

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Energétique

MISE AU POINT D'UNE METHODOLOGIE EXPERIMENTALE
ET ANALYTIQUE D'UNE SEQUENCE DE SOUDAGE PAR POINT

Par

Djelloul AZZOUZI

Devant le jury composé de :

N. AIT MESSAOUDENE	Professeur	(U.Blida)	Président
L. LOUKARFI	Professeur	(U.Chelef)	Examineur
T. REZOUG	Maître de conférences	(U.Blida)	Examineur
M .ZERGOUG	Maître de recherche	(CSC.Cheraga)	Examineur
Y. BENKEDDA	Maître de conférences	(U.Blida)	Promoteur

Blida, Février 2005

RESUME

Ce présent travail a été mené dans le souci d'étudier l'évolution de la formation d'un noyau de soudure réalisé en soudage par point sous différents paramètres de soudage, en utilisant la technique métallographique. Une approche analytique en suite a été développée pour prédire la taille du noyau sous les mêmes paramètres de soudage utilisés dans l'étape expérimentale. Les résultats obtenus à travers cette approche analytique sont comparés à ceux fournis par l'expérimental selon un modèle de comparaison développé par GOULD, J [11].

ABSTRACT

This present work was undertaken with the aim of study the evolution of the formation of a core of welding carried out in spot welding under various parameters of welding, by using the metallographic technique. An analytical approach in following summer developed to predict the size of the core under the same parameters of welding used in the experimental stage. The results obtained through this analytical approach is compared provided those by the experimental one according to a model of comparison developed by GOULD, J [11].

ملخص

إن الهدف من هذا العمل هو دراسة تكوين و تطور نواة التلحيم المحصل عليها من خلال استعمال طريقة التلحيم النقطة تحت عدة عوامل التلحيم و هذا باستعمال طريقة الميتالوجرافيا. مقارنة تحليلية تم تطويرها بهدف منحنا إمكانية قياس أبعاد نواة التلحيم تحت نفس عوامل التلحيم المستعملة في المرحلة التجريبية. النتائج المحصل عليها من خلال المقارنة التحليلية تم مقارنتها مع النتائج التجريبية من خلال نموذج مقارنة صمم من طرف [GOULD] [11].

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je remercie Mr Y.BENKEDDA, pour son aide continue dans l'orientation et le suivi durant toutes les étapes de réalisation de ce modeste travail.

Je tiens aussi a remercier Mr B.IBRIR pour l'aide qui ma apporté en matière de documentation technique.

Ma reconnaissance très sincère à Mlle K.TAHAR CHAOUACH pour ses critiques encourageantes dans l'aspect général du travail.

En aucun cas je ne voudrais oublier l'aide de l'ensemble des attachés de recherche au niveau du centre de recherche et contrôle/Cheraga.

Je remercie enfin Mr , N.AIT MESSAOUDENE d'avoir accepter de présider le jury de soutenance, ainsi que Mr , L. LOUKARFI , Mr, M. ZERGOUG et Mr T.REZOUG d'avoir examiner ce travail et participer au jury.

TABLE DES MATIERES

RESUME	1
REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIERES	3
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	5
LISTE DES SYMBOLES	7
INTRODUCTION	8
1. ETAT DES RECHERCHES	10
2. INTRODUCTON AU SOUDAGE PAR POINT	19
2.1. Généralités.	19
2.2. Principe du procédé.	19
2.3. Déroulement du cycle de soudage.	20
2.4. Paramètres de soudage.	
2.5. Mécanisme de formation du noyau de soudure.	22
3. SIMULATION MATHEMATIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU NOYAU DE SOUDURE EN SOUDAGE PAR POINT	23
3.1. Introduction.	23
3.2. Eléments sur les phénomènes thermiques en soudage par point.	23
3.3. Simulation thermique du procède de soudage par point.	24
3.3.1. Evaluation de la résistance électrique globale R_g .	26
3.3.2. Evaluation du volume de noyau fondu Δv_n .	28
3.4. Détermination du champ de température dans la zone de soudure.	29
3-5. Détermination de l'épaisseur théorique du noyau fondu.	30
4. ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EVOLUTION DU NOYAU DE SOUDURE	31
4.1. Introduction.	31
4.2. Données expérimentales.	31

4.2.1. Choix du matériau.	31
4.2.2. Propriétés mécaniques et thermiques de l'acier inoxydable 304L.	32
4.2.3. Paramètres de soudage.	32
4.2.3.1. Diamètre de l'électrode.	32
4.2.3.2. Effort exercé par l'électrode.	33
4.2.3.3. Intensité du courant.	33
4.2.3.4. Temps de soudage.	33
4.3. Travaux effectués.	33
4.3.1. Soudage.	33
4.3.2. Découpage de l'échantillon pour traitement.	34
4.3.3. Enrobage.	34
4.3.4. Polissage.	34
4.3.5. Attaque chimique.	35
4.3.6. Prise des dimensions.	35
5. PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.	36
5.1. Résultats expérimentaux.	36
5.1.1. Influence de l'intensité du courant sur la taille du noyau de soudure.	36
5.1.2. Influence du temps de soudage sur la taille du noyau de soudure.	37
5.2. Résistance de contact R_c .	43
5.3. Résultats du modèle analytique.	44
5.3.1. Épaisseur de la tôle=1mm.	44
5.3.2. Épaisseur de la tôle=1.5mm	45
6. CONCLUSION.	49
ANNEXE.	51
BIBLIOGRAPHIE.	72

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Tableau 5.1	Volumes maximaux d'un noyau de soudure réalisé lors du soudage de tôles d'épaisseur =1mm.	37
Tableau 5.2	Volumes maximaux d'un noyau de soudure réalisé lors du soudage de tôles d'épaisseur =1.5mm.	37
Figure 2.1	Principe du soudage par point.	20
Figure 2.2	Les différentes phases d'un cycle de soudage.	21
Figure 2.3	Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles en soudage par point.	22
Figure 3.1	Description axiale des deux tôles.	24
Figure 3.2	Représentation schématique d'une source d'énergie instantanée non ponctuelle.	25
Figure 3.3	Bilan thermique au niveau du noyau de soudure.	27
Figure 3.4	Représentation schématique d'un noyau de soudure.	27
Figure 3.5	Cycle thermique au centre du noyau de soudure réalisé sous différentes intensités -temps de soudage de 10cycles.	29
Figure 3.6	Distribution du champ de température le long de l'épaisseur des deux tôles – épaisseur=1mm.	30
Figure 4.1	Electrode en cuivre pur.	32
Figure 4.2	Soudeuse par point.	33
Figure 4.3	Micro- tronçonneuse.	34
Figure 4.4	Machine à enrober.	34
Figure 4.5	Mécanisme de visualisation (Microscope + micro - ordinateur).	35
Figure 5.1	Evolution du noyau fondu en fonction de l'intensité du courant pour un temps de soudage=5cycles.	39
Figure 5.2	A-Variation de la taille du noyau en fonction de l'intensité. B- Variation du volume du noyau en fonction de l'intensité.	39
Figure 5.3	Evolution du noyau fondu en fonction de l'intensité du courant pour un temps de soudage=5cycles.	40
Figure 5.4	A-Variation de la taille du noyau en fonction de l'intensité. B- Variation du volume du noyau en fonction de l'intensité.	40
Figure 5.5	A-Variation de volume du noyau en fonction de l'intensité pour les différent temps de soudage. B- Variation de volume en fonction du temps de soudage (4000-6000A) C- Variation de volume en fonction du temps de soudage (7000-9000A)	41
Figure 5.6	A- Variation de volume du noyau en fonction de l'intensité pour les différent temps de soudage. B- Variation de volume en fonction du temps de soudage (4000-6000A) C- Variation de volume en fonction du temps de soudage (7000-9000A)	42
Figure 5.7	Variation de la résistance de contact en fonction du temps de soudage A : Epaisseur de la tôle =1mm B : Epaisseur de la tôle = 1.5mm	43
Figure 5.8	Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1mm, t=5cycles.	44

Figure 5.9	Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1mm, t=10cycles.	45
Figure 5.10	Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1mm, t=15cycles.	45
Figure 5.11	Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1.5mm, t=5cycles.	46
Figure 5.12	Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1.5m, t=10cycles.	47
Figure 5.13	Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1.5m, t=15cycles.	47

LISTE DES SYMBOLES

- C_p : Capacité calorifique a pression constante.
- e : Epaisseur de la tôle à souder.
- H : Chaleur latente de fusion
- I : Intensité du courant de soudage.
- J_0 : Fonction de Bessel de première espèce et d'ordre 0.
- q : Quantité de chaleur produite par effet joule.
- R_g : Résistance électrique globale.
- r_0 : Rayon de l'électrode
- T : Température.
- T_0 : Température initiale.
- t : Temps.
- ΔT : Différence de température.
- ΔV_n : Volume du noyau fondu.
- α : Diffusivité thermique.
- λ : Paramètre d'intégration.
- ρ : Masse volumique.

INTRODUCTION

Le procédé du soudage électrique par résistance par point représente le procédé le plus moderne d'assemblage des métaux, sa première apparition dans l'industrie remonte en 1877 par ELIHU THOMSON qui a prouvé la possibilité d'assembler deux pièces d'acier, en utilisant comme agent de chauffage un courant électrique de forte intensité.

Cette technique de soudage exige l'emploi de puissance électrique très importante en courant alternatif. Les machines utilisées à l'époque étaient dans la plupart d'entre elles à courant continu, ce qui a empêché l'utilisation de ce procédé à grande échelle industrielle. Le soudage par point a pris son essor aux environs de 1930 avec une progression très rapide au cours des dernières décennies.

Les applications du soudage par point couvrent un domaine très étendu dans l'industrie: industrie automobile, aéronautique, électroménagère.

Le mécanisme de formation d'un point de soudure qui caractérise ce procédé nécessite une grande compréhension et maîtrise, car il présente un des facteurs déterminant dans la qualité de la structure soudée.

Beaucoup de chercheurs ont étudié ce mécanisme de formation du point de soudure dans de divers matériaux en fonction des paramètres de ce procédé. La plupart de ces études sont des simulations thermiques basées sur des méthodes numériques qui servent à développer des modèles de calcul, ces derniers sont employés pour examiner la formation du noyau et la distribution du champs de température dans la soudure (*zone fondue + zone affectée thermiquement*).

D'autres travaux expérimentaux dans le même axe de recherche ont été réalisés en utilisant les techniques métallographiques afin de caractériser le point de soudure. Ces techniques, n'offrent pas la possibilité de mesurer la croissance du noyau fondu cependant, elles rendent compte de l'importance de contrôler les paramètres du procédé pour assurer une qualité de soudure acceptable. Récemment, une nouvelle technique non destructive est apparue dans ce domaine utilisant un appareil photo à grande vitesse de résolution offrant la possibilité de contrôler et de suivre la croissance d'un point de soudure au cours d'une séquence de soudage.

Dans les cinq dernières décennies, les nombreux travaux qui sont présentés traitent essentiellement le couplage existant entre les différents phénomènes (thermique, mécanique,

électrique, métallurgique) régissant le processus. Les résultats obtenus ont participé efficacement à la compréhension de la formation et l'évolution d'un noyau fondu ainsi que le rôle des différents paramètres et facteurs du procédé.

CHAPITRE 1

ETAT DES RECHERCHES

Dans ce chapitre on présente une récapitulation historique des travaux de recherches effectués durant ces cinq dernières décennies, le choix de chaque article présenté dans ce chapitre est fait sur la base de son contenu et sa relation avec l'objectif de ce travail présenté dans ce mémoire.

En 1958-WILLIAMSON et BOWDEN [1] ont présentés un travail qui consiste à étudier théoriquement le comportement électrique, thermique et mécanique de l'interface de deux solides en contact sous l'effet d'une charge appliquée.

Les résultats de cette étude montrent que les aspérités définies par le nombre de points de constriction entre les deux surfaces, augmente la densité du courant de soudage (*Intensité par unité de surface*) ce qui engendre une limitation de la résistance de contact lors du passage du courant.

Une élévation rapide de température à l'interface provoque une augmentation de la surface de contact.

Dans la même année, GREENWOOD et WILLIAMSON [2] ont étudié théoriquement et expérimentalement la distribution du courant électrique dans une zone entre deux solides semi-infinis en contact. L'étude a prouvé que la singularité de la densité du courant est apparue à la périphérie de la zone de contact, et que la zone la plus proche de la zone de contact est affectée thermiquement (*ZAT*) non pas par un chauffage direct qui est du au passage du courant électrique, mais par l'écoulement de la chaleur par conduction à partir de la zone de contact dans laquelle s'est générée une quantité de chaleur par effet joule.

Le début des années soixante ARCHER [3] a étudié mathématiquement la réponse de la température au cours d'un procédé de soudage par point.

Cette étude présente un modèle mathématique mono-dimensionnel développé par la méthode de séparation de variable. Les résultats de ce modèle permet la détermination du temps requis par une soudure par points pour atteindre sa température de fusion.

Le calcul montre également comment l'épaisseur et les caractéristiques thermiques de différents alliages affectent la réponse de la température.

En 1961 GREENWOOD [4] a présenté le premier modèle de simulation du procédé de soudage par point en utilisant la méthode des différences finies pour discrétiser l'équation de la chaleur. Ce modèle a été considéré comme une contribution significative qui s'ajoute aux efforts de modélisations théoriques.

L'analyse de GREENWOOD tient compte de la variation des propriétés thermiques des matériaux à souder en fonction de la température, ainsi que la génération interne de la chaleur due au passage du courant électrique. Les effets de la résistance de contact et de la chaleur latente de fusion n'ont pas été considérés dans ce modèle.

Les résultats de cette analyse ont montré la distribution spatio-temporelle de la température dans un point de soudure lors de sa formation. La température maximale s'est produite dans un anneau autour du bord du secteur de contact électrode/tôle à l'étape initiale du soudage (*premiers cycles de soudage*). A de plus longs temps de soudage, ce maximum est situé près de l'axe axisymétrique de la surface de contact.

La forme elliptique du point de soudure est délimitée par l'isotherme qui correspond à la température de fusion du métal de base.

Basé sur ce modèle, des taux de refroidissement se sont avérés de l'ordre de 1000 k/s pour la majorité des aciers doux.

Dans le même axe BENTLEY et GREENWOOD [5] ont vérifié expérimentalement les résultats du modèle théorique (*Numérique*) développé par GREENWOOD [4], en utilisant la technique métallographique sur un acier doux.

L'analyse des résultats expérimentaux a montré le rôle principal de la résistance de contact dans la génération de la chaleur aux premiers cycles de soudage, cette résistance de contact devient moins influente aux cycles postérieurs de la formation du point de soudure.

La comparaison avec les résultats théoriques a indiqué que le modèle de GREENWOOD qui n'a pas considéré l'effet de la résistance de contact donne des résultats contradictoires aux données expérimentales pendant les premiers cycles de soudage, mais il présente une bonne concordance dans le reste des cycles de soudage.

RICE et FUNK [6] ont développés en 1967 un modèle mono-dimensionnel basé sur la méthode des différences finies.

Ce modèle thermique permet d'étudier l'évolution thermique des matériaux composites lors d'une séquence de soudage par point. La variation des propriétés électriques et thermiques des

matériaux à souder a été prise dans le calcul, contrairement à la chaleur latente de fusion qui n'a pas été considérée dans le modèle.

La résistance de contact introduite dans le calcul a été déterminée à partir de données expérimentales.

Les résultats de ce travail ont montré que la résistance de contact n'a pas eu d'effet sur le comportement thermique des matériaux à souder, l'explication de ce résultat étant basée sur l'analyse suivante :

Pendant un temps de soudage donnée, la surface de contact entre les deux tôles a subi un chauffage très rapide dans les premiers cycles de soudage provoquant la fusion instantanée dans cette zone de contact, ce qui induit une augmentation dans la surface de contact et par conséquent, la résistance de contact atteint une valeur constante dans le reste des cycles de soudage.

Le début des années soixante-dix JHONSON et NEEDHAM [7] ont développé un nouveau concept de commande pour le procédé de soudage par point ; ils ont montrés que la force appliquée sur l'électrode affecte directement le phénomène de la formation du noyau fondu et la qualité de ce dernier est assurée par l'ajustement de la charge appliquée ainsi que par le temps et l'intensité du courant de soudage. Un système d'ajustement automatique de la charge appliquée a été développé afin de limiter l'expansion de la soudure.

Pour la quasi-totalité des matériaux utilisés, le diamètre du noyau fondu varie linéairement par rapport à la charge appliquée sur l'électrode dans la zone délimitée par le début de formation du noyau jusqu'à sa limite d'expulsion.

En 1977 HOUCHENS [8] a développé deux modèles analytiques, en utilisant la méthode des différences finies, pour simuler le procédé de soudage par point et de déterminer la réponse thermique (champs de température) ainsi que la pénétration du point de soudure (taille du noyau fondu) pour des tôles d'acier. Son premier modèle était un modèle thermique mono-dimensionnel qui tient compte de la variation des propriétés thermiques en fonction de la température, la chaleur latente de fusion et la génération de chaleur par effet joule.

Le deuxième modèle est axisymétrique, il a inclut l'effet de la géométrie du bord d'attaque de l'électrode.

Les résultats obtenus à travers ses deux modèles ont montrés que le premier a fourni des informations intéressantes sur la taille du point de soudure, et le deuxième a donné plus

d'information sur la densité du courant et la distribution de la température dans l'électrode et la pièce.

Expérimentalement KAISER [9] a révélé certains principes fondamentaux dans la détermination des paramètres qui affectent le plus la formation d'un point de soudure. Dans ce travail expérimental deux types d'acier sont utilisés. L'acier *HSLA* et un acier à basse teneur en carbone.

Les résultats de ce travail sont énumérés ci dessous.

- 1- Les aciers *HSLA* montrent des résistivités plus élevées que les aciers à basse teneur en carbone.
- 2- Les résistances d'interface électrode/pièce sont comparable en valeur à la résistance de contact entre les deux pièces, et la chaleur produite aux interfaces électrode/pièce est principalement absorbée par les électrodes elles même.
- 3- Le domaine réel de l'écoulement du courant électrique peut changer nettement la superficie de contact nominal.
- 4- Pour des courants très élevés et des temps de soudage très court, la fusion initiale se produit autour de la périphérie de l'électrode.

En 1984 NIED [10] a exploité le code de calcul *ANSYS*, Pour présenter son modèle axisymétrique couplé basé sur la méthode d'éléments finis.

Ce modèle prend en compte dans son algorithme de calcul la variation des propriétés thermiques en fonction de la température, la chaleur latente de fusion, source d'énergie par effet joule et la distribution d'effort appliqué sur l'électrode ainsi que la densité du courant.

L'analyse thermique des résultats obtenus à travers ce modèle montre que :

- Les températures maximales sont localisées au centre de la surface de contact des deux pièces à souder.
- Les dimensions des points de soudure en fonction du temps de soudage, montrent une bonne concordance avec les données expérimentales.

La possibilité fortement flexible offerte par ce modèle de calcul a recherché les facteurs qui affectent la formation du point de soudure manque toujours d'un point de vue transfert thermique, car il exclu les effets de la variation de la résistance de contact en fonction de la température sur la croissance axiale du point de soudure.

GOULD [11] en 1987 a étudié expérimentalement et analytiquement le développement d'un point de soudure lors d'une séquence de soudage par point.

La partie expérimentale de cette étude consiste à utiliser la technique métallographique afin de déterminer la taille des différents points de soudure réalisés sous différentes valeurs des paramètres de soudage.

Les données expérimentales sont les suivantes :

- Acier doux *AISI 1008*.
- 3 épaisseurs (*0.5, 1, 1.5 mm*).
- Temps de soudage variant de *5 cycles* à *15cycles*.
- Courant de soudage variant de *7kA* à *15kA*.

La partie analytique est présentée sous forme d'un modèle thermique mono-dimensionnel développé par la méthode des différences finies, semblable à celui proposé par d'autres auteurs ([6], [8]).

Ce modèle tient compte des paramètres suivants :

- Géométrie de l'électrode.
- Source d'énergie interne (effet joule).
- Résistance électrique de contact.
- Variation des propriétés thermo- physiques en fonction de la température.
- Chaleur latente de fusion.

La variation de la résistance de contact a été supposée linéaire entre une valeur statique correspond à la température initiale et une valeur nulle qui caractérise le début de fusion.

La comparaison des résultats expérimentaux à ceux analytiques obtenus à travers cette étude montre que la taille des points de soudure calculée analytiquement est beaucoup plus grande que celles observée expérimentalement.

Cette différence quantitative de la taille du point de soudure est due selon l'auteur à la sous-estimation radiale de la chaleur à la surface de contact, et à la perte de chaleur dans la pièce qui n'a pas été considérée dans le calcul.

Ce modèle offre une bonne simulation qualitative de la formation d'un point de soudure, mais il démontre qu'un modèle quantitativement cohérent est nécessaire afin de fournir de meilleurs résultats dans ce procédé de soudage.

Un modèle thermique a été développé par EAGER [12] en 1988 offrant la possibilité de déterminer les différents flux de chaleur mis en jeu lors d'une séquence de soudage par point.

Le modèle proposé a inclut les paramètres thermiques et électriques des matériaux à souder participants à la formation d'un point de soudure. A travers cette étude, une analyse paramétrique de la transmission de chaleur a montré les résultats suivants :

- 1- Le rapport de taux de perte de chaleur dans l'électrode comparé aux taux de perte de chaleur dans la pièce est une fonction du diamètre d'électrode divisé par le carré de l'épaisseur de la pièce.
- 2- Les tôles plus minces augmentent la température de surface d'électrode.
- 3- Le rapport de la conductivité thermique et de la capacité thermique à la résistivité électrique est le nombre caractéristique qui représente la soudabilité d'un matériau donné.
- 4- Une valeur élevée de la résistance de contact augmente la largeur du noyau, à condition que cette résistance ne produise pas l'expulsion à l'interface électrode/tôle.

Les deux chercheurs CHO, h et CHO, y [13] ont présenté en 1989 un modèle analytique bi-dimensionnel basé sur la méthode des différences finies afin de résoudre l'équation de la chaleur sous des conditions aux limites prédéfinis.

Ce travail de modélisation thermique a permis la détermination du champ de température dans les deux directions longitudinale et transversale de la zone de soudure.

Le traçage des isothermes en balayant toute la surface, a offert la possibilité de déterminer la dimension des noyaux fondus qui sont délimités par les isothermes qui correspondent aux températures de fusion du matériau.

SHEPPARD [14] a fait passer en revue dans un travail publié en 1990, des études analytiques concernant la simulation des cycles thermique, électrique et mécanique dans le soudage par point. L'analyse et la simulation sont les outils valables pour développer une compréhension plus profonde de ce type de soudage.

En particulier la formation du noyau et la distribution des effets résiduels peuvent être simulés, et l'influence des variables de processus peut être étudié.

Des techniques analytiques ont été appliquées par un certain nombre de chercheurs afin d'étudier les cycles électrique, thermique et mécanique.

L'application des techniques de simulation trouve une vaste plage dans le soudage par point ; le processus est en soi tridimensionnel mais il peut être reconverti en mode bi-dimensionnel avec une exactitude de résultat très acceptable.

La détermination de la résistance électrique de contact par un procédé expérimental a été abordé par VOGLER [15] en 1993. Ce travail consiste à déterminer la résistance électrique de contact impliquée dans le soudage par point des aciers de tôles minces.

Les aciers utilisés dans les essais sont : l'acier *HSLA*, et l'acier doux *AISI 1008*.

Le dispositif expérimental exploité dans cette recherche est un banc d'essai de montage spécial doté d'appareillage de contrôle et de mesure offrant la possibilité d'évaluer les différentes résistances de contact *tôle/tôle - électrode/tôle*. Une simulation mathématique a été développée dans le même concept afin de confronter les résultats expérimentaux.

Dans le même axe de recherche NA, j et PARK, w [16] ont étudié en 1996, l'effet de la résistance de contact comprenant la résistance de constriction et de contamination ; l'évaluation de cette résistance a été un obstacle important dans l'analyse thermoélectrique du procédé de soudage par point.

Dans ce travail, un modèle simple de résolution numérique basé sur la méthode des éléments finis a été développé pour calculer la distribution de température en fonction de l'effort exercé sur l'électrode lors de la formation d'un point de soudure.

Les résultats de simulation ont montré que le modèle proposé peut être avec succès employé afin de prévoir l'effet de la résistance de contact sur la réponse électrique et thermique du procédé.

Un certain nombre d'expériences ont été réalisées pour différents états de soudure afin de vérifier ce modèle numérique.

En 1999 YOUNG, k et THORNTON, p [17] ont développé un modèle paramétrique basé sur la méthode des éléments finis, ce modèle a pour objectif la simulation thermique du bord d'attaque d'une électrode lors du soudage par point.

Ce modèle offre la possibilité d'étudier le comportement thermique transitoire de l'électrode afin de déterminer les facteurs qui influent sur sa durée de vie. Le chauffage excessif sur la surface de contact *électrode/pièce*, provoque la détérioration du bord d'attaque et réduit sa durée de vie. A cet effet la connaissance de la distribution de la température a une importance capitale dans l'amélioration ainsi que l'entretien de la qualité du soudage par point.

L'analyse des résultats a indiqué que :

- Les pertes de chaleur par convection et par rayonnement n'étaient pas importantes.
- Le développement rapide de la température sur la surface d'attaque est apparu lorsque l'écart des températures de fusion de l'électrode et de la pièce est petit.
- Aucun changement crucial de température n'a été enregistré pour une diminution de débit d'eau de refroidissement passant de 3.79 l/min à 2.24 l/min
- La diminution de la profondeur pleine de l'électrode de 9 à 6.5 mm n'a pas entraînée un changement dans la distribution de champs de température.

Ce manque de changement peut être attribué à une réponse lente de l'électrode pour une vitesse de chauffage rapide.

Récemment le mécanisme de formation d'un point de soudure dans le procédé de soudage par point et son effet sur les paramètres du procédé de soudure est examiné en 2003 par CHO,y et RHEE,s [18] en employant un appareil- photo numérique à grande vitesse de résolution. Cet outil a permis la surveillance et l'observation du processus de la formation du noyau.

La génération de chaleur et la variation de la résistance dynamique de contact sont étudiés en se basant sur les changements de couleur de l'interface *pièce/ pièce* caractérisée par une couleur jaune-rouge (*ZF et ZAT*).

Les résultats de la surveillance à grande vitesse offerte par l'appareil photo, sont employés dans cette étude pour examiner non seulement la formation et la croissance du noyau mais également le rapport entre les paramètres de soudage et le processus de formation du noyau.

Les données expérimentales sont les suivantes :

- Force d'électrode = 1.96 KN .
- Temps de soudage = 15 cycles .
- Courant de soudage varie de 5.5 à 8 KA .
- Enregistrement d'image se faisant à 1000 Frames/s avec une résolution de 256 pixels.
- 8 à 9 images sont prises chaque demi cycle.

Les résultats obtenus à travers cette étude expérimentale montrent que :

- la chaleur initiale est apparue dans un petit noyau de forme arrondie dans la surface de contact *pièce/pièce*, et la première zone rouge est observée au centre de la soudure.
- La résistance dynamique de contact a atteint son équilibre dans les deux premiers cycles de soudage.
- Pour des courants de soudage élevés, la croissance du noyau atteint son état final après le 4^{ème} cycle du soudage.

Les résultats d'essai sur les matériaux revêtus et non revêtus sont conformes aux évaluations analytiques, un certain nombre de résultats étaient qualitativement prévisibles, par exemple :

- La résistance de contact diminue avec l'augmentation de la charge appliquée sur électrode (effort de soudage).
- Le nettoyage et la galvanisation des surfaces des tôles réduit la résistance électrique de contact.

CHAPITRE 2

INTRODUCTION AU SOUDAGE PAR POINT

2.1. GENERALITES

Le soudage par point fait partie de la famille des procédés de soudage par résistance, au même titre que le soudage à la molette, par bossages, ou en bout. Il est utilisé pour assembler deux tôles (ou plus) dont l'épaisseur est typiquement comprise entre 0.5 et 10 mm. Historiquement, ce fut le professeur I.Thomson qui eut, en 1877 [1] l'idée d'assembler deux tôles d'acier en utilisant; comme agent de chauffage, l'effet de la traversée de l'assemblage par un courant électrique de forte intensité.

Introduit dans l'industrie vers le début du siècle, il voyait sa technique évoluer avec une rapidité surprenante et devenait en quelques années, l'auxiliaire indispensable des plus importantes fabrications modernes.

Le soudage électrique par point est l'opération qui consiste à exécuter une soudure par résistance, cette dernière peut se définir comme une soudure autogène, exécutée sous une pression d'électrodes, et sans apport de métal en utilisant le chauffage sous l'effet joule généré par le passage d'un courant électrique à travers l'assemblage.

