



**HAL**  
open science

## Estimation d'un terme source dans un problème transitoire bidimensionnel ; Application au soudage par faisceau d'électrons

Jialin Guo, Philippe Le Masson, Eugène Artioukhine, Tahar Loulou, Sébastien Rouquette

### ► To cite this version:

Jialin Guo, Philippe Le Masson, Eugène Artioukhine, Tahar Loulou, Sébastien Rouquette. Estimation d'un terme source dans un problème transitoire bidimensionnel ; Application au soudage par faisceau d'électrons. Congrès français de Thermique 2005, Université de reims, May 2005, Reims, France. hal-04543828

**HAL Id: hal-04543828**

**<https://hal.science/hal-04543828>**

Submitted on 12 Apr 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

# Estimation d'un terme source dans un problème transitoire bidimensionnel ; Application au soudage par faisceau d'électrons.

Jialin GUO<sup>1</sup>, Philippe LE MASSON<sup>1\*</sup>, Eugène ARTIOUKHINE<sup>2</sup>, Tahar LOULOU<sup>1</sup>, Sébastien ROUQUETTE<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Laboratoire d'Etudes Thermiques, Energétiques et Environnement

Université de Bretagne-Sud - Centre de Recherche - rue de saint Maudé - 56321 Lorient Cedex

<sup>2</sup>Institut FEMTO-ST - Département CREST

CNRS UMR 6174 – Université de Franche Comté – 2 avenue Jean Moulin - 90000 Belfort.

<sup>3</sup>Laboratoire des Systèmes Mécaniques et Ingénierie Simultanée (LASMIS)

Université de Technologie de Troyes - FRE CNRS 2719 - 12 Rue Marie Curie - 10010 TROYES Cedex.

\*(auteur correspondant : [philippe.le-masson@univ-ubs.fr](mailto:philippe.le-masson@univ-ubs.fr))

**Résumé** – Dans cet article sont présentés les résultats de l'estimation de l'énergie dissipée dans la zone fondue lors d'une opération de soudage par faisceau d'électrons. L'objectif est d'identifier dans un plan transverse à l'axe de soudage et à chaque pas de temps la distribution énergétique. La méthode d'estimation utilisée est la méthode de régularisation itérative. Le modèle thermomécanique établi ne tient pas compte des phénomènes convectifs dans la zone fondue.

## Nomenclature

$b$	constante pour la réaction martensitique $S(z,x,t), S^{n+1}$ terme source ( $W.m^{-3}$ )		
$C_p(T)$	chaleur spécifique de la phase $i$	$T_{inf}, T_0$	températures externe et initiale ( $^{\circ}C$ ).
$D^n$	vecteur de la direction de descente	$T$	température de l'échantillon ( $^{\circ}C$ )
$H\gamma, H\alpha$	enthalpies des phases $\gamma$ et $\alpha$ ( $J.m^{-3}$ )	$U, I_b$	tension et intensité de soudage.
$\Delta H_{fus}$	enthalpie de fusion ( $J.kg^{-1}$ )	$V$	vitesse de soudage ( $m.s^{-1}$ )
$\Delta H_{vap}$	enthalpie de vaporisation ( $J.kg^{-1}$ )	$Y$	température expérimentale ( $^{\circ}C$ )
$J(S)$	fonction résiduelle	$\gamma^n$	paramètre de descente
$\nabla J^n$	gradient de la fonctionnelle	$\delta^2$	critère de convergence
$L(T), L_{\gamma\alpha}$	énergie de transformation ( $J.m^{-3}$ )	$\varepsilon(T)$	émissivité de l'échantillon
$Ms$	température de début de transformation martensitique	$\varepsilon_1$	critère d'arrêt
$n, n^*$	nombre d'itérations, dernière itération	$\lambda(T)$	conductivité de la phase $i$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$P_{\alpha}, P, P_{eq}$	proportion de phase métallurgique	$\rho(T)$	masse volumique ( $Kg.m^{-3}$ )
$z, x, y$	coordonnées spatiales (m)	$\sigma^2$	écart type
		$\Psi(z,r,t)$	variable adjointe
		$\tau$	fonction de retard

