



**HAL**  
open science

# Caractérisation d'un poste de soudure Cold Métal Transfer pour le pilotage du procédé Wire Arc Additive Manufacturing

Anthony Dellarre, Nicolas Béraud, Nicolas Tardif, Frédéric Vignat, François  
Villeneuve, Maxime Limousin

► **To cite this version:**

Anthony Dellarre, Nicolas Béraud, Nicolas Tardif, Frédéric Vignat, François Villeneuve, et al.. Caractérisation d'un poste de soudure Cold Métal Transfer pour le pilotage du procédé Wire Arc Additive Manufacturing. S-MART 2023: 18ème Colloque national S.mart, Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence, Université de Toulon [UTLN], Apr 2023, Carry-le-Rouet, France. hal-04278696

**HAL Id: hal-04278696**

**<https://hal.science/hal-04278696>**

Submitted on 10 Nov 2023

**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.

# Caractérisation d'un poste de soudure Cold Métal Transfer pour le pilotage du procédé Wire Arc Additive Manufacturing

A. Dellarre<sup>(a)</sup>, N. Béraud<sup>(a)</sup>, N. Tardif<sup>(b)</sup>, F. Vignat<sup>(a)</sup>, F. Villeneuve<sup>(a)</sup>, M. Limousin<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP\*, CNRS, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

\*Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

<sup>(b)</sup> Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, Lamcos, UMR5259, 69100, Villeurbanne, France

\* e-mail : anthony.dellarre@grenoble-inp.fr

## 1. INTRODUCTION

Le Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) est une technologie de fabrication additive émergente. Elle permet la production de pièces avec un taux de dépôt de matière relativement élevé, mais avec un état de surface équivalent à un brut de fonderie. Le procédé utilise une torche de soudure montée sur un robot ou une machine tridimensionnelle [1]. Plusieurs technologies de torche existent. Cet article se concentrera sur les torches de type Gas Metal Arc Welding [2] avec la technologie Cold Metal Transfer (CMT – Fronius).

Afin de produire industriellement des pièces fonctionnelles, il est nécessaire de maîtriser l'apparition des défauts tels que la porosité [3], les contraintes résiduelles [4] ou les erreurs dimensionnelles [5], [6]. La littérature montre que l'origine de ces défauts est en grande partie due à une mauvaise gestion de la thermique pendant la fabrication [7]. La maîtrise thermique du procédé est donc un enjeu clef.

Plusieurs stratégies sont possibles pour piloter la température de la pièce pendant la fabrication. L'une d'elles consiste à réaliser des temps de pause pendant la fabrication pour laisser la pièce diffuser le surplus d'énergie [8]. Cette stratégie est efficace, mais limite la productivité de la machine. Une autre solution est d'utiliser des dispositifs de refroidissement externe permettant d'améliorer la dissipation thermique [9]. Ces solutions sont contraignantes, car elles ajoutent des éléments dans l'espace de travail du robot pouvant limiter ses mouvements. Enfin, le poste de soudure peut être piloté afin de moduler l'énergie d'apport de la torche pendant la fabrication [10]. Cette solution a l'avantage de conserver la productivité de la machine sans limiter son

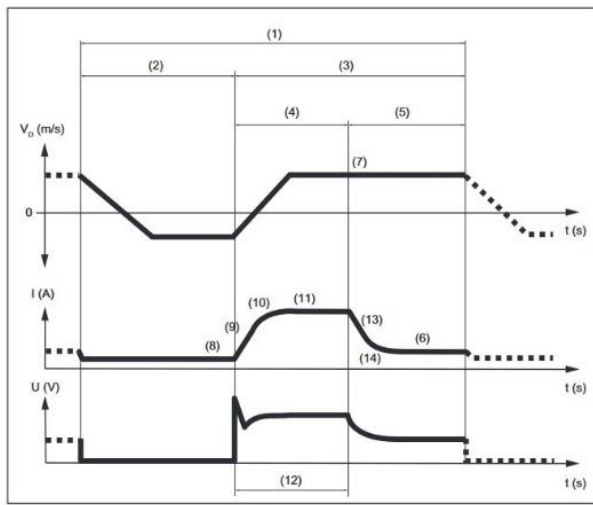
espace de travail. Ce type de pilotage permettrait la mise en place d'un asservissement à l'échelle du cordon de soudure.

