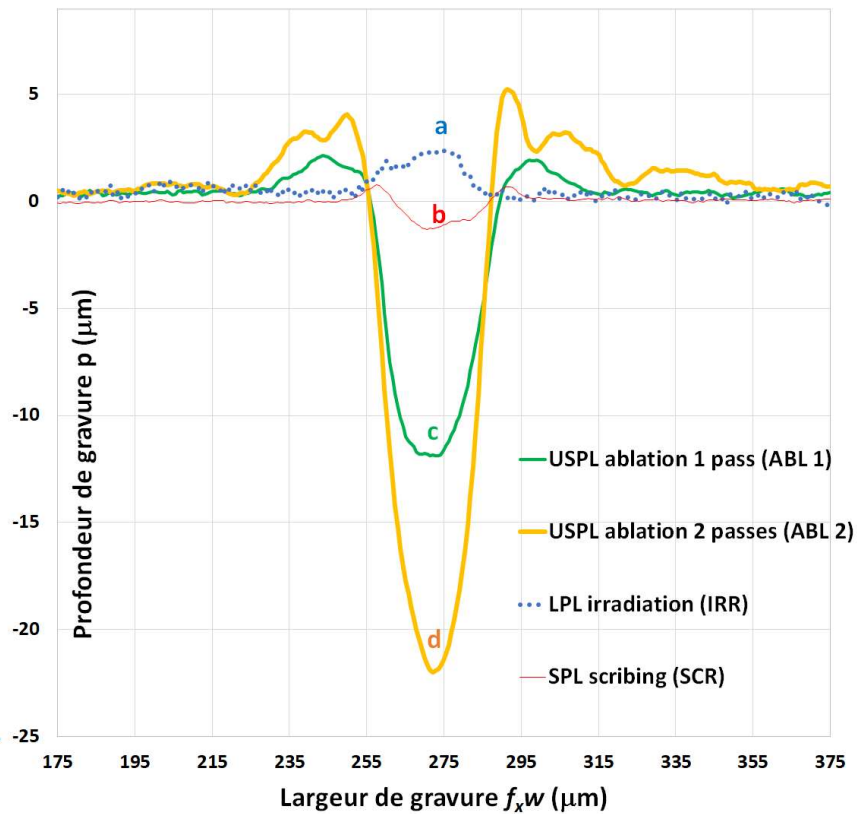


LPL (Long Pulsed Laser) - IRRADIATION
SPL (Short Pulsed Laser) - SCRIBING
USPL (Ultra-Short Pulsed Laser) - ABLATION

PPD= \hat{I} (MW/cm²): Peak Power Density



Gravures typiques pour IRR, SCR, ABL 1 and ABL 2



2. Procédé USPL d'ablation

ORIGINES QUANTIQUES

Echelles de temps très différentes entre les PHASE 1 et PHASE 2

⇒ Vision semi-classique d'un métal constitué de deux sous-systèmes couplés :

Gaz d'électrons e libres à la température T_e + les ions/atomes en réseau support de propagation des phonons ph à la température T_{ph} baignés dans ce gaz d'électrons..

Chaleur spécifique $C'_{ve} = C_{ve}(T_e)/T_e$ **des électrons**

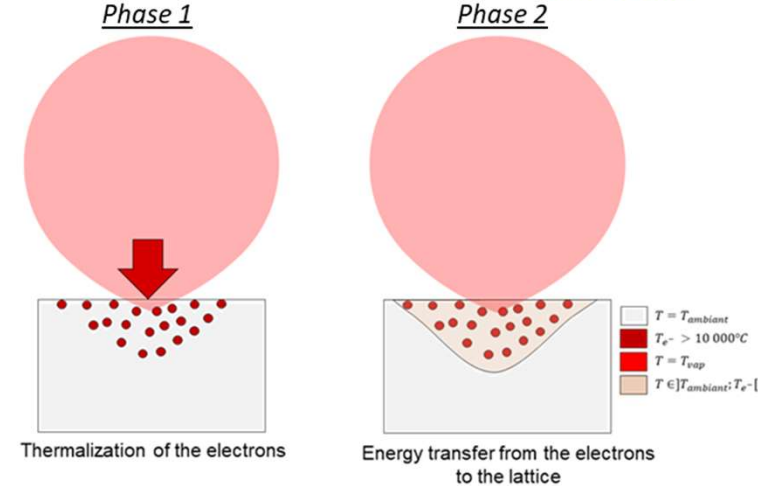
$$C'_{ve} = \frac{\pi^2 k_B^2 n_e}{2 E_F} ; 1 < C'_{ve}(T_e) \sim 80 < 250 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-2}$$

Propriété G de couplage e-Ph

$$\frac{\pi^2}{6} m_e n_e V_s^2 = \frac{\pi^2 m_e n_e \varepsilon_c^0 \omega_{ph}^2}{6 k_F^2} < G < \frac{m_e^2 n_e^2 (k_B T_D)^2 k_B}{16 \hbar^5} ; 0.1 < G \sim 1 < 10 \text{ TW.cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

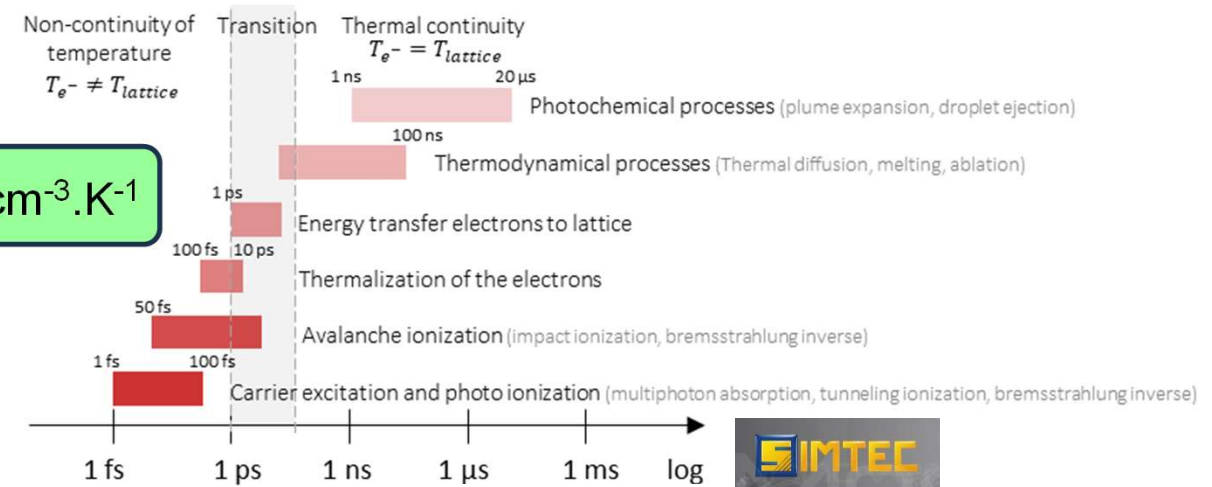
Conductivité thermique λ_e **des électrons**

$$\lambda_e \sim \frac{v_F^2}{2 v_e} C_{ve} ; 1 T_e < \lambda_e < 100 T_e \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$



PHASE 1: Thermalisation
Absorption de l'énergie
par les électrons (Temps
caractéristique: 10 fs)

PHASE 2: Transfert
Diffusion de l'énergie des
électrons aux phonons
(Temps caractéristique: 10 ps)



3. Modélisation numérique EF

SOURCE LASER

Paramètres du laser:

longueur d'onde $\lambda = 1030$ nm, **largeur temporelle** $\tau = 500$ fs, puissance moyenne $P_w < 4$ W (basse fluence) et $P_w < 20$ W (haute fluence), Fréquence de répétition f (1-330 kHz), vitesse de balayage v (1-2000 mm/s). WAIST du laser $w_0 = 2a$ (~ 10 à 50 μm), $f_x \geq 1$ coefficient de focalisation

DISTRIBUTION TEMPORELLE

Fonction porte ou créneau:

Puissance crête par impulsion

$$\hat{P} = P_w / (f \cdot \tau)$$

Intensité ou densité de puissance crête

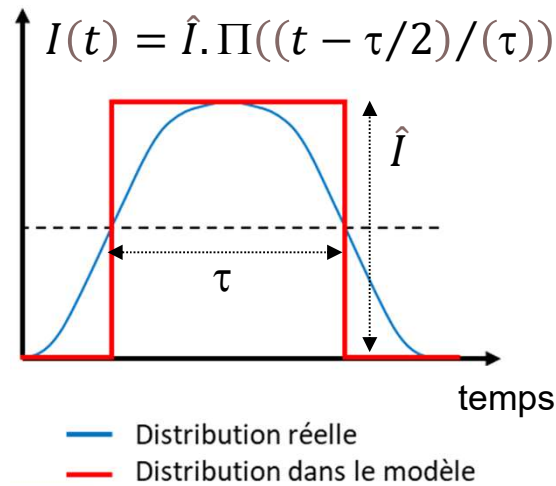
$$\hat{I} = \hat{P} / (\pi (f_x r)^2)$$

Energie par impulsion et cumulée

$$E_1 = \tau \hat{P} = \frac{P_w}{f} \text{ et } E_N = N_p N E_1 = N_p \frac{f_x w_0 P_w}{v \tau f}$$

Energie ou Fluence par impulsion et cumulée

$$F_1 = \frac{E_1}{\pi (f_x a)^2} = \frac{P_w}{\pi (f_x a)^2 f} \text{ et } F_N = N_p N F_1 = N_p \frac{f_x w_0 P_w}{\pi (f_x a)^2 v \tau f}$$

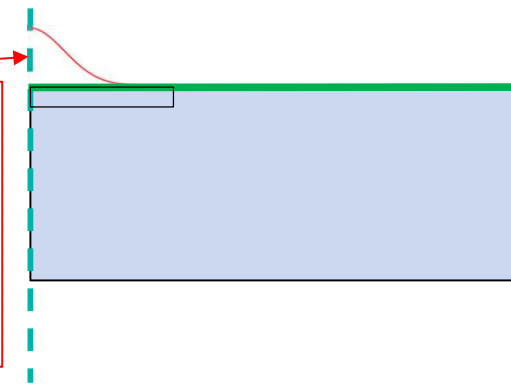


DISTRIBUTION SPATIALE

Faisceau gaussien, de largeur spatiale $w_0 = 2a$ définie le flux thermique axi-symétrique imposé sur le spot de focalisation de largeur $f_x w_0$

$$S = S_{num}(t, r) = -\mathbf{n} \cdot (-\lambda_e \nabla T) = A_0 \cdot \frac{\hat{P}}{\pi \left(f_x \frac{w_0}{2}\right)^2} \cdot e^{-\frac{r^2}{\left(f_x \frac{w_0(z)}{2}\right)^2}}$$

Flux thermique gaussien (W/m^2)



Paramètres optiques

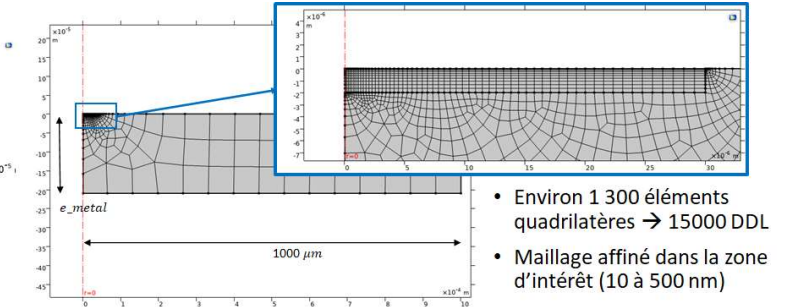
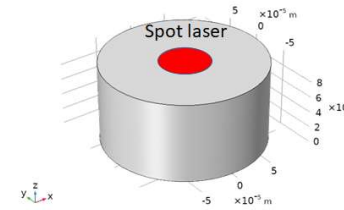
Coefficient de Transmission optique A (valeur nominale A_0)