Ce mode de soudage est caractérisé par une rapidité d'exécution, cette affirmation est justifiée par quelques chiffres qui montrent l'un des multiples avantages de ce procédé. Le soudage par point de deux tôles d'acier de 1mm d'épaisseur s'exécute en soudage rapide dans des temps de soudage qui sont de l'ordre de 5 à 10 cycles, certains soudeuses par point peuvent assurer des cadences de 500 points de soudure à la minute, en soudant des tôles d'acier de 8/10 mm. Quant aux machines à point multiples, elles semblent ne plus connaître de limite pouvant exécuter automatiquement des grillages métalliques en soudant 1200 points de soudure à la minute.

2.2. PRINCIPE DU PROCEDE

La figure (2-1) représente schématiquement le principe du soudage par point: les deux tôles sont prises en étau entre deux électrodes afin de maintenir l'ensemble en contact. Cet assemblage est ensuite traversé par un courant de forte intensité qui crée un noyau fondu au niveau de l'interface tôle-tôle. En refroidissant, ce noyau fondu fixe localement les deux tôles entre elles.

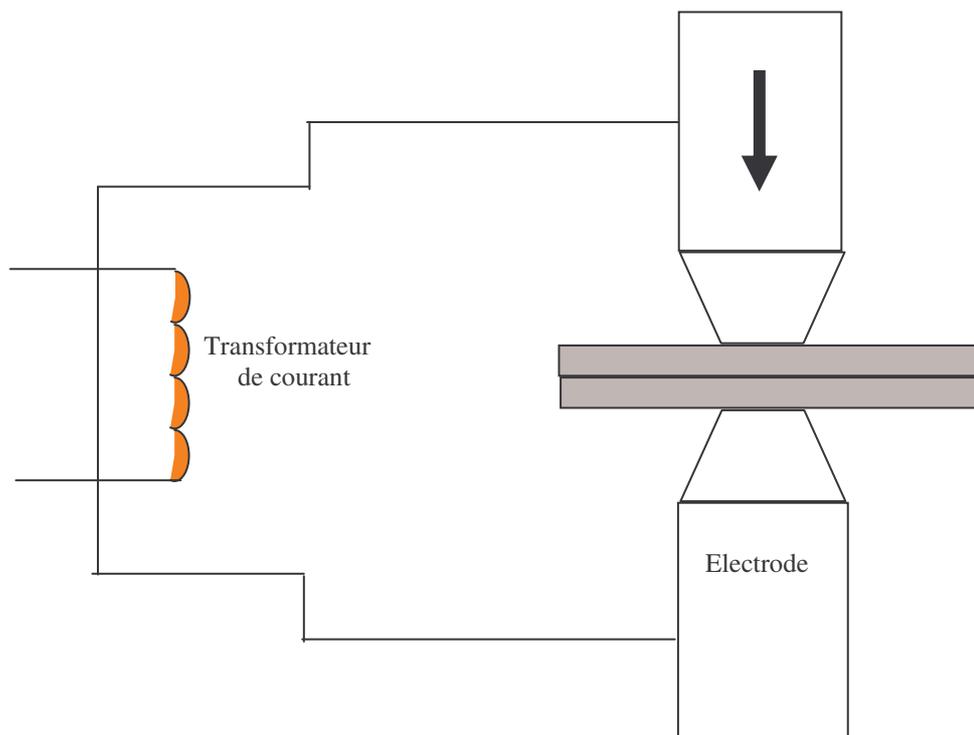


Figure 2.1 : Principe du soudage par point

2.3. Déroulement du cycle de soudage

Un cycle de soudage se décompose en quatre phases [voir Figure 2.2] :

- L'accostage : les électrodes se rapprochent serrer les tôles à souder, à l'endroit prévu et sous un effort donné. Cette phase se termine quand la valeur d'effort nominale est atteinte.
- Le soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance, et doit par effet joule, produire assez de chaleur à l'interface tôle-tôle pour qu'une zone fondue apparaisse.
- Le forgeage : effectué avec maintien de l'effort mais sans passage de courant, il permet au noyau fondu de se refroidir et de se solidifier en restant confiné.
- La remontée de l'électrode : l'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à la soudure d'un nouveau point

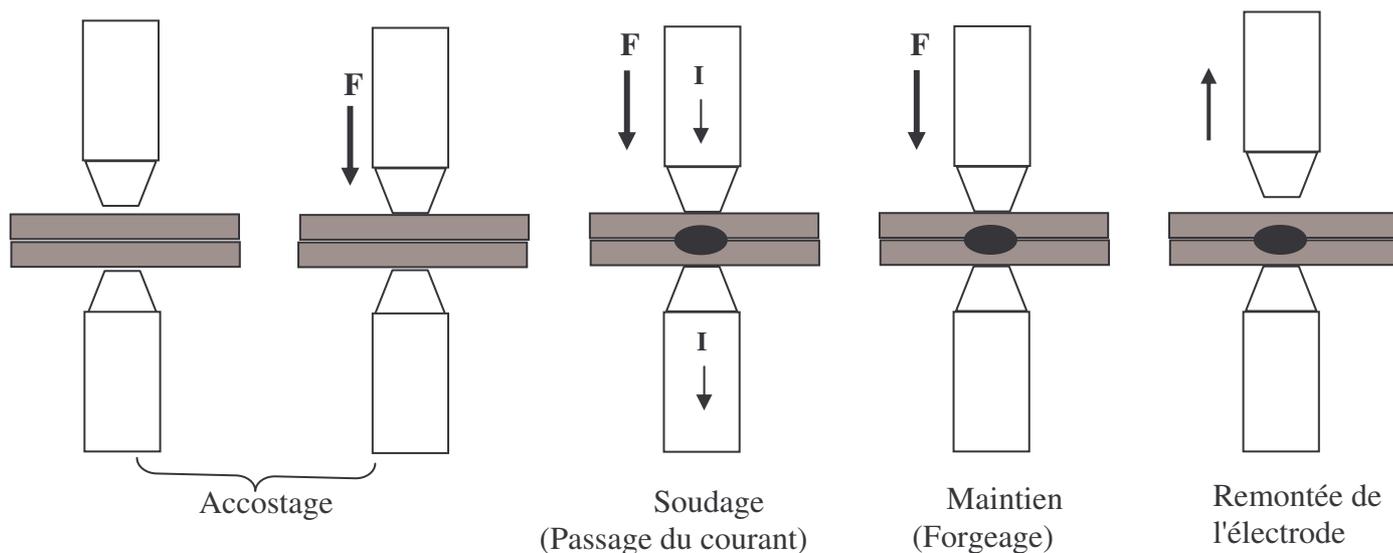


Figure 2.2 : Les différentes phases d'un cycle de soudage.

2.4. Paramètres de soudage

Les paramètres de soudage doivent être adaptés en fonction des caractéristiques des tôles à souder. Les différents paramètres de soudage sont ordonnés par ordre chronologique d'une séquence de soudage par point.

-Effort de soudage : c'est la première variable entrant en jeu car elle intervient dès la phase d'accostage. La valeur à appliquer dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. Dans la pratique, la courbe de mise en effort n'est pas linéaire, mais dépend des caractéristiques de la soudeuse.

-Courant de soudage : Il représente le paramètre déterminant dans l'opération de soudage, car il intervient au carré dans l'énergie générée par effet joule, l'intensité efficace à délivrer (typiquement entre 5 et 20KA) dépend des propriétés mécaniques, de l'épaisseur des tôles à souder ainsi que de la présence ou non de revêtement. On utilise généralement un courant alternatif monophasé à 50Hz.

-Temps de soudage : Il intervient au premier ordre dans l'énergie électrique dissipée. Ce paramètre d'une valeur typique de quelques dixièmes de seconde est donc, lui aussi, adapté aux propriétés des tôles à souder.

-Temps de forgeage : Il est nécessaire à la solidification de la soudure et généralement il est du même ordre de grandeur que le temps de soudage.

2.5. Mécanisme de formation du noyau de soudure

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle- tôle est créée par effet joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée t en fonction de l'intensité du courant de soudage et de la résistance électrique traversée est donnée par la relation suivante :

$$Q = \int_{t_0}^{t_0+t} R_g I^2 dt \quad (2-1)$$

Si on néglige les phénomènes capacitifs, l'équivalent électrique de l'assemblage de soudage par point est constitué de résistances en série Figure (2.3). Le dégagement de chaleur est donc maximal à l'endroit où la résistance est la plus élevée.

Dans la pratique, les résistances de contact sont, au début d'un cycle de soudage, plus grandes que les résistances ohmiques des tôles et des électrodes.

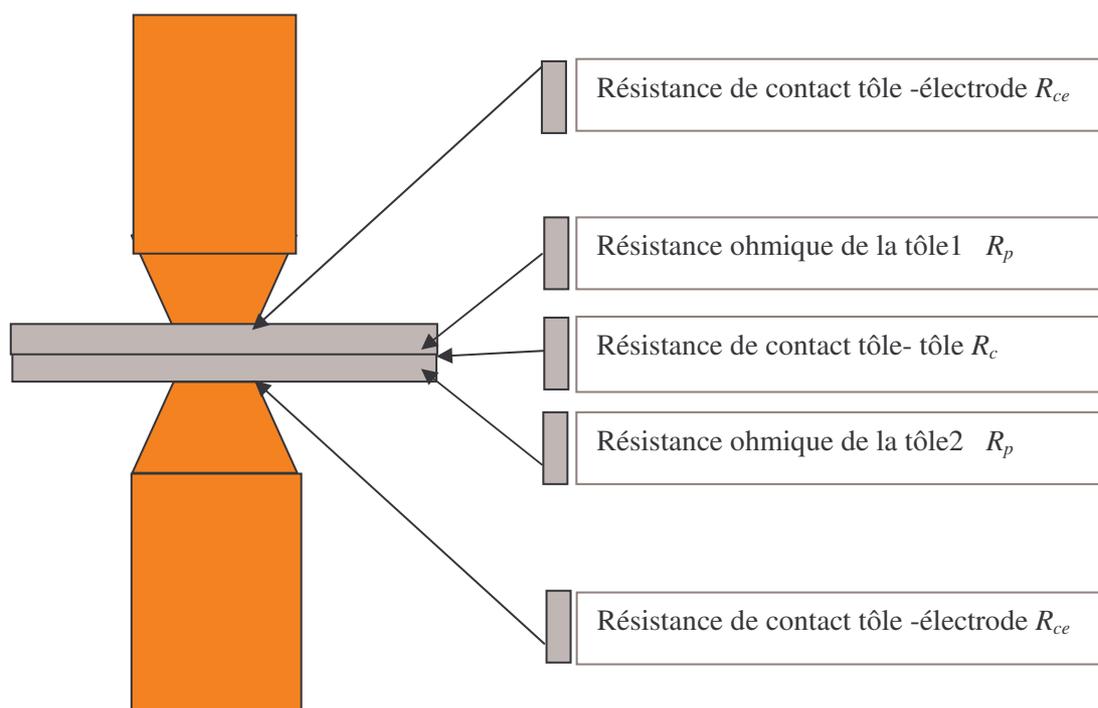


Figure 2.3 : Schéma des résistances d'un assemblage de deux tôles en soudage par point.

CHAPITRE 3

SIMULATION MATHÉMATIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU NOYAU DE SOUDURE EN SOUDAGE PAR POINT.

3.1. Introduction

Dans la plupart des procédés de soudage, l'assemblage des pièces est réalisé par fusion locale, faisant intervenir des opérations de fonderie, d'élaboration métallurgique et de traitement thermique.

En raison du caractère local de la fusion, ces opérations sont différentes d'un point à l'autre des pièces assemblées qui sont ainsi soumises à des traitements mécaniques à chaud, subissent des retraits et sont le siège de contraintes résiduelles.

La métallurgie du soudage étudie les modifications physico-chimiques des matériaux des assemblages soudés ainsi que celles de leurs propriétés mécaniques.

L'étude de ces modifications est basée, d'une part sur la connaissance des *régimes thermiques de soudage*, et d'autre part sur le comportement des matériaux soumis à ces régimes thermiques.

3.2. Eléments sur les phénomènes thermiques en soudage par point

De nombreux auteurs proposent des expressions mathématiques de la répartition thermique en régime transitoire ou stationnaire, dans le cas du soudage des tôles minces et dans ce lui du dépôt d'un cordon de soudure sur des tôles de fortes épaisseurs.

Ces expressions sont en général établies à partir de la théorie classique de résolution des équations aux dérivées partielles (*EDP*) et ne s'applique qu'à des cas particuliers.

Il est préférable d'adopter une méthode plus physique et plus générale basée sur la notion de *source ponctuelle instantanée* libérant une quantité finie de chaleur, en un temps supposé infiniment court.

La répartition thermique élémentaire utilisée dans cette méthode est celle obtenue dans un solide infini de diffusivité thermique α , sous l'action d'une source ponctuelle instantanée. Cette répartition est une solution de l'équation de la conduction de chaleur traduite par :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3-1)$$

3.3. Simulation thermique du procédé de soudage par point

L'élévation de température $T - T_0$ à l'instant t au point $P(r, \theta, z)$ due à la quantité de chaleur q libérée à l'instant initial t_0 au point $P'(r', \theta', z')$ où se trouve la source (Fig. (3-2)) est donnée par la solution élémentaire de l'équation de la chaleur (3.1) sous Les conditions aux limites de *Neuman* dont les flux thermiques à travers les frontières qui délimitent la zone de transfert sont nuls.

$$r \rightarrow +\infty \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad , \quad z = \pm e \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

On trouve ainsi l'expression suivante de la répartition du champ de température [19] :

$$T - T_0 = \frac{Q}{8(\pi \alpha t)^{3/2}} \text{EXP} \left[-\frac{r^2 + z^2 + r'^2 - 2r r' \cos(\theta - \theta')}{4\alpha t} \right] \quad (3.2)$$

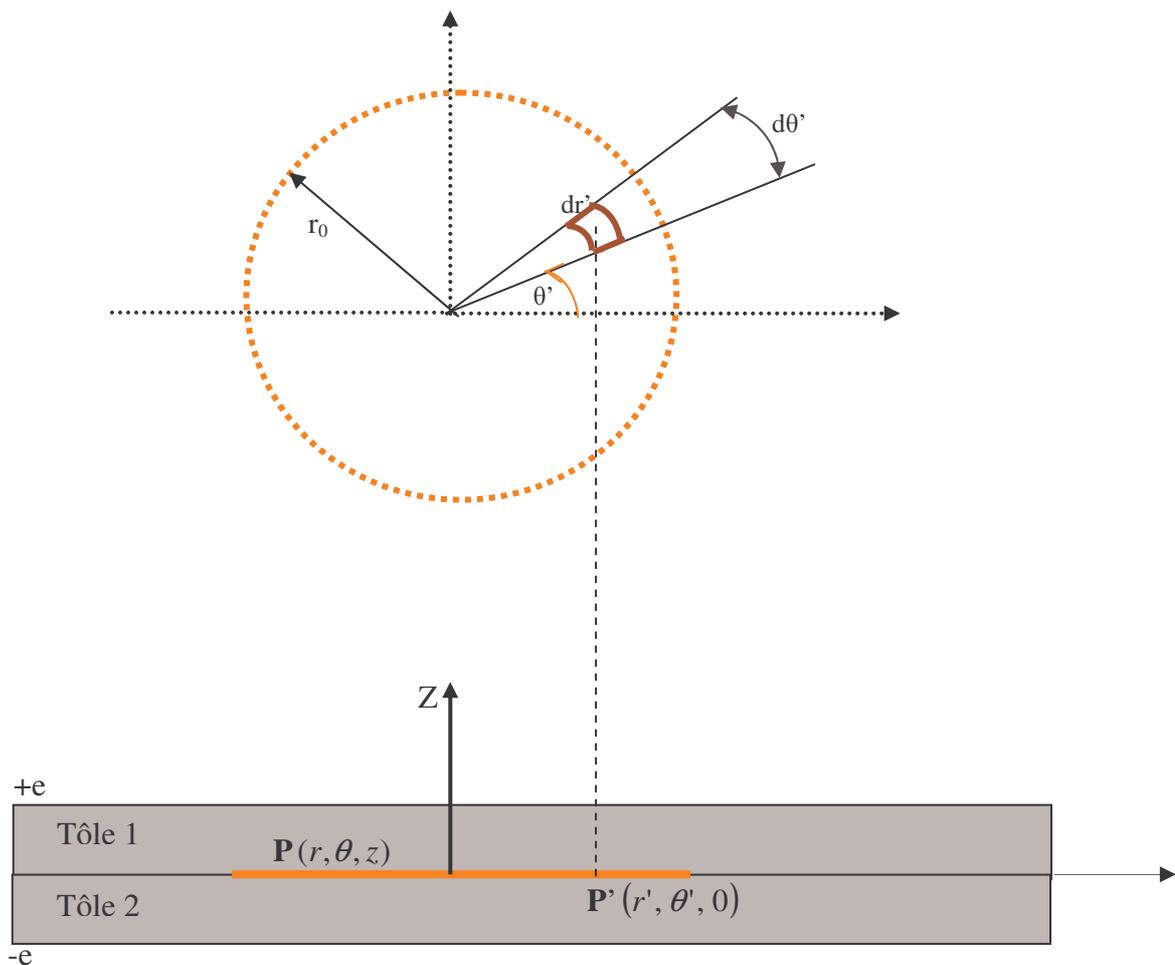


Figure 3.1 : Représentation schématique d'une source d'énergie instantanée non ponctuelle.

La quantité de chaleur générée se retrouve intégralement dans le solide infini à tout instant

$t > t_0$ est exprimée par :

$$q = \int_0^r \int_0^{2\pi} \int_{-e}^{+e} \rho c (T - T_0) r dr d\theta dz \quad (3-3)$$

Dont :

ρ : masse volumique du solide (kg/m^3)

c : la capacité calorifique ($J/kg.c^\circ$)

Si on admet que le solide est homogène et que ρc est indépendant de la température, l'expression (3-3) peut s'écrire

$$q = \rho c \int_0^r \int_0^{2\pi} \int_{-e}^{+e} (T - T_0) r dr d\theta dz = \rho c Q \quad (3-4)$$

Si, au lieu de la source ponctuelle, on envisage une surface élémentaire $r' dr' d\theta'$ du disque circulaire (Figure 3.1), libérant une quantité de chaleur $dq = Q \rho c r' d\theta' dr'$.

L'élévation de température correspondante est donnée par l'expression suivante :

$$d(T - T_0) = \frac{Q r' d\theta' dr'}{8(\pi \alpha t)^{3/2}} \text{EXP} \left[- \frac{r^2 + z^2 + r'^2 - 2r r' \cos(\theta - \theta')}{4 \alpha t} \right] \quad (3-5)$$

Pour l'ensemble du disque on trouve par intégration, la répartition thermique suivante :

$$T - T_0 = \frac{Q}{8(\pi \alpha t)^{3/2}} \int_0^{r_0} r' dr' \int_0^{2\pi} \text{EXP} \left[- \frac{r^2 + z^2 - 2r r' \cos(\theta - \theta')}{4 \alpha t} \right] d\theta' \quad (3-6)$$

cette expression (3-6) peut se mettre sous la forme (3-7) dans laquelle λ est un paramètre

d'intégration donné par $\lambda = \frac{n\pi}{2e}$ et J_0 la fonction de *bessel* de première espèce et d'ordre 0.

$$T - T_0 = \frac{Q r_0}{2(\pi \alpha t)^{1/2}} \text{EXP} \left(- \frac{z^2}{4 \alpha t} \right) \int_0^{+\infty} \text{EXP}(-\alpha t \lambda^2) J_0(\lambda r) J_0(\lambda r_0) d\lambda \quad (3-7)$$

L'expression de la quantité de chaleur $q_0 = Q_0 \rho c$ libérée par le disque est obtenue en intégrant sur sa surface (Ω) la quantité de chaleur élémentaire :

$$\int_{\Omega} dq = Q \rho c \int_0^{r_0} r' dr' \int_0^{2\pi} d\theta' \quad (3-8)$$

On en déduit

$$Q = \frac{Q_0}{\pi r_0^2} \quad (3-9)$$

En remplaçant Q par sa valeur dans (3-8) on trouve :

$$T - T_0 = \frac{Q_0}{2 \pi r_0 (\pi \alpha t)^{1/2}} \text{EXP} \left[\frac{-z^2}{4 \alpha t} \right] \int_0^{+\infty} \text{EXP}[-\alpha t \lambda^2] J_0(\lambda r) J_0(\lambda r_0) d\lambda \quad (3-11)$$

Suivant l'axe Z c'est à dire pour $r=0$

Cette répartition thermique dans le cas du soudage par point a pour expression :

$$T - T_0 = \frac{Q_0}{2 \pi r_0^2 (\pi \alpha t)^{1/2}} \text{EXP} \left[\frac{-z^2}{4 \alpha t} \right] \left(1 - \text{EXP} \left(-\frac{r_0^2}{4 \alpha t} \right) \right) \quad (3-10)$$

La source peut être considérée comme instantanée étant donné la faible durée de passage du courant, les deux pièces à assembler peuvent être assimilées au solide semi infini étant donnée l'importance de leurs dimensions par rapport a la zone d'échauffement.

Cette source de chaleur nécessaire au soudage se ramène pratiquement à un disque circulaire situé dans le plan de contact entre ces tôles, ce disque s'échauffe sous l'effet du passage du courant entre les électrodes dont la section est supposée circulaire. La quantité de chaleur Q_0 libérée par effet joule est donnée par:

$$Q_0 = R_g I^2 \Delta t \quad (3-11)$$

Dont :

R_g : La résistance électrique globale

I : Intensité du courant de soudage.

Δt : Temps de soudage.

3.3.1. Evaluation de la résistance électrique globale R_g

La résistance électrique globale est la somme des résistances de contact *électrode/tôle*, *tôle/tôle* et la résistance électrique propre des deux tôles à souder (voir Figure 2.3).

$$R_g = R_c + 2R_{ce} + 2R_p \quad (3-12)$$

dont :

R_{ce} : la résistance électrique de contact électrode - tôle

R_p : la résistance électrique propre du matériau

R_c : la résistance de contact tôle- tôle

La résistance de contact R_c est difficile à évaluer, car elle est affectée par plusieurs paramètres qui interviennent dans le procédé de soudage par point, sa valeur varie en fonction du temps au cours d'une séquence de soudage.

Dans cette étude on s'est basé sur une approche thermique permettant d'évaluer la résistance de contact R_c . Cette approche est présentée sous forme d'un bilan thermique qui tient compte des différents flux thermiques mis en jeu lors d'une séquence de soudage par point.

Les résultats obtenus à travers cette approche sont comparés à ceux déterminés dans la référence [15] pour les aciers doux.

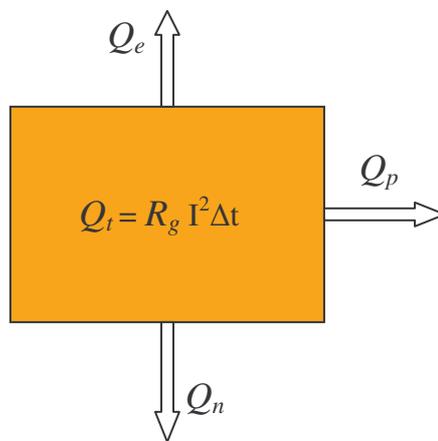


Figure 3.2 : Bilan thermique au niveau du noyau de soudure.

Le bilan thermique appliqué dans un volume de contrôle Δv qui délimite les frontières de la zone de soudure est donné par :

$$Q_t = Q_e + Q_p + Q_n \quad (3-13)$$

Dont :

Q_e : Quantité de chaleur dissipée à travers la surface de contact électrode/tôle

Q_p : Quantité de chaleur dissipée dans le métal de base qui entoure la zone de soudure.

Q_n : Quantité de chaleur mise en jeu dans la transformation du noyau (chaleur sensible + chaleur latente de fusion).

Q_t : La quantité de chaleur générée par effet joule.

Q_t et Q_n sont exprimées respectivement par les relations suivantes :

$$Q_t = R_g I^2 \Delta t \quad (3-14)$$

$$Q_n = \rho c \Delta T \Delta V_n + H \Delta V_n \quad (3-15)$$

Dont :

ΔT : L'écart entre la température de fusion et la température initiale.

H : Chaleur latente de fusion par unité de volume.

ΔV_n : Volume du noyau fondu.

Si on néglige la résistance de contact électrode/pièce R_{ce} ainsi que la résistance propre du métal de base R_p , et remplaçant Q_n , Q_t et R_g par leurs valeurs dans (3-15), on obtient :

$$R_c I^2 \Delta t = \rho c \Delta T \Delta V_n + H \Delta V_n \quad (3-16)$$

On peut déduire R_c :

$$R_c = \frac{\Delta V_n (\rho c \Delta T + H)}{I^2 \Delta t} \quad (3-17)$$

Plusieurs études ont quantifié la résistance électrique de contact. VOGLER [15] a mis au point un modèle de calcul de la résistance de contact basé sur l'étude théorique présentée par GREENWOOD [4]. Les résultats présentés dans [15] stipulent des intervalles de variation des résistances de contact pour différents types d'acier. La résistance électrique de contact dans le cas de soudage par point des aciers doux varie de $0.2\mu\Omega$ à $28\mu\Omega$, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus à travers l'approche analytique proposée pour la détermination de la résistance de contact.

3.3.2. Evaluation du volume de noyau fondu ΔV_n

Les sections longitudinales de l'ensemble des noyaux fondus présentés dans le chapitre (4) présentent une forme quasi elliptique.

Une approche analytique a été adoptée afin d'évaluer le volume des noyaux en supposant que le noyau prend une forme d'ellipsoïde Figure (3.4).

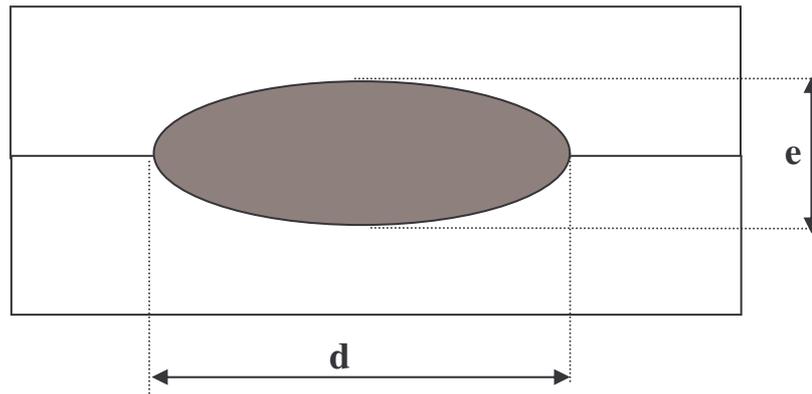


Figure 3.3 : Représentation schématique d'un noyau de soudure.

$$\Delta V_n = \frac{4}{3} \pi a^2 b \quad (3-19)$$

$$\text{Dont : } a = \frac{e}{2} \quad \text{et} \quad b = \frac{d}{2}$$

3.4. Détermination du champ de température dans la zone de soudure

La distribution du champs de température suivant l'axe Z dans la zone de soudure est obtenue en utilisant la relation (3-12) adaptée au procédé de soudage par point.

Les résultats sont obtenus pour les différents points de soudure réalisés expérimentalement sous différents paramètres de soudage. Ces résultats sont le support de données de l'ensemble des graphes tracés (isothermes le long de z, cycles thermiques).

