

# ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES OPERATOIRES SUR LA MORPHOLOGIE DES CORDONS DE SOUDURE - CAS DE SOUDAGE HYBRIDE (LASER/MIG)

Lyes BIDI<sup>1</sup>, Philippe LE MASSON<sup>2</sup>, Eugen CICALA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université Frères Mentouri Constantine, Route de Ain EL Bey Constantine, Algérie, bidi.lyes@gmail.com

<sup>2</sup>Université Bretagne Sud, FRE CNRS 3744, IRDL, F-56100 Lorient, France, philippe.le-masson@univ-ubs.fr

<sup>3</sup>Université de Bourgogne, IUT-12, rue de la Fonderie, Le Creusot 71200, France, eugen.cicala@laposte.net

## RÉSUMÉ

Le travail présenté dans cet article concerne l'optimisation des paramètres opératoires de soudage par la méthode des Plans d'Expériences. Le procédé de soudage utilisé dans ce cas est le soudage hybride (laser/MIG), qui consiste à combiner un faisceau laser avec une torche MIG afin d'augmenter la productivité et la fiabilité de l'opération de remplissage des chanfreins en plusieurs passes sur toute la hauteur du chanfrein. Chaque passe, apporte environ 3 mm de métal déposé et doit assurer une pénétration latérale suffisante de l'ordre de 0,2 mm. Nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences d'une part pour estimé les effets des paramètres opératoires et leurs interactions sur la surface de pénétration latérale, et d'autre part pour fournir un modèle mathématique qui relie les paramètres opératoires de soudage à la fonction objectif surface de pénétration latérale.

**Mots Clés:** *Soudage Hybride laser-MIG, Plans d'Expériences, Optimisation.*

---

## NOMENCLATURE

### Symboles :

Déf	défocalisation laser, mm	Surflat.tot	surface de la pénétration latérale totale, mm <sup>2</sup>
D <sub>LM</sub>	distance entre laser et MIG, mm	V <sub>f</sub>	vitesse de fil, m/min
FI	fcateur d'influence	V <sub>s</sub>	vitesse de soudage, m/min
FO	fonction objectif		
MIG	metal inert gas		
MP	matrice programme		
PEC	plan d'expérience complet		
PEC 2 <sup>5</sup>	plan d'expériences complet à 32 essais		

---

## 1. INTRODUCTION

Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblages à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. On peut citer : les procédés de soudage à l'arc électrique (MIG/MAG, TIG, plasma...), le soudage par résistance (très utilisé dans l'industrie automobile), ainsi que les procédés à haute densité d'énergie (laser, faisceaux d'électrons). Les besoins des industriels en matière de

fiabilité et de productivité ont favorisé le développement de nouveaux procédés de soudage hybride tel le laser/MIG.

Vu la complexité du procédé de soudage hybride laser-MIG, vis-à-vis du nombre de paramètres opératoires d'une part, et des interactions probables entre ces paramètres d'autre part, nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences pour mettre en évidence les paramètres les plus influents et leurs interactions sur des observables que sont les caractéristiques géométriques des cordons de soudure. La méthode des plans d'expériences par utilisation des Plans d'Expériences Complets (PEC) permet d'étudier l'ensemble des facteurs ainsi que leurs interactions. Dans la littérature, il existe plusieurs études fondées sur la méthode des plans d'Expériences appliquée à l'optimisation de différents procédés de soudage. Casalino et al [1] ont étudié à l'aide d'un PEC, les effets et les interactions entre les paramètres opératoires du procédé de soudage hybride laser-MIG sur la pénétration. Il a proposé un modèle expérimental qui permet d'estimer la valeur de la pénétration en fonction des paramètres de soudage. Tani et al [2] ont analysé l'influence de la nature du gaz de protection et sa composition à la fois sur la stabilité du procédé hybride, et sur les caractéristiques dimensionnelles du cordon de soudure. G. Campana et al [3] a travaillé sur deux aspects, l'optimisation de la position du laser par rapport au MIG, et l'influence du mode de Transfert du MIG sur la stabilité du procédé hybride laser-MIG. Dans ce cas d'étude, l'utilisation de l'approche plan d'expériences est mise en évidence. Bidi et al [4] a combiné la modélisation expérimentale à l'aide de la méthode des plans d'expériences avec une simulation numérique des phénomènes thermiques lors d'une opération de soudage ou de rechargement dans le cas de procédé hybride laser/MIG à plat. Casalino et al [5] a étudié les effets de l'énergie due au laser et l'énergie due à l'arc sur la géométrie de cordon de soudure, sur les porosités et sur les contraintes résiduelles près de la zone affectée thermiquement. Une combinaison optimale de paramètres d'énergie a été préposée.

