

# Caractérisation et modélisation du comportement mécanique local en ZAT d'un joint FSW en alliage d'aluminium de la série 2000

Sébastien Galisson<sup>1</sup>, Denis Carron<sup>1</sup>, Philippe Le Masson<sup>1</sup>, Georgios Stamoulis<sup>2</sup>, Eric Feulvarch<sup>3</sup>, Gilles Surdon<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France

<sup>2</sup>Univ. Bretagne Occidentale, UMR CNRS 6027, IRDL, F-29200 Brest, France

<sup>3</sup>Univ. Lyon, ENISE, UMR CNRS 5513, LTDS, F-42023 Saint-Etienne, France

<sup>4</sup>Dassault Aviation, Direction du Développement des Procédés de Production, F-33701 Mérignac, France

## Résumé :

*Cet article présente une étude expérimentale de l'homogénéité d'éprouvettes en alliage d'aluminium 2024-T3 ayant subi un cycle thermique proche de ceux rencontrés en soudage par friction malaxage (FSW). Le but est de générer des éprouvettes présentant en zone centrale des microstructures homogènes et représentatives de celles rencontrées en zone affectée thermiquement (ZAT) pour pouvoir ultérieurement caractériser leur comportement mécanique. Des éprouvettes rectangulaires de différentes dimensions en alliage d'aluminium 2024-T3 ont été cyclées thermiquement à l'aide d'une machine Gleeble. La température maximale du cycle thermique imposée correspond aux températures classiquement mesurée à la jonction de la ZAT et de la zone affectée thermomécaniquement (ZATM) dans un joint soudé par FSW. La zone d'intérêt a été définie comme étant de 10 mm de longueur sur toute la largeur de l'éprouvette. L'homogénéité du champ de température de la zone d'intérêt a été étudiée à l'aide d'une instrumentation en thermocouples de type K. Des mesures de dureté et de conductivité électrique ont également été effectuées afin de vérifier la bonne homogénéité microstructurale de la zone d'intérêt.*

## Abstract:

*This paper presents an experimental study on the thermal homogeneity of aluminum alloy 2024-T3 specimens which underwent a thermal cycle close to those encountered during friction stir welding (FSW). The aim is to generate samples with a homogeneous microstructure in the central area. This microstructure needs to be representative of those encountered in heat affected zone (HAZ) in order to characterize its mechanical behavior at a later stage. Different sizes of AA 2024-T3 specimens with rectangular shape have been investigated. Specimens underwent controlled thermal cycles in a Gleeble machine. The maximal temperature involved in the thermal cycle correspond to the area between the heat affected zone (HAZ) and the thermomechanically affected zone (TMAZ) FSW weld joint. The area of interest in the specimen has been defined as 10 mm in length and the whole width. The thermal homogeneity has been studied by K-type thermocouple instrumentation. Hardness and*

*electrical conductivity measurements have also been achieved to study the microstructural homogeneity in the area of interest.*

**Mots clefs : soudage FSW ; alliages d'aluminium 2xxx ; caractérisation mécanique ; caractérisation métallurgique ; lois de comportement**

## 1 Introduction

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est un procédé d'assemblage à l'état solide en plein essor qui est maintenant bien maîtrisé pour les cas simples, notamment pour les alliages à durcissement structural des séries 2000 et 7000 pour applications aéronautiques, difficilement soudables par les techniques classiques de soudage par fusion. Cependant la maîtrise complète du procédé et des assemblages associés reste encore à améliorer.

Dans ce cadre, la modélisation numérique du procédé FSW revêt un intérêt tout particulier pour étudier la faisabilité ou optimiser les paramètres opératoires. Si la prédiction des champs thermiques en cours de soudage dans les différentes zones du joint apparaît actuellement bien maîtrisée [1], [2], ce n'est pas encore complètement le cas pour le comportement mécanique local et global du joint soudé. Une démarche complète de modélisation intégrée peut permettre néanmoins de faire le lien entre le procédé de soudage et les performances du joint en utilisation [3]. Cela nécessite cependant le calcul successif via plusieurs modèles indépendants qui simulent respectivement les cycles thermiques, la précipitation, l'écrouissage et l'endommagement. Le modèle de précipitation par classe de précipités employé généralement [4], [5], [6] nécessite la connaissance de nombreux paramètres thermodynamiques et microstructuraux souvent difficiles à obtenir. De plus, ce modèle reste chronophage et est donc difficilement applicable industriellement.

