

# Analyse statistique de l'assemblage acier/aluminium réalisé par le procédé de soudage MIG-CMT

MEZRAG Bachir<sup>1,2</sup>

BENACHOUR Mustapha

<sup>1</sup> Université Abou Bekr Belkaid.

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et Matériaux.  
Tlemcen, Algérie.

DESCHAUX BEAUME Frédéric

<sup>2</sup> Université de Montpellier 2.

Laboratoire de mécanique et génie civil.  
Montpellier, France.

**Résumé**— La dépendance vis-à-vis des paramètres de soudage de la géométrie de l'assemblage hétérogène acier/aluminium réalisé par le procédé MIG-CMT dans une configuration à clin est étudiée à travers un plan d'expérience. Les paramètres choisis comme facteurs d'influence sont la puissance de soudage, la distance entre la torche et la pièce ou "stick-out", le débit de gaz et la vitesse de soudage, tandis que les caractéristiques géométriques sélectionnées comme fonctions objectifs sont le poids de métal déposé, la largeur et la hauteur de cordon de soudure. La méthode de Taguchi est utilisée pour minimiser le nombre d'expériences et faciliter l'interprétation des résultats. On montre par la quantification de l'effet de chaque facteur d'influence sur les fonctions objectifs que le contrôle de la géométrie finale du cordon de soudure est possible par un choix adapté de paramètres de soudage.

**Mots clés** — Assemblage hétérogène, Soudage MIG-CMT, Méthode de Taguchi.

## I. INTRODUCTION

Dans le but de limiter le réchauffement climatique, les normes européennes anti-pollution imposent à l'industrie automobile de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> à 95 g.km<sup>-1</sup> en 2021, ce qui nécessite une réduction de la consommation de carburant. Une des solutions envisagées pour répondre à ces normes concerne l'allègement de la structure des véhicules. Une des voies pour y parvenir consiste à remplacer dans certains composants l'acier par l'aluminium. Cependant, cette solution nécessite l'assemblage entre l'acier et l'aluminium, souvent réalisé par soudage [1].

La qualité d'un tel assemblage dépend de la géométrie de cordon, liée elle-même aux paramètres de soudage [1, 2, 3]. Il est donc important de connaître l'effet des variations de ces paramètres sur la forme du joint de soudure, afin de déterminer la bonne configuration dans le but d'optimiser la qualité de l'assemblage d'un point de vue mécanique.

Dans la présente étude, l'assemblage de l'acier avec l'aluminium est réalisé par la technique de «soudo-brasage», reposant sur l'exploitation de la différence de température de fusion de l'acier ( $T_f = 1536$  °C) et de

l'aluminium ( $T_f = 660$ °C), pour réaliser une soudure du côté aluminium et une brasure du côté acier.

L'analyse de l'effet de variation des paramètres de soudage sur la géométrie finale du cordon de soudure est effectuée par la méthode de Taguchi. Cette méthode basée sur des matrices orthogonales, offre la possibilité de déterminer l'effet de chaque facteur aux différents niveaux indépendamment des autres paramètres et de balayer le domaine d'étude des paramètres avec un nombre d'expériences minimum en gardant la même précision que le plan d'expériences complet [4].

## II. EXPÉRIMENTATION

### A. Essais de soudage

L'expérience consiste à réaliser un assemblage hétérogène entre un acier galvanisé et l'aluminium A1050 en configuration à clin (Fig.1) par l'intermédiaire d'un fil d'apport AlSi5 de diamètre 1.2 mm. Le matériau d'apport de nuance 4043 est choisi pour sa température de fusion de 573-625°C compatible avec celle de l'aluminium à assembler. L'argon est utilisé comme gaz de protection.

Le procédé de soudage utilisé dans l'étude est la nouvelle variante du procédé MIG, appelée Cold Metal Transfer (CMT), récemment développée par Fronius. Le procédé CMT, comme l'indique son nom, est un procédé de soudage à l'arc avec électrode fusible à transfert de métal dit "froid". Les gouttes de métal liquide formées par l'arc électrique à l'extrémité du "fil électrode" sont déposées grâce à un dévidage alterné du fil. Celui-ci descend pour entrer en contact avec la pièce, formant un court circuit, puis un mouvement de retrait permet le détachement de la goutte de métal liquide et le rétablissement de l'arc, jusqu'au court-circuit suivant. Ce procédé est particulièrement adapté au soudage hétérogène acier-aluminium, car l'apport calorifique très faible qu'il induit limite l'épaisseur des couches de composés intermétalliques fragiles qui se forment à l'interface acier-aluminium.

