



HAL
open science

Etude stochastique numérique de l'influence de la présence de défauts de porosité sur le comportement des matériaux composites

Hassoun Ishak, Alexandre Clément, Frédéric Jacquemin

► To cite this version:

Hassoun Ishak, Alexandre Clément, Frédéric Jacquemin. Etude stochastique numérique de l'influence de la présence de défauts de porosité sur le comportement des matériaux composites. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, Champs-sur-Marne, France. hal-01621596

HAL Id: hal-01621596

<https://hal.science/hal-01621596>

Submitted on 23 Oct 2017

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.

Etude stochastique numérique sur l'influence de la présence de porosité sur le comportement des matériaux composites

Stochastic numerical study on the influence of porosity on the behavior of composite materials

Hassoun ISHAK^{1,2}, Alexandre CLEMENT², Frédéric JACQUEMIN²

1 : Institut de Recherche Technologique Jules Verne,
Chemin du Chaffault 44340 Bouguenais, France
e-mail : hassoun.ishak@irt-jules-verne.fr

2 : GeM, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique,
Université de Nantes, Centrale Nantes, UMR CNRS 6183,
58 rue Michel Ange 44606 Saint-Nazaire, France
e-mail : alexandre.clement@univ-nantes.fr
e-mail : frederic.jacquemin @univ-nantes.fr

Résumé

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans des domaines divers tels que le transport et l'aérospatiale. En effet, ce type de matériau présente des caractéristiques intéressantes telle qu'une grande résistance tout en ayant des masses inférieures et un contrôle étroit sur les propriétés mécaniques ce qui leur a permis de devenir des concurrents sérieux à leurs homologues métalliques. Cependant, les procédés de fabrication des composites sont complexes et peuvent conduire à l'apparition ou le développement de défaut comme la porosité, qui affectent les propriétés mécaniques de la structure. Basé sur des critères conservatifs, un système de contrôle non destructif des pièces composites permet de juger leur conformité. En cas d'échec, ces pièces sont rejetées, avec des conséquences économiques non négligeables. Il apparait donc nécessaire d'étudier ces défauts et leur impact sur le comportement du matériau. Dans ce travail, nous proposons une étude numérique des effets des porosités, tout en tenant compte des incertitudes auxquelles elles sont soumises afin d'obtenir des prévisions physiques plus robustes. Nous adoptons une vision paramétrique des incertitudes, et nous étudions la propagation des incertitudes en se basant sur les méthodes d'approximation sur le chaos polynomial.

Abstract

Composite materials are more and more used in diverse domains such as the transport and the aerospace industries. Indeed, this type of material presents interesting characteristics such as higher strength at lower weights and close control over the mechanical properties. This allowed them to become competitors to their metallic counterparts. However, the manufacturing process of composites is complex and could lead to the appearance and the development of defects, such as porosity, which affect the mechanical properties of the structure. Based on conservative criteria, a system of non-destructive testing of composite parts makes it possible to judge their conformity. In case of non-conformity, those components are rejected, with non-negligible economic consequences. It is therefore necessary to study these defects and their impact on the behavior of the structure. In this work, we propose a numerical study of the impact of porosity, taking into account the uncertainties to which they are subjected, in order to obtain more robust physical predictions. We adopt a parametric vision of uncertainties, and we study the propagation of uncertainties based on stochastic spectral approximation such as the polynomial chaos.

Mots Clés : Mécanique numérique, Porosité, Analyse probabiliste, Chaos polynomial

Keywords : Computational mechanics, Porosity, Probabilistic analysis, Polynomial Chaos

1. Introduction

L'utilisation de matériaux composites dans l'industrie aérospatiale et dans l'industrie des énergies marines renouvelables est de plus en plus répandue [1]. En effet, ce type de matériau offre les meilleures performances en raison de leurs remarquables propriétés mécaniques spécifiques. Cependant, lors des contrôles des pièces composites

