

Métaheuristique pour l'optimisation fiabiliste des joints de brasure d'une carte électronique

Metaheuristic for the RBDO of the brasure's joints of an electronic board

Hamid HAMDANI^{12a} Abdelkhalak EL HAMI^{1b} Bouchaib RADI^{2c}

¹Laboratoire de Mécanique de Normandie LMN, INSA Rouen, France.

²Laboratoire d'Ingénierie, Management Industriel et Innovation (IM2I) FSTS

^a hamid.hamdani@insa-rouen.fr

^b abdelkhalak.elhami@insa-rouen.fr

^c bouchaib.radi@yahoo.fr

RÉSUMÉ. Dans la majorité des systèmes mécatroniques, la fatigue thermique des joints de brasure est un mécanisme entraînant une rupture de ces derniers, ce genre de défaillance est la principale cause à laquelle la durée de vie des systèmes mécatroniques embarqués, est souvent liée. Cet article présente une simulation éléments finis du comportement mécanique des joints de brasure dans une carte électronique ainsi que l'application de la méthode d'optimisation CMAES pour l'augmentation de la fiabilité des joints. Cette méthode est sans contestation, la meilleure méthode évolutionnaire pour l'optimisation paramétrique continue. Elle a en particulier été grand vainqueur sur les méthodes stochastiques (autres ES, mais aussi PSO, Differential Evolution, et autres EDAs) [8]. Un modèle de simulation par éléments finis est développé, ce modèle a l'intention d'analyser la séquence des événements de panne dans les systèmes mécatroniques, et estimer le nombre de cycle de vie en fatigue en modélisant le joints de brasure le plus sollicité, puis la méthode d'optimisation CMAES, est exécutée pour surmonter l'inconvénient de complexité géométrique (difficulté d'application des méthode à gradient) des composants mécatroniques. Les résultats de la simulation numérique montrent une bonne augmentation du nombre des cycles de vie en fatigue des systèmes mécatroniques.

ABSTRACT. In the majority of mechatronic devices, thermal fatigue of solder joints is a mechanism causing failure of the solder joints. This type of failure is the main cause that the lifetime of embedded mechatronics systems is often related. This paper presents a finite element simulation of the mechanical behavior of solder joints in an electronic board as well as the application of the CMAES optimization method to increase the reliability of joints. This method is the best evolutionary method for continuous parametric optimization. In particular, she was the winner of the stochastic methods (other ES, but also PSO, Differential Evolution, and other EDAs)[8]. A model of finite element simulation is developed, this model intends to analyze the sequence of failure events in mechatronic devices. In this article, this numerical model is used to estimate the number of fatigue life cycles by modeling the most stressed solder joints, and then the proposed CMAES optimization method is performed to overcome the disadvantage of geometric complexity (difficulty application of gradient methods) of mechatronic components. Numerical results show the increasing of the fatigue life cycle of mechatronic devices.

MOTS-CLÉS. optimisation, systèmes mécatroniques, carte électronique, joint de brasure, algorithme évolutionnaire, CMAES.

KEYWORDS. optimization, mechatronic devices, electronic card, solder joint, evolutionary algorithm, CMAES.

Introduction

Les systèmes mécatroniques sont en forte croissance. Ces derniers jouent un rôle de plus en plus important dans de nombreux domaines d'applications. On citera par exemple le domaine de la santé avec la conception des technologies innovantes, l'industrie automobile, l'aéronautique, les télécommunications etc. L'évaluation de la fiabilité de ces systèmes reste un défi majeur, dans le but d'assurer un bon fonctionnement. Cependant les défaillances ces systèmes sont souvent causées par de nombreuses sollicitations extrêmes de nature thermique (variations de température), mécaniques (chocs, vibration), etc. Un retour de terrain montre que la plupart des pannes signalées dans les dispositifs mécatroniques sont dues à la fatigue des joints de brasure. Afin de répondre aux exigences de fiabilité, la robustesse des connexions dans les joints doivent être validées. En raison de la dilatation thermique, les cycles thermiques, dont les systèmes mécatroniques subis, induisent des contraintes mécaniques dans les joints de brasure reliant les composants électroniques au circuit imprimé. Par conséquent, ces contraintes peuvent être significatives conduisant à une déformation plastique. L'accumulation de ces déformations plastiques peut causer des dommages conduisant à la défaillance du joint de brasure et par suite une défaillance du disposi-