Coefficient de rendement d'ablation η (valeur nominale $\eta = 1$)

3. Modélisation Numérique EF

DEFINITIONS

Géométrie et maillage



CONDITIONS LIMITES ET CONTRAINTES SPECIFIQUES

Flux thermique gaussien imposé par la source laser (W/m^2):

$$-\mathbf{n} \cdot (-\lambda_e \nabla T_e)$$

$$= \hat{P} \cdot \frac{A_0}{\pi \left(\frac{f_x w_0}{2}\right)^2} \cdot e^{-\frac{r^2}{\left(\frac{f_x w_0}{2}\right)^2}}$$

1 contrainte de surface sur le flux de la source laser

Flux convectif numérique représentant la matière vaporisée:

$$\Phi_{vap} = h \cdot (T_{ph} - T_v)$$

ssi $T_{ph} \geq T_v$

Condition limite d'isolation thermique loin de la source:

$$-\mathbf{n} \cdot (-\lambda_{e,ph} \nabla T_{e-ph}) = 0$$

Condition d'axisymétrie

3 conditions limite de surface sur le flux de chaleur

Ablation de matière simulée par déformation du maillage

$$\mathbf{v}_{mesh} \cdot \mathbf{n} = v_{vap} - v_{abl}$$

$$= \frac{\Phi_{vap} - \Phi_{abl}}{\rho L_v}$$

$$\Phi_{abl} = \frac{\int_{vol} h_{vol} * (T_v - T_{ph})}{S_{scrater}}$$

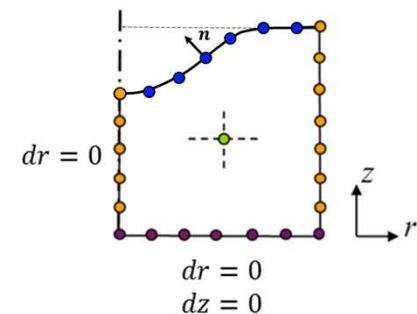
ssi $T_{ph} \geq T_v$

3 conditions limite de surface sur le flux de chaleur

Ablation de matière simulée grâce à une déformation du maillage à l'interface métal – air avec une vitesse \mathbf{v}_{mesh} calculée à partir des flux de vaporisation et d'ablation des CL et contrainte:

$$\mathbf{v}_{mesh} \cdot \mathbf{n} = v_{vap} - v_{abl} = \frac{+\Phi_{vap} - \Phi_{abl}}{\rho(L_v + L_f)}$$

avec \mathbf{n} le vecteur normal à la surface ($v_{vap} > 0, v_{abl} < 0$). $\mathbf{v}_{mesh} \cdot \mathbf{n} = v_{vap} \cdot \mathbf{n}$



6 conditions limites ou contraintes:

3. Modélisation Numérique EF

FORMULATION

Variable d'état à calculer.

| Nom | Valeur | Unité | Description |
|----------|--------|---------------|---|
| ρ | - | μm | Profondeur du cratère issue de l'ablation |
| T_e | - | K | Température du gaz d'électrons |
| T_{ph} | - | K | Température des phonons, ie du métal |

Terme source dû au flux incident du laser:

$$S = S_{num}(t, r) = -\mathbf{n} \cdot (-\lambda_e \nabla T)$$

Systeme d'équations du modèle à deux températures

DIFFUSION DE LA CHALEUR DANS LE GAZ D'ELECTRONS

$$\left\{ \begin{aligned} C_{ve} \cdot \frac{\partial T_e}{\partial t} &= C'_{ve} T_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda_e \cdot \nabla(T_e)] \\ C_{vph} \cdot \frac{\partial T_{ph}}{\partial t} &= \nabla \cdot [\lambda_{ph} \cdot \nabla(T_{ph})] \end{aligned} \right.$$

TERME SOURCE LOCALISE EN SURFACE

$$\begin{aligned} &- G \cdot (T_e - T_{ph}) + \nabla \cdot S_{num} \\ &- G \cdot (T_{ph} - T_e) \end{aligned}$$

DIFFUSION DE LA CHALEUR DANS LA MATRICE DES ATOMES

COUPLAGE ELECTRONS-PHONONS

3. Modélisation Numérique EF

RESULTATS

Acier test (23MXX): FeSi GO standard $\rho = 7380 \text{ kg.m}^{-3}$, épaisseur $\zeta = 0.23 \text{ mm}$ (revêtement $3 \mu\text{m}$).

Propriétés thermiques du métal:

$T_f = 1535 \text{ K}$ et $T_v = 2861 \text{ K}$, températures de fusion et de vaporisation;

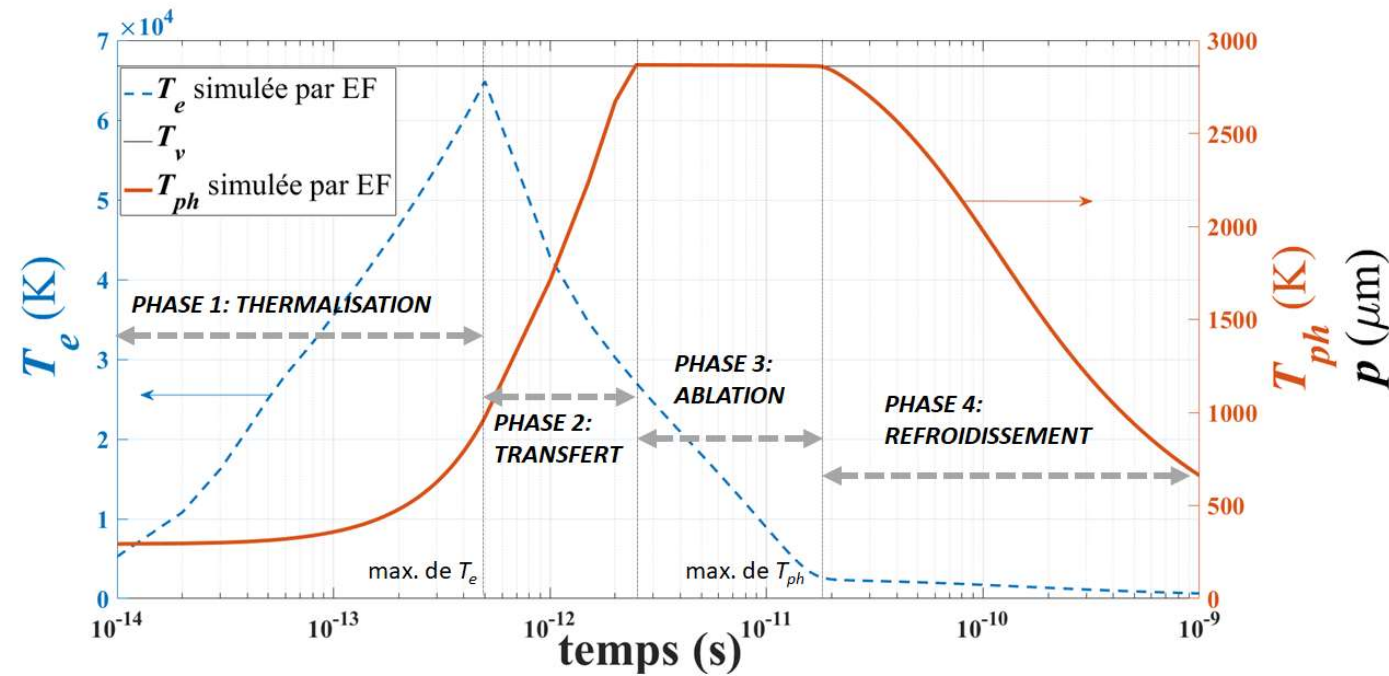
$L_f = 180 \text{ kJ/kg}$ et $L_v = 6400 \text{ kJ/kg} \gg L_f$, enthalpies libres de fusion et de vaporisation;

$C_{mph} = 460 \text{ J/kg/K}$; $\lambda_{ph} = 25 \text{ W/m/K}$, chaleur spécifique et conductivité thermique.

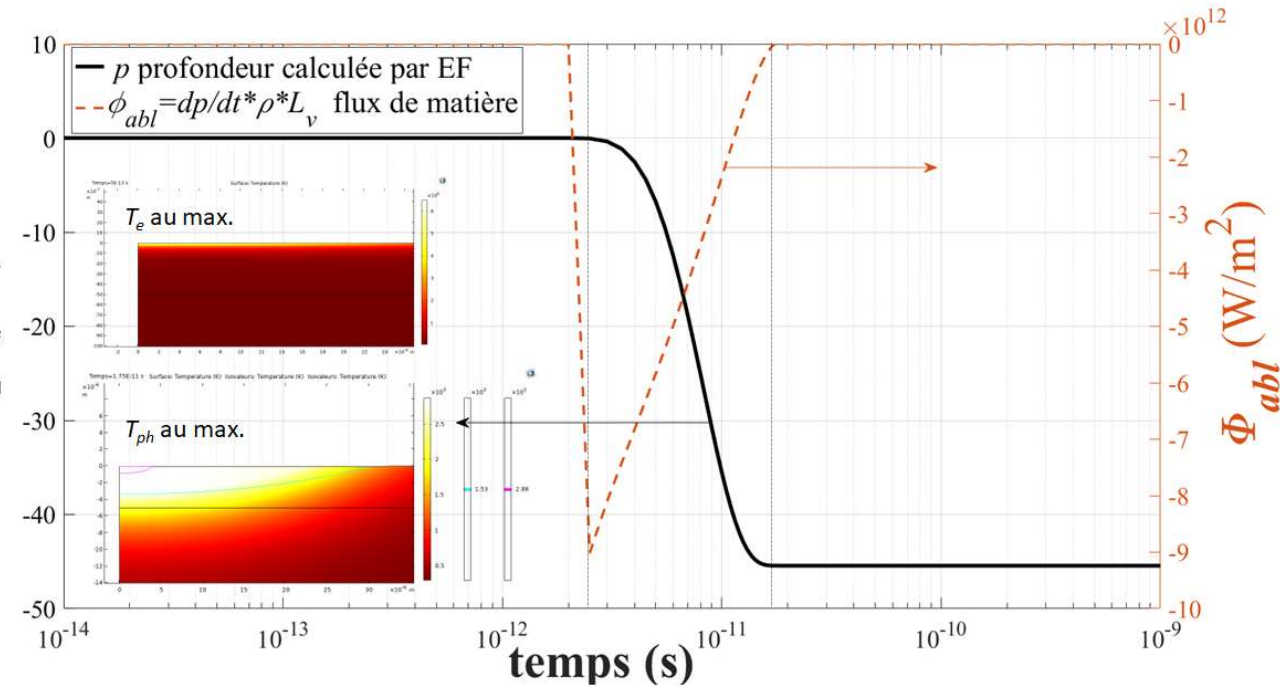
Propriétés thermiques des électrons et de couplage : $C_{ve} = 100 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-2}$; $\lambda_e = 4.e^5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $G = 0.1 \text{ TW.cm}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

Coefficients numériques d'échange: $h = 1.e^{13} \text{ W/m}^2.\text{K}$ et $h_{vol} = 1.e^{20} \text{ W/m}^3.\text{K}$; garantissent toujours $T \leq T_v$ avec ablation de matière dès que $T > T_v$

Températures simulées



Ablation de matière simulée



3. Modélisation Numérique EF

EXTRAPOLATIONS

Acier test (23MXX): FeSi GO standard $\rho = 7380 \text{ kg.m}^{-3}$, épaisseur $\zeta = 0.23 \text{ mm}$ (revêtement $3 \mu\text{m}$).

