
EVALUATION EXPERIMENTALEMENT DE LA FORMATION DU NOYAU

Sommaire

2.1	Généralité sur les Essais de Soudage par Point :.....	47
2.2	Contexte d'Etude :.....	47
2.3	Moyens Expérimentaux :.....	47
	Machine de Soudage :.....	47
	Types de Courant de Soudage :.....	49
	Signaux de Soudage :.....	50
	Produits et Caractéristiques Mécaniques des Tôles :.....	52
	Électrodes :.....	52
	Conditionnement des Electrodes :.....	53
	Aptitude de Soudage :.....	53
	Essais Usuels Destructifs :.....	54
2.4	Résultats et Discussion :	57
	Cinétique de la Formation du Noyau – Une Revue :.....	57
	Développement du Noyau dans l'Assemblage Homogène des 2 Tôles :.....	60
	Développement du Noyau dans l'Assemblage Homogène des 3 Tôles :.....	61
	Développement du Noyau dans l'Assemblage Hétérogène :.....	62
	Influence de l'Effort :.....	64
	Influence des Types d'Électrode :.....	65
	Influence du Diamètre de la Face Active d'Électrode :.....	66
	Influence de la Polarisation :.....	67
	Qualité de la Surface d'un Assemblage :.....	70
	Influence du Revêtement :.....	70
2.5	Conclusions :.....	78

To obtain the welding parameters for numerical simulation and study weld development, thirty-nine sheet configurations are welded with parameters given according to the welding standard. Parameters of the upper welding lobe before the expulsion is considered in all cases. MFDC and AC currents are used for the welding tests. Macro-photography technique is utilized for the weld geometry development observation.

It is revealed that nugget starts forming differently and depends on sheet configuration. However, the nugget originates at the sheet/sheet interface due to higher contact resistance. Influences of welding parameters and that of electrode types found from the experiments are also presented in this chapter. It is found that stackup-sheet welding requires lower current comparing to that of two-sheet or thinner-sheet configuration while retaining other parameters. Welding coated-sheet configuration requires higher current than that of uncoated sheet configuration. Welding with curved face electrode uses lower current than that with flat face electrode. In addition, the electrode face profile governs the contact size at the interfaces. Influence of using MFDC as a welding current is also studied this chapter.

2.1 Généralité sur les Essais de Soudage par Point :

Pour obtenir des paramètres de soudage à large domaine de soudabilité, il convient d'abord d'adopter la démarche des essais de soudage, qui concerne les phénomènes et la cinétique de développement du noyau ainsi que l'influence des paramètres. Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les moyens expérimentaux utilisés pour des essais de soudage, et pour observer la cinétique de la formation du noyau en cas de l'assemblage des tôles d'acier bas carbone revêtue et non. Les essais pratiques de soudage par point effectués au CRDM sont :

- ❖ l'essai pour déterminer l'aptitude, ou le domaine de soudabilité,
- ❖ l'essai de dégradation d'électrode,
- ❖ et les essais destructifs pour évaluer la tenue mécanique et pour quantifier la taille du noyau.

2.2 Contexte d'Etude :

Cette étude se centre sur la cinétique de développement du noyau dans l'assemblage des tôles fines ainsi que des tôles épaisses. Les objectifs des essais sont de :

- ❖ comprendre la cinétique du développement du noyau ainsi que celle de la ZAT dans l'assemblage homogène et hétérogène par la technique macrophotographique,
- ❖ obtenir des paramètres de soudage et introduire ceux-ci au modèle aux éléments finis,
- ❖ mettre en évidence l'influence des paramètres de soudage sur la caractéristique de la formation de la soudure.

2.3 Moyens Expérimentaux :

Machine de Soudage :

La machine de soudage pour réaliser la plupart des essais est une machine de soudage par points « ARO » actionnée sur pied par l'utilisateur. Cette machine est utilisée pour réaliser le point soudé des tôles d'acier bas carbone. Une autre machine est de marque « SCIAKY » (§ Fig. 2.1a), qui se distingue essentiellement de ARO par un système pneumatique différent, à base de membranes, qui permet une réponse plus rapide aux sollicitations mécaniques, donc une plus grande souplesse mécanique axiale.

Grâce à cette caractéristique mécanique, SCIAKY est utilisée pour souder l'assemblage d'acier haute résistance mécanique de forte épaisseur.

Dans cette étude, on n'utilise que la soudeuse ARO, (§Fig. 2.2a), pour souder des tôles d'acier bas carbone de nuance IF ou ES. Les conditions de soudage définies dans la norme-[NFA87-001] ont été prises pour réaliser des essais. Les signaux enregistrés en cour de soudage sont l'effort, l'intensité, le déplacement relatif entre deux électrodes, et la tension entre les bornes d'électrodes.

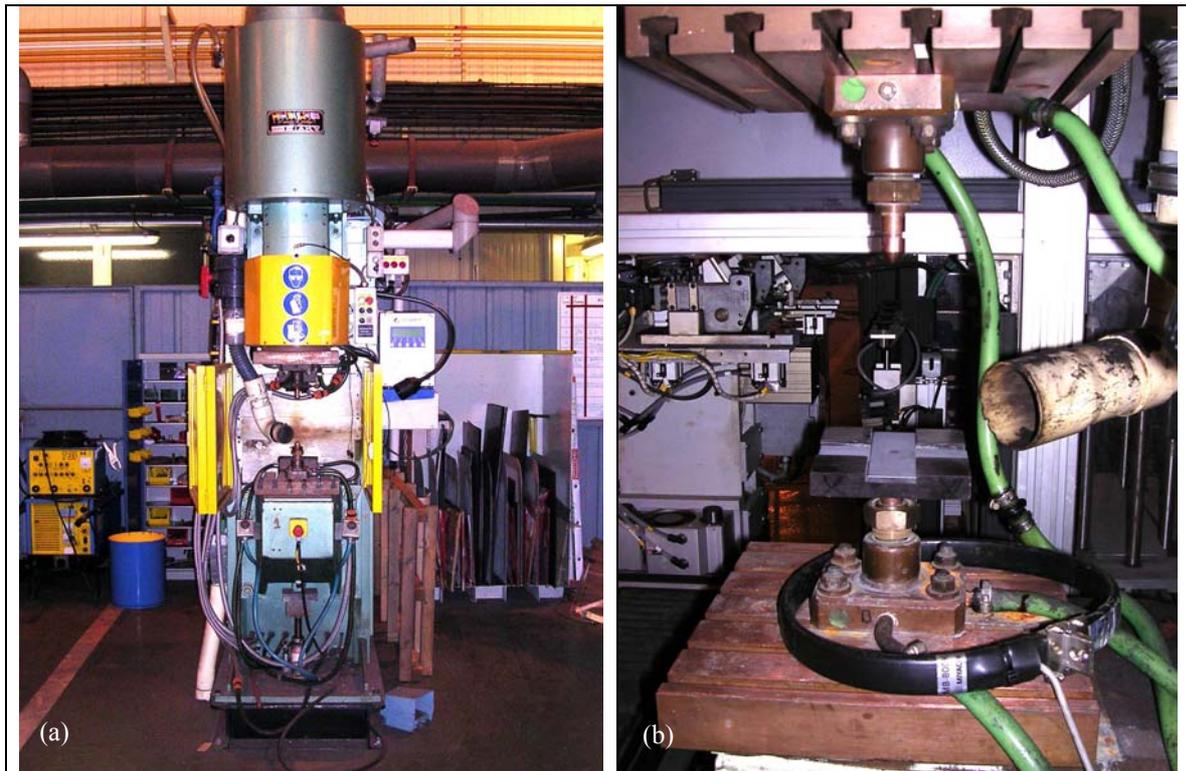


Fig. 2.1: Appareillage d'essai de soudage par points : a) Machine de soudage «SCI AKY», b) Eprouvette de traction en croix entre deux électrodes



Fig. 2.2: Appareillage d'essai de soudage par points : a) Machine de soudage «ARO», b) Acquisition de signaux de soudage «Labview» et current signal checker «Miyashi »

L'enregistrement de ces signaux en cours de soudage est directement effectué par le logiciel Labview. Lorsqu'on soude avec un courant pulsé, il est nécessaire d'équiper le vérificateur Miyashi pour calculer l'amplitude de l'intensité efficace. Celui-ci est nécessaire en cas de souder avec la pulsation du courant.

Types de Courant de Soudage :

Pour le soudage par points, les deux modes de courant utilisés sont:

- ❖ un courant alternatif de 50Hz,
- ❖ un courant continu obtenu en redressant un courant alternatif de 1000Hz, (MFDC-Medium Frequency Direct Current)

Il s'agit de paramètre décisif de ce procédé car il intervient au carré dans l'énergie dissipée par effet Joule. Modifier la quantité d'énergie reçue par le système revient à jouer sur l'intensité efficace et sur le temps de passage de courant. Ce dernier est souvent exprimé en périodes. Le courant utilisé étant à la fréquence de 50Hz, le temps de soudage d'une période est égale à 0,02 secondes. Précisons qu'aux Etats-Unis, la fréquence étant de 60Hz, le temps de soudage est à modifier par conséquence.

Courant Alternatif de 50Hz :

Le type de courant le plus utilisé est un courant monophasé à basse fréquence de 50 Hz. Les générateurs fonctionnent en générateurs de courant, c'est-à-dire, ils peuvent réguler l'intensité efficace sur une consigne, mais de faire en sorte que la moyenne de toutes ces valeurs efficaces soit égale à l'intensité nominale.

Pour la machine ARO, le réglage de l'énergie électrique fournie peut être modifié de trois manières :

- ❖ la modification de la tension au primaire,
- ❖ le changement du rapport de bobinage primaire/secondaire au niveau du transformateur, ce qui revient à modifier la tension au secondaire,
- ❖ et la suppression d'une partie du courant à l'aide d'un gradateur de courant. En jouant sur le rapport entre durée de fermeture des thyristors et demi-période de soudage, on fait varier l'intensité efficace du circuit primaire et donc du circuit secondaire.

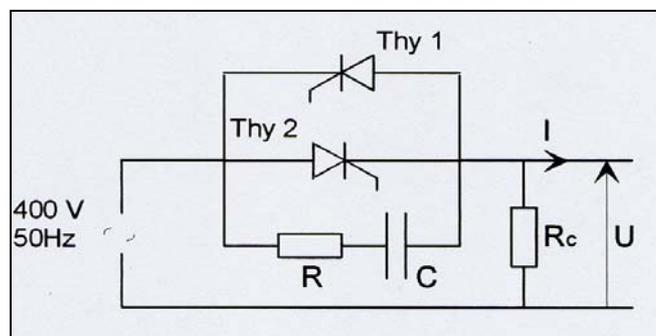


Fig. 2.3: Circuit de puissance de 50Hz de la machine « ARO »-[AR0]

La soudeuse est équipée d'un système de régulation de l'intensité efficace à base d'un pont de thyristors inclus dans le circuit primaire, (§Fig. 2.3). Un thyristor est un composant électronique, qui sous la tension négative est bloquant, et sous la tension positive est passant à partir de moment où un signal électrique d'allumage lui est envoyé par un troisième pôle. En l'absence d'allumage, le thyristor est donc un isolant parfait. Les thyristors du pont sur la Fig. 2.2 sont allumés par le régulateur à chaque fois qu'ils sont tension positive. Toutefois, le système de régulation laisse chaque thyristor bloquant un certain temps avant de l'allumer, donnant au signal de sortie une allure découpée, (§Fig. 2.4). Un condensateur dans le circuit limite le saut d'intensité à l'allumage des thyristors.

A intensité nominale égale, l'intensité efficace délivrée est donc réglée par cette portion de temps où les thyristors sont passants, i.e. le pourcentage d'ouverture des thyristors. Afin de ne pas trop modifier l'allure générale sinusoïdale de la courbe d'intensité, la norme [NFA 87-001], impose un taux d'ouverture des thyristors tel que l'intensité efficace soit au moins égale à 70% de l'intensité efficace de l'onde pleine. La régulation s'effectue à chaque période de soudage.

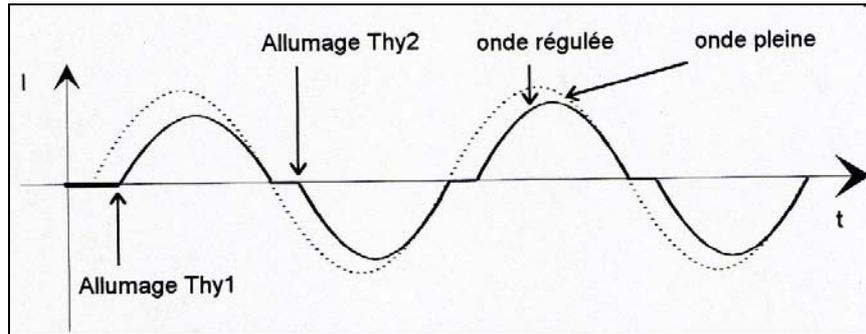


Fig. 2.4: Régulation d'intensité par un pont de thyristors

Courant Continu de 1000Hz :

Un autre type de courant est le courant continu moyenne fréquence redressé (MFDC-1000Hz). A cette fréquence, le courant alternatif redressé peut être assimilé à un courant continu. Cette solution a été initialement développée pour le soudage des alliages d'aluminium. En cas d'acier, on attend souvent des bons résultats, tant au niveau de la consommation d'énergie électrique qu'au niveau de la durée de vie des électrodes. Le soudage avec le courant continu permet d'éliminer l'oscillation de l'effort pendant la phase de soudage.

L'utilisation du MFDC n'est possible que sur la machine de ARO. Pour une même configuration d'assemblage, la durée ainsi que l'effort de soudage sont les mêmes qu'en cas du courant alternatif 50Hz. La norme ne distingue ni une différence des procédures de soudage, ni une modification des paramètres par rapport le courant alternatif.

Selon la norme, la durée de passage du courant est recommandée de façon précise. Celle-ci dépend des caractéristiques mécaniques des tôles, de leur épaisseur ainsi que de la présence de l'épaisseur du revêtement. Elle se situe entre 5 périodes pour des tôles nues de 0,5-mm d'épaisseur et 18 périodes pour des tôles revêtues de 1,2-mm d'épaisseur. En cas de tôles plus épaisses, le courant est appliqué en plusieurs pulsations séparées par des « temps froids » de 2 ou 3 périodes. Malgré la durée du procédé plus longue, la pulsation du courant a d'avantage pour un meilleur contrôle de l'apport calorifique et donc une stabilisation pour le développement du noyau.