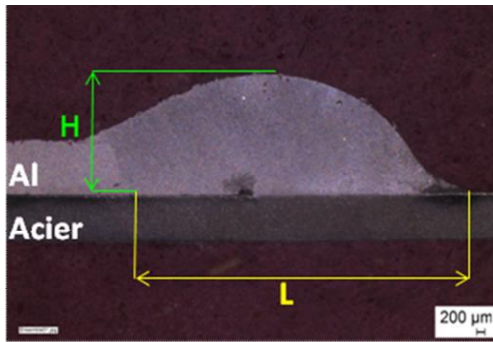


Fig. 1. Configuration de soudage à clin et fonctions objectives choisies pour l'assemblage acier/Al

Le réglage des paramètres de soudage étant très complexe avec ce nouveau procédé (une vingtaine de paramètres à régler), le procédé dispose de programmes adaptés aux différents matériaux, qui permettent, par le choix d'une puissance moyenne de consigne, d'adapter tous les paramètres pour obtenir une bonne fusion et un bon transfert du métal d'apport. L'enregistrement des tensions et intensités en cours de soudage permet de comprendre le cycle de soudage correspondant à ce nouveau procédé (Fig.2). Un arc électrique de forte intensité (arc chaud) permet de former une goutte de métal liquide à l'extrémité du fil d'apport, puis la descente du fil, sous une plus faible intensité d'arc (arc froid), permet de déposer la goutte sur la pièce à souder, créant un court-circuit qui "éteint" l'arc électrique, produisant une chute de la tension. Puis le retrait du fil permet le détachement de la goutte liquide du fil d'apport, et

l'augmentation de l'intensité permet de rétablir un arc électrique au moment du détachement.

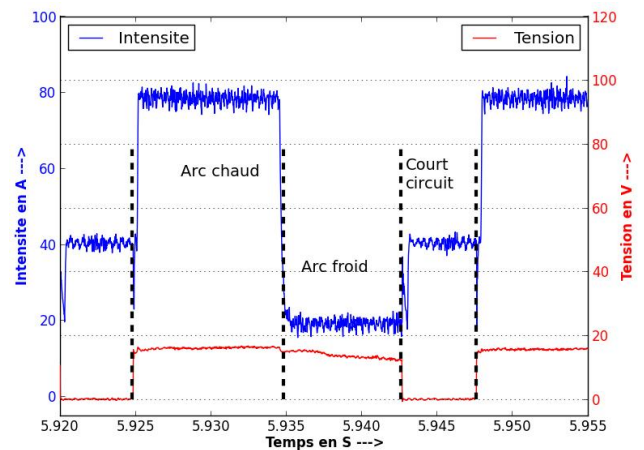


Fig. 2. Cycle de soudage correspondant au procédé MIG-CMT.

Les enregistrements montrent que lorsque la "puissance moyenne" de consigne augmente, l'intensité maximale devient de plus en plus élevée mais pour des durées de plus en plus courtes, ce qui produit une augmentation de la fréquence des court-circuits (Fig.3). La puissance moyenne réelle, mesurée à partir des enregistrements, peut alors être très différente de la puissance de consigne réglée.

