



**HAL**  
open science

# Analyse de la sensibilité d'un résonateur SIW partiellement rempli d'air (Partially Air-Filled SIW) par une approche de chaos polynomial

Leanne Johnson, Dieter Klink, Hassan Bouazzaoui, Elmine Meyer, Petrie Meyer, Benjamin Potelon, Cédric Quendo, Rozenn Allanic

## ► To cite this version:

Leanne Johnson, Dieter Klink, Hassan Bouazzaoui, Elmine Meyer, Petrie Meyer, et al.. Analyse de la sensibilité d'un résonateur SIW partiellement rempli d'air (Partially Air-Filled SIW) par une approche de chaos polynomial. XXIIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes (06), France. hal-04588469

**HAL Id: hal-04588469**

**<https://hal.science/hal-04588469>**

Submitted on 27 May 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Analyse de la sensibilité d'un résonateur SIW partiellement rempli d'air (Partially Air-Filled SIW) par une approche de chaos polynomial

Leanne Johnson<sup>1</sup>, Dieter Klink<sup>1</sup>, Hassan Bouazzaoui<sup>2,3</sup>, Elmine Meyer<sup>4</sup>, Petrie Meyer<sup>1</sup>, Benjamin Potelon<sup>5</sup>,  
Cédric Quendo<sup>2</sup>, Rozenn Allanic<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Electrical and Electronic Department, Stellenbosch University, Stellenbosch 7602, South Africa

<sup>2</sup>Lab-STICC, UMR CNRS 6285, CNRS, Université de Brest, 29238 Brest, France

<sup>3</sup>Protecno Groupe Traon Industrie Développement, 29200 Brest, France

<sup>4</sup>Department of Electrical Eng., Eindhoven University of Technology, 5612 AP Eindhoven, The Netherlands

<sup>5</sup>Lab-STICC, UMR CNRS 6285, IMT Atlantique, 29238 Brest, France

benjamin.potelon@imt-atlantique.fr

**Résumé** – Cet article présente l'analyse de sensibilité d'un résonateur en s'appuyant sur une approche de chaos polynomial. Cette technique associée aux moindres carrés partiels permet de construire un modèle compagnon de dimension réduite, ce qui autorise une analyse rapide de la sensibilité aux dispersions technologiques. Cette technique est tout d'abord présentée puis elle est appliquée à l'analyse de la sensibilité de la réponse électrique d'un résonateur SIW partiellement rempli d'air à piédestal (Partially Air-Filled SIW) aux variations de  $\delta$  de ses paramètres dimensionnels.

## 1. Introduction

Les dispersions de fabrication sont un des problèmes couramment rencontrés lors de la réalisation de dispositifs radiofréquences, il convient donc d'essayer au maximum de minimiser l'impact de ces dispersions, par exemple en désensibilisant les structures vis-à-vis des dimensions les plus critiques. Ceci ne peut cependant être réalisé que dans le cas où les analyses de sensibilités peuvent être réalisées de façon rapide et fiable. Ces dernières années, les analyses de sensibilité appliquées aux dispositifs hyperfréquences ont utilisé diverses techniques, notamment les méthodes Monte Carlo [1], les méthodes de différences finies dans le domaine temporel et fréquentiel [2], [3], les méthodes de collocation stochastique [4] ou bien encore les méthodes d'expansion du chaos polynomial (PCE) [5]. Ces études ont montré que ces méthodes peuvent être efficaces pour identifier les paramètres les plus importants et leur influence sur le système. Cependant, beaucoup de ces méthodes utilisées seules ne sont pas adaptées aux problèmes complexes et/ou aux systèmes non-linéaires, car elles deviennent rapidement trop coûteuses en termes de calcul.