Signaux de Soudage :

Les signaux enregistrés en cours l'essai par le logiciel Labview sont :

- ❖ signal d'effort,
- ❖ signal d'intensité,
- ❖ signal de déplacement relatif entre deux électrodes,
- ❖ signal de tension.

Pour la condition de soudage avec une seule pulse de 8 ou de 10 périodes, le calcul de l'intensité efficace se fait sur la totalité du temps de soudage, ' T ', utilisant le signal checker Miyashi®. L'intensité efficace peut être vérifiée soit sur la fenêtre de ARO, ou soit par le enregistrement sur le papier de Miyashi®.

La tension, ' U_{eff} ', et l'intensité efficaces ' I_{eff} ', qui peuvent être exprimées :

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t).dt} \quad [2.1]$$

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t).dt} \quad [2.2]$$

Il est alors possible de calculer l'énergie, ' E ' :

$$E = \int_0^T U(t).I(t)dt \quad [2.3]$$

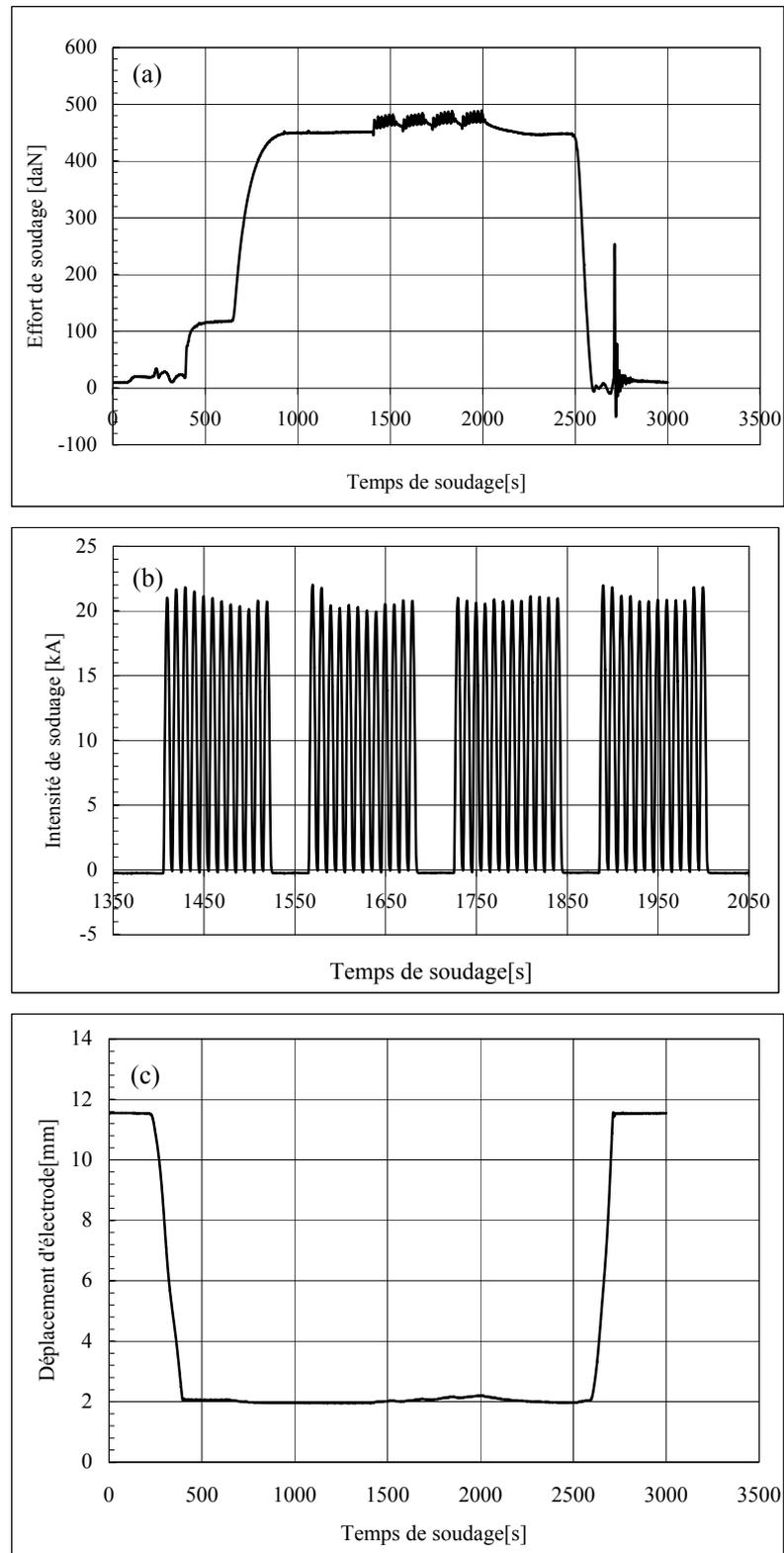


Fig. 2.5: Acquisition des signaux du courant alternatif 50Hz pulsé sur la fenêtre de Labview de la machine ARO :
a) Effort de soudage, b) Intensité absolue de soudage, i.e. la valeur positive, et c) Déplacement relatif entre deux électrodes

Produits et Caractéristiques Mécaniques des Tôles :

Le repérage et les caractéristiques du produit d'acier bas carbone utilisés sont dans le tableau 2.1 :

Tableau 2.1: Repérage produits utilisé dans les essais de soudage

Repère	Substrat	Description	Epaisseur (mm)	Revêtement
				Epaisseur (µm)
1	IF-Ti	Tôle de rodage	0.8	nue
2	ES	Tôle de rodage	2.0	nue
3	IF-Ti	XES (JR7)	2.0	GZ/10µm/ 2-faces
4	ES	Tôle de rodage	2.0	nue

Les compositions chimiques des produits IF et ES sont dans le tableau 2.2. Les tôles avec l'état de surface brute de finition sont utilisées pour la cadence d'électrode et les essais de soudage.

Tableau 2.2: Composition chimique de produits en masse (10^{-3} %)

Rep.	C	Mn	P	S	Si	Al.	Ni	Cr	Cu	Ti	Ceq	Symbole
1	10,5	206,5	10,7	8	2,5	35,5	33,06	20	12,4	110	52,4	
2	40	280	10	10	10	50	40	20	30	1	97	
3	1,4	111	9	8,3	7	41	20	15	14	78	26,3	
4	29	196,8	7	10,1	7,8	36,1	16,3	54,1	7,4	1	75,5	

Note : $C_{eq,IIW} = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$ d'après-[BAI94]

Tableau 2.3: Caractéristiques mécaniques conventionnelle des tôles à froid

Rep.	Sens long			Sens travers		
	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A [%]	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A [%]
1	-	-	-	-	-	-
2	303,6	175,1	39,5	-	-	-
3	282	196	48,6	281	177	47,9
4	309,9	173,5	41,6	303,8	175,1	39,2

La première partie des essais est pour la tôle nue de ces nuances avec la comparaison des différents paramètres, et une étude sur la cinétique de formation de la soudure. Les paramètres principaux étudiés sont le diamètre de la face d'électrode, le type de la face d'électrode, et l'effort de soudage. On cherche l'intensité efficace maximale avant l'expulsion pour définir la condition du haut du domaine de soudabilité. Le nombre des cycles est préalablement fixé selon la norme.

Dans la deuxième partie, on utilise la démarche des essais comme le cas précédent pour étudier la soudabilité des tôles revêtues.

Électrodes :

Les électrodes utilisées dans les essais sont des électrodes tronconiques avec la face active hémisphérique de diamètre de 6 et 8-mm, qui sont respectivement les électrodes TH6 et TH8. Une électrode tronconique à face plate du CRDM a été également utilisée afin de comparer l'influence de la face active sur l'intensité efficace ainsi que sur la cinétique de la formation du noyau. Les électrodes à face plate de diamètre de 6-mm et 8-mm sont TP6 et TP8, (§Fig. 2.6).

Conditionnement des Electrodes :

Il s’agit d’un rodage des faces actives des électrodes avant commencer leur utilisations pour des essais. Le rodage d’électrodes se fait sur la tôle nue et la cadence dépend de l’épaisseur et de la caractéristique mécanique de la tôle. Le conditionnement des électrodes est pour :

- ❖ la correction des aspérités de la face active des électrodes
- ❖ et la correction des éventuels défauts d’alignement entre deux électrodes.

La condition de cadence d’électrode avant d’effectuer les essai est dans le tableau 2.4-[NFA87-001]:

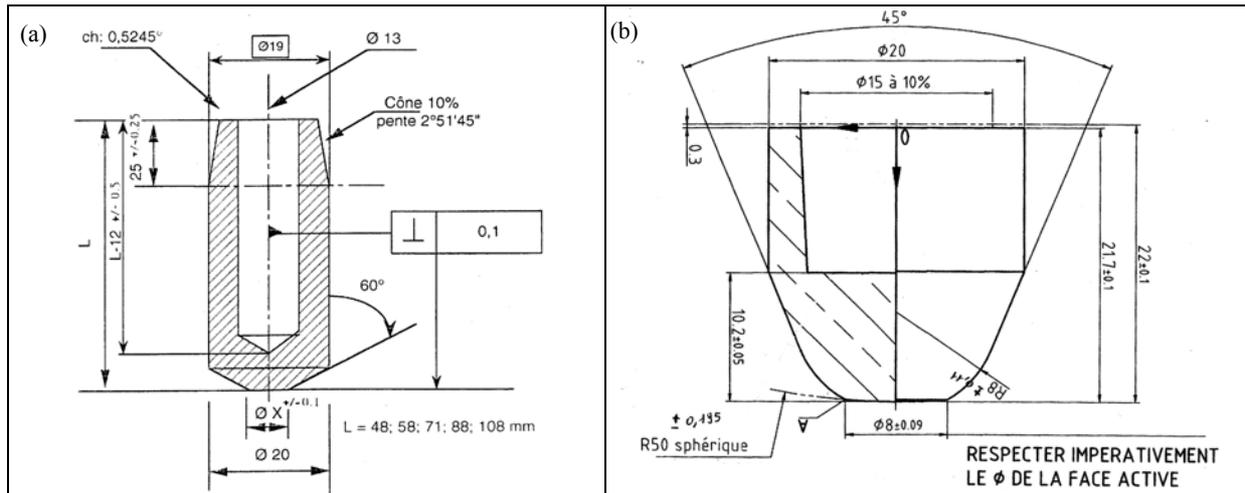


Fig. 2.6: Électrodes utilisées pour les essais de soudage, a) Électrode à face plate, TP, dont profil du CRDM, b) Électrode en forme tronconique à face hémisphérique de diamètre de 8-mm-TH8.

Tableau 2.4: Conditions de cadence d’électrodes

Epaisseur de tôle de rodage	0,8-mm	2,00-mm
Caractéristique de tôle de rodage	Acier extra doux (IF ou Calmé Alu)	Acier extra doux (IF ou Calmé Alu)
Effort de soudage	230 daN	450 daN
Temps de soudage	10 périodes (0,2 sec.)	4(6+2)
Intensité de soudage	7,50kA	11,50kA
Temps de maintien	10 périodes	15 périodes
Nombre de points	50	300
Vitesse de cadence	30 points/min	15 points/min

En ce qui concerne le courant pulsé, la condition de 4(6+2) indique qu’il y a 4 pulsations de chacune 0,12 secondes (6 périodes) de passage du courant et 0,04 secondes (2 périodes) pour le temps « froid », ou sans courant. La bande de la tôle de rodage est de 50x300-mm.

Aptitude de Soudage :

La recherche de l’intensité maximale, (i.e. haut du domaine de soudabilité), est obtenue avec un décalage de l’intensité de 0,5 kA jusqu’à l’expulsion. Lorsqu’une expulsion est détectée, l’intensité est diminuée par une modification de l’intensité de 0,2 kA par rapport à l’intensité d’expulsion. Avec une intensité trouvée sans l’expulsion, les trois coupons sont soudés en vérifiant des signaux de soudage. La dimension d’un coupon est de 50x50-mm. Pour l’étude cinétique de la soudure, la condition de soudage se modifie par l’usage de cycles interrompus programmés sur ARO.

En bas du domaine, il est nécessaire de déboutonner les éprouvettes et de mesurer le diamètre du noyau. Les critères des diamètres acceptables selon la norme s’applique dans ce cas, i.e. les assemblages homogènes d’épaisseur de 0,8 et de 2,0-mm, les diamètres acceptables du noyau sont de 4 et de 6-mm, respectivement.

Les paramètres du soudage utilisés sont dans les tableaux 2,5-6.

Essais Usuels Destructifs :

Généralité :

Les tests de déboutonnage au burin ou au marteau sont très utilisés pour leur simplicité et fournissent une image souvent exacte de la qualité du point soudé. Ce sont ces deux tests qui sont le plus souvent utilisés chez les constructeurs automobiles. Les essais de traction/cisaillement, de traction en «croix» et de traction en «U» permettent de déterminer les lois de comportement statique du point de soudure. Enfin, les essais de fatigue ne donnant pas assez d'indication sur les lois de comportement dynamique, un nouvel essai, l'essai de traction par choc, a été récemment développé. Cet essai permet d'analyser d'une façon fine les mécanismes de la rupture fragile et donne accès aux lois de comportement dynamique dans des conditions proches de celles des «crash-test». L'essai de traction par choc est basé sur la compétition entre un mécanisme de rupture fragile initiée au niveau de l'entaille d'une éprouvette et un mécanisme de rupture ductile lorsque la rupture intervient dans la partie lisse de cette même éprouvette.

Pour déboutonner une série de points. On utilise une machine communément appelée «les dents de la mer», (§Fig. 2.8), qui permet de déboutonner le bande avec un maximum de 10 points. L'éprouvette est un assemblage de deux tôles, qui est de 5-mm de large et 33-mm de long pour une bande de contrôle.

La machine de dents de la mer fonctionne en écartant les deux tôles par un système hydraulique. Les points soudés sont sollicités principalement en traction, et puis déboutonnés. Cependant, la charge d'écartement non symétrique provoque une perte de deux points situés aux extrémités de la bande. Le diamètre des boutons est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse muni de becs adaptés.

