



HAL
open science

Modélisation numérique de la dégradation d'électrodes de soudage par point en alliage Cu-Cr-Zr

Elise Gauthier, Denis Carron, Philippe Pilvin, Philippe Rogeon, Cédric
Pouvreau, Thomas Lety, François Primaux

► **To cite this version:**

Elise Gauthier, Denis Carron, Philippe Pilvin, Philippe Rogeon, Cédric Pouvreau, et al.. Modélisation numérique de la dégradation d'électrodes de soudage par point en alliage Cu-Cr-Zr. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03441230

HAL Id: hal-03441230

<https://hal.science/hal-03441230v1>

Submitted on 22 Nov 2021

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.

Modélisation numérique de la dégradation d'électrodes de soudage par point en alliage Cu-Cr-Zr

E. GAUTHIER^a, D. CARRON^a, P. ROGEON^a, P. PILVIN^a, C. POUVREAU^a, T. LETY^b, F. PRIMAUX^c

a. LIMATB, Université de Bretagne-Sud, rue de Saint-Maudé, 56321 LORIENT

b. PSA Peugeot-Citroën, DRD/DCHM/CFER/AVRT, Route de Gisy, 78943 VELIZY-VILLACOUBLAY

c. Le Bronze Industriel, avenue du Général Leclerc, 51600 SUIPPES

Résumé :

Le soudage par point est une technique largement utilisée par l'industrie automobile pour assembler des tôles minces en acier. Les sollicitations thermomécaniques cycliques associées à l'accumulation des points de soudage dégradent progressivement les électrodes. L'objectif de cette étude est le développement d'un modèle multi-physique couplé qui décrit la détérioration séquentielle des électrodes. On présente ici l'analyse d'essais de soudage sur tôles nues et revêtues et les résultats d'un plan d'expérience numérique conduit avec un modèle électro-thermo-métallurgique qui permet d'étudier l'influence des paramètres du procédé et des conditions aux limites sur l'adoucissement des électrodes.

Abstract :

Resistance spot welding is a technique widely used by the car industry to assemble thin steel sheets. The cyclic thermo-mechanical loading associated with the accumulation of welding spots progressively deteriorate the electrodes. This study addresses the development of a comprehensive multi-physical model that describes the sequential deterioration. Welding tests achieved on uncoated and Zn-coated steel sheets are analyzed. Finite element analysis is performed using an electrical-thermal-metallurgical model. A numerical experimental design is carried out to highlight the main process parameters and boundary conditions which affect electrode degradation.

Mots clefs : soudage par point, électrodes, Cu-Cr-Zr, dégradation, simulation numérique

1 Introduction

Le soudage par point est une technique largement utilisée par l'industrie automobile pour assembler des tôles minces en acier. Le cycle de soudage (figure 1), d'une période de 1 à 2s, avec une durée de passage de courant limitée à quelques dixièmes de secondes, est répété un grand nombre de fois en différents points de l'assemblage à une cadence élevée via l'utilisation de robots de soudage. Le rôle des électrodes, qui sont refroidies par une circulation d'eau interne pour éviter leur surchauffe, est primordial dans ce procédé puisqu'elles doivent à la fois transmettre l'effort, conduire le courant vers les tôles et participer à l'évacuation du surplus de chaleur de la zone soudée. Le matériau les constituant doit donc posséder une conductivité électrique et thermique élevée ainsi qu'une résistance à la déformation à chaud suffisante. Les électrodes de soudage sont ainsi typiquement fabriquées en alliage de cuivre à durcissement structural (Cu-Cr, Cu-Zr ou Cu-Cr-Zr) ou à dispersions d'oxydes Cu-Al₂O₃ (appelé aussi cuivre ODS).

La durée de vie des électrodes est un des enjeux essentiels du procédé et dépend de plusieurs paramètres tels que le courant de soudage, le refroidissement par eau des électrodes, la durée du cycle de soudage et l'état métallurgique du matériau. Lors de l'assemblage de tôles, les sollicitations thermomécaniques cycliques associées à l'accumulation des points de soudage dégradent progressivement les électrodes.