Cas test, paramètres

Numérique EF:

$C'_{ve} = 100 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-2}$; $\lambda_e = 4.e^5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
 $A = A_0 = 0.35$ et $\eta = 1$;
 $G = 0.1 \text{ TW.cm}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

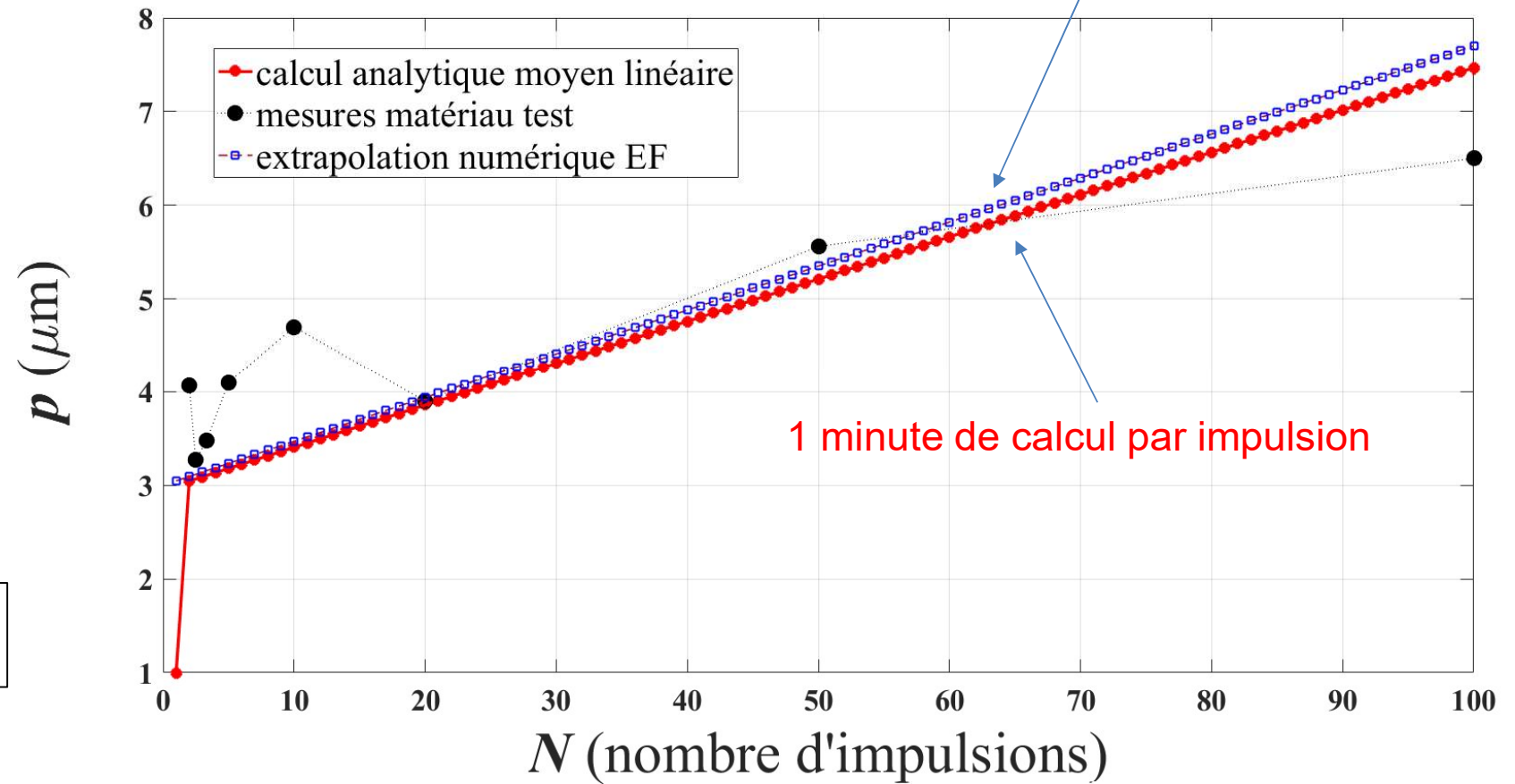
Analytique:

$C'_{ve} = 5.6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-2}$; $\lambda_e = 0 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
 $A = A_0 = 0.35$; $\alpha^{-1} = \alpha_0^{-1} = 30 \text{ nm}$ et $\eta = 1$;
 $G = 0.1 \text{ TW.cm}^{-3}.\text{K}^{-1}$.

Hypothèse linéaire:

Profondeur de gravure de N impulsions
= N * profondeur de une impulsion

1 jour de calcul par impulsion



4. Modèle Analytique Moyen

EQUATIONS

$\delta = \alpha^{-1}$ est la profondeur de pénétration de l'onde ($\delta_0 \approx 91 \text{ nm}$) où $\alpha = \alpha_0$ est la part de la fluence seuil théorique d'ablation $e_{th} \approx 0.44 \text{ J.cm}^{-2}$ responsable de la sublimation.

$$\alpha_0 = (\rho \cdot L_v) / e_{th}$$

Terme source = puissance laser transmise et absorbée

$$S = S_{an}(t, z) = \hat{S} \cdot e^{-\alpha \cdot z} = A \cdot \eta \cdot \alpha \cdot I(t) \cdot e^{-\alpha \cdot z}$$

Modèle couplé analytique en négligeant les termes de conduction thermique $\lambda_{e-ph} \ll$

$$\begin{cases} \tau_{e-ph} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \Delta T_e^2 + \Delta T_e^2 = 2 \frac{S}{C'_{ve}} t \\ \tau_{e-ph} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \Delta T_{ph} + \Delta T_{ph} = \Delta T_e \end{cases}$$

Découplage des équations pour les électrons

Couplage simple et direct entre phonons et électrons

avec $\tau_{e-ph} = \frac{C_{vp}}{G}$, $\Delta T_{e-ph} = T_{e-ph} - T_0$, $\Delta T_e^2 = T_e^2 - T_0^2$

4. Modèle Analytique Moyen

SOLUTIONS

L'acier test étudié est le 23MXX

propriétés linéaires simplifiées pour le cas test analytique:

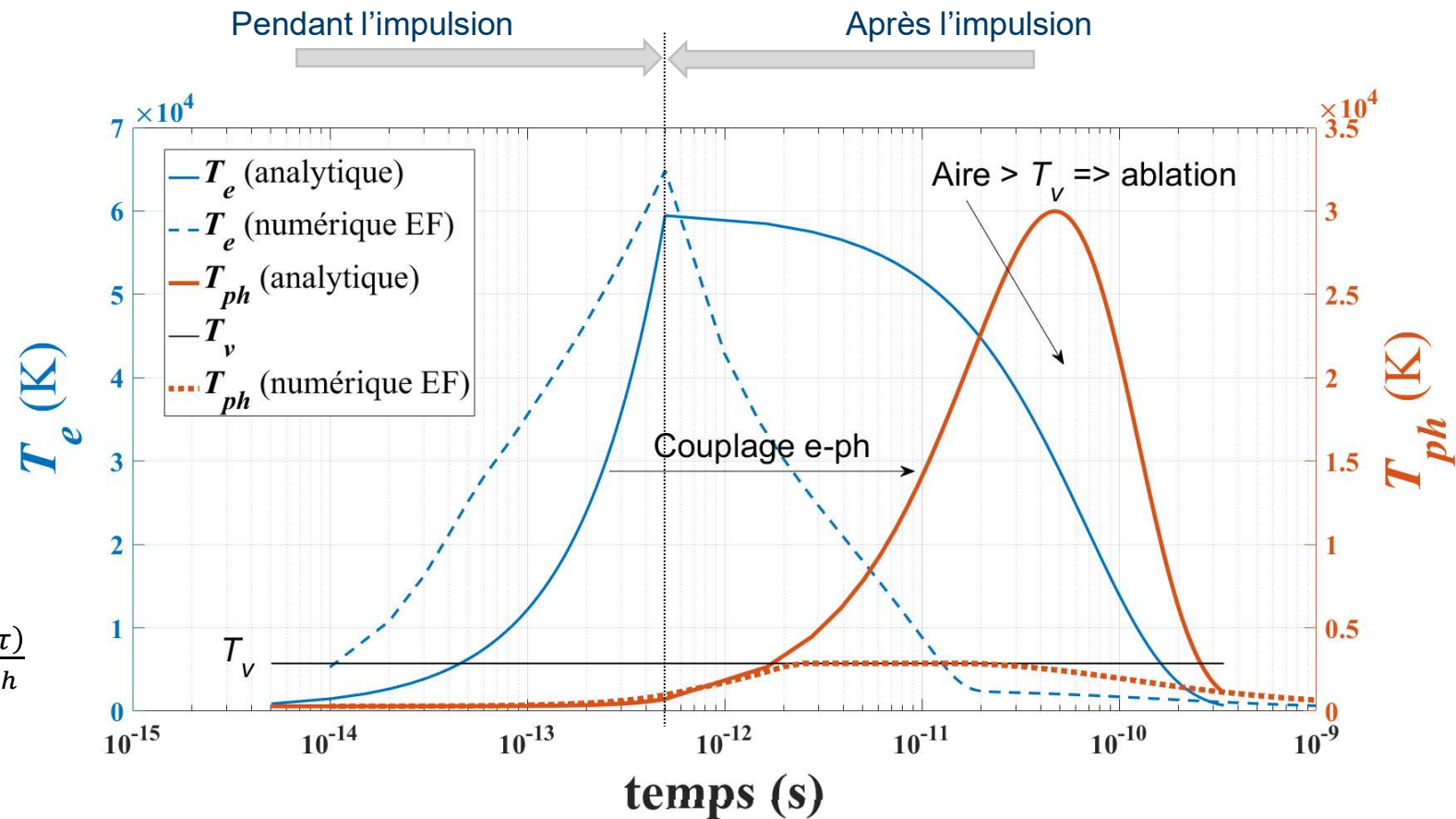
$A = A_0 = 0.35$, $\alpha^{-1} = \alpha_0^{-1} = 30 \text{ nm}$, $C'_{ve} = 5.6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-2}$, $G = 0.1 \text{ TW.cm}^{-3}.\text{K}^{-1}$ et $\eta = 1$.