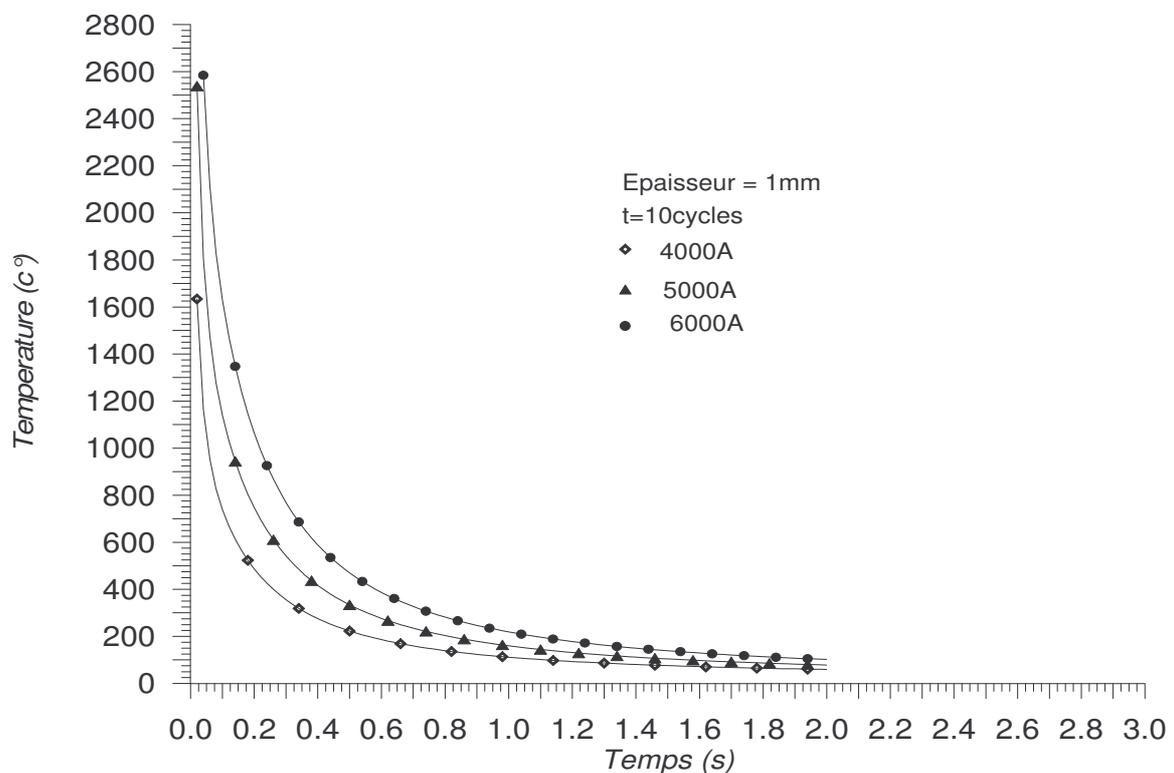


Figure 3.4 : Cycle thermique au centre du noyau de soudure réalisé sous différentes intensités- temps de soudage de 10cycles.

3.5. Détermination de l'épaisseur théorique du noyau fondu

Le modèle analytique développé offre la possibilité de déterminer l'épaisseur d'un point de soudure réalisé sous des paramètres de soudage donnés. Cette épaisseur est calculée après la représentation de la distribution du champ de température le long de l'épaisseur de la tôle à souder [voir Figure. (3-6), (A-9)... (A-23)]. L'intersection de l'isotherme qui correspond à la température de fusion du métal avec l'axe Z délimite l'épaisseur théorique recherchée.

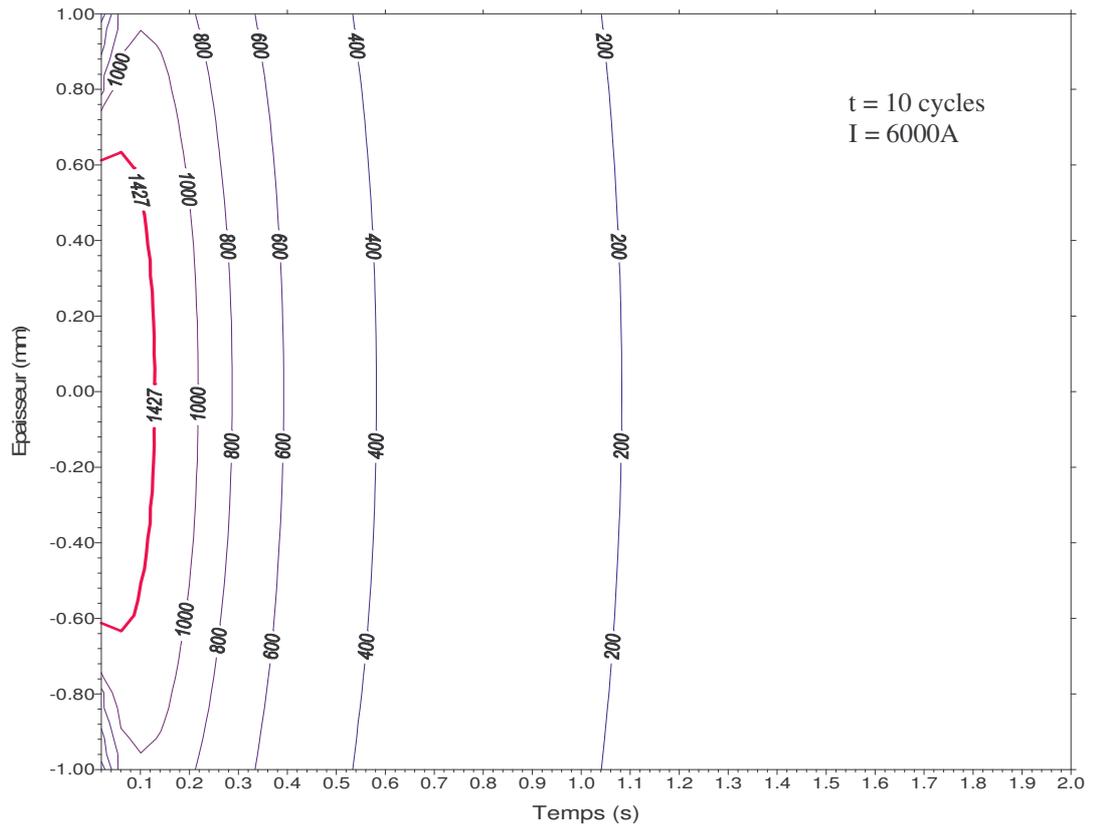


Figure3.6 : Distribution du champ de température le long de l'épaisseur des deux tôles –épaisseur=1mm

CHAPITRE 4

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EVOLUTION DU NOYAU DE SOUDURE.

4.1. Introduction

Cette étude expérimentale d'une séquence de soudage par point d'un acier inoxydable (304L), à été abordée dans un souci orienté essentiellement afin de visualiser le phénomène de formation d'un point de soudure au cours d'une séquence de soudage, sous les paramètres de soudage prédéfinis, ainsi que l'influence de ces derniers sur la taille du noyau fondu formé lors du soudage de tôles de même épaisseur ou de différentes épaisseurs.

Les résultats présentés dans cette étude offrent la possibilité de bien assimiler l'impact des différents paramètres qui interviennent dans une séquence de soudage, à savoir (courant de soudage, temps de soudage, effort exercé par l'électrode, diamètre d'électrode, épaisseur de la tôle).

Ces résultats feront l'objet d'une comparaison avec les résultats qui seront fournis par le modèle analytique en tenant compte des mêmes paramètres de soudage.

4.2. Données expérimentales

4.2-1. Choix du matériau

Le choix d'un acier inoxydable est basé sur une série de critères dont certains sont en relation directe avec son excellente résistance à la corrosion. Cette propriété donne au matériau inoxydable une durée de vie quasi exceptionnelle dans la très grande majorité de milieux et donc des applications.

A cette propriété fondamentale, on doit ajouter les caractéristiques mécaniques (résistance mécanique, ductilité, ténacité) qui couvrent une très grande plage de températures, allant des températures cryogéniques jusqu'à celles dépassant 1000 C° . Cette famille de propriétés fait notamment de l'acier inoxydable un matériau de structure dont le rapport élevé entre le module de *Young* et la masse volumique permet à lui seul d'excellentes performances en termes d'allègement.

4.2.2. Propriétés de l'acier inoxydable 304L

L'acier inoxydable 304L est constitué des éléments chimiques donnés dans le tableau ci dessus :

C	Cr	Ni	Mn	Si	S	P
0.08	18 - 20	8 -12	2.0	1.0	0.03	0.04

-Propriétés thermo physiques :

- chaleur latente de fusion = 265.2 (KJ/kg)
- température de fusion = 1427(C°)
- masse volumique = 7816 (kg/m³)
- conductivité thermique = 17 (W/m.C°)
- capacité calorifique = 460 (J/kg.C°)
- résistivité électrique = 70 (μ Ohm.cm)

4.2.3. Paramètres de soudage

Le choix des valeurs de différents paramètres de soudage est fait sur les bases de données expérimentales des travaux énumérés dans les références [11] et [16], et qui examinent la formation du noyau fondu sous différents paramètres de soudage.

4.2.3.1. Diamètre de l'électrode

Les deux électrodes en cuivre pur Figure (4.1) avec lesquelles on a effectué les opérations de soudage par point ont été confectionnées au niveau de l'atelier d'usinage de l'université de blida. Ces deux électrodes ont un diamètre de contact de 6 mm.



Figure 4.1: Electrodes en cuivre pur.

4.2.3.2. Effort exercé par l'électrode (effort de soudage)

L'effort appliqué par l'électrode est maintenu constant à une valeur de $2,5(KN)$ équivalente à une pression de contact de $(884 bars)$.

4.2.3.3. Intensité du courant

La marge de variation de ce paramètre électrique est définie par les deux limites suivantes:

- **Limite inférieure:**

Correspondant au début de la formation du noyau, au dessous de laquelle on est dans la zone d'incubation.

- **Limite supérieure:**

Au dessus de laquelle apparaît le phénomène d'expulsion. En se basant sur les travaux présentés dans les références [11],[13] la marge à été fixée de 6000 à 9000A ; au cours des essais une correction à été apportée a cette marge en diminuant le courant jusqu'à 4000 A.

4.2.3.4. Temps de soudage

Ce paramètre traduit le temps réel de passage du courant électrique traversant les deux tôles à souder. Le choix de la valeur du temps de soudage est liée à la nature du procédé de soudage par point qui est caractérisé par une rapidité dans son exécution.

Le temps de soudage choisi varie de 5 à 15 cycles.

4.3. Travaux effectués

4.3.1. Soudage

Après le nettoyage et la mise en cote des tôles à souder, on procède au soudage par le biais d'une soudeuse par point [Figure (4-2)] disponible au niveau de l'atelier d'usinage. Chaque point de soudure est réalisé sous le contrôle des paramètres de soudage correspondants.



Figure 4.2 : Soudeuse par point.

4.3.2. Découpage de l'échantillon pour traitement

L'opération est effectuée à l'aide d'une micro-tronçonneuse (*Buelher*) Figure 4.3 disponible au niveau du centre de soudage et de contrôle (C.S.C / Cheraga.). La qualité de cette opération est conditionnée par la surface de coupe qui doit passer par l'axe géométrique du point de soudure à découper. (Symétrie géométrique).



Figure 4.3 : Micro-tronçonneuse.

4.3.3. Enrobage

L'enrobage des échantillons découpés est réalisé sous une pression de 20 KN et une température de 180°C à l'aide d'une machine à enrober Fig.(4-4) de marque (*struers. Labo press*).



Figure 4.4 : Machine à enrober.

4.3.4. Polissage

Le polissage des échantillons enrobés est effectué à l'aide d'une polisseuse mécanique ; cette opération consiste à affiner la face de coupe des échantillons progressivement en passant d'un polissage grossier à un polissage moyen.

4.3.5. Attaque chimique

Cette opération a pour but de rendre possible la distinction de la zone soudée du métal de base. La solution chimique est composée de volumes suivants:

- 1 volume de HNO_3 .
- 2 volumes de HCL .
- 2 volumes de glycérine.

4.3.6. Prise des dimensions

Après l'attaque chimique de l'ensemble des échantillons, une prise de leurs dimensions (diamètre, épaisseur) est effectuée à l'aide d'un microscope optique Figure (4-5) de marque (ZEISS) doté d'une caméra numérique de type (AXIO-CAM) reliée à un micro-ordinateur.

Les dimensions sont relevées sous un agrandissement de (X50) afin de limiter au maximum l'erreur de lecture.



Figure 4.5 : Mécanisme de visualisation (Microscope+Micro-ordinateur).

Les résultats obtenus représentent la base de données de différents graphes présentés dans cette étude qui traduisent la variation de la taille ainsi que le volume du noyau fondu en fonction de l'intensité et du temps de soudage.

Les photos présentées dans le chapitre (5) ont été prises directement par la caméra sous un agrandissement de (X12.5).

CHAPITRE 5

PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

5.1. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux présentés dans ce travail sont interprétés en fonction des différents paramètres qui interviennent dans la réalisation d'un point de soudure lors d'une séquence de soudage par point.

Ces paramètres sont, le temps de soudage qui varie de 5 cycles à 15 cycles, l'intensité du courant de soudage variant dans une fourchette allant de 4000A à 9000A, ainsi que l'épaisseur des tôles à souder 1mm et 1.5mm et ce Contrairement à l'effort de soudage (2.5 kN) et au diamètre d'électrode qui sont maintenus constant durant tout le processus d'expérimentation.

5.1.1. Influence de l'intensité du courant sur la taille du noyau de soudure

Les micrographes présentés dans les figures (5-1)..(5-4) ainsi que ceux en annexe (A-1)....(A-8)) sous un agrandissement de (X12.5) ,montrent que l'évolution du noyau de soudure est caractérisé par un passage de quatre zones ; ces dernières sont définies comme suit :

Zone1 - incubation ($I < 4000A$) : C'est une zone dans laquelle aucune apparition du noyau de soudure n'est observée. La quantité de chaleur générée par effet joule dans cette zone sert à l'échauffement de l'interface tôle- tôle sans pouvoir provoquer la fusion du métal.

Zone2- Développement rapide (4000A à 6000A) : Cette zone est caractérisée par une croissance rapide du noyau de soudure. La taille du noyau atteint une valeur maximale dans la majorité des cas dans cette zone, ce maximum est traduit par un volume maximal atteint.

Zone3- Développement ralenti (6000A à 9000A) : On constate que dans cette zone le développement du noyau est relativement ralenti caractérisé par une décroissance de son volume, cette décroissance est due essentiellement à la diminution sensible de son épaisseur malgré l'augmentation de son diamètre [voir Figure (5-2-A) et (5-2-B)].

Zone4- Expulsion ($I > 9000A$) : Cette phase est caractérisée par l'expulsion du métal fondu vers la face extérieure de la tôle (expulsion externe), ou bien dans l'interface tôle-tôle (expulsion interne). Il est remarqué que le noyau de soudure dans cette zone prend une forme aléatoire.

Il est à noter que les quatre zones qui caractérisent l'évolution du noyau de soudure en fonction de l'intensité du courant sont présentes dans le soudage des deux différentes épaisseurs 1.5mm et 1mm sous différentes étendues pour chacune des zones.

Tableau 5.1 : Volumes maximaux d'un noyau de soudure réalisé lors du soudage de tôles d'épaisseur =**1mm**.

	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4
5 cycles	< 4000 A	[4000-6000]	]6000-9000]	>9000 A
Volume max. (mm^3)	-----	4.44 (6000A)	-----	-----
10 cycles	< 4000 A	[4000-6000]	]6000-9000]	>9000 A
Volume max. (mm^3)	-----	4.48 (6000A)	-----	-----
15 cycles	< 4000 A	[4000-6000]	]6000-9000]	>9000 A
Volume max. (mm^3)	-----	3.3 (5000A)	-----	-----

Le volume maximal atteint dans le soudage de tôle d'épaisseur de 1mm est de 4.48mm^3 obtenu sous les paramètres de soudage tels que définis dans le tableau (5-1) { $I=6000\text{A}$, temps de soudage= 10cycles },

Dans le soudage des tôles d'épaisseur de 1.5mm le volume maximal atteint est de 11.92mm^3 réalisé sous les paramètres de soudage donnés au tableau (5-2) ,{ $I=6000\text{A}$, temps de soudage= 10cycles }.

Tableau 5.2 : Volumes maximaux d'un noyau de soudure réalisé lors du soudage de tôles d'épaisseur =**1.5mm**.

	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4
5 cycles	< 4000 A	[5000-8000]	] 8000-9000]	>>9000 A
Volume max. (mm^3)	-----	10.1 (8000A)	-----	-----
10 cycles	< 4000 A	[4000-6000]	] 6000-9000]	>>9000 A
Volume max. (mm^3)	-----	11.92 (6000A)	-----	-----
15 cycles	< 4000 A	[4000-6000]	] 6000-9000]	>>9000 A
Volume max. (mm^3)	-----	9.6 (6000A)	-----	-----

5.1.2. Influence du temps de soudage sur l'évolution du noyau de soudure

A travers les résultats expérimentaux illustrés dans les Fig.(5-5),(5-6) , on remarque que l'évolution du noyau de soudure varie en fonction du temps de soudage différemment dans deux zones distinctes . Ces zones sont définies pour chacune des épaisseurs de tôles comme suit :

[5cycles à 10cycles]: Dans cette intervalle de temps et pour une intensité du courant variant de 4000A à 9000A la taille du noyau de soudure croît avec l'augmentation du temps de soudage, le volume maximal étant atteint dans cet intervalle. Pour une épaisseur de tôle de **1mm** Fig. (5-5-B), le volume du noyau passe d'une valeur de 0.88mm³ à 1.01mm³ sous une intensité de 4000A, de même pour les intensités de 5000A et 6000A le volume passe respectivement de 2.74 mm³ à 3.24 mm³ et de 4.44 à 4.48 mm³,de 6000A à 9000A Fig.(5-5-C) la croissance du noyau en fonction du temps de soudage diminue. Pour une épaisseur de tôle de **1.5mm** Fig. (5-6-B), le volume passe de 0.38 à 5.08 mm³ sous une intensité de 4000A et de 0.35 à 6.75 mm³ sous une intensité du courant de 5000A, Le volume maximal du noyau de soudure est obtenu sous une intensité de 6000A, cette valeur maximale étant de 11.92 mm³. De même pour les intensités allant de 6000A à 9000A une légère croissance du noyau de soudure est constatée.

Dans le même intervalle de temps la taille du noyau de soudure décroît avec l'augmentation du temps de soudage sous des intensités de courant allant de 6000A à 9000A. Pour une épaisseur de tôle de 1mm [Fig. (5-5-C)], on remarque que le volume passe d'une valeur de 3.35 à 1.6mm³ sous une intensité de 7000A.

[10cycles à 15cycles] : Cette fourchette de temps est caractérisée par une croissance dans la taille du noyau de soudure seulement sous les intensités du courant allant de 4000A à 5000A Fig. (5-5-B), (5-6-B) pour les deux différentes épaisseurs de tôle **1mm** et **1.5mm**.

Dans la plage des intensités allant de 6000A à 9000A, les Figures (5.5.C), (5.6.C) montrent la décroissance de la taille du noyau de soudure en fonction du temps de soudage.

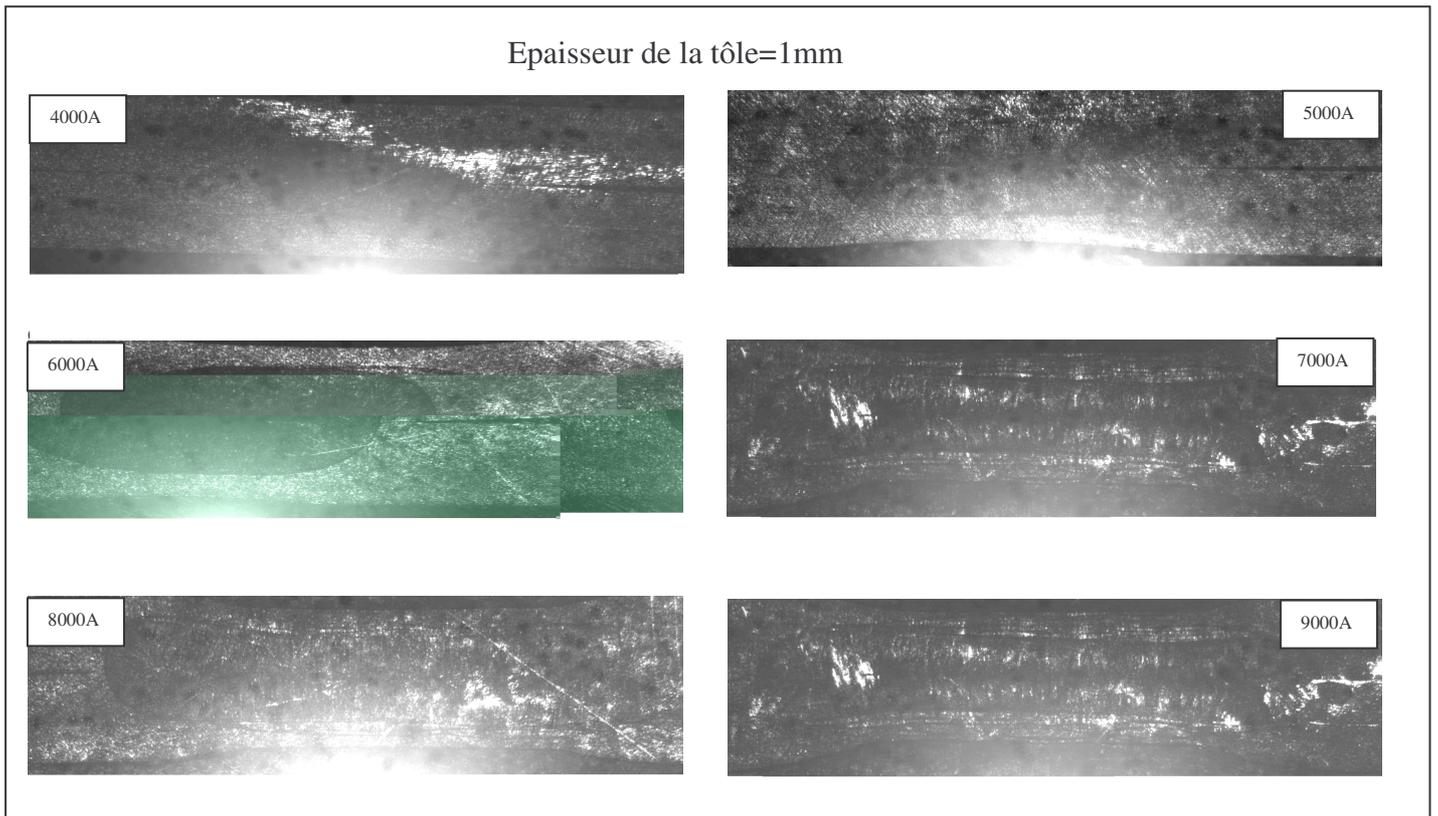


Figure 5.1: Evolution du noyau fondu en fonction de l'intensité du courant pour un temps de soudage=5cycles

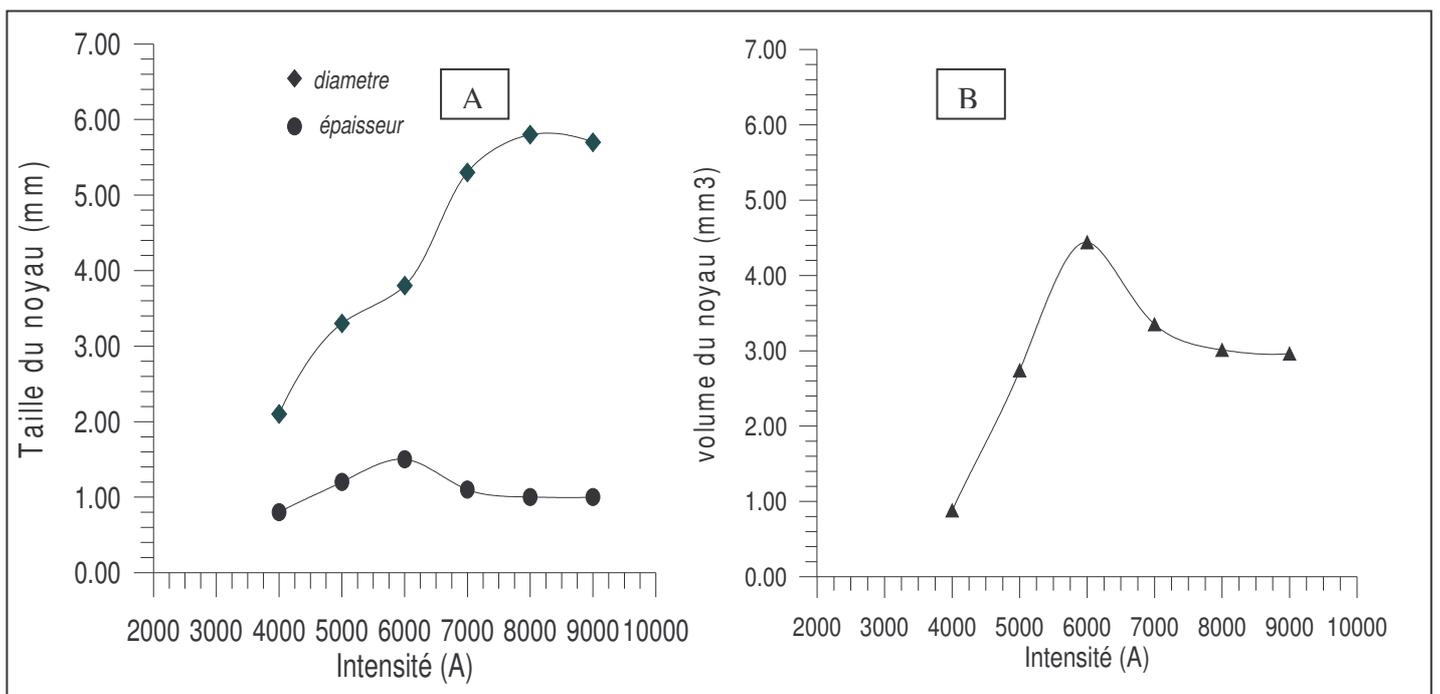


Figure 5.2 : A- Variation de la taille du noyau en fonction de l'intensité.
B- Variation du volume du noyau en fonction de l'intensité.

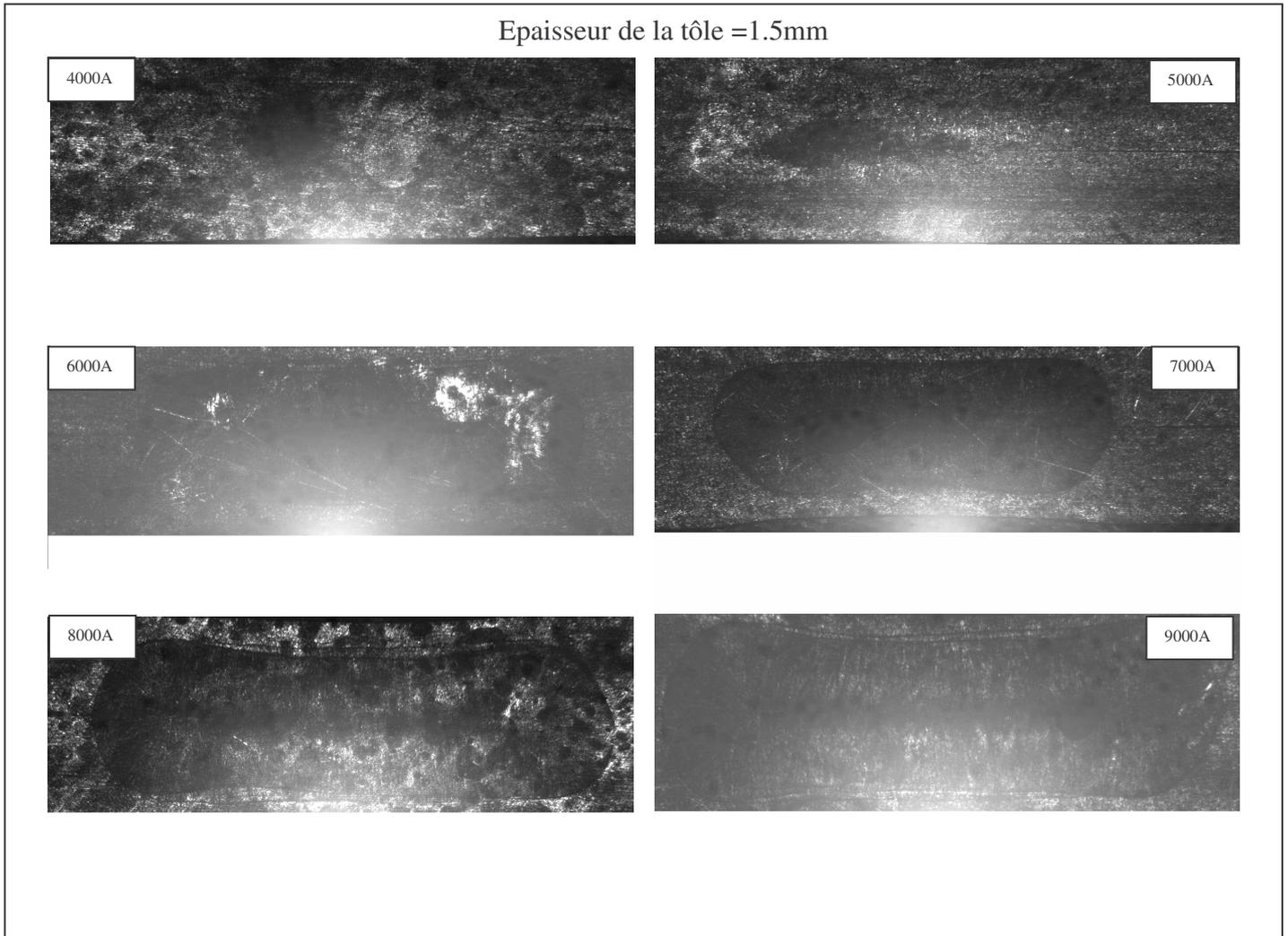


Figure 5.3 : Evolution du noyau fondu en fonction de l'intensité du courant pour un temps de soudage=5cycles

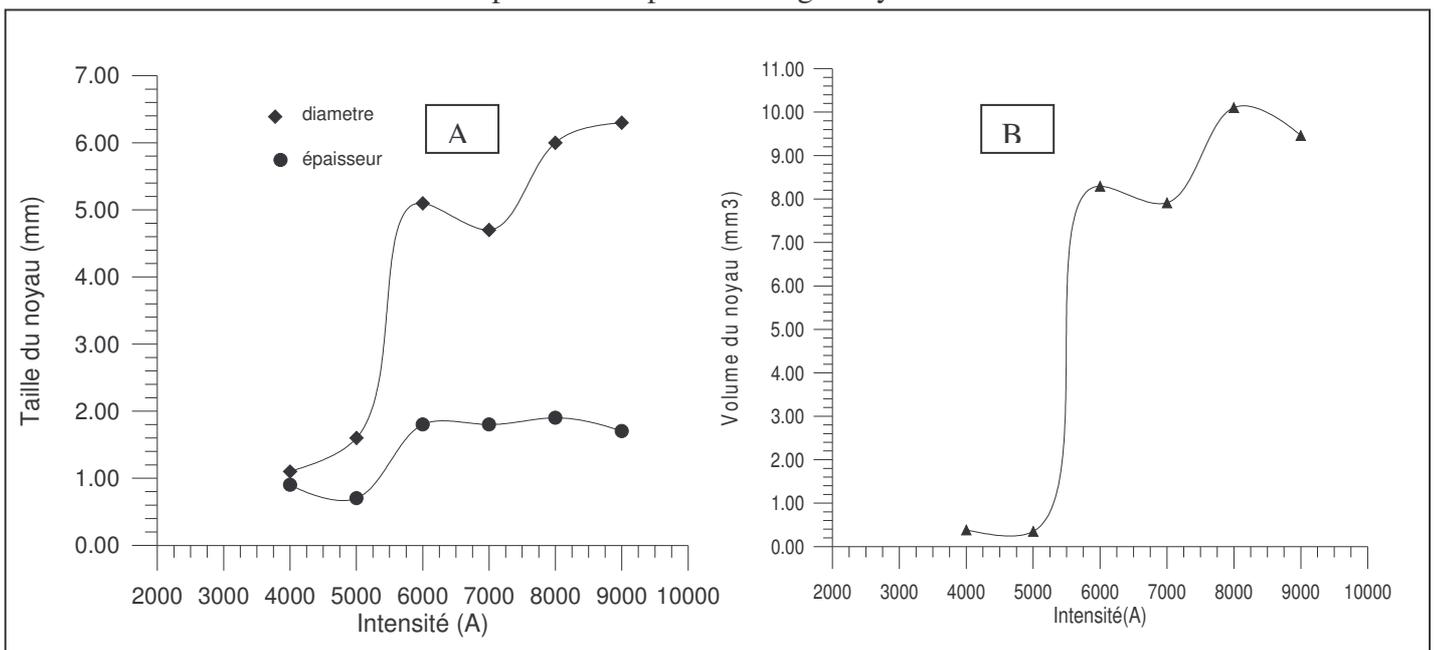


Figure 5.4 : A-Variation de la taille du noyau en fonction de l'intensité.
B-Variation du volume du noyau en fonction de l'intensité.