Des études récentes se sont concentrées sur le développement de nouvelles méthodes d'analyse de sensibilité globale qui peuvent traiter des systèmes non linéaires et de haute dimension [6], ce qui est le cas de la plupart des dispositifs hyperfréquences. Ces études reposent notamment sur des méthodes comprenant l'utilisation de l'expansion du chaos polynomial et des réseaux neuronaux [5], [7]. Ces travaux ont montré que ces méthodes peuvent fournir des résultats précis tout en

gérant la haute dimensionnalité et la non-linéarité du système.

Dans cet article, le PCE basé sur la méthode des moindres carrés partiels non linéaires (NL-PLS) est utilisé pour effectuer une analyse de sensibilité sur un résonateur à piédestal implémenté en technologie SIW partiellement rempli d'air (PAF-SIW) [8]-[10]. Dans la conception initiale de ce résonateur, présentée dans [8], le piédestal était implémenté en SIW avec une cavité complètement remplie de diélectrique. Dans [9], le résonateur a été conçu et réalisé en SIW partiellement rempli d'air (AFSIW) afin d'augmenter le facteur Q du résonateur, cependant, la réalisation de ces circuits, parce qu'elle est basée sur des procédés innovants, présente des risques élevés de dispersions technologiques. En effet, pour réaliser ce circuit, la fabrication a été réalisée en trois étapes : micro-usinage de la cavité, métallisation et empilage par thermodiffusion. Ces techniques de fabrication peuvent poser des problèmes de dispersions dimensionnelles ou d'alignement, et c'est pourquoi une analyse de sensibilité doit être effectuée sur la base des tolérances technologiques réalisables afin d'évaluer la fiabilité et la répétabilité de cette topologie sur de tels procédés.

Nous proposons ici de présenter les outils mathématiques (chaos polynomial) permettant de modéliser le comportement d'une structure vis-à-vis de la variance de différents paramètres, en l'occurrence des dimensions, puis d'appliquer cette méthode à la structure d'un résonateur à piédestal en technologie SIW partiellement remplie d'air.

## 2. Chaos polynomial et moindres carrés

Comme présenté dans [11], le chaos polynomial basé sur les moindres carrés est la combinaison de deux techniques, d'une part l'expansion du chaos polynomial (PCE), et d'autre part la méthode des moindres carrés partiels non linéaires (NL-PLS). Le PCE est utilisé pour construire un modèle stochastique consistant en une expansion polynomiale représentant le modèle électromagnétique. La méthode des moindres carrés partiels vise quant à elle à identifier les transformations des paramètres dimensionnels du système qui sont

fortement liés à un indicateur de performance choisi, tout en étant indépendants les uns des autres.

### 2.a. Moindres carrés partiels

La méthode des moindres carrés partiels repose sur l'hypothèse que les paramètres du système (dimensions) sont liés à (impactent) un indicateur de performance [12]. Cette relation pouvant être de nature linéaire ou non-linéaire. La technique des moindres carrés partiels est alors utilisée pour réduire la dimensionnalité du problème. Ainsi, une matrice de données, représentée par  $X$ , est composée d'un ensemble de  $N$  échantillons obtenus à partir d'un vecteur de variables aléatoires, noté  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Un vecteur de résultats de performance,  $Y$ , est établi sur la base des évaluations de l'algorithme EM sur la matrice de données  $X$ . La méthode des moindres carrés partiels projette la matrice de données  $X$  sur les composantes latentes en maximisant successivement la covariance entre  $Y$  et  $t_i$ , où  $t_i = \{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}\}$ . Pour tenir compte de la non-linéarité du système, la corrélation non linéaire entre  $Y$  et  $t_i$  est modélisée comme une fonction polynomiale, et les moindres carrés ordinaires (Ordinary Least Squares - OLS) sont utilisés pour calculer les coefficients. Une explication mathématique complète est développée dans [11] et [13].