Il reste donc un champ de recherche ouvert pour une démarche de modélisation plus pragmatique et plus facile à coupler directement avec le modèle thermomécanique. L'objectif étant de prédire dans des temps de calcul raisonnables la loi de comportement mécanique locale dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et en bordure de zone affectée thermomécaniquement (ZATM) qui représentent la zone de fragilité du cordon de soudure FSW. Cela passe vraisemblablement par une prise en compte et une modélisation des évolutions microstructurales à une échelle moins fine que celle des précipités.

Cette étude globale s'intéresse ainsi à la caractérisation du comportement mécanique local en ZAT d'un joint FSW réalisé en alliage d'aluminium de la série 2000. L'objectif est de déterminer la cartographie des propriétés mécaniques locales et de corrélérer ces résultats avec l'état microstructural pour déterminer une loi de comportement mécanique. Le prélèvement de micro-éprouvettes en ZAT sur des tôles de faible épaisseur s'avérant trop délicat, des éprouvettes présentant en zone utile des microstructures représentatives des différentes zones de la ZAT sont générées à l'aide d'une machine Gleeble. L'équivalence microstructurale entre éprouvettes Gleeble et ZAT du joint soudé sera vérifiée par différentes techniques (DSC, dureté, conductivité électrique ...). Le comportement mécanique à température ambiante est alors caractérisé par des essais de traction avec suivi des déformations par corrélation d'images (DIC).

Dans cet article, on s'intéresse à la génération d'éprouvettes Gleeble en alliage d'aluminium 2024-T3 et à l'étude de leur homogénéité. La machine Gleeble permet de simuler des cycles thermiques de

soudage sur les éprouvettes. Le mode de chauffage par effet Joule génère un gradient de température entre le centre de l'éprouvette qui est à la température de consigne et les bords de l'éprouvette qui sont maintenus dans des mors refroidis par eau. Afin de pouvoir effectuer les caractérisations mécaniques par DIC, l'objectif est d'obtenir une zone homogène d'une longueur d'au moins 10 mm sur toute la largeur de l'éprouvette. L'homogénéité thermique des éprouvettes est caractérisée par des mesures par thermocouples et l'homogénéité microstructurale par mesure de dureté et de conductivité électrique.

## **2 Matériau et dispositifs expérimentaux**

### **2.1 Alliage étudié**

Le matériau utilisé est un alliage d'aluminium 2024-T3 (trempe + écrouissage + maturation) sous forme de plaques de 2 mm d'épaisseur. La dureté du matériau étudié est de  $156 \pm 4$  HV<sub>1</sub>. La conductivité électrique mesurée est de  $16,8 \pm 0,1$  MS/m.

### **2.2 Cycle thermique imposé et forme d'éprouvette**

La machine Gleeble 3500 permet de réaliser des cycles thermiques contrôlés et représentatifs de la ZAT. L'étude présentée se concentre sur l'homogénéité des propriétés lors d'un traitement thermique à 350°C avec une vitesse de chauffe de 110°C/s. Durant tout l'essai la machine régule à force nulle. La température maximale de 350°C est dans la gamme des températures maximales atteintes dans la ZAT lors du soudage FSW [2], [4], [7]. La vitesse de chauffe de 110°C/s correspond à des cinétiques thermiques rapides telles qu'observées dans la littérature [2]. Le refroidissement de l'éprouvette est laissé libre (refroidissement assuré par les mors en alliage de cuivre refroidis par eau), ce qui impose une vitesse de refroidissement plus faible pour les éprouvettes de plus grande longueur. L'essai permet de corréler la vitesse de refroidissement libre maximale avec la longueur de l'éprouvette. Le cas échéant, un refroidissement externe par jet d'air ou d'hélium pourra accélérer le refroidissement.