structurelles, certains défauts, liés aux procédés de fabrication, sont détectés [2]. Ces défauts peuvent diminuer les propriétés mécaniques de la structure [5-6-7]. Parmi les défauts les plus courants induits par les procédés de fabrication des composites il y a les porosités [3-4]. Ces dernières sont par ailleurs soumises à des incertitudes conduisant à des taux de porosité ou des distributions spatiales aléatoires. Nous proposons donc de mener une étude numérique stochastique visant à analyser l'impact de ces défauts sur les propriétés du composite, dans le but d'obtenir des prédictions physiques améliorées. Dans cet article, nous adoptons une vision paramétrique des incertitudes qui consistent à représenter le contenu probabiliste à travers un ensemble fini de variables aléatoires. La géométrie des vides modélisant les porosités et leurs taux sont caractérisés par des paramètres aléatoires d'entrée. Nous nous concentrons donc sur la propagation des incertitudes basée sur des méthodes stochastiques spectrales [5] telles que la technique de projection L^2 qui appartient aux approches dites non intrusives [6]. Ces méthodes ne nécessitent que l'utilisation de solveurs déterministes, tels que les logiciels d'éléments finis classiques, permettent facilement le calcul parallèle. La modélisation stochastique proposée sera résumée dans la section 3.

Dans ce travail, nous nous intéressons dans un premier temps à l'impact des porosités de petite taille (inférieure ou égale à celle des renforts) sur le comportement du matériau composite. Pour cela, nous utilisons l'homogénéisation numérique afin d'estimer les propriétés macroscopiques du matériau en prenant en compte l'aléa sur les porosités : celles-ci sont ici représentées à l'échelle microscopique par des vides et la variabilité est contenue dans le taux de porosité identifié à partir d'observations expérimentales. Les résultats obtenus sont discutés et l'efficacité de l'approche est montrée en comparant les différents résultats entre un modèle hétérogène, où les détails géométriques sont représentés, et un modèle homogène équivalent dont les propriétés aléatoires sont issues de l'homogénéisation effectuée.

2. Problème mécanique

Nous étudions le comportement d'un système mécanique qui, à partir d'un état initial non chargé, atteindra un nouvel état d'équilibre sous l'action de forces extérieures. L'étude sera limitée à un matériau composite constitué de plusieurs matériaux supposés linéaires élastiques dans le cadre des petites déformations. Le domaine $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ est soumis à des efforts volumétriques $\mathbf{f}(x)$ et des forces surfaciques $\mathbf{F}(x)$, avec des conditions aux limites spécifiques appliquées aux frontières. Les contraintes sont représentées par un tenseur symétrique du second ordre noté $\boldsymbol{\sigma}$ de sorte que le problème consiste à trouver le champ de déplacement \mathbf{u} qui vérifie :

$$\operatorname{div}\boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (\text{Eq. 1})$$

Cette équation est complétée par la loi de comportement qui relie le tenseur de contrainte au tenseur de déformation du deuxième ordre $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})$:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \quad (\text{Eq. 2})$$

où \mathbf{C} est le tenseur élastique de quatrième ordre dépendant du matériau.

Des conditions aux limites spécifiques en déplacement et en force sont ajoutées à ce problème pour notamment assurer l'unicité de la solution.

3. Approche spectrale stochastique

L'approche stochastique basée sur la théorie probabiliste est l'une des différentes approches existantes pour modéliser les incertitudes. Dans ce travail, nous adoptons une vision paramétrique des incertitudes [5, 6, 7] consistant à représenter le contenu probabiliste par un ensemble fini de m variables aléatoires indépendantes du second ordre $\boldsymbol{\xi} = (\xi_1, \dots, \xi_m)$ caractérisées par leur mesure de probabilité $P_{\boldsymbol{\xi}}$. Une identification des paramètres aléatoires d'entrée en utilisant des données existantes ou un jugement d'expert peut aider à caractériser les lois de probabilité marginale d'entrée qui décrivent le vecteur aléatoire $\boldsymbol{\xi}$. La propagation des incertitudes, c'est-à-dire le calcul de quantités d'intérêt aléatoires de sortie, peut être effectué avec diverses techniques telles que des simulations de Monte-Carlo. Dans ce travail, nous proposons d'utiliser des approches spectrales qui consistent à approximer la solution stochastique par une représentation fonctionnelle par rapport aux variables aléatoires de base.