### 2.b. Chaos polynomial

Le chaos polynomial étendu (PCE) [14]-[17] tire parti de l'orthogonalité des polynômes lors de l'utilisation de différentes fonctions pour distribuer les paramètres. Il est particulièrement bien adapté pour la prise en compte des incertitudes ou des aléas dans les processus de conception et constitue donc un choix pertinent pour notre cas d'usage. Il consiste à calculer la variable de performance  $Y(x)$  à l'aide de l'équation (1) :

$$Y(x) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \psi_k(x) \quad (1)$$

Dans laquelle on somme sur l'ensemble  $k = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$  les polynômes d'Hermite  $\psi_k(x)$  pondérés par  $c_k$ . Ces polynômes sont construits avec un ensemble de variables statistiquement indépendantes comme suit :

$$\Psi_k(x) = \prod_{i=1}^n \psi_{k_i}(x_i) \quad (2)$$

Dans laquelle les  $\psi_{k_i}$  représentent les polynômes d'Hermite pour un paramètre dimensionnel (une variable)  $x_i$ . Afin d'alléger les calculs, le PCE est tronqué pour n'inclure que les  $P$  premiers termes comme suit :

$$Y(x) = \sum_{|k| \leq P} c_k \psi_k(x) \quad (3)$$

En considérant cette approximation, la moyenne et la variance peuvent être extraites à partir des équations suivantes :

$$\mathbb{E}\{y(x)\} \approx c_0 \alpha_0 \quad (4)$$

$$\text{Var}\{y(x)\} \approx \sum_{|k| \leq P} c_k^2 \alpha_k^2 \quad (5)$$

Avec

$$\alpha_k^2 = \langle \psi_k(x), \psi_k(x) \rangle = \int \psi_k w(x) dx \quad (6)$$

Où  $w(x)$  représente la densité de probabilité associée au paramètre  $x$ .

Pour évaluer la sensibilité de structures, nous proposons d'utiliser la méthode des moindres carrés partiels avec un chaos polynomial qui est utilisé pour définir une fonction polynomiale non linéaire qui relie la composante latente  $t_i$  au vecteur de réponse  $Y$ , ce qui se traduit par une expansion unidimensionnelle de degré  $p$  à l'aide de polynômes d'Hermite.

$$Y_i^P(t) = \sum_{i=1}^P \hat{c}_{ij}^p \psi_j(t_i) \quad (7)$$

Chaque composante est évaluée avec différents degrés pour les polynômes  $q = \{1 \dots p\}$ . Le degré qui présente l'erreur minimale est sélectionné comme degré polynomial approprié pour cette variable latente spécifique [11]. Le vecteur d'erreur est ensuite minimisé en utilisant le PCE décrit et la méthode des moindres carrés décrite dans [12] jusqu'à ce qu'un seuil d'erreur prédéfini soit atteint. On obtient ensuite un ensemble de  $m$  composantes latentes,  $m$  poids et  $m$  modèles polynomiaux. La version finale du métamodèle est ainsi obtenue.

$$Y_m^{PLS}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^m \hat{Y}_i^{qi} \left[ (r_i^{qi})^T \tilde{x} \right] \quad (8)$$

La valeur  $q_i$  représente le degré de la composante principale  $i$  du métamodèle, avec l'erreur de covariance la plus faible. La matrice  $R$  est utilisée pour exprimer l'ensemble des valeurs cibles "T" en tant que projection de la matrice de données  $X$  sur la matrice  $R$ . Ce métamodèle est vérifié par la comparaison de ses prédictions avec les résultats réels obtenus à partir des évaluations du modèle, en utilisant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) comme indicateur de performance.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2 / N} \quad (9)$$

Une fois que le métamodèle a atteint un niveau satisfaisant de précision, évalué par l'erreur quadratique moyenne, des informations statistiques (paramètres les plus influents, par exemple) peuvent être dérivées directement des coefficients du chaos polynomial. Il s'agit notamment de la somme des estimations de la variance et de la moyenne pour chaque composante latente :

$$\hat{\sigma}_{Y_m^{PLS}} = \sum_i^m \sigma_{Y_i}^{qi} \quad (10)$$

$$\hat{\mu}_{Y_m^{PLS}} = \sum_i^m \mu_{Y_i^{qi}} \quad (11)$$

Maintenant que les fondements théoriques associés à la création du modèle équivalent ont été présentés et que les éléments permettant d'évaluer la sensibilité de chaque paramètre sont identifiés, nous proposons d'appliquer cette méthode pour évaluer la sensibilité d'une structure à différentes dispersions dimensionnelles.

