

Etude Mecano-Fiabiliste D'un Packagin Electronique De Type BGA*

ZAKARIA EL HADDAD, LARBI EL BAKKALI, OTHMANE BENDAOU

Modeling and Simulation of Mechanical Systems Laboratory, Abdelmalek Essaâdi, Faculty of Sciences, BP.2121, M'hannech, 93030, Tetouan, Morocco

Zakaria_elhaddad@hotmail.fr

Résumé— Dans ce travail on va analyser la fiabilité sur un package électronique de type BGA par les méthodes FORM/SORM et par la méthode de Monté Carlo ; c'est pourquoi nous allons essayer d'élaborer un modèle numérique concret ; celui-ci sera fondé sur la technique des éléments finis : ces éléments participent des recommandations JEDEC qui sont liés à un package de type BGA avec ANSYS MECHANICAL.

Mots clés—Package électronique ;package BGA ; fiabilité ;FORM/ SORM ;Monté Carlo

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'électronique joue un rôle important, voire vital dans plusieurs applications : médecine, systèmes des moyens de transport, télécommunication,... Afin de réaliser les fonctions électriques, les systèmes électroniques sont appelés à être sûrs, fiables, de faible résistance thermique (pour bien dissiper la chaleur), de même insensibles aux variations de l'environnement extérieur (humidité, choc thermique et mécanique,...).

Parmi les études relevant de ce domaine d'application, la fiabilité joue un rôle primordial pour traiter ce sujet; notamment le packaging.

La technologie des Packages électroniques ne s'arrête pas de se développer, si bien qu'à présent, on dénombre environ une vingtaine de modèles.

Nous nous intéressons dans ce travail aux types BGA (matrice de billes en anglais Ball Grid Array), figure(1). Ce type se présente sous forme compacte et offre des propriétés électriques bien supérieures vis-à-vis des autres modèles. Alors que ses désavantages résident principalement dans le fait qu'elles soient d'ordre mécanique, du fait de leur sensibilité aux gradients de température auxquels ils sont exposés lors de l'encapsulation plus (de 150°C) et aussi au moment de la refusions. Cette situation entraîne la déformation du packages (warpage) [5], causée par les différents coefficients de dilatation thermiques (CTE) des matériaux contenus dans le package.

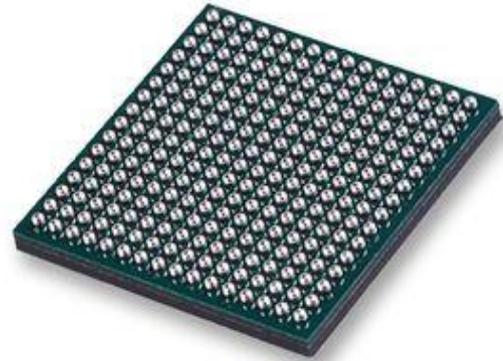


Fig.1 : BGA Ball Grid Array

Dans cette étude, nous allons élaborer un modèle numérique concret fondé sur la technique des éléments finis qui relèvent des recommandations JEDEC en relation avec un package de type BGA avec ANSYS MECHANICAL.

Pour simuler l'état de refroidissement de la température après moule de cuisson (175°C) à la température ambiante (25°C) ; on a fait une analyse thermomécanique, dans le but de mesurer et de prévoir le taux de déformation. Ensuite, on a étudié la sensibilité pour examiner les paramètres les plus influents. Enfin, nous avons analysé la fiabilité sur ce package en appliquant les méthodes FORM/SORM et la méthode de Monte-Carlo.

II. MÉTHODE DE FIABILITÉ

Dans la majorité des problèmes de fiabilité, le fait de chercher à modéliser les mécanismes de dégradations, celui des contraintes de l'environnement de la structure, va conduire à la définition d'une fonction et d'un critère de défaillance.

Ce critère devient une fonction des paramètres du modèle ; il implique une séparation de l'espace en deux zones : d'une part la zone de fiabilité ; d'autre part la zone de défaillance.

$G(X) > 0$ définit le domaine de sécurité de la structure.

$G(X) < 0$ définit le domaine de défaillance de la structure.

$G(X) = 0$ définit la surface d'état limite.

La fonction $G(X)$ appelée fonction d'état limite ou fonction de performance. [1]

La probabilité de défaillance de la structure est alors égale à :

$$P_f = P(G(X) \leq 0) \quad (1) \text{ soit } P_f = \int_{G(X) \leq 0} f_X(x) dx \quad (2)$$

f_X est la densité de probabilité conjointe du vecteur aléatoire X .