Nous désignons par $\mathbf{u}(\boldsymbol{\xi})$ la solution aléatoire du problème modèle. Cette approche consiste à rechercher la réponse $\mathbf{u}(\boldsymbol{\xi})$ sous la forme d'un développement en série de la forme suivante :

$$\mathbf{u}(\boldsymbol{\xi}) \approx \sum_{\alpha=1}^P \mathbf{u}_{\alpha} H_{\alpha}(\boldsymbol{\xi}) \quad (\text{Eq. 3})$$

où $\{H_\alpha(\xi)\}_{\alpha=1}^P$ désigne une certaine base connue de fonctions et où les \mathbf{u}_α sont des coefficients à déterminer. Il existe différents choix pour la base d'approximation $\{H_\alpha(\xi)\}_{\alpha=1}^P$. Dans notre étude, notre choix s'est porté sur la représentation (ou décomposition) sur le chaos polynomial [8] qui est une construction particulière de cette base où les fonctions H_α sont des polynômes multidimensionnels orthonormés.

Pour calculer la décomposition (Eq.3), plusieurs techniques existent. Ces techniques sont divisées en deux familles : les méthodes intrusives qui nécessitent des modifications du solveur déterministe et des méthodes non intrusives qui ne demandent pas de tels changements. Dans ce travail, nous utilisons la méthode de projection L^2 [6, 9], qui appartient à la famille des méthodes non intrusives. Elle consiste à définir la solution approchée comme une projection de la solution semi-discrétisée sur l'espace d'approximation stochastique. La solution vectorielle, dont les composantes sont les coefficients polynomiaux des inconnues nodales, est ensuite calculée par une procédure d'intégration numérique telle que

$$\mathbf{u}_\alpha \approx \sum_{\alpha=1}^M \omega_k H_\alpha(\xi_k) \mathbf{u}(\xi_k) \quad (\text{Eq. 4})$$

où les ξ_k sont les points d'intégration correspondant à des réalisations particulières des variables aléatoires de base et les ω_k sont les poids d'intégration associés. Pour chaque point d'intégration, le calcul de $\mathbf{u}(\xi_k)$ requiert l'utilisation d'un solveur déterministe.

Dans ce travail, nous utilisons la méthode des éléments finis classiques à travers le logiciel commercial Abaqus®. En pratique, nous avons développé un outil qui permet de maîtriser entièrement le problème probabiliste avec le logiciel Matlab®. Le pré-traitement stochastique et le post-traitement sont réalisés avec l'outil Matlab® et des scripts Python dédiés permettent de résoudre automatiquement les problèmes déterministes avec Abaqus®.

4. Etudes numériques : étude d'un composite UD 90° avec porosité aléatoire

4.1 Étude à l'échelle microscopique

Dans cette partie, nous proposons une étude numérique impliquant la porosité aléatoire. Nous travaillons à l'échelle microscopique, où nous considérons un matériau composite constitué d'une résine époxy et renforcé avec des fibres de verre avec une fraction volumique de 50 % représenté sur la figure (Fig. 1. (a)). La taille caractéristique de la cellule est de 70 μm et le diamètre déterministe des fibres est de 14 μm . Les propriétés du matériau sont les suivantes : $E_m = 3$ GPa et $\nu_m = 0,33$ pour la résine époxy, $E_f = 72$ GPa et $\nu_f = 0,33$ pour les fibres de verre. Les conditions aux limites sont illustrées sur la figure 1. (a) avec une déformation appliquée = 0.5 % sur Γ_2 . L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence de l'aléa des porosités sur le comportement du composite. Les porosités sont représentées par des vides dans la matrice et leur taux est modélisé avec une variable aléatoire. Les données expérimentales ont permis d'identifier cette variable aléatoire par l'estimation du maximum de vraisemblance. La loi log-normale semble être une bonne candidate, comme le montre la figure (Fig. 1. (b)) avec une moyenne $\mu = 4,63$ % et un écart-type $\sigma = 1,65$ % conduisant à un coefficient de variation $\text{CoV} = \sigma / \mu = 35,7$ %. L'espace d'approximation stochastique est basé sur un chaos polynomial d'ordre 2 composé de polynômes d'Hermite. Pour l'approximation spatiale, nous utilisons un maillage d'éléments finis composé d'éléments triangulaires linéaires à 3 nœuds avec un nombre d'élément qui varie suivant le taux de porosité dans la microstructure mais dont la taille caractéristique reste la même. Il convient de noter que la convergence spatiale et stochastique a été vérifiée afin de fournir des résultats précis dans ce qui suit.