tif complet. Afin d'éviter les défaillances dans le milieu opérationnel et réduire les coûts de garantie, une optimisation et une validation robuste des joints de brasure critiques devrait être effectuée dans le processus de conception et fabrication d'un dispositif mécatronique. La robustesse de cette validation comprend une optimisation de la conception du dispositif mécatronique [3] dans le but de maximiser le nombre de cycle de vie en fatigue. En général, les algorithmes d'optimisation peuvent être divisés en deux catégories principales : les méthodes sans gradient, qui n'emploient pas de gradients et se basent uniquement sur des évaluations de la fonction objective et des méthodes basées sur les gradients, qui nécessitent des calculs des dérivées de la fonction objective. Les méthodes basées sur le calcul du gradient nécessitent généralement un nombre beaucoup plus petit d'itérations pour converger vers un optimum par rapport aux autres méthodes. Cependant, seule la convergence vers un minimum local est garantie pour les méthodes basées sur les gradients, alors que les méthodes sans gradient sont capables de trouver un minimum global. En outre, Les méthodes sans gradient ne limitent pas les fonctions objectives et leurs vitesses de convergence ont considérablement augmenté grâce au développement de techniques d'optimisation sans gradient alors que les méthodes avec gradient sont limitées dans les cas où la fonction objectif est toujours différentiable et possède des dérivées continues sur le domaine de conception. Dans les problèmes d'optimisation des systèmes mécatroniques pour la maximisation du nombre de cycle de vie des dispositifs, la fonction objectif est généralement une fonction non linéaire et son analyse n'est pas explicitement connue et son évaluation est réalisée par simulation numérique (à base des éléments finis) ; En d'autres termes, les dérivées de la fonction objectif ne sont pas disponibles. Compte tenu des deux aspects ci-dessus, un algorithme d'optimisation global sans gradient est préféré. Dans cet article, la stratégie d'évolution basée sur l'adaptation de matrice de covariance (CMA-ES) [5, 4] est utilisée. La fonction objectif (Nombre de cycle de vie en fonction des paramètres de conception) est évaluée de manière répétée en exécutant des itérations. L'intérêt de cette méthode est l'efficacité et le calcul d'un optimum global de la fonction objectif.

1. Modélisation et simulation du système

1.1. Modèle éléments finis

Dans notre étude, nous utilisons une carte électronique composée d'un microcontrôleur de type 256 pin PQFP placé sur un circuit imprimé. Les joints sont brasés sur le PCB par une brasure sans plomb nommée SAC305. Un calcul utilisant le modèle global (voir figure 1 de la carte avec le microcontrôleur [2]) a un coût très élevée. Afin de réduire le temps de calcul, on a développé un modèle local avec le joint de brasure le plus critique [10]. Le modèle local basé sur la technique des éléments finis, de la zone critique est développé, il s'agit du joint de brasure le plus sollicité par le chargement thermique. Le modèle géométrique local (cf. Figure 2) est composé d'un circuit imprimé (PCB) en FR4, d'un composant en résine EPOXY, d'une broche en cuivre et d'une brasure en SAC305. L'intérêt de l'utilisation du modèle local réside dans la réduction du temps de calcul. Les conditions aux limites de symétrie sont introduites dans la modélisation. Le modèle du joint de brasure est réalisé en tenant compte des non linéarités du matériau. Le comportement viscoplastique de la brasure est modélisé par le modèle d'Anand. Tous les modèles éléments finis de cette étude sont développés avec l'outil de simulation par éléments finis ANSYS Mechanical.

