

Etude numérique de la soudabilité des assemblages dissymétriques lors du soudage par point

Karima TAHAR-CHAOUCH¹, Philippe ROGEON¹, Rija RAOELISON¹, Patrick CARRE¹, Tahar LOULOU¹, Florent DECHALOTTE²

¹ Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne (LIMATB), Université de Bretagne Sud, Rue de Saint-Maudé, BP 92116, 56321 Lorient Cedex

² PSA Peugeot Citroën, Centre Technique de Vélizy, Route de Gisy, 78943 Vélizy Villacoublay Cedex, France

Résumé – Ce travail porte sur la compréhension des mécanismes de formation et de développement du noyau dans des assemblages complexes soudés par résistance par point. Un modèle numérique aux éléments finis a été utilisé pour étudier l'effet de la dissymétrie en épaisseur et en nuance sur la formation de la zone fondue (noyau) dans un assemblage de deux tôles. L'influence des propriétés matériaux et interfaciales est discutée, avec la mise en évidence des effets conjugués des mécanismes de génération et de diffusion de la chaleur dans les assemblages.

1. Introduction

Pour répondre aux contraintes d'allègement et de renforcement des carrosseries automobiles les industriels introduisent de nouvelles configurations d'assemblages dissymétriques avec des tôles d'épaisseur et de nuance différentes. Ces nouvelles configurations posent des problèmes de soudabilité (défaut de positionnement du noyau dans l'assemblage, établissement des paramètres opératoires). Au plan théorique, le mécanisme de développement du noyau de soudure dans des assemblages dissymétriques est rarement abordé, seuls certains travaux ont traité la soudabilité des assemblages dissymétriques en épaisseur avec un modèle thermoélectrique [2, 4]. Dans ce travail, on propose d'étudier les mécanismes d'échauffement, de localisation et développement du noyau dans les assemblages dissymétriques en épaisseur et en nature, à l'aide d'un modèle numérique. On s'intéresse particulièrement à l'influence des paramètres responsables de la dissymétrie (propriétés des tôles, épaisseurs des tôles/propriétés des interfaces).

2. Formation du noyau dans des assemblages dissymétriques

La dissymétrie peut être générée par la variation d'épaisseur des deux tôles qui décale l'interface tôle-tôle du plan de symétrie, ou par la différence de nuance entre les tôles dans un assemblage de tôles d'épaisseur identique. Elle peut être aussi la résultante de la combinaison de ces deux facteurs.

2.1. Description du modèle numérique et des configurations d'assemblages étudiées

Le modèle numérique utilisé, a été développé au LTDS (Laboratoire de Tribologie des Système ENI St Etienne) et au LIMATB [3, 5], et permet de traiter les phénomènes physiques couplés (électrique, thermique, et métallurgique) dans la matière et aux interfaces. Le modèle est mis en œuvre avec le code de calcul aux éléments finis SYSWELD. Dans le cadre de cette étude, les faces actives des électrodes sont considérées plates (diamètre 6mm), ce qui permet de supposer les surfaces de contact électrode-tôle (E/T) et tôle-tôle (T/T) constantes et de s'affranchir d'une analyse mécanique couplée. On s'intéresse ici à des assemblages de tôles

galvanisées avec deux nuances d'aciers : un acier doux peu résistif (ESG) et un acier dual phase très résistif (DP6G). Les épaisseurs des tôles varient de 0.8 à 5 mm. Les propriétés électriques et thermiques des matériaux sont issues de la littérature [1, 3]. Les propriétés interfaciales (résistances de contact électriques et thermiques) proviennent de mesures réalisées au LIMATB sur un dispositif expérimental spécifique ex-situ [6]. Pour toutes les configurations d'assemblages étudiées le temps de soudage est fixé à 0.26s (équivalent à 13~ avec le courant 50HZ). Par contre le courant électrique (valeur efficace) est ajusté selon la configuration pour permettre la formation et le développement du noyau.

2. 2. Résultats Numériques et Discussion

2.2.1. Développement du noyau dans les assemblages symétriques de deux tôles

Dans le cas d'un assemblage de deux tôles identiques (ESG) l'initiation de l'échauffement et l'apparition du noyau se localisent à l'interface T/T qui correspond au plan de symétrie de l'assemblage (figure 1a). Si à basse température ($T < 350^{\circ}\text{C}$) la résistance de contact électrique $R_{CE}(T/T)$ est plus importante que les résistances ohmiques des tôles, à l'approche de la température de fusion du revêtement ($\sim 420^{\circ}\text{C}$) la $R_{CE}(T/T)$ s'effondre, et la résistance des tôles qui augmente avec la température devient dominante (figure 2a). Consécutivement il y a deux régimes d'échauffement : d'abord, dès le début du soudage, un régime d'échauffement rapide par la $R_{CE}(T/T)$ jusqu'à 0.02s (1~), puis un échauffement plus lent par la résistance électrique des tôles (figure 3).