## 1. Introduction

Le procédé de soudage par faisceau d'électrons (FE) est plus souvent utilisé dans l'industrie lourde, la construction et la motorisation des bateaux, l'aérospatiale et le domaine nucléaire pour assembler des pièces épaisses et massives. Avec ce procédé, l'énergie est très concentrée et permet de réaliser des cordons étroits et profonds qui n'entraînent pas de distorsions importantes des pièces. En revanche, les forts gradients thermiques génèrent des niveaux de contraintes résiduelles élevés. Par ailleurs les cinétiques thermiques sont à l'origine de transformations micro-structurales au chauffage et au refroidissement. Ces changements de phases s'accompagnent de variations importantes des propriétés thermophysiques et du comportement mécanique du matériau. Il apparaît donc que les aspects thermiques sont fondamentaux lors d'une opération de soudage et sont fortement couplés aux aspects métallurgiques et mécaniques. Il existe dans la littérature de nombreux modèles qui,

appliqués à différents procédés de soudage et différents matériaux, tentent de traiter simultanément ces couplages pour prédire *in fine* les distorsions et les contraintes résiduelles. Toutefois, notamment dans le cas du soudage FE, le modèle thermique construit avec une source de chaleur trop approximative, ne permet pas de reproduire fidèlement les cinétiques thermiques dans toute la Zone Affectée Thermiquement (ZAT), qui est la zone sensible du cordon. En effet pour le procédé FE différentes formes de cordons de soudure peuvent être obtenues, en fonction de l'ajustement des différents paramètres de soudage que sont le courant du faisceau, le courant de focalisation, la tension d'accélération et la distance de tir. Les modèles thermiques actuels avec les termes sources existants ne permettent pas de simuler toutes ces formes de cordons de soudures observées expérimentalement.

Ce travail a donc pour objectif de mettre au point une méthodologie pour définir le terme source (du modèle thermique) qui modélise le plus fidèlement possible le dépôt d'énergie lors du soudage FE. Cette méthodologie s'appuie sur les techniques inverses pour estimer le terme source de notre modèle thermique en ne considérant qu'un modèle conductif pour les différentes phases en présence. Nous utilisons la méthode de régularisation itérative afin d'estimer l'énergie dissipée dans la zone fondue. Nous présentons, premièrement, le modèle thermométallurgique du problème direct. Nous rappelons ensuite quelques éléments de la méthode de régularisation appliquée à notre étude. Le travail se poursuit par une présentation de la manipulation développée. Enfin, nous présentons les principaux résultats de l'estimation.

## 2. Simulation numérique du soudage par faisceau d'électrons

De nombreux travaux au laboratoire LET2E [1, 2] ont permis de définir et d'approfondir la modélisation de ce type de soudage. Cette simulation est construite pour un échantillon d'acier faiblement allié 16MnNiMo5 (ASTM A508 Cl.3). Le faisceau d'électrons génère dans la matière un capillaire de vapeur ainsi qu'une zone fondue. Dans son déplacement (Figures 1 et 2), le faisceau vient intersecter des plans équipés de thermocouples. Du fait d'un temps de calcul prohibitif, nous avons négligé la diffusion de la chaleur dans la direction (y) d'avance du faisceau. Pour ce modèle 2D (x,z), les équations résolues dans le code d'estimation que nous avons développé ont été préalablement validées grâce au code de calcul « SYSWELD » [3, 4]. Nous résolvons l'équation de conduction de la chaleur (1) et les équations de transformations métallurgiques (2) du type Leblond-Devaux [5] et Koistinen-Marburger [6]. Le domaine d'étude (figure 1) est un demi-plan transverse perpendiculaire à l'axe de soudage.

$$\rho(T)C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial P_\alpha}{\partial t} L_{\alpha\gamma}(T) - \frac{\partial L(T)}{\partial t} + S(x, z, t) \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{eq} - P}{\tau} f \left( \frac{dT}{dt} \right) \text{ et } P = P_{max} (1 - \exp(-b(T - M_s))) \quad (2)$$