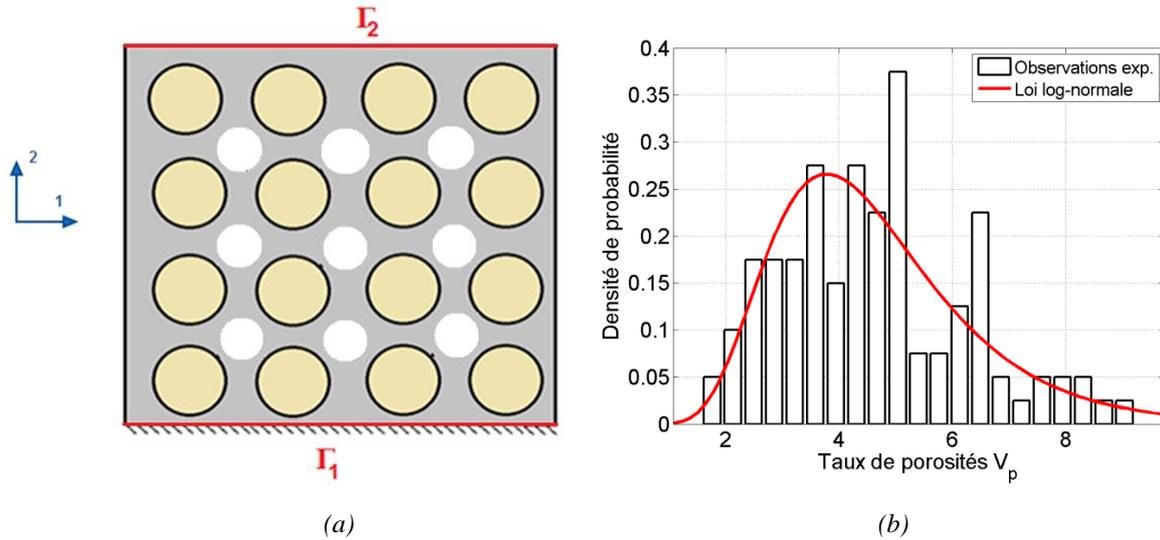


Fig. 1. (a). Géométrie et conditions aux limites du problème
 (b). Fonction de densité de probabilité (PDF) du taux de porosité.

Résultats et discussion

La figure (Fig. 2) représente la surface de réponse et la fonction de densité de probabilité (PDF) de la contrainte maximale locale σ_{22}^{max} . Comme prévu, on peut voir sur la figure (Fig. 2. (a)) que le niveau de contrainte augmente avec le taux de porosité. La PDF de σ_{22}^{max} (Fig. 2. (b)) montre que nous avons une forte probabilité d'avoir un niveau de contrainte inférieur à 74 MPa avec $P(\sigma_{22}^{max} \leq 74 \text{ MPa}) = 0.86$. Le coefficient de variation de cette quantité est $CoV = 1.74 \%$, ce qui est une valeur assez faible comparée à celle que nous avons pour le taux de porosité d'entrée montrant que, pour le problème considéré et le modèle associé, l'influence de la porosité est modeste sur cette quantité d'intérêt locale.

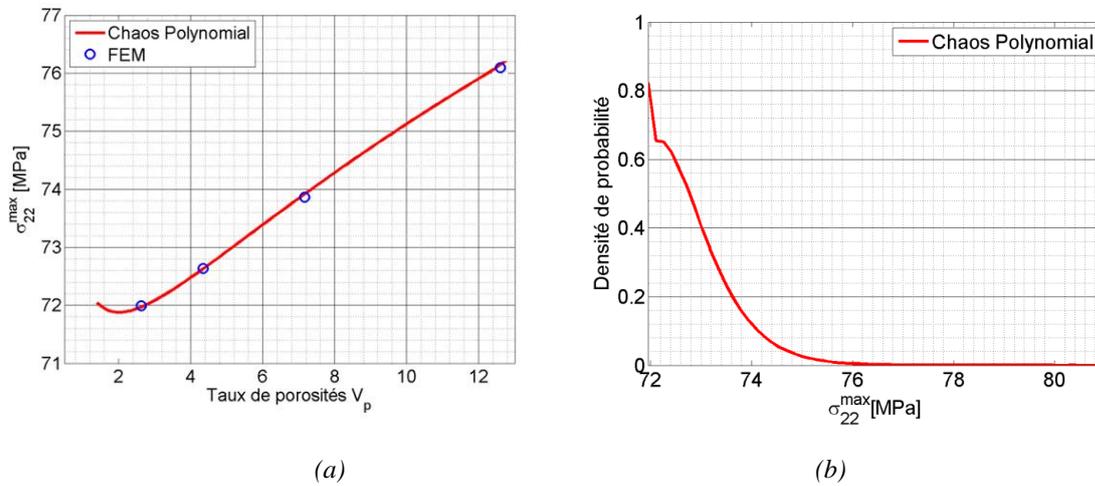


Fig. 2. (a). Surface de Réponse de la contrainte σ_{22}^{max} en fonction du taux de porosité V_p
 (b). Fonction de Densité de Probabilité (PDF) de σ_{22}^{max} .