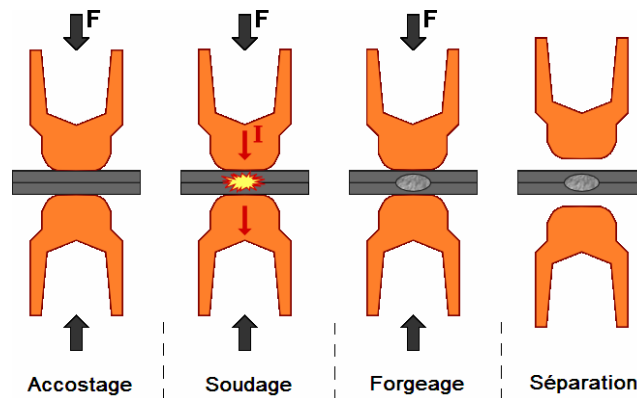


FIG. 1 – Principe du soudage par point.

Les mécanismes de dégradation sont complexes [1-3] et font intervenir l'adoucissement de l'alliage (lié à son état de précipitation initial), la fatigue thermo-mécanique, la contamination par le zinc sur les tôles galvanisées et l'érosion associée. Ces différents modes de dégradation ont pour conséquence une diminution de la qualité des points soudés, un remplacement prématuré des électrodes et une usure accélérée des outils de rodage. Parmi plusieurs solutions d'améliorations, les choix qui sont généralement pris pour contrer la dégradation des électrodes en alliage de cuivre à durcissement structural sont les suivants [4] :

- un réglage optimal des paramètres de soudage pour minimiser les températures atteintes dans les électrodes,
- l'incrémentation du courant de soudage pour compenser les déformations des faces actives,
- un rodage des faces actives deux fois plus fréquent sur tôles revêtues que sur tôles nues dans les usines PSA,
- le remplacement des électrodes après une dizaine de rodages.

Néanmoins en pratique, la prédiction de la durée de vie des électrodes reste un problème récurrent. Cette étude s'attache donc à une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation des électrodes en CuCr1Zr en utilisant la modélisation numérique comme un outil permettant notamment d'évaluer la contribution respective des principaux paramètres contrôlant la durée de vie de l'électrode.

La difficulté provient, d'une part, du caractère multi-physique fortement couplé du problème (figure 2) et, d'autre part, de l'aspect cyclique lié à la répétition des points soudés. Le développement d'un modèle couplé thermique-électrique-métallurgique-mécanique qui décrit la détérioration séquentielle des électrodes sans pour autant mener à des simulations trop pénalisantes en terme de temps de calcul est donc un point particulièrement délicat. Des campagnes d'essais de soudage et la caractérisation expérimentale du matériau en conditions de vieillissement sont réalisées pour mettre au point cette modélisation, valider les calculs et enrichir l'analyse des résultats issus des simulations. La campagne de caractérisation microstructurale (microscopie optique, à balayage et en transmission), des propriétés thermo-mécaniques (sur machine Gleeble) et des propriétés thermo-physiques (masse volumique, chaleur massique, conductivité thermique, résistivité électrique) n'est pas détaillée ici. A signaler cependant que les résistances de contact électriques (RCE) et thermiques (RCT) à l'interface électrode/tôle ont été caractérisées dans des conditions plus représentatives du procédé [5].

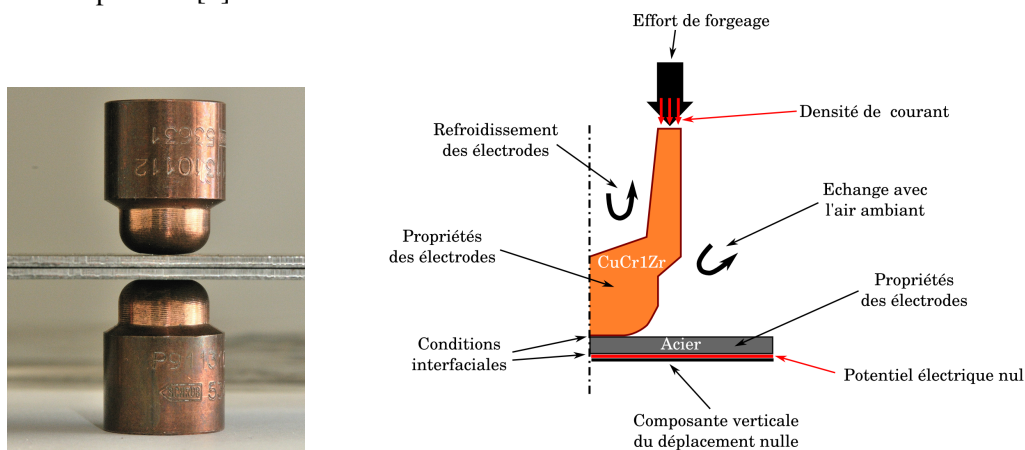


FIG. 2 – Conditions aux limites et propriétés pertinentes pour la simulation numérique.