Néanmoins, le pilotage d'une torche de soudure de type CMT est complexe. La Figure 1 présente le cycle électrique et le cycle d'apport de matière de la loi de soudure CMT. L'apport de matière et l'apport d'énergie sont fortement couplés nécessitant l'utilisation d'un grand nombre de paramètres [11]. Des connaissances expertes sont nécessaires pour les modifier indépendamment. Ainsi, les constructeurs de tels postes de soudure proposent d'utiliser des lois synergiques. Ces lois sont définies de sorte que l'utilisateur n'ait qu'un seul paramètre à faire varier, appelé paramètre synergique (Figure 2). Ce paramètre est appelé paramètre synergique (S, sans unité), il est disponible dans l'interface Fornius sous le nom « vitesse de dévidage ». D'autres paramètres peuvent être disponibles pour l'utilisateur afin de piloter plus finement la loi synergique (tel que le paramètre utilisateur EP/EN). Les paramètres utilisateurs (S, EP/EN, ...) passeront toujours via la loi synergique qui modifiera globalement les paramètres process (Figure 2).

Parmi les grandeurs physiques influentes sur la qualité de la pièce obtenue, cette étude se focalise sur l'énergie apportée et la quantité de matière apportée. Du fait du pilotage en mode synergique du poste de soudure, il est difficile d'établir un lien entre les paramètres utilisateur et les grandeurs influentes [12].

De plus, le poste de soudure est un système asservi à des phénomènes physiques non contrôlables [14] et non documentés par le constructeur. Cet asservissement est utile pour conserver une soudure stable. Une variation des phénomènes physiques autour de la soudure telle qu'une variation de la température ou de la forme du

substrat va faire réagir le poste pour conserver une stabilité du bain. Ces réactions ne sont pas nécessairement souhaitées dans le cadre de la fabrication additive (Figure 2).



Overview of the CMT characteristic parameters

- (1) CMT cycle time
- (2) Short-circuit phase
- (3) Plasma phase
- (4) Boost phase
- (5) Burn phase

Figure 1 : Paramètres process de la loi de soudure CMT. Neuf paramètres process sont présentés (de 6 à 14). Ces paramètres ne sont pas exhaustifs et ne sont pas tous modifiables par l'utilisateur. [13] Vd : Vitesse de dévidage instantané, I : Intensité, U : tension

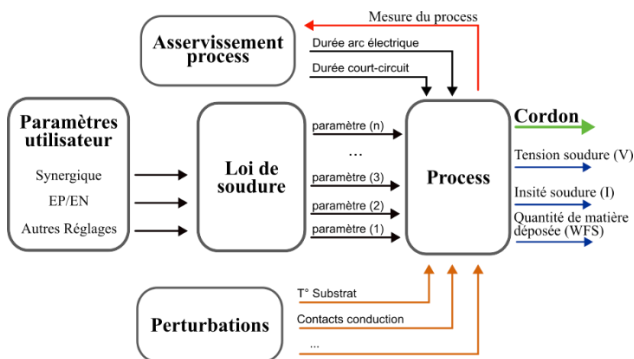


Figure 2: Schémas de fonctionnement du poste de soudure

Cet article propose de caractériser l'influence de paramètres utilisateur d'un poste de soudure (S, EP/EN) sur les grandeurs physiques clés de la fabrication additive (E, WFS) afin de permettre un pilotage découplé de ces deux grandeurs. Pour répondre à cet objectif, un plan d'expériences complet est proposé pour caractériser le comportement du poste de soudure à l'aide de surfaces de réponses. Après avoir détaillé la méthode, les résultats sont présentés. L'établissement des surfaces de réponse et leur analyse sont proposés.