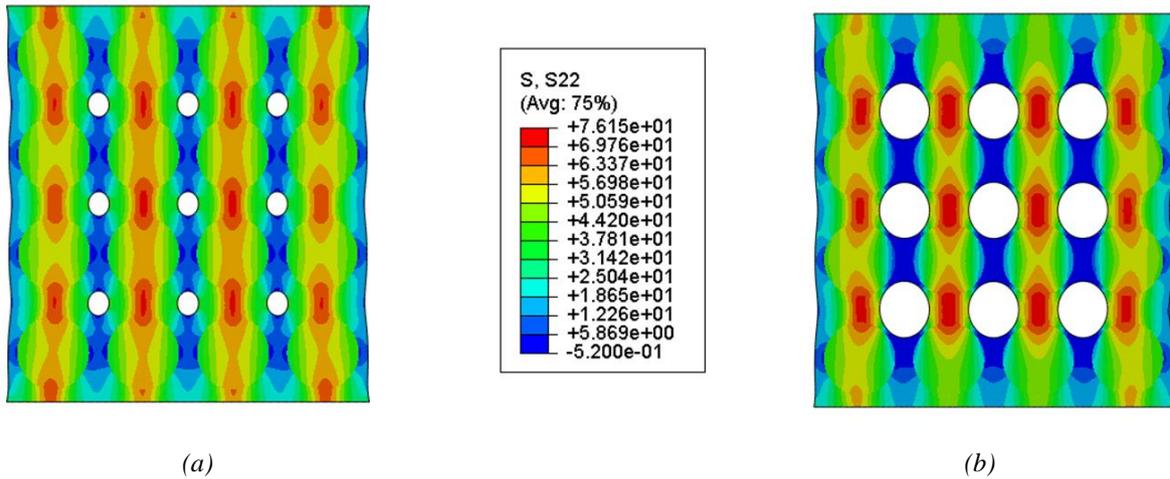


Fig. 3. (a). Contrainte σ_{22} pour un taux de porosité $V_p = 2 \%$
 (b). Contrainte σ_{22} pour un taux de porosité $V_p = 12.5 \%$.

La figure (Fig. 3) présente une illustration du champ de contrainte σ_{22} pour deux réalisations particulières, la première avec un faible taux de porosité $V_p = 2 \%$ et la deuxième pour un taux de porosité plus élevé $V_p = 12.5 \%$ (les porosités sont représentées par des vides circulaires en blanc dont la taille varie suivant le taux de porosité). L'échelle de la contrainte étant normalisée pour les deux réalisations, il faut se référer au code couleur qui nous permet de voir que la contrainte est plus élevée pour le cas où le taux de porosité est plus élevé. On constate aussi une zone de concentration de contrainte située entre les fibres.

4.2 Comparaison approche hétérogène et approche homogène équivalente

Dans un premier temps, et pour pouvoir faire la transition de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique, nous avons développé un outil d'homogénéisation numérique avec des conditions limites de déformation homogène (CLDH) [10-11-12]. Nous avons choisi ce type de conditions limites car elles sont relativement simples à mettre en œuvre sur Abaqus®. Les conditions limites périodiques sont en effet plus complexes à imposer.

Dorénavant, l'objectif est de prendre en compte l'aléa sur le taux de porosité dans le calcul des propriétés équivalentes. Dans ce cas, ces propriétés sont dites apparentes car, a priori, toujours soumises à des incertitudes. Pour les calculer, nous utilisons une décomposition sur le chaos polynomial qui nous permettra de quantifier facilement l'aléa sur ces quantités en fonction de l'incertitude observée sur les paramètres d'entrée. La méthode d'homogénéisation devient alors notre « solveur déterministe ». Dans l'étude suivante, les paramètres déterministes et stochastiques du problème sont les mêmes que dans la section 4.1.