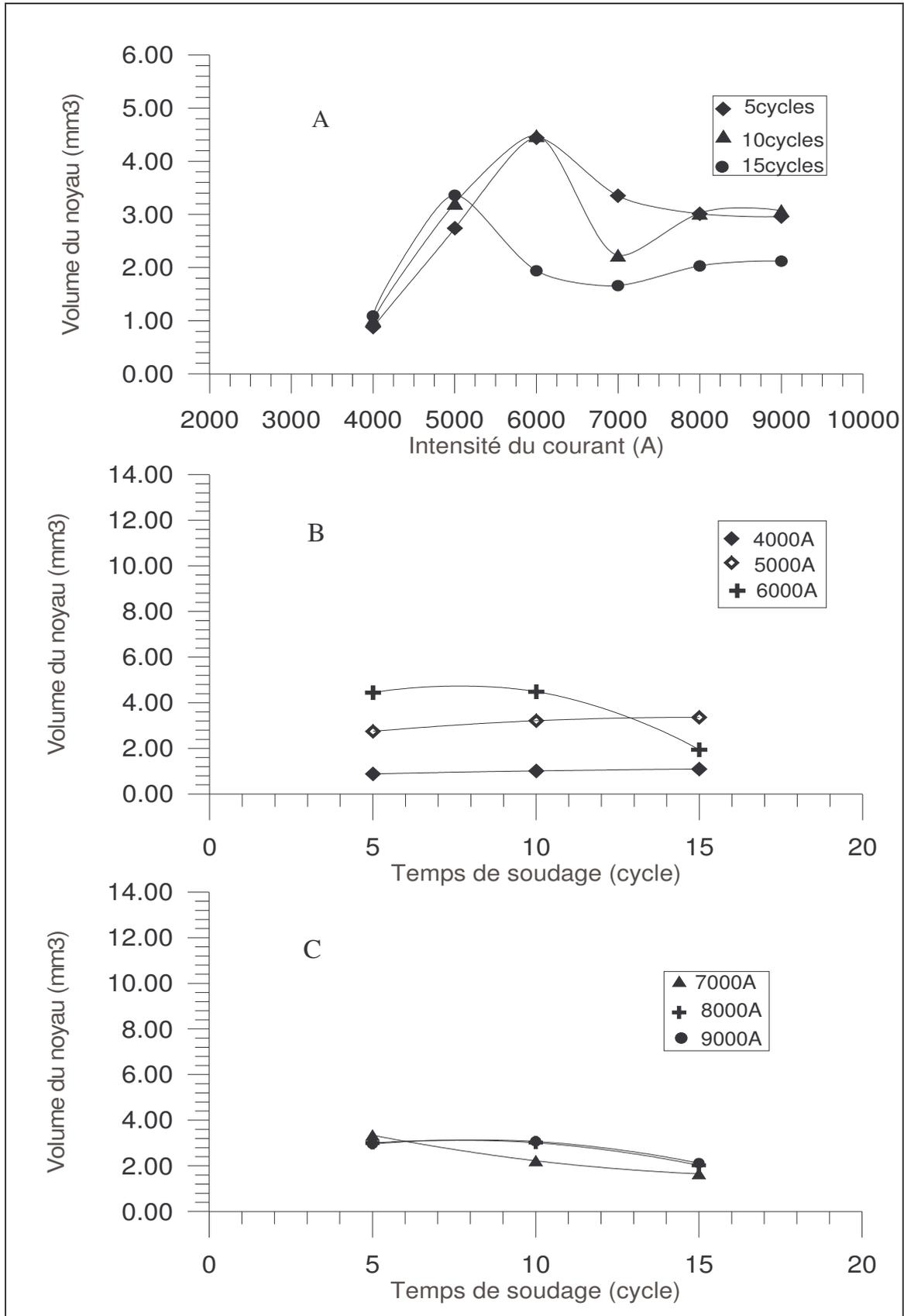


Figure 5.5 : A- Variation de volume du noyau en fonction de l'intensité pour les différent temps de soudage.
 B- Variation de volume en fonction du temps de soudage (4000-6000A)
 C- Variation de volume en fonction du temps de soudage (7000-9000A)

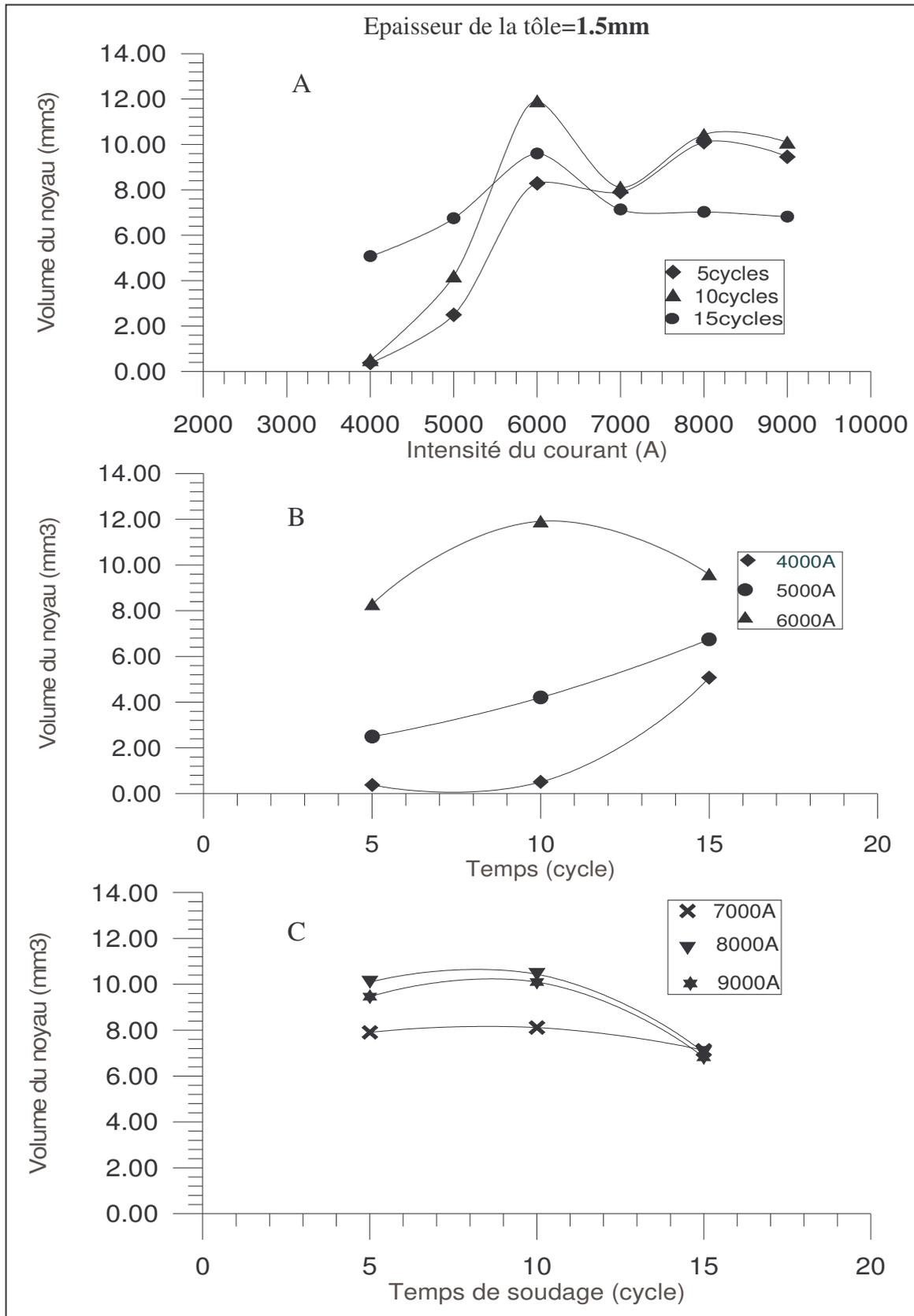


Figure 5.6 : A- Variation de volume du noyau en fonction de l'intensité pour les différents temps de soudage.

B- Variation de volume en fonction du temps de soudage (4000-6000A)

C- Variation de volume en fonction du temps de soudage (7000-9000A)

5.2. Résistance de contact R_c

Les résultats obtenus à travers l'approche analytique utilisée dans l'évaluation de la résistance de contact montrent que :

La valeur de la résistance de contact diminue rapidement avec l'augmentation du temps de soudage, cette remarque est constatée pour les différentes intensités du courant de soudage ainsi que pour les deux différentes épaisseurs de tôle à souder Fig. (5-7), (5-8).

Pour une épaisseur de tôle de **1.5mm**, la résistance de contact atteint son maximum de $16.80 (\mu\Omega)$ à 5cycles sous une intensité de $6000A$ [voir Fig.(5-7)], puis elle chute jusqu'à une valeur de $6.31(\mu\Omega)$ à 15cycles, cette chute représentant 62.44% de la valeur max.

La valeur maximale atteinte dans le soudage des tôles de **1mm** est de $8.7 (\mu\Omega)$ à 5cycles sous une intensité du courant de $6000A$; cette résistance diminue jusqu'à une valeur de $1.27 (\mu\Omega)$ enregistrée à 15cycles sous la même intensité du courant. Cette chute représente 85.40% de la valeur max.

On peut expliquer cette diminution rapide, par l'augmentation de la surface de contact à l'interface tôle-tôle avec le temps de soudage engendrée par la fusion des points de contact (points de constriction) entre les deux tôles à souder.

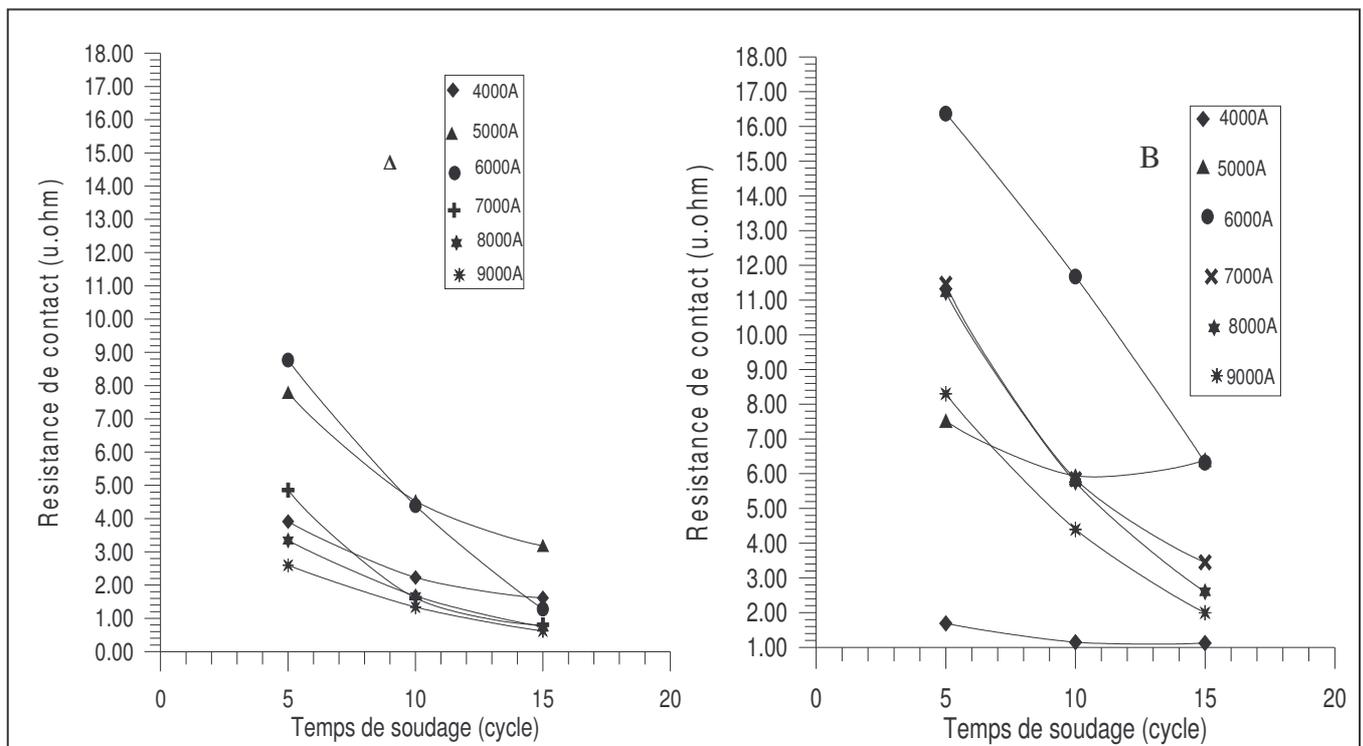


Figure 5.7 : Variation de la résistance de contact en fonction du temps de soudage

A : Epaisseur de la tôle = 1mm

B : Epaisseur de la tôle = 1.5mm

5.3. Résultats du modèle analytique

L'application du modèle analytique développé dans le chapitre (3), pour les mêmes paramètres de soudage utilisés dans la partie expérimentale (temps de soudage, intensité du courant, diamètre de l'électrode) a fourni les résultats représentés sur les Figure. (5-8)....., (5-13). Ces résultats font l'objet d'une comparaison avec les résultats expérimentaux.

Pour les deux épaisseurs de tôle **1mm** et **1.5mm** on a relevé les remarques suivantes:

5.3.1. Epaisseur de tôle = 1mm

Temps de soudage=5cycles: les résultats représentés sur la Figure. (5-8) montrent que le modèle analytique prévoit une intensité de courant qui correspond au début de formation du noyau de soudure inférieure à 5000A au dessous de laquelle aucune formation n'est possible. La zone de développement rapide est comprise entre 4000 et 8000A, cette zone est caractérisée par une augmentation de l'épaisseur théorique contrairement à l'épaisseur expérimentale qui cesse d'augmenter à 6000A. Aucune expulsion de métal n'est apparue.

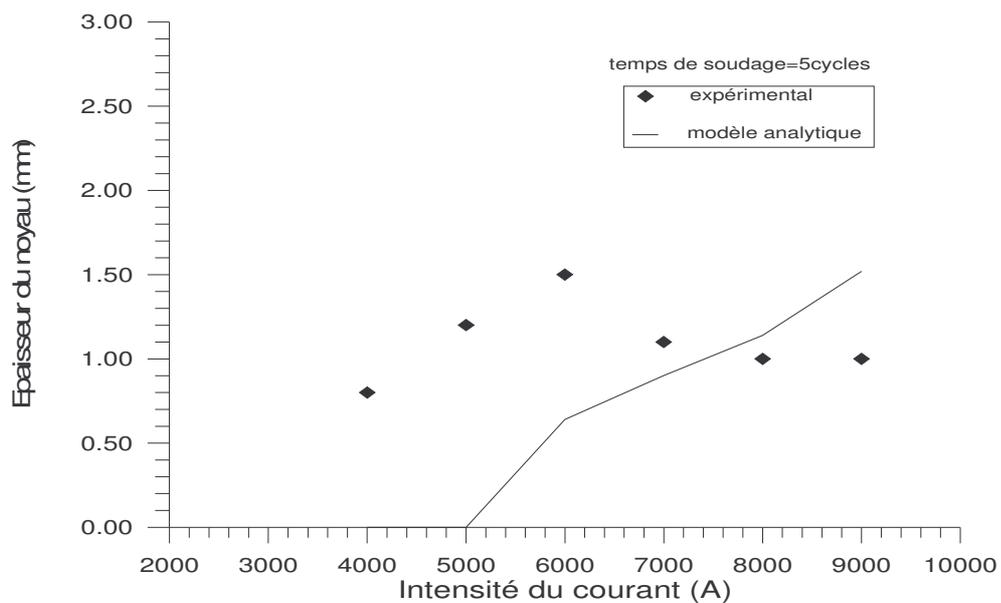


Figure 5.8 : Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1mm.

Temps de soudage=10cycles: La zone d'incubation se trouve dans une marge d'intensité inférieure à 3000A, de 3000 à 6000A les épaisseurs théoriques augmentent selon la même allure que les épaisseurs expérimentales avec une différence de taille de 18% Fig. (5-10).

On constate qu'à $I=6000A$, l'épaisseur expérimentale devient égale à celle calculée. Cette épaisseur correspond au volume maximal calculé expérimentalement.

De 6000A à 8000A l'épaisseur théorique continue à augmenter, contrairement à celle expérimentale. Ceci est dû à la croissance radiale du noyau de soudure qui n'est pas

conditionnée dans le modèle analytique contrairement à ce qui est constaté expérimentalement où la croissance radiale dans cette plage d'intensité devient saturée et compensée par une croissance longitudinale [voir Fig. (5-3-A)]. L'expulsion de métal est apparue à 8000A.

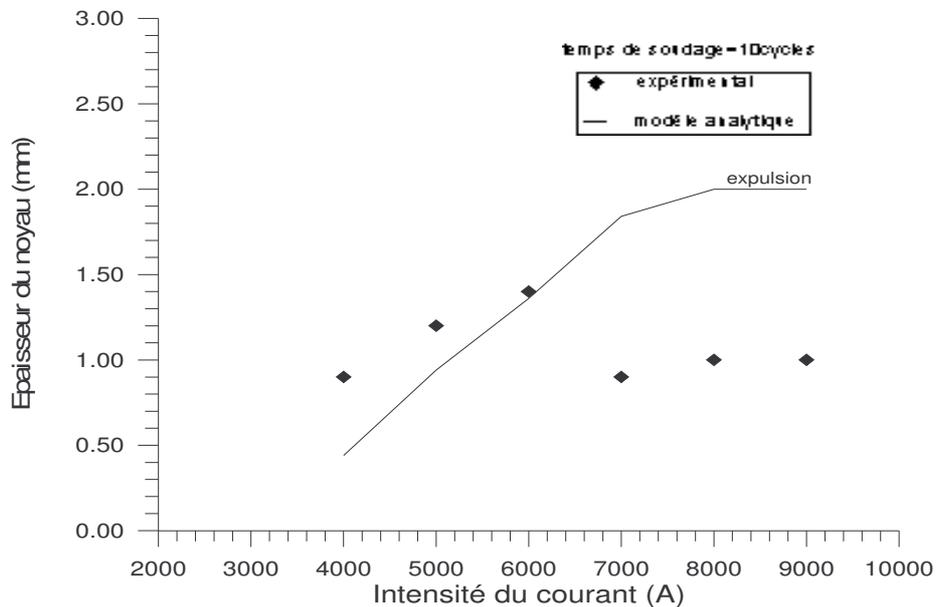


Figure 5.9 : Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1mm.

Temps de soudage=15cycles: L'intensité du courant qui correspond au début de formation du noyau est de 2200A. La zone de développement rapide est caractérisée par une augmentation des épaisseurs théoriques à I=4000A. L'épaisseur expérimentale s'égalise avec celle théorique [Fig. (5.10)]. De 4000A à 5000A les deux épaisseurs augmentent avec la même allure, la différence moyenne est de 15%. L'expulsion est apparue à I=6000A

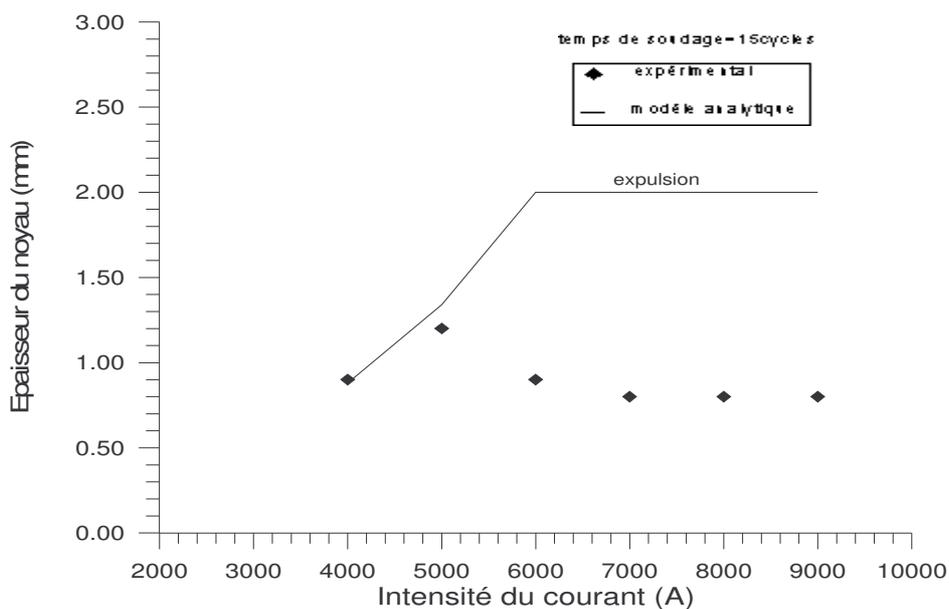


Figure 5.10 : Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1mm.

5.3.2. Épaisseur de tôle = 1.5mm

Temps de soudage=5cycles: On constate que la zone d'incubation Figure (5.11) calculée théoriquement coïncide à celle trouvée expérimentalement. Cette zone est le siège des intensités inférieures à 4000A, dans la zone de développement rapide entre 4000A à 6000A on remarque que les épaisseurs théoriques sont inférieurs a celles déterminées expérimentalement d'une différence de valeur de 45%.

Dans de 6000A à 9000A, l'épaisseur théorique continue à augmenter sans atteindre l'épaisseur critique qui correspond à l'expulsion. Il est à noter que dans cette zone, la différence de taille entre les deux épaisseurs diminue jusqu'une valeur moyenne de 18%.

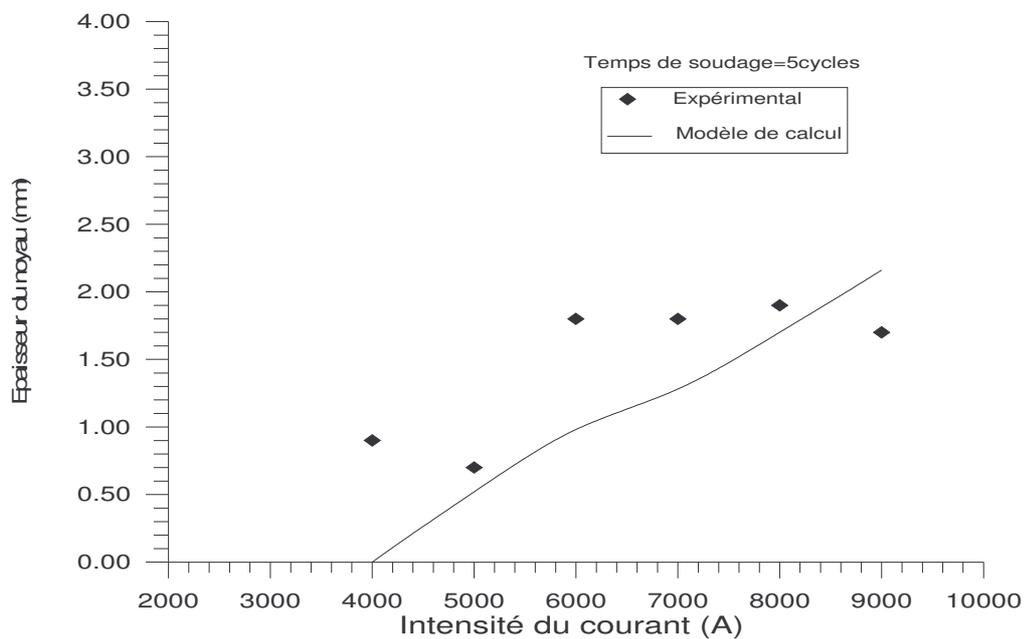


Figure 5.11 : Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1.5mm..

Temps de soudage=10cycles : On peut tirer de la Figure (5.12) l'intensité qui correspond au début de formation du noyau cette intensité est de 3000A, au dessous de laquelle on est dans la zone d'incubation.

Dans la zone de développement rapide entre 4000A et 6000A, une différence qualitative est constatée entre les épaisseurs théoriques et expérimentales, cette différence moyenne est de 12%.

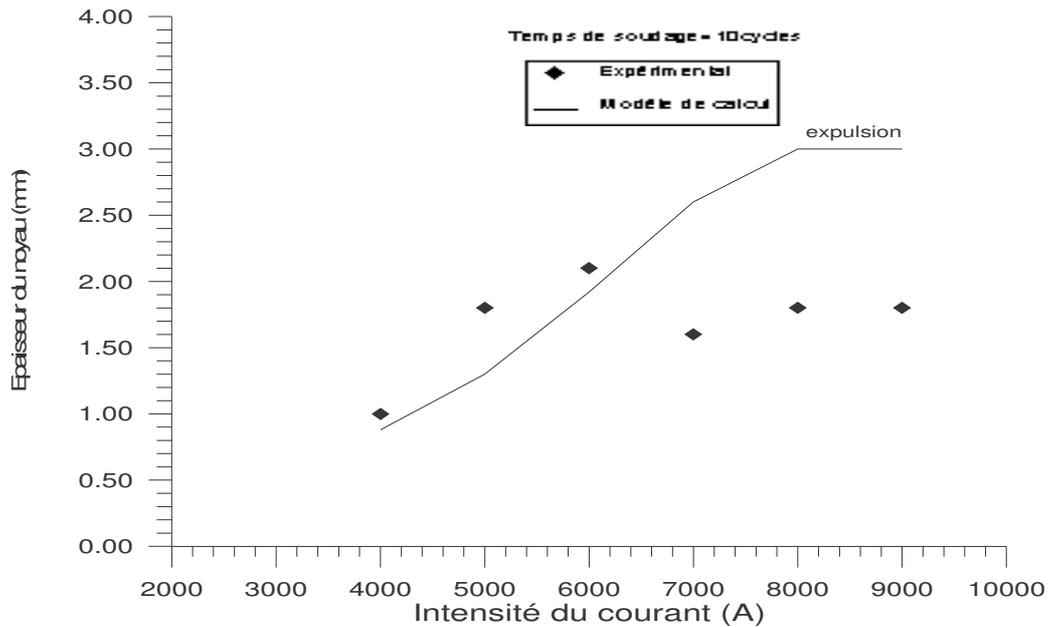


Figure 5.12 : Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1.5mm

De 6000 à 8000A, l'épaisseur théorique continue à augmenter jusqu'à une valeur de 2.5mm, tandis que l'épaisseur expérimentale diminue lentement jusqu'à une valeur constante. Cette augmentation d'épaisseur théorique est dû à la structure du modèle théorique utilisé et qui ne conditionne pas l'évolution radiale du noyau de soudure.