## 2. METHODE

### 2.1. Design de l'expérience

Plusieurs cordons sont fabriqués isolément en suivant un plan d'expériences complet (Figure 3). La loi de soudure utilisée propose un pilotage synergique de l'énergie de soudure à l'aide de deux paramètres utilisateurs : le paramètre synergique (S) qui est le paramètre principal pour piloter la loi de soudure et un paramètre de réglage appelé "balance EP/EN" qui permet de faire varier la quantité d'énergie. Pour reproduire des conditions de soudure différentes, le pilotage de la température initiale du substrat avant fabrication ( $T_{init}$ ) est réalisé à l'aide d'un plateau chauffant. Ainsi, les 3 facteurs du plan d'expériences sont : S, EP/EN et  $T_{init}$  ( $^{\circ}C$ ).

Les réponses de l'expérience sont la vitesse du dévidage moyen du fil durant l'expérience (WFS, cette valeur est proportionnelle à la quantité de matière déposée) et l'énergie volumique moyenne de la torche ( $E_{vol}$ ,  $J/m^3$ ). Celles-ci sont calculées à partir des grandeurs physiques de production (U, I, WFS) qui sont mesurées avec l'instrumentation proposée par le poste de soudure (Figure 2).

Dans cette étude, la forme des cordons n'est pas une réponse étudiée de l'expérience.

Le cordon fabriqué avec les paramètres au centre du plan d'expérience est répété 18 fois afin de tester la répétabilité et la stabilité du poste de soudure.

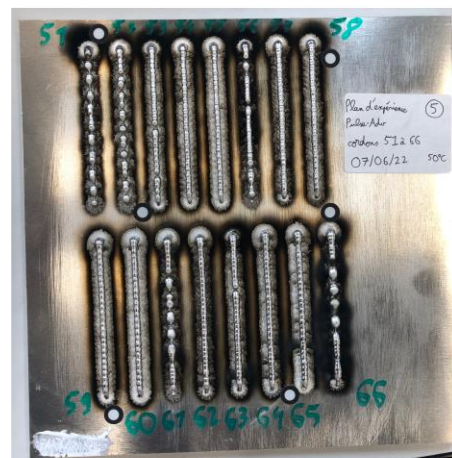


Figure 3 : Cordons fabriqués isolément sur une plaque substrat

### 2.2. Conditions expérimentales

Le plan d'expériences est réalisé avec un robot 6 axes YASKAWA MA1440 et un poste de soudure FRONIUS TPS CMT 4000 Advance. Un plateau chauffant conçu par le laboratoire est utilisé afin d'imposer la température initiale du substrat. Le substrat est une plaque de 250mm\*250mm\*10mm en AlMg3. Avant chaque fabrication, la température du substrat est contrôlée avec un thermocouple FLUKE-50S avec une précision de  $\pm 10^{\circ}C$ .

Le poste de soudure est piloté en mode synergique par la loi CMT Pulse Advance 1369. Figure 4 illustre les dispositifs expérimentaux du laboratoire.

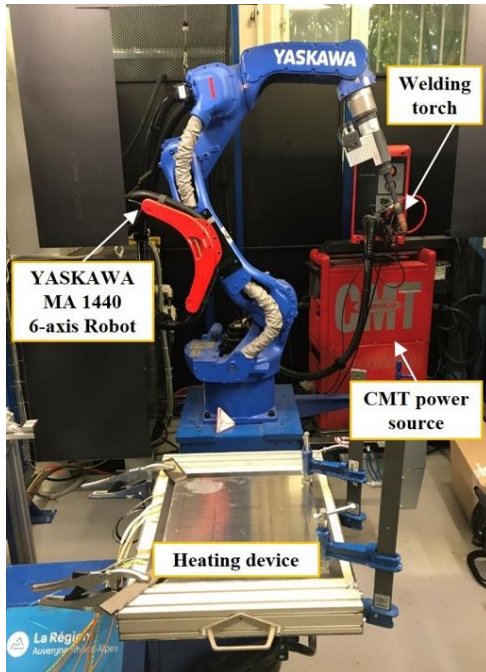


Figure 4 : Robot et plateau chauffant

Un cycle de la loi CMT-PA 1369 correspond à 10 cycles d'une loi CMT suivis de N cycles d'une loi MIG à arc pulsé. Le paramètre utilisateur « balance EP/EN » permet de piloter le nombre N de cycles pulse comme indiqué dans le Tableau 1. La loi CMT étant moins énergétique par rapport à la loi Pulse, cette balance permet de varier fortement l'énergie d'apport de la loi CMT-PA 1369.