Pendant l'impulsion ($0 \leq t \leq \tau$)

$$\begin{cases} T_e = \sqrt{T_0^2 + 2 \frac{\hat{S}\tau}{C'_{ve}} \left(\frac{t - \tau_{e-ph}}{\tau} + \frac{\tau_{e-ph}}{\tau} e^{-t/\tau_{e-ph}} \right)} \\ T_{ph} = T_0 + \Delta T_e(\tau) \left(\frac{t - \tau_{e-ph}}{\tau} + \frac{\tau_{e-ph}}{\tau} e^{-t/\tau_{e-ph}} \right) \end{cases}$$

Après l'impulsion ($t \geq \tau$)

$$\begin{cases} T_e = \sqrt{T_0^2 + \Delta T_e^2(\tau) e^{\frac{-(t-\tau)}{\tau_{e-ph}}} \approx T_e + \Delta T_e(\tau) e^{\frac{-(t-\tau)}{2\tau_{e-ph}}} \\ T_{ph} \approx T_0 + \left(\Delta T_{ph}(\tau) + 2\Delta T_e(\tau) \left(e^{\frac{(t-\tau)}{2\tau_{e-ph}}} - 1 \right) \right) e^{\frac{-(t-\tau)}{\tau_{e-ph}}} \end{cases}$$



4. Modèle Analytique Moyen

CALCUL DE L'ABLATION

Calcul des maxima de température

Le maximum de T_e est obtenu pour $t = t_{e,max} = \tau : T_{e,max} = T_e(\tau)$

Le max. de T_{ph} pour $e^{+\frac{(t_{ph,max}-\tau)}{\tau e-ph}} = 2 - \tau/(2 \cdot \tau e-ph) : T_{ph,max} = T_0 + T_e(\tau)/(2 - \tau/(2 \cdot \tau e-ph))$

Seuil d'ablation effectif:

$$C_{vph}(\Delta T_{ph} - \Delta T_v) = \rho \cdot (L_v + L_f) \approx \rho \cdot L_v$$



$$F_{th} = \left(\left(\rho \cdot L_v + C_{vph} \Delta T_v \right)^2 \left(e^{+\frac{(t_{ph,max}-\tau)}{\tau e-ph}} \right)^2 \right) / \left(\frac{\alpha C_{vph}}{C'_{ve}} \tau G \right)$$

Calcul de la profondeur d'ablation:

1 impulsion:

$$dp_1 = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{A \cdot \eta \cdot F_1}{F_{th}} \right)$$

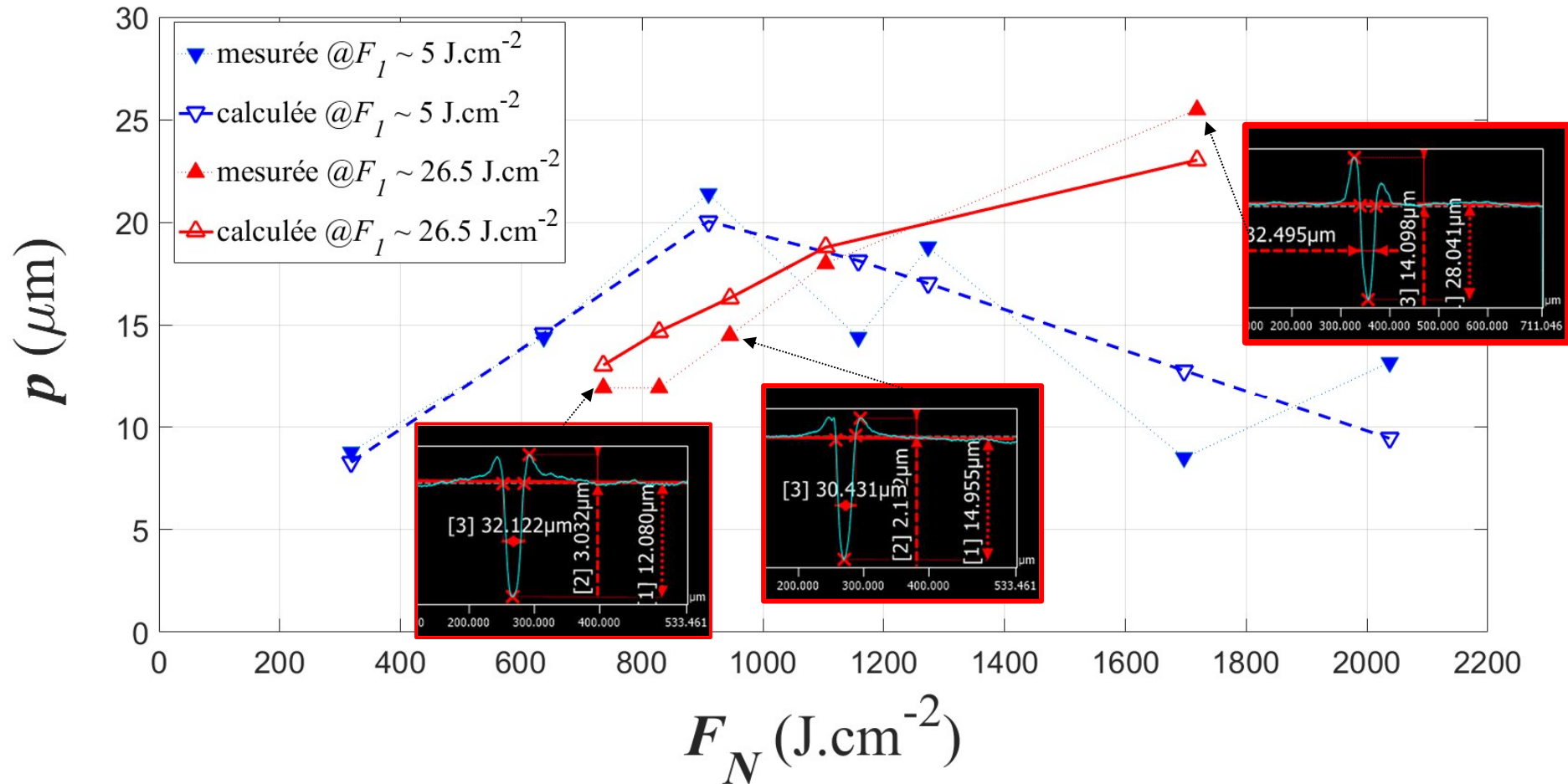
N impulsions:

$$p(N_p N) = \sum_{i=1}^{N_p N} \frac{1}{\alpha(\hat{I})} \ln \left(\frac{A(p(i), F_1) \cdot \eta(F_1) \cdot F_1}{F_{th}(C'_{ve}, G(\hat{I}), \alpha(\hat{I}))} \right)$$

4. Modèle Analytique Moyen

RESULTATS

Très grand nombre de « tirs » laser (variation de tous les paramètres:
 $P_w = 1 - 20 \text{ W}$, $v = 1 - 100 \text{ mm.s}^{-1}$, $f_x = 1$, $w_0 = 25 - 50 \mu\text{m}$, $f = 10 - 100 \text{ kHz}$
 $\Rightarrow F_1 = 1 - 30 \text{ J.cm}^{-2}$ et $F_N = 250 - 2500 \text{ J.cm}^{-2}$)



L'acier:
FeSi GO conventionnel R120-27
 $(\rho = 7650 \text{ kg.m}^{-3}, \zeta = 0.27 \text{ mm} + 2 \mu\text{m})$. Calibrations des paramètres constants ($C_{VE} = 9.03 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-2}$) et variables.

Profondeur du cratère calculée et mesurée avec un microscope confocal en fonction de la fluence cumulée.

Le résultat a été calibré avec F_N croissante; F_1 constante. (variation de la vitesse de balayage du laser v)

5. Conclusion

BILAN ET DISCUSSIONS

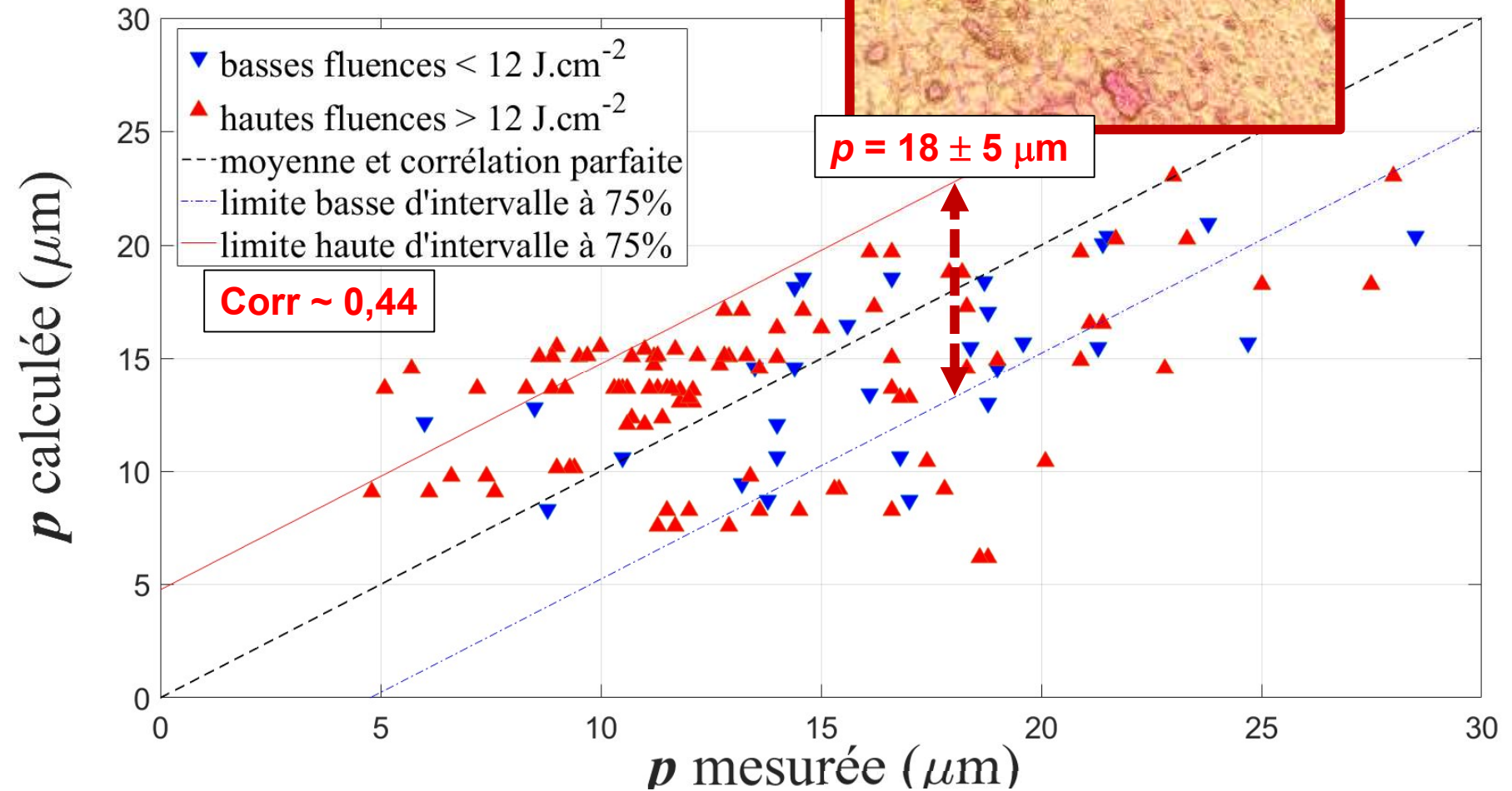
Corrélations calculs - mesures ?

L'acier:
FeSi GO conventionnel R120-27
($\rho = 7650 \text{ kg.m}^{-3}$, $\zeta = 0.27 \text{ mm}$ +
revêtement de $2 \mu\text{m}$).

Calibrations des paramètres constants
($C_{me}^* = 9.03 \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-2}$) et variables
($G(F_1 \text{ ou } \hat{I})$, $\alpha(F_1 \text{ ou } \hat{I})$,

$$A(p, F_1) = A_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\beta \frac{p_{\max} - p_{\lim}}{p_{\lim}} \right) \right)$$

$$, \eta(F_1) = 1 - \operatorname{erf} \left(\kappa \frac{F_1 - F_{\lim}}{F_{\lim}} \right).$$



5. Conclusion

PERSPECTIVES

- Possibilités de calculer le relief en surface dû à de la re-déposition et/ou refusion autour de la gravure
- Travaux parallèles présentant l'étude des impacts laser sur le magnétisme

M. Nesser et al., *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 58 (8), p. 1-5, 2022, [10.1109/TMAG.2022.3152899](https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3152899)

O. Maloberti et al., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 580, 2023, 170279, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170279>.