L'expulsion est apparue à $I=8000A$.

Temps de soudage = 15cycles : La zone d'incubation devient plus restreinte dans une plage d'intensité inférieure à 2400A. Entre 2400A et 5000A, un développement rapide est constaté au niveau de l'épaisseur théorique [figure (5.13)].

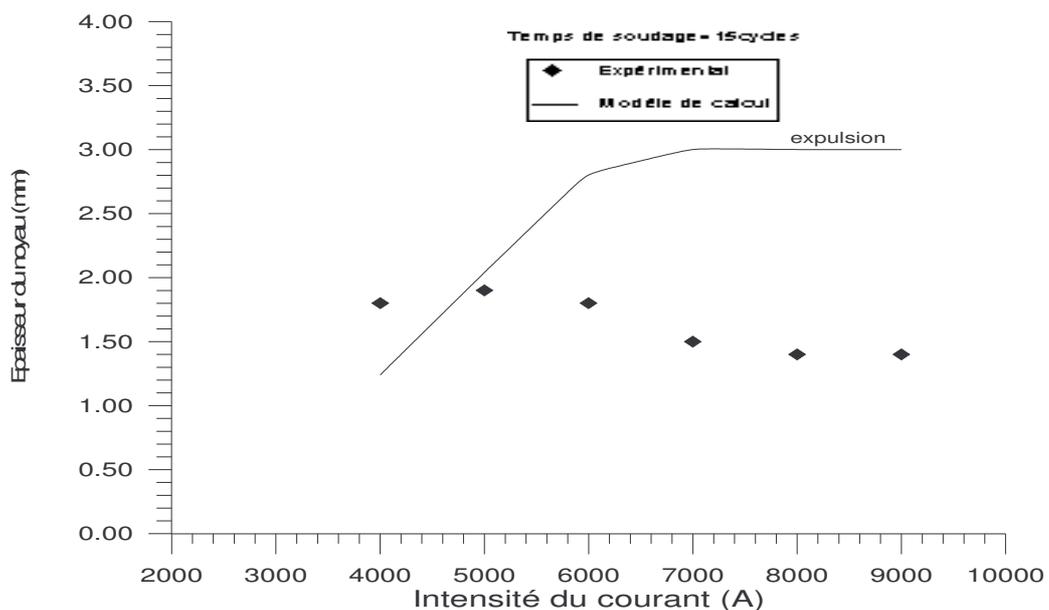


Figure 5.13 : Variation de l'épaisseur du noyau en fonction de l'intensité du courant pour une épaisseur de tôle de 1.5mm

Dans la zone délimitée par des intensités allant de 4000A à 5000A, les deux épaisseurs augmentent selon la même allure avec une différence moyenne de 35%.

La zone d'expulsion apparaît à une intensité égale à 6000A.

CONCLUSION

L'évolution de la formation d'un noyau de soudure et les changements associés à cette formation au cours d'une séquence de soudage par point de tôles minces a fait l'objet de plusieurs travaux analytiques et expérimentaux. Ces travaux effectués permettent de mieux comprendre l'effet des différents paramètres qui interviennent dans la formation du noyau de soudure, afin de pouvoir optimiser les conditions qui déterminent une qualité du noyau de soudure répondant aux caractéristiques mécaniques les plus appropriées.

Les travaux de simulation thermique dans le procédé du soudage par point caractérisé par sa rapidité d'exécution sans impliquer de métaux d'apport, trouvent un champ d'application très étendu car ils participent efficacement dans l'analyse du comportement thermique lors de la formation du point de soudure sous des paramètres de soudage définis sans faire recours aux essais expérimentaux.

Ces modèles sont loin d'être complets du point de vue résultats fournis car ils sont conditionnés par des simplifications dans leur développement ce qui rend les résultats inadéquats quantitativement avec l'expérimental, mais qualitativement sont acceptables.

Dans notre travail, on a abordé deux volets principaux afin de pouvoir analyser l'évolution d'un noyau de soudure réalisé par le soudage par point des tôles d'acier inoxydable 304L. Le premier volet est consacré aux essais expérimentaux en procédant à la réalisation de différents points de soudure en fonction des deux variables importantes dans le procédé de soudage par point à savoir le temps et l'intensité de soudage, afin d'arriver à l'étape de prise de dimensions des noyaux de soudure réalisés.

Le deuxième volet du travail consiste à mettre au point un modèle thermique développé selon une approche analytique qui tient compte de l'ensemble des paramètres de soudage à l'exception de l'effort de soudage. Ce modèle offre la possibilité de déterminer la distribution du champ de température le long de l'épaisseur des deux tôles à souder, après l'évaluation de la résistance de contact par l'application d'une approche thermique présentée sous forme d'un bilan thermique mis en jeu lors d'une séquence de soudage par point.

Les résultats expérimentaux, montrent que l'évolution du noyau de soudure en fonction de l'intensité du courant passe par quatre zones, incubation développement rapide

,développement ralenti et expulsion indépendamment de l'épaisseur de la tôle à souder , le volume maximal du noyau étant atteint sous une intensité de 6000A (10cycles) .

Cette évolution prend une autre allure en fonction du temps de soudage dans deux zones distinctes d'intensité. La formation du noyau est remarquée dans les premiers cycles de soudage confirmant les résultats de *RICE,w et Funck, e* [6] et Gould.j [11].

La confrontation des résultats obtenus par l'exploitation du modèle analytique avec les résultats expérimentaux est acceptable. En effet les épaisseurs du noyau fondu calculées et mesurées en fonction du temps et de l'intensité du courant de soudage sont qualitativement en bonne adéquation, dans la fourchette d'intensité allant de 4000A à 7000A appliqués pour des temps de soudage ne dépassant pas 10cycles.

La variation de la résistance de contact est affectée beaucoup plus dans les premiers cycles de soudage, caractérisée par une chute rapide de sa valeur quelle que soit la valeur de l'intensité du courant. Ceci est dû essentiellement à l'augmentation de la surface de contact tôle- tôle lors des premiers cycles de soudage, ainsi qu'à la diminution de la densité du courant par rapport au centre du noyau.

Ce modèle thermique développé est limité dans ses résultats, il n'est capable de prédire que l'évolution radiale du noyau de soudure (Epaisseur du noyau). Toutefois, on peut apporter certains changements dans sa structure pour le rendre capable de prédire l'évolution longitudinale du noyau de soudure (Diamètre).

ANNEXE

A.1. Propriétés du matériau de la tôle

A.1.1. La chaleur spécifique (J/g.c°)

$C_p = (3.0702 \times 10^{-8} T^2 + 7.6579 \times 10^{-5} T + 0.1075)$	si $T \leq 400$
$C_p = (1.85 \times 10^{-7} T^2 + 1134)$	si $400 < T \leq 600$
$C_p = (7.333 \times 10^{-4} T - 0.26)$	si $600 < T \leq 750$
$C_p = -1.0 \times 10^{-3} T + 1.265$	si $750 < T \leq 850$
$C_p = 0.16$	si $850 < T \leq 1427$
$C_p = \frac{H_f}{(T_i - T_s)}$	si $T > T_f$

A.1.2. La conductivité thermique ($K \times 0.0023889 \text{ W/mm.c}$)

$K = (-5.76 \times 10^{-7} T^2 - 2.5 \times 10^{-5} T + 0.12533) 10^{-3}$	si $T < 400$
$K = (-7.5 \times 10^{-3} T^2 - 1 \times 10^{-5} T + 0.118) 10^{-3}$	si $400 < T \leq 800$
$K = 0.065 \times 10^{-3}$	si $T > 800$

A.1.3. La densité ($\rho \times 10^{-6} (\text{g/mm}^3)$)

$\rho = 0.7974 \times 10^4 - 0.3006 T - 0.3816 \left(\frac{T}{100} \right)^2$	si $20 \leq T \leq 1525$
$\rho = 0.9246 \times 10^4 - 1.481 T + 1.425 \left(\frac{T}{100} \right)^2$	si $T > 1537$

A.1.4. La résistivité électrique ($\sigma (\mu\Omega.cm)$)

$\sigma = 15.4 + 0.0049 \times T + 8.56 \times 10^{-6} T^2$	si $T < 800$
$\sigma = 0.002875(T - 800) + 109.4$	si $T > 800$

A.1.5. Chaleur latent de fusion ($H_l(j/Kg)$)

$$H_l = 2.742 \times 10^5$$

A.1.6. Températures caractéristiques du matériau

Température du solidus $T_s = 1493c^\circ$

Température du liquidus $T_l = 1525c^\circ$

A.3. Propriété du matériau de l'électrode

Table 1

Notation (unité)	Electrode (alliage de cuivre)
$K(w/m.c^\circ)$	3.014×10^3
$\delta (\mu\Omega.m)$	3.83×10^{-2}
$C_p (kj/kg.c^\circ)$	4.102×10^2
$\rho (kg/m^3)$	8.93×10^3

Epaisseur de la tôle=1mm

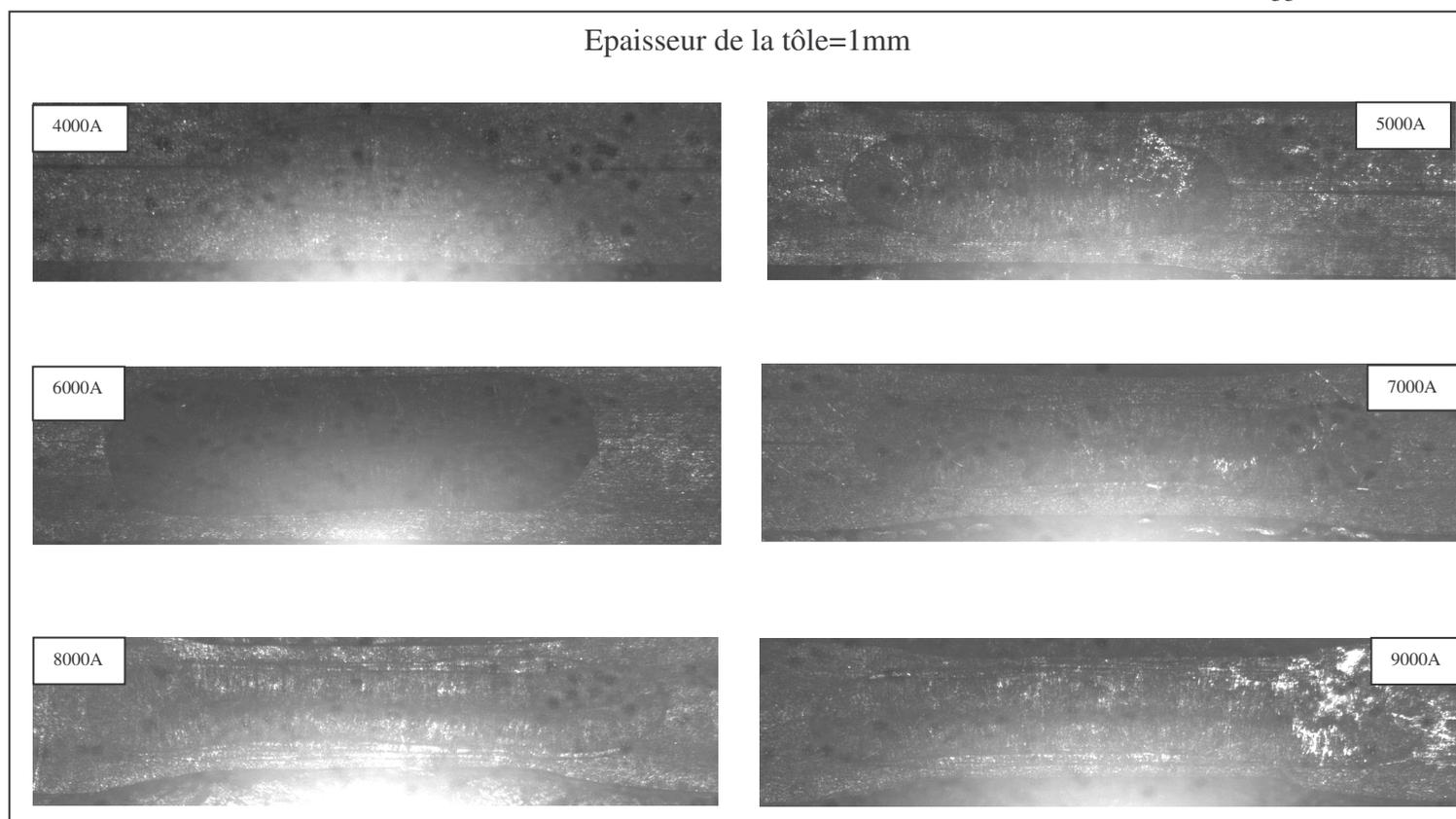


Fig. (A.1) – Evolution du noyau fondu en fonction de l'intensité du courant pour un temps de soudage=10cycles

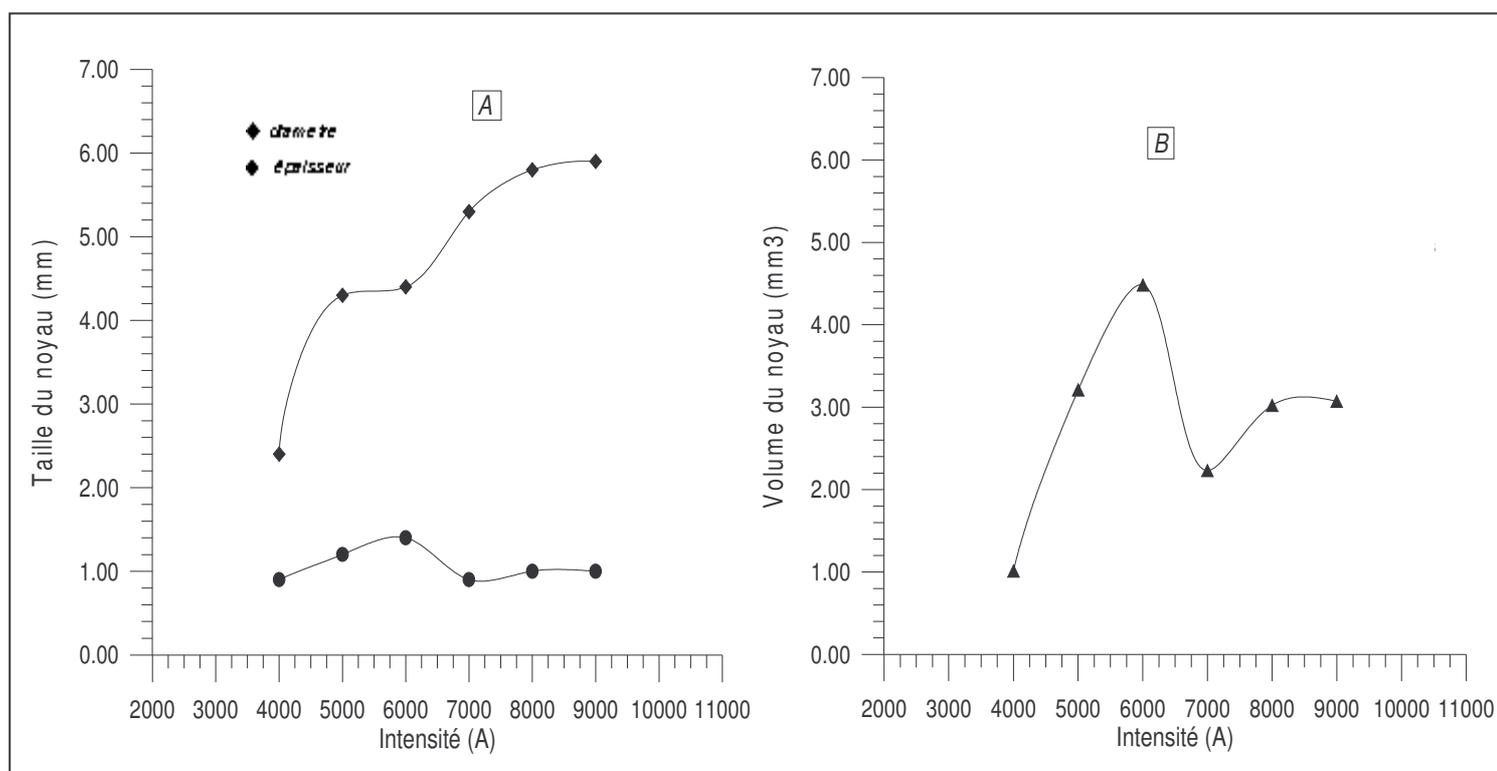


Fig. (A.2) : A- Variation de la taille du noyau en fonction de l'intensité.
B- Variation du volume du noyau en fonction de l'intensité.

Epaisseur de la tôle=1.5mm

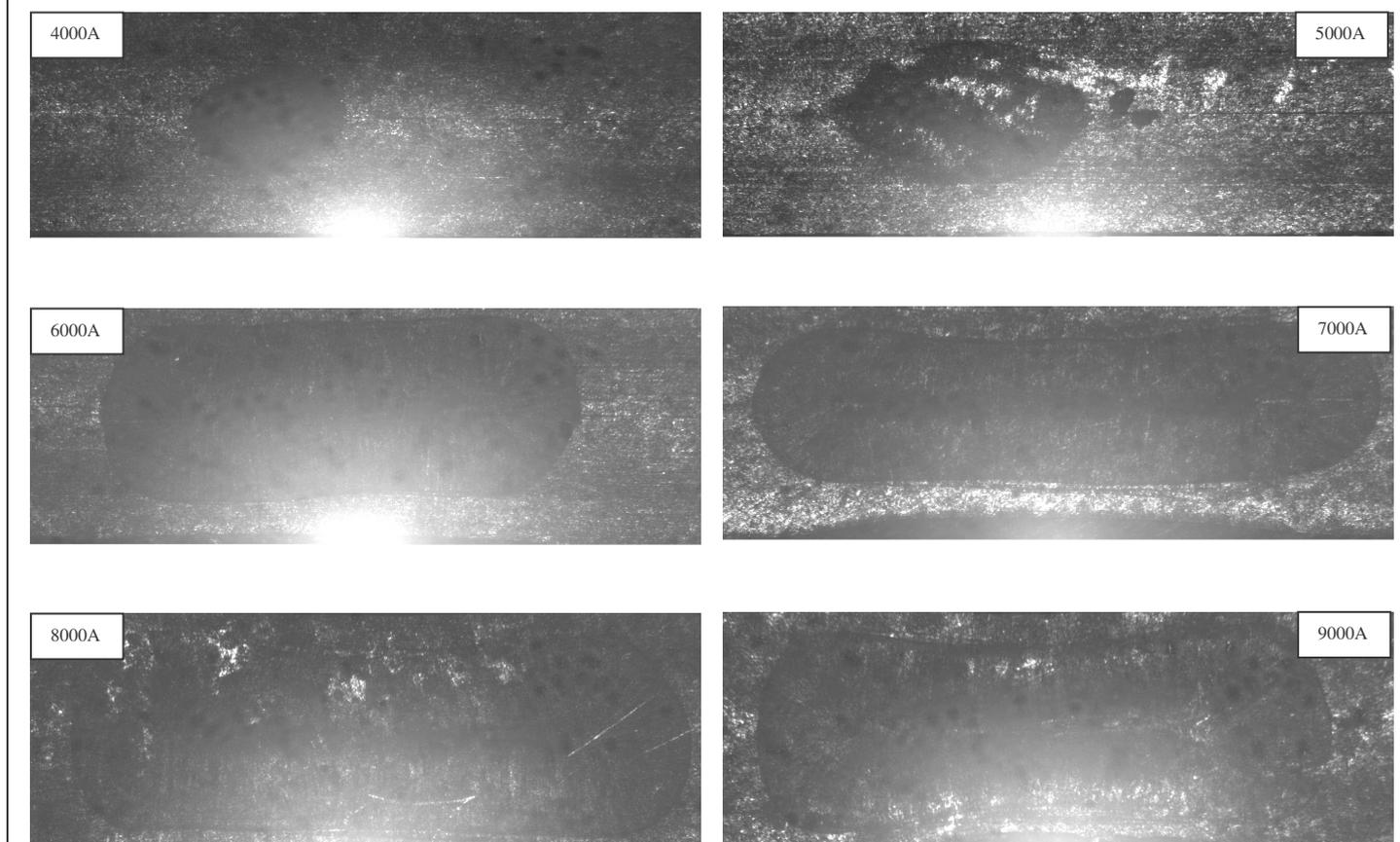


Fig. (A.3) – Evolution du noyau fondu en fonction de l'intensité du courant pour un temps de soudage=10cycles

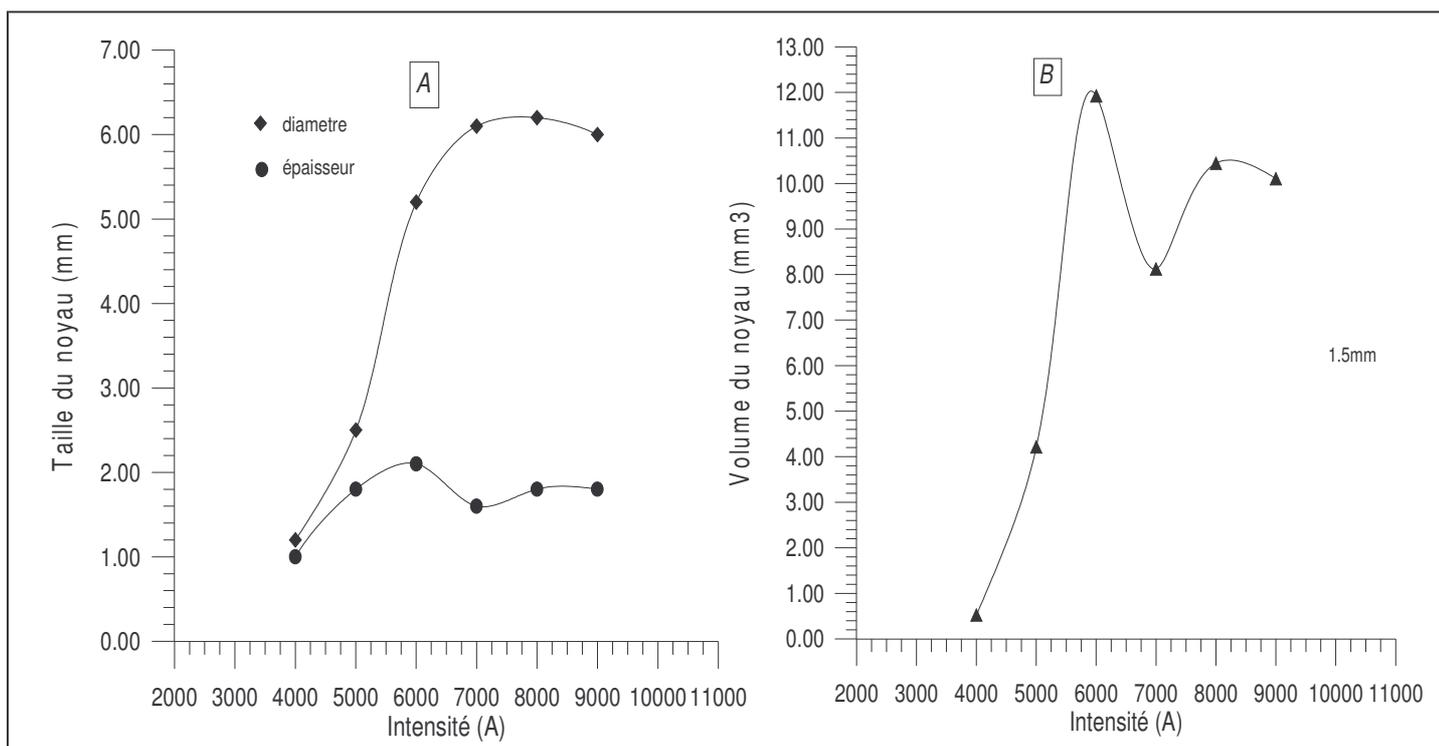


Fig. (A.4) : A- Variation de la taille du noyau en fonction de l'intensité.
B- Variation du volume du noyau en fonction de l'intensité.

Epaisseur de la tôle=1mm

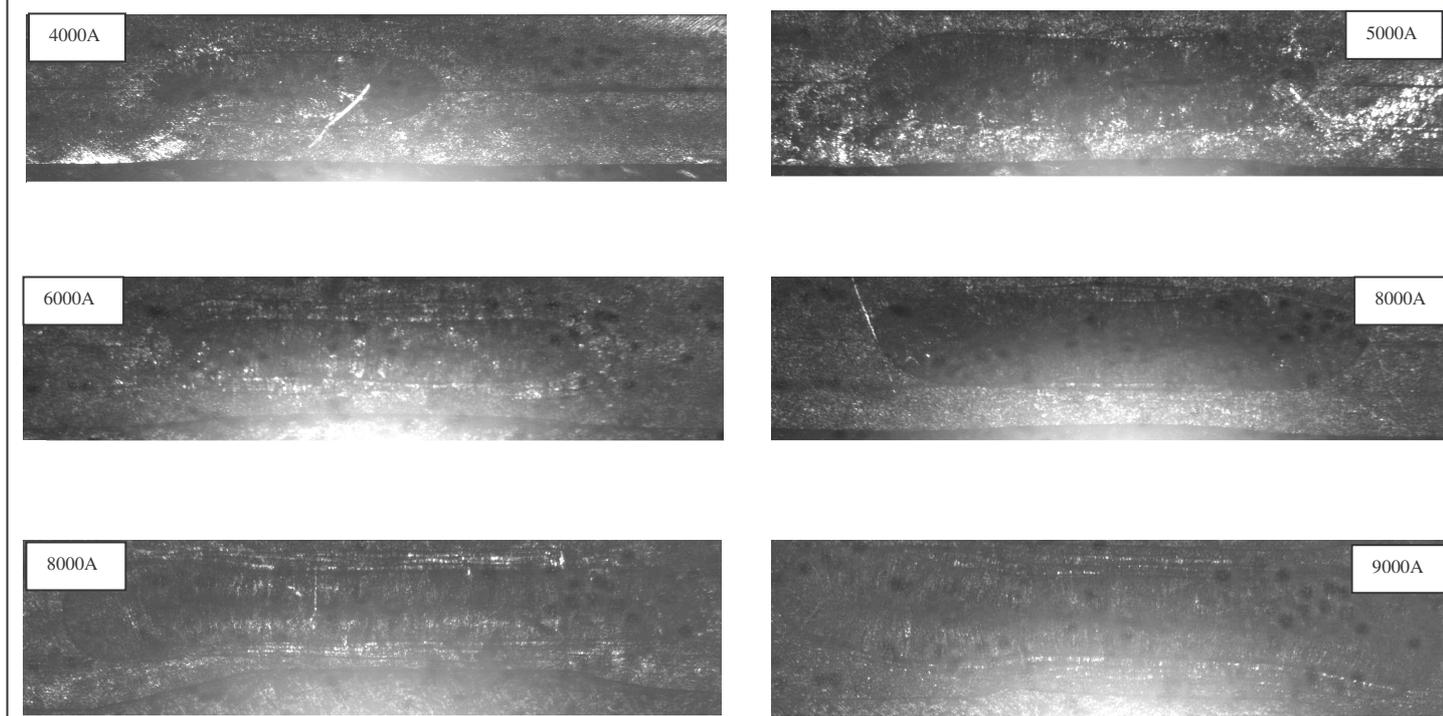


Fig.(A.5) – Evolution du noyau fondu en fonction de l'intensité du courant pour un temps de soudage=15cycles

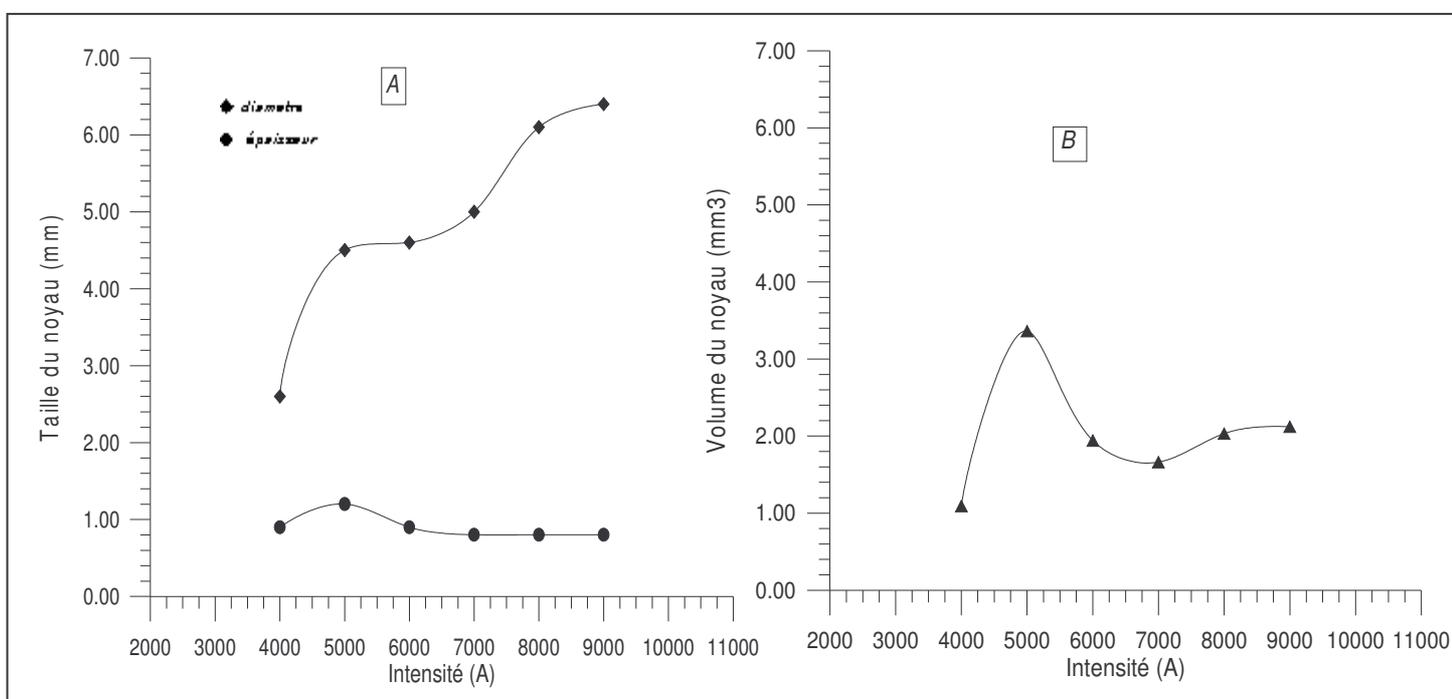


Fig. (A.6) : A- Variation de la taille du noyau en fonction de l'intensité.
B- Variation du volume du noyau en fonction de l'intensité.