2 Essais de soudage

Les essais de soudage réalisés ont deux objectifs principaux. Le premier est d'étudier la dégradation du profil des électrodes dans différents cas de soudage en s'intéressant plus particulièrement aux conséquences de l'adoucissement de l'alliage de cuivre sur la déformation du profil des faces actives. Dans un second temps les résultats expérimentaux obtenus dans certaines configurations de soudage servent à la validation des modèles numériques du soudage.

Différentes configurations et conditions de soudage ont été retenues pour les essais : assemblage composés de tôles revêtues ou non, assemblage comprenant deux tôles ou une tôle unique. Le cas de la tôle unique est une configuration académique simplifiée sans interface T/T. L'usage de tôles nues permet de s'affranchir de l'effet du revêtement sur l'usure de la face active des électrodes. La dégradation des faces actives ne peut être imputable dans ce cas qu'aux mécanismes de déformation pouvant être favorisés par l'adoucissement. L'influence des paramètres procédés tels que le débit d'eau de refroidissement et la cadence de soudage a aussi été étudiée. Certains jeux d'électrodes ont été instrumentés avec des thermocouples ce qui permet de relever in-situ les cinétiques thermiques dans des zones proches de la face active de l'électrode. Une expertise des électrodes a aussi été réalisée à posteriori. Une étude profilométrique des faces actives et des filiations de dureté par nanoindentation sur l'axe ont ainsi été effectuées. Enfin pour certains assemblages la cinétique de développement du noyau a été établie à partir de coupes macrographiques.

Nous illustrons ici la comparaison entre une configuration une tôle d'épaisseur 2mm en acier nu et un assemblage de deux tôles d'épaisseur 1mm en acier galvanisé. Les paramètres de soudage (Table 1) ont été déterminés afin de garantir des noyaux de taille conforme aux normes dimensionnelles. Le courant est incrémenté (figure 3) pour compenser l'aplatissement de la face active des électrodes.

Configuration	F (daN)	I (A)	Δt_s (s)	Δt_f (s)	Δt_r (s)	Débit (l/min)
1 tôle nue 2mm	270	9600	0,20	0,20	1,60	2,5
2 tôles galvanisées 1mm	270	9800	0,24	0,20	1,56	2,5

Table 1 - Paramètres de soudage (effort de serrage F , courant de soudage I , durée de soudage Δt_s , durée de forgeage Δt_f , durée de refroidissement Δt_r et débit d'eau de refroidissement).

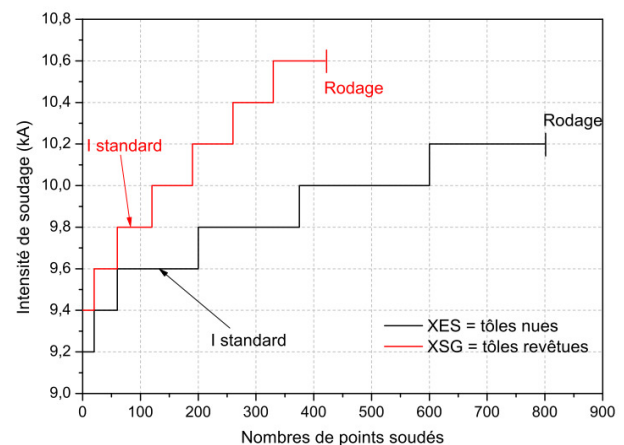


FIG. 3 – Courbes d'incrément de soudage utilisées pour les essais.

Les résultats obtenus indiquent que la dégradation des profils des électrodes s'effectue en deux temps :

- dans le cas des tôles nues et revêtues, les déformations en face active sont surtout importantes en début de vie des embouts (soit ici entre le premier et le 100^{ème} point soudé, figure 4). Les profils de dureté évoluent aussi rapidement mais se stabilisent ensuite dans les deux cas aux environs de 100 points soudés (figure 5);
- lors de l'utilisation de tôles revêtues, l'usure du profil se poursuit au-delà de 100 points. C'est le mécanisme d'érosion consécutif au laitonnage des surfaces actives associé aux phénomènes d'inter-diffusion cuivre-zinc qui est alors à l'origine de cette dégradation.