- Prise en compte de toutes les énergies, y compris l'énergie de l'effet de l'onde de choc induite par le laser simultanément à l'effet d'ablation
- Principe, modélisation et calcul des contraintes résiduelles induites par l'onde de choc du laser



ESSIAL

Merci et à bientôt



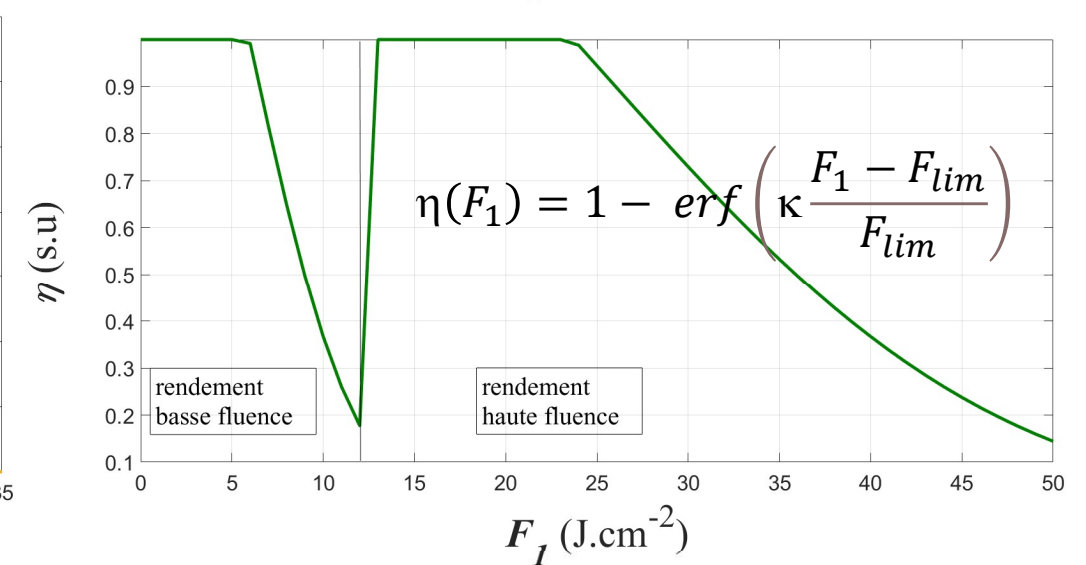
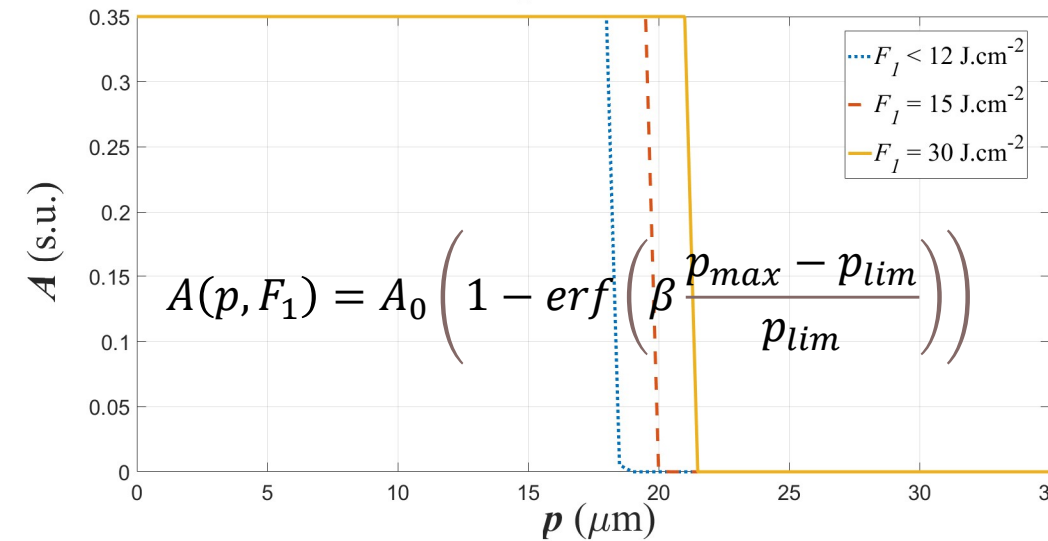
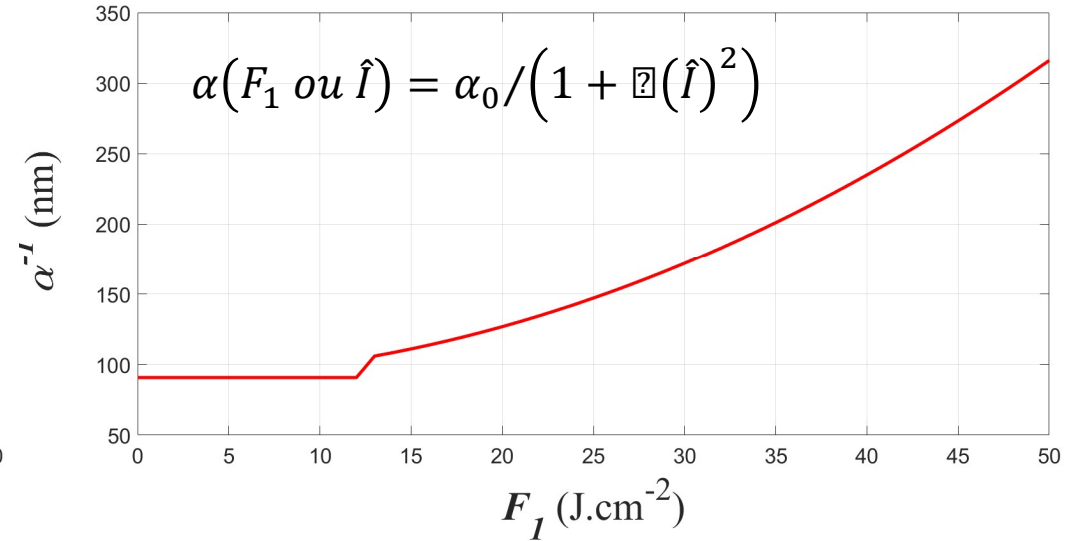
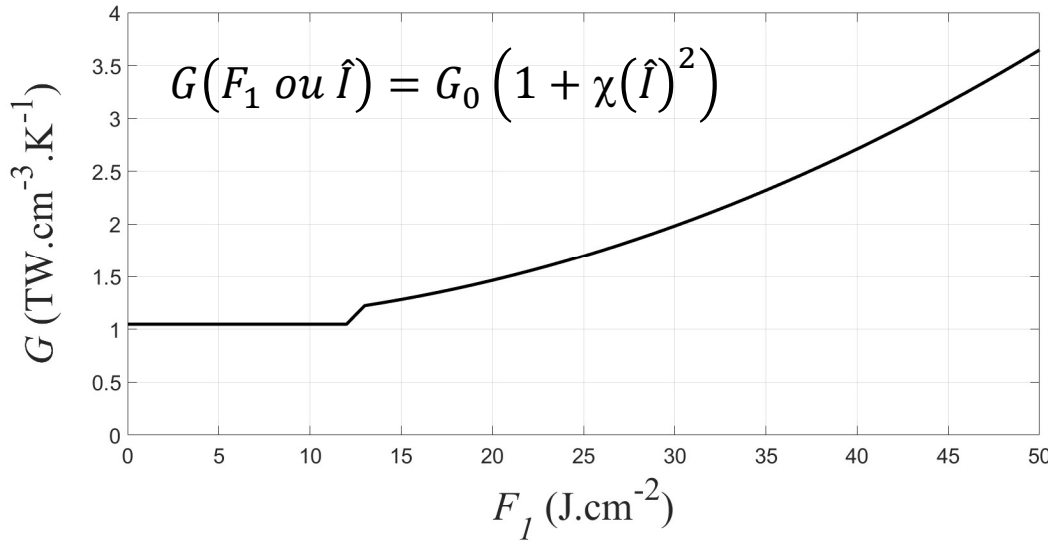
4(annexe). Calibrations

L'acier: FeSi GO conventionnel R120-27 ($\rho = 7650 \text{ kg.m}^{-3}$, $\zeta = 0.27 \text{ mm} + 2 \mu\text{m}$).
Calibrations des paramètres constants ($\alpha_{Fe}^0 = 9.03 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-2}$) et variables.

Effets non-linéaires pour α et G qui en fonction de \hat{I} ($\chi = 2.48e^{-36} \text{ A}^{-2}$.)

Limite pratique pour le facteur de forme des cratères au-delà d'une profondeur $p \geq f_x w_0 / 2$ ($\beta = 180 \text{ s.u.}$ et $p_{lim} \sim 19 \mu\text{m}$)

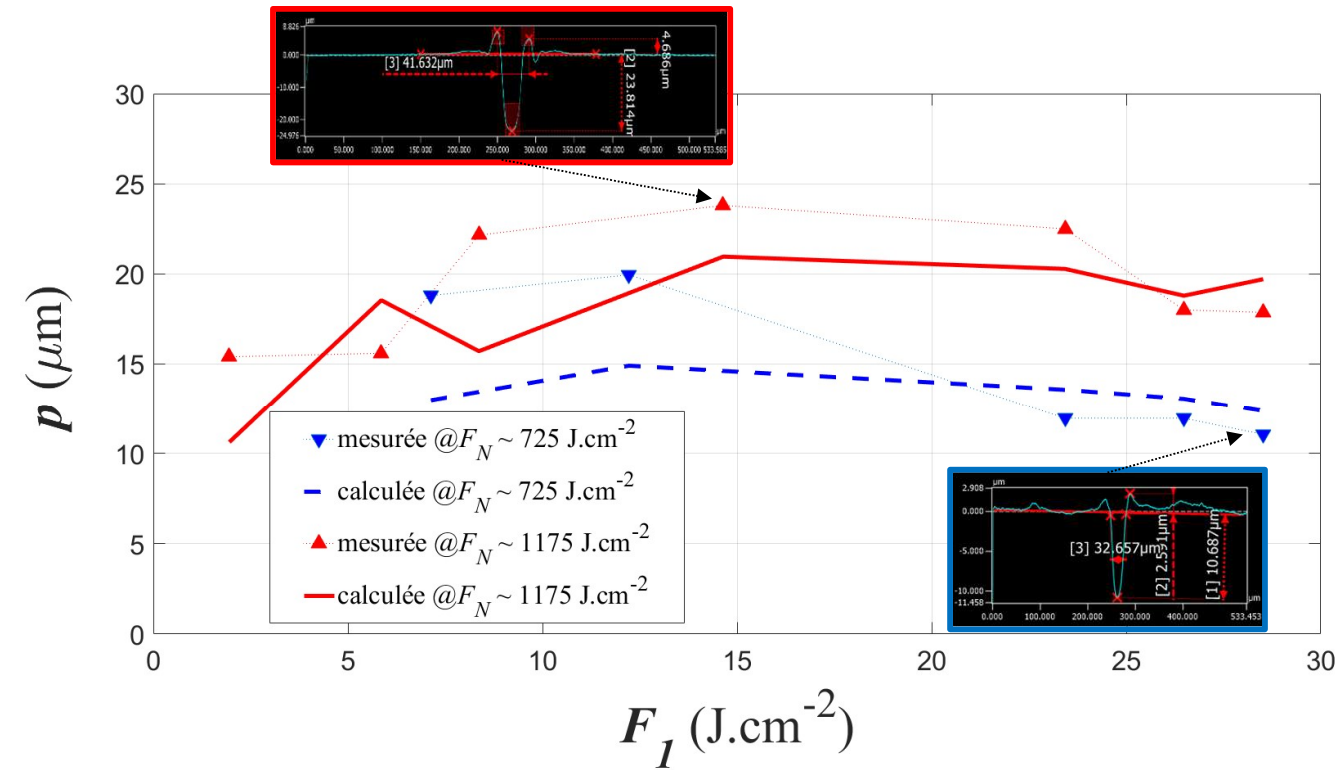
Le rendement d'ablation η peut décroître pour des fluences $F_1 \geq F_{th}$ ($\kappa \sim 0.94$). Deux régimes d'ablation sont identifiés: l'un pour les faibles fluences ($F_{lim} \sim 6 \text{ J.cm}^{-2}$), l'autre pour les plus fortes fluences ($F_{lim} \sim 12 \text{ J.cm}^{-2}$)