Dans la mesure où la solution analytique de cette intégrale est en général complexe, voire impossible ; vu la complexité des fonctions de défaillance et le grand nombre de variables du modèle rendant en général le calcul direct de P_f impossible, on utilise en pratique les méthodes FORM et SORM qui sont basées sur une approximation du domaine de défaillance D par un domaine simplifié dans lequel l'intégrale peut être calculée au moyen des techniques numériques.

III. MÉTHODE FORM ET SORM

Il va sans dire que ces méthodes sont les plus utilisées pour résoudre les problèmes dans le domaine de la fiabilité des structures [1], [4]. Ce sont des méthodes approchées qui nous permettent d'approximer la fonction d'état limite, l'indice de fiabilité β , et la probabilité de défaillance. Mais elles ne permettent pas de donner la fonction de densité de probabilité de la réponse. La première étape pour ces méthodes consiste à rechercher le point de défaillance le plus probable P^* , encore appelé point de conception, dans l'espace des variables standard. Ensuite, la fonction d'état limite est approximée par son développement de Taylor au premier ordre (FORM) ou au second ordre (SORM), autour du point de conception.

A. Méthode FORM

La méthode FORM (First Order Reliability Method) a été introduite dans le but de faire une approximation de la probabilité de défaillance à moindre coût comparé à la simulation de Monte Carlo, ou le coût est mesuré en termes du nombre d'évaluation de la fonction d'état limite [3].

La première étape consiste à retraiter le problème dans l'espace normal standard par l'utilisation des transformations isoprobabilistes. Pour ce faire, les variables physiques X , suivant a priori une loi quelconque et corrélées, sont transformées en variables aléatoires centrées réduites et indépendantes U . Ces dernières définissent les vecteurs de base de l'espace normé. Cet espace est parfaitement adapté à une conduite simple de calculs. Par ailleurs, les difficultés liées aux domaines de définition des densités des variables physiques sont ainsi évitées étant donné que la densité gaussienne est à support infini. D'autre part, celles liées à une différence trop importante entre les ordres de grandeurs des valeurs moyennes des variables en jeu ne se posent plus.

La deuxième étape de la méthode FORM consiste à déterminer le point u^* appelé point de conception, qui est le point de défaillance le plus probable. Ce point appartient à la surface d'état limite et a pour caractéristique d'être le plus proche de l'origine. La fonction d'état limite pour la méthode FORM du premier ordre autour du point de conception s'écrit :

$$G_U(U) = 0 \approx \nabla_{g_u}(u^*)^T (u - u^*) \quad (3)$$

Ce point de conception est solution du problème d'optimisation qui résoud :

$$\begin{cases} \beta = \min(\sqrt{u^T u}) \\ \text{tel que : } G_U(u) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Dans l'équation Eq.(4), u^T est la transposée de u et β représente l'indice de fiabilité au sens de Hasofer et Lind,

β_{HL} qui est la distance entre l'origine et le point de conception.

Cet indice diffère de celui de Basler et Cornell qui est basée sur une linéarisation autour du point moyen. Celle proposée par ces deux derniers auteurs est rarement retenue dans la pratique en raison du manque d'invariance quant à la manière de formuler la fonction d'état limite [3].

Troisième et dernière étape de cette méthode d'approximation consiste à estimer la

probabilité de défaillance à partir de l'indice de fiabilité. C'est une grandeur scalaire, qui permet de rendre compte de la fiabilité d'un mode de performance donné. En effet, plus cet indice est élevé, plus la probabilité de défaillance sera faible. La relation entre l'indice de fiabilité et la probabilité de défaillance s'écrit de la manière suivante :

$$P_f \approx \Phi(-\beta) \quad (5)$$

Il est à noter que dans le cas d'une fonction d'état limite possédant une forte courbure, l'approximation au point de conception par un hyperplan tangent n'est évidemment plus adaptée. Il est alors nécessaire de recourir à une approximation au second ordre.