L'objectif de cette étude est de maîtriser le procédé de soudage hybride laser-MIG, afin d'assurer une très bonne qualité de cordons de soudure. Vu le niveau très élevé requis pour la sécurité des installations dans l'industrie nucléaire, nous avons réalisé une étude plus complète sur la surface de la pénétration latérale qui est un élément fondamental en configuration chanfrein. Cette étude consiste à analyser les effets des paramètres opératoires et leurs interactions sur la surface de pénétration latérale et de fournir un modèle mathématique fiable qui relie les paramètres opératoires de soudage aux dimensions du cordon de soudure.

## 2. MODELE EXPERIMENTALE POLYNOMIAL DE LA SURFACE LATERALE A L' AIDE D'UN PLAN D'EXPERIENCE

La méthode moderne (Box-Wilson) est définie par le principe « tous les facteurs à chaque moment » et utilise une stratégie multi factorielle [6]. Ceci suppose de faire varier les niveaux de tous les facteurs à la fois, mais d'une manière programmée et raisonnée. Le fait de faire varier tous les facteurs à la fois présente de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer [7] : une diminution du nombre d'essais ; un nombre de facteurs étudiés très grand ; une détection des interactions entre les facteurs ; une détection des valeurs optimales ; une meilleure précision sur les résultats ; une modélisation des résultats.

La surface de la pénétration latérale, notamment en configuration chanfrein, est une grandeur importante d'un point de vue industriel, nous avons par conséquent réalisé une étude complète avec pour seule Fonction Objectif (FO) cette grandeur. Cette étude nous permet aussi d'analyser tous les effets des interactions entre les paramètres opératoires de soudage. L'objectif de ce plan d'expériences est de mettre en évidence l'influence de 5 facteurs (Vitesse de fil -  $V_f$ , Distance laser / MIG-  $D_{LM}$ , Vitesse de soudage-  $V_s$ , Puissance laser- $P_L$  et Défocalisation laser-Def) sur la surface de pénétration latérale totale (**Surflat.tot**) et de fournir un modèle empirique. La surface de pénétration latérale totale est la somme des surfaces de pénétrations de chaque côté du chanfrein (FIGURE 1). L'étude expérimentale a été menée à l'aide d'un Plan d'Expériences Complet PEC 2<sup>5</sup> (plan factoriel complet à 5 facteurs et 2 niveaux). Le modèle expérimental associé à ce plan est dénommé modèle linéaire ou de premier degré explicité par un polynôme de la forme (1) :

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^5 b_j x_j + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^5 b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

où :  
*y* – fonction objectif correspondante  
*x<sub>j</sub>, x<sub>i</sub>* – valeurs codifiées des facteurs d’influence (±1)  
*b<sub>0</sub>, b<sub>j</sub>* – coefficients de régression (termes linéaires)  
*b<sub>ij</sub>* – coefficients de régression (termes d’interaction)

*Facteurs d’Influences (FI)*

Nous avons attribué 2 niveaux à chacun des 5 paramètres (TABLEAU 1).

Facteurs d’Influences (FI)	Domaine d’exploration
Vitesse de fil, Vf [m.min <sup>-1</sup> ]	[7.5 ; 10.5]
Distance laser/MIG, D <sub>LM</sub> [mm]	[1.6 ; 4]
Vitesse de soudage, V <sub>s</sub> [m.min <sup>-1</sup> ]	[0.7 ; 1.3]
Puissance laser, P <sub>L</sub> [kW]	[4 ; 6]
Défocalisation laser, Déf [mm]	[26 ; 40]

TABLEAU 1. Facteurs d’influence et leurs niveaux de variation.

*Fonction Objectif (FO)*

Dans le cas de soudage des chanfreins, on pourra caractériser la géométrie des cordons par plusieurs grandeurs tels que : la pénétration en profondeur, la hauteur de dépôt de métal, la surface de pénétration latéral. Dans ce travail nous intéressons à l’étude de la Fonction Objectif : **la surface de la pénétration latérale totale (Surflat.tot [mm<sup>2</sup>])**, qui est la somme des surfaces des pénétrations latérale de chaque côté du chanfrein (FIGURE 1). Ce choix est justifié par rapport à sans importance d’un point de vue industriel (la qualité des soudures, la résistance des assemblages,...)