Ces résultats, en accord avec la littérature [1,2], montrent que si le laitonnage est vraisemblablement le mécanisme prépondérant de dégradation des tôles revêtues, le rôle exact de l'adoucissement de l'alliage constitutif des électrodes sur les déformations de la face active reste à préciser. L'influence des paramètres opératoires de soudage sur cet adoucissement, qui se produit plus ou moins rapidement selon les paramètres de soudage et le type d'assemblage, est aussi à étudier dans l'optique de leur optimisation.

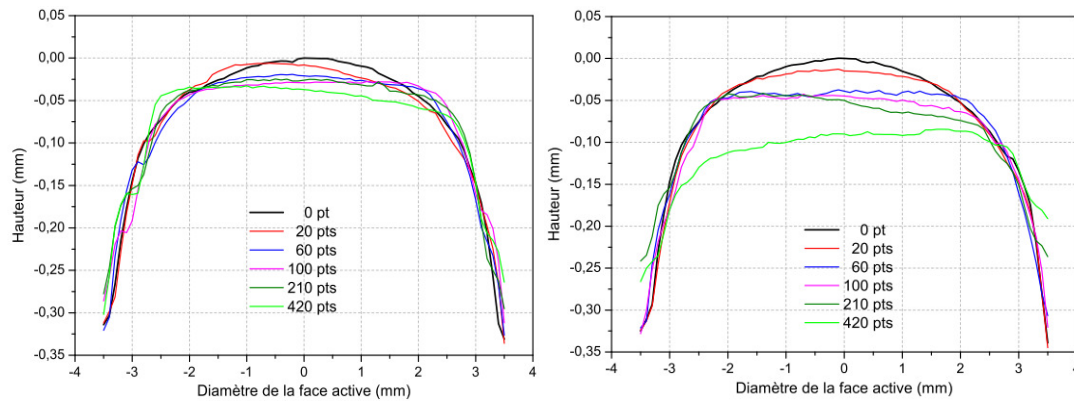


FIG. 4 – Evolution des profils 2D de l'électrode avec le nombre de points soudés : assemblages une tôle 2mm épaisseur en acier nu (gauche) et deux tôles 1mm épaisseur en acier galvanisé (droite).

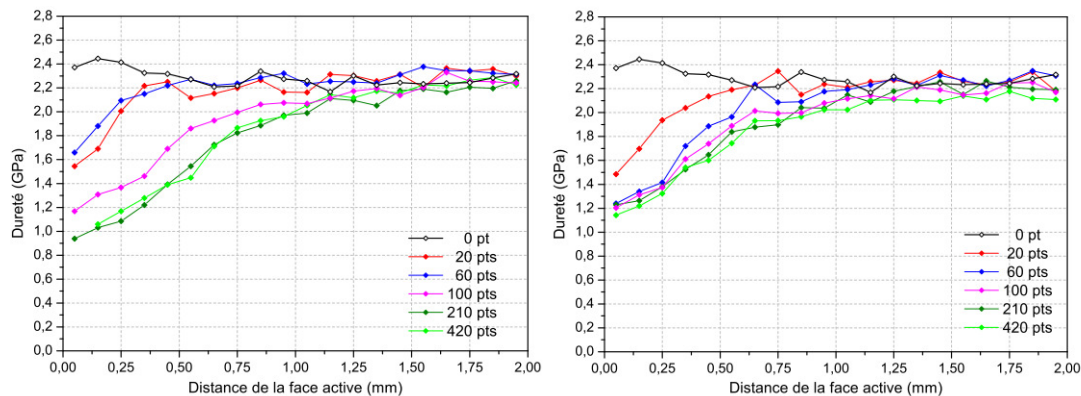


FIG. 5 – Evolution de la dureté dans l'électrode avec le nombre de points soudés : assemblages une tôle 2mm épaisseur en acier nu (gauche) et deux tôles 1mm épaisseur en acier galvanisé (droite).