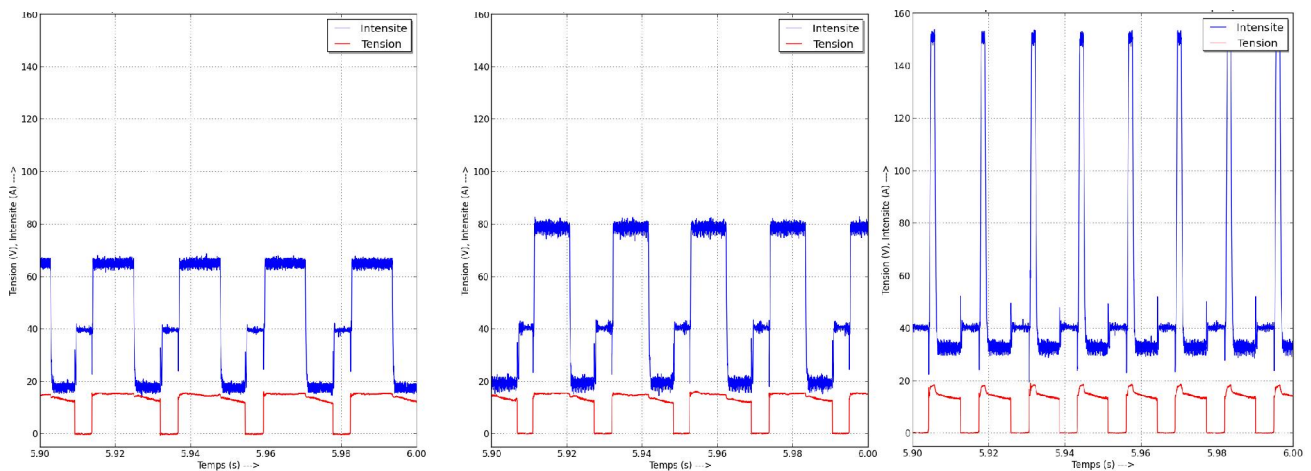


Fig. 3. Evolution de la tension et de l'intensité lorsque la "puissance moyenne" de consigne réglée sur le générateur de soudage MIG-CMT augmente.

### B. Plan d'expérience

Pour étudier l'effet de la variation des paramètres du procédé MIG-CMT sur la géométrie de l'assemblage acier/aluminium, un plan d'expériences a été élaboré selon la méthode de Taguchi. Cette méthode permet de réaliser plusieurs essais avec des combinaisons déterminées des

paramètres de soudage pour chaque essai afin de caractériser les variations des dimensions du cordon de soudure en fonction des paramètres choisis. Après le calcul de degré de liberté et la vérification de l'orthogonalité, la table L8 (quatre facteurs et deux niveaux) de Taguchi a été adoptée. Un plan orthogonal permet de réduire considérablement le temps de

l'étude tout en donnant une évaluation de l'effet de chaque paramètre sans ambiguïté.

La quantification des effets des facteurs d'influence qui affectent les fonctions objectifs préalablement choisies (poids de métal déposé et géométrie de la zone fondue) offre l'avantage d'une meilleure compréhension et contrôle du procédé de soudage. Les dimensions de cordon (largeur et hauteur) sont mesurées sur des sections transversales de la soudure (Fig.1), découpées dans les éprouvettes soudées par jet d'eau, au moyen d'un microscope. Le poids de métal d'apport déposé lors de l'assemblage acier/Al est déterminé en pesant les échantillons avant et après soudage en utilisant une balance de précision  $10^{-3}$  g.

Quatre paramètres ont été choisis comme facteurs d'influence (FI) avec deux niveaux pour chacun:

- la puissance de soudage moyenne de consigne (kW).
- la vitesse de soudage (cm/min).
- le débit de gaz de protection (l/min).
- la distance embout de contact-pièce (stick-out) (mm).

Pour chaque facteur d'influence, le niveau le plus haut et le plus bas sont désignés respectivement par les indices 2 et 1.

Les facteurs d'influence ainsi que leurs symboles et valeurs aux différents niveaux sont regroupés dans le tableau I. Les fonctions objectifs (FO) choisies pour caractériser la géométrie du cordon de soudure sont :

- la largeur (L).
- la hauteur (H).

- le poids de métal déposé (M).

TABLE I. FACTEURS D'INFLUENCE ET LEURS NIVEAUX.

Facteur	Symbole	Niveau 1	Niveau 2
Puissance de soudage (kW)	A	0.31	0.53
Vitesse de soudage (cm/min)	B	31	45
Débit de gaz (l/min)	C	10	15
Stick out (mm)	D	10	18

### III. ANALYSE DES RÉSULTATS

Le tableau II récapitule le plan d'expériences défini avec la combinaison des facteurs d'influence. Il se compose de plusieurs colonnes: la première identifie les essais, les suivantes indiquent les états des facteurs exprimés en unités codées puis en valeurs physiques et les dernières colonnes indiquent les valeurs des réponses obtenues pour chaque essai. Chaque colonne est représentative d'un facteur et chaque ligne présente les conditions de l'essai formé par la combinaison des différents niveaux des facteurs étudiés.