2.2.2. Influence de la dissymétrie en épaisseur

Dans le cas d'un assemblage dissymétrique en épaisseur, l'initiation de l'échauffement se produit à l'interface T/T, décalé par rapport au plan de symétrie de l'assemblage. Lorsque la $R_{CE}(T/T)$ s'effondre, l'assemblage se comporte quasiment comme un assemblage symétrique et le maximum de température se recale vers le plan de symétrie dans la tôle la plus épaisse (figure 4). Le noyau apparaît, sur l'axe, au niveau du plan de symétrie plus au moins décalé de l'interface en fonction du rapport des épaisseurs ($e = e_{\text{(tôle mince)}} / e_{\text{(tôle épaisse)}}$), puis grossit et finit par englober l'interface T/T à la fin du temps de soudage (figure 1a). La forme du noyau apparaît régulière au début du soudage, et selon le rapport des épaisseurs sa forme peut devenir irrégulière en fin de soudage (figure 1a cas ESG 2.5mm/ESG 0.8mm). En effet, les flux thermiques plus importants qui diffusent dans l'épaisseur de la tôle la plus épaisse modifient la forme finale du noyau et notamment son diamètre qui n'est pas constant selon l'épaisseur.

Notons que dans le cas de l'assemblage de référence ESG0.8mm/ESG0.8mm, les flux dominants qui quittent les tôles sont ceux qui traversent l'interface E/T et diffusent dans les électrodes thermostatées. A l'extrême pour un assemblage avec une dissymétrie en épaisseur plus prononcée ESG5mm/ESG0.8mm, le flux qui diffuse dans l'épaisseur de la tôle la plus épaisse est si important que le noyau reste localisé au voisinage de l'interface T/T. Il naît en périphérie de l'interface T/T (forme annulaire) et progresse vers l'axe, sans se développer dans la tôle épaisse (figure 1a).

2.2.3. Influence de la dissymétrie en nature et épaisseur

Dans un assemblage avec deux tôles de même épaisseur et de nuance différente ESG0.8mm/DP6G0.8mm, l'échauffement s'initie toujours à l'interface T/T. Le noyau

apparaît à l'interface plus développé dans la tôle la plus résistive puis se propage et se recale dans le plan de symétrie (figure 1b). En effet, au-delà de la température d'austénitisation, les propriétés thermiques et électriques des deux nuances d'aciers deviennent identiques, la dissymétrie en nature s'efface.

Dans les assemblages dissymétriques en nature et épaisseur les deux effets (le rapport des épaisseurs et la différence de nuance) se conjuguent et influent sur la position, la taille et la forme du noyau. L'échauffement initié à l'interface T/T se recentre vers le plan de symétrie (figure 5). Lorsque la tôle la plus épaisse est aussi la plus résistive électriquement et thermiquement, la plus forte dissipation ajoutée à une plus faible diffusion dans l'épaisseur de cette tôle, permettent au noyau d'atteindre un volume important avec une forme plus régulière et un diamètre quasiment constant selon sa hauteur (figure 5a). Lorsque la tôle la plus résistive correspond à la tôle mince, le noyau naît à proximité de l'interface T/T plus proche de la tôle résistive et sa forme finale est modifiée par les flux dans l'épaisseur de la tôle épaisse conductrice (figure 5b).

3. Conclusion

Dans ce papier, notre objectif a été d'explicitier les différents phénomènes physiques et les principaux facteurs déterminant la position et le développement du point de soudure électrique dans les assemblages de deux tôles dissymétriques en nature et en épaisseur, à l'aide d'un modèle numérique bidimensionnel axisymétrique intégrant les phénomènes physiques couplés électro-thermo-métallurgique dans la matière et aux interfaces.