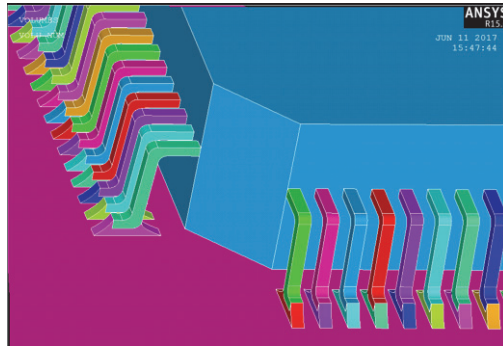


Figure 1. *Modèle géométrique global.*

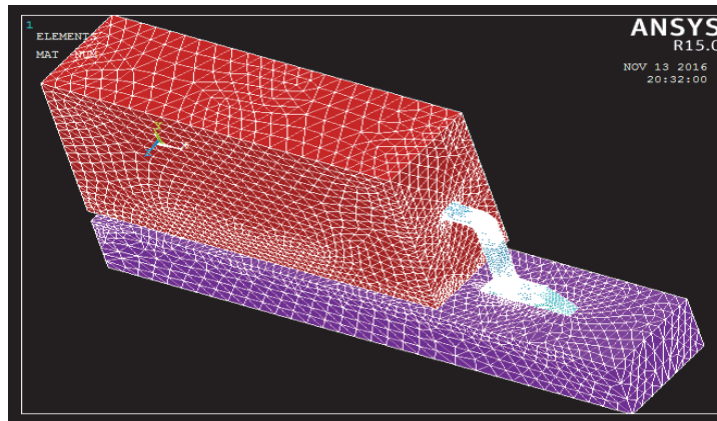


Figure 2. *Modèle géométrique local.*

1.2. *Chargement thermique*

Les tests de vieillissement thermique accéléré, recommandés par les normes JEDEC [7] sont appliqués comme charge thermique dans l'analyse des éléments finis. Le profil de température appliqués, varie entre -40°C et 125°C avec une durée de 30 min pour la plus haute et la plus basse température, et d'une rampe de $15^{\circ}\text{C} / \text{min}$. Les dispositifs pour les applications automobiles sont généralement testés dans cette gamme de température. La figure 3 montre le profil de température cyclique. Dans le calcul EF, la première étape consiste à simuler le processus de refusion des brasures pour tenir compte des contraintes initiales. Ce processus consiste à appliquer un profil de température allant de la température de fusion des joints de brasure à la température ambiante de 25°C en 150 secondes. Dans une deuxième étape, six cycles thermiques entre -40°C et 125°C sont appliqués comme condition de chargement pour le modèle d'éléments finis.

1.3. *Propriétés des matériaux*

Pour l'analyse thermomécanique, en utilisant le modèle local, le matériau des joints de brasure (SnAgCu) est supposé avoir un comportement viscoplastique. Le développement des déformations plastiques dans le matériau du joint de brasure, dépend de la vitesse du chargement. De nombreux auteurs ont étudié la réponse des joints de brasure sans plomb (SnAgCu) et ils ont proposés des équations modélisant cette réponse. L'un des modèles développés est le modèle d'Anand [1] qui intègre la viscoplasticité et la plasticité dépendant du temps, ce modèle est représenté par des équations, [12], obtenus à partir des résultats expérimentaux. Ces paramètres sont présentés dans le tableau 1.2 [12].

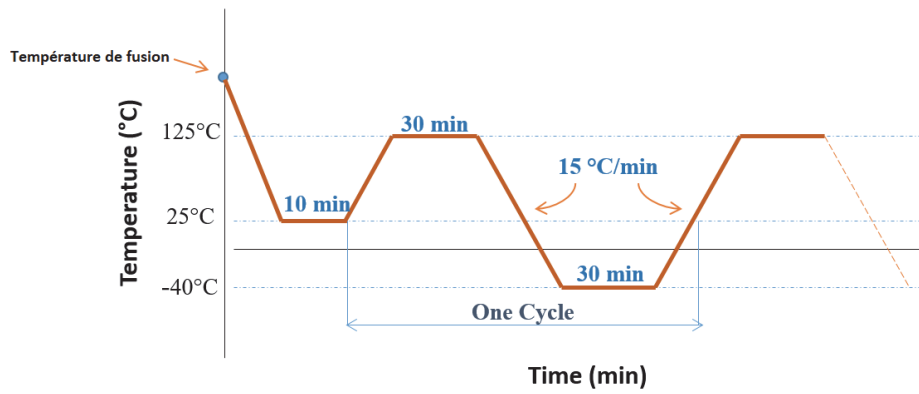


Figure 3. Le cycle de température.