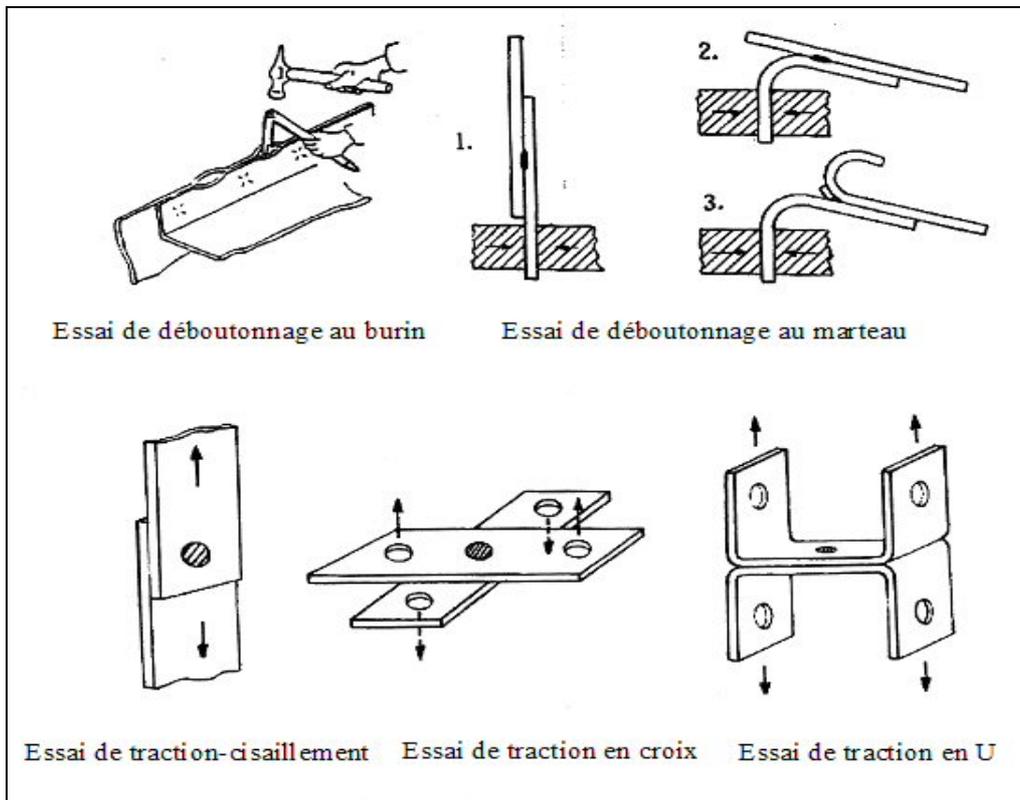


Fig. 2.7: Différente technique pour l'évaluation de la taille du noyau et celle du comportement mécanique du point soudé



Fig. 2.8: Technique de déboutonnage des série de points soudés, a) Machine de déboutonnage «les dents de la mer», et b) Représentation d'une bande de contrôle pour l'essai de dégradation des électrodes

Tableau 2.5: Essais réalisés pour l'assemblage des tôles nues. Conditions de soudage basées sur la norme NFA-87-001

Condition de soudage		Intensité [kA-Type/N° des pulses]	Effort [daN]	Remarques
Electrode	Configuration			
1) TH6		8,6-DC/1(10)	230	*
2) TH6		8,6-DC/1(10)	250	*
3) TH6		8,8-DC/1(10)	300	*
4) F16		9,2-DC/1(10)	230	*
5) F16		10,2-DC/1(10)	300	*
6) TP6		9,8-DC/1(10)	230	*
7) TP6		9,8-DC/1(10)	300	*
8) TH6		9,2-DC/4(6+2)	400	*
9) TH6		9,5-DC/4(6+2)	450	*
10) TH8		11,2-DC/4(6+2)	400	***
11) TH8		12,4-DC/4(6+2)	450	*
12) TH6		8,7-DC/1(8)	230	*
13) TH6		8,2-DC/1(8)	270	*
14) TH6		8,7-DC/1(8)	270	*
15) TH8		8,8-DC/1(8)	230	*
16) TH8		9,1-DC/1(8)	230	*
17) TH6		8,0-DC/1(8)	250	*
18) TH6		8,4-DC/1(8)	300	*
19) TH6		7,4-DC/1(8)	230	*
20) TH6		7,4-DC/1(8)	230	*
21) TH6		7,6-DC/1(8)	230	*
22) TH6		7,8-DC/1(8)	230	*
23) TH8		10,6-DC/4(6+2)	450	**
24) TH6		9,2-DC/4(6+2)	450	*
25) TH6		8,0-DC/1(8)	230	*

Tableau 2.6: Essais réalisés pour l'assemblage des tôles revêtues. Conditions de soudage basées sur la norme NFA-87-001

Condition de soudage		Intensité [kA-TypeN° des pulses]	Effort [daN]	Remarques
Electrode	Configuration			
26)	TP8	15,43-AC/4(6+2)	350	*
27)	TH8	12,72-AC/4(6+2)	450	**
28)	TH8	11,85-AC/4(6+2)	350	*
29)	TP8	16,28-AC/4(6+2)	450	*
30)	TP8	15,41-AC/4(6+2)	450	*
31)	TH8	13,23-AC/4(6+2)	350	*
32)	TH8	14,23-AC/4(6+2)	450	**
33)	TP8	14,19-AC/4(6+2)	450	*
34)	TH6	9,64-AC/4(6+2)	450	*
35)	TP8	16,53-AC/4(6+2)	450	*
36)	TP8	15,29-AC/4(6+2)	450	*
37)	TH8	12,0-AC/4(6+2)	450	*
38)	TH8	11,80-AC/4(6+2)	450	*
39)	TH8	12,29-AC/4(6+2)	450	*

Nota * : Etude cinétique pour le développement du noyau.
 ** : Validation de la taille et de la géométrie de la soudure.
 *** : Etude pour l'influence des données entrées électrothermiques sur la taille du noyau

2.4 Résultats et Discussion :

Cinétique de la Formation du Noyau – Une Revue :

Il s'agit d'une étude pour comprendre la cinétique de la formation du noyau en cas de différents assemblages avec différents paramètres. Nous rappelons que la condition de soudage indiquée est celle en haut du domaine de soudabilité. L'expulsion est vérifiée par une observation de signal d'effort de soudage sur la fenêtre de Labview.

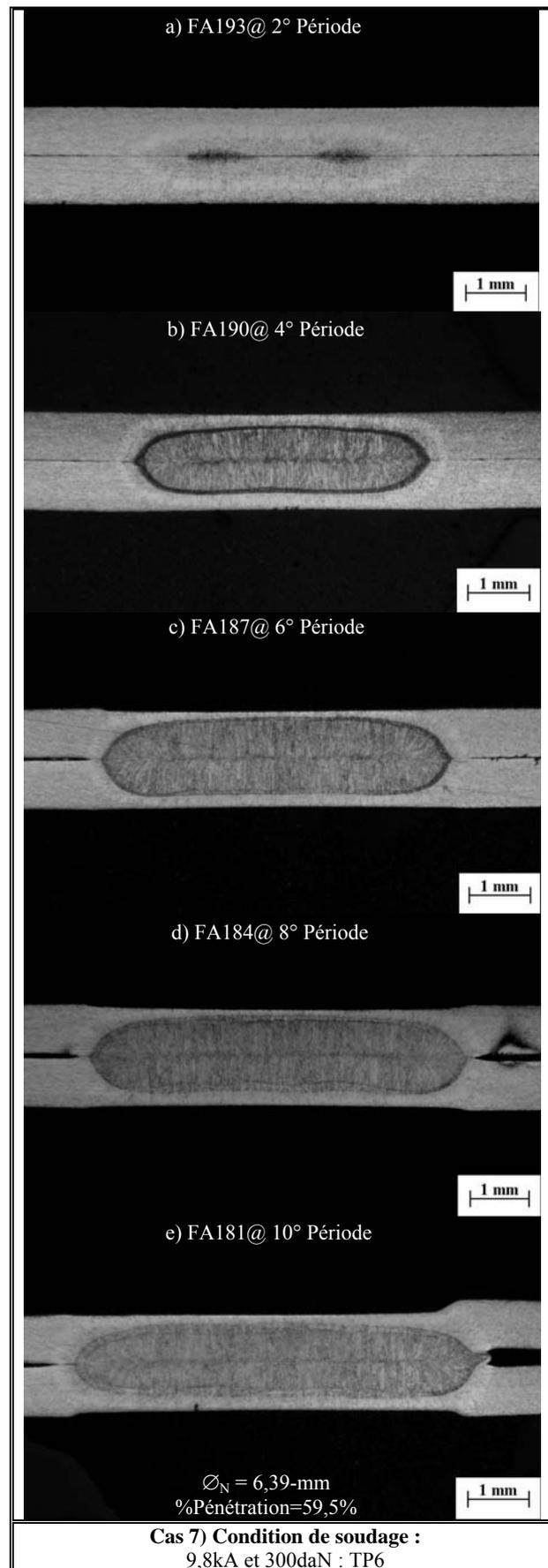


Fig. 2.9: Cinétique de la formation du noyau dans le cas n° 7 pour un assemblage de deux tôles, (tôle d'acier IF de 0,8-mm d'épaisseur)

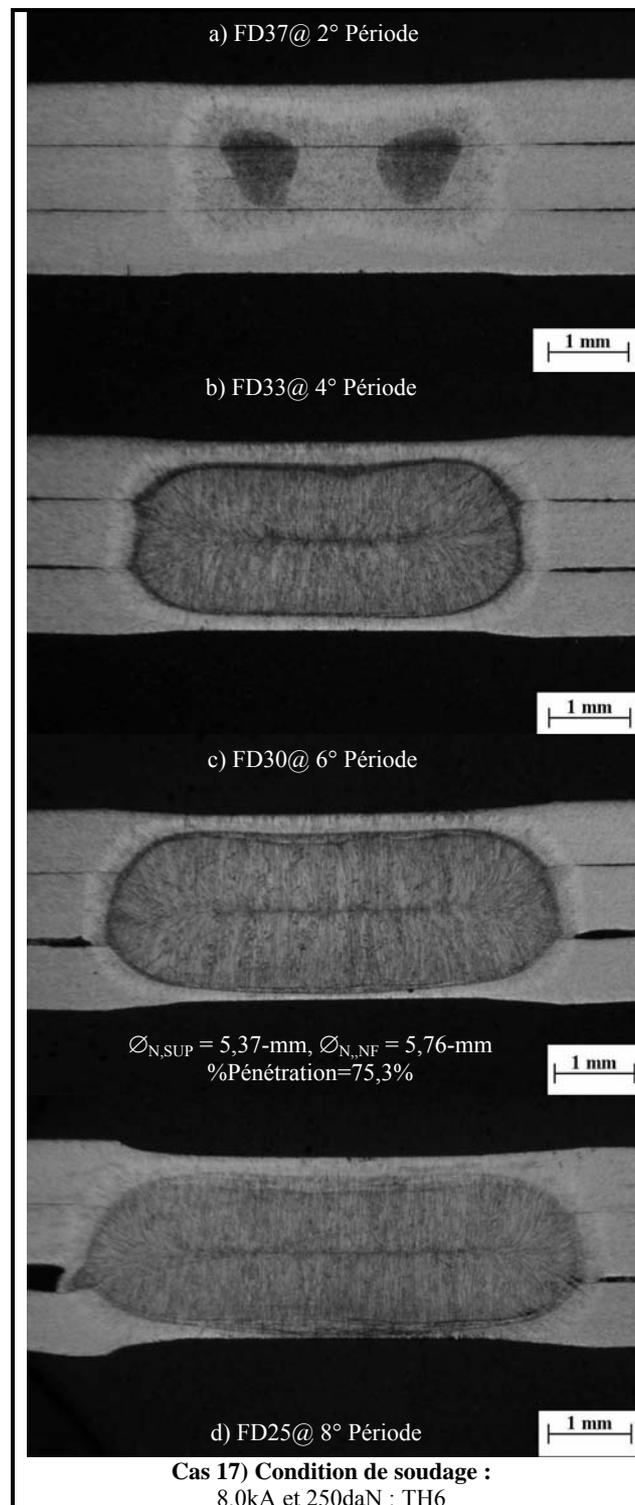


Fig. 2.10: Cinétique de la formation du noyau dans le cas n° 17 pour un assemblage de deux tôles, (tôle d'acier IF de 0,8-mm d'épaisseur)

Développement du Noyau dans l'Assemblage Homogène des 2 Tôles :

Dans un cas d'assemblage de tôle fine, la première zone chaude se développe d'abord à l'interface tôle/tôle, (§Fig. 2.11). Le noyau se forme rapidement dans l'épaisseur au début de première quatre période, et puis il se développe largement dans la direction radiale de l'assemblage.

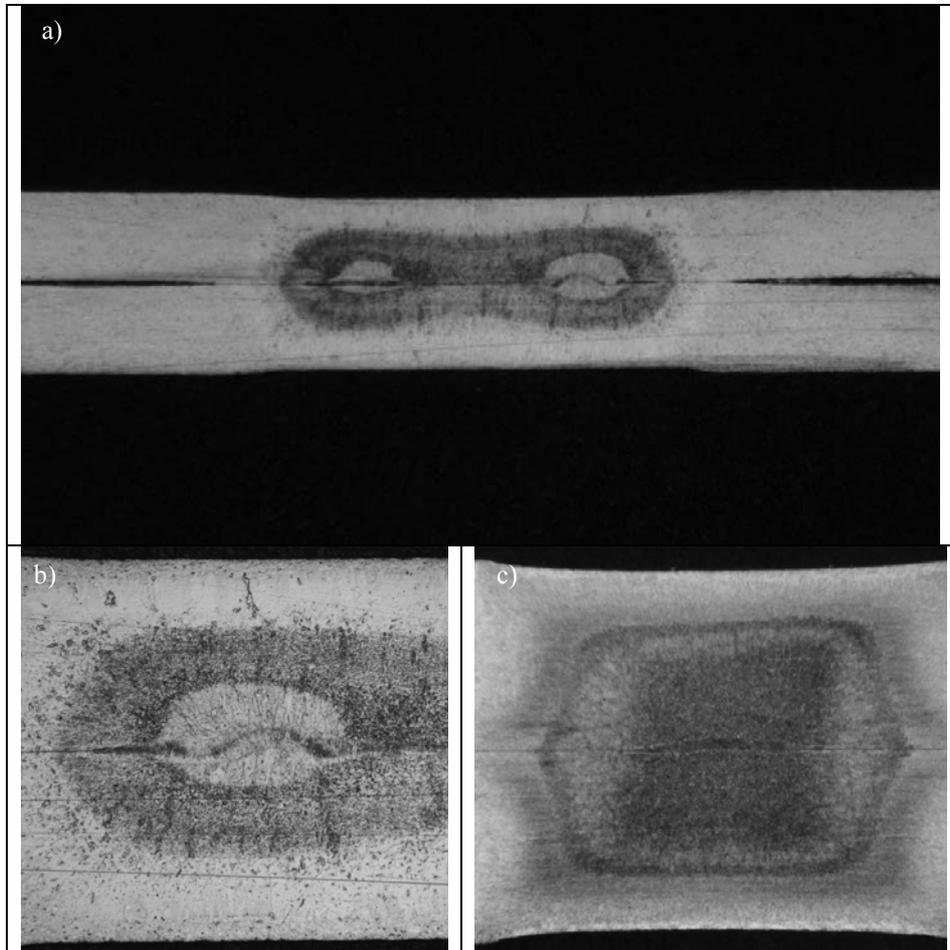


Fig. 2.11: Différent mécanisme de la formation de zone fondue et de la ZAT au début de soudage, a) Zone chaude se développe à l'interface tôle/tôle en forme toroïdale par le soudage à l'état solide, b) Interface tôle/tôle dans la zone fondue au début de soudage, (Cas n° 3 à la fin de deuxième cycle), et c) Cas d'un assemblage des tôles épaisses avec la condition de soudage pulsée (Cas n° 9 à la fin de première pulse)

Figures 2.9 et 2.10 montrent la tendance similaire pour le développement du noyau dans les cas de deux et de trois tôles. Dans le cas d'assemblage homogène de trois tôles, la mesure de diamètres du noyau supérieur et inférieur a effectuée aux interfaces entre les tôles supérieure/intermédiaire et les tôles intermédiaire/inférieure.