Si l'échauffement s'initie toujours à l'interface T/T siège d'une forte dissipation dans les premiers instants, en delà d'une valeur limite d'épaisseur e , le noyau naît toujours dans la tôle épaisse entre l'interface et le plan de symétrie. Pour des valeurs du rapport e faibles, le noyau apparaît et se développe au niveau de l'interface. Pour un assemblage de deux tôles, dans les différentes configurations dissymétriques envisagées, il apparaît toujours possible de trouver une valeur du courant électrique tel que le noyau finisse par englober l'interface T/T. La forme du noyau est conditionnée par les effets conjugués des mécanismes de dissipation et de diffusion dans l'épaisseur de la tôle épaisse, plus ou moins résistive électriquement et thermiquement selon la nuance.

Par contre, dans le cas de certains assemblages de trois tôles, classiques sur les carrosseries, avec deux tôles raides épaisses et résistives (renfort et doublure) et une tôle mince extérieure en acier doux et peu résistive (enveloppe), il n'est pas toujours possible de trouver les paramètres opératoires (intensité, effort, temps) qui garantissent l'accrochage de la tôle mince. Le noyau se forme et se développe entre les deux interfaces dans la tôle épaisse sans parvenir toujours à englober l'interface T/T au niveau de la tôle mince (figure 1 c). Pour déplacer artificiellement la position du noyau vers cette interface, on peut envisager de dissymétriser l'assemblage avec des électrodes différentes (diamètre de face active ou nature) ou de renforcer la résistance électrique de contact entre la tôle mince et la tôle épaisse.

Références

[1] E.Thieblemont, Modélisation du soudage par résistance par points, *Thèse de doctorat*, Institut National de Lorraine (1992).

- [2] W.Chungsheng, Chen Yong, et al, Electrical-thermal interaction simulation for resistance spot welding nugget process of mild steel and stainless steel, *China Welding*, 11-1 (May 2002),51-54.
- [3] G. Sibilía, "Modélisation du soudage par point - Influence des conditions interfaciales sur le procédé, *Thèse de Doctorat*, Polytechnique de Nantes. (2003)
- [4] Y. Benkedda, K. Tahar- Chaouch and B. Ibrir, Analyse numérique du problème de déplacement du noyau fondu en soudage par points de tôles à différentes épaisseurs, *J. Phys. IV France* **124** (2005).
- [5] E.Feulvarch, P.Rogeon, P.Carré, V.Robin, G.Sibilía, J.M.Bergheau, Resistance spot welding process : experimental and numerical modelling of the weld growth mechanisms with consideration of contact condition, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 49(2006):345-367
- [6] P. Rogeon, P. Carré, J. Costa, G. Sibilía, G. Saindrenan, Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.195, Issues 1-3, N°1, 117-124. (2007).