3 Modélisation numérique

Les modèles développés dans cette étude doivent permettre d'étudier, d'une part, l'influence des paramètres du procédé de soudage (courant, cadence) et des conditions aux limites (refroidissement par eau, contacts avec les tôles) sur l'adoucissement des électrodes et, d'autre part, l'influence de l'adoucissement sur la déformation de la face active. Le laitonnage des surfaces actives n'est pas modélisé. Les simulations sont menées avec le code commercial SYSWELD[®]. Pour pouvoir simuler numériquement l'enchaînement de plusieurs points de soudage tout en évitant des temps de calcul prohibitifs, deux modèles sont utilisés :

- un modèle électro-thermo-métallurgique (ETM^{al}) pour étudier l'influence des paramètres procédé et des conditions aux limites sur le niveau d'adoucissement dans les électrodes. Le modèle électrothermique avec couplage fort et la modélisation des contacts électrode/tôle et tôle/tôle sont détaillés dans [6]. Compte tenu des résultats obtenus lors des campagnes de caractérisation expérimentale il a été choisi de ne pas coupler l'évolution de la résistivité électrique et de la conductivité thermique avec les évolutions microstructurales. Seules les propriétés de l'échantillon trempé-revenu et leurs évolutions avec la température sont prises en compte. De même, et pour ne pas complexifier les modèles, seules seront considérées l'évolution des RCE et RCT avec la température. Les apports de cette étude concernent la prise en compte des phénomènes de coalescence / dissolution des précipités au travers de l'évolution d'une fraction adoucie que l'on peut déterminer expérimentalement à partir de mesures de dureté. Le modèle métallurgique, présenté dans [7], utilise un paramètre d'équivalence temps-température introduit dans une relation de type Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov pour calculer cette fraction adoucie ;

- un modèle électro-thermo-métallurgique-mécanique (ETM^{alM^{ec}}) pour calculer les déformations plastiques dans l'électrode consécutives au vieillissement des embouts. Une loi élasto-viscoplastique à écrouissage isotrope, dont les paramètres dépendent de la température est utilisée. Elle fait par ailleurs intervenir une variable d'adoucissement pour prendre en compte la forte dépendance du comportement mécanique avec les phénomènes de coalescence-dissolution des précipités.

4 Résultats

Les résultats obtenus avec le modèle ETM^{al}M^{ec}, actuellement en cours d'exploitation, ne sont pas présentés ici. Par contre les résultats d'un plan d'expérience numérique conduit avec le modèle ETM^{al} sur le cas académique de la tôle d'épaisseur double sont détaillés et critiqués.

Le modèle ETM^{al} a été utilisé tout d'abord pour effectuer une analyse de sensibilité sur les conductivités électrique, thermique et les RCE. Cette analyse a montré que la précision avec laquelle ont été mesurées ces grandeurs est largement suffisante pour alimenter la base de données utilisée pour les simulations. Les variations appliquées à ces grandeurs engendrent ainsi au maximum une variation de 5% sur les températures obtenues par les calculs.

En ce qui concerne le plan d'expériences numériques, la mise en place d'un plan factoriel complet a permis de mettre en avant l'influence des paramètres opératoires dans un domaine de vie bien défini dans lequel il y a création d'un noyau et adoucissement des électrodes, soit durant les 10 premiers points de soudage. Les résultats obtenus sont ainsi assez représentatifs de l'influence réelle de ces paramètres sur les observables. L'élévation de température dans l'électrode résulte des effets antagonistes de la génération de chaleur dans l'assemblage par effet Joule et du refroidissement par l'eau des électrodes. Les paramètres retenus (Table 2) sont le courant de soudage I , la durée de soudage Δt_s , la durée de refroidissement Δt_r , le coefficient d'échange avec l'eau h_{eau} et la température de l'eau T_{eau} . Les observables sont (figure 6) : la température maximale T_{max} en un nœud situé sur l'axe de symétrie au niveau de la face active de l'électrode (nœud 342), la fraction adoucie sur la maille immédiatement voisine (maille 297) et la profondeur d'adoucissement dans l'électrode délimitée par l'isotherme à 500°C. Il ressort de cette étude que, dans le domaine de variation des paramètres étudié, la durée de soudage et l'intensité de soudage ont les impacts les plus importants sur la température maximale de l'électrode et donc sur son adoucissement (figure 7). Ces effets se font sentir dès les premiers points soudés. Les paramètres de refroidissement (coefficient d'échange avec l'eau, température de l'eau et durée de refroidissement) jouent des rôles non négligeables mais cependant moins importants. Impactant la température minimale de retour en fin de cycle, ils ne se manifestent qu'à partir du second cycle (figure 8). Enfin le plan factoriel a pu mettre en évidence les interactions principales, notamment celles qui font intervenir la durée de soudage. De manière générale le modèle ETM^{al} permet donc de calculer les gradients de température et le vieillissement des électrodes au cours d'une séquence de soudage. Néanmoins, ce modèle suppose que les surfaces de contact E/T sont constantes pour ces calculs, ce qui correspond seulement aux cas de soudage avec des électrodes usagées à face active aplatie. La comparaison avec les essais de soudage instrumentés est donc rendue difficile mais l'on retrouve expérimentalement les mêmes tendances sur l'influence des différents paramètres.