Dans l'équation de la chaleur, les termes  $\frac{\partial P_\alpha}{\partial t} L_{\alpha\gamma}(T)$  et  $\frac{\partial L(T)}{\partial t}$  permettent de prendre en compte les enthalpies de changement de phase en fonction de la température de l'échantillon (transformations métallurgiques pour le premier terme et, fusion ou vaporisation pour le second). L'énergie pour les transformations métallurgiques « solide-solide » est définie en fonction de l'enthalpie des phases:  $L_{\alpha\gamma}(T) = \rho_\gamma H_\gamma - \rho_\alpha H_\alpha$  et en considérant seulement deux phases métallurgiques :  $\gamma$  (austénite) et  $\alpha$  (ferrite, perlite, bainite ou martensite) (Les enthalpies des deux phases sont entrées sous la forme de fonctions continues par morceaux entre 100°C et 1450°C). De plus, les caractéristiques thermophysiques  $\rho(T)$ ,  $C_p(T)$  et  $\lambda(T)$  sont calculées à chaque pas de temps du calcul par une loi de mélange (ex:  $\lambda(T) = P_\gamma * \lambda_\gamma(T) + P_\alpha * \lambda_\alpha(T)$ ). Les énergies de fusion et de vaporisation sont définies entre 1450°C et 1550°C

pour la fusion et entre 2600°C et 2800°C pour la vaporisation. Ces enthalpies de changement de phase ont été prises dans les travaux de M. Costantini [7] :  $\Delta H_{fus} = 391970 J / Kg$  et  $\Delta H_{vap} = 6332879 J / kg$ . Les paramètres des équations de transformations métallurgiques (2) sont obtenus par la modélisation des diagrammes de transformation TRC appropriés. La première de ces équations est utilisée pour les transformations avec diffusion ( $\alpha \rightarrow \gamma$ , austénite  $\rightarrow$  ferrite et austénite  $\rightarrow$  bainite). Dans cette équation,  $\tau$  est un temps de retard et  $f(dT/dt)$  est une fonction liée à la vitesse de chauffage ou de refroidissement. La seconde équation (2) est utilisée pour la transformation sans diffusion austénite – martensite. Enfin les caractéristiques thermophysiques des phases liquide et vaporisée sont imposées aux valeurs données à 1450°C. Les conditions aux frontières et initiales sont les suivantes : sur les faces inférieure, supérieure et latérale, on peut insister sur le fait que le soudage se passe sous vide et que seuls des effets radiatifs sont pris en compte :

$$\text{Exemple sur la face supérieure : } -\lambda(T) \frac{\partial T(z=0, x, t)}{\partial x} = \varepsilon(T) \sigma [T^4(z=0, x, t) - T_{inf}^4] \quad (3)$$

$$\text{Sur l'axe : } \frac{\partial T(z, x=0, t)}{\partial x} = 0 \quad (4); \text{ valeurs initiales : } T(z, x, 0) = T_0; P_\alpha(z, x, 0) = 1$$

(5)

Nous notons ici que ce problème direct a été validé dans des précédents travaux [1,2,3]. Enfin, les différents systèmes d'équations sont résolus par des méthodes aux volumes finis (76 mailles constantes dans la direction verticale  $\Delta z = 0.5 mm$  et 100 mailles dans la direction transverse avec un raffinement important dans les zones fondue et vaporisée  $0.05mm \leq \Delta x \leq 2mm$ ) et un schéma implicite.

### 3. Procédure d'estimation

L'objectif de ce travail est l'estimation du terme source  $S(z,x,t)$  (équation 1) créé par le faisceau d'électrons. Lors de ce travail, aucune hypothèse n'est posée sur la forme du terme source. Nous réalisons une estimation en chaque point du maillage ( $0 < t < 20s$ ,  $0 < x < 1.5mm$  et  $0 < z < 80mm$ ). Cette estimation est conduite à partir de mesures de températures prises dans la zone affectée thermiquement à une distance comprise entre 2 mm et 8 mm de l'axe de soudage. Le pas de temps d'estimation est de  $\Delta t = 0.01s$ . L'estimation du terme source à la vue du problème direct (équations (1) à (5)) peut être formulée sous la forme variationnelle qui implique la minimisation de la fonction résiduelle:

$$J(S) = \int_0^{t_f} \sum_{i=1}^N [T(z_i, x_i, t; S) - Y(z_i, x_i, t)]^2 dt$$

(6)