D'après la littérature, la forme rectangulaire [8], [9], [10] permet d'obtenir une bonne homogénéité thermique comparée à une forme d'haltère [11], [12]. Néanmoins cette forme nécessite un usinage ultérieur pour obtenir la forme d'haltère classiquement utilisée pour les éprouvettes de traction à température ambiante. L'usinage permettra de s'affranchir des effets thermiques de bords inhérents au chauffage par effet Joule de l'éprouvette. Dans cette étude, trois longueurs (120, 135 et 150 mm) et deux largeurs d'éprouvette (25 et 30 mm) sont étudiées.

### **2.3 Mesures de conductivité électrique**

Les mesures de conductivité électrique ont été réalisées à l'aide d'une sonde à courant de Foucault et d'un système de mesure Fischerscope MMS PC2. La sonde a un diamètre de 3,3 mm et mesure la conductivité sur une zone qui s'étend jusqu'à 7,2 mm de diamètre [13]. La mesure de conductivité électrique permet de donner une indication sur l'état de précipitation dans l'alliage d'aluminium. Lors de la précipitation, la matrice s'appauvrit en éléments d'addition (cuivre, magnésium, etc.) et s'enrichit donc en proportion en aluminium. La conductivité électrique de l'alliage va donc augmenter et se rapprocher de la conductivité électrique de l'aluminium pur. Réciproquement la dissolution des précipités fait baisser la conductivité électrique de l'alliage.

## 2.4 Mesures de dureté

Les mesures de dureté ont été effectuées à l'aide d'un duromètre Mitutoyo AVK-C2. Ces mesures ont été réalisées sous une charge de 1 kg avec une durée d'application de dix secondes. La mesure de dureté renseigne sur les propriétés mécaniques des éprouvettes. Ces propriétés varient très rapidement en fonction de l'état de précipitation dans les alliages d'aluminium de la série 2000. La précision des mesures de dureté est renseignée par l'écart-type des mesures effectuées sur l'alliage à l'état de réception qui est d'environ 4 HV<sub>1</sub>. Un changement de dureté significatif nécessite l'observation d'une variation d'au moins 10 HV<sub>1</sub>.

## 3 Résultats et discussion

### 3.1 Mesures de température par thermocouple

Les mesures de températures ont été réalisées in-situ dans la machine Gleeble via l'utilisation de thermocouples de type K (chromel-alumel) de diamètre 250 µm. Les fils des thermocouples ont été soudés par décharge capacitive sur l'axe médian soit à mi-longueur  $L_0/2$  de l'éprouvette (thermocouple central), soit à 5 mm de part et d'autre du milieu ( $L_0/2 + 5$  ou  $L_0/2 - 5$  mm). L'homogénéité thermique de la zone centrale des éprouvettes Gleeble lors du pic à 350°C est étudiée.

Comme on peut le constater dans les résultats présentés dans le Tableau 1, la régulation au centre de l'échantillon est très reproductible avec généralement moins de 1°C d'écart-type. Ceci est dû au mode de régulation de la machine qui ajuste la puissance électrique injectée dans l'éprouvette en comparant la température de consigne et la réponse du thermocouple central. Concernant les thermocouples à  $\pm 5$  mm du centre, l'écart-type est plus important et peut atteindre jusqu'à 8°C, même si les valeurs moyennes obtenues restent proches de la température du centre de l'échantillon. D'après le Tableau 1, la longueur de 150 mm permet d'obtenir une bonne homogénéité thermique pour les deux largeurs étudiées. La longueur de 120 mm avec une largeur de 25 mm donne aussi de bons résultats. Cette longueur permet également d'avoir un refroidissement plus rapide pour être plus proche des vitesses observées lors du soudage. Dans la suite de l'étude, nous nous concentrerons sur les longueurs de 120 et 150 mm qui ont donné les meilleurs résultats en terme d'uniformité thermique.