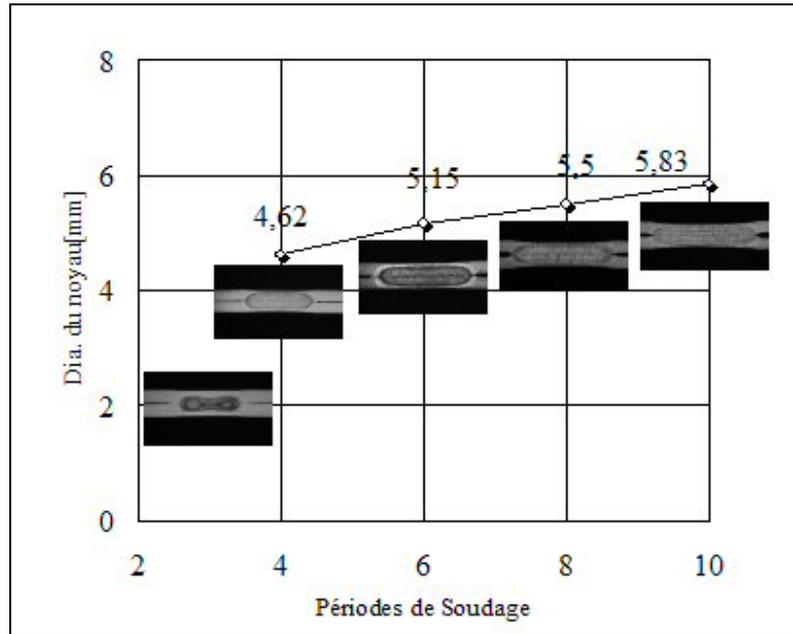


Fig. 2.12: Cinétique de la formation du noyau en fonction des périodes de soudage d'un assemblage de tôles IF d'épaisseur de 0,8-mm-(Cas n° 3)

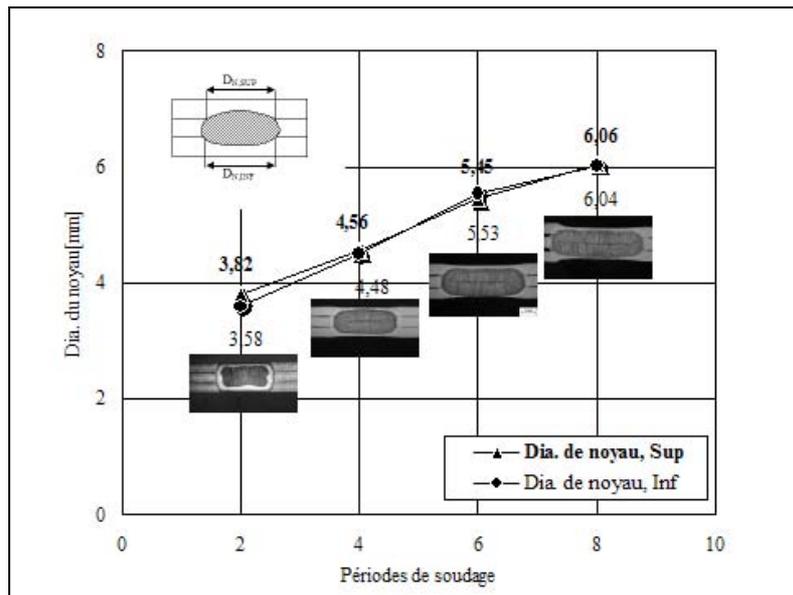


Fig. 2.13: Cinétique de la formation du noyau en fonction des périodes de soudage d'un assemblage des trois tôles IF d'épaisseur de 0,8-mm-(Cas n° 18)

Développement du Noyau dans l'Assemblage Homogène des 3 Tôles :

Au début de soudage, (§Fig. 2.14a-b), les premières zones chaudes semblent commencer d'abord dans les tôles inférieure et supérieure au lieu de se former à l'interface tôle/tôle. Pour les pulses suivantes, le développement d'un seul noyau est observé jusqu'à la fin de soudage. Comme dans le cas d'un assemblage de tôles fines, le diamètre du noyau final peut avoir la même ou une taille différente. Les diamètres du noyau final sont indiqués sur la Fig. 2.14d.

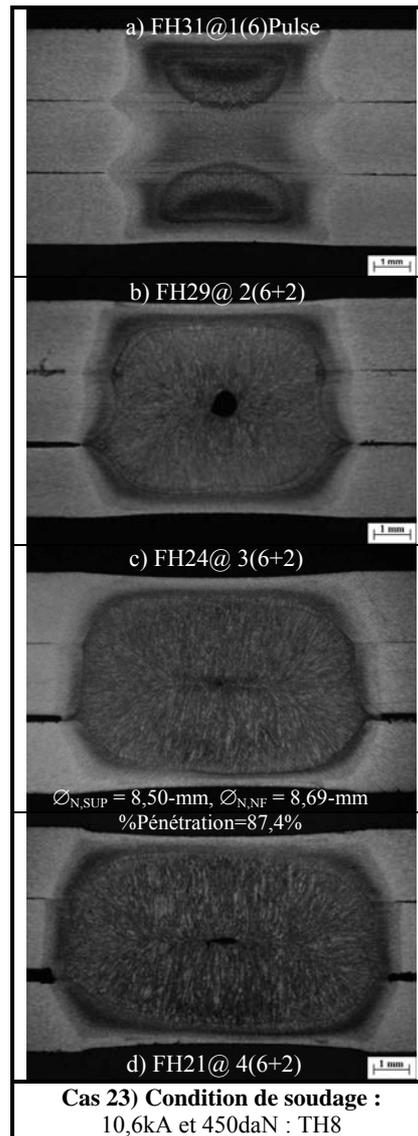


Fig. 2.14: Comparaison de la cinétique de développement du noyau entre l'assemblage de tôle nue de l'acier ES d'épaisseur de 2-mm et celui de tôle revêtue de l'acier IF d'épaisseur de 2-mm

Développement du Noyau dans l'Assemblage Hétérogène :

Il s'agit de type d'assemblage hétérogène de différentes nuances et épaisseurs. Pour ces configurations, la formation du noyau est encore observée à l'interface tôle/tôle comme dans le cas d'un assemblage de tôle fine. Fig. 2.15 montre la cinétique de la formation de la soudure dans les trois cas de l'assemblage hétérogène.

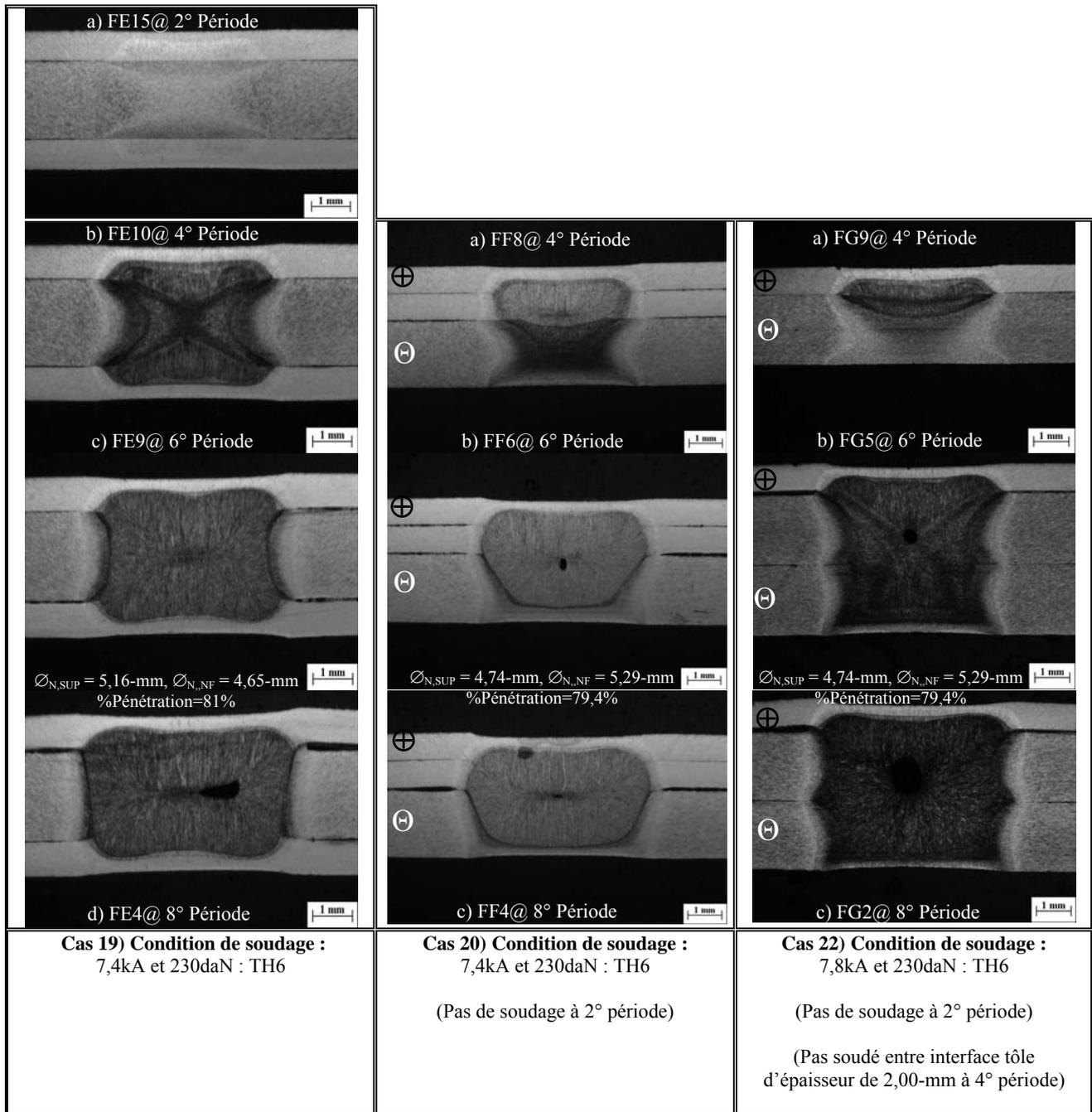


Fig. 2.15: Comparaison de la cinétique de développement du noyau pour l'assemblage hétérogène de l'acier ES-[la signe (+) indique l'anode ou l'électrode supérieure]

Avec un rapport d'épaisseur de tôle de 2,5, les deux zones chaudes se forme à l'interface tôle/tôle, puis le noyau s'élargit progressivement dans la tôle plus épaisse. Dans les cas n° 20 et 22, les assemblages ne sont pas encore soudés à la fin de deuxième période. Pour le cas n° 22, il semble qu'il y a deux noyaux apparus aux interfaces tôle/tôle. Le premier noyau apparaît à la fin de quatrième période à l'interface tôle/tôle supérieure. Cependant, il n'y pas de collage à l'interface tôle/tôle inférieure. La combinaison de ces deux noyaux se trouve dans deux périodes suivantes et un seul noyau s'élargit dans les tôles plus épaisses.

Selon ces résultats, on peut constater que la zone chaude se forme toujours à l'interface tôle/tôle au début de soudage, puis l'élargissement du noyau se développe principalement dans les tôles plus épaisses.

Influence de l'Effort :

L'effort influe directement sur la résistance de contact-[VOG92]. La comparaison de plusieurs configurations et l'étudiant l'influence de l'effort est montrée sur les Figs. 2.16, 17, et 18.