B. Méthode SORM

La méthode de fiabilité du second ordre SORM (Second Order Reliability Method) est basée sur une approximation plus précise de la surface d'état limite, puisque cette dernière est approchée par une surface quadratique ayant le même rayon de courbure que la surface réelle au point de conception. Il est nécessaire de trouver une approximation de la fonction d'état limite par un développement en série de Taylor du second ordre autour du point de conception. La surface d'état limite s'écrit de la forme suivante :

$$G_U(U) = 0 \approx \nabla_{g_u}(u^*)^T (u - u^*) + \frac{1}{2} (u - u^*)^T D(u^*)(u - u^*) \quad (6)$$

D est la matrice Hessienne symétrique de la fonction G_U qui est la matrice des dérivées partielles du second ordre au point de conception :

$$D_{ij}(u^*) = \frac{\partial^2 g_u(u^*)}{\partial u_i \partial u_j} \quad (7)$$

Avec une telle approximation, la probabilité de défaillance peut être approchée par plusieurs approches. La probabilité de défaillance est [3] :

$$Pf = \Phi(-\beta) \prod_{j=1}^{n-1} (1 - \beta k_j)^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Il apparaît clairement dans l'équation Eq.(8) que l'approximation SORM de la probabilité de défaillance est obtenue par une correction de celle obtenue par l'approximation FORM exprimé dans l'équation Eq.(5) [3].

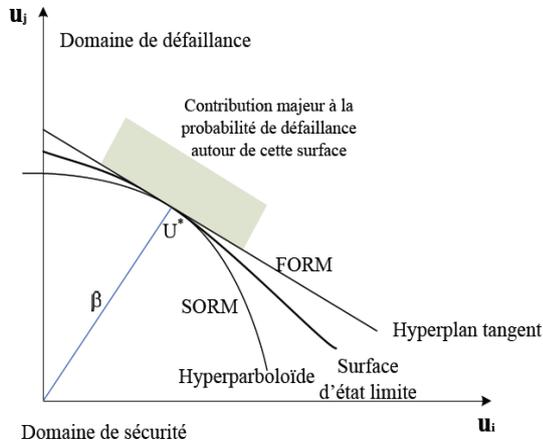


Fig.2. Méthode FORM/SORM

C. Simulations de Monte Carlo (MC)[2]:

C'est la méthode la plus générale et la plus coûteuse. Les tirages sont effectués dans tout l'espace normé, suivant la loi multi-normale. Pour N tirages aléatoires, l'espérance de l'intégrale est :

$$P_f = P[G(X_i) \leq 0] = \int_{D_f} f_{X_i}(x_i) dx_1 \dots dx_n$$

elle est évaluée par le rapport du nombre d'échantillons défaillants N_f sur le nombre total de tirages

$$N(P_f = \frac{N_f}{N}) \quad (9)$$

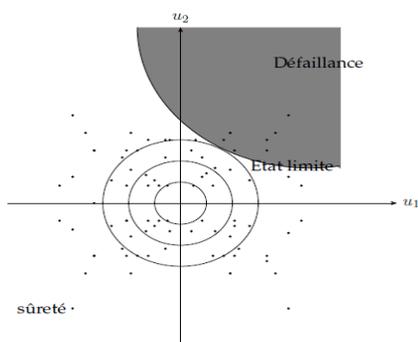


Fig.3: Simulation de Monté-carlo

D. Couplage mécano-fiabiliste

Déterminer la fonction de performance explicitement dans les problèmes de mécanique des structures s'avère parfois impossible, c'est pourquoi il est nécessaire d'avoir une définition implicite tel que à titre d'exemple un code de calcul des éléments finis. Dans notre étude, on a effectué un couplage direct entre le logiciel ANSYS et Matlab pour pouvoir calculer la probabilité de défaillance du package. Le modèle mécanique assure le fait de passer des données d'entrée aux variables de sortie ; alors l'outil fiabiliste se charge de calculer la probabilité de défaillance.

IV. LE MODÈLE DE SIMULATION

Le modèle effectué est un modèle en 3 dimensions (3D) d'un package de mémoire ayant la forme rectangulaire ; il se compose de 6 matériaux dont : Substrat, Die attach, Die, Over mold, Top & Bot Cu et Top & Bot Solder Mask ; leurs propriétés sont détaillées au tableau 1.

TABLE I. PROPRIETES DES MATERIAUX

	ν	T_g	E(MPA)	CTE(ppm /°C)
Substrat (polymère)	19	187	25700/10500 @ 20 /150°C	CTE1xy=12 CTE1z=27 CTE2xy=12 CTE2z=140
Die attach (polymère)	0.4	-	1000/10 @ 20 /150°C	115
Die (Si)	0.278	-	131°3/129°3 @ 25/227°C	2.36/3.61 @ 73/227°C
Mould Compound (polymère)	0.36	120	2000/500 @ 20 /150°C	CTE12 1= 11/45
Cu	0.344	-	128900	16.7
Smask (polymère)	0.35	182	2900	CTE12 1= 68/146

Nous avons effectué un maillage cartésien rectangulaire (voire figure 4).