où  $T(z_i, x_i, t; S)$  et  $Y(z_i, x_i, t)$  représentent respectivement les températures estimées et mesurées aux N points de l'échantillon et  $t_f$  le temps final de l'estimation ( $t_f = 20s$ ). Le problème inverse consiste en la minimisation de la fonctionnelle résiduelle sous contraintes données par les équations du problème direct. La fonction  $S(z,x,t)$  est considérée ici comme un élément de l'espace de Hilbert  $L^2$  et la nouvelle fonction est obtenue après chaque itération grâce à la méthode du gradient conjugué couplée au principe de régularisation itératif [8]. Le gradient  $\nabla J^n$  de la fonctionnelle résiduelle est obtenu pour toutes les valeurs de z, de x et de t par la relation analytique suivante [8] :

$$\nabla J^n = \Psi(z, x, t),$$

(7)

où  $\Psi(z, x, t)$  est la solution du problème adjoint. Plus de détails sur le problème adjoint, le problème en variation et sur l'algorithme de convergence sont donnés dans les références [3, 9]. Ces références présentent la validation des codes d'estimation à partir de différentes

sources théoriques. Enfin, en présence de bruit, la méthode de régularisation itérative est appliquée [8].

## 4. Application

### 4.1. La manipulation

L'estimation d'un terme source théorique par différentes méthodes (Levenberg Marquardt sur les paramètres d'une source gaussienne et méthode de régularisation itérative)[3] a montré qu'il est difficile d'obtenir la répartition spatiale de l'énergie dans chaque plan perpendiculaire à l'axe de soudage. Par contre, la distribution d'énergie en fonction de la profondeur ainsi que la position relative de la source en fonction de cette profondeur restent des grandeurs potentiellement identifiables. Le travail expérimental développé est le fruit de travaux menés au laboratoire LET2E depuis 2000 [10]. Ceci nous a conduit à proposer une méthode d'implantation de thermocouples basée sur la découpe des échantillons afin d'y réaliser une instrumentation fine [3, 10]. Les figures 2 et 3 présentent le principe de découpe des échantillons ainsi que l'implantation des thermocouples de type K (50 $\mu$ m). Deux blocs du type de la figure 2 ont été équipés. 93 thermocouples, répartis sur les quatre interfaces, ont été implantés dans la zone affectée thermiquement. Chaque thermocouple est soudé par décharge capacitive au fond d'un petit trou (diamètre 400  $\mu$ m, profondeur 500  $\mu$ m). Les fils de 50  $\mu$ m de diamètre sont ensuite ressortis grâce à des rainures réalisées par électroérosion jusqu'à une cuvette (à environ 20mm de l'axe de soudage) où une jonction (nœud et étamage de ce nœud) avec des fils de 125  $\mu$ m est réalisée. Les fils sont ensuite protégés et isolés électriquement par une colle haute température (Aremco Ceramabond 571 -  $T_{max} = 1750^{\circ}C$ ) et par un élastomère ( $T < 470^{\circ}C$ ). A l'issue de la fabrication, la reconstitution des blocs (figure 2) est obtenue par agrafage grâce à des points de soudage TIG. Le soudage par faisceau d'électrons des deux échantillons a été exécuté sur le site de l'établissement d'Indret de la Direction des Constructions Navales (D.C.N. Propulsion) qui dispose d'un faisceau d'une puissance de 100 KW avec une enceinte à vide de 800 m<sup>3</sup>. Un essai de type « ARATA »[11] a été réalisé sur un feuillard inox pour s'assurer de la reproductibilité de la forme du faisceau avec les paramètres de soudage du tir de référence ( $U = 60$  kV,  $I_b = 0,29$  A,  $I_f = 2,46$  A,  $V = 2,5$  mm/s, distance de tir = 160 mm). En effet, la géométrie du faisceau peut évoluer en fonction du vieillissement de l'installation. Enfin, la fréquence d'acquisition est de 100 Hz sur un temps d'enregistrement de 5 minutes. Concernant le bilan de cette campagne de mesure, 93 cycles thermiques ont été enregistrés, 52 thermocouples ont donné des enregistrements directement utilisables par le code d'estimation, 28 thermocouples ont donné des informations tronquées et 13 thermocouples ont dépassé le niveau thermique acceptable par le type K. Le travail d'exploitation de la manipulation s'est décomposé en deux étapes. L'une de ces étapes a consisté en un contrôle précis des positionnements des boules de thermocouples (étape indispensable à l'estimation de la source). Une autre a eu pour objet de synchroniser les enregistrements obtenus des quatre interfaces en considérant que le soudage se fait de façon quasi stationnaire [3].