Tableau 1 : Températures mesurées en fonction des dimensions de l'éprouvette

Longueur (mm)	Largeur (mm)	Centre (°C)		-5 mm (°C)		+5 mm (°C)	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
120	25	349.58	0.56	347.33	3.50	350.49	1.24
135	25	349.50	0.85	341.01	3.42	347.47	6.57
150	25	350.68	0.58	349.91	2.67	349.59	1.87
120	30	351.21	0.71	352.10	4.71	352.84	6.06
135	30	350.36	1.47	348.42	8.73	350.03	4.42
150	30	352.79	3.82	351.39	2.38	349.82	1.92

### 3.2 Corrélation conductivité électrique et dureté

Afin de vérifier l'homogénéité microstructurale de la zone d'observation, des mesures de dureté et de conductivité électrique ont été réalisées après refroidissement. Des cartographies de la zone d'intérêt

ont été effectuées, ces cartes contiennent 7\*7 mesures pour la dureté et 5\*8 mesures pour la conductivité électrique.

On peut observer que les résultats sont relativement homogènes (cf. Figure 1) en prenant en compte la dispersion expérimentale d'environ 4 HV<sub>1</sub> de la dureté sur l'alliage à l'état de réception. La dureté moyenne dans la zone étudiée est plus faible que dans le matériau de base de 20 HV<sub>1</sub> avec une valeur moyenne de 136 HV<sub>1</sub> et un écart-type de 4 HV<sub>1</sub>. La conductivité électrique a augmenté de près de 3 MS/m avec une valeur moyenne de  $19,5 \pm 0,3$  MS/m. Cette augmentation de conductivité électrique provient vraisemblablement de l'enrichissement en aluminium de la matrice et donc d'une plus grande proportion de précipités dans la zone d'intérêt. Dans le même temps la dureté diminue, d'après la littérature [4] ce qui peut être provoqué par la coalescence des phases de type S (S/S'/S'') lors de l'exposition à de hautes températures. Une étude complémentaire par calorimétrie différentielle à balayage et par microscopie électronique pourrait confirmer cette hypothèse. L'homogénéité de dureté et de conductivité électrique en zone centrale a été constatée sur toutes les dimensions d'éprouvette. Toutefois, les valeurs moyennes obtenues diffèrent d'une dimension à l'autre. Cette différence provient principalement des cinétiques de refroidissement qui changent selon les dimensions.

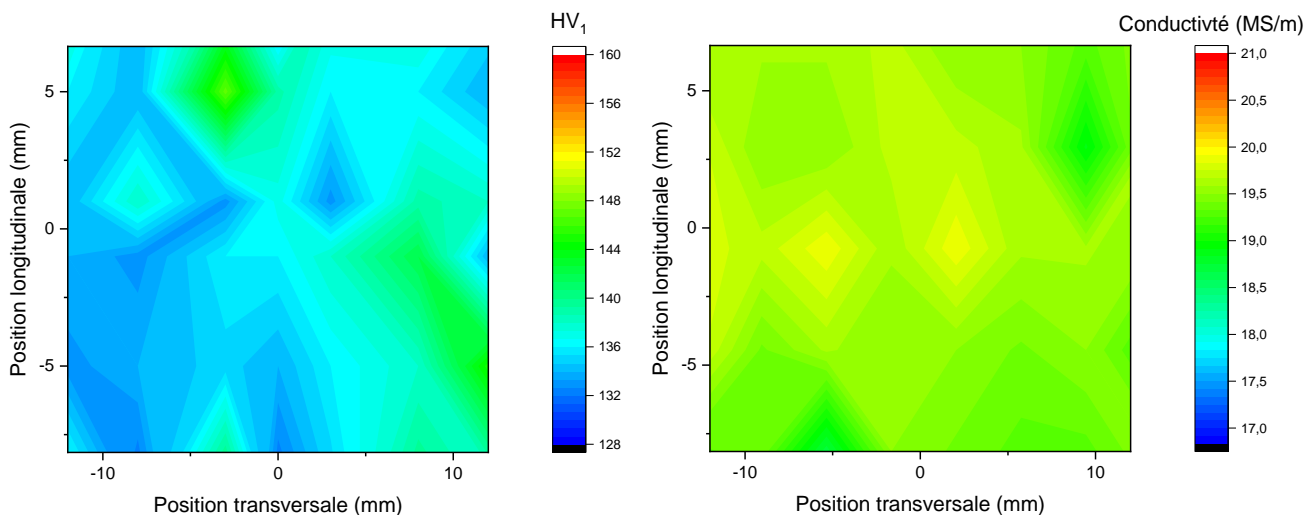


Figure 2 : Cartographies de dureté et de conductivité électrique d'une éprouvette de dimension 120 mm par 30 mm