Propriétés des matériaux	SAC305	FR	Résine EPOXY	Cu
Module de Young(GPa)	51.3	17	17	115
Coefficient de Poisson	0.3	0.3	0.2	0.31
Densité (Kg/m ³)	740	180	180	8890
CTE (um/K)	20	18	22	17
Module de cisaillement(GPa)	19	2.4	7.4	44

Tableau 1.1. Propriétés des matériaux..

Paramètres du matériau	SAC305
A (s ⁻¹)	2.23 10 ⁴
Q/R (K)	8900
ξ (sans)	6
m (sans)	0.182
\hat{s} (sans)	73.81
n (sans)	0.018
h_0 (MPa)	3321.15
a (sans)	1.82
S_0 (MPa)	39.09

Tableau 1.2. Paramètres du matériau du modèle d'Anand.

1.4. Modèle de fatigue thermique

La plupart des défaillances dans les dispositifs mécatroniques sont dues à la fatigue des joints de brasure causée par les mécanismes de dégâts thermomécaniques pendant la durée de vie du composant. La prédiction de la fatigue articulaire du joint de brasure nécessite une combinaison de la simulations des éléments finis avec un modèle de fatigue thermique. Le modèle de fatigue est généralement obtenu en utilisant des données expérimentales et des tests accélérés. Ce modèle est utilisé pour déterminer le nombre de cycles qu'un composant peut résister avant la défaillance du dispositif.

Les modèles proposés pour prédire la durée de vie en fatigue peuvent être classés en quatre catégories : approche basée sur la contrainte, approche basée sur la déformation plastique et le fluage, approche basée sur l'énergie, et une approche basée sur l'endommagement [9].

Étant donné que la déformation inélastique (déformation plastique et fluage) est un paramètre dominant qui influence la fatigue oligocyclique, cette étude utilise le modèle de Coffin-Manson classée dans l'approche à base de déformation plastique. La déformation inélastique est calculée par simulation éléments finis non linéaire avec le modèle d'Anand, qui combine la déformation plastique et le fluage. Le modèle de fatigue de Coffin-Manson est l'approche la plus utilisée, où le nombre de cycles de vie N_f dépend de l'amplitude de la déformation inélastique ; le modèle est généralement donnée par l'équation suivante :

$$\Delta \epsilon_{in} N_f^\alpha = \theta \quad [1]$$

avec $\Delta \epsilon_{in}$ la variation de la déformation plastique au niveau du joint de brasure, α le coefficient de ductilité ($\alpha = 0.73$), N_f le nombre de cycles, et $\theta = 3.7$ l'exposant de ductilité [11].

Dans cette étude, le nombre de cycles de vie en fatigue des joints de brasures est évalué en fonction du taux de déformation inélastique. Le calcul de la déformation inélastique du joint de brasure en figure 4 indique les zones fortement déformées. L'épaisseur et la largeur de la brasure sont alors des dimensions caractéristiques puisque l'ensemble des déformations inélastiques se produit dans cette zone.

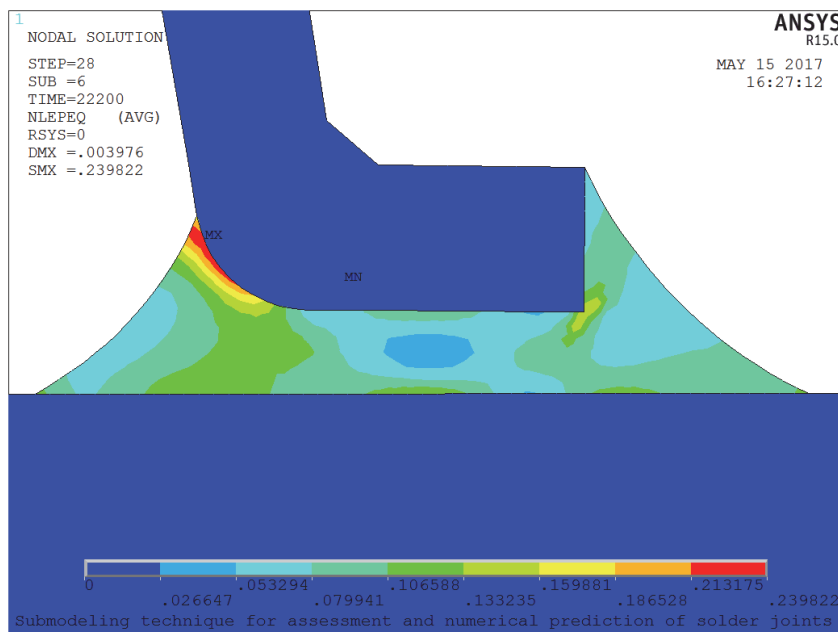


Figure 4. Distribution de la déformation plastique au niveau du joint de brasure.