### 4.2. L'estimation

L'estimation du terme source s'appuie sur les 52 cinétiques thermiques obtenues sur les quatre interfaces après un recalage temporel. Le nombre important de points de mesure en particulier à proximité de la surface nous permet de souligner les points suivants. Tout d'abord, le calcul a été mené jusqu'à 300 itérations. La figure 4 présente l'évolution de la fonctionnelle au cours du calcul. De façon identique aux cas théoriques [3], on montre que la décroissance est très rapide sur les 20 premières itérations lors de la convergence vers la densité de puissance dissipée. Par la suite, nous notons une variation plus lente après une centaine d'itérations. La source estimée n'évolue que très peu. Les formes de source obtenues nous permettent de noter qu'il est impossible d'obtenir une distribution correcte suivant la

direction transversale (on obtient une valeur moyenne), que la distribution en fonction du temps suit une loi de type gaussien hormis près de la surface (figure 6) où la forme laisse apparaître une quantité d'énergie non négligeable à l'arrière du faisceau liée certainement au rejet de métal fondu. De plus, à la figure 5, nous pouvons noter que la distribution d'énergie est fonction de la profondeur avec tout d'abord une zone plus énergétique proche de la surface ( $z < 10$  mm), puis une valeur moyenne sur une bonne partie du cordon ( $10\text{mm} < z < 65\text{mm}$ ) et enfin une atténuation des valeurs à la racine du cordon. A l'issue des estimations précédentes, nous avons décidé de corriger le terme source dans la direction transverse et d'imposer une forme gaussienne. En effet, faute de contrainte, la méthode de régularisation itérative aboutit à un étalement de l'énergie dans cette direction qui ne permet pas d'obtenir des limites de zones fondue et affectée thermiquement correctes par rapport à l'expérience. La figure 7 présente la nouvelle forme de source obtenue à partir de la source estimée de la figure 6.

## 6. Conclusion

L'objectif de ce travail était d'estimer par la méthode de régularisation itérative un terme source dans le cas d'un soudage par faisceau d'électrons. Une modélisation thermométallurgique transitoire s'appuyant sur un plan 2D transverse a été réalisée. Les résultats montrent que nous sommes dans l'impossibilité de décrire correctement la distribution d'énergie dans la direction transverse. Une valeur moyenne et constante est obtenue en fonction de cette direction. Par contre, les répartitions en fonction de la direction de soudage ( $t$ ) et en fonction de la profondeur ( $z$ ) nous donnent des indications pertinentes. De plus, l'analyse de l'intégrale de l'énergie en fonction de la profondeur  $z$  montre que la répartition de l'énergie est uniforme pour des profondeurs  $8 < z < 65$  mm et qu'elle varie en tête et pied de cordon. En pied de cordon, la densité de puissance s'atténue tandis qu'en tête de cordon, le rejet de matière accentue cette densité. Finalement, afin de proposer une forme de source optimale, et afin de contourner la difficulté liée à la répartition transverse de l'énergie, nous avons proposé de répartir l'énergie moyenne estimée dans la direction transverse sous une forme gaussienne. Une analyse finale des formes des zones fondues et affectées thermiquement montre une difficulté à retrouver la limite de zone fondue. Par contre, la limite de zone affectée thermiquement est très bien retrouvée.

