



## Avis de Soutenance

### THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Monsieur **Hafid MATAICH**

**Spécialité** : Génie Civil et Mécanique des matériaux

**Formation** : Sciences, Sciences de l'Ingénierie et Métiers d'Enseignement

**Laboratoire** : Laboratoire Mathématiques, Modélisation et Physique  
Appliquée

Sujet de la thèse

**Etude comparative des instabilités dynamiques des ponts suspendus due aux vibrations relatives à la flexion et la torsion**

Thèse présentée et soutenue **Le Mercredi 08 Janvier 2025 à 9h30** à la Salle de Conférences ENS-Fès,  
devant le jury composé de :

Nom et Prénom*	Etablissement	Grade	Qualité
Pr. LAMCHARFI Tajdine	FST de Fès	PES	Président
Pr. MANSSOURI Imad	ENSAM de Meknès	PES	Rapporteur & Examineur
Pr. LIMAME Karoum	CRMEF de Fès	PES	Rapporteur & Examineur
Pr. KHADIRI Karim	ENS de Fès	MCH	Rapporteur & Examineur
Pr. SALI Ahmed	FSDM de Fès	MCH	Examineur
Pr. EL AMRANI Bouchta	ENS de Fès	PES	Directeur de thèse
Pr. EL MEKKAOUI Jaouad	EST de Fès	MCH	Co-Directeur de thèse



## Résumé

Cette thèse analyse les instabilités dynamiques des ponts suspendus, en étudiant les interactions entre les modes de flexion et de torsion, ainsi que les effets du vent, des charges sismiques et mobiles. Elle évalue les risques dynamiques en utilisant des exemples tels que l'effondrement du pont de Tacoma et le pont du Grand Belt pour illustrer les défis liés à leur stabilité.

L'étude propose un cadre analytique détaillé pour évaluer les risques d'instabilité dynamique, en particulier en ce qui concerne la torsion et la flexion verticale des ponts suspendus. Ce cadre prend en compte à la fois la gravité des instabilités et leur probabilité d'occurrence, offrant ainsi une évaluation plus complète et plus précise des risques associés à ces structures. Dans un premier temps, cette thèse explore les avancées récentes dans les méthodologies d'analyse aérodynamique, ainsi que les approches numériques et expérimentales en matière de