

# Avis de Soutenance

Fan XU

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

## Étude numérique des modes d'instabilités des systèmes film-substrat

Numerical study of instability patterns of film-substrate  
systems

Soutenance prévue le *mardi 02 décembre 2014 à 13h30*  
Ile du Saulcy, 57045 Metz, France. Salle **Amphithéâtre Hermite**

### Composition du jury

M. Basile AUDOLY	Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)	Rapporteur
M. Yibin FU	Keele University	Rapporteur
Mme Martine BEN AMAR	École Normale Supérieure	Examinatrice
M. Hachmi BEN DHIA	École Centrale Paris	Examinateur
M. Heng HU	Wuhan University	Examinateur
M. Michel POTIER-FERRY	Université de Lorraine	Directeur de thèse
M. Salim BELOUETTAR	CRP Henri Tudor	Co-directeur de thèse

**Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux – UMR CNRS 7239**  
**Centre de Recherche Public Henri Tudor**

## Résumé:

Le plissement dans les films minces sur un substrat plus mou a été largement observé dans la nature. Ces phénomènes ont suscité un intérêt considérable au cours de la dernière décennie. L'évolution en post-flambage d'instabilités morphologiques implique souvent de forts effets de non-linéarité géométrique, de grandes rotations, de grands déplacements, de grandes déformations, une dépendance par rapport au chemin de chargement et de multiples brisures de symétrie. En raison de ces difficultés notoires, la plupart des analyses non-linéaires de flambement ont recouru à des approches numériques parce qu'on ne peut obtenir qu'un nombre limité de solutions exactes de manière analytique. Cette thèse propose un cadre général pour étudier le problème de flambage de systèmes film/substrat de manière numérique : de la modélisation 2D ou 3D, d'un point de vue classique ou multi-échelle. L'objectif principal est d'appliquer des méthodes numériques avancées pour des analyses de bifurcations multiples aux divers modèles de film/substrat, en particulier en se concentrant sur l'évolution en post-flambement et la transition du mode à la surface. Les modèles intègrent la Méthode Asymptotique Numérique (MAN) comme une technique robuste de pilotage et des indicateurs de bifurcation qui sont bien adaptés à la MAN pour détecter une séquence de bifurcations multiples ainsi que les modes d'instabilité associés sur leur chemin d'évolution de post-flambement. La MAN donne un accès interactif aux branches d'équilibre semi-analytique, qui offre un avantage considérable en termes de la fiabilité par rapport aux algorithmes itératifs classiques. En outre, une stratégie originale de couplage non-local est développée pour coupler les modèles classiques et les modèles multi-échelles concurrentement, où les forces de chaque modèle sont pleinement exploitées, et leurs lacunes surmontées. Une discussion sur la transition entre les différentes échelles est fournie d'une manière générale, qui peut également être considéré comme un guide pour les techniques de couplage impliquant d'autres modèles réduits. A la fin, un cadre général de modélisation macroscopique est développé et deux modèles spécifiques de type Fourier sont dérivés de modèles classiques bien établis, qui permettent de prédire la formation des modes d'instabilités avec beaucoup moins d'éléments et donc de réduire le coût de calcul de manière significative.

**Mots-clés:** Plissement; Post-flambement; Bifurcation; Film mince; Multi-échelle; Technique de cheminement; Méthode de couplage; Méthode Arlequin; Méthode des éléments finis.

## Abstract:

Surface wrinkles of stiff thin layers attached on soft materials have been widely observed in nature and these phenomena have raised considerable interests over the last decade. The post-buckling evolution of surface morphological instability often involves strong effects of geometrical nonlinearity, large rotation, large displacement, large deformation, loading path dependence and multiple symmetry-breakings. Due to its notorious difficulty, most nonlinear buckling analyses have resorted to numerical approaches since only a limited number of exact analytical solutions can be obtained. This thesis proposes a whole framework to study the film/substrate buckling problem in a numerical way: from 2D to 3D modeling, from classical to multi-scale perspective. The main aim is to apply advanced numerical methods for multiple-bifurcation analyses to various film/substrate models, especially focusing on post-buckling evolution and surface mode transition. The models incorporate the Asymptotic Numerical Method (ANM) as a robust path-following technique and bifurcation indicators well adapted to the ANM to detect a sequence of multiple bifurcations and the associated instability modes on their post-buckling evolution path. The ANM gives interactive access to semi-analytical equilibrium branches, which offers considerable advantage of reliability compared with classical iterative algorithms. Besides, an original nonlocal coupling strategy is developed to bridge classical models and multi-scale models concurrently, where the strengths of each model are fully exploited while their shortcomings are accordingly overcome. Discussion on the transition between different scales is provided in a general way, which can also be seen as a guide for coupling techniques involving other reduced-order models. Lastly, a general macroscopic modeling framework is developed and two specific Fourier-related models are derived from the well-established classical models, which can predict the pattern formation with much fewer elements so as to significantly reduce the computational cost.

**Keywords:** Wrinkling; Post-buckling; Bifurcation; Thin film; Multi-scale; Path-following technique; Bridging technique; Arlequin method; Finite element method.