Tableau 1 : Balance EP/EN

EP/EN	-2	-1	0	1	2
N	4	7	10	13	16

Les cordons sont fabriqués avec les paramètres de fabrication du Tableau 2. Les facteurs du plan d'expériences sont définis dans le Tableau 3 ce qui représente 120 cordons. 18 cordons supplémentaires sont fabriqués au centre du plan d'expériences avec les facteurs suivants : S = 5,2, EP/EN = 0, Tinit = 125°C. Ils seront appelés cordons de référence.

## 2.1. Instrumentation

L'instrumentation se fait à l'aide du poste de soudure. Le poste permet de mesurer la tension, l'intensité et la vitesse de dévidage moyenne du fil du poste de soudure (WFS). Ces données sont mesurées à 10Hz. Chaque valeur correspond à la moyenne de la grandeur physique dans le laps de temps. Fronius ne communique pas d'information supplémentaire sur l'échantillonnage ou la précision de la mesure.

Tableau 2 : Paramètres de fabrication

Matériau	Loi CMT	Diamètre fil	Longueur cordon	Vitesse robot (TS)	Distance tube contact
4043 - AISi3	CMT-PA 1369	1,2mm	100 mm	60cm/min	15mm

Tableau 3: Facteurs du plan expérience

Paramètre Synergique (S)	EP/EN	Température initiale substrat
4 - 4,5 - 5 - 5,5 - 6 - 6,5	-2 - -1 - 0 - 1 - 2	50°C - 100°C - 150°C - 200°C

## 2.2. Traitement des données

Avec ces données, l'énergie volumique ( $E_{vol}$ ) apportée par la torche peut être calculée :

$$E_{vol} = \frac{U \times I}{WFS \times \frac{\pi \phi_{fil}^2}{4}} \quad (1)$$

Pour avoir une valeur représentative de  $E_{vol}$  et de WFS par cordon, la valeur moyenne de chaque grandeur par cordon est calculée en excluant les valeurs de la première et dernière seconde. En effet, le poste de soudure a des lois spécifiques pour démarrer et arrêter l'arc qui n'est pas étudié ici.

Pour mieux représenter les variations des facteurs, les données de  $E_{vol}$  sont normalisées par rapport à la valeur moyenne calculée avec les 18 cordons au centre du plan d'expériences.

## 2.3. Donnée en ligne

Les données générées sont disponibles en ligne [15]. Un fichier CSV comprenant les données d'entrées et de sortie est proposé. Un code python est également proposé pour visualiser les graphiques en 3D.

# 3. RESULTATS

## 3.1. Répétabilité du procédé

Les résultats concernant WFS en fonction des facteurs d'entrée sont présentés à la Figure 5. La valeur moyenne des points de référence pour WFS est de 6,94 m/min, la valeur moyenne des points de référence pour  $E_{vol}$  est  $9,48 \times 10^9 J/m^3$ .

L'étude de la dispersion des résultats se fait avec l'écart type expérimental à 95% par la loi de Student. L'écart type est égal à 7% pour WFS et égal à 7% pour  $E_{vol}$ .

## 3.2. Étude de WFS

La valeur de référence est égale à 6,94 m/min. Les résultats sont présentés à la Figure 5. La variation de WFS dans le plan d'expériences par rapport à la valeur de



référence atteint un maximum de +28% (8,55 m/min) et un minimum de -31% (4,62m/min).

Augmenter le EP/EN fait baisser WFS, mais avec une influence d'environ +/- 2.5% à autres facteurs constants.

La variation de température a une faible influence sur la variation de WFS avec une variation moyenne observée inférieure à 1%.

Deux valeurs semblent aberrantes pour une EP/EN = -2, et un WFS de 4,5m/min et 6m/min.