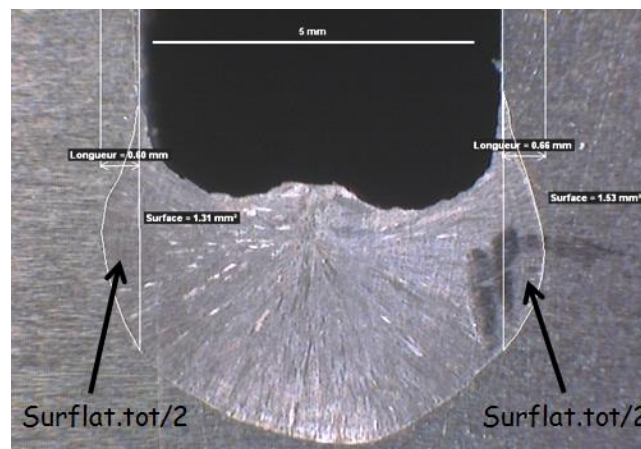


FIGURE 1. Présentation de la Fonctions Objectif : surface de pénétration latérale totale (Surflat.tot).

### Matrice Programme (MP)

La Matrice Programme pour les conditions expérimentales retenues (cinq Facteurs d'Influence avec 2 niveaux et une seule Fonction Objectif) comporte 32 essais ( $2^5$ essais) [7,8].

### 3. RESULTATS

L'amplitude des effets, provoqués par les facteurs d'influence et leurs interactions, sur la surface de pénétration latérale (**Surflat.tot**) est présentée dans la FIGURE 2 sous forme d'histogrammes de Pareto. L'histogramme de Pareto est une représentation graphique par ordre décroissant d'importance des effets provoqués par les facteurs et les interactions sur les fonctions objectifs. La FIGURE 2 montre que Surflat.tot est principalement influencée par la vitesse de soudage ( $V_s$ ), la puissance laser ( $P_L$ ) et leur interaction. Des interactions complexes entre  $V_s$ ,  $P_L$  et les autres Facteurs d'Influence (principalement la distance entre le laser et l'arc MIG) ont aussi des influences significatives sur la surface de pénétration latérale.

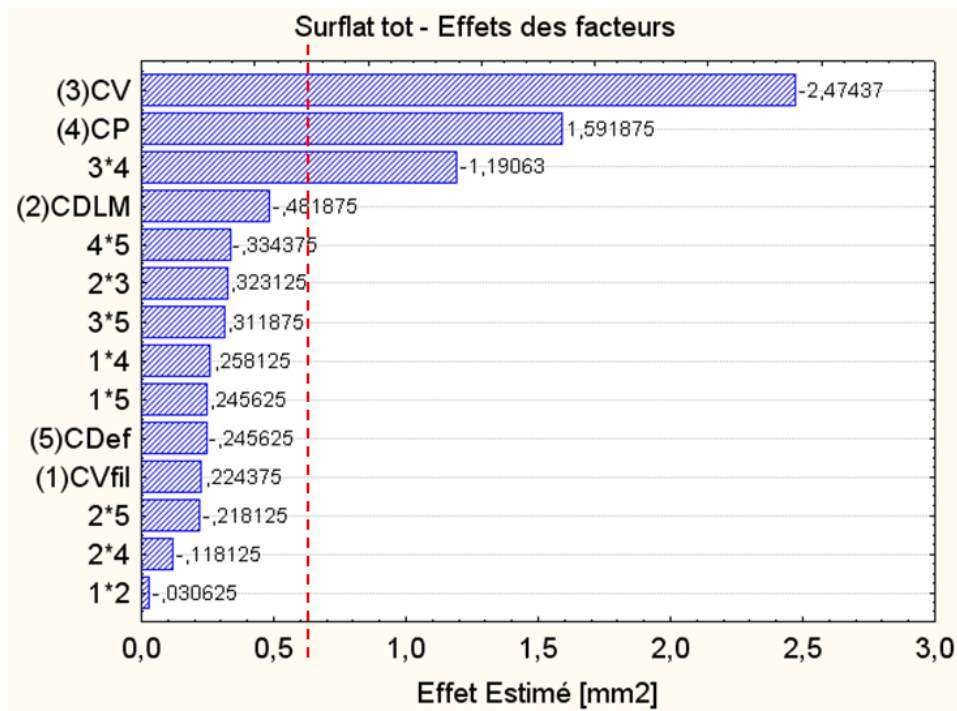


FIGURE 2. Influence des facteurs sur la surface de pénétration latérale (Surflat.tot).