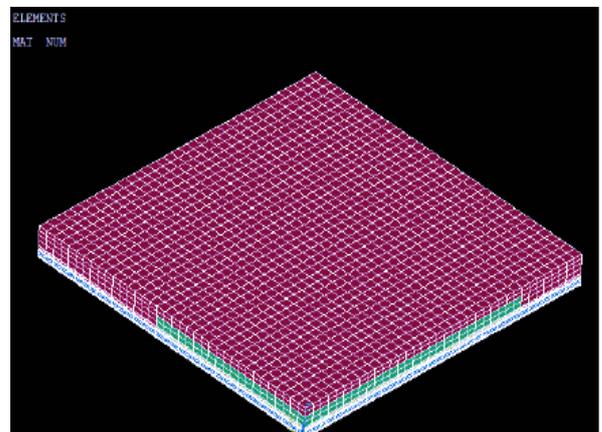


Fig.4.Maillage du Package de mémoire

L'analyse thermo-mécanique sur le package est fait d'une façon déterministe en supposant que tous les paramètres sont constants et la déformation maximale est de 0.47mm [6] (voire figure 5).

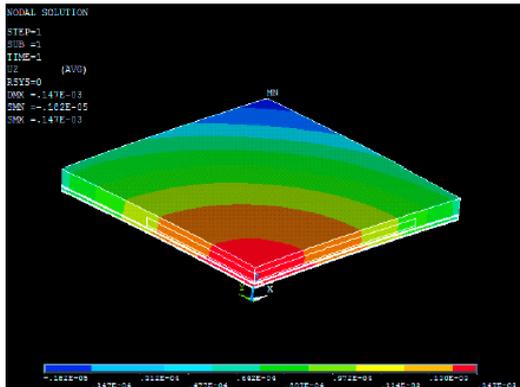


Fig.5.Warpage sur le package de mémoire

Résultats

En estimant que CTE du mold suit une loi Normale de moyenne $12e-6$ est d'écart type $12e-6*0.1$.

La défaillance a été fondée sur le constat selon lequel le taux de déformation ne doit pas dépasser une certaine valeur déterminée ; celle-ci doit être prise de façon arbitraire. La fonction d'état limite pourrait donc s'écrire de la façon suivante :

$$G = \varepsilon_{\max} - e \quad \text{avec} \quad \varepsilon_{\max} = 1.5253e - 4m$$

On montre les résultats des calculs pour l'estimation des indices de fiabilité et probabilités de défaillance dans le tableau ci-dessous

	FORM	SORM	Monté carlo(1000)
CTE-mold	1.0421e-5	1.0421e-5	-----
β	1.3212	1.3212	-----
P_f	0.9068	0.9068	0.9073

Conclusion

On a soumis le modèle relatif au package électronique de type BGA réalisé à deux analyses : L'une, thermomécanique dans le but de mesurer et de prévoir le taux de déformation pendant le refroidissement du package (de 175°C à 25°C). L'autre, mécano-fiabiliste avec implication des incertitudes sur le coefficient de dilatation thermique du Mold. Ensuite, on a calculé la probabilité de défaillance avec la méthode Form/Sorm. Alors, les résultats obtenus se sont avérés conforme avec celle de la simulation de Monte-Carlo.

References

- [1] M. Lemaire, A. Chateaufeu, and J.C. Mitteau. Fiabilité des structures. Couplage Mécano-fiabiliste statique. Hermes, 2005.
- [2] Mohamed A. and Lemaire M., 1995. Linearized mechanical model to evaluate reliability of offshore structures. Structural Safety, Vol. 17, pp. 167-193 .
- [3] S. Moammadkhani-Shali. Contribution de l'étude de redondance dans les ponts :analyses des mecanismes de défaillance par surfaces de réponse. PhD thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées, 2007.
- [4] Zakaria EL HADDAD, Larbi EL BAKKALI,Othmane BENDAOU.Application de Première / deuxième méthodes de fiabilité (FORM / SORM).1ère Conférence Internationale sur la Mécanique des Matériaux et des Structures MSM2014- Marrakech 2014.
- [5] JEDEC Standard n° 22B112, "High Temperature Package Warpage Measurement Methodology", 2005.
- [6] O. Bendaou, F. Bourzeix, B. Lakssir, A. El Hami, M.Agouzoul, L. El Bakkali, "BGA Warpage Investigations by Measurement and Stochastic FEA". 11ème Congrès International de Mécanique, Agadir, MAROC.Avril 2013.