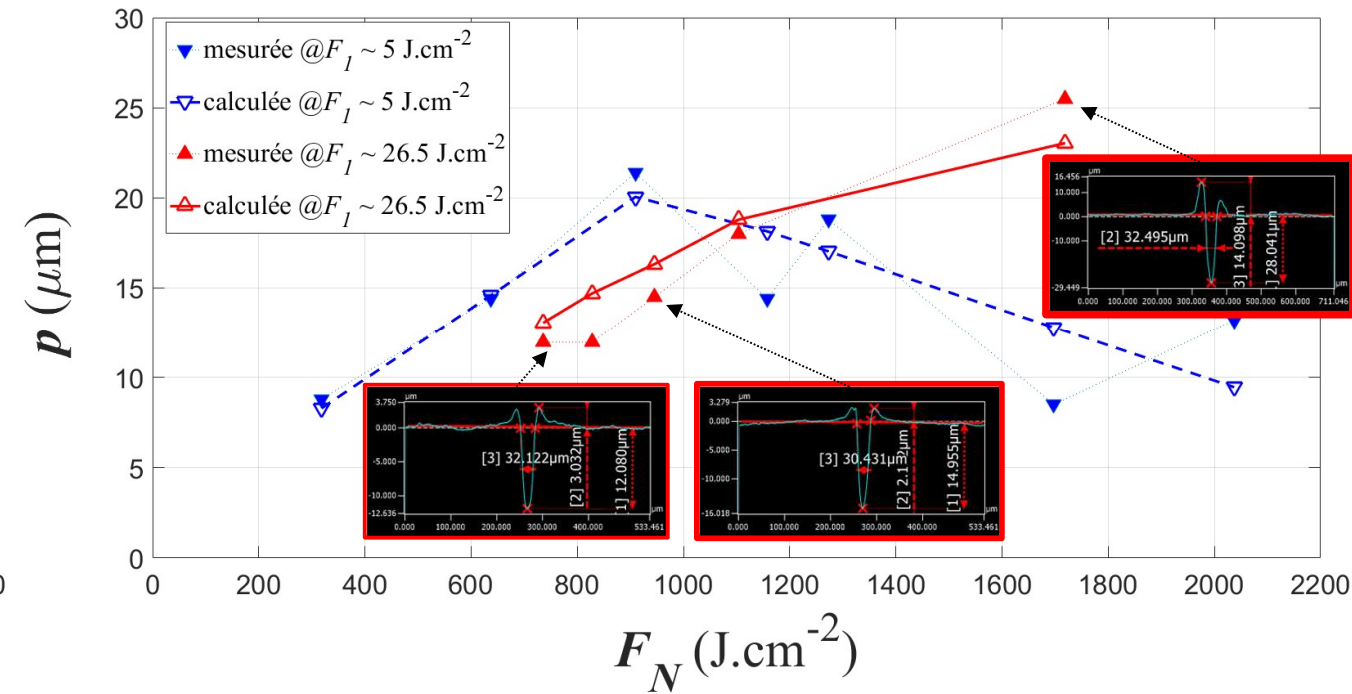
4(annexe). Modèle Analytique Moyen

RESULTATS

Très grand nombre de « tirs » laser (variation de tous les paramètres:
 $P_w = 1 - 20 \text{ W}$, $v = 1 - 100 \text{ mm.s}^{-1}$, $f_x = 1$, $w_0 = 25 - 50 \mu\text{m}$, $f = 10 - 100 \text{ kHz}$
 $\Rightarrow F_1 = 1 - 30 \text{ J.cm}^{-2}$ et $F_N = 250 - 2500 \text{ J.cm}^{-2}$)

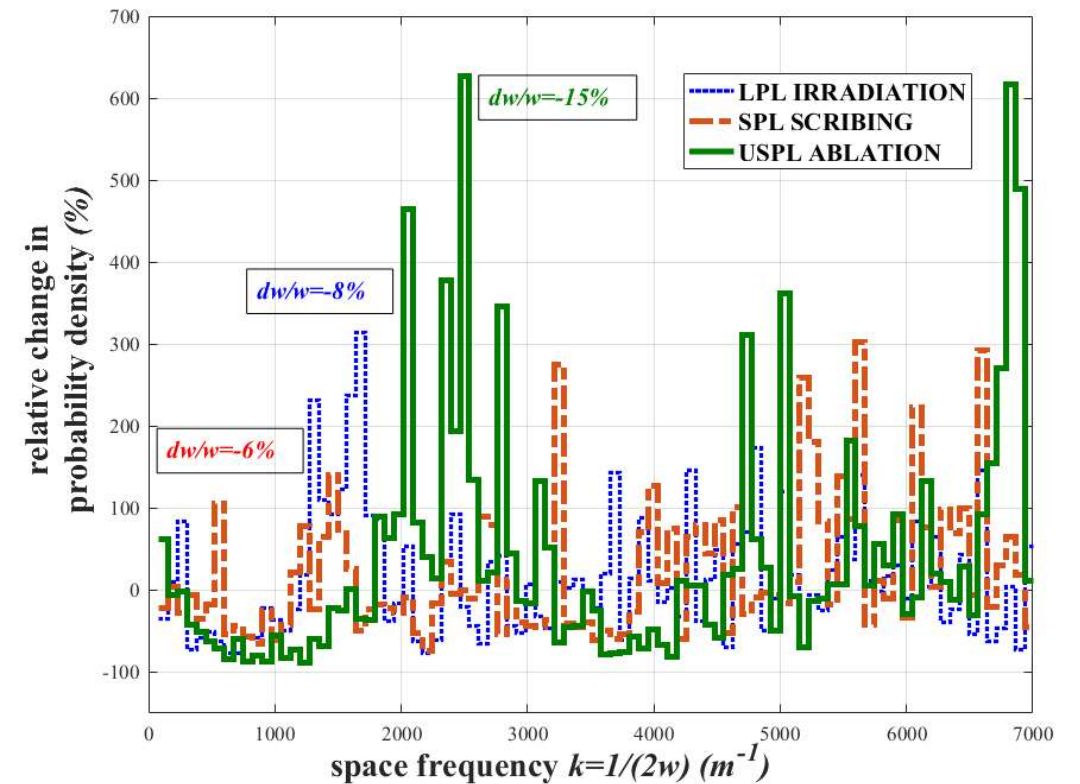
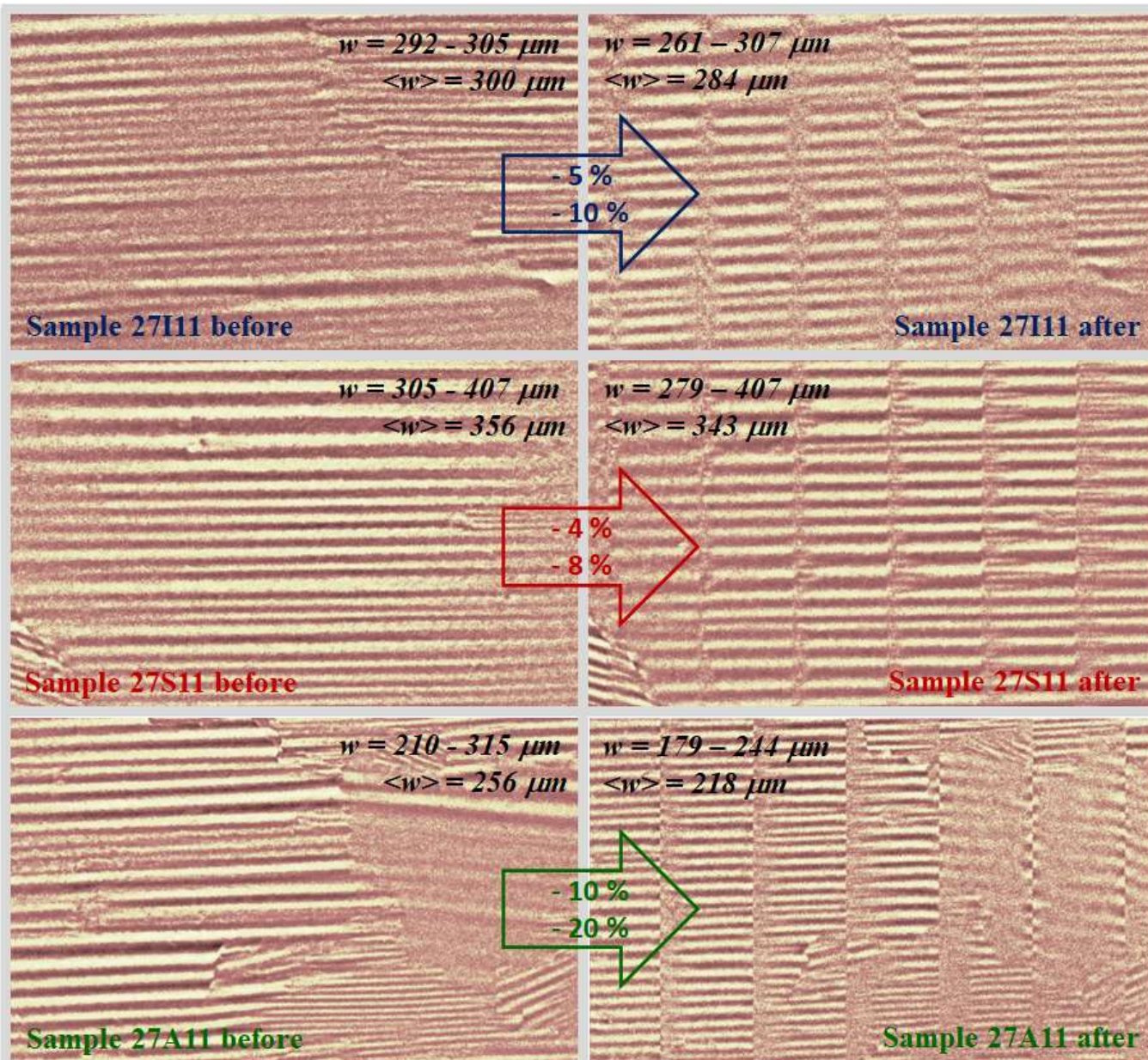


Profondeur du cratère calculée et mesurée en fonction de la fluence.
 Le résultat a été calibré avec F_1 croissante; mais F_N constante.
 (variation de P_w et f)



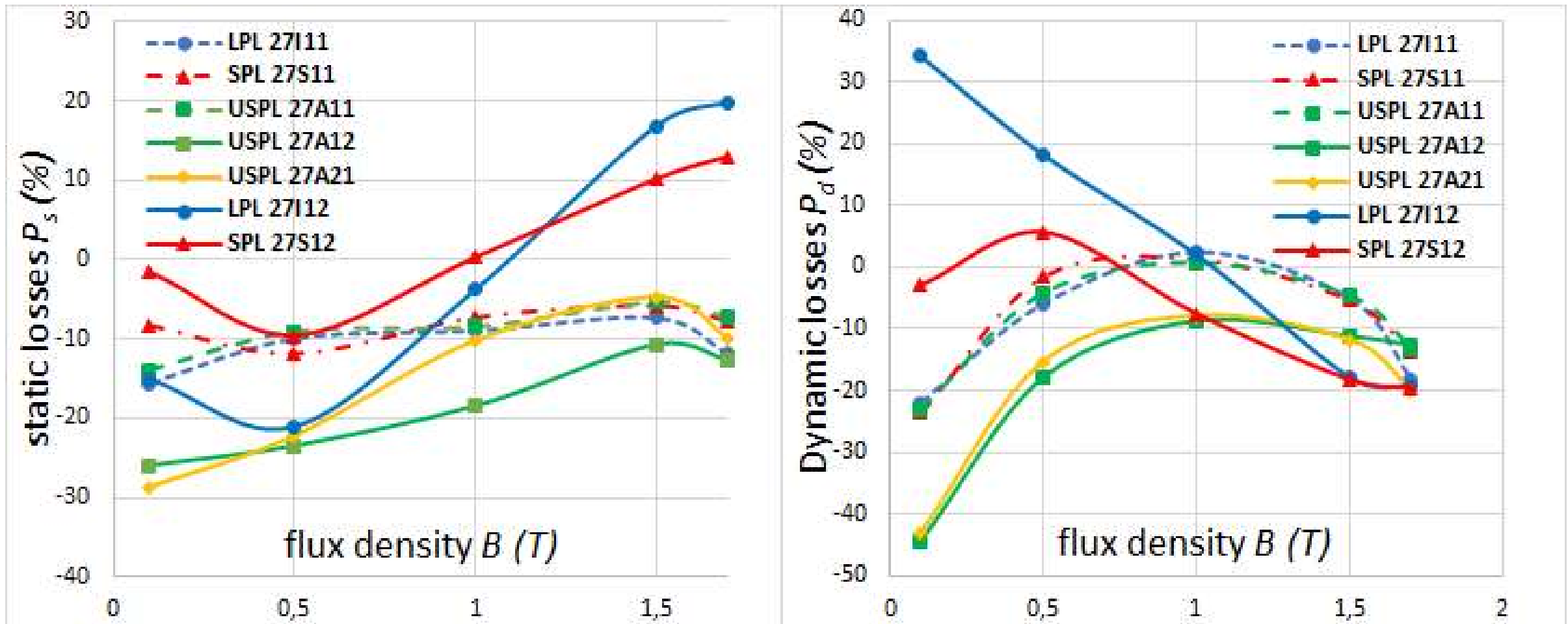
Profondeur du cratère calculée et mesurée en fonction de la fluence cumulée.
 Le résultat a été calibré avec F_N croissante; mais F_1 constante.
 (variation de v)