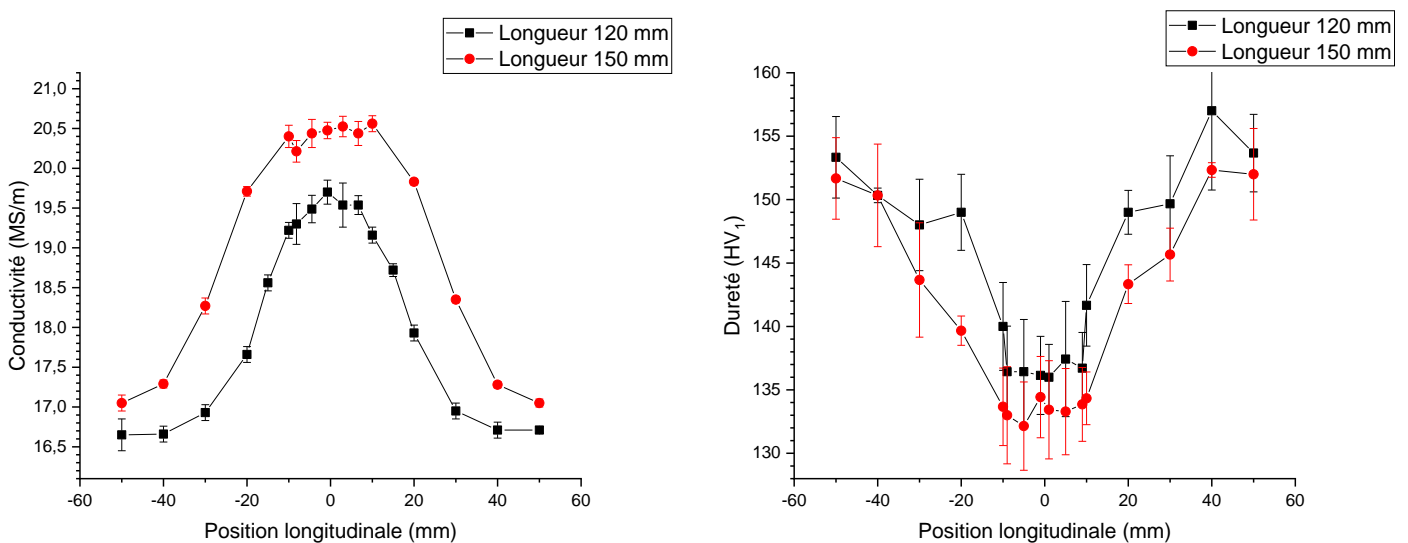


Figure 1 : Profils de conductivité électrique et de dureté en fonction de la position dans des éprouvettes de longueur 120 mm et 150 mm et de largeur 30 mm

Les profils de conductivité électrique et de dureté après refroidissement ont été tracés en fonction de la distance au centre de l'éprouvette dans la direction longitudinale pour deux longueurs différentes (cf. Figure 2). Ces mesures ont été réalisées en moyennant plusieurs valeurs obtenues à la même position longitudinale mais à différentes positions transversales. La zone centrale des profils provient des cartographies réalisées précédemment (cf Figure 1).

On peut observer que la conductivité électrique est maximale au centre pour les deux dimensions d'éprouvette, avec un plateau en zone centrale un peu moins étendu pour l'éprouvette de longueur 120mm. La conductivité électrique est plus importante pour une longueur de 150 mm car le refroidissement étant libre, cette éprouvette a refroidi plus lentement que l'éprouvette de 120 mm. De ce fait, l'éprouvette de 150 mm a donc séjourné plus longtemps à haute température, ce qui favoriserait la précipitation et la coalescence des phases de type S [4], [6]. Dans le cas des mesures de dureté, l'adoucissement est localisé au centre de l'éprouvette avec une dureté quasi-constante entre -9 et + 9 mm pour les deux longueurs. La longueur de 150 mm semble avoir une dureté légèrement plus basse qui doit provenir là encore d'une durée d'exposition plus longue à haute température.