## Références

- [1] P. Rogeon et al., Numerical simulation of electron beam welding of metals : sensitivity study of a predictive model, *Mathematical Modelling of weld Phenomena* 5, Eds. H.Cerjak, H.K.D.H. Bhadeshia, Institute of Materials (2001) 913-943
- [2] P. Rogeon et al., Numerical simulation of electron beam welding of metals : Influence of prior austenite grain size on HAZ microstructure in a low alloyed steel, article accepté à *Welding Journal- Research supplement*
- [3] J. Guo, thèse soutenue le 7/1/2005
- [4] Manuel d'utilisation "sysweld", Systus International (1994).
- [5] J. Leblond, J. Devaux, A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size ; *Acta Metall.*, 32 (1) (1984) 137-146.
- [6] D.P. Koistinen, R.E. Marburger, A general equation prescribing the extent of austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels; *Acta. Metall.*, 7 (1959) 59.
- [7] M. Costantini, Simulation numérique du soudage par faisceau d'électrons - contribution au développement d'un modèle prédictif de l'apport d'énergie, thèse de l'université Paris 6 (1995)
- [8] O.M. Alifanov, E.A. Artyukhin, S.V. Rumyantsev, *Extreme Methods for Solving Ill-posed Problems with Applications to inverse Heat Transfer Problems*, Begell house, N-Y, 1995.
- [9] J. Guo et al., A new approach for the estimation of a phase change interface location in a two-dimensional problem ; Application to a electron beam welding, article accepté au congrès 2<sup>nd</sup> International Conference on Thermal Process Modelling and Computer Simulation – Nancy - F - 31mars– 2avril 2003

- [10] M. Carin, P. Rogeon, D. Carron, P. Le Masson et D. Couedel, Numerical simulation of electrons beam welding and instrumental technique, Revue européenne des éléments finis, Vol. 13, N° 3-4, pp. 247-267, 2004.
- [11] Y. Arata, Evaluation of beam characteristics by the ab test method, Plasma, electron and laser beam technology, Metals Park, Ohio/USA : American Society for Metals, pp. 177-189, 1986.