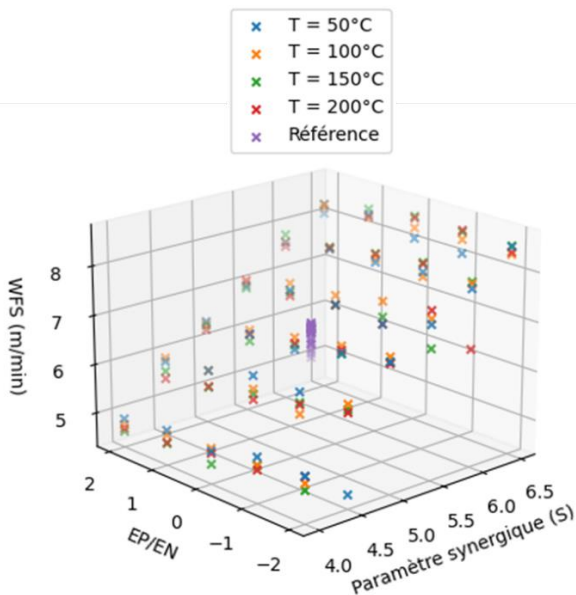


Figure 5 : WFS en fonction des facteurs d'entrée. La valeur de référence est égale à 6,94 m/min.

### 3.3. Étude de E\_vol

Pour comparer la variation de E\_vol en fonction des facteurs, les valeurs sont normalisées par rapport à la valeur moyenne des points de référence. Cette valeur de référence est égale à  $9,48 \times 10^9 J/m^3$ . Les résultats sont présentés à la Figure 6.

La variation de E\_vol dans le plan d'expériences par rapport à la valeur de référence atteint un maximum de +41% ( $13,1.10^9 J/m^3$ ) et un minimum de -28% ( $6,9.10^9 J/m^3$ ).

Le facteur EP/EN permet une variation moyenne sur E\_vol d'environ +/- 18%. Son influence est plus importante pour de faibles S que pour de grands S.

La variation de S a une influence moyenne sur E\_vol de +/-12%. Plus S est grand, plus E\_vol est petit.

Concernant la température du substrat, son influence est variable en fonction des facteurs de fabrication. Cette variation peut-être de +/- 11% pour S = 4 et EP/EN = 2 à négligeable pour S = 6 et EP/EN = -2.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Répétabilité du procédé

L'écart type des résultats pour les cordons de référence à 95% est conséquent. Cette expérience ne permet pas de proposer des causes à ces variations, mais illustre la difficulté d'obtenir des conditions de fabrication initiales répétable. De plus, le fait que le poste de soudure fonctionne comme une boîte noire rend l'analyse de ces variations difficiles. Une hypothèse de l'origine de ces défauts peut être le contact entre la plaque substrat et le plateau chauffant. En effet, si un contact plan-plan est réalisé initialement, les déformations thermiques modifient la nature du contact. Ainsi le transfert thermique et le transfert électrique seraient modifiés. La variation de 7% pour WFS est à prendre en considération pour la suite des résultats. La variation de 7% pour le E\_vol n'est pas surprenante, car cette grandeur est inversement proportionnelle à WFS.

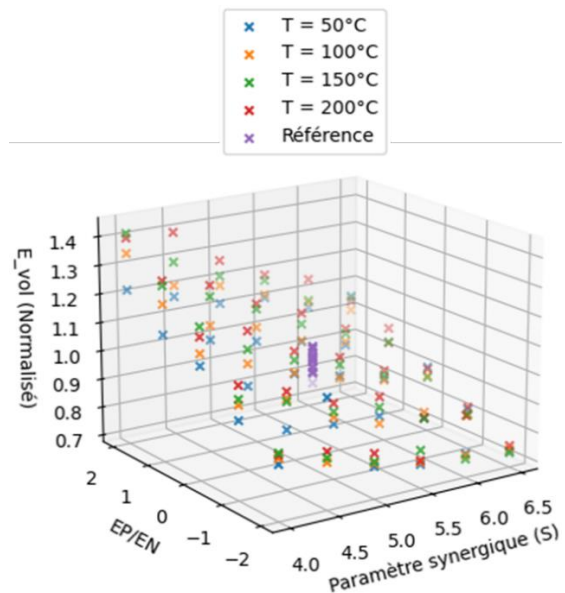


Figure 6: E\_vol en fonction des facteurs. La valeur de référence est égale à  $9,48 \times 10^9 J/m^3$ .