## 4 Conclusion

Le gradient thermique à haute température dans les éprouvettes Gleeble a été caractérisé à l'aide de thermocouples. Ces mesures nous ont permis de déterminer que les éprouvettes rectangulaires de longueur de 120 mm et de longueur de 150 mm possédaient une bonne homogénéité thermique lors du pic de température à 350°C.

Les cartographies de dureté et de conductivité électrique après refroidissement des éprouvettes ont révélé en zone centrale des valeurs relativement homogènes quelles que soient les longueurs et largeurs choisies. Les dimensions retenues pour les éprouvettes seront de 120 mm de longueur et 25 mm de largeur. Ceci assurera un refroidissement rapide tout en validant l'homogénéité de la zone d'intérêt.

Les profils de dureté et de conductivité électrique ont permis d'observer une bonne symétrie des propriétés avec un maximum ou minimum localisé en zone centrale. Les profils obtenus permettent de visualiser un plateau de dureté entre -9 et +9 mm. Ce plateau est également présent pour la conductivité électrique pour l'éprouvette de longueur de 150 mm. Celui-ci semble en revanche plus réduit pour une longueur de 120 mm. Cette homogénéité des propriétés en zone centrale est de bon augure pour favoriser les caractérisations mécaniques ultérieures des éprouvettes par DIC.

## Références

- [1] E. Feulvarch, J.-C. Roux, et J.-M. Bergheau, « A simple and robust moving mesh technique for the finite element simulation of Friction Stir Welding », *J. Comput. Appl. Math.* (2013) vol. 246, p. 269-277
- [2] H. Robe, « Apports à la compréhension du soudage FSW hétérogène d'alliages d'aluminium par une approche expérimentale et numérique », Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2017.

- [3] A. Simar, Y. Bréchet, B. de Meester, A. Denquin, C. Gallais, et T. Pardoen, « Integrated modeling of friction stir welding of 6xxx series Al alloys: Process, microstructure and properties », *Prog. Mater. Sci.* (2012) vol. 57, n° 1, p. 95-183
- [4] C. Genevois, « Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 5000 et comportement mécanique résultant », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004
- [5] E. Hersent, « Modélisation intégrée de la précipitation pour le soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium à durcissement structural », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2010
- [6] V. Legrand, « Modélisation des processus de précipitation et prédiction des propriétés mécaniques résultantes dans les alliages d'aluminium à durcissement structural : Application au soudage par Friction Malaxage (FSW) de tôles AA2024 », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2015.
- [7] R. S. Mishra et H. Sidhar, *Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys including Al-Li Alloys*. Elsevier Science, 2016.
- [8] Q. Li, A. Wu, Y. Li, G. Wang, D. Yan, et J. Liu, « Influence of temperature cycles on the microstructures and mechanical properties of the partially melted zone in the fusion welded joints of 2219 aluminum alloy », *Mater. Sci. Eng. A* (2015) vol. 623, p. 38-48
- [9] J. G. Yang, S. H. Sung, C. S. Chen, et A. H. Tan, « Study of microstructural and mechanical properties of weld heat affected zones of 2024-T3 aluminium using Gleeble simulation », *Mater. Sci. Technol.* vol. 27, n° 1, p. 357-365
- [10] W. Ma, B. Wang, J. Lin, et X. Tang, « Influence of process parameters on properties of AA6082 in hot forming process », *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (2017) vol. 27, n° 11, p. 2454-2463
- [11] M. Zain-ul-abdein, D. Nélias, J.-F. Jullien, et A. I. Wagan, « Thermo-mechanical characterisation of AA 6056-T4 and estimation of its material properties using Genetic Algorithm », *Mater. Des.* (2010) vol. 31, n° 9, p. 4302-4311
- [12] O. R. Myhr, Ø. Grong, H. G. Fjær, et C. D. Marioara, « Modelling of the microstructure and strength evolution in Al–Mg–Si alloys during multistage thermal processing », *Acta Mater.* (2004) vol. 52, n° 17, p. 4997-5008
- [13] Helmut Fischer GmbH, « Operator's manual, Fischerscope MMS PC2 ». 2009.