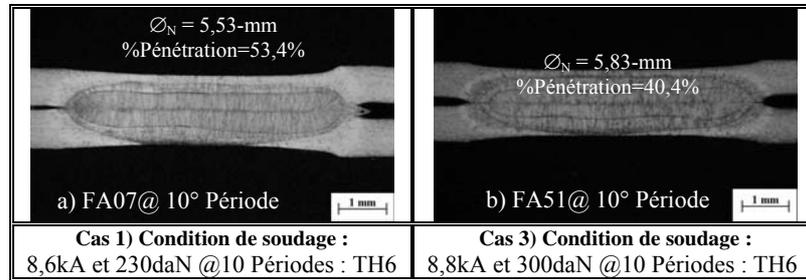


Fig. 2.16: Influence de l'effort de soudage sur l'intensité et sur le diamètre final du noyau dans le cas d'un assemblage des tôles fines

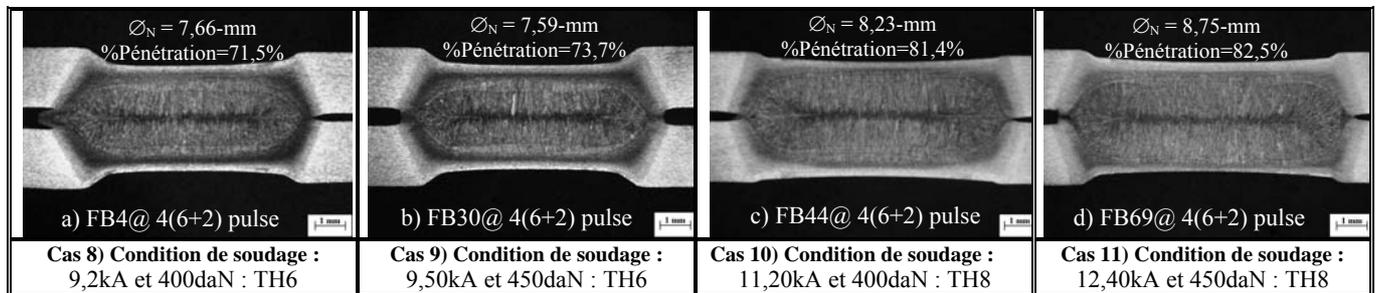


Fig. 2.17: Influence de l'effort de soudage sur l'intensité et sur le diamètre final du noyau dans le cas d'un assemblage de tôles épaisses

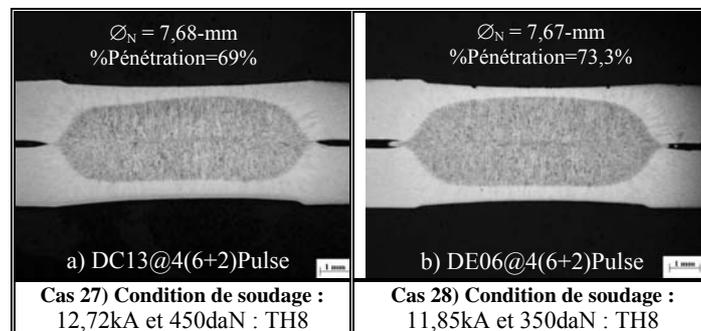


Fig. 2.18: Influence de l'effort de soudage sur l'intensité et sur le diamètre final du noyau dans le cas d'un assemblage de tôles revêtues

Comparons entre les cas n° 1 et 3 pour des électrodes TH6, (§Fig. 2.16), les diamètres finals du noyau sont de 5,53-mm et 5,83-mm. L'influence de l'effort sur l'intensité est similaire au cas d'électrode TP6 : l'intensité nécessaire en haut du domaine de la soudabilité augmente avec l'effort de soudage.

En cas d'un assemblage homogène de tôles nues épaisses, (§Fig. 2.17), l'influence de l'effort sur l'intensité est similaire au cas d'assemblage des tôles fines utilisant la même type d'électrode, (e.g. Cas n° 10 et 11). Il est probable qu'une mauvaise sélection de l'électrode, (§Cas n° 8 et 9 utilisant l'électrode plus petite que celle recommandée dans la norme), ne donne pas le diamètre de noyau plus grand, malgré plus forte intensité. L'indentation profonde est visiblement marquée sur des surfaces de la tôle lorsqu'on utilise une petite électrode.

En cas d'un assemblage homogène de tôles nues soudé avec une intensité en haut du domaine de soudabilité pour quelle que soit l'épaisseur, l'intensité augmente avec l'effort, et par conséquent le diamètre du noyau est plus grand.

Cependant si l'on compare entre les cas n° 27 et 28 de l'assemblage des tôles revêtues, l'augmentation de l'intensité avec l'effort ne montre pas l'impact si important sur le diamètre du noyau, Les diamètres du noyau sont de 7,68-mm à 12,72kA et de 7,67-mm à 11,85kA utilisant d'électrode TH8.

On conclue que l'effort joue un rôle sur la variation de l'intensité de soudage. L'augmentation de l'effort de conduit à une augmentation de l'intensité.

Le choix des électrodes est, à priori, basé sur la recommandation de la norme. Lorsqu'on envisage de souder la configuration complexe, il est encore indispensable de réaliser quelques essais pour déterminer des paramètres appropriés, qui donnent des meilleurs résultats, en termes de la qualité du point, et la durée de vie d'électrode.

Influence des Types d'Électrode :

Il s'agit d'une influence concernant l'électrode, qui sont sa forme et sa taille de la face active.

Effet de la forme de la face active d'électrode :

La forme de la face active d'électrode joue un rôle sur la variation de la taille de contact électrode/tôle. Il est récemment possible d'évaluer la taille du contact ou la distribution de la pression de contact électrode/tôle en cours de soudage par un calcul aux éléments finis-[SUN00]. La distribution de la pression de contact électrode/tôle calculé dans les cas d'électrodes TP6 et TH6 est illustrée sur la Fig. 2.19.

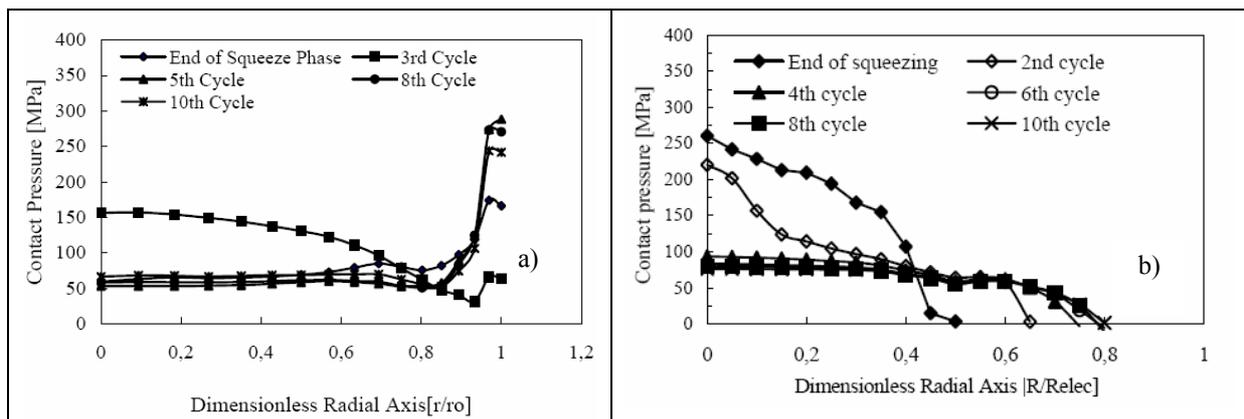


Fig. 2.19: Distribution de la pression de contact à l'interface électrode/tôle pendant soudage a) Cas d'une électrode à face plate-TP6, et b) Cas d'une électrode à face courbée-TH6, [SRI01]

En cas d'une électrode à face plat, (§TP6), on trouve que la pression de contact est la plus importante et concentre à la périphérie de la face d'électrode. La pression de contact est peu variée pendant soudage, (§Fig. 2.19a). Ces résultats montrent que la taille de contact électrode/tôle peut être fixée et égale au diamètre de l'électrode, lorsqu'il s'agit du cas de la simulation numérique de l'assemblage soudé avec l'électrode à face plate.

Au contraire pour l'électrode TH6, une concentration de la pression de contact est trouvée au centre du contact électrode/tôle. Puis, la pression est brusquement diminuée pendant deux périodes de soudage lorsque les électrodes indentent sur la surface de la tôle. La taille de contact varie de 50% à 80% par rapport à la taille de face d'électrode, (§Fig. 2.19b). Lorsque la taille de contact est plus petite, plus la concentration des lignes du courant à l'interface est importante.

Quelques résultats de l'étude du développement de la soudure permettent de mise en évidence ce phénomène.

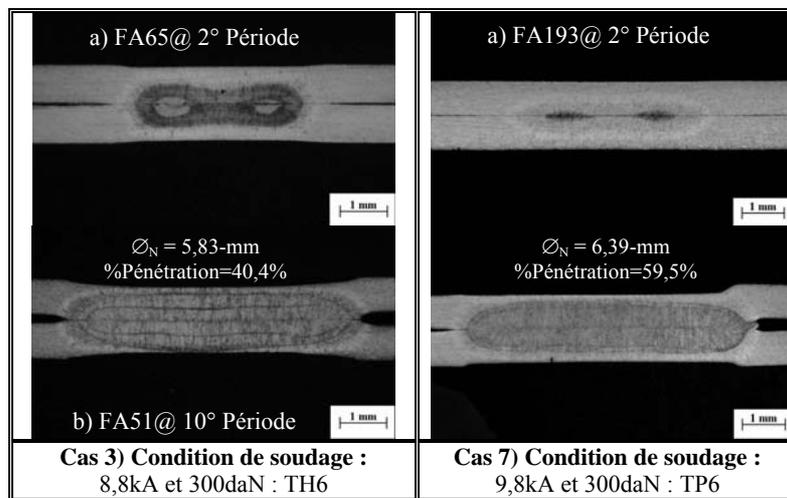


Fig. 2.20: Comparaison entre la cinétique de développement du noyau dans l'assemblage des tôles fines utilisant les électrodes TH6, et TP6, (Voir dans Annexe I pour la cinétique complète)

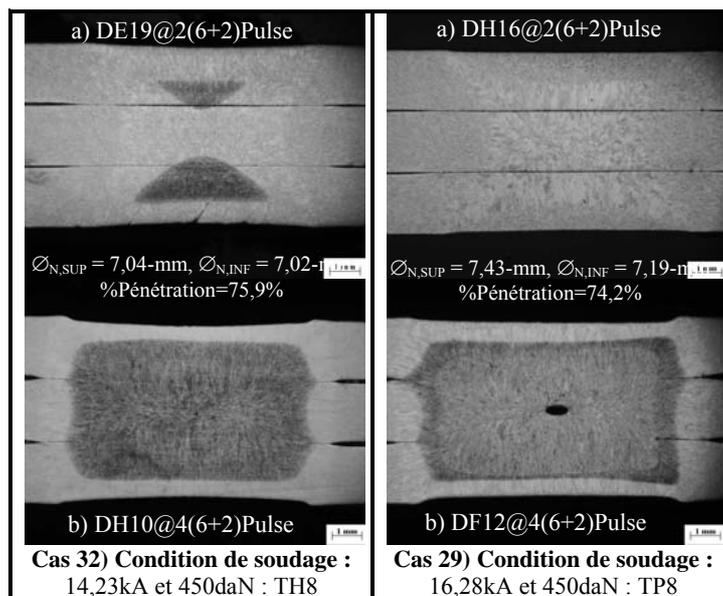


Fig. 2.21: Cinétique de la formation de la soudure dans l'assemblage des tôles épaisses revêtues utilisant les électrodes TH6, et TP6, (Voir dans Annexe I pour la cinétique complète)

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, la zone chaude apparaît plus rapidement avec l'utilisation d'électrode à face courbée que celle d'électrode à face plate, particulièrement au début du soudage. Il s'agit d'une influence de la taille de contact engendrée par la face de l'électrode.

En haut du domaine de soudabilité, l'intensité est plus importante lorsqu'on utilise l'électrode à face plate, et par conséquent le diamètre de noyau, lui aussi est plus grand. Concernant la configuration n° 7, le diamètre final de noyau trouvé est supérieur à celle n° 3.

On peut constater que la forme de la face active influe sur le développement de la soudure, particulièrement au début de soudage. Il est probable qu'une variation de l'intensité selon le type d'électrode employée a encore un rôle sur le diamètre final du noyau. La forme de la face active de l'électrode gouverne alors la taille de contact, et par conséquent l'intensité de soudage.

Influence du Diamètre de la Face Active d'Électrode :

Il s'agit de la taille de la face active de l'électrode. Pour comprendre ce paramètre, on compare les configurations soudées par les électrodes à face hémisphérique avec le diamètre de la face active différente, i.e. les électrodes TH6 et TH8. Selon la norme, le choix du diamètre d'électrode est un paramètre cohérent avec l'épaisseur de la tôle.

En ce qui concerne la qualité de la surface, on essaie toujours d'éviter une indentation importante d'électrode sur la surface de la tôle. Nous comparons deux cas du soudage d'une configuration de tôle nue d'épaisseur de 2-mm utilisant les électrodes TH6 et TH8, (§Figs. 2.22-23).

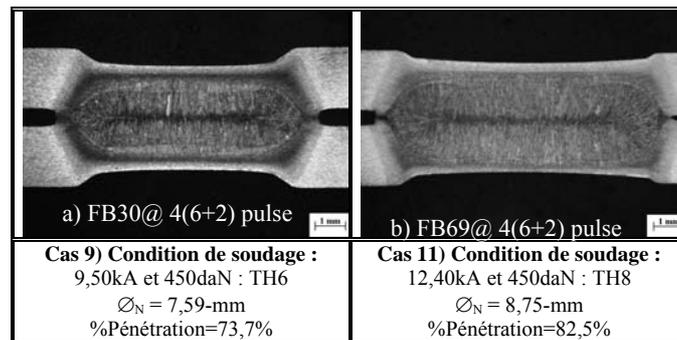


Fig. 2.22: Indentation engendrée par les électrodes tronconiques à face hémisphérique de diamètre de 6-mm et de 8-mm sur un assemblage de deux tôles épaisses

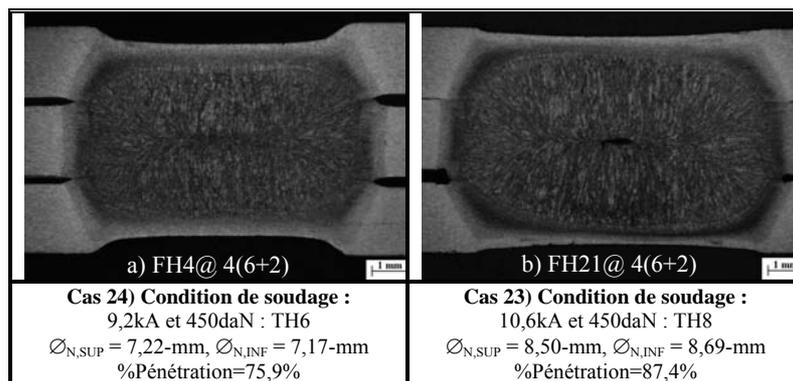


Fig. 2.23: Indentation engendrée par les électrodes tronconiques à face hémisphérique de diamètre de 6-mm et de 8-mm sur un assemblage de trois tôles épaisses

L'indentation plus importante sur la surface de tôle est observée lorsqu'on utilise l'électrode plus petite. Le diamètre final du noyau est probablement plus grand avec l'utilisation d'électrode dont la face active plus grande. Dans cas d'assemblage de deux tôles, les diamètres du noyau sont de 7,59-mm et 8,75-mm pour des électrodes TH6 et TH8. Une tendance similaire est observée dans le cas de l'assemblage de trois tôles, (§Fig. 2.23).