5 Conclusions

Des essais de soudage par point séquentiels, sur tôles nues et revêtues, ont permis de mettre en avant le rôle de l'adoucissement dans les mécanismes de dégradation des électrodes en CuCr1Zr. Sur tôles nues l'usure des profils se fait par déformation essentiellement pendant les 100 premiers points. Sur tôles revêtues les profils s'usent d'abord par déformation, puis par érosion au-delà de 100 points. En parallèle des modèles numériques plus ou moins complexes (ETM^{al}, ETM^{al}M^{ec}) ont été développés pour étudier l'effet des paramètres opératoires sur l'adoucissement et l'influence de l'adoucissement sur les déformations de la face active. L'analyse de sensibilité effectuée avec le modèle ETM^{al} a confirmé que les conductivités électrique, thermique et les RCE ont été déterminées expérimentalement avec une précision suffisante pour permettre une simulation correcte du champ de températures dans les électrodes. Le plan d'expériences numériques a permis de dégager les paramètres de soudage et les conditions aux limites qui influent le plus la cinétique d'adoucissement. Pour modéliser au mieux l'échauffement dans les électrodes à face active convexe et étudier l'influence de l'adoucissement de l'électrode sur les déformations de face active, les aspects mécaniques doivent être pris en compte via le modèle ETM^{al}M^{ec}. Ce dernier travail est en cours d'exploitation.

Remerciements

Les auteurs remercient la région Bretagne pour son soutien financier (bourse ARED ELECSOUD). La machine Gleeble 3500 et le diffusivimètre flash laser NETZSCH LFA 457 de l'Université de Bretagne-Sud ont été co-financés par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER).

			-1	0	+1
I	(A)	X_1	12925	13000	13075
h_{eau}	($W.m^{-2}.K^{-1}$)	X_2	30000	25000	20000
T_{eau}	(°C)	X_3	10	20	30
Δt_r	(s)	X_4	1,76	1,56	1,36
Δt_s	(s)	X_5	0,22	0,24	0,26

Table 2 - Domaine de variation des paramètres pour le plan d'expériences numériques.

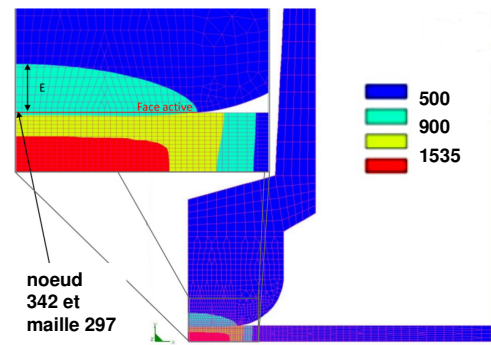


FIG. 6 – Positions du noeud et de la maille des observables et isothermes quand $T_{342} = T_{max}$.