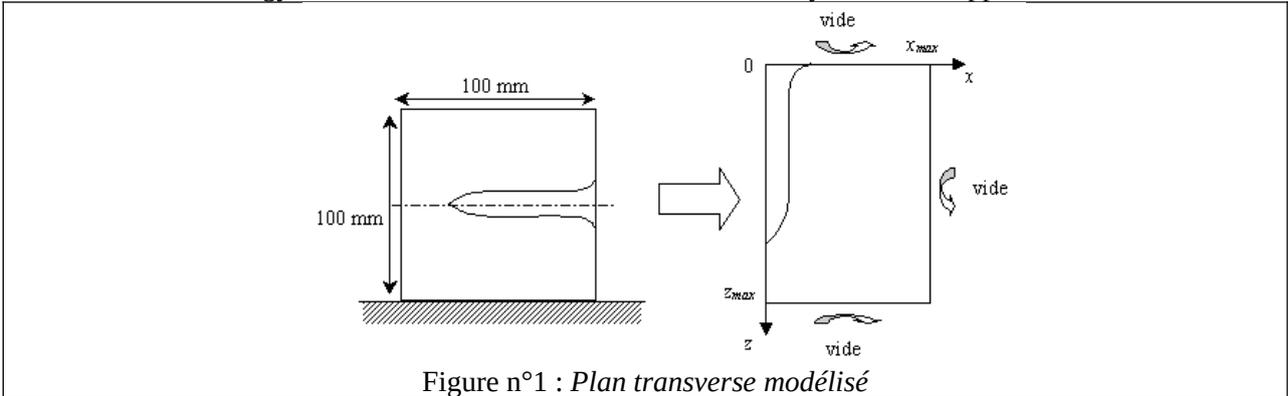


Figure n°1 : Plan transverse modélisé

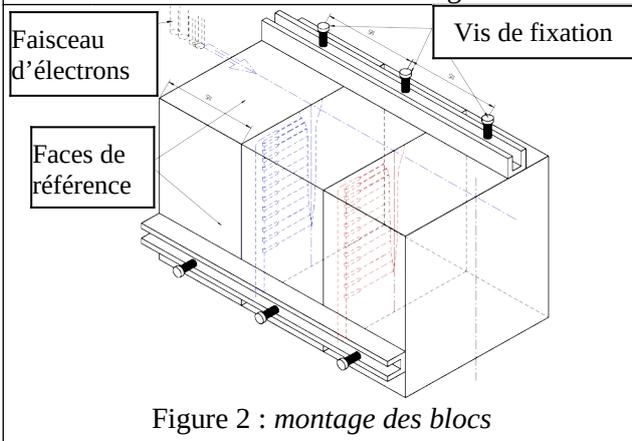


Figure 2 : montage des blocs

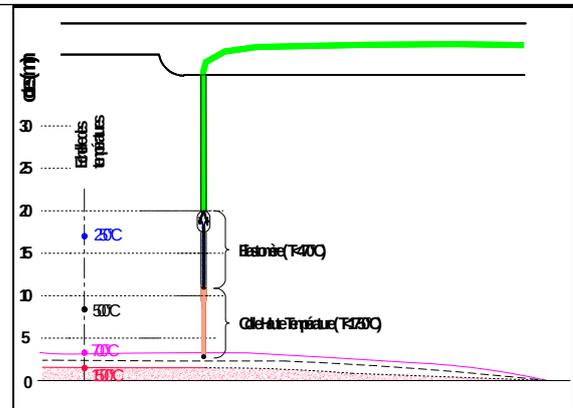


Figure 3 : Implantation des thermocouples

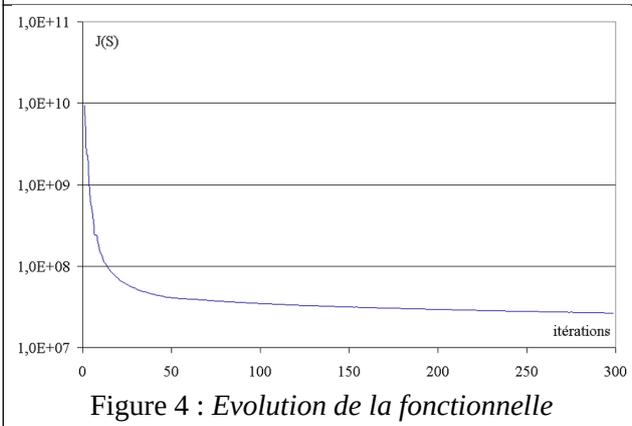


Figure 4 : Evolution de la fonctionnelle

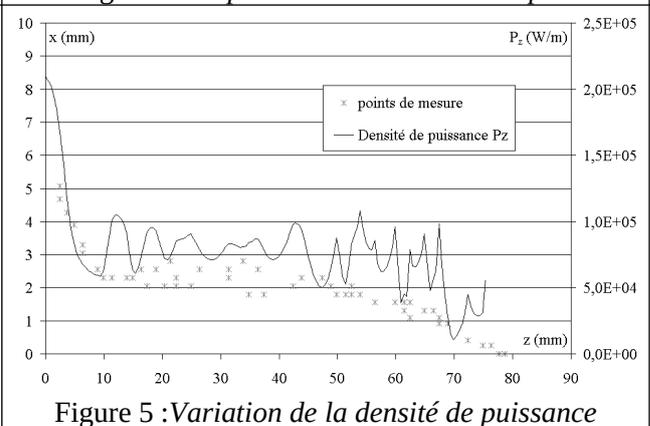


Figure 5 : Variation de la densité de puissance

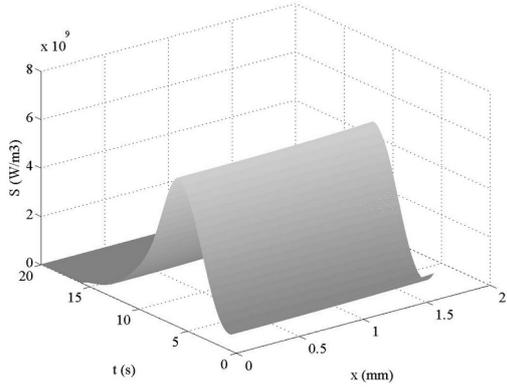


Figure 6 : Source estimée en  $z = 2,47$  mm

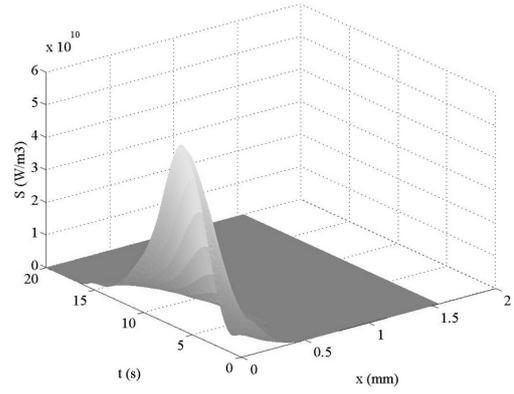


Figure 7 : Source optimale en  $z = 2,47$  mm