### 4.2. Étude de WFS

À partir de ces données, il est alors possible de proposer une surface de réponse sur ces plages de valeur pour piloter la quantité de matière apportée en fonction des facteurs d'entrées. L'influence de la température peut être négligée. La surface de réponse proposée est un plan associé par la méthode des moindres carrés. L'écart type expérimental à 95% est de 6%. Au vu de la variation du procédé, approximer les réponses du système par un plan pour WFS semble pertinent. L'équation du plan s'écrit :

$$WFS = 1.33 S - 0.104 EP/EN - 0.172 \quad (2).$$

On observe une relation proche de celle de la proportionnalité entre WFS et le paramètre synergique (S). Certainement cela a été voulu par Fronius lors de

l'établissement de la synergie, pour autant le paramètre synergique ne devrait pas être assimilé à une vitesse de dévidage.

### 4.3. Étude de E\_vol

Concernant la variation de E\_vol, les facteurs ont une influence sur le système. Ce nuage de point peut être approximé par 4 plans associés à l'aide du critère des moindres carrés en fonction de la température. Les écarts types des erreurs à 95% pour l'approximation de E\_vol par des plans aux températures de 50°C, 100°C, 150°C et 200°C sont respectivement égaux à 4%, 6%, 6% et 7%. Au vu de la variation du procédé, approximer les réponses du système par un plan pour E\_vol semble pertinent. Les équations des quatre plans de tendance sont :

$$E_{volT_{50}} = 0.183 S - 0.013 EP/EN + 0.059 \quad (3)$$

$$E_{volT_{100}} = 0.193 S - 0.013 EP/EN + 0.012 \quad (4)$$

$$E_{volT_{150}} = 0.212 S - 0.015 EP/EN - 0.098 \quad (5)$$

$$E_{volT_{200}} = 0.207 S - 0.02 EP/EN - 0.069 \quad (6)$$

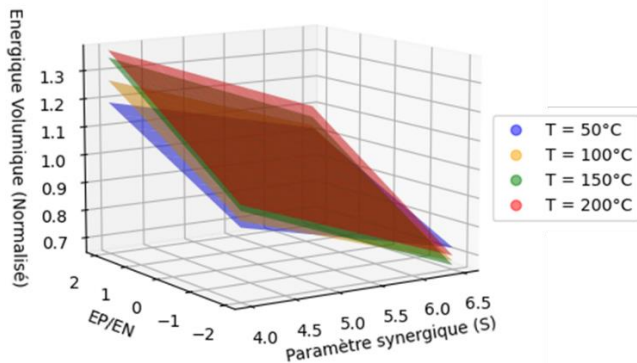


Figure 7 : Approximation de E\_vol par des plans en fonction des facteurs

### 4.4. Proposition de pilotage du poste

Avec ces plans de réponse, le poste de soudure peut être piloté pour faire varier E\_vol sans faire varier WFS. En effet, l'intersection du plan de réponse avec le plan horizontal correspondant au WFS choisi donne alors le couplage de S et EP/EN. Par exemple avec une consigne de WFS = 8m/min, la relation de couplage entre S et EP/EN est égale à :

$$1.33 S - 0.104 EP/EN - 5 = 0 \quad (7)$$

Pour déterminer les variations de E\_vol possibles avec ce couplage, un plan vertical est créé contenant l'ensemble des points vérifiant le couplage entre S et EP/EN. L'intersection de ce plan avec les plans de réponse de E\_vol en fonction de la température indique les variations d'énergie possibles. La Figure 8 définit les E\_vol accessibles pour une température initiale de substrat de 50°C vérifiant le couplage pour maintenir WFS = 8m/min.

La Figure 9 illustre les variations de E\_vol accessibles en fonction du couplage de EP/EN - S permettant d'avoir WFS de 8m/min en fonction de la température.