Influence de la Polarisation :

Il s'agit d'un effet électrique lorsque le courant MFDC est utilisé. Pour étudier ce phénomène, nous avons étudié sept configurations de l'assemblage hétérogène de tôle nue. Malgré différente nuance de tôle ou autrement dit la différente entre la résistivité de la tôle, l'influence de la polarisation peut être observée sur la variation de l'intensité non seulement dans le cas d'un assemblage de deux tôles, mais également celui de trois tôles.

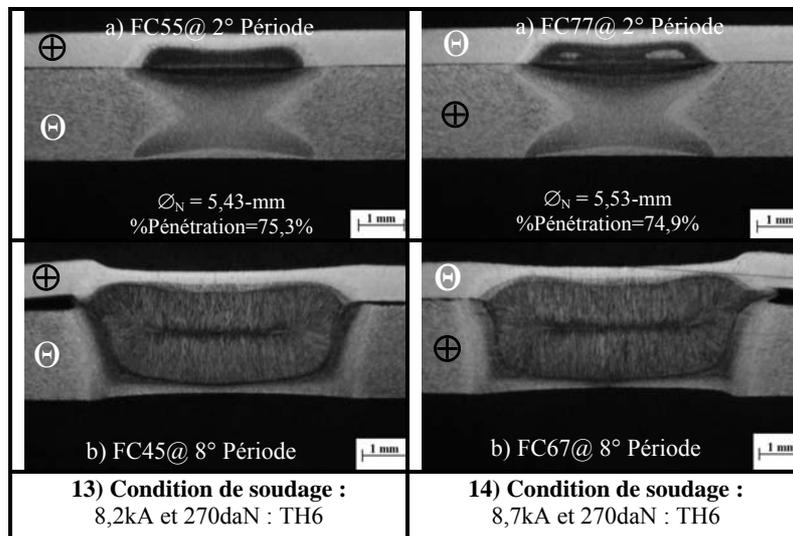


Fig. 2.24: Influence de la polarisation sur la cinétique de la formation de la soudure utilisant l'électrode TH6-(Conditions de soudage sont indiquée dans le tableau 2.5)

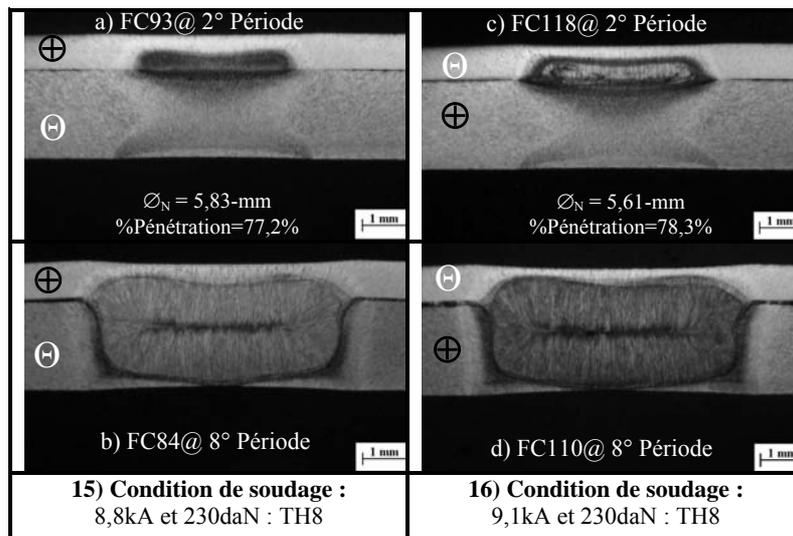


Fig. 2.25: Influence de la polarisation sur la cinétique de la formation de la soudure utilisant l'électrode TH8

Figs. 2.24, et 2.25 montrent une formation de noyau avec l'inversion d'un assemblage par rapport à la polarité entre deux électrodes. Après une vérification de la polarité avec un multimètre, l'électrode supérieure est l'anode, et l'électrode inférieure est la cathode.

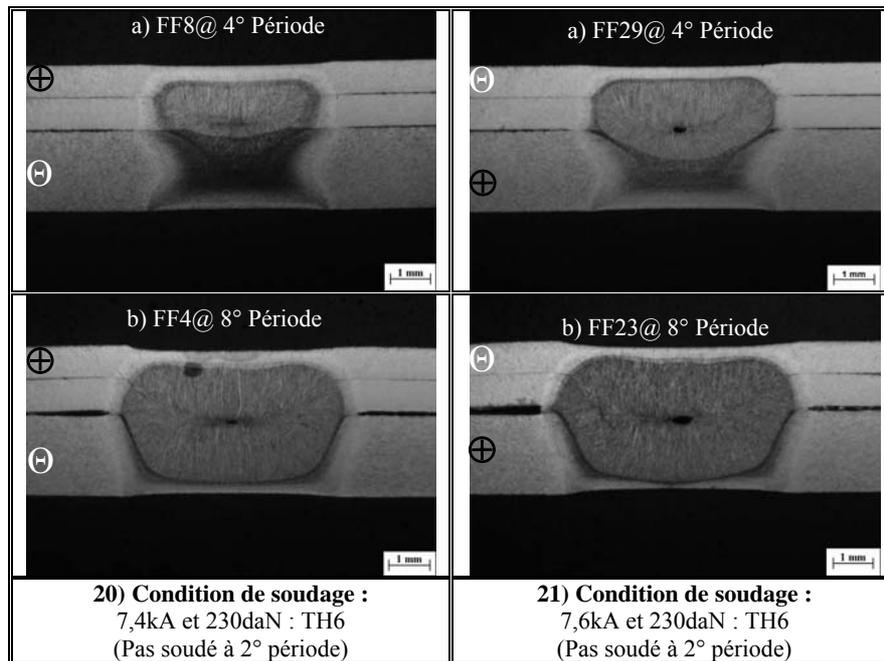


Fig. 2.26: Influence de la polarisation sur la cinétique de la formation de la soudure utilisant l'électrode TH6

Dans tous cas, la soudure forme plus rapidement lorsque la tôle fine est mise à la cathode. On soude avec une intensité plus forte, et par conséquent le diamètre de noyau est plus grand.

Cependant, l'apparition de noyau vers un pôle ou une électrode n'est pas évidente, car il existe aussi une influence de la résistivité sur le développement du noyau. Pour une étude approfondie de cet effet, il est nécessaire que les tôles, dont différente épaisseur, soient la même nuance. Celle-ci permet d'éliminer l'influence de la résistivité électrique sur le développement du noyau.

Dans ce paragraphe, on peut constater qu'il existe l'influence de la polarisation sur l'intensité de soudage, et sur la taille de noyau.

En ce qui concerne la dégradation des deux électrodes ne suit pas la même tendance avec l'utilisation du courant MFDC, car une des électrodes est souvent dégradée plus rapidement qu'une autre. Matsuyama [MAT02-1] a étudié une relation entre la polarisation d'électrode et la durée de vie d'électrode avec l'observation de la formation de noyau. Il a rapporté que l'influence de la polarisation devient plus complexe et aléatoire lorsqu'il s'agit d'un assemblage des tôles revêtues.

Qualité de la Surface d'un Assemblage :

Dans une structure caisse en blanc, ils existent des assemblages de deux tôles, et de trois tôles. En cas de deux tôles, les paramètres de soudage sont basés, à priori, sur la norme. La raison pour laquelle le soudage de l'assemblage de trois tôles est plus délicat et difficile qu'en cas de deux tôles est le réglage des paramètres. S'il est possible de remplacer l'assemblage de trois tôles par l'assemblage adapté de deux tôles, la présence d'un assemblage de trois tôles est déconseillée ou d'éviter. Cependant, la réduction de nombre des tôles à souder semble d'avoir des avantages, mais elle conduit à plusieurs inconvénients comme :

- ❖ l'augmentation de nombre des pièces de tôles, par conséquent l'augmentation du temps pour la préparation et la fixation de pièces.
- ❖ l'augmentation de temps de l'assemblage à cause de plus de nombre des points à souder,
- ❖ le problème de jeu entre des pièces, d'accessibilité aux point soudés pour le pince, et la tenue mécanique réduite de la structure.

Pour souder l'assemblage de trois tôles, nous utilisons des paramètres donnés par la norme. Dans la pratique bien entendu qu'il soit possible également de souder un assemblage des trois tôles par une seule pulse-[SCH01]. Cette dernière est pour réduire le temps de soudage.

Dans ce paragraphe, un aspect autre que le domaine de soudabilité et la durée de vie d'électrode est présenté. Il s'agit de la *qualité de la surface* d'un assemblage. La qualité de surface se traduit à une minimisation de l'indentation des électrodes sur la surface. Il est parfois préférable d'utiliser des électrodes à face plate afin de réduire l'indentation des électrodes,-[CHA94]. Une autre façon de réduire la marque des électrodes sur les surfaces est de ne pas utiliser un effort trop élevé.

Un cas de point soudé sur les Figs. 2.23-24 montre l'indentation marquée avec l'utilisation d'électrode de diamètre de 6-mm pour souder l'assemblage des tôles épaisses. L'écartement au bord de tôles est aussi important. Le choix de l'électrode TH6 ne correspond pas à la norme, mais il permet d'étudier l'influence de diamètre d'électrode sur l'intensité en haut du domaine de soudabilité ainsi que sur le développement du noyau.

Certaines spécifications, comme DVS2902-part4, imposent une spécification pour la qualité de la surface. Selon la norme DVS2902, l'indentation admissible ne doit pas être supérieure à 25% de la épaisseur d'une tôle extérieure. Pour diminuer l'indentation, Schreiber-[SCH01] a proposé une utilisation des électrodes avec différente forme de la face active d'électrode pour souder un assemblage critique comme l'électrode à face courbée est à la coté de tôle plus fine, et une autre à face plate est à la coté de tôle plus épaisse. Ce choix de la paire d'électrodes permet de maîtriser la concentration du courant, et par conséquent permet d'avoir le diamètre de noyau suffisamment grand dans la tôle la plus fine. Cependant, le test de durée de vie ainsi la tenue du point obtenue par cette technique reste encore à déterminer avant l'application.

Influence du Revêtement :

Dans le procédé du soudage par point, la condition de la surface ou du revêtement joue un rôle direct sur la soudabilité ainsi que la dégradation d'électrode. Pour le soudage des tôles nues, il est évident que la taille de contact thermoélectrique peut être égale à celle de contact mécanique. Cette condition peut être appliquée pour la définition de la taille de contact dans un modèle aux éléments finis.

Cependant, lorsqu'il s'agit d'un assemblage de tôles revêtues, les tailles de contact électrothermique et mécanique n'égale plus à cause de la fusion du revêtement métallique. Dans ce cas, il nécessite de définir un paramètre supplémentaire pour décrire la condition de l'interface. On parle d'une valeur de l'épaisseur de la couche de revêtement fondu. Ce paramètre est défini pour la condition de contact électrothermique *parfait* et *non-parfait*. La définition de celles-ci est dans le manuel de SysweldTM-[ROB02, SYS01].

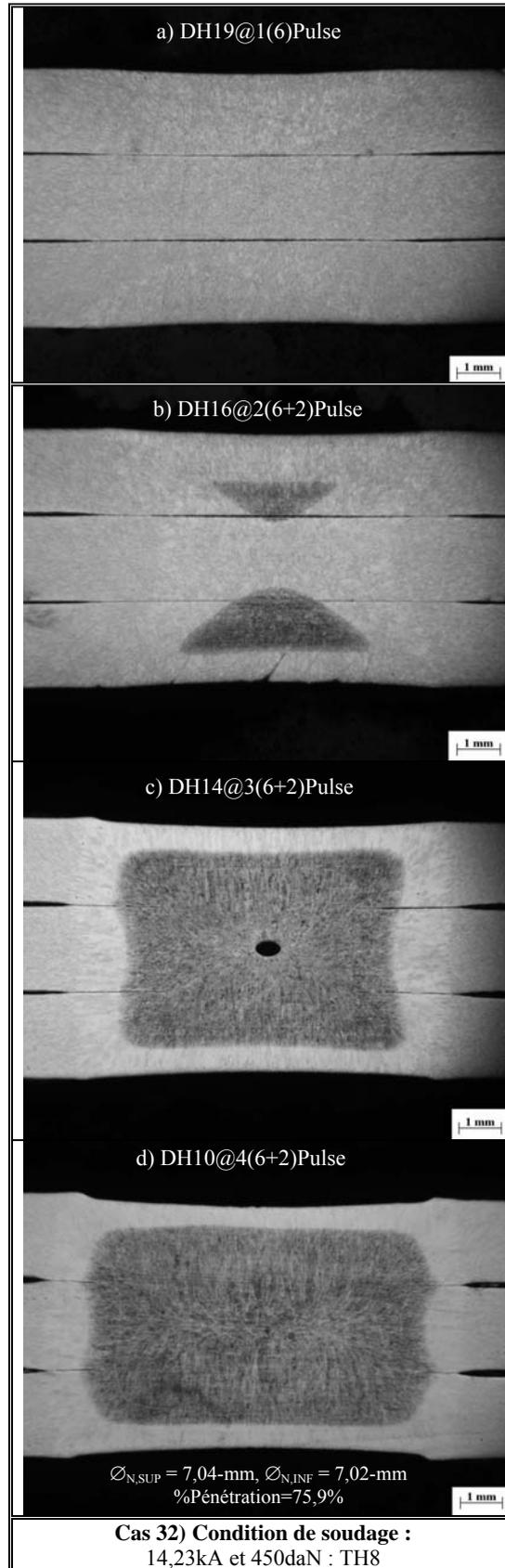


Fig. 2.27: Influence du revêtement montrant un retard sur le développement de la soudure, particulièrement au début de soudage

Sur la Fig. 2.28, si la distance entre deux surfaces est inférieure à la valeur définie, i.e. ' ϵ ', le flux de courant et de chaleur peut traverser cette interface. On parle de la définition d'un *contact parfait* pour une interface.

Contrairement à cette condition, le flux de courant ne peut pas passer. Le transfert de chaleur entre celle-ci par la convection ou par la radiation est proportionnellement à la distance de la séparation de l'interface. C'est la définition d'un *contact non parfait*. Le modèle de contact électrothermique sera présenté dans le chapitre suivant.