Les surfaces de réponse présentant les variations de la surface de pénétration latérale totale (Surflat.tot) en fonction des certains facteurs d'influence (significatifs ou non significatifs) peuvent être observées en FIGURE 3 et FIGURE 4. Sur la FIGURE 3 on observe que la vitesse de soudage ( $V_s$ ) et la puissance laser ( $P_L$ ) et leur interaction ont des effets significatifs (FIGURE 2) sur la surface de pénétration latérale (dans le domaine exploré). Dans ces conditions, l'effet de la puissance laser sur la Surflat.tot est influencé par le niveau sur lequel se situe la vitesse. Pour des faibles vitesses, l'effet de la puissance laser sur la Surflat.tot est plus important que pour des grandes vitesses. En revanche on observe sur la FIGURE 4 que la vitesse de fil ( $V_f$ ) et la distance entre le laser et l'arc MIG ( $D_{LM}$ ) ont en général des effets directs non-significatifs sur la Surflat.tot (dans le domaine exploré). En revanche, leurs interactions avec les autres Facteurs d'Influence (en premier  $V_s$  et  $P_L$ ) peuvent présenter des effets significatifs.

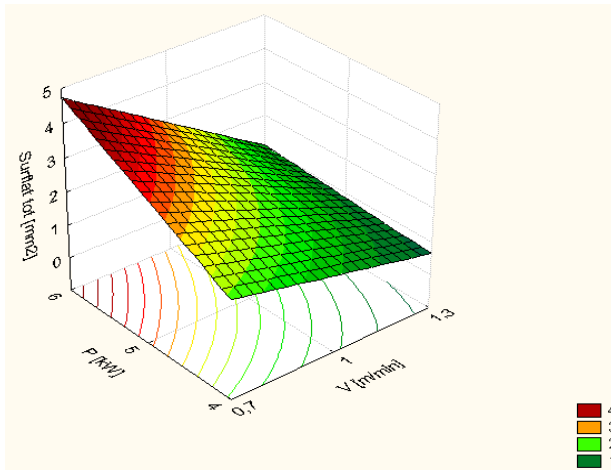


FIGURE 3. Variation de la surface de pénétration latérale totale avec la  $V_s$  et  $P_L$

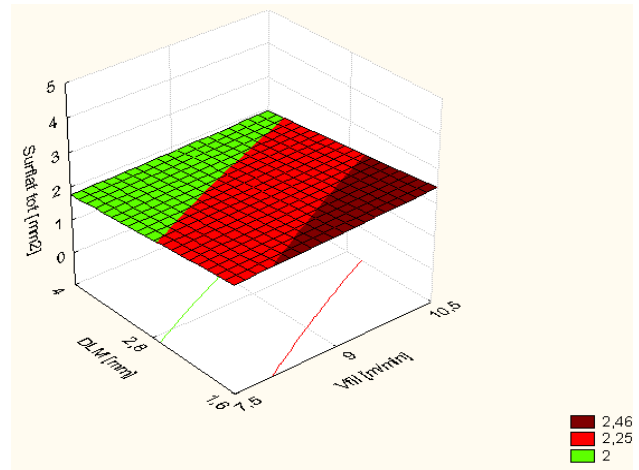


FIGURE 4. Variation de la surface de pénétration latérale totale avec la  $V_f$  et  $D_{LM}$

A partir de l'histogramme de PARETO (FIGURE 2) et des coefficients des Facteurs d'Influence, nous pouvons écrire la loi de variation [4,9] de la surface de pénétration latérale (**Surflat.tot**) en fonction des paramètres opératoires de soudage et de leurs interactions ( $V_f$ ,  $D_{LM}$ ,  $V_s$ ,  $P_L$ , Def).

$$\text{Surflat.tot} = 2,047 - 1,237 V_s + 0,796 P - 0,595 V_s P \quad (2)$$

Ensuite, afin de valider le modèle expérimental, nous avons comparé les valeurs de la surface de pénétration latérale estimées par le modèle à celle mesurées sur les macrographies (FIGURE 5). Nous constatons un bon accord entre les mesures et les valeurs estimées avec l'équation (2).