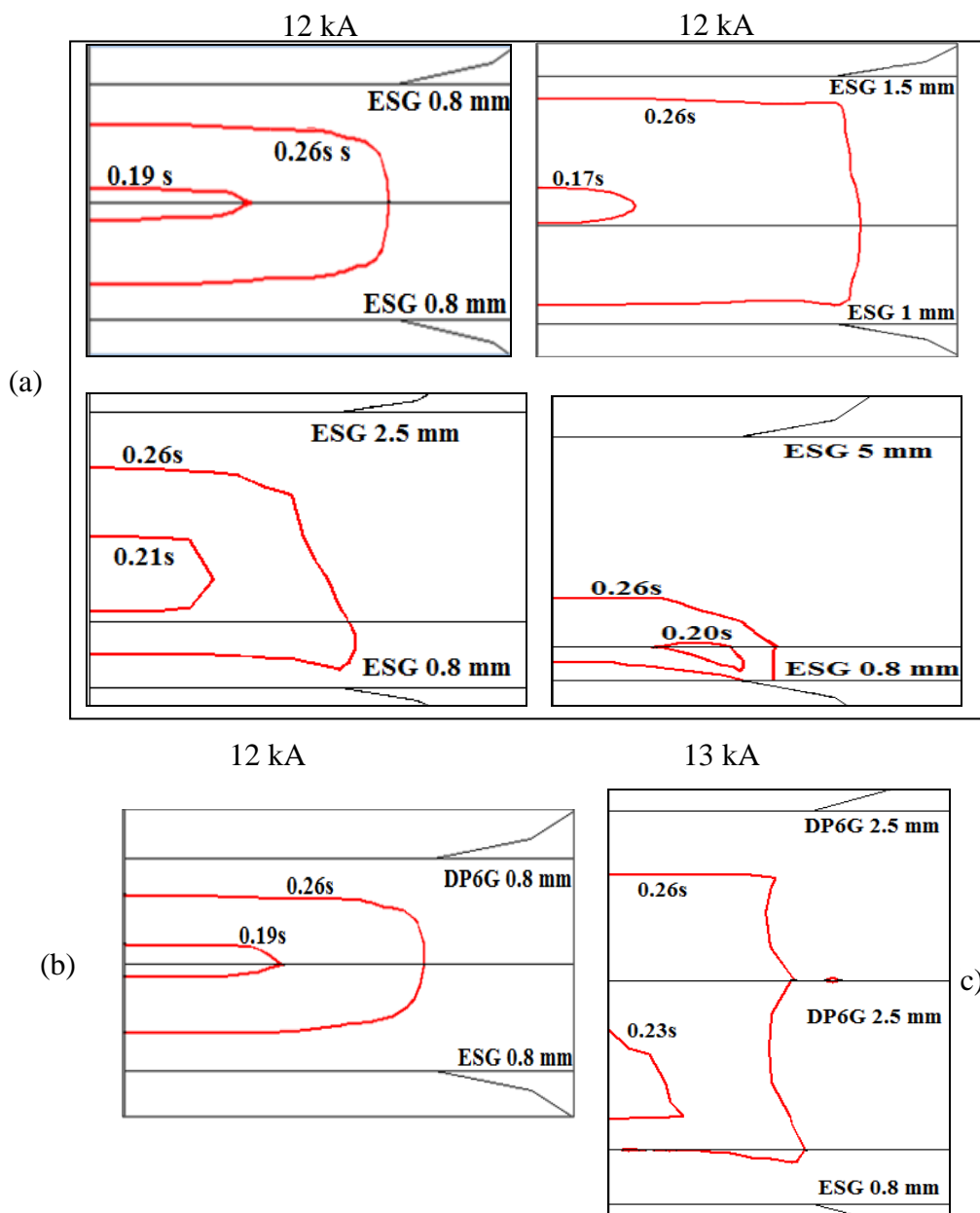


Figure 1: (a) Evolution du noyau dans l'assemblage de deux tôles en ESG/ESG d'épaisseur différente
 (b) Evolution du noyau dans un assemblage de deux tôles en ESG/DP6G (12kA)
 (c) Evolution du noyau dans un assemblage à trois tôles DP6G/DP6G/ESG (11kA)