### 4.5. Les limites

Ce plan d'expériences a été réalisé dans des conditions ne correspondant qu'à la première couche de déposition en fabrication additive. Extrapoler ces résultats pour la réalisation d'une pièce complète n'est pas possible. En effet, lors de l'empilement des couches de fabrication, plusieurs perturbations telles que des températures de substrat beaucoup plus élevées ou des transferts thermiques différents dus à la géométrie doivent être prises en considération.

Néanmoins, il est intéressant de noter que les réponses du poste de soudure pour E\_vol et WFS sont linéaires par rapport aux facteurs S et EP/EN. Ce résultat est prometteur pour pouvoir réaliser de futurs plans d'expérience optimisés pour tester l'influence d'autres perturbations liées à la fabrication additive.

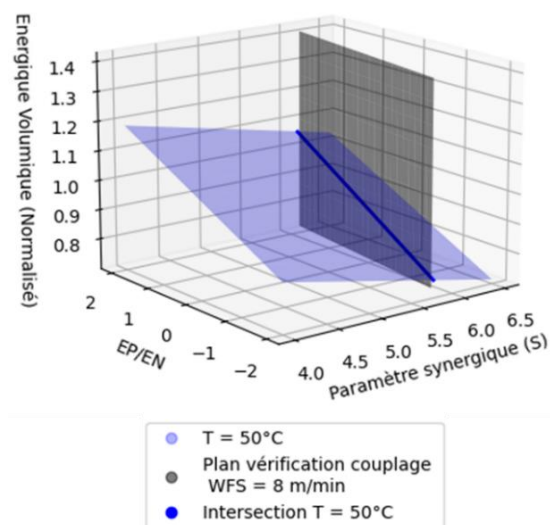


Figure 8 : intersection entre le plan de réponse E\_vol<sub>T<sub>50</sub></sub> et le plan vérifiant la consigne de couplage pour WFS = 8m/min

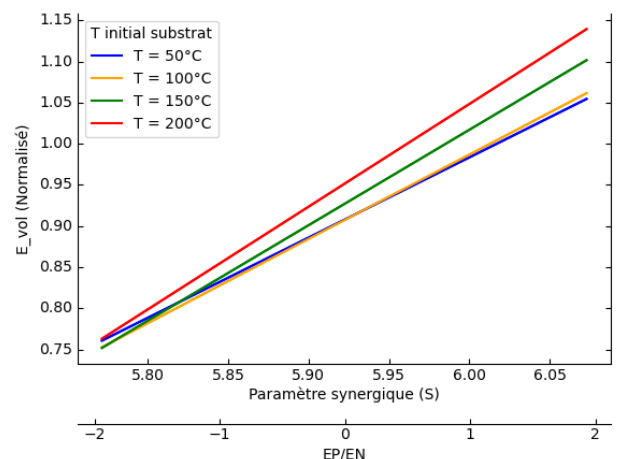


Figure 9 : E\_vol accessible une consigne de WFS = 8m/min

## 5. CONCLUSION

Ce papier propose une caractérisation du poste de soudure FRONIUS TPS CMT 4000 Advance dans des conditions de fabrication spécifiques pour un pilotage indépendant de la quantité de matière et de l'énergie apportée. La littérature montre le besoin de contrôler la thermique et la possibilité de réaliser ce pilotage par le poste de soudure. Cependant, la complexité synergique des lois où l'apport de matière et l'apport d'énergie sont liés rend un découplage problématique. Un plan d'expériences complet est proposé afin de caractériser le poste de soudure. Les résultats montrent une faible répétabilité du processus. Au vu de ces variations, une approximation par des plans de réponse caractérise bien les résultats. Ces résultats sont à considérer dans le contexte du plan d'expériences. Dans ce contexte, le pilotage de  $E_{vol}$  et de WFS peut être dissocié.