### 3. Résonateur à piédestal en technologie SIW partiellement remplie d'air

Le résonateur à piédestal est un type de cavité chargée, qui contient un patch métallique situé à une hauteur intermédiaire relié par un ou plusieurs vias métallisés à l'un des plans de masse (supérieur ou inférieur) [8], [9]. Afin de réduire les pertes et d'améliorer le facteur de qualité, nous avons proposé d'implémenter cette topologie sur une technologie permettant d'avoir des SIW vides ou partiellement vides (Figure 1) [9].

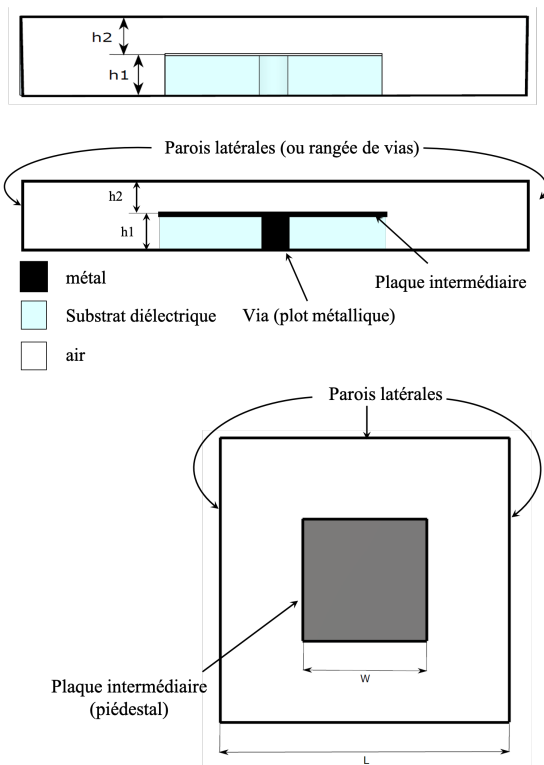


Figure 1 Vues en coupe transversale (haut) et de dessus (bas) d'un résonateur à piédestal

Ce résonateur est ensuite conçu en adaptant le principe décrit ci-dessus aux règles liées à la technologie choisie (Figure 2), celle-ci, basée sur du micro-usinage de cavité et la fermeture des cavités à air par thermodiffusion, est présentée dans [9]. Les procédés technologiques utilisés, novateurs et prometteurs, n'en restent pas moins au stade du développement et par conséquent sont sujets à des dispersions de réalisation. Le dispositif obtenu, centré sur une fréquence de 5 GHz, est présenté en Figure 3, ses réponses électriques mesurées et simulées sont présentées à la Figure 4.