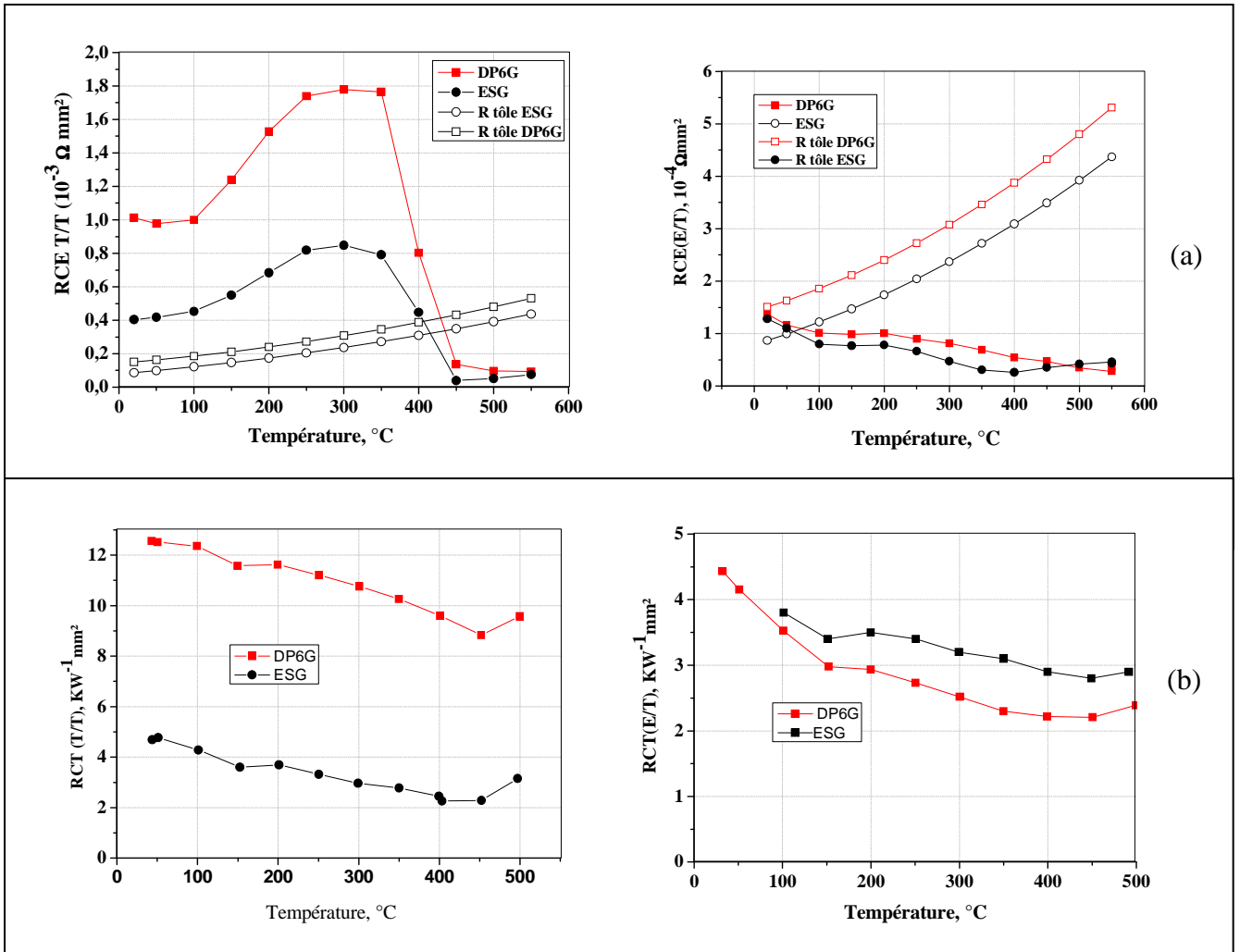


Figure 2: Evolution des résistances de contact :

(a) Résistance de contact électrique en fonction de la température à la pression de 80Mpa - comparaison avec les résistances des tôles (0.8mm) aux interfaces tôle-tôle (T/T) et électrode-tôle (E/T)

(b) Résistances de contact thermique en fonction de la température à la pression de 80Mpa,

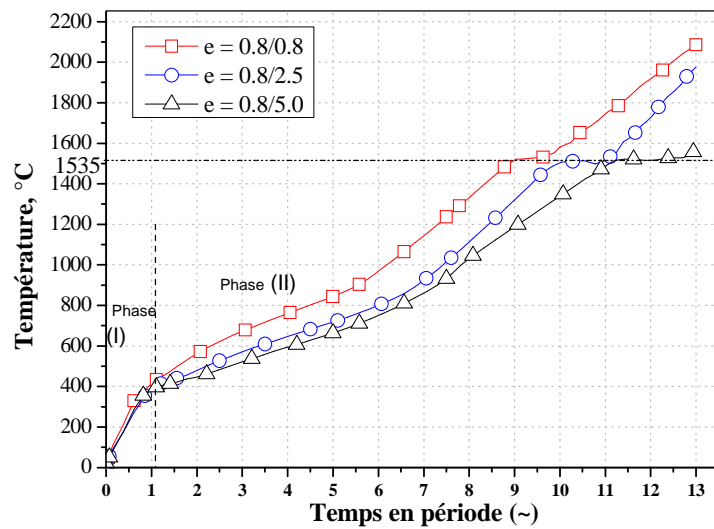


Figure 3: Evolution de la température à l'interface T/T sur l'axe dans les assemblages ESG/ESG dissymétrique en épaisseur ($I=12\text{kA}$)

Pour différent rapport d'épaisseur, e ,

Phase (I) : régime d'échauffement rapide, Phase (II) : régime d'échauffement lent