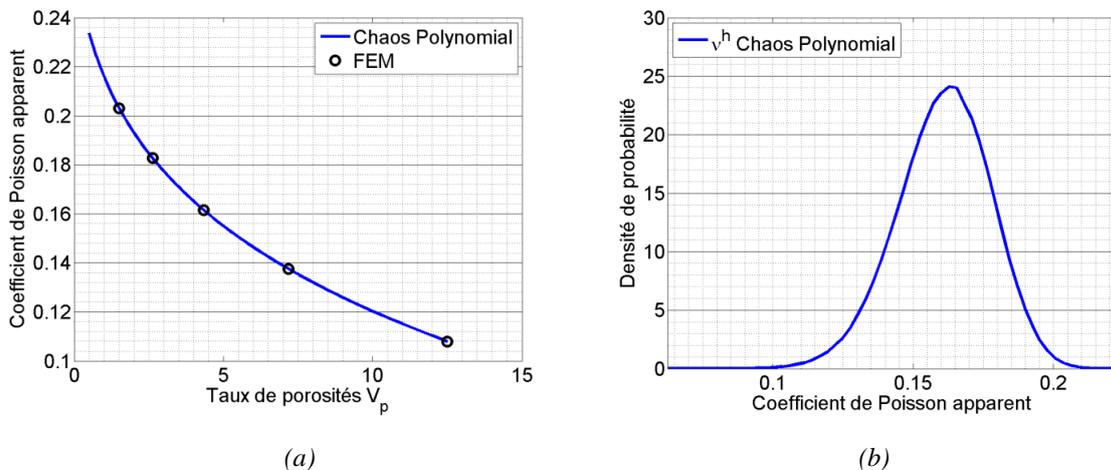


Fig. 4. (a). Surface de Réponse du coefficient de Poisson apparent en fonction du taux de porosité V_p
 (b). Fonction de densité de probabilité du coefficient de Poisson apparent.

La figure (Fig. 4) représente la surface de réponse et la fonction de densité de probabilité (PDF) du coefficient de Poisson apparent. On constate donc sur la figure (Fig. 4. (a)) que, comme prévu, le coefficient de Poisson apparent diminue quand le taux de porosité augmente. La PDF de σ_{22}^{max} figure (Fig. 4. (b)) montre que nous avons une forte probabilité d'avoir le coefficient de Poisson compris entre 0.13 et 0.2 avec $P(0.13 \leq \nu^h \leq 0.2) = 0.92$. Le coefficient de variation de cette quantité est $CoV = 10\%$ ce qui est trois fois plus faible que la dispersion sur le taux de porosité.

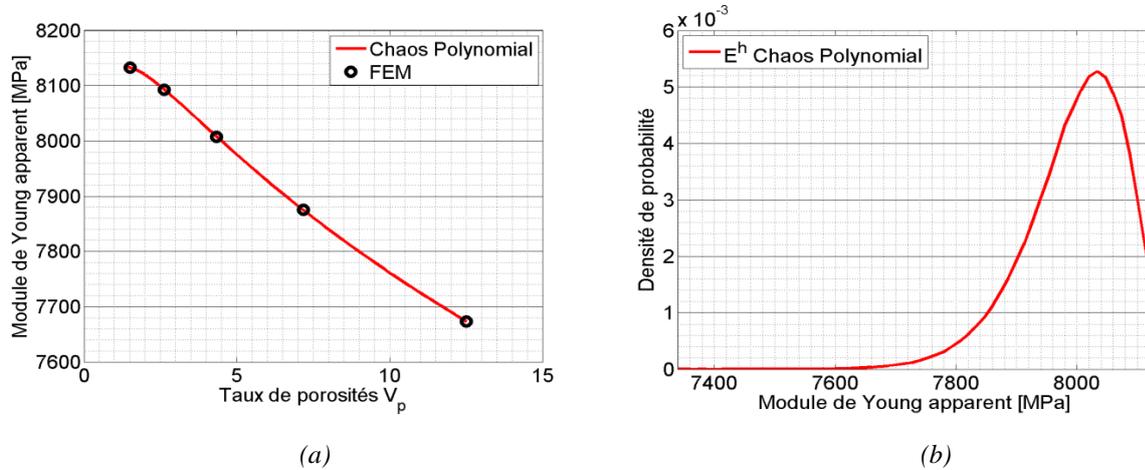


Fig. 5. (a). Surface de Réponse du module de Young apparent en fonction du taux de porosité V_p
 (b). Fonction de densité de probabilité du module de Young apparent.