TABLE II. RECAPITULATIF DU PLAN D'EXPERIENCES.

Expériences	Codification de FI				Valeurs physiques de FI				Fonctions objectifs		
	1	2	4	7	A	B	C	D	M (g)	L (mm)	H (mm)
1	1	1	1	1	0.31	31	10	10	3.1	7.48	2.41
2	1	1	2	2	0.31	31	18	15	2.71	8.67	2.11
3	1	2	1	2	0.31	45	10	15	1.83	5.53	2.51
4	1	2	2	1	0.31	45	18	10	1.99	5.92	1.97
5	2	1	1	2	0.53	31	10	15	3.05	8.73	2.34
6	2	1	2	1	0.53	31	18	10	3.01	8.89	2.18
7	2	2	1	1	0.53	45	10	10	1.98	6.73	1.73
8	2	2	2	2	0.53	45	18	15	1.83	6.62	2.20

L'effet moyen de chaque facteur d'influence à un niveau i donné ( $E_{Xi}$ ) est trouvé par la formule:

$$E_{Xi} = M_{Xi} - M_g \quad (1)$$

Le calcul de l'interaction entre deux facteurs A et B ( $I_{AiBj}$ ) permet de quantifier la modification apportée à la fonction objectif lors d'une combinaison particulière des deux facteurs. Elle est obtenue par :

$$I_{AiBj} = M_{AiBj} - M_g - E_{Ai} - E_{Bj} \quad (2)$$

Avec :

- $E_{Ai}$  : Effet moyen du facteur A au niveau i.
- $E_{Bj}$  : Effet moyen du facteur B au niveau j.
- $I_{AiBj}$  : Interaction entre les facteurs A au niveau i et B au niveau j.
- $M_g$  : Moyenne générale des réponses.
- $M_{Xi}$  : Moyenne des réponses lorsque A est au niveau i.
- $M_{AiBj}$  : Moyenne lorsque A est au niveau i et B est au niveau j.

Les effets des facteurs d'influence (A, B, C et D) sur les fonctions objectifs (H, L et M), lorsque leurs valeurs varient entre leurs hauts et bas niveaux, sont comparés à partir de représentations graphiques en figures 4. La ligne interrompue correspond à la moyenne générale de la fonction objectif. Afin de simplifier l'interprétation, les résultats des graphes d'effets sont résumés dans le tableau III. La figure 5 présente

les graphes des interactions entre facteurs d'influence. Les graphes montrant une interaction nulle ne sont pas représentés.

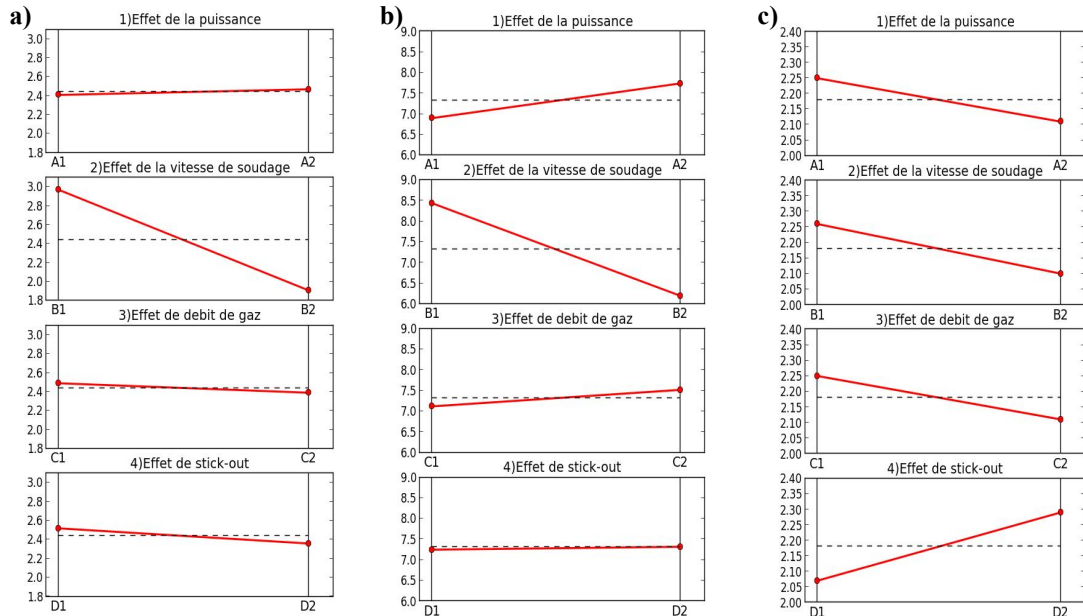


Fig. 4. Effets des facteurs d'influence sur : (a) le poids de métal déposé, (b) la largeur et (c) la hauteur du cordon de soudure.

