

Ecole Doctorale EMMA (Spécialité Mécanique)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention: « Sciences de la Vie et de la Santé »

par **Qun HUANG**

Multi-scale modeling and simulation on buckling and wrinkling phenomena

Membres du jury:

Rapporteurs:	Prof. Corrado Maurini	Université Pierre et Marie Curie, France
	Prof. Philippe Le Grogne	ENSTA Bretagne, France
Examineurs:	Prof. Marion Martiny	Université de Lorraine, France
	Prof. Farid Abed-Meraim	Arts et Métiers Paris Tech, France
	Dr. Martin Michael Müller	Université de Lorraine, France
	Dr. Gaetano Giunta	Luxembourg Institute of Science and Technology
	Prof. Michel Potier-Ferry	Université de Lorraine, France
	Prof. Heng Hu	Wuhan University, China

Abstract

Instability phenomena have been widely observed in the engineering field. When a structure is subjected to compressive stress, buckling may occur. The occurrence of wrinkles may pose a limit on the performance of materials or structures and are always thought to be avoided, but nowadays may find some applications in measuring and designing the mechanical properties of materials and structures. For these reasons, it is quite necessary to study the occurrence and evolution of wrinkles in a structure in an accurate and efficient way.

Generally, the instability phenomena have two typical characteristics: 1) the instability pattern is nearly spatially periodic, and 2) the wavelength of the wrinkles is very small compared to the structural size. Compared with the experiment, numerical simulation for this kind of phenomena can significantly save time and economic cost, but now faces two challenges: 1) to take into account both computational efficiency and accuracy is difficult, and 2) to pilot the nonlinear simulation is challenging because too many solution paths exist around the useful one.

The main aim of this thesis is to develop advanced and efficient multi-scale modeling and simulation techniques to study the instability phenomena in three common engineering structures, i.e., membrane, film/substrate and sandwich structures, by combining the Technique of Slowly Variable Fourier Coefficients (TSVFC) and the Asymptotic Numerical Method (ANM). Towards this end, based on the Von Karman plate equations, the TSVFC has been firstly used to develop a two-dimensional (2D) Fourier double-scale model for membrane, which has also been implemented into commercial software ABAQUS via its user-defined element (UEL) subroutine. Then a 2D Fourier double-scale model is constructed for film/substrate. Further, making use of the deformation features of the film/substrate, a one-dimensional Fourier double-scale model is developed by using both the TSVFC and the Carrera's Unified Formulation (CUF). Subsequently, based on high-order kinematics belonging to Zig-Zag theory, a 2D Fourier double-scale model is deduced for sandwich plates. The governing equations for the above models are discretized by the Finite Element Method (FEM), and the resulting nonlinear systems are solved by the efficient and robust nonlinear solver ANM. These models are then adopted to study the instability phenomena emerging in the above three kinds of structures subjected to different external loads (e.g., uni- and bi-axial compressive stresses). Results show that the established models in this paper could accurately and efficiently simulate various instability phenomena. Besides, it's found that the membrane instability is very sensitive to the boundary conditions, and there exists a

dimensionless parameter that is almost constant near bifurcation point for various boundary conditions, loading cases and geometric parameters. This parameter may be quite helpful for fast predicting the occurrence of wrinkles.

The results of this thesis are proved to accurately and efficiently predict, prevent and utilize buckling and wrinkling of membrane, film/substrate and sandwich structures, and also hoped to lay a foundation for the study of other instability phenomena with nearly periodic patterns.

Keywords: Membrane, Film/substrate, Sandwich, Instability, Buckling, Wrinkling, Fourier series, Asymptotic Numerical Method

Résumé

Les phénomènes d'instabilité ont été largement observés dans le domaine de l'ingénierie. Lorsqu'une structure est soumise à une contrainte de compression, le flambage peut se produire. L'apparition de rides peut imposer une limite à la performance des matériaux ou des structures et on s'attend à ce qu'elles soient évitées, mais aujourd'hui, on peut trouver des applications dans la mesure et la conception des propriétés mécaniques des matériaux et des structures. Pour ces raisons, il est très nécessaire d'étudier l'apparition et l'évolution des rides dans une structure de manière précise et efficace.

Généralment, les phénomènes d'instabilité ont deux caractéristiques typiques: 1) le modèle d'instabilité est presque périodiquement spatial et 2) la longueur d'onde des rides est très faible par rapport à la taille structurelle. Par rapport à l'expérience, la simulation numérique pour ce type de phénomène peut réduire considérablement le temps et le coût économique, mais présente deux défis: 1) considérant l'efficacité et la précision des calculs est difficile et 2) la simulation non linéaire de pilotage est un défi car d'autres chemins de solution existent autour de l'utile.

L'objectif principal de cette thèse est de développer des techniques de modélisation et de simulation multi-échelle avancées et efficaces pour étudier les phénomènes d'instabilité dans trois structures d'ingénierie communes, à savoir les structures membranaires, le film/substrat et le sandwich, combinant la technique des coefficients de Fourier lentement variables (TSVFC) et la méthode numérique asymptotique (ANM). À cette fin, sur la base des équations de la plaque Von Karman, TSVFC a d'abord été utilisé pour développer un modèle bidimensionnel (2D) de Fourier à double échelle pour membrane, qui a également été implémenté dans un logiciel commercial ABAQUS via son sous-programme d'éléments définis par l'utilisateur (UEL). Ensuite, un modèle 2D Fourier à double échelle est conçu pour le film/substrat. De plus, en utilisant les caractéristiques de déformation du film/substrat, un modèle à deux échelles de Fourier unidimensionnel est développé en utilisant à la fois TSVFC et la Carrera Unified Formulation (CUF). Par la suite, en fonction de la cinématique de haut ordre appartenant à la théorie de Zig-Zag, on déduit un modèle 2D Fourier à double échelle pour les plaques sandwich. Les équations de régulation pour les modèles ci-dessus sont discrétisées par la méthode des éléments finis (FEM), et les systèmes non linéaires résultants sont résolus par l'ANM solveur non linéaire efficace et robuste. Ces modèles sont ensuite adoptés pour étudier les phénomènes d'instabilité émergeant dans les trois types

de structures ci-dessus soumis à des charges externes différentes (par exemple, des contraintes compressives uni et bi-axiales). Les résultats montrent que les modèles établis dans cet article pourraient simuler de manière précise et efficace divers phénomènes d'instabilité. En outre, on constate que l'instabilité de la membrane est très sensible aux conditions aux limites, et il existe un paramètre sans dimension qui est presque constant près du point de bifurcation pour diverses conditions aux limites, cas de chargement et paramètres géométriques. Ce paramètre peut être très utile pour prédire rapidement l'apparition de rides.

Les résultats de cette thèse se prouvent qu'il est précisé et efficace de prédire, prévenir et utiliser le flambement et le froissement des structures membranaires, film/substrat et sandwich, et ont également espéré jeter les bases de l'étude d'autres phénomènes d'instabilité avec des modèles presque périodiques.

Mots clés: Membrane, Film/substrat, Sandwich, Instabilité, Flambage, Rides, Série de Fourier, Méthode numérique asymptotique, Méthode de pontage de domaine