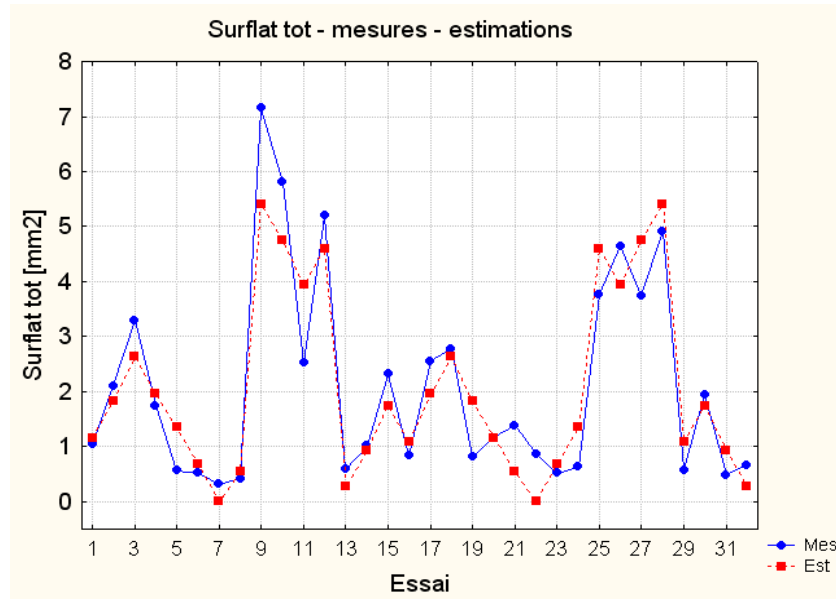


FIGURE 5. Comparaison Mesures- Estimations de la surface de pénétration (Surflat.tot).

#### 4. CONCLUSIONS

Dans le cas du rechargement des chanfreins, la surface de pénétration latérale est une fonction objectif complexe, fortement influencée par les interactions entre les paramètres opératoires de soudage (facteurs d'influence). Les Facteurs d'Influence ayant plus grand effet sur la surface de pénétration latérale dans le domaine exploré sont : la vitesse de soudage, la puissance laser et leur interaction. La comparaison entre les valeurs de la surface de pénétration latérale estimées par le modèle expérimental développé par la méthode des plans d'expériences expérimentales et celles mesurées sur les macrographies, donné un bon accord.

La complexité des phénomènes physiques mis en jeu lors de l'opération de soudage hybride laser/MIG est dû, d'une part à la synergie des procédés associés (laser et l'arc électrique MIG), et d'autre part aux grand nombre de facteurs intervenants au cours de l'opération de rechargement des chanfreins, nous ont conduits à faire appel à la stratégie des plans d'expériences. Cette stratégie nous permet de réduire le nombre d'essais tout en ayant une bonne précision sur les résultats.

Dans le cadre de ce travail nous avons mis en place une méthodologie de travail. Pour laquelle les développements sont nombreux. La démarche utilisant la méthode des Plans d'Expériences peut, en effet, être utilisée pour l'étude de divers types de procédés de soudage.

#### REFERENCES

- [1] G. Casalino, Statistical analysis of MIG-laser CO<sub>2</sub> hybrid welding of Al- Mg alloy, *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 106-110.
- [2] G. Tani, G. Campana, A. Fortunato, A. Ascari, The influence of shielding gas in hybrid laser-MIG welding, *Applied Surface Science* 253 (2007) 8050-8053.
- [3] G. Campana, A. Fortunato, A. Ascari, G. Tani, L. Tomesani, The influence of arc transfer mode in hybrid laser-MIG welding, *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 111-113
- [4] L. Bidi, S. Mattei, E. Cicala, H. Andrzejewski, P. Le Masson, J. Schroeder, The use of exploratory experimental designs combined with thermal numerical modelling to obtain a predictive tool for hybrid laser/MIG welding and coating processes, *Optics & Laser Technology*, Volume 43, Issue 3, April 2011, Pages 537-545.
- [5] G. Casalino, M. Mortello, P. Leo, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy, *Materials and Design* 61 (2014) 191–198
- [6] A. Nichici, E.F.Cicală, R. Mee, Prelucrarea datelor experimentale, *Curs și aplicații*, Timișoara, 1996, 163p.
- [7] Jacques Goupy, *Introduction aux plans d'expériences – 2e Edition*, Dunond, Paris, 2001.
- [8] E. Cicala, *Metoda experimentelor factoriale*, Ed. Politehnica, Timisoara 2005.
- [9] Dawei Zhao, Yuanxun Wang, Xiaodong Wang, Xuenong Wang, Fa Chen, Dongjie Liang, Process analysis and optimization for failure energy of spot welded titanium alloy, *Materials and Design* 60 (2014) 479–489.
- [10] Montgomery DC. *Design and Analysis of Experiments*, New York, John Wiley 2009.