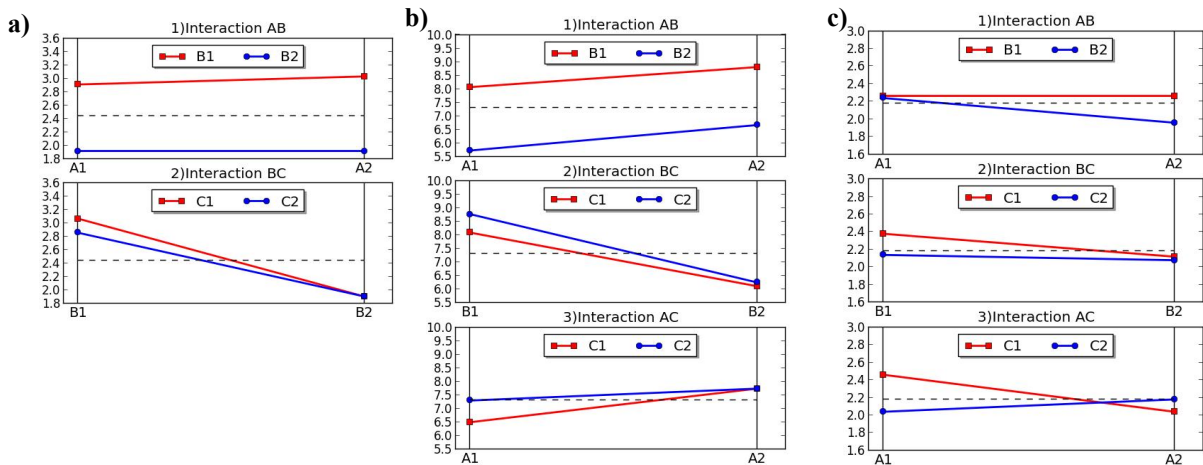


Fig. 5. Interactions entre les facteurs d'influence sur (a) le poids du métal déposé, b) la largeur et (c) la hauteur du cordon de soudure.

TABLE III. EFFETS DES FACTEURS D'INFLUENCE SUR LES REPNSES.

Paramètres de soudage	Evolution de niveau	Métal déposé M	Largeur L	Hauteur H
Puissance de soudage	↑	↗	↗	↘
Vitesse de soudage	↑	↘	↘	↘
Débit de gaz	↑	↘	↗	↘
Stick out	↑	↘	↗	↗

A la lumière du tableau et des graphes ci-dessus, on remarque que le facteur D (Stick-out) ne semble pas avoir d'effet significatif sur le poids de métal déposé et la largeur du cordon. Il a en revanche un effet plus marqué sur la hauteur de cordon. Son augmentation de 10 à 15 mm augmente en moyenne la hauteur du cordon de soudure de 0,22 mm (Figure 4, c4). Ce phénomène est souvent constaté avec le procédé MIG traditionnel, l'augmentation du stick-out ayant tendance à réduire la hauteur d'arc, et donc à produire un cordon plus "bombé".

Lorsque la puissance de consigne réglée sur le générateur augmente, le poids de métal déposé varie très peu (Figure 4, a). On a pu constater que la réponse du générateur CMT à cette augmentation de la puissance de consigne se traduisait par l'augmentation de l'intensité maximale et de la fréquence des court-circuits (Figure 3), mais les résultats montrent que l'augmentation de matière déposée est très minime, ce qui signifie que la quantité déposée à chaque court-circuit doit diminuer avec l'augmentation de la fréquence. En revanche, l'effet de la puissance sur la largeur du cordon de soudure (L) et sa hauteur (H) est très significatif. La largeur de la soudure augmente et la hauteur diminue lorsque la puissance de consigne augmente. L'augmentation de la puissance génère une augmentation de la température de métal transféré qui diminue sa viscosité, favorisant ainsi son étalement.