Epaisseur de la tôle=1.5mm

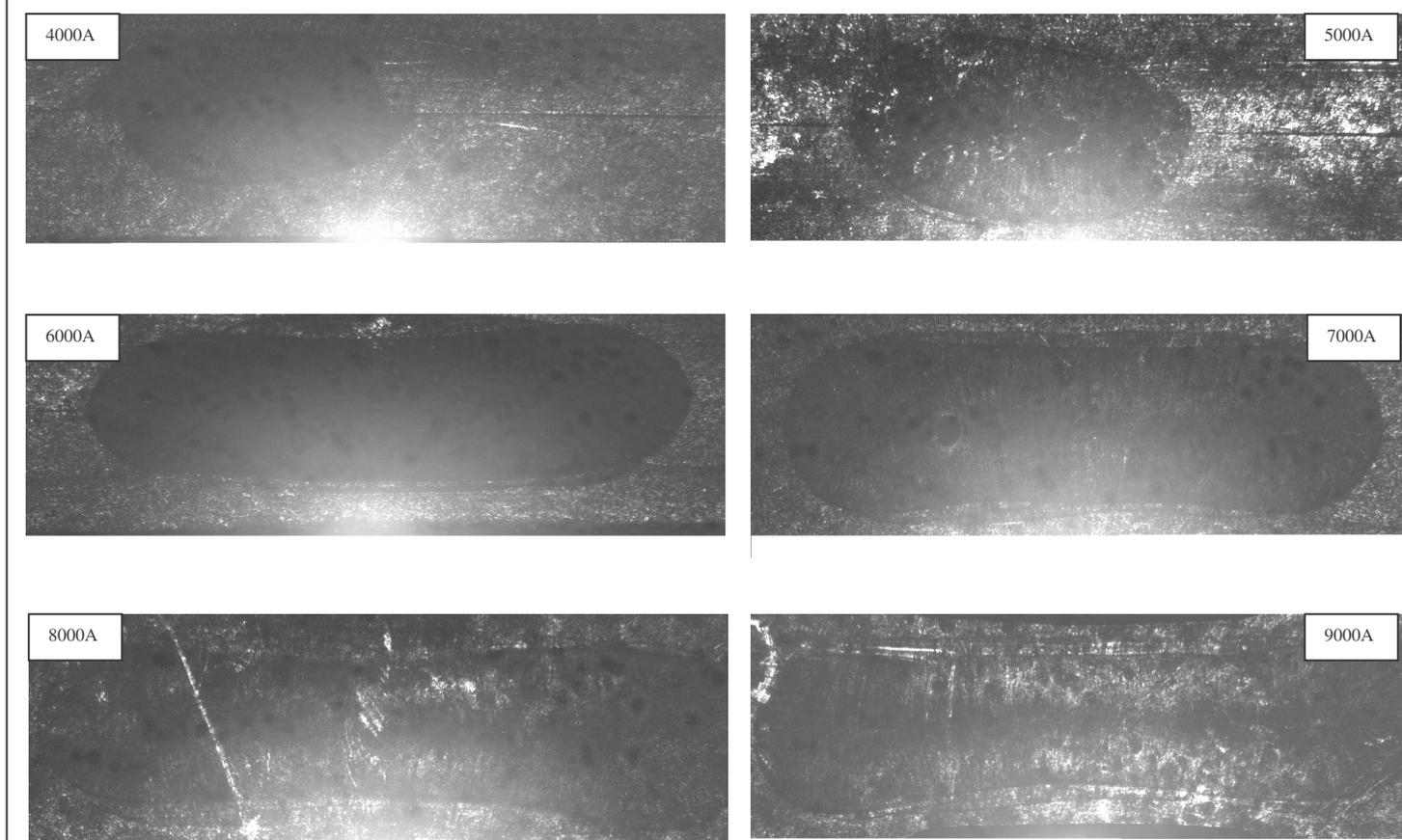


Fig. (A-7) – Evolution du noyau fondu en fonction de l'intensité du courant pour un temps de soudage=15cycles

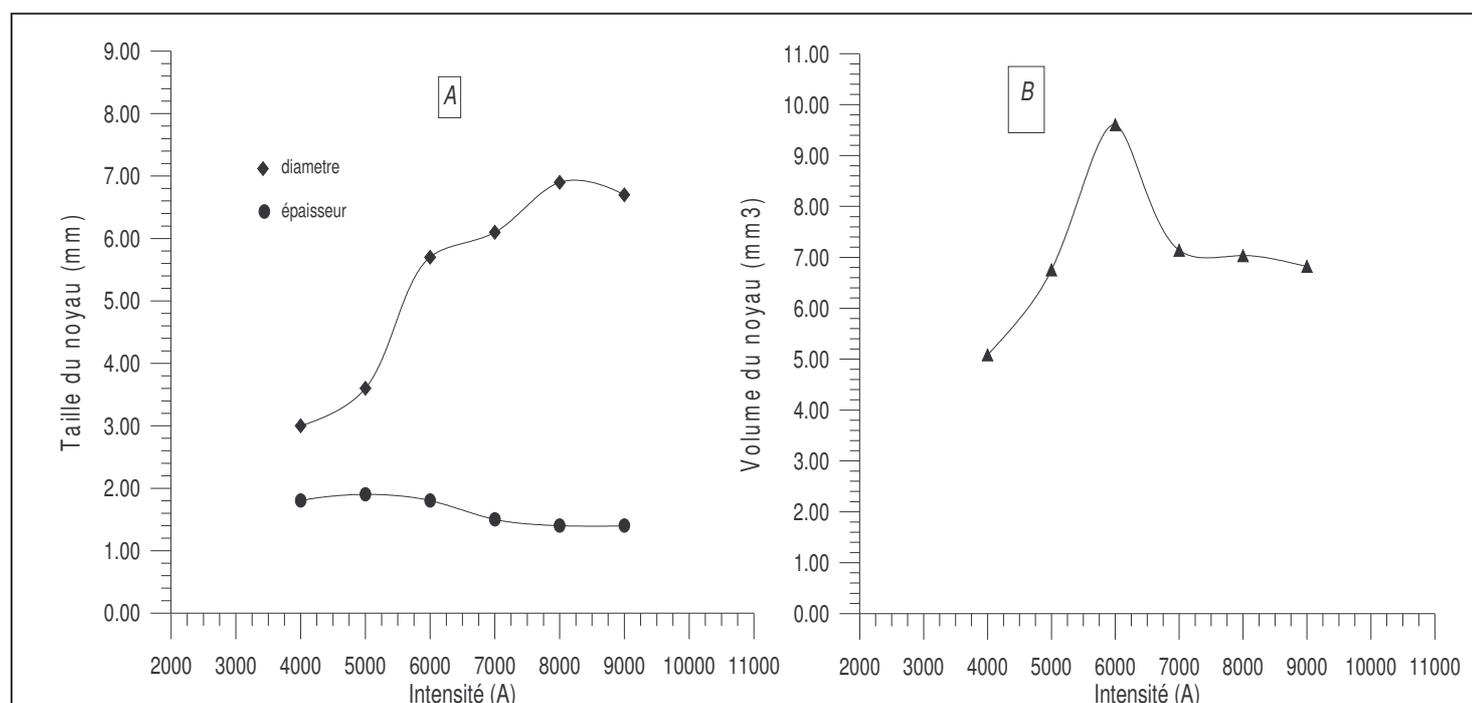


Fig. (A-8) : A -Variation de la taille du noyau en fonction de l'intensité.
B -Variation du volume du noyau en fonction de l'intensité.

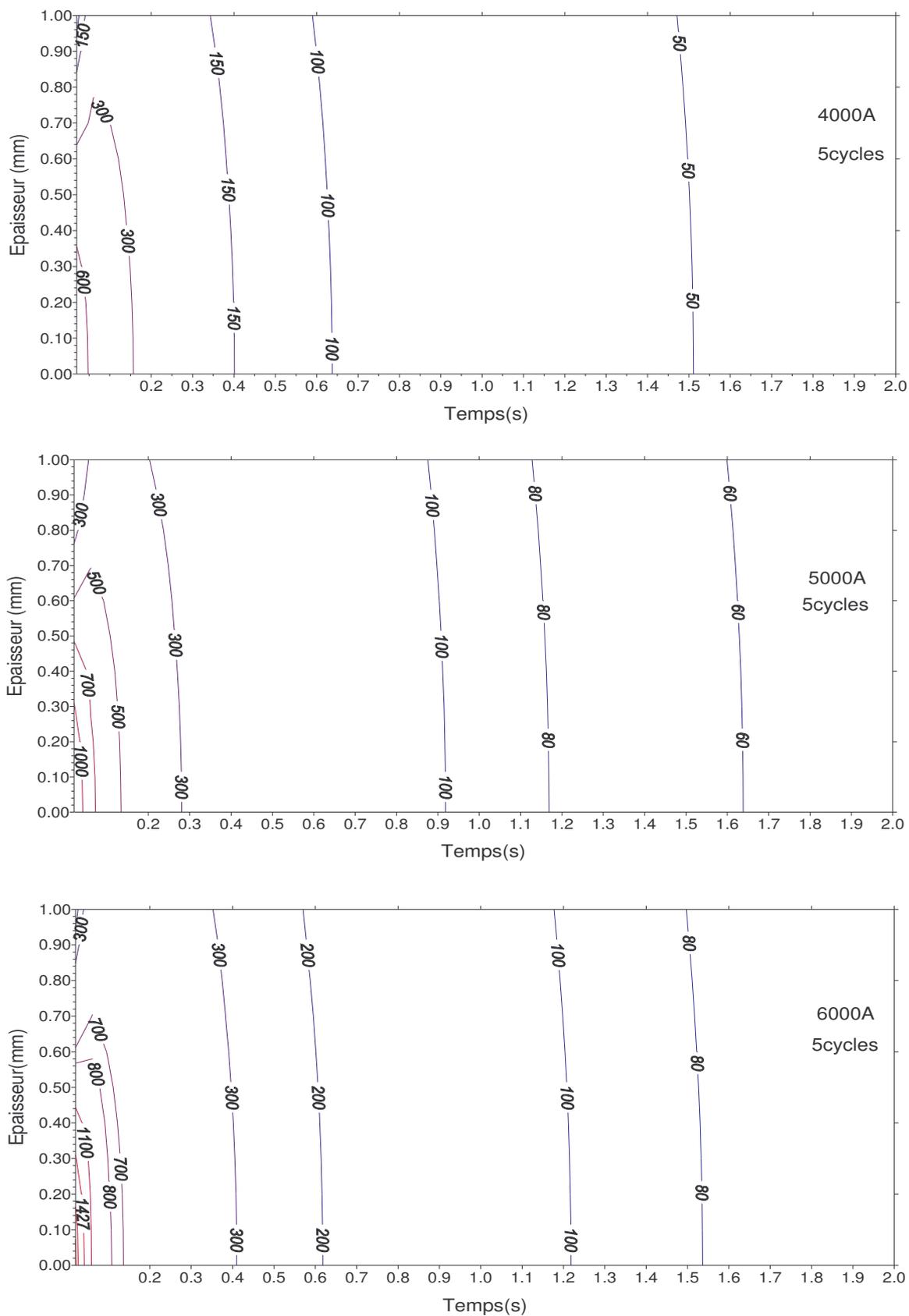


Fig. (A.9) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1mm

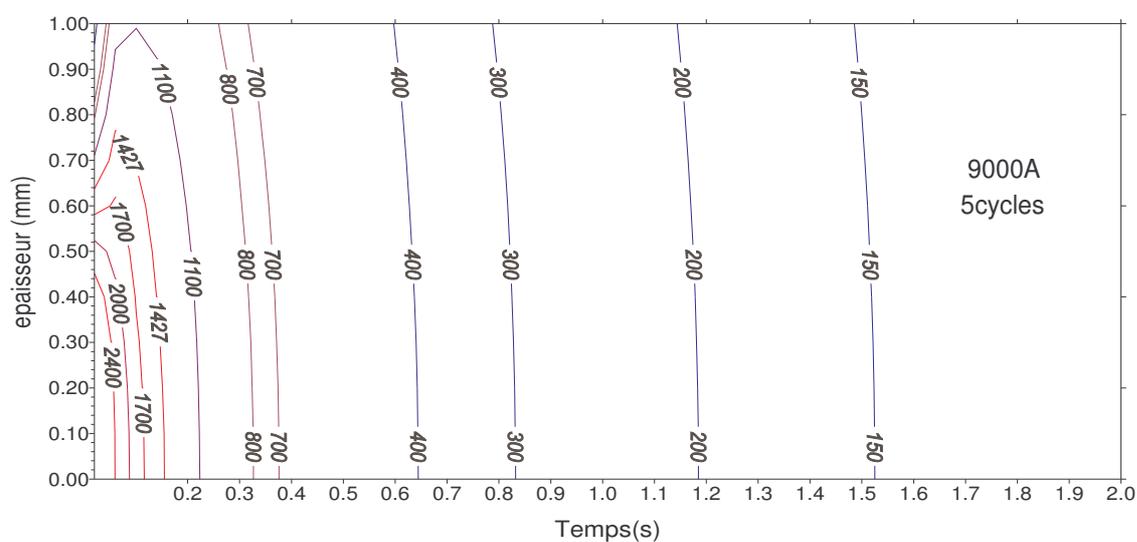
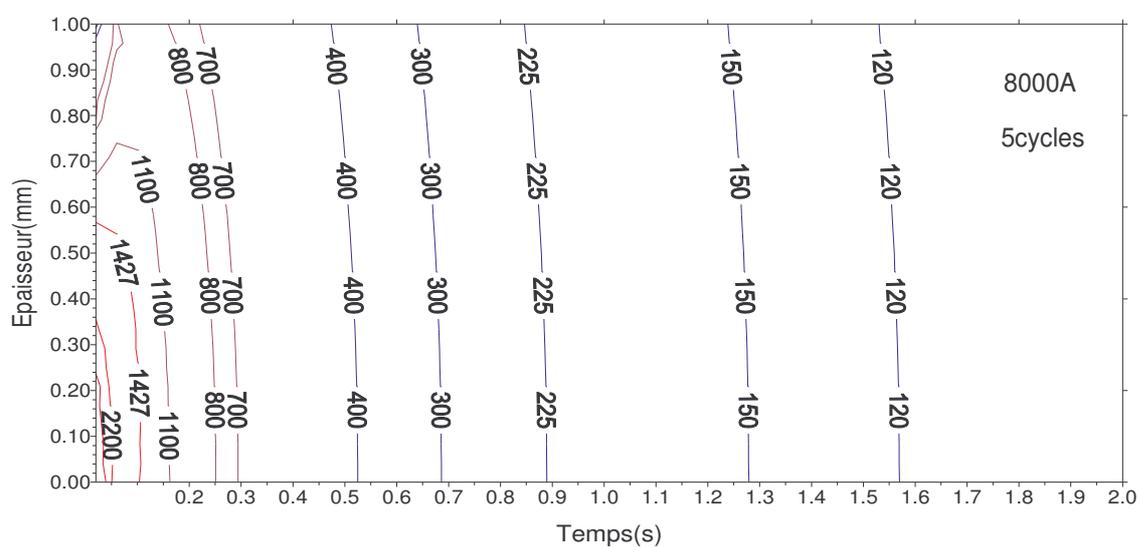
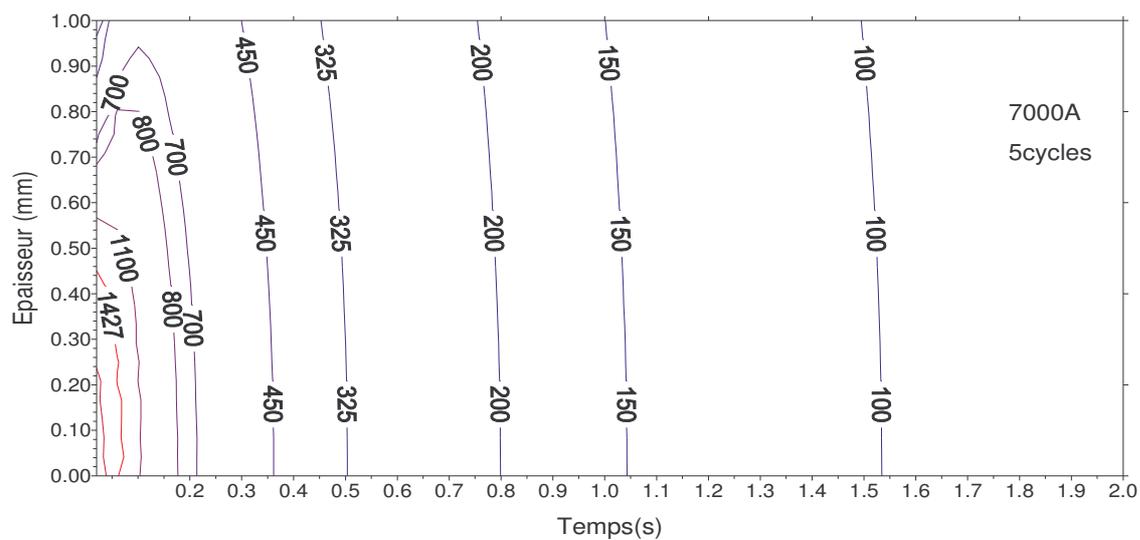