La figure (Fig. 5) représente la surface de réponse et la fonction de densité de probabilité (PDF) du module de Young apparent. On peut voir sur la figure (Fig. 5. (a)) que le module de Young apparent diminue lorsque le taux de porosité augmente ce qui est attendu. La PDF du module de Young apparent figure (Fig. 5. (b)) montre que nous avons une forte probabilité d'avoir un module d'élasticité apparent supérieur à 7800 MPa avec $P(7800 \text{ MPa} \leq E^h) = 0.89$. Le coefficient de variation de cette quantité est de 1% , qui est une valeur très faible au regard de la dispersion sur le taux de porosité en entrée. Contrairement au coefficient de Poisson, le module de Young pourrait être considéré déterministe.

Nous allons conclure cet exemple avec une comparaison entre un problème stochastique hétérogène (section 4.1) et un problème stochastique homogène dont les propriétés apparentes sont celles obtenues précédemment (cf. figure (Fig. 6)). Cette comparaison, basée sur le problème présenté sur la figure (Fig. 1), nous permettra de valider la bonne représentation de l'approche proposée.

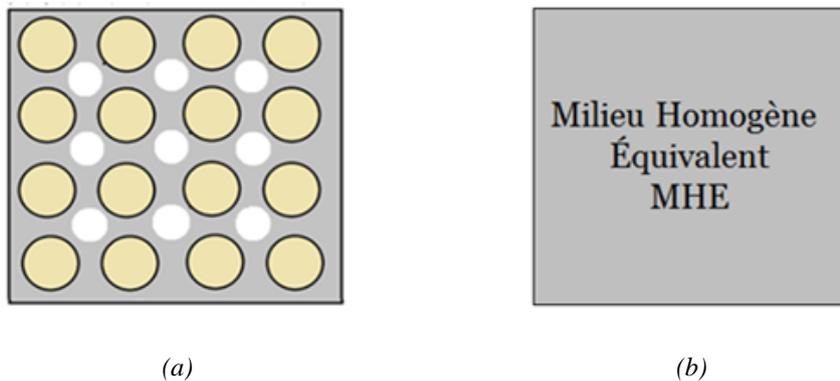


Fig. 6. (a). Modèle hétérogène (échelle microscopique)
 (b). Modèle homogène (M.H.E.).

La figure (Fig. 7) présente les résultats obtenus avec les deux modèles homogène et hétérogène pour la contrainte globale Σ_{22} dans le sens de la sollicitation. Cette contrainte Σ_{22} est calculée à partir de la moyenne spatiale de la contrainte σ_{22} (intégration sur le domaine Ω). On observe un bon accord entre les deux solutions avec un écart maximal ne dépassant pas les 1% . Ce qui nous réconforte dans notre démarche et nous permet de valider notre modèle.

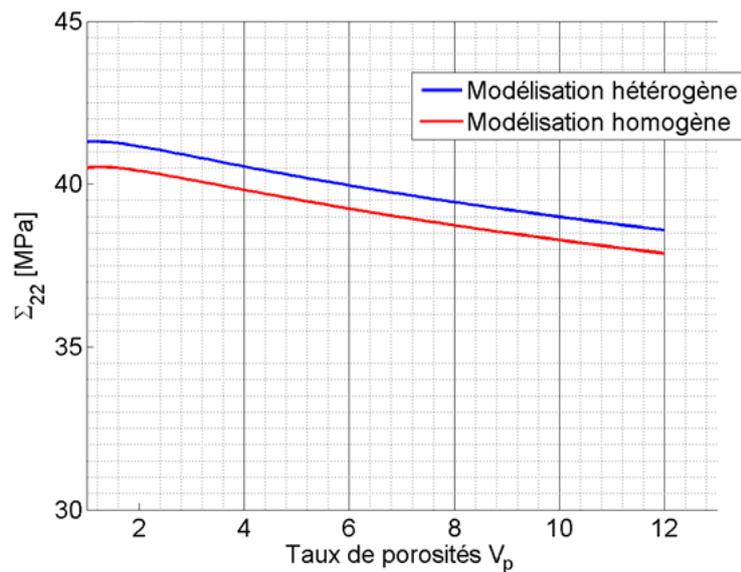


Fig. 7. Comparaison entre le modèle hétérogène et le modèle homogène sur la contrainte globale Σ_{22} .