La vitesse de soudage est le principal facteur influençant le poids de métal déposé, la largeur et la hauteur du cordon de soudure. En effet, on remarque à la fois une diminution du poids de métal déposé, de la largeur et de la hauteur du cordon de soudure lorsque la vitesse augmente (Fig. 4 et Tableau III). Cela est bien sûr dû à la diminution de la quantité de métal (et donc d'énergie) transférée à l'éprouvette, qui mène à un cordon de soudure moins large et moins épais.

L'augmentation de débit de gaz à 18 l/min ne présente pas d'effet significatif sur le poids de métal déposé (diminution de 0.1 g), mais diminue en moyenne la hauteur et augmente la largeur du cordon (Fig. 4, b-c). Notons que parmi les interactions entre facteurs d'influence, celle entre la puissance et le débit de gaz est la plus marquée (Fig. 5, c), car on observe une inversion de l'effet produit par

l'augmentation du débit de gaz lorsque la puissance varie. Pour une faible puissance de soudage, on observe bien la tendance moyenne (augmentation de la largeur et diminution de la hauteur de cordon lorsque le débit de gaz augmente). Cette évolution de la géométrie du cordon peut s'expliquer par un effet mécanique du flux de gaz, qui produit un effet de cisaillement à la surface du cordon liquide depuis le centre vers la périphérie, et favorise son étalement. En revanche, pour les puissances plus élevées, l'augmentation du débit a tendance à accroître la hauteur de cordon, ce que l'on pourrait attribuer à un effet thermique, le flux de gaz accélérant le refroidissement des cordons qui se solidifient plus rapidement et donc n'ont pas le temps de s'étaler, malgré l'effet de cisaillement mécanique produit par le gaz.

#### IV. CONCLUSION

L'application de la méthode de Taguchi montre que les dimensions du cordon de soudure sont gouvernées directement par l'énergie de soudage (puissance et vitesse de soudage). Les principaux résultats de cette note technique peuvent être synthétisés comme suit :

- Le procédé MIG-CMT offre la possibilité d'assembler l'acier galvanisé avec l'aluminium en choisissant la bonne combinaison de paramètres opératoires ;
- La vitesse de soudage est le principal facteur influant sur la géométrie de cordon de soudure, son augmentation diminuant la largeur et la hauteur de la soudure ;
- L'augmentation de la puissance de consigne augmente à la fois l'intensité maximale du cycle de soudage et la fréquence des court-circuits, mais n'a que peu d'effet sur le poids de métal déposé. La soudure est en revanche plus large et moins haute, probablement du fait d'une température plus élevée du métal déposé, qui présente donc une plus faible viscosité ;
- L'augmentation du débit de gaz présente un effet plus complexe, du fait d'une forte interaction avec la puissance de soudage. Pour une faible puissance, elle diminue la hauteur du cordon de soudure et

augmente sa largeur, alors que pour une forte puissance, elle augmente la hauteur de cordon;

- La distance stick-out quant à elle influe principalement sur la hauteur du cordon, celle-ci augmentant en même temps que le stick-out.

Au regard de ces résultats, il semble qu'il est possible de contrôler la géométrie du cordon en adaptant les paramètres de soudage.

#### REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à remercier le programme Averroès 4 d'Erasmus Mundus pour le soutien financier de cette étude.

#### REFERENCES

- [1] Mathieu Alexandre, Shabadi Rajashekar, Deschamps Alexis, Suery Michel, Mattei Simone, Grevey Dominique, Cicala Eugen. Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire). *Optics & Laser Technology*, 2007, vol. 39, n° 3, pp. 652–661.
- [2] Shanglu Yang, Jing Zhang, Jin Lian, Yongpin Lei. Welding of aluminum alloy to zinc coated steel by cold metal transfer. *Materials & Design*, 2013, vol. 49, pp. 602-612.
- [3] Sierra Guillaume, Peyre Patrice, Deschaux Beume Frédéric, Stuart David, Fras Gilles. Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes. *Materials Characterization*, 2008, vol. 59, n° 12, pp. 1705-1715.
- [4] Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Yuin Wu. *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. John Wiley & Sons Eds. USA, pp.501-617, 2005.