2. Optimisation du joint de brasure

2.1. Algorithme d'optimisation CMAES (λ, μ)

À l'heure actuelle, la méthode CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy) se présente comme une des meilleures stratégies d'évolution. Cette méthode [6] appartient à la classe des stratégies d'évolutions où on utilise un ensemble de μ « parents » pour produire λ « enfants ».

CMA-ES (λ, μ) est utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation sans contrainte. CMA-ES repose sur un modèle de distribution d'une population candidate (répartition paramétrique multivariée normale) afin d'explorer l'espace de conception. Il est basé sur une sélection et un processus d'adaptation de la population candidate. Dans CMAES (λ, μ), à chaque génération, k les candidats à la progéniture sont générés par les parents. À la prochaine génération, pour sélectionner les nouveaux parents parmi les candidats à la progéniture, on choisit une sélection (λ, μ), les meilleurs candidats sont choisis (en fonction de leur classement selon la fonction objective). CMA-ES (λ, μ) génère la population en échantillonnant une distribution multinormale :

$$x_t^{k+1} \sim m^{(k)} + \sigma^{(k)} \mathcal{N}(0, C^{(k)}), \text{ pour } t = 1, \dots, \lambda \quad [1]$$

avec $x_t^{k+1} \in \mathbb{R}$ est un individu généré à partir du vecteur moyen $m^{(k)}$, le pas $\sigma^{(k)}$ et la loi multinormale $\mathcal{N}(0, C^{(k)})$ de moyen 0 et d'une matrice de covariance $C^{(k)} \in \mathbb{R}^{(n)} \times \mathbb{R}^{(n)}$, λ est la taille de la population générée à chaque itération (k), la distribution multinormale est caractérisée par une matrice de covariance définie positive, et cela dans l'objectif de permettre les transformations homothétiques et les rotations de l'hypervolume de recherche probable. La mise à jour de la matrice de covariance intègre une combinaison entre les anciens générations et les μ meilleurs individus de la génération précédente [5]. Le vecteur moyen s'agit du centre de la prochaine population, et elle est obtenue à travers une combinaison pondérée des μ meilleurs individus : $m^{(k+1)} = \sum_{i=1}^{\mu} w_i z_{(i)}^{(k+1)}$ où $\sum_{i=1}^{\mu} w_i = 1$, $w_1 > w_2 > \dots > w_{\mu} > 0$ sont les coefficients de pondération et $(z_{(1)}, \dots, z_{(1)})$ sont les meilleurs individus de la génération classée en fonction de leur valeurs obtenues par la fonction objective. Les coefficients de pondération sont déterminés à base du nombre des μ meilleurs individus [5]. L'algorithme ci-dessous présente une description simplifiée de la méthode :

Algorithm 1 CMAES (λ, μ) [5]

Initialiser la matrice de covariance $C(0) = I$, la taille de l'étape $\sigma^{(0)}$ et les paramètres de sélection ;

initialiser le vecteur moyen $m^{(0)}$;

$k \leftarrow 0$

tant que critères de convergence CMA-ES ne sont pas atteints **faire**

Générer une population de λ individus selon la loi :

$$x_t^{k+1} \sim m^{(k)} + \sigma^{(k)} \mathcal{N}(0, C^{(k)}), \text{ for } t = 1, \dots, \lambda$$

Evaluer la fonction coût de chacun de λ individus.