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une étude de l'influence de la porosité sur le comportement mécanique élastique d'un matériau composite. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'impact des incertitudes souvent observées sur ce type de phénomène. A partir de données expérimentales sur le taux de porosité nous avons étudié la propagation des incertitudes à l'aide d'une approche spectrale stochastique basée sur une approximation sur le chaos polynomial couplée à des calculs éléments finis permettant la résolution du problème élastique. Nous avons ensuite proposé une étude de l'impact de l'aléa du taux de porosité sur le comportement du composite et nous avons remarqué que la variabilité sur les quantités d'intérêt ciblées était relativement faible. Nous avons aussi analysé une méthode de transition de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique basée sur l'homogénéisation numérique. Cette approche a conduit à des résultats très satisfaisants au regard de ceux obtenus avec l'approche à champs complet. Les travaux à venir porteront sur l'étude de l'influence des macroporosités aléatoires (dont la taille caractéristique est très supérieure à celle des renforts) sur le comportement du matériau composite.

Remerciements

Cette étude fait partie du projet SIMSCEF mené par IRT Jules Verne (Institut française dans la Recherche et la Technologie dans des Technologies Industrielles Avancées pour des Structures Composites, Métalliques et Hybrides). Les auteurs veulent associer les partenaires industriels et universitaires de ce projet; respectivement ADWEN, DAHER, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique GeM (UMRCNRS-ECN-Université de Nantes 6183), Arts et métiers ParisTech (LAMPA Angers).

Références

- [1] K.B. Katnam, L.F.M. DaSilva, T.M.Young, « Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities ». *Progress in aerospace*, 61 : 26-42, August 2013.
- [2] K.D. Potter, « Understanding the origins of defects and variability in composites manufacture ». *ICCM-17* Edinburgh, 2009.
- [3] C. Lopes , J. Remmers, Z. Gurdal, « Influence of Porosity on the Interlaminar Shear Strength of Fibre-Metal Laminates ». *Key Engineering Materials*, 383 : 35-52, 2008.
- [4] M. Wisnom, T. Reynolds, et N. Gwilliam, « Reduction in interlaminar shear strength by discrete and distributed voids ». *Composites Science and Technology*, vol. 56, 93-101, 1996.
- [5] J. Tang, W. Lee, and G. Springer, « Effects of cure pressure on resin flow, voids and mechanical properties ». *Journal of composite materials*, vol. 21, 421-440, 1987.
- [6] M. L. Costa, S. F. M. de Almeida, and M. C. Rezende, « The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/ epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates ». *Composites Science and Technology*, vol. 61, 2101-2108, 2001.

- [7] A. Chambers, J. Earl, C. Squires, and M. Suhot, « The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fibre composites developed for wind turbine applications » *International Journal of Fatigue*, vol. 28, 1389-1398, 2006.
- [8] R. Ghanem, P. Spanos, « Stochastic finite elements : a spectral approach ». *Springer, Berlin*, 1991.
- [9] O.P. Le Maître, M.T. Reagan, H.N. Najm, R.G. Ghanem, O.M. Knio, « A stochastic projection method for fluid flow ». *Journal of Computational Physics*, 181 : 9-44, 2002.
- [10] M. Loève, « Probability Theory. I, fourth edition, in : Graduate Texts in Mathematics », *Springer-Verlag vol. 45*, New York, 1977.
- [11] D. B. Xiu, G. E. Karniadakis, « The Wiener-Askey polynomial chaos for stochastic differential equations ». *SIAM Journal on Scientific Computing*, 24 (2) : 619–644, 2002.
- [12] O.P. Le Maître, O.M. Knio, « Spectral Methods for Uncertainty Quantification with Applications to Computational Fluid Dynamics ». *Springer, Heidelberg* 2010.
- [13] S. Hazanov, M. Amieur, « On overall properties of elastic heterogeneous bodies smaller than the representative volume ». *International Journal of Engineering Science*, 33 : 1289–1301, 1995.
- [14] R. Hill, « Elastic properties of reinforced solids : Some theoretical principles ». *Journal of Mechanics and Physics of Solid*, 11 : 357–372, 1963.
- [15] T.Kanit, S. Forest, I. Galliet, V. Mounoury, D. Jeulin, « Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach ». *International Journal of Solids and Structures*, 40 : 3647–3679, 2003.