Pour avoir une grandeur physique de ' ϵ ', la mesure microscopie optique pour le diamètre de contact électrothermique et la couche de revêtement fondu sont faits avant l'attaque chimique. Nous déterminons ces valeurs dans les cas d'assemblage de deux et de trois tôles. L'assemblage avec l'éjection idéale de revêtement fondu aux interfaces est schématisé sur la Fig. 2.28. Le zinc fondu s'observe principalement à l'interface tôle/tôle et à la périphérie de l'interface électrode/tôle. La quantité du Zn fondu projeté dépend de la condition de soudage et l'épaisseur du revêtement.

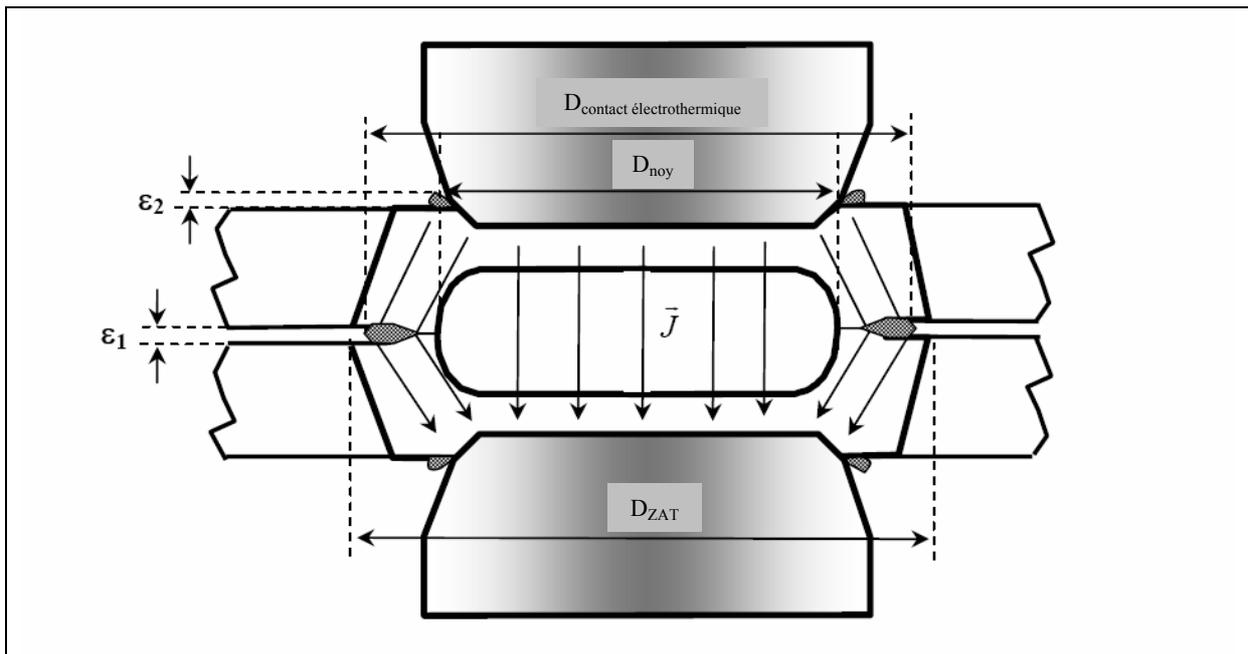


Fig. 2.28: Représentation schématisée des paramètres définis pour un contact électrothermique élargi par Zn fondu dans le cas d'un assemblage des tôles revêtues

Pour la cinétique de la formation de la soudure dans l'assemblage des tôles revêtues, le noyau se développe plus tardivement qu'en cas de tôle nue de fait que la faible résistance de contact tôle/tôle. Sur la Fig. 2.29a, les pièces sont collées par le zinc fondu à la fin de première pulse, cependant la soudure n'est pas observée.

Le développement de la taille du noyau, de la ZAT, et de la taille du contact thermique en fonction du temps de soudage est similaire, (§la Fig. 2.31).

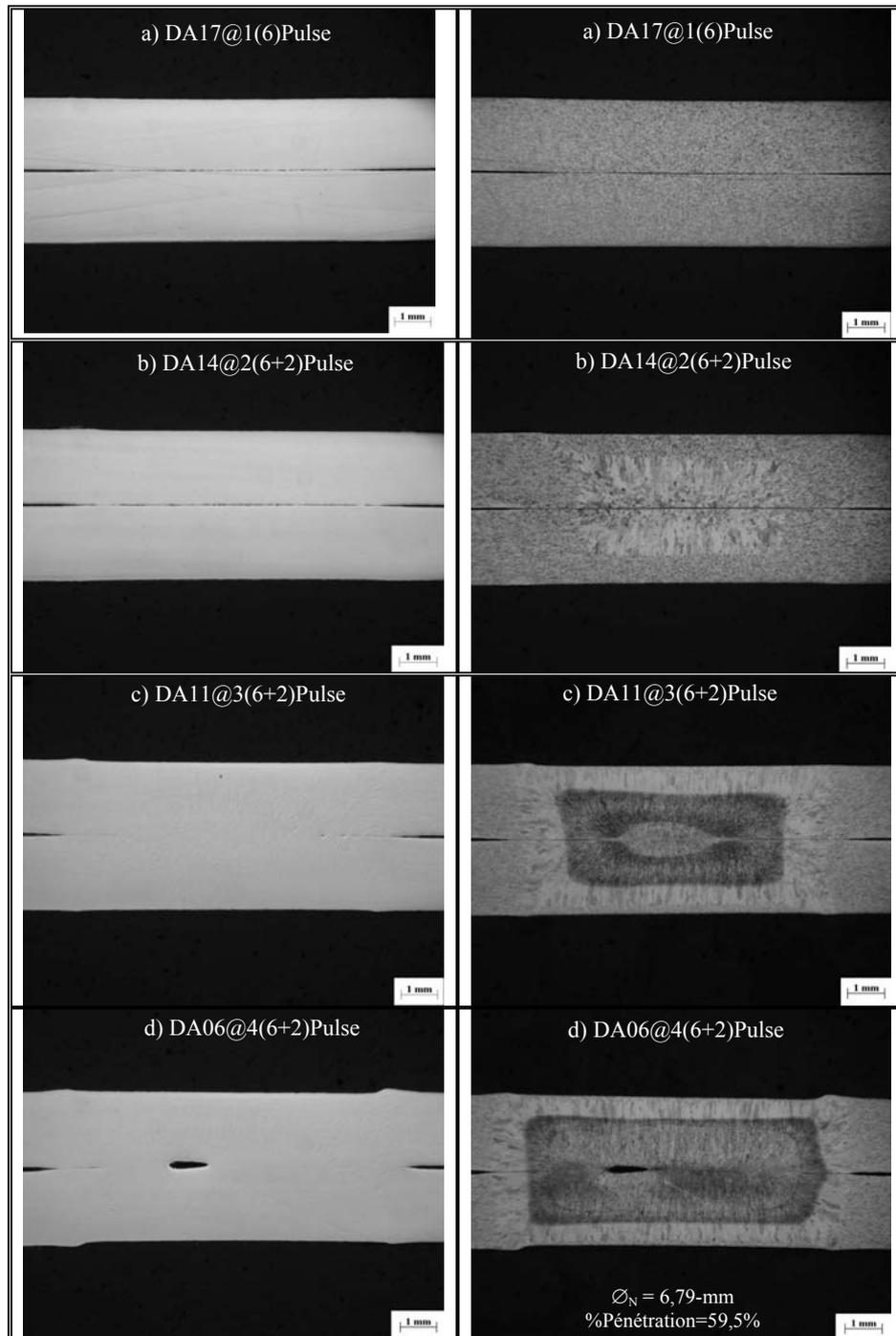


Fig. 2.29: Evolution des différentes zones, a) Echantillon avant l'attaque chimique, et b) Echantillon après l'attaque chimique [Cas n° 26]

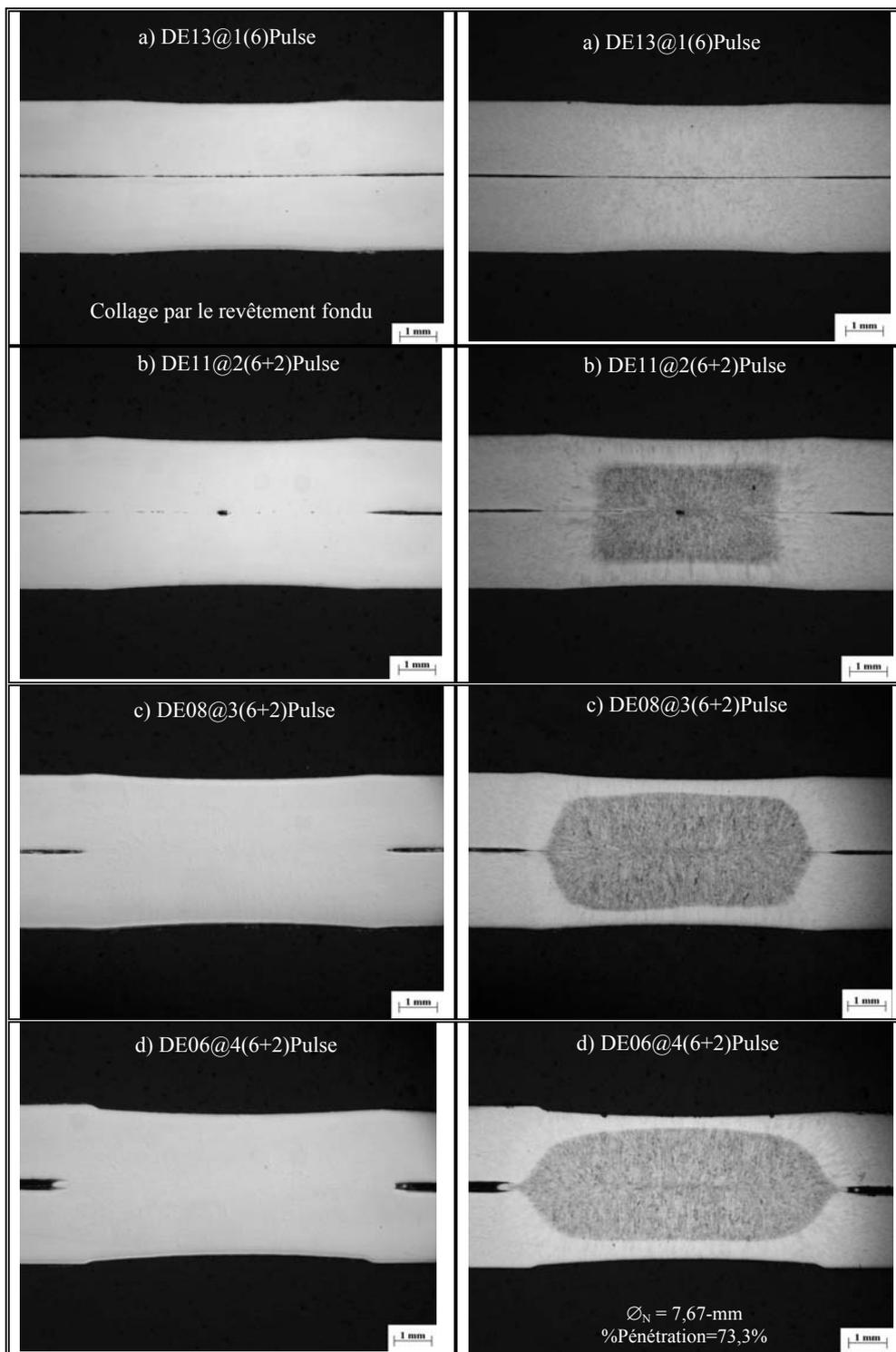


Fig. 2.30: Développement de la soudure, a) Echantillon avant l'attaque chimique, et b) Echantillon après l'attaque chimique [Cas n° 28]

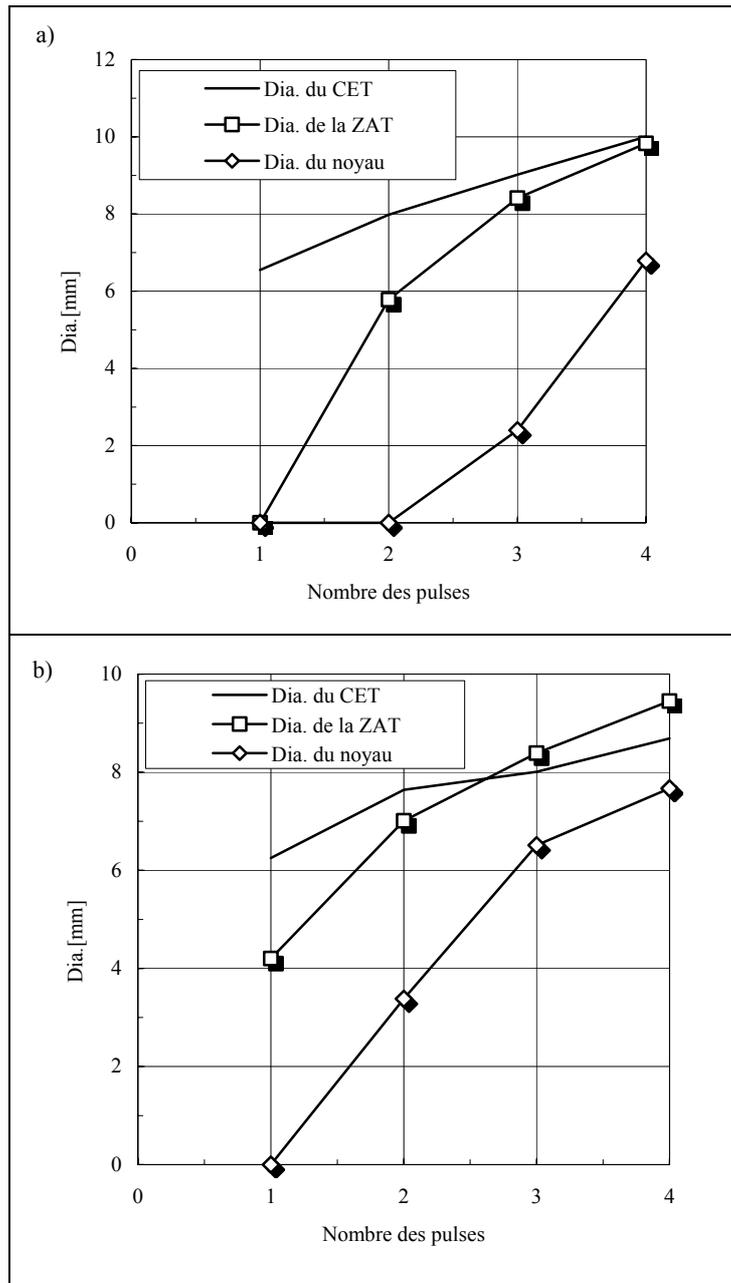


Fig. 2.31: Cinétique de la formation du noyau, de la ZAT, du contact électrothermique-CET, à la fin de chaque pulse, a) En cas d'électrode TP8- [Cas n° 26], et b) En cas d'électrode TH8-[Cas n° 28]

La taille du contact électrothermique est engendrée par l'effort. L'élargissement de celui-ci avec le zinc fondu au début de soudage est illustré sur la Fig. 2.32a. L'apparition de la ZAT ainsi que l'éjection du zinc à l'interface ne sont pas observées à cette étape. L'assemblage est collé par le zinc fondu donnant un faible tenu en mécanique de l'assemblage. L'injection de zinc à la périphérie de l'interface tôle/tôle est présentée sur la Fig. 2.32b.