Classer les sur la base de leur fonction objective

Déterminer le vecteur moyen par **mutation** des μ meilleurs individus selon :

$$m^{(k+1)} = \sum_{i=1}^{\mu} \omega_i z_i^{(k+1)}$$

Mettre à jour la matrice de covariance $C^{(k+1)}$ et la taille de pas $\sigma^{(k+1)}$ selon [5]

fin tant que

Retourner les meilleurs individus x_t^{k+1}

Les critères de convergence peuvent être basés sur le nombre maximal d'itérations, le nombre d'évaluations de la fonction objectif, la valeur de cette dernière, l'écart type de la population actuelle inférieure à une tolérance donnée, ou la matrice de covariance C devient numériquement non définie positive.

2.2. Application

Comme il est indiqué sur la figure 4 les zones fortement déformés sont au niveau du joint de brasure. Les variables d'optimisation : $BRAS_E$, $BRAS_L$, et $BRAS_H$ sont les trois paramètres les plus influents dans la structure. avec $BRAS_E$ est l'épaisseur de la brasure, $BRAS_L$ et $BRAS_H$ sont respectivement : la longueur et la hauteur de la broche [?].

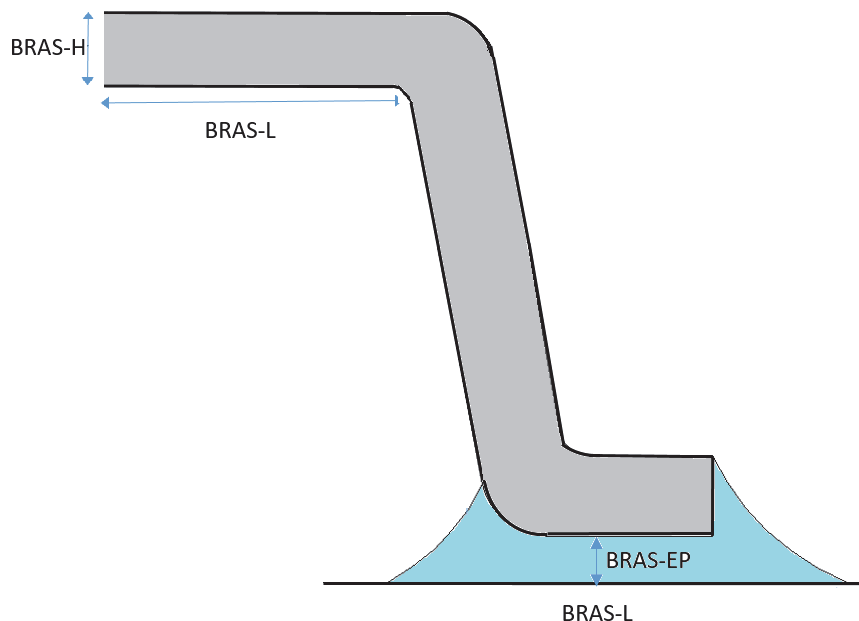


Figure 5. Variables d'optimisation.

Le problème d'optimisation consiste à maximiser le nombre de cycle de vie N_f du joint, ce qui revient à minimiser $\Delta\varepsilon_{in}$ la variation de la déformation plastique au niveau du joint de brasure.

$$f(x) = \begin{cases} \min f(x) = \min \Delta\varepsilon_{in} \\ 0.1 < BRAS_{EP} < 0.25 \\ 0.5 < BRAS_L < 1 \\ 0.1 < BRAS_H < 0.4 \end{cases} \quad [2]$$

L'optimisation est réaliser à l'aide d'un couplage entre Matlab et ANSYS suivant la méthodologie ci-dessous.

Le tableau 2.3 présente les résultats d'optimisation par la méthode CMAES. Les résultats obtenus montrent une augmentation du nombre de cycles de vie du joint de brasure, et signifie un succès et la robustesse de la méthode CMAES dans l'application dans le domaine de la mécanique.