ANNEXE – IMPACTS LPL, SPL et USPL



O. Maloberti, M. Nesser, J. Dupuy, P. Dassonville, J. Fortin, C. Pineau, J.P. Birat, "Discriminating the physical impacts of various laser pulses on the magnetic structure of oriented electrical steels", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 566, 2023, 170248, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170248>.

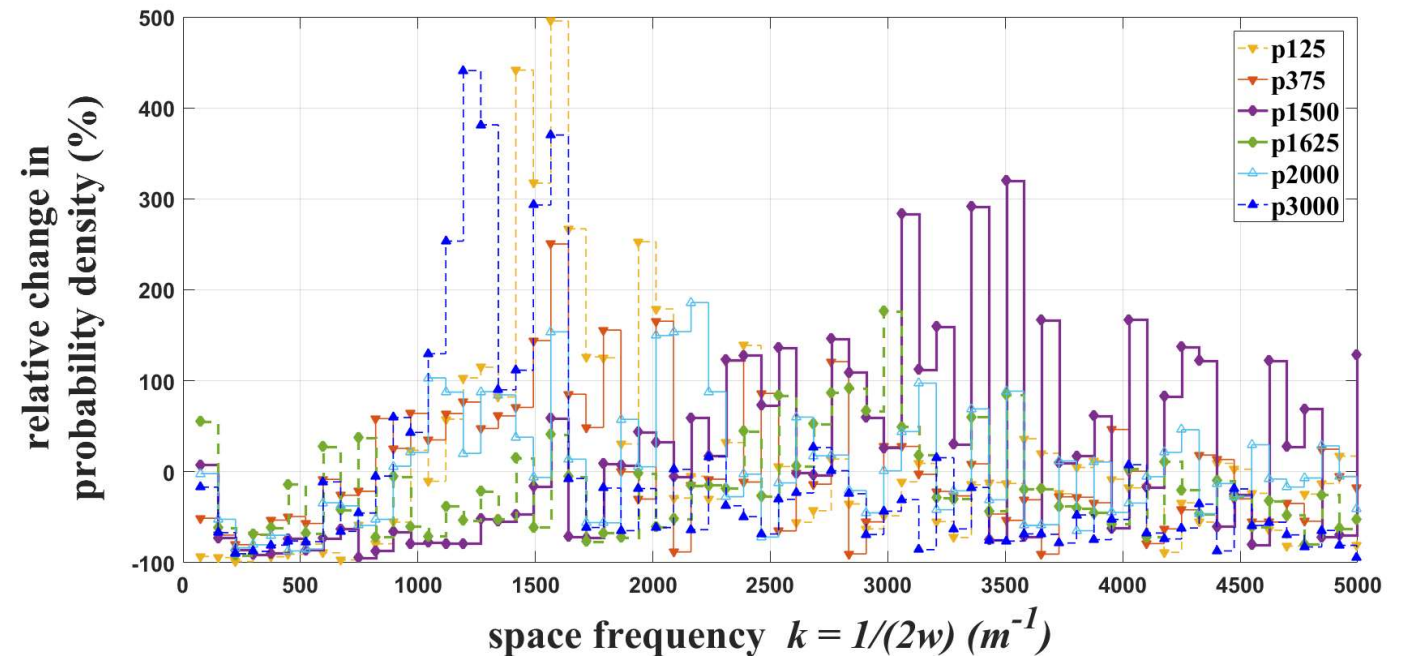
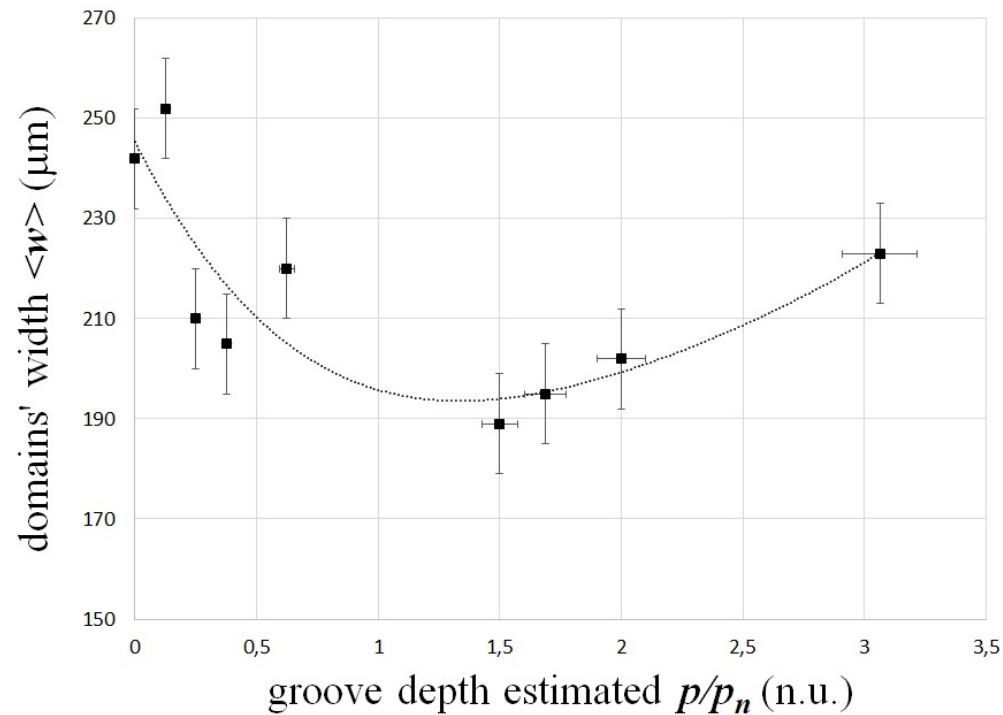
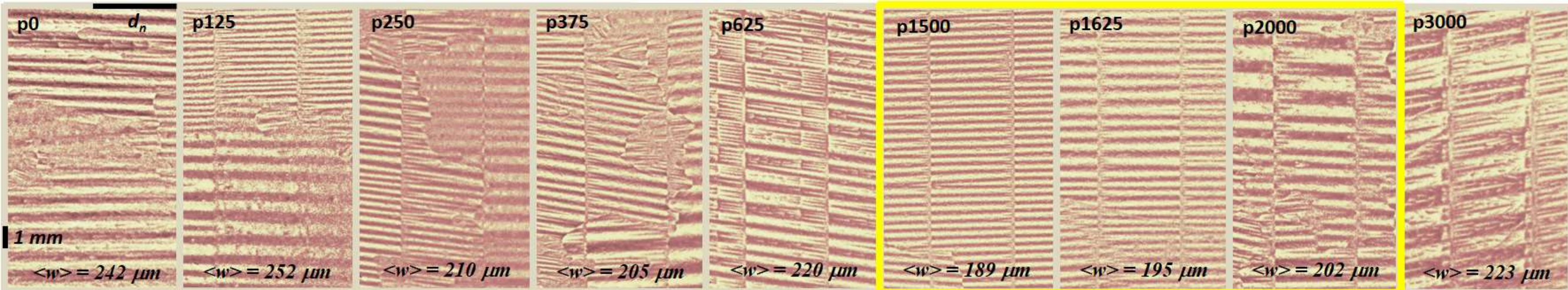
ANNEXE – IMPACTS LPL, SPL et USPL



O. Maloberti, M. Nesser, J. Dupuy, P. Dassonville, J. Fortin, C. Pineau, J.P. Birat, "Discriminating the physical impacts of various laser pulses on the magnetic structure of oriented electrical steels", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 566, 2023, 170248, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170248>.