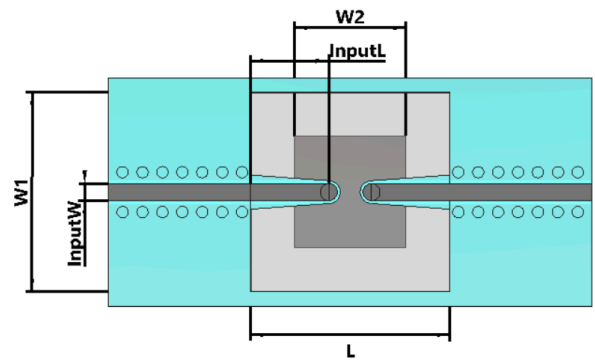


Figure 2 Vue de dessus du dispositif conçu

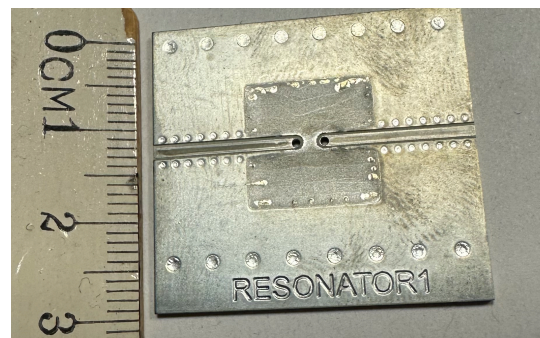


Figure 3 Photographie du dispositif réalisé

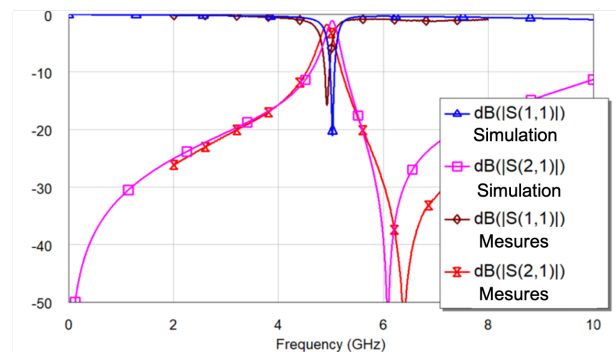


Figure 4 Réponses électriques simulée et mesurée de la structure

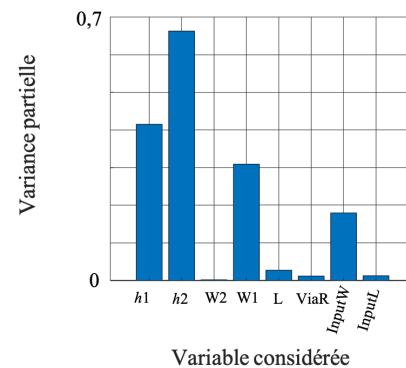


Figure 5 Résultats de l'analyse de sensibilité

## 4. Évaluation de la sensibilité de la structure aux dispersions dimensionnelles

L'analyse de sensibilité a été menée avec, pour chacune des variables de conception, des distributions gaussiennes autour des valeurs nominales avec une moyenne de 0 mm et une variance de 1  $\mu$ m. Le paramètre de réflexion,  $S_{11}$  est utilisé comme le paramètre de performance. Le critère à respecter est d'atteindre -17 dB sur une largeur de bande de 5 % autour de 5 GHz. La convergence du chaos polynomial est atteinte à partir de 30 échantillons.

Les dimensions pour lesquelles les calculs de variances ont été effectués sont  $x = \{h_1, h_2, W_2, W_1, L, \text{ViaR}, \text{InputW}, \text{InputL}\}$ , leurs valeurs nominales associées sont  $x_0 = \{0,5,0,5,7,84,14,14,0,4,5,5\}$ . Les résultats de cette analyse de sensibilité montrent que la réponse du résonateur est hautement sensible aux variations de  $h_1$  et  $h_2$  (variances les plus élevées). Ce résultat, cohérent avec une interprétation phénoménologique du fonctionnement du résonateur (le champ électrique est fortement concentré entre la plaque intermédiaire et la paroi métallique supérieure) indique qu'une attention particulière doit être apportée au respect de ces hauteurs au cours de la fabrication.

## 5. Conclusion

Dans cet article, nous avons démontré l'intérêt de l'utilisation du chaos polynomial associé aux moindres carrés partiels pour évaluer la sensibilité d'un système aux dispersions de certains de ses paramètres. Cette méthode a ensuite été appliquée au cas d'un résonateur SIW partiellement rempli d'air à piédestal. Les résultats apparaissent intéressants et prometteurs. En effet, l'utilisation d'un tel outil pourrait s'avérer d'une grande aide pour les concepteurs soucieux de savoir quelles sont les dimensions critiques lors de la réalisation de structures, et notamment en vue de rendre ces dernières moins sensibles.