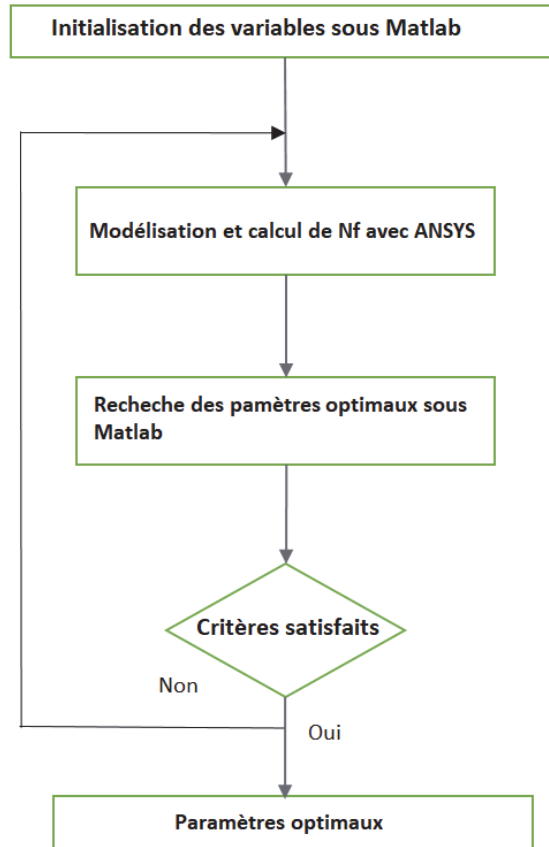


Figure 6. *Méthodologie d'optimisation.*

Paramètres	Paramètre initiaux	Paramètres optimaux
$BRAS_{EP}$	0.15	0.17
$BRAS_L$	0.7	0.6
$BRAS_H$	0.17	0.16
N_f	750.10	925

Tableau 2.3. *Résultats d'optimisation.*

3. Conclusion

Dans cette article on a étudié le comportement en fatigue des joints de brasure des composant électronique de type SAC305, sous des contraintes thermique de l'environnement. Un modèle d'éléments finis est développé pour simuler le comportement viscoplastique de l'alliage SAC305 et déterminer l'évolution de la déformation plastique dans les zones critiques du joint de brasure. Les résultats sont utilisés pour prédire le nombre de cycle de vie en fatigue du composant. la deuxième partie de ce travail était consacré à l'application de la méthode d'optimisation CMAES qui a montré sa robustesse dans l'optimisation du joint de brasure et l'amélioration du nombre de cycle de vie en fatigue du composant.

Bibliographie

- [1] L. Anand. Constitutive Equations for the Rate-Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 104(1) :12, 1982.
- [2] Y Aoues, A Makheloufi, P Pougnet, and P Dahoo. Probabilistic assessment of thermal fatigue of solder joints in mechatronic packaging. (January), 2012.
- [3] Abdelkhalak El Hami and Radi Bouchaib. *Uncertainty and Optimization in Structural Mechanics*. John Wiley & Sons, 2013.
- [4] Nikolaus Hansen. The CMA Evolution Strategy : A Comparing Review. *Towards a New Evolutionary Computation*, pages 75–102, 2006.
- [5] Nikolaus Hansen. The CMA Evolution Strategy : A Tutorial. 102(2006) :75–102, 2016.
- [6] Nikolaus Hansen, Sibylle D. Müller, and Petros Koumoutsakos. Reducing the Time Complexity of the Derandomized Evolution Strategy with Covariance Matrix Adaptation (CMA-ES). *Evolutionary Computation*, 11(1) :1–18, 2003.
- [7] JEDEC Solid State Technology Association. JEDEC Standard JESD22-A104D, Temperature Cycling. *Jedec.Org*, (May 2005) :11, 2009.
- [8] R Le Riche, M Schoenauer, and M Sebag. Un état des lieux de l'optimisation évolutionnaire et de ses implications en sciences pour l'ingénieur. *Modélisation Numérique : défis et perspectives, vol. 2, Traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux*, pages 187–259, 2007.
- [9] W.W Lee, L.T Nguyen, and G.S Selvaduray. Solder joint fatigue models : review and applicability to chip scale packages. *Microelectronics Reliability*, 40(2) :231–244, 2000.
- [10] S.ASSIF. FIABILITÉ ET OPTIMISATION DES STRUCTURES MÉCANIQUES À PARAMÈTRES INCERTAINS : application aux cartes électroniques. Technical report, 2013.
- [11] Wei Tan. No Title. (April), 2008.
- [12] G. Z. Wang, Z. N. Cheng, K. Becker, and J. Wilde. Applying Anand Model to Represent the Viscoplastic Deformation Behavior of Solder Alloys. *Journal of Electronic Packaging*, 123(3) :247, 2001.