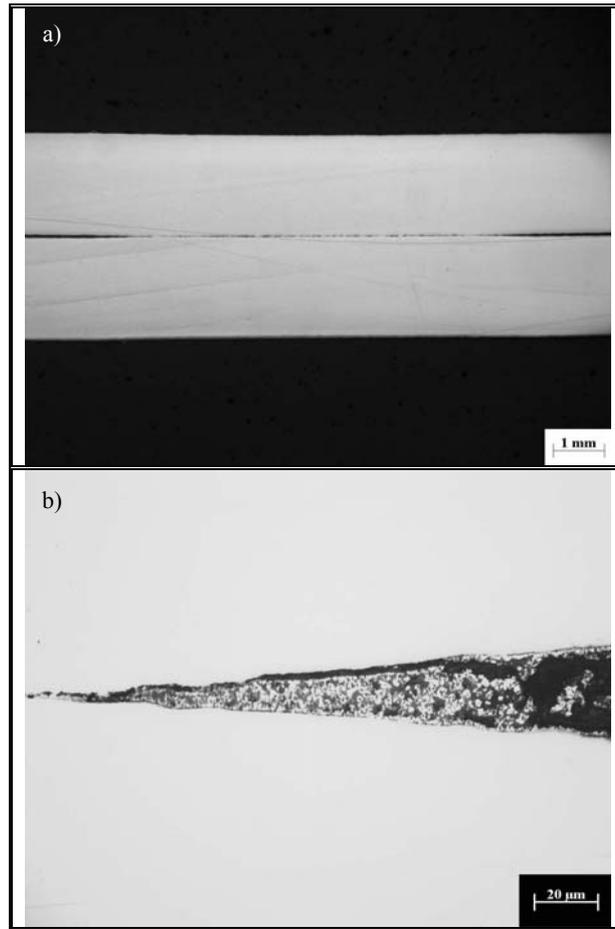


Fig. 2.32: Contact électrothermique dans le cas d'un assemblage homogène des tôles revêtues, a) Assemblage collé par le zinc fondu, b) Revêtement fondu à la fond d'entaille

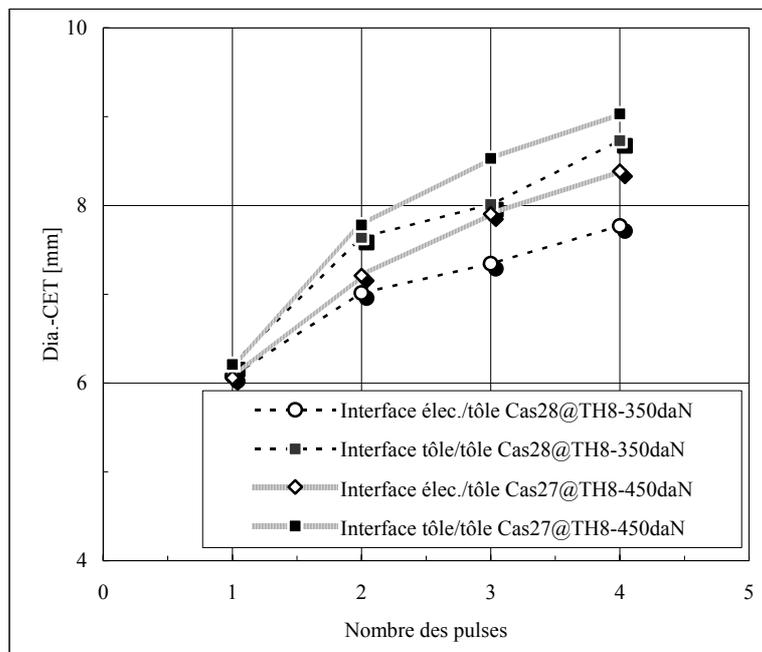


Fig. 2.33: Evolution du diamètre moyen du contact électrothermique en fonction du nombre des pulses et de l'effort utilisant l'électrode-TH8 [Cas n° 27 et 28 dans le tableau 2.6]

La comparaison pour l'évolution de la taille du contact électrothermique à l'interface électrode/tôle et tôle/tôle en fonction de l'effort de soudage est sur la Fig. 2.33. Le diamètre du contact s'élargit en fonction du temps de soudage. La taille du CET à l'interface tôle/tôle est plus large que celle à l'interface électrode/tôle. Pour la tôle revêtue, on peut constater que plus d'effort élevé, plus grand pour le diamètre du contact thermique.

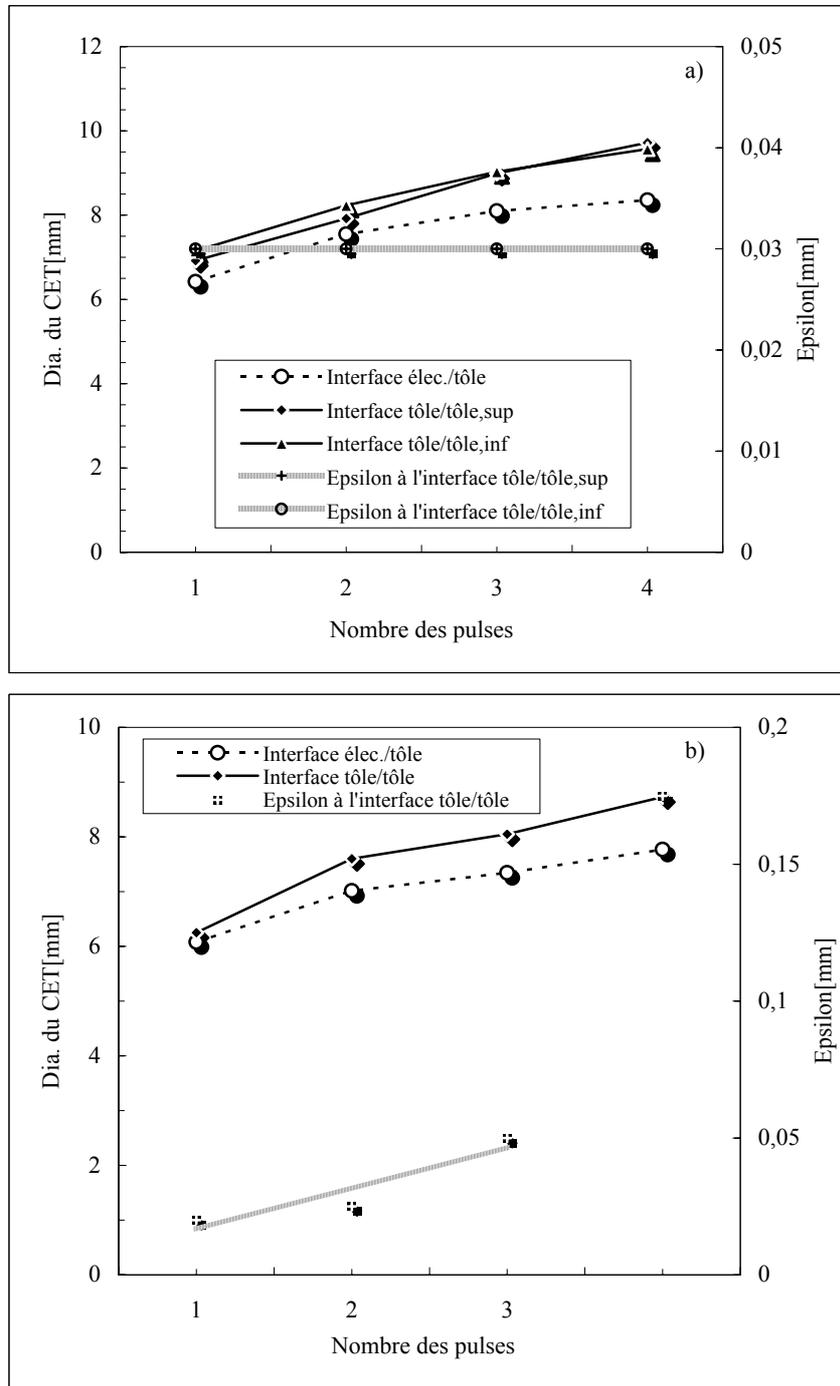


Fig. 2.34: Evolution de la taille du contact électrothermique aux interfaces électrode/tôle, tôle/tôle et l'épsilon (ϵ_1) en fonction du nombre des pulses, a) Cas n° 32 d'un assemblage de trois tôles, et b) Cas n° 28 d'un assemblage de deux tôles

L'évolution de la taille du contact électrothermique en cas d'un assemblage de trois tôles, (§Fig. 2.34) montrent que l'évolution de celle-ci est similaire au cas de deux tôles. La taille du contact à l'interface tôle/tôle est plus grande que celle à l'interface électrode/tôle.

Contrairement au cas d'un assemblage de deux tôles, la taille du contact et l'épsilon varient en fonction du temps de soudage. L'épsilon varie entre 30 et 50 micromètres.

En cas d'acier nu, la taille du contact électrothermique peut être faxée et égale à celle du contact mécanique, (§Fig. 2.19). De plus, la taille du contact électrothermique varie peu en en fonction du temps de soudage, on peut alors définir la taille du contact mécanique étant égale au diamètre de l'électrode dans ce cas.

En ce qui concerne l'acier revêtu, le revêtement joue un rôle sur le développement du noyau, et aussi sur la taille de contact électrothermique. *Cependant, le diamètre du contact thermique et celui mécanique ne sont plus le même de fait que la formation du zinc fondu élargissant la taille du contact électrothermique. On peut constater que la taille du contact électrothermique est toujours supérieure à celle mécanique, (§Fig. 2.28), et le passage de courant sera défini par l'écartement approximatif entre tôles, ou ' ε '.*

2.5 Conclusions :

Dans ce chapitre, une étude macrographique a été consacrée à la cinétique de la formation de la soudure, et à l'obtention des paramètres de soudage. Le développement du noyau en cas d'assemblages de tôle nue, et revêtue est présentée. Cette étude permet de mieux comprendre la différence cinétique, et les paramètres du soudage dans chaque cas. Les conclusions de ce chapitre sont :

i) Concernant de résultats d'observation macro-photographique de la formation du noyau, la formation du noyau s'initie différemment, et elle dépend du nombre des tôles de l'assemblage. En cas de soudage de tôle fine, le noyau apparaît d'abord à l'interface tôle/tôle, i.e. par le soudage en état solide. Puis, il développe principalement dans la tôle. Le mécanisme du développement de la soudure dépend de la combinaison entre la résistance de contact, et la résistivité. A froid, la résistance de contact est nettement supérieure à la résistivité de la tôle. Lorsque la température augmente, la résistance de contact diminue, et la résistivité de l'acier domine le développement de la soudure. La résistivité augmente avec la température.

En ce qui concerne le développement de la soudure en cas d'acier revêtu, la soudure développe plus tardivement de fait que la faible résistance de contact tôle/tôle par rapport à celle d'acier nue.

ii) Considérons la condition de soudage en haut du domaine de soudabilité avec les paramètres choisis dans la norme étant le temps de soudage, et le diamètre de l'électrode. On trouve que l'intensité augmente avec l'effort. Cependant celle-ci ne montre pas le noyau largement si grand.

iii) L'influence de la forme de la face active d'électrode est également étudiée comparant l'électrode à face courbée hémisphérique et celle à face plate. On trouve qu'on soude avec une intensité plus élevée lorsqu'on utilise l'électrode à face plate. Car cette dernière engendre la taille du contact plus grande, et par conséquent plus de répartition du flux de courant.

Sans l'influence du revêtement, l'utilisation d'électrode à face courbée permet d'abaisser l'intensité. La comparaison des profils de pression dans le cas de différent type d'électrode permet de constater que *la forme de la face active d'électrode gouverne principalement la taille du contact aux interfaces électrode/tôle, et tôle/tôle.*

iv) L'influence de la polarisation du courant-MFDC est également présentée dans ce chapitre. Ceux-ci sont les études supplémentaires en cas d'un assemblage hétérogène. Pour négliger l'influence de revêtement, nous ne considérons que le soudage d'acier nu. Avec la même type d'électrode et à un effort donné, on trouve que l'inversement de pôle a une influence sur l'intensité. Cependant, même si l'intensité augmente, on n'obtient pas toujours le diamètre du noyau nettement plus grand.

v) La taille de contact électrothermique (' ϕ_{CET} ') avec la formation du Zn fondu est évaluée pour l'utilisation dans un modèle aux éléments finis. Selon des résultats, on conclue que *la taille de contact électrothermique, comprenant le revêtement métallique fondu, varie en fonction du temps de soudage, et elle s'élargit avec une tendance similaire à la taille de la ZAT et du noyau.*

Concernant les paramètres entrés d'un modèle aux éléments finis, on intéresse les valeurs ' ε_1 ', et ' ε_2 '. Puisqu'elles permettent de modéliser la variation de la taille du contact électrothermique en cours de soudage. Ces paramètres sont pour définir un critère du passage de courant à travers des éléments de contact électrothermique. Selon ces résultats, l'épaisseur du revêtement joue aussi un rôle sur cette distance critique entre électrode/tôle et tôle/tôle.

A l'interface tôle/tôle, ' ε_1 ' a l'ordre de grandeur entre 30 et 50 micromètres, et il augmente en fonction du temps de soudage.

Dans la plupart des cas, ' ε_2 ' ne peut pas être déterminé, car le zinc fondu est éjecté en dehors de l'interface électrode/tôle. Cependant pour la première approximation, la valeur minimale de ' ε_2 ' pourrait être approximativement égale à l'épaisseur de la couche du revêtement.