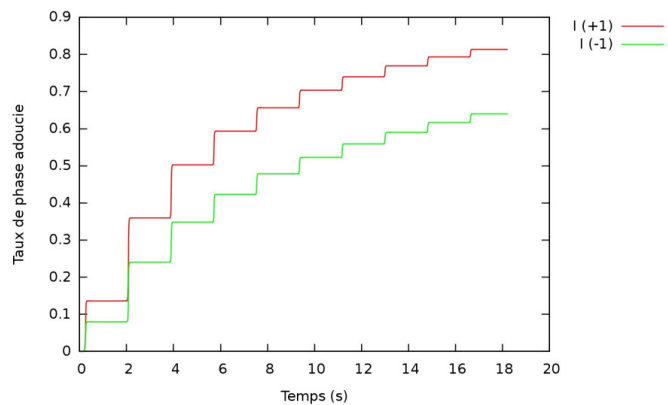
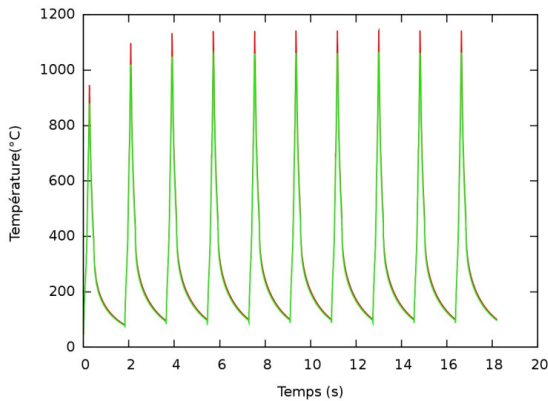


FIG. 7 – Effet du courant de soudage sur les températures et l'adoucissement dans l'électrode.

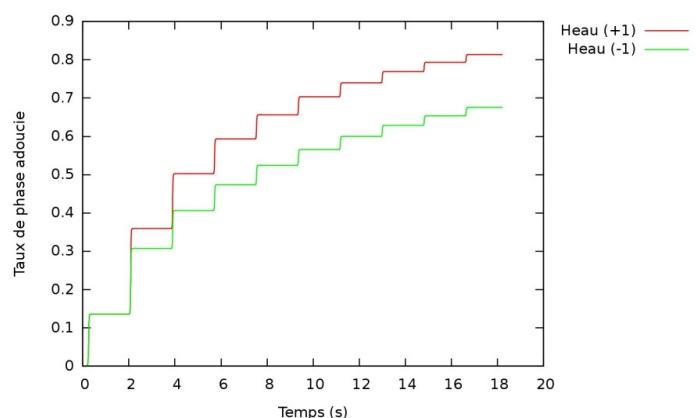
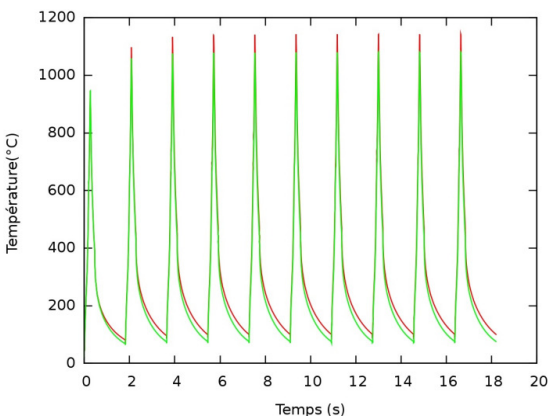


FIG. 8 – Effet du coefficient d'échange avec l'eau sur les températures et l'adoucissement dans l'électrode.

Références

- [1] Dupuy T., La dégradation des électrodes lors du soudage par points de tôles d'acier zinguées, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, France, 1998.
- [2] Babu S.S., Santella M.L. and Peterson W., Modeling Resistance Spot Welding Electrode Life, Proc. Sheet Metal Welding Conf. XI, Sterling Heights, May 2004.
- [3] Parker J. D., Williams N. T. and Holliday R. J., Mechanisms of electrode degradation when spot welding coated steels, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 3, N°2, 65-74, 1998.
- [4] Claeys J., Dupuy T. et Verrier P., Soudage des tôles d'acier revêtues, Tech. Ingénieur, BM7771, 2005.
- [5] Rogeon P., Carré P., Costa J., Sibilia G., and Saindrenan G., Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies, J. of Mat. Proc. Tech., 195,117-124, 2008.
- [6] Raelison R., Fuentes A., Rogeon P. *et al.*, Contact conditions on nugget development during RSW of Zn coated steel sheets using rounded tip electrodes, J. of Mat. Proc. Tech., 212, 1663-69, 2012.
- [7] Carron D., Gauthier E., Pouvreau C. *et al.*, Modelling age hardening CuCr1Zr electrode alloy softening during resistance spot welding, Solid State Phenomena, 172-174, 857-862, 2011.