Fig. (A.10) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1mm

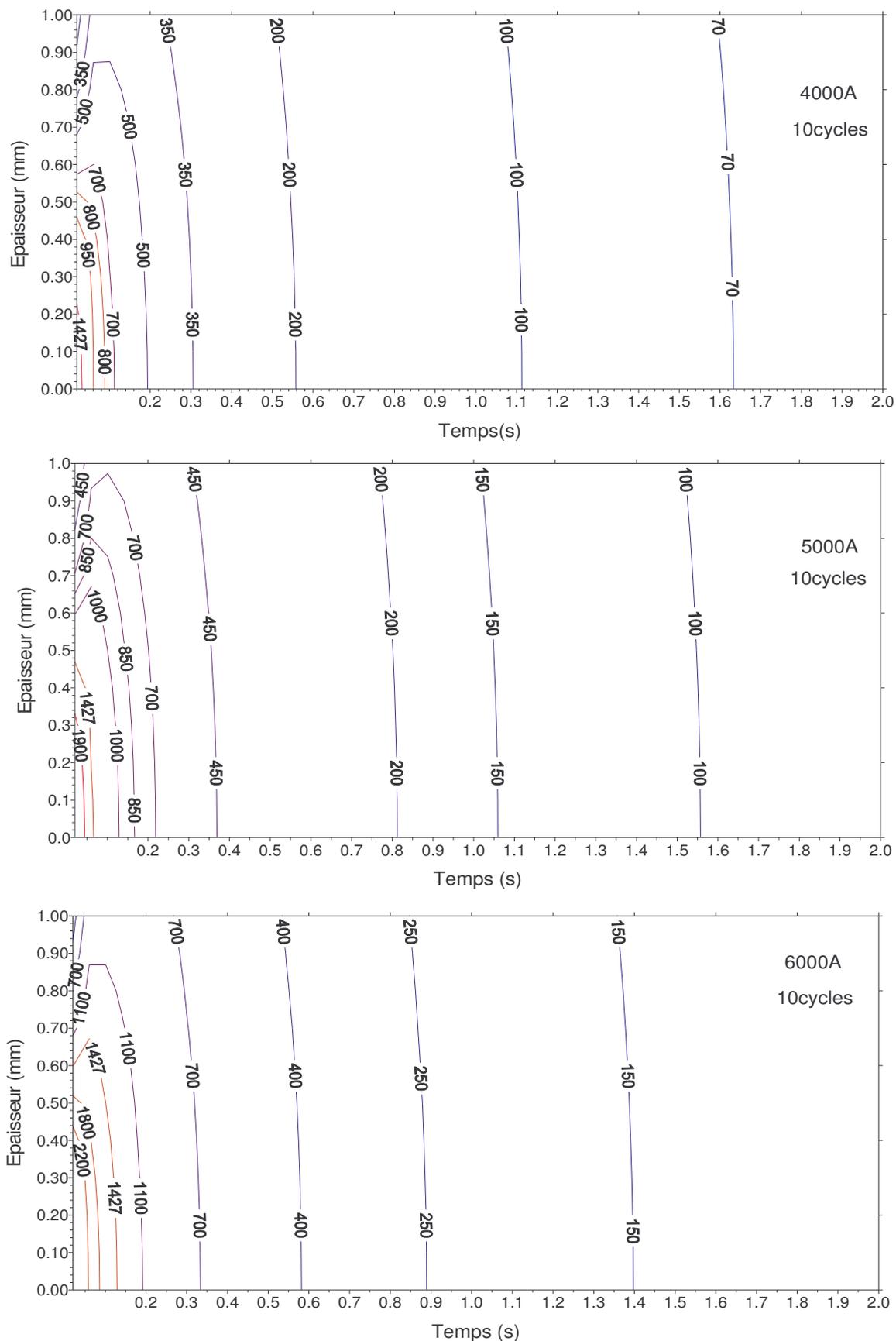


Fig. (A.11) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur =1mm

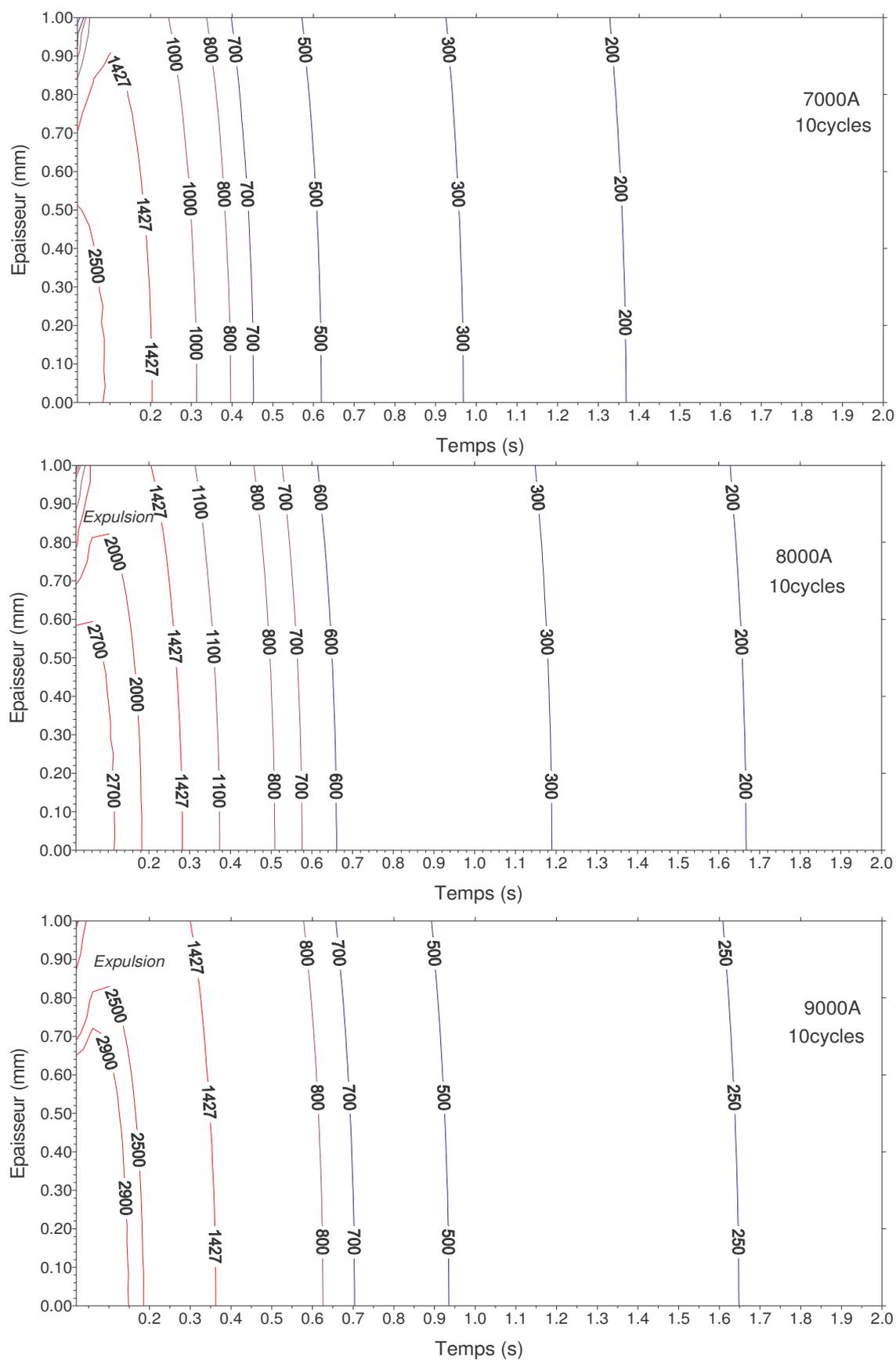


Fig. (A.12) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1mm

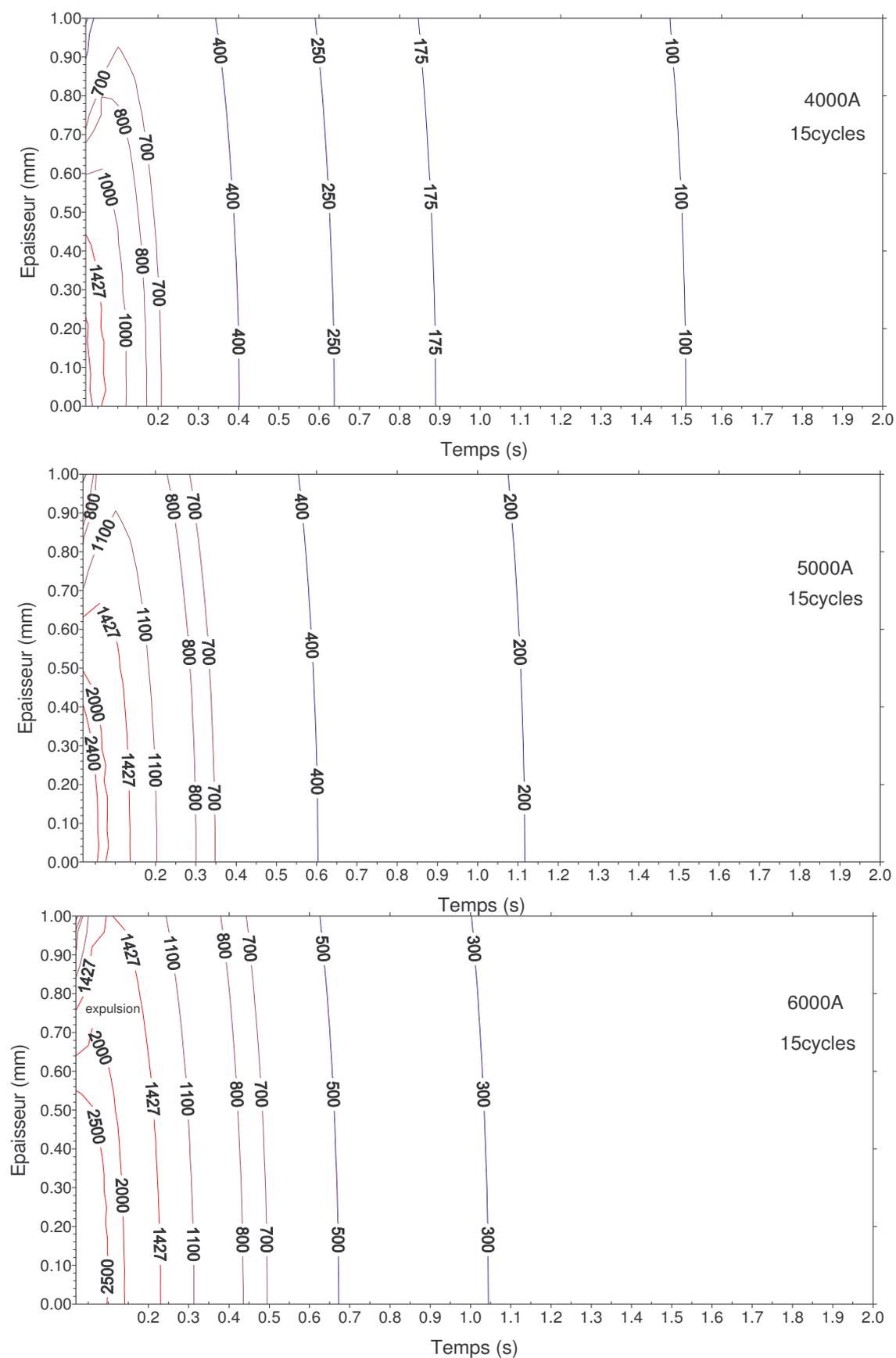


Fig. (A.13) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1mm

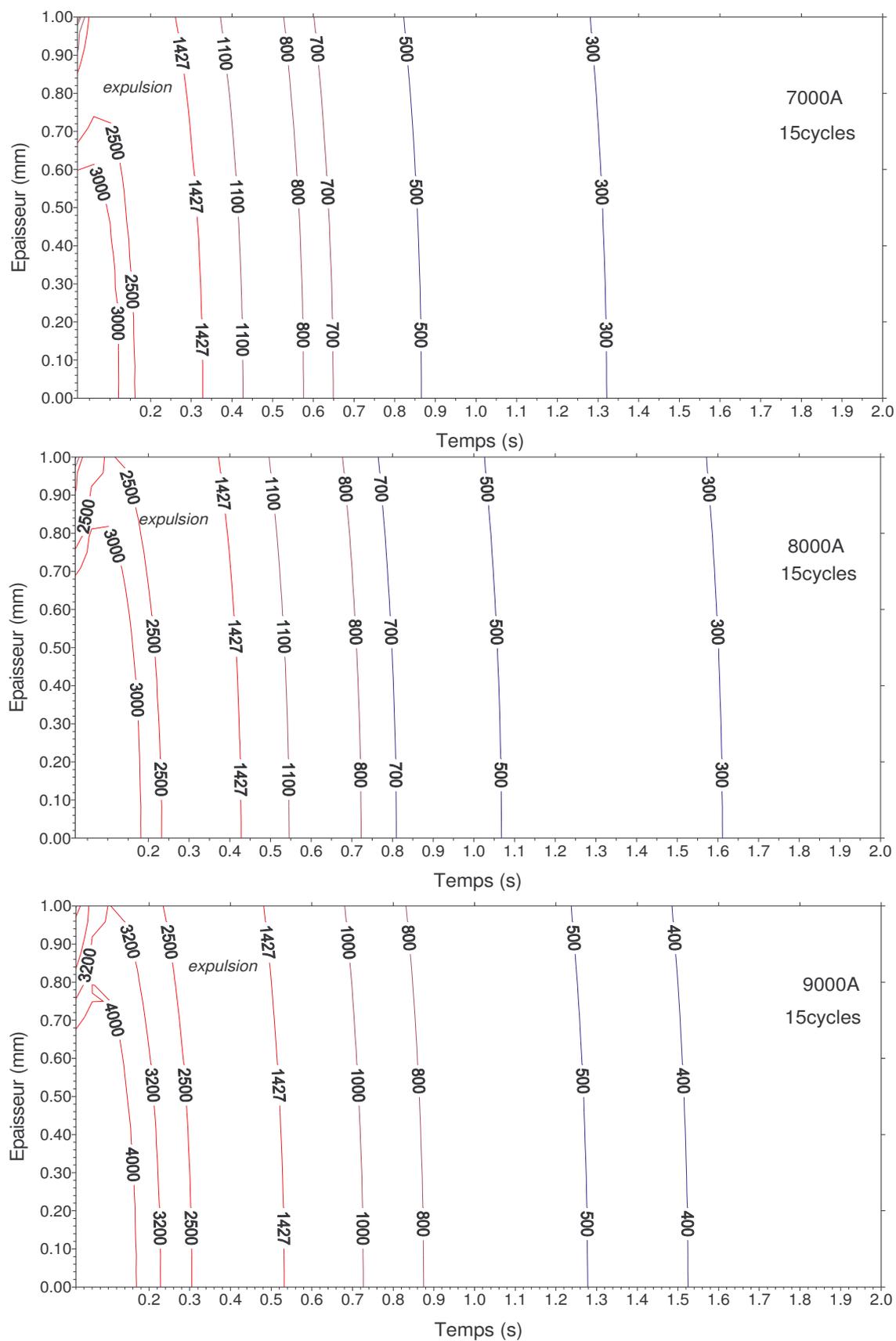


Fig. (A.14) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1mm

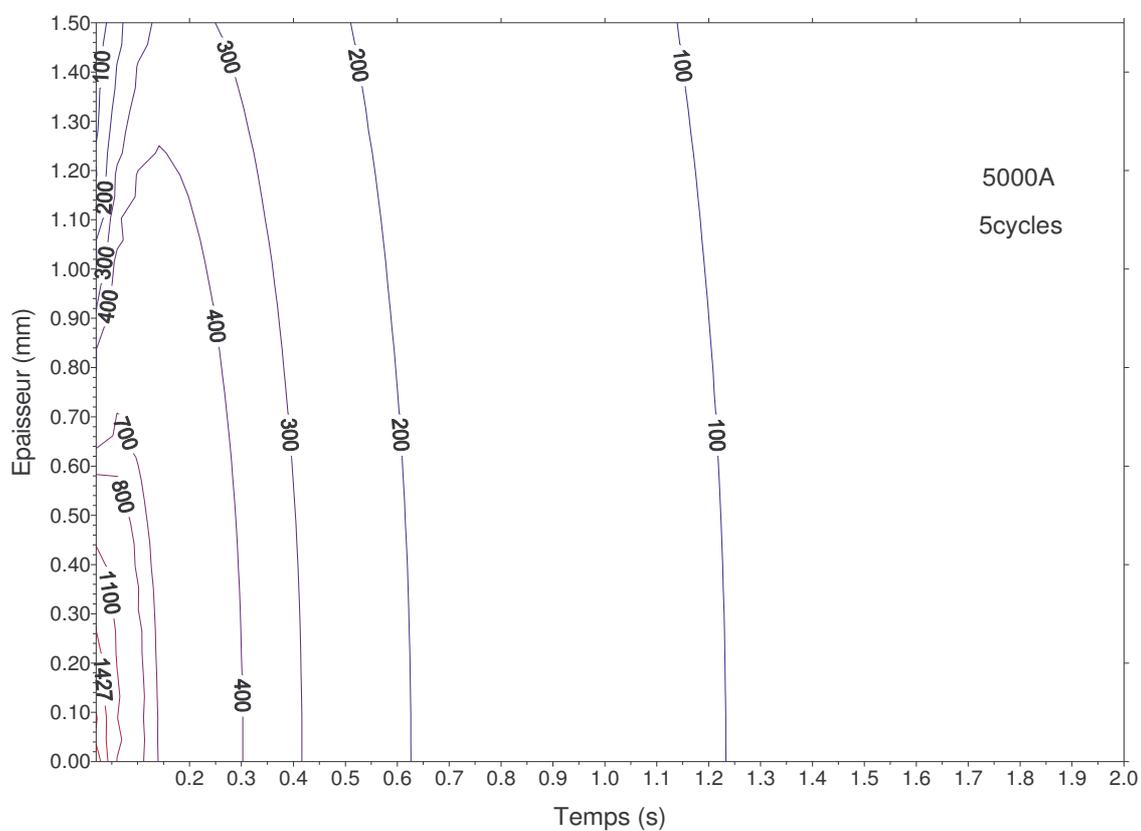
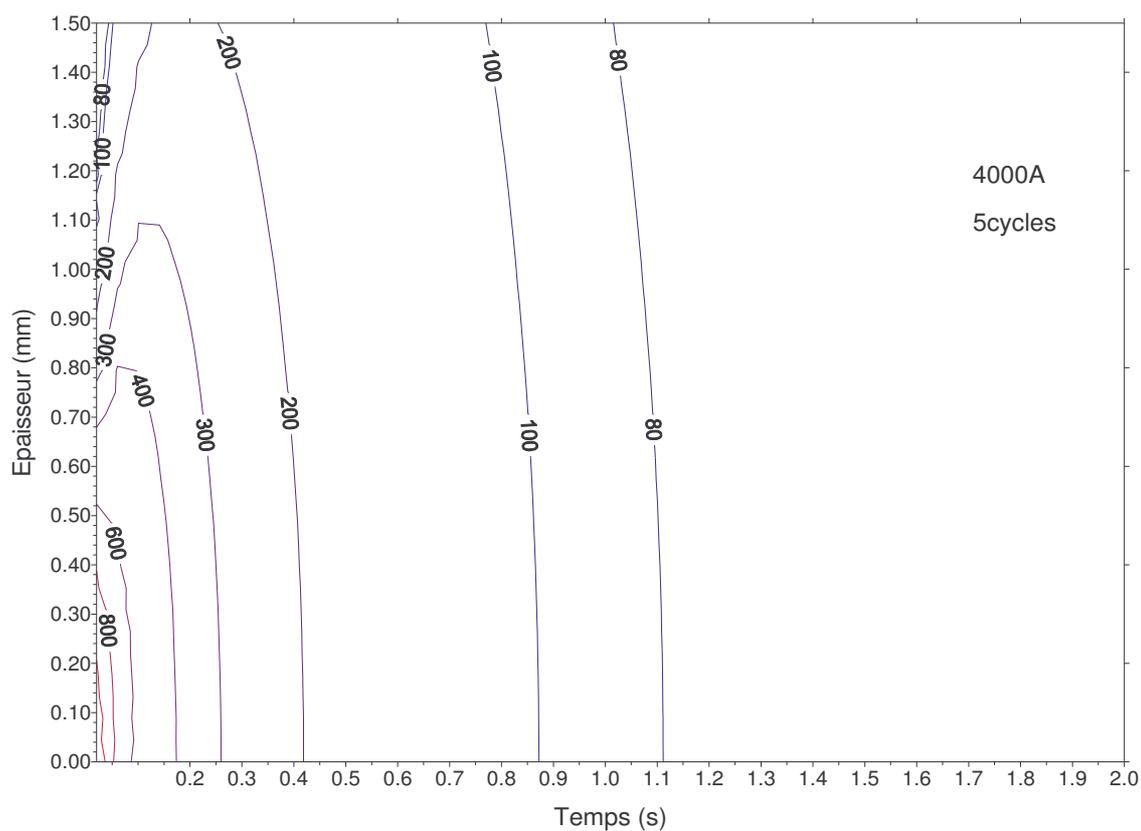


Fig. (A.15) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1.5mm

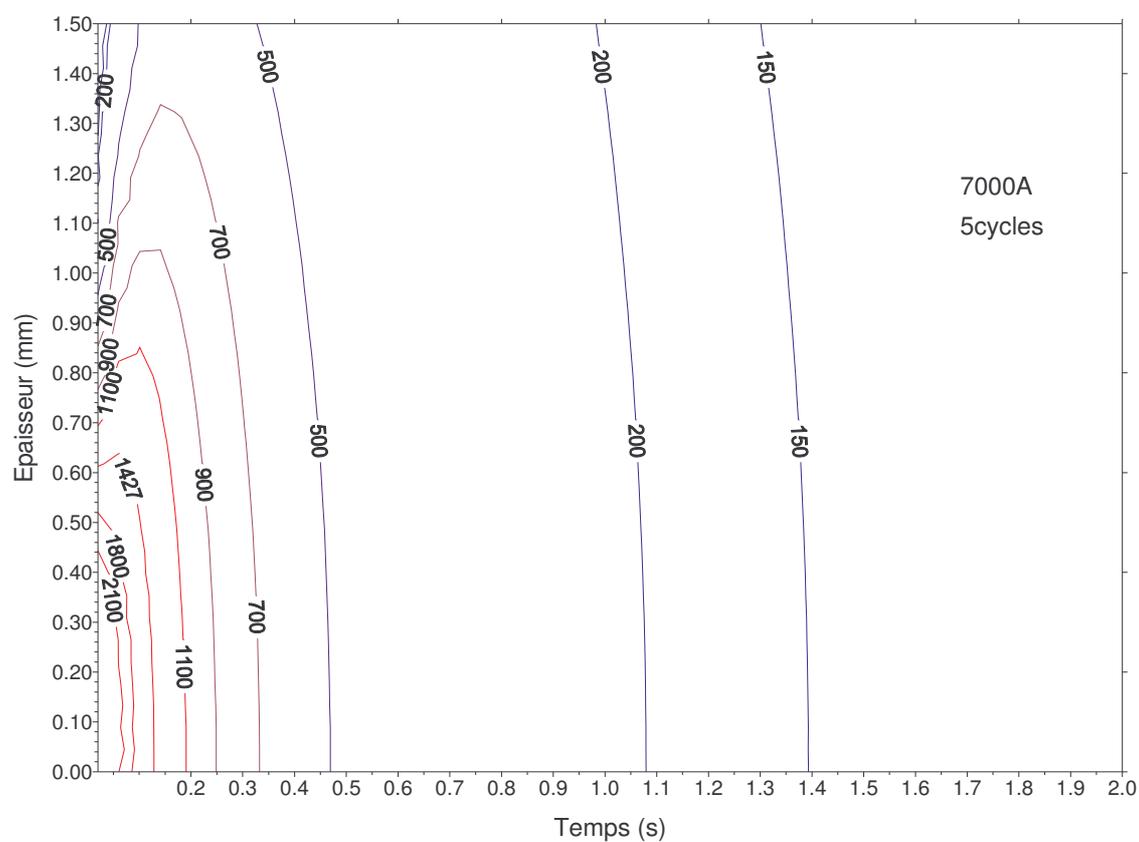
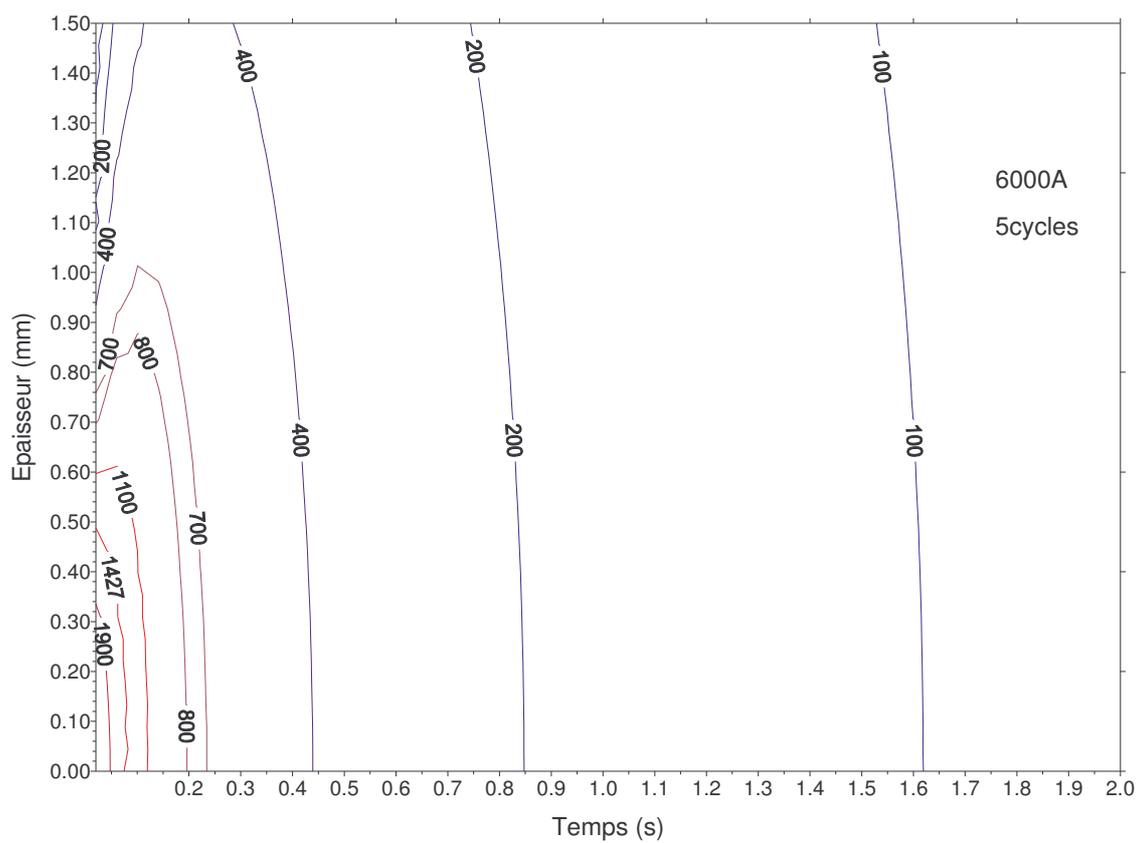


Fig. (A.16) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1.5mm

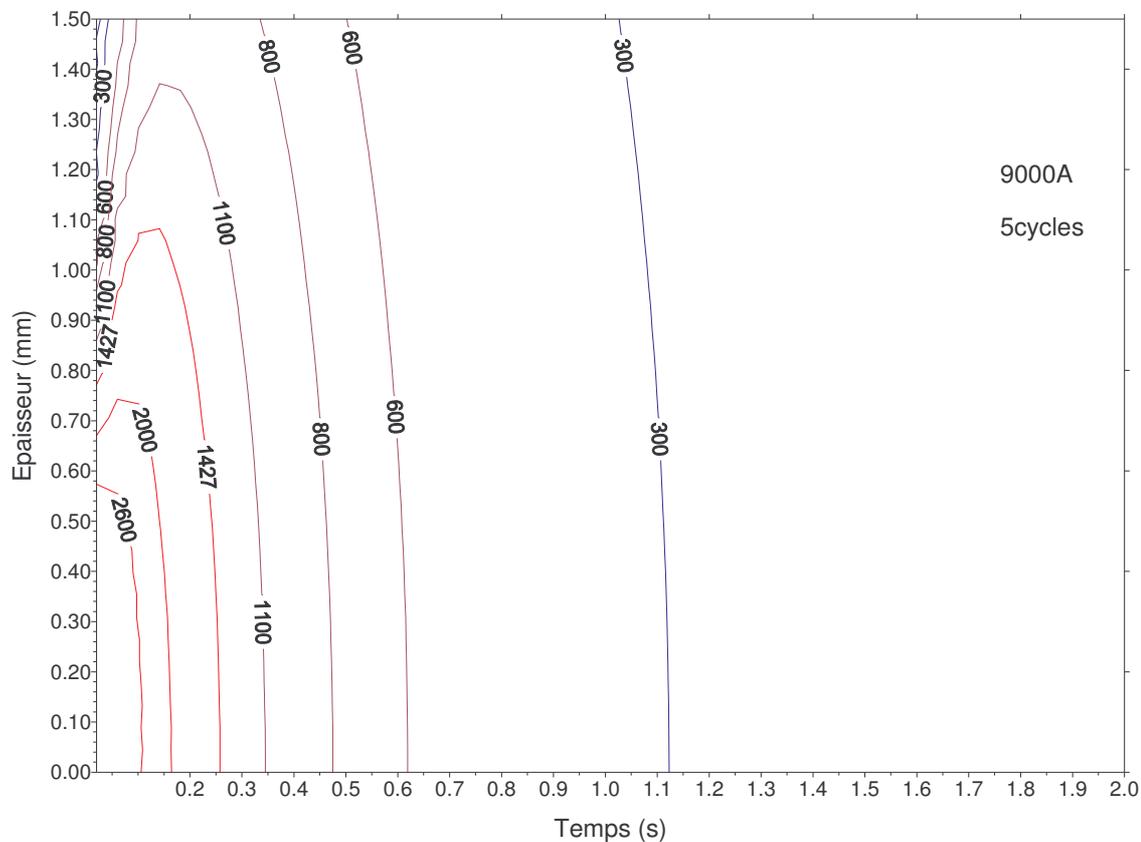
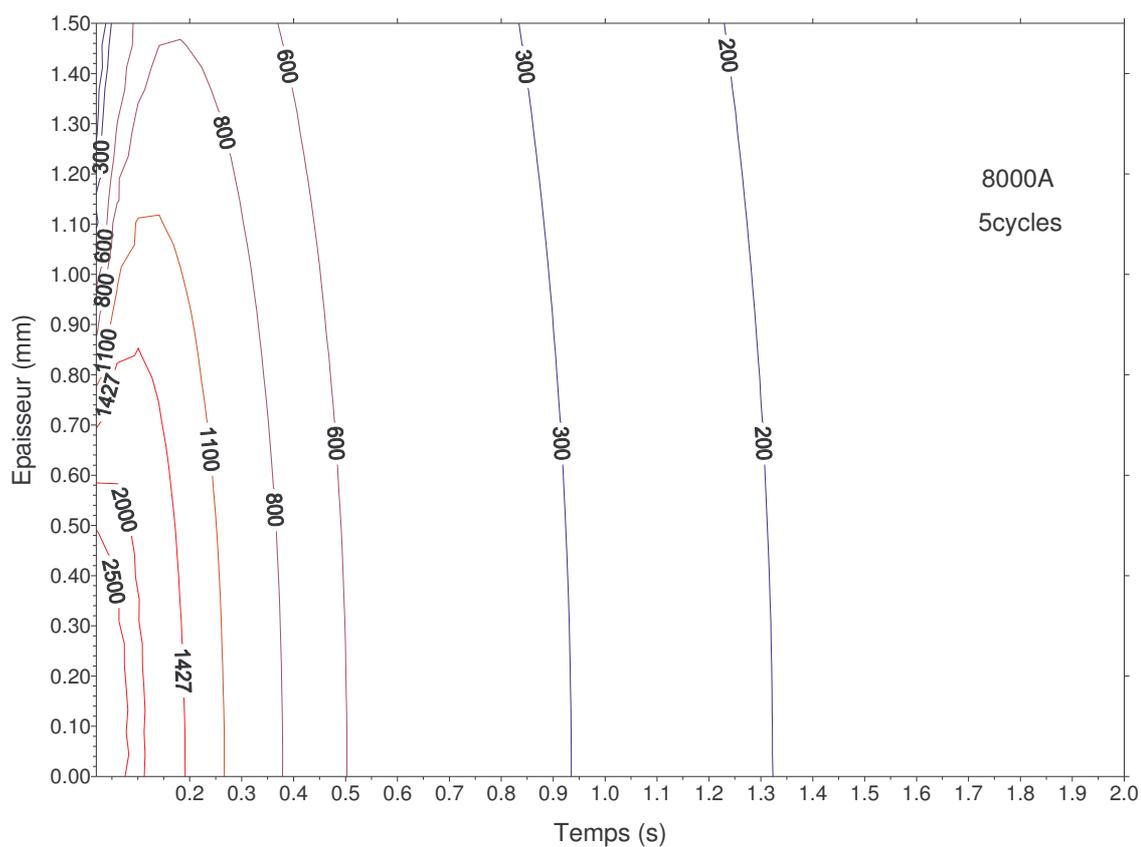


Fig. (A.17) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1.5mm

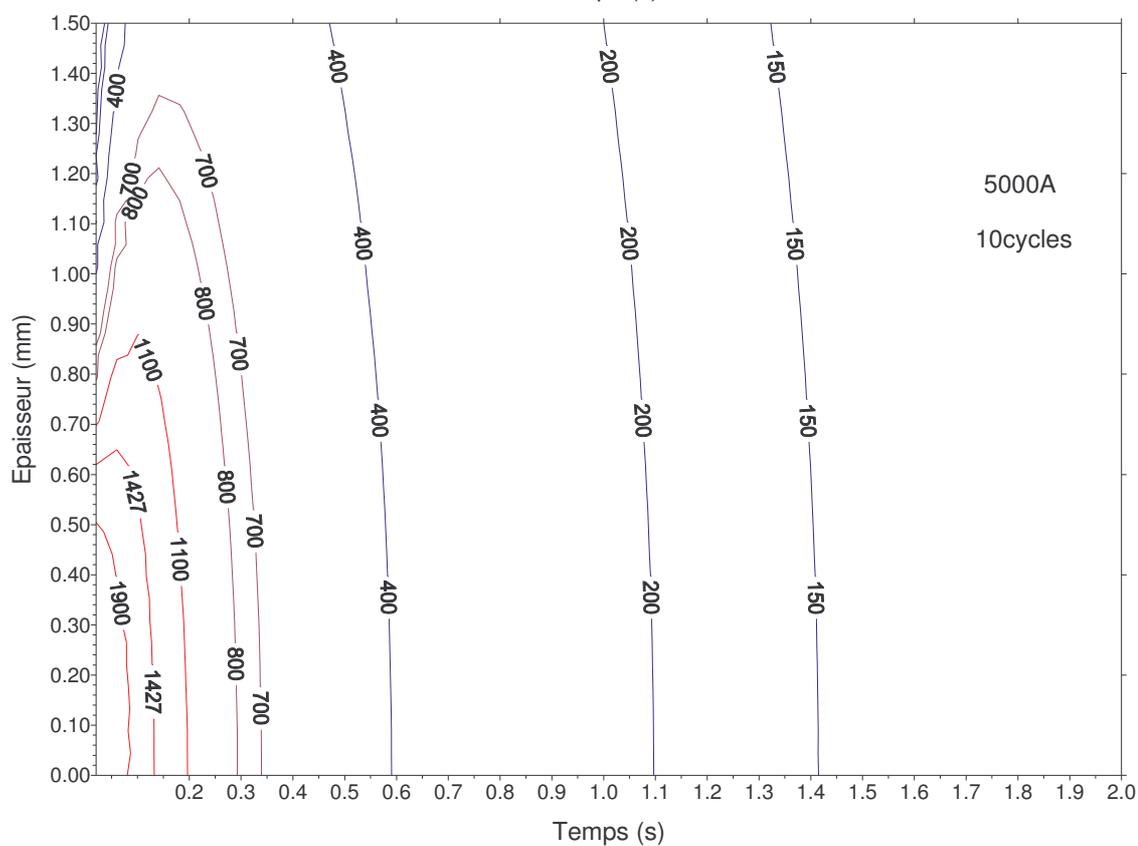
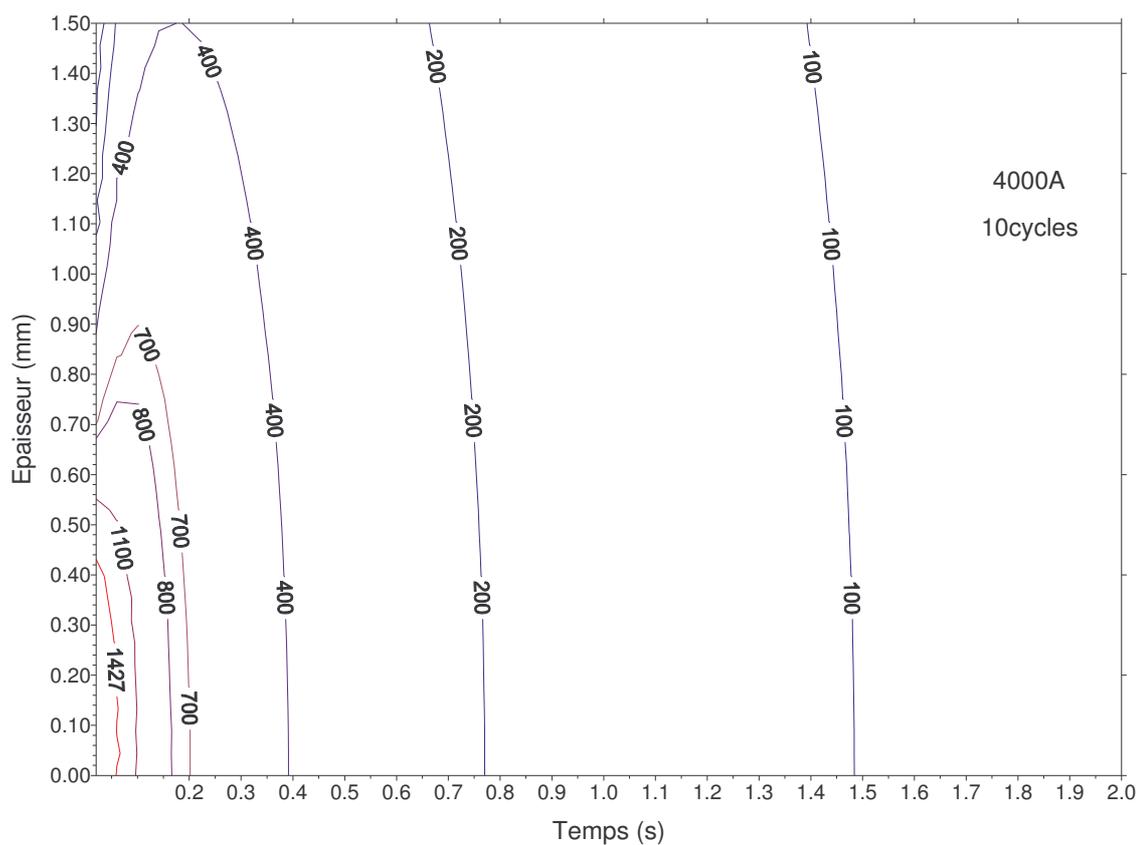