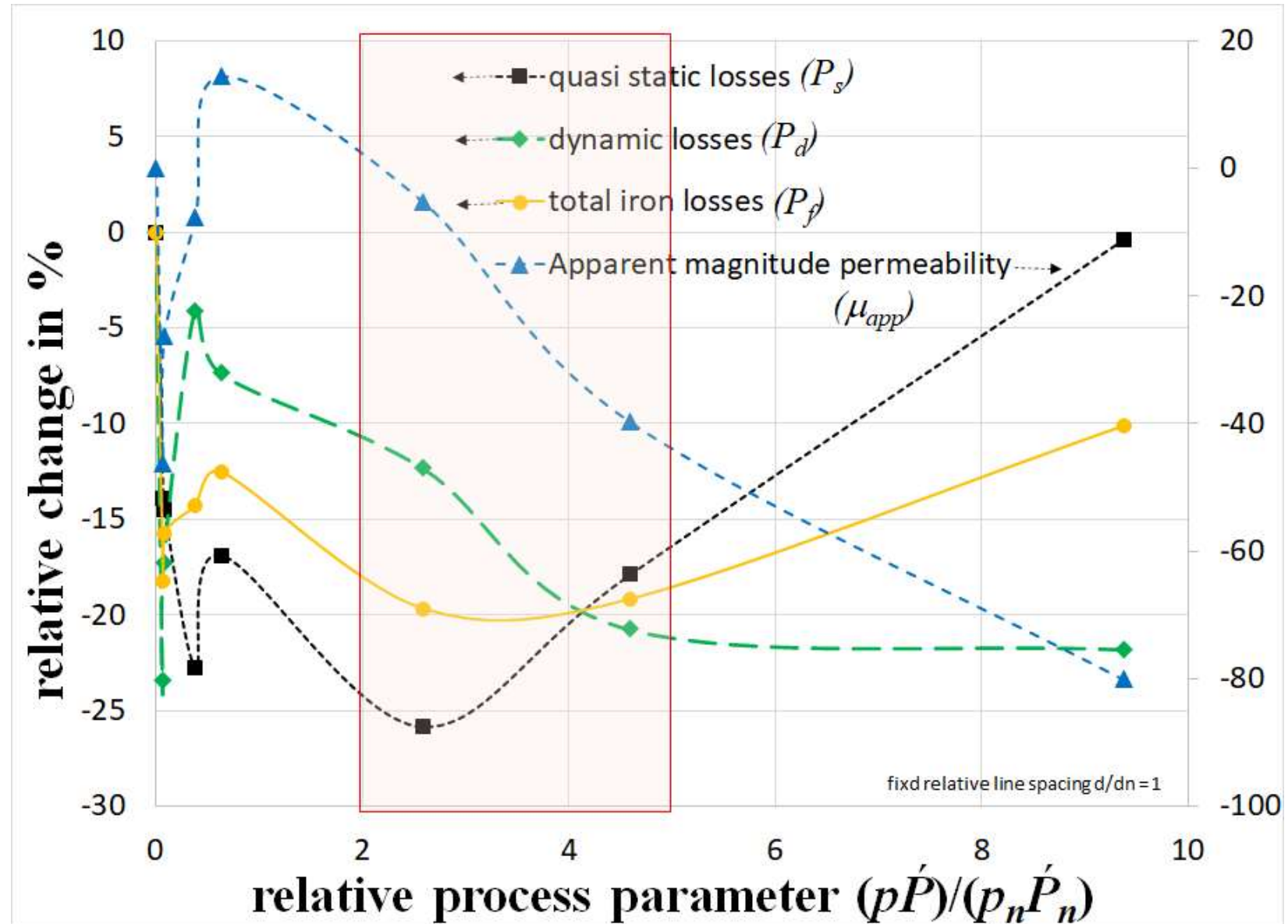
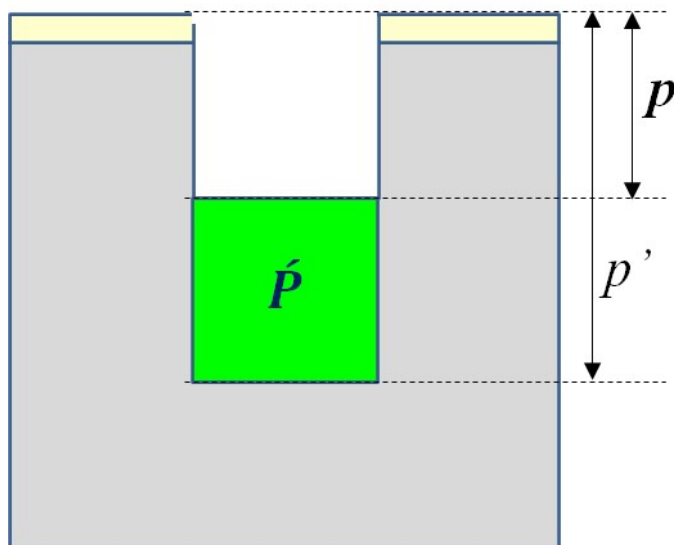
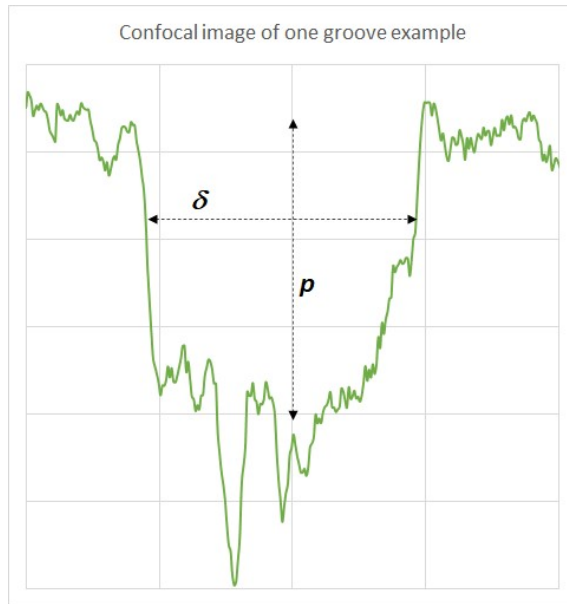
ANNEXE – IMPACT USPL vs p

O. Maloberti et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 580, 2023, 170279, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170279>.



ANNEXE – IMPACT USPL vs p

O. Maloberti et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 580, 2023, 170279, ISSN 0304-8853, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170279>.



Paramètres du laser et propriétés optiques du métal

| Nom | Valeur | Unité | Description |
|--------------|-------------------|---------------------|--|
| τ | 500 | fs | Durée d'une impulsion laser |
| N_p | 1 ou 2 | s.u. | Nombre de passes du faisceau laser |
| P_w | 0.5 – 20 | W | Puissance moyenne de la source laser |
| v | 1 – 10 | mm/s | Vitesse de balayage du faisceau laser |
| f | 1 – 100 | kHz | Fréquence de répétition |
| w_0 | 25 – 50 | μm | Largeur du spot laser (au waist) |
| f_x | 1 – 1.5 | s.u. | Coefficient de focalisation |
| N | - | s.u. | Nombre d'impulsions reçues en un point |
| E_1 | - | μJ | Energie par impulsion laser |
| F_1 | - | J.cm^{-2} | Fluence par impulsion laser |
| E_N | - | mJ | Energie cumulée en chaque point |
| F_N | - | J.cm^{-2} | Densité d'énergie ou Fluence cumulée |
| \hat{P} | - | MW | Puissance crête d'une impulsion |
| \hat{I} | - | TW.cm^{-2} | Intensité laser d'une impulsion |
| e_{th} | 0.5 | J.cm^{-2} | Fluence seuil d'ablation nominale |
| F_{th} | - | J.cm^{-2} | Fluence seuil d'ablation recalculée |
| A_0 | 0.35 | s.u. | Transmittance optique nominale |
| A | $A(p, F_1)$ | s.u. | Transmittance optique atténuée |
| ρ_{lim} | 5 – 20 | μm | Profondeur palier d'ablation |
| β | 180 | s.u. | Paramètre d'atténuation de A |
| α_0 | 0.011 | nm^{-1} | Coefficient d'absorption nominal |
| α | $\alpha(\hat{I})$ | nm^{-1} | Coefficient d'absorption non linéaire |
| χ | 2.48e-36 | A^{-2} | Coefficient non linéaire optique |

Propriétés thermiques et thermodynamiques de l'acier électrique

| Nom | Valeur | Unité | Description |
|----------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| T_f | 1535 | K | Température de fusion du métal FeSi |
| T_v | 2860 | K | Température de vaporisation du métal |
| L_f | 180 | kJ.kg^{-1} | Chaleur latente de fusion $\ll L_v$ |
| L_v | 6400 | kJ.kg^{-1} | Chaleur latente de vaporisation |
| ρ | 7.3-7.7 | g.cm^{-3} | Masse volumique du métal FeSi |
| λ_{ph} | 25 | $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ | Conductivité thermique du métal |
| C_{mph} | 460 | $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ | Chaleur spécifique massique du métal |
| C_{vph} | $\rho.C_{mph}$ | $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ | Chaleur spéc. volumique du métal |
| λ_e | $1e^4-1e^6$ | $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ | Conductivité du gaz d'électrons |
| C_{me} | C_{ve}/ρ | $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ | Chaleur spéc. massique des électrons |
| C_{ve} | $C_{ve} \cdot T_e$ | $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ | Chaleur spéc. volumique des e |
| h_s | $1e^{13}$ | $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ | Echange pour ablation de surface |
| h_v | $1e^{20}$ | $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ | Echange pour ablation de volume |
| $v_{vap/abl}$ | - | m.s^{-1} | Vitesse des particules sublimées |
| C_{ve} | $1-10^3$ | $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-2}$ | Coefficient de chaleur spécifique |
| G_0 | 0.1-10 | $\text{TW.cm}^{-3}.\text{K}^{-1}$ | Coefficient de couplage e-ph nominal |
| G | $G(\hat{I})$ | $\text{TW.cm}^{-3}.\text{K}^{-1}$ | Coef. de couplage électron-phonons |
| F_{lim} | 6-20 | J.cm^{-2} | Fluence palier de rendement |
| κ | 0.939 | s.u. | Coef. de dégradation de rendement |
| η | $\eta(F_1)$ | s.u. | Rendement d'ablation |

Données quantiques et constantes fondamentales

| Nom | Valeur | Unité | Description |
|----------------|----------------|-----------------|--|
| n_e | $1.69e^{29}$ | m^{-3} | Densité volumique d'électrons libres |
| E_F | 11.2 | eV | Energie de Fermi d'occupation des e^- |
| k_F | 1.71 | Å^{-1} | Vecteur d'onde de Fermi |
| T_F | 129°860 | K | Température de Fermi |
| v_F | 1985 | $km.s^{-1}$ | Vitesse de Fermi des électrons |
| ν_e | 41 | THz | Fréquence de collisions des électrons |
| ϵ_c^0 | 1.09 | s.u. | Permittivité rel. des électrons de valence |
| ω_{ph} | $8.58e^{13}$ | $rad.s^{-1}$ | Fréquence Plasma des ions métalliques |
| V_{ph} | 5960 | $m.s^{-1}$ | Vitesse du son, des phonons |
| k_D | 1.91 | Å^{-1} | Vecteur d'onde de Debye |
| T_D | 464 | K | Température de Debye |
| h | $6.63.e^{-34}$ | $m^2.kg.s^{-1}$ | Constante de Planck |
| \hbar | $h/(2\pi)$ | $m^2.kg.s^{-1}$ | Constante de Planck barre |
| k_B | $1.38.e^{-23}$ | $J.kg^{-1}$ | Constante de Boltzmann |
| m_e | $9.1.e^{-31}$ | kg | Masse d'un électrons |
| e | $1.6.e^{-19}$ | C | Charge d'un électron |
| ϵ_0 | $8.85.e^{-12}$ | $F.m^{-1}$ | Permittivité diélectrique |
| N_A | $6.02.e^{23}$ | s.u. | Nombre d'Avogadro |

BIBLIOGRAPHY

1. P. Beckley et al., *J. Mat. Eng. Perf.*, vol. 3 (2), p. 209-213, 1994.
2. K. Sato et al., *JMMM*, vol. 112, no 1-3, p. 183-185, july. 1992.
3. P. Beckley et al., *J. Appl. Phys.*, vol. 57 (8), p. 4212-4213, 1985.
4. S. V. Ponnaluri, *J. Mat. Proc. T.*, vol. 112 (2-3), p. 199-204, 2001.
5. Y. Huang et al., *Int. J. Adv. Manu. Tech.*, vol. 70, p. 1-9, 2014.
6. I. Petryshynets et al., *AIP Adv.*, vol. 8, no 4, p. 047604, april 2018.
7. J. Dupuy et al., *SPIE LASE conf.*, USA (2019), Proc. vol. 10911.
8. M. Nesser et al., *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 58 (8), p. 1-5, 2022.
9. M. Nesser et al., *JMMM*, vol. 504, 15 June 2020, 166696.
10. A B. N. Chichkov et al., *Ap. Ph. M. S. Proc.*, vol. 63 (2), p. 109-115, 1996.
11. S. Rung, *Micromachines*, vol. 5, p. 943-953; 2014.
12. A. Tatra, *Physics Procedia*, vol. 83, p. 1339-1346, 2016.
13. Ashcroft & Mermin, *Solid State Physics*, Rinehart & Winston, N-Y, 1976.
14. S. Coudert, PhD thesis, ED SPI, Université de Bordeaux, France, 2020.
15. Z. Lin et al., *Physical Review B*, vol. 77, , 2008.
16. M. I. Kaganov et al., *J. Exp. Th.. Phys.*, vol. 4, 173, 1957.
17. S. I. Anisimov et al., *Sov. Phys. JETP*, vol. 39, p. 375, 1974.
18. J. Chen et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 49, p. 307–316, 2006.
19. E.C. Chevallier et al., 24th-26th COMSOL conf. in Cambridge, 2019.
20. X. Y. Wang, *Physical Review B*, volume 50, number 11, 1994.
21. K.-H. Leitz, *Physics Procedia*, vol. 12, part B, p. 230-238, 2011.
22. P. Peyre et al., *Opt. Quantum Electron.*, vol. 27, p. 1213-1229, 1995.
23. O. Maloberti et al., *SMM'25th conference*, poster the 5th of may 2022.