De nouvelles expériences peuvent être réalisées pour valider le résultat en appliquant le couplage pour maintenir WFS constant. Des approximations des réponses au procédé par des plans ont été proposées. La prise en compte de plusieurs autres facteurs d'entrée, notamment celle de perturbations caractéristiques de la fabrication additive telle qu'une évolution du substrat, pourrait alors être utilisée pour réaliser un plan d'expériences optimisé pour caractériser la machine. Une calibration avec des expériences spécifiques et optimisées pourrait alors être proposée afin de caractériser le poste de soudure dans un cadre d'utilisation défini pour moduler l'énergie et l'apport de matière de manière indépendante aux perturbations observées.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le stagiaire Geoffrey Melzani pour son aide à la réalisation au plan d'expériences. Remerciement à S.mart Grenoble Alpes pour l'utilisation de la plateforme de prototypage. Remerciement à l'ANR pour le financement inscrit dans le projet METALIC [ANR-21-CE10-0003].

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Xia *et al.*, "A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system," *Journal of Manufacturing Systems*, p. 15, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.008>.
- [2] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, doi: [10.1007/s00170-015-7077-3](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3).
- [3] G. Marinelli, F. Martina, S. Ganguly, and S. Williams, "Development of Wire + Arc Additive Manufacturing for the production of large-scale unalloyed tungsten components," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, doi: [10.1016/j.ijrmhm.2019.05.009](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.05.009).
- [4] J. Ding *et al.*, "Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts," *Computational Materials Science*, 2011, doi: [10.1016/j.commatsci.2011.06.023](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.06.023).
- [5] V. Laghi, M. Palermo, G. Gasparini, V. Alena Girelli, and T. Trombetti, "Geometrical Characterization of Wire-and-Arc Additive Manufactured Steel Element," *Adv. Mater. Lett.*, doi: [10.5185/amlett.2019.0019](https://doi.org/10.5185/amlett.2019.0019).
- [6] A. S. Yildiz, K. Davut, B. Koc, and O. Yilmaz, "Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics," *Int J Adv Manuf Technol*, 2020, doi: [10.1007/s00170-020-05482-9](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05482-9).
- [7] X. Chen *et al.*, "A review on wire-arc additive manufacturing: typical defects, detection approaches, and multisensor data fusion-based model," *Int J Adv Manuf Technol*, 2021, doi: [10.1007/s00170-021-07807-8](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07807-8).
- [8] F. Montevecchi, G. Venturini, N. Grossi, A. Scippa, and G. Campatelli, "Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique," *Additive Manufacturing*, 2018, doi: [10.1016/j.addma.2018.01.007](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.007).
- [9] L. J. da Silva, D. M. Souza, D. B. de Araújo, R. P. Reis, and A. Scotti, "Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM," *Int J Adv Manuf Technol*, 2020, doi: [10.1007/s00170-020-05201-4](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4).
- [10] M. A. Chergui, "Simulation Based deposition Strategies Evaluation and Optimization in Wire Arc Additive Manufacturing," 2020, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03273221>
- [11] T. Kumar, D. V. Kiran, N. Arora, and P. S. Kumar, "Study of steel-aluminium joining under the influence of current waveforms using advanced CMT process variants," *Materials and Manufacturing Processes*, 2022, doi: [10.1080/10426914.2022.2030879](https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2030879).
- [12] A. G. Ortega, "Prototypage rapide de pièces en alliage d'aluminium: étude du dépôt de matière et d'énergie lors de la fusion à l'arc d'un fil par le procédé MIG-CMT," Génie civil. Université Montpellier, 2018.
- [13] Fronius, "RCU 500i Operating instructions." Accessed: Mar. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42,0426,0021,EN.pdf>
- [14] P. Kah, R. Suoranta, and J. Martikainen, "Advanced gas metal arc welding processes," *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, doi: [10.1007/s00170-012-4513-5](https://doi.org/10.1007/s00170-012-4513-5).
- [15] A. Dellarre, N. Béraud, N. Tardif, F. Vignat, F. Villeneuve, and M. Limousin, "Caractérisation d'un poste de soudure Cold Métal Transfer pour le pilotage du procédé Wire Arc Additive Manufacturing." Recherche Data Gouv. doi: [10.57745/TOR3SF](https://doi.org/10.57745/TOR3SF), Recherche Data Gouv [dataset], <https://doi.org/10.57745/TOR3SF>