Fig. (A.18) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1.5mm

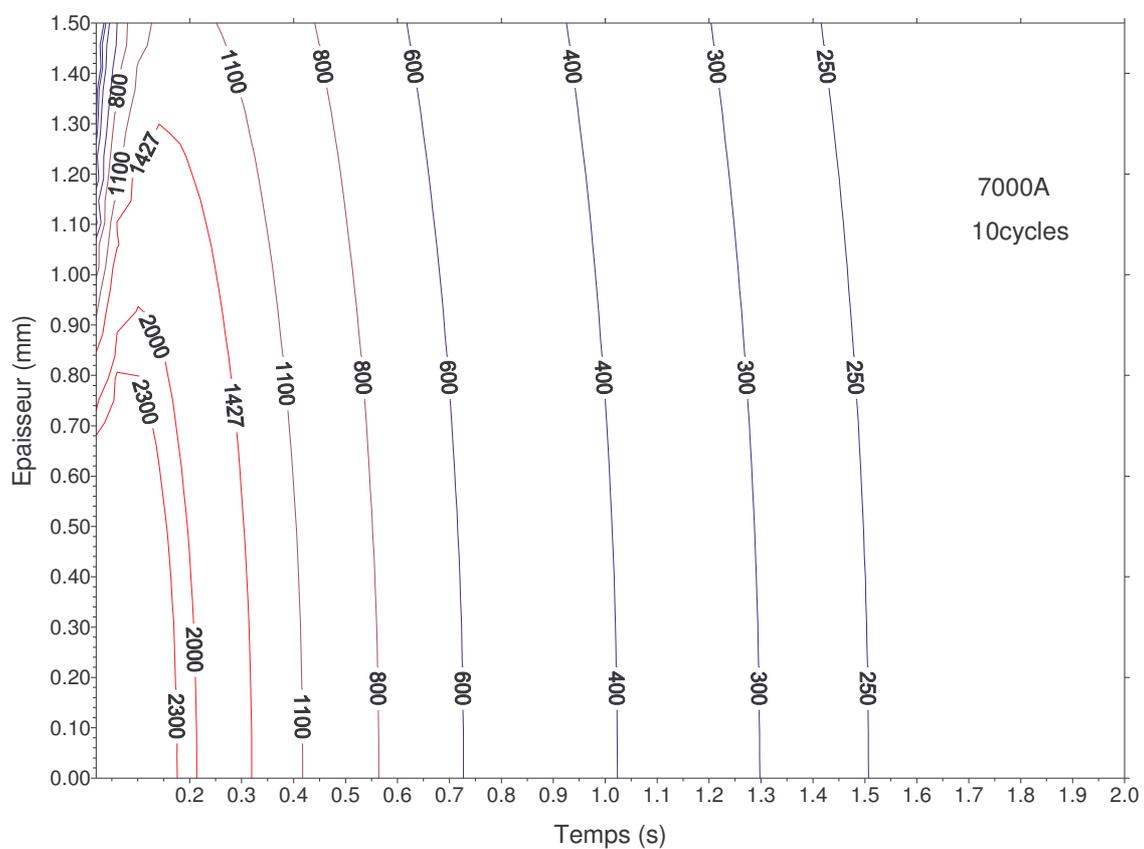
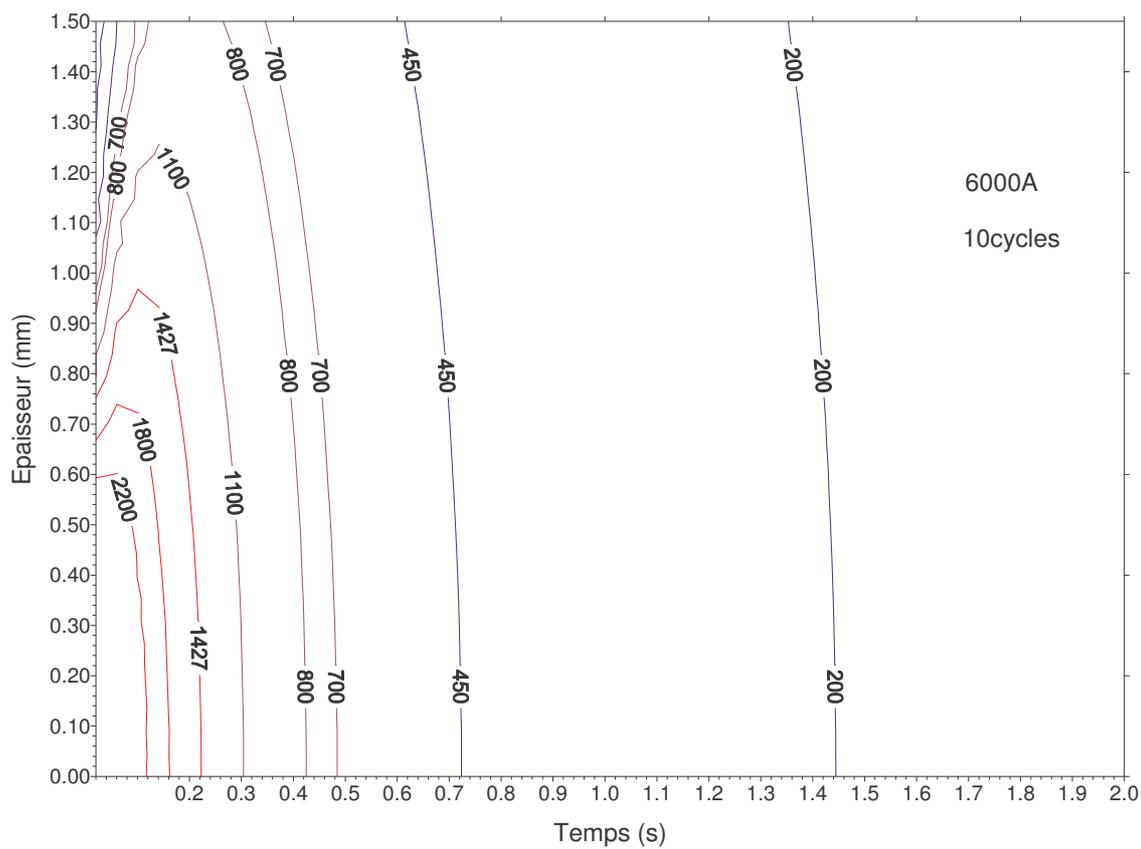


Fig. (A.19) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur =1.5mm

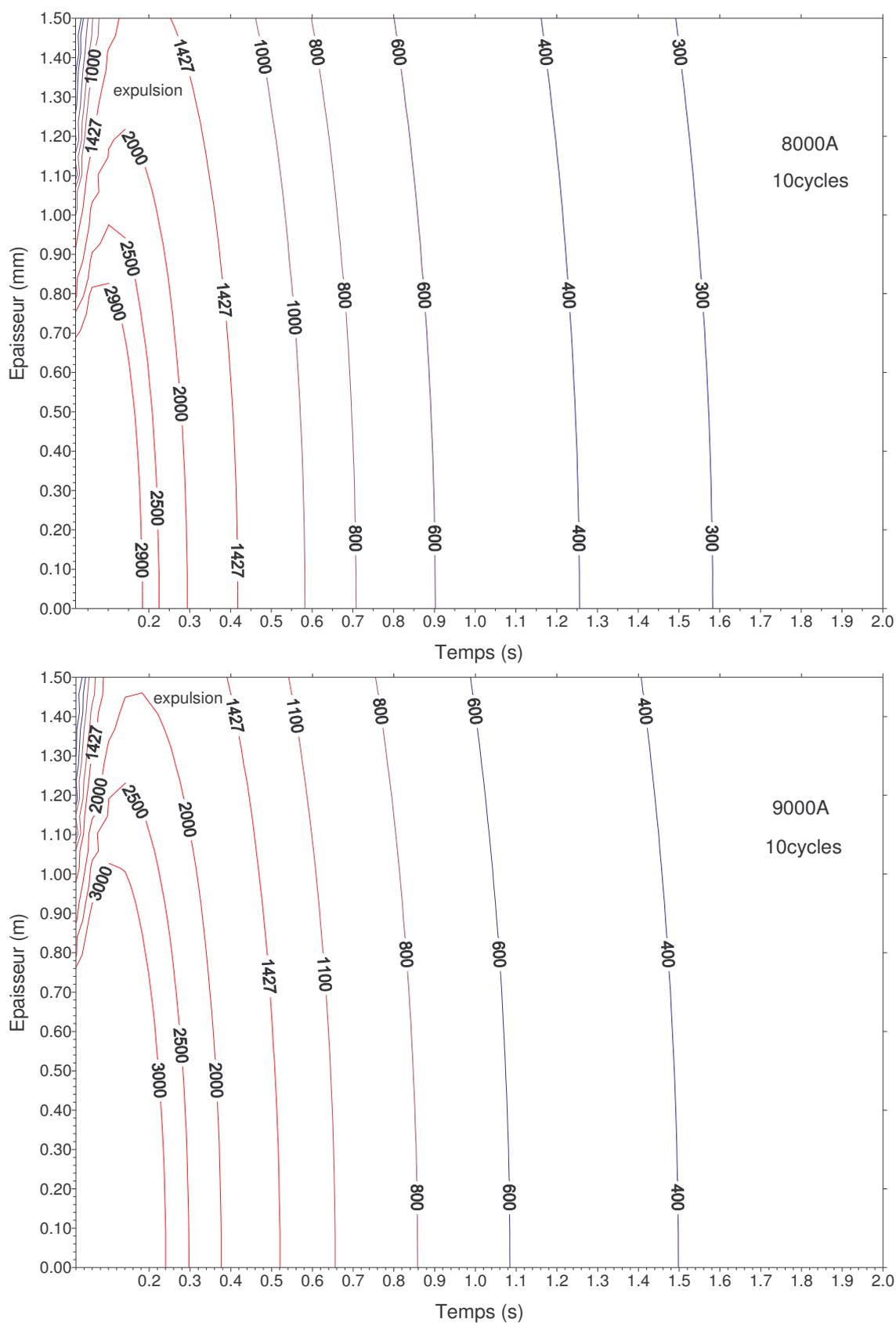


Fig. (A.20) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur =1.5mm

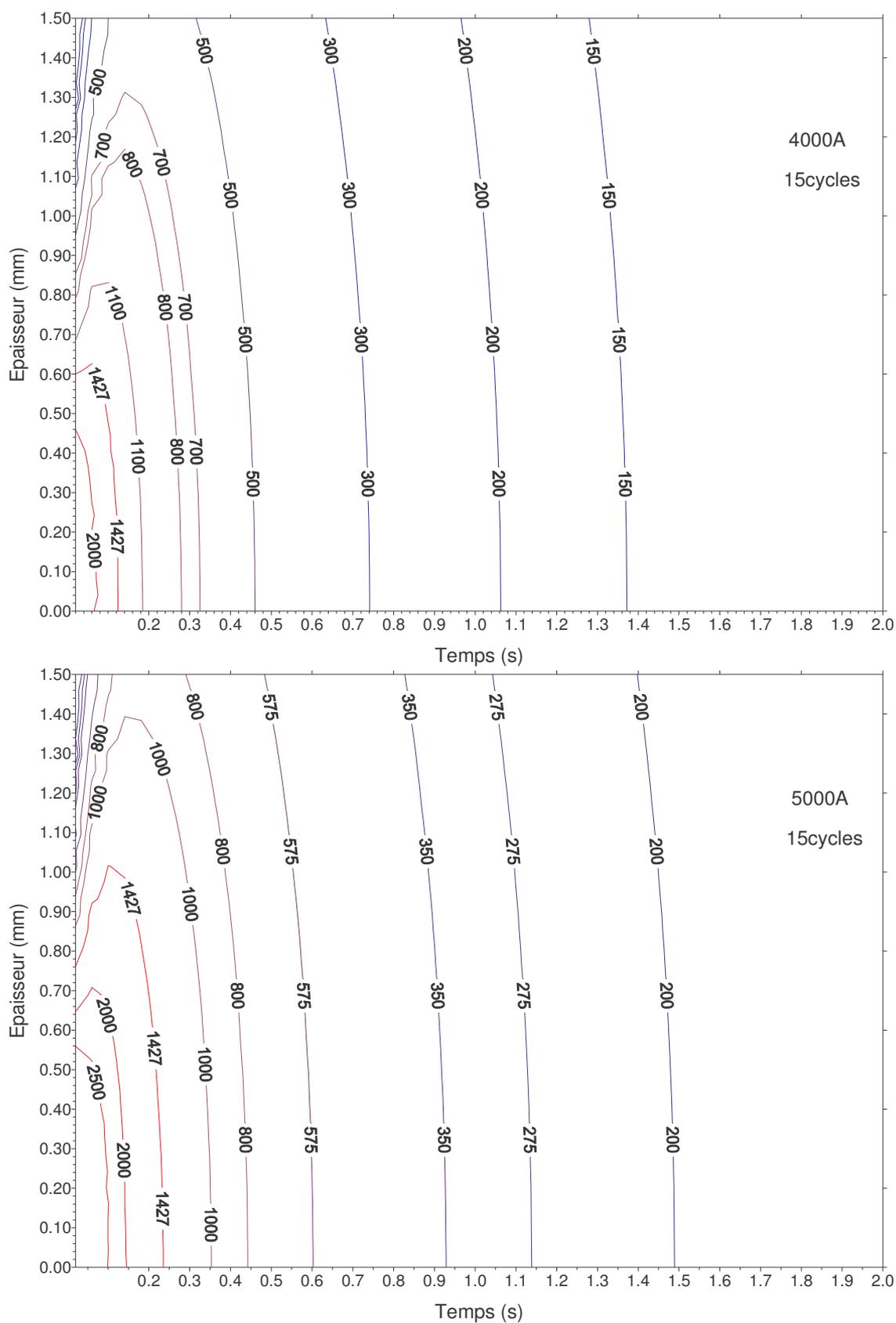


Fig. (A.21) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1.5mm

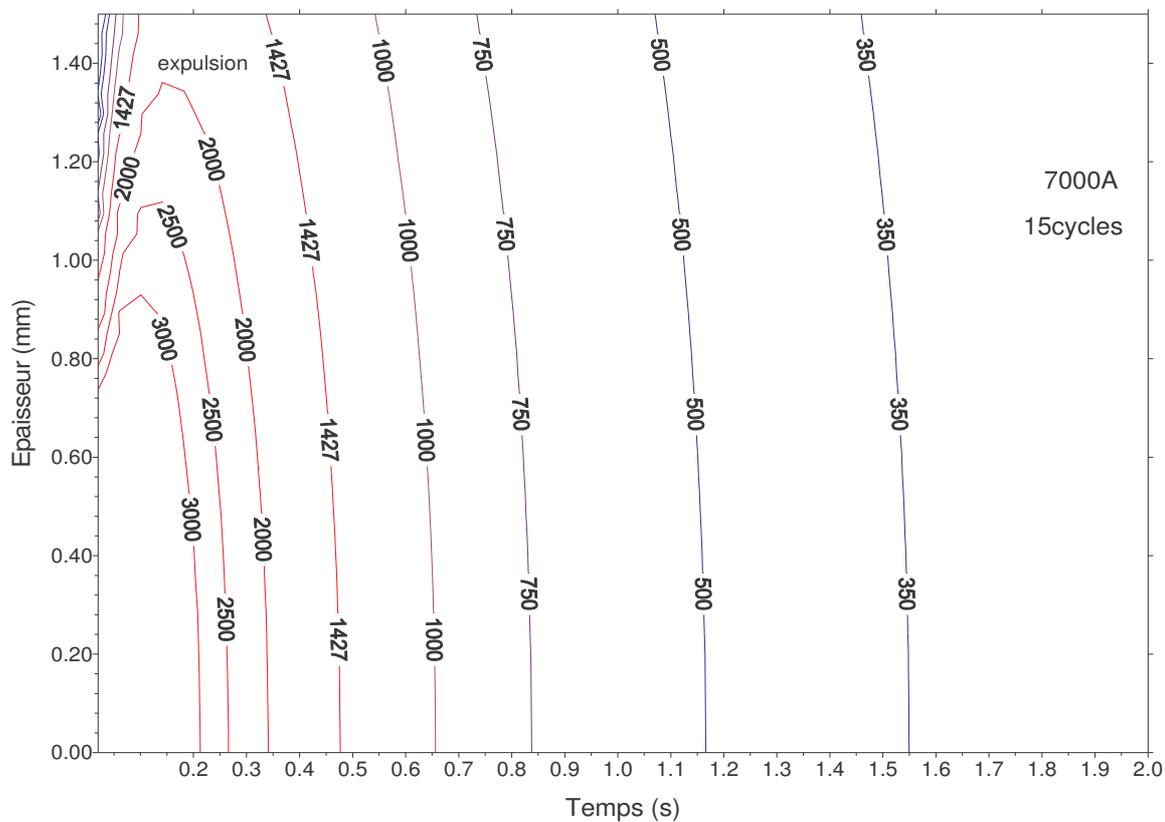
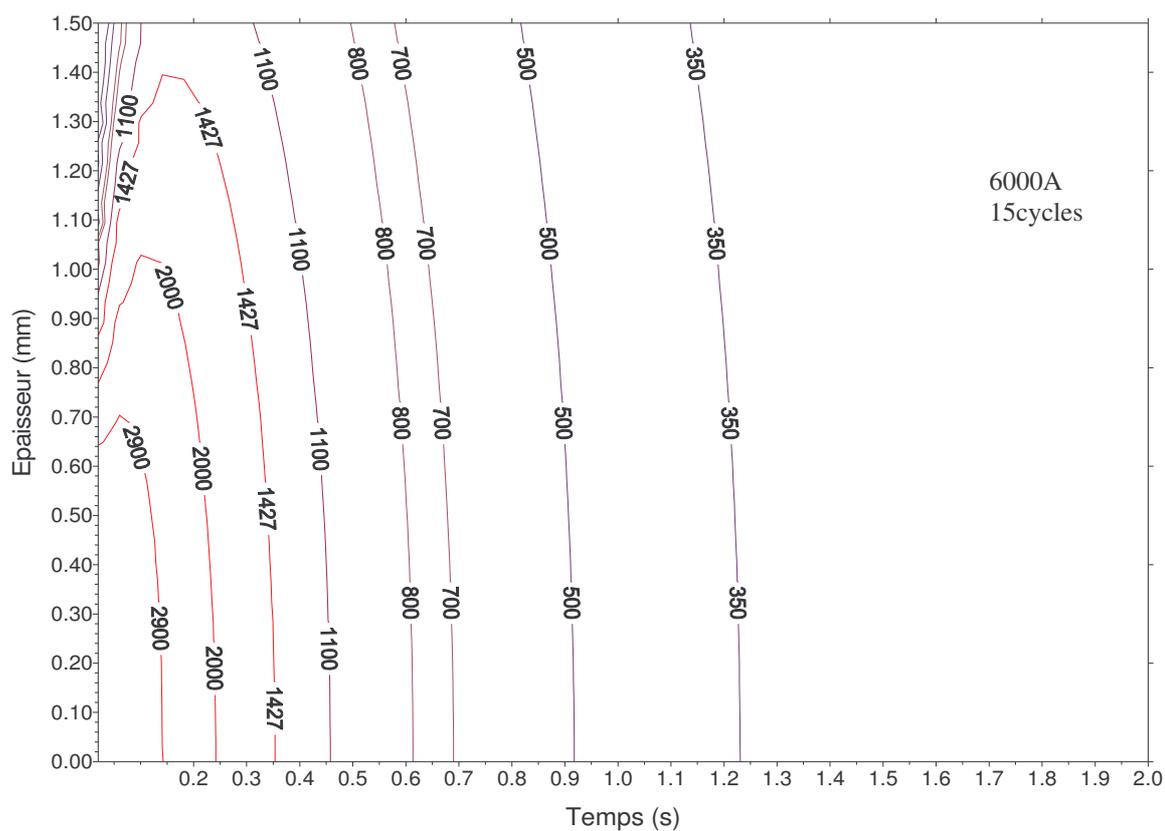


Fig. (A.22) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1.5mm

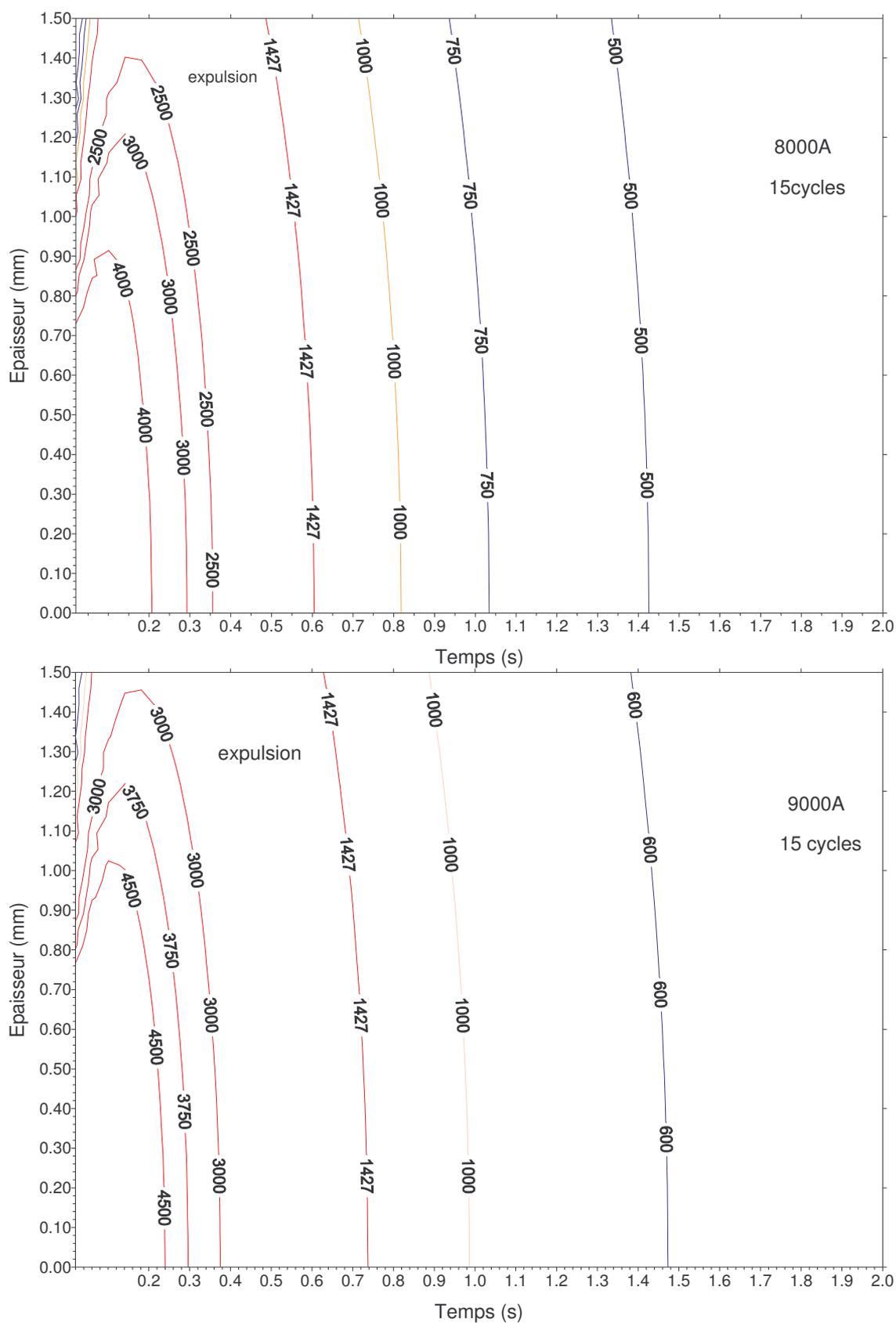


Fig. (A.23) Représentation des isothermes le long de l'épaisseur lors d'une séquence de soudage par point des deux Tôles d'épaisseur = 1.5mm

REFERENCES

1. BOWDEN, F et WILIAMSON, J «Electrical conduction in solid; influence of the passage of current on the contact between solids. » Welding journal: (1958).
2. GREENWOOD, J et WILIAMSON, J «Theory of temperature dependent conductors. » Welding journal: (1958).
3. ARCHER, G « calculation of the temperature response in spot welds. », Welding journal: (1960).
4. GREENWOOD, J « temperature in spot welding. », Welding journal: August (1961).
5. BENTLEY, K et GREENWOOD, J « Temperature distribution in spot welds. », Welding journal: (1963).
6. RICE, W et FUNK, E «An analytical investigation of the temperature distribution in spot welding», Welding journal: (1967).
7. JHONSON, K et NEEDHAM,J « New design of resistance spot welding machine for quality control. », Welding journal: (1972).
8. HOUCHENS, D « Numerical modelling of resistance spot welding, numerical modeling of manufacturing processes. », Welding journal: (1977).
9. KAISER, J et EAGER «The effect of electrical resistance on nugget fomation durinnng spot welding. », Welding journal: (1982).
10. NIED, H «The finite element modeling of the resistance spot welding process. », Welding journal: (1984).
11. GOULD, J « An examination of nugget development during spot welding, using both experimental and analytical techniques. », Welding journal: (1987).
12. EAGER et KIM « Parametric study of heat flow during resistance spot welding. », Welding journal: (1988).

13. CHO, H et CHO, Y « A study of thermal behavior in resistance spot welds. », Welding journal: (1989).
14. SHEPPARD, S «Thermal and mechanical simulation of resistance spot welding. », Welding journal: (1990).
15. VOGLER, M et SHEPPARD, S «Electrical contact resistance under high loads and elevated temperatures. », Welding journal: (1993).
16. NA,J et PARK,W «A theoretical study on electrical and thermal response in resistance spot welding », Welding journal: (1996).
17. YEUNG, K et THORNTON, P « Transient thermal analysis of spot welding. », Welding journal: (1999).
18. CHO, Y et RHEE, S «Experimental study of nugget formation in resistance spot welding », Welding journal: (2003).
19. R. BAUS , W. CHAPEAU « Application du soudage aux constructions», Eyrolles Editeur: (1979).