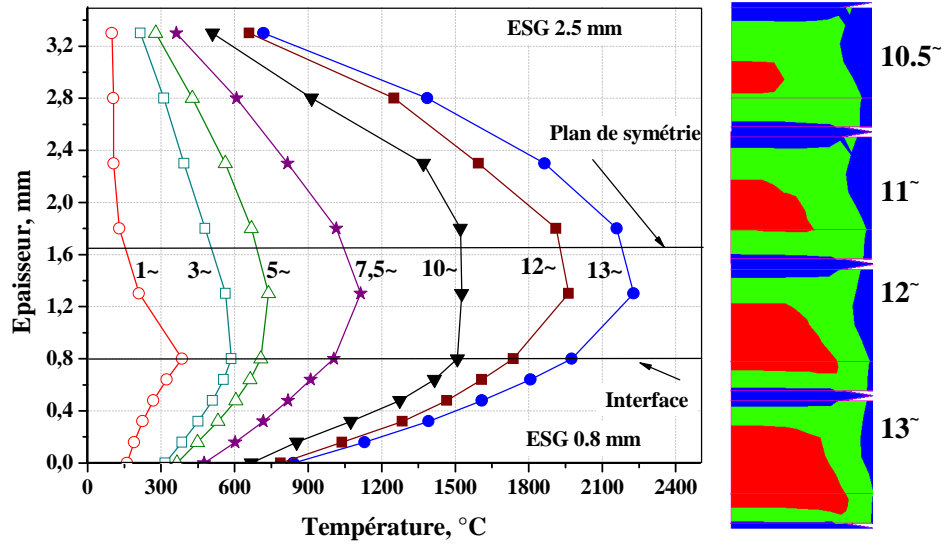


Figure 4 : Evolution des températures sur l'axe de l'assemblage et développement du noyau dans les tôles dissymétriques en épaisseur ESG0.8mm/ESG2.5mm (12kA)

930°C (ZAT)
1535°C (ZF)

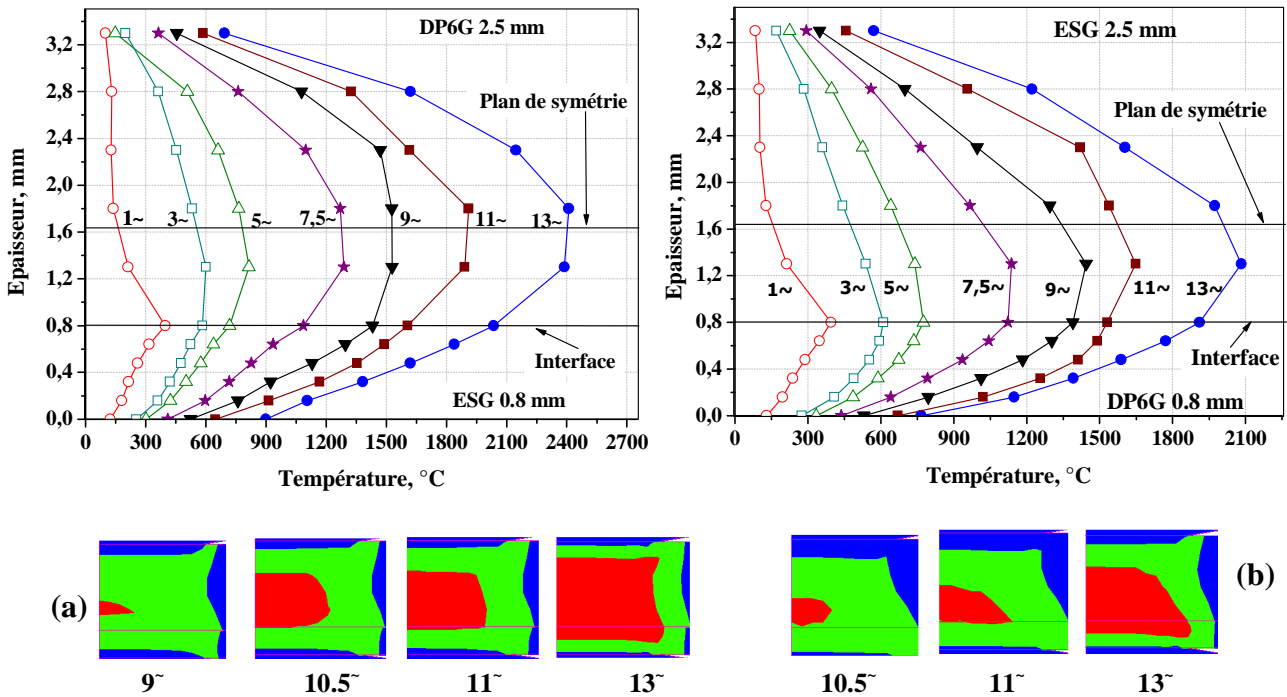


Figure 5 : Evolution des températures sur l'axe de l'assemblage et développement du noyau dans les tôles dissymétriques en nuance et épaisseur (11.5kA): (a) DP6G2.5mm/ESG0.8mm (b) ESG2.5mm/DP6G0.8mm

930°C (ZAT)
1535°C (ZF)