## Références

- [1] Sadiku, M.N.O. (2009). Monte Carlo Methods for Electromagnetics (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315218465>
- [2] S. M. Smith and C. Furse, "Stochastic FDTD for analysis of statistical variation in electromagnetic fields," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 7, pp. 3343–3350, 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2196962.
- [3] K. Masumnia-Bisheh, K. Forooghi, and M. Ghaffari-Miab, "Electromagnetic Uncertainty Analysis Using Stochastic FDFD Method," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 5, pp. 3268–3277, 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2896771.
- [4] J. Bai, G. Zhang, L. Wang, and T. Wang, "Uncertainty analysis in EMC simulation based on improved method of moments," *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol. 31, no. 1, pp. 66–71, 2016.
- [5] P. Manfredi, D. Vande Ginste, D. De Zutter, and F. G. Canavero, "Generalized Decoupled Polynomial Chaos for Nonlinear Circuits with Many Random Parameters," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 25, no. 8, pp. 505–507, 2015, doi: 10.1109/LMWC.2015.2440779.
- [6] D. Klink, P. Meyer, and W. Steyn, "Efficient sensitivity analysis of EM structures using NLPLS-based PCE," *2022 Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl. ICEAA 2022*, vol. 14, no. 8, pp. 366–371, 2022, doi: 10.1109/ICEAA49419.2022.9900042.
- [7] S. A. Sadrossadat, Y. Cao, and Q. J. Zhang, "Parametric modeling of microwave passive components using sensitivity-analysis-based adjoint

- neural-network technique," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 5, pp. 1733–1747, 2013, doi: 10.1109/TMTT.2013.2253793.
- [8] S. O. Nassar and P. Meyer, "Pedestal substrate integrated waveguide resonators and filters," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 11, no. 6, pp. 804–810, 2017, doi: 10.1049/iet-map.2016.0120.
- [9] L. Johnson et al., "Novel High-Q Partially Air-Filled Pedestal Resonator and Filter Integrated in a Printed Circuit Board (PCB)," *IEEE Access*, vol. 10, no. September, pp. 101160–101167, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3208351.
- [10] L. Johnson et al., "Non-Linear Partial-Least-Squares-based Polynomial Chaos Expansion (NLPLS-based PCE) approach for global sensitivity analysis of a High-Q Partially Air-Filled Pedestal Resonator Integrated in a Printed Circuit Board (PCB)" *56th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP CMS '23*, October 2023, Capetown, South Africa
- [11] I. Papaioannou, M. Ehre, and D. Straub, "PLS-based adaptation for efficient PCE representation in high dimensions," *J. Comput. Phys.*, vol. 387, pp. 186–204, 2019, doi: 10.1016/j.jcp.2019.02.046.
- [12] A. Höskuldsson, "PLS regression methods," *J. Chemom.*, vol. 2, no. 3.
- [13] G. Baffi, E. B. Martin, and A. J. Morris, "Non-linear projection to latent structures revisited: The quadratic PLS algorithm," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 395–411, 1999, doi: 10.1016/S0098-1354(98)00283-X.
- [14] R. Tipireddy and R. Ghanem, "Basis adaptation in homogeneous chaos spaces," *J. Comput. Phys.*, vol. 259, pp. 304–317, 2014, doi: 10.1016/j.jcp.2013.12.009.
- [15] B. To and H. A. L. Id, "Chaos polynomial creux et adaptatif pour la propagation d'incertitudes et l'analyse de sensibilité," *Éraud BLATMAN Docteur d'Université*, 2009.
- [16] M. Ehre, I. Papaioannou, and D. Straub, "Global sensitivity analysis in high dimensions with PLS-PCE," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 198, no. November 2019, p. 106861, 2020, doi: 10.1016/j.ress.2020.106861.
- [17] B. S. Å, "Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions," vol. 93, pp. 964–979, 2008, doi: 10.1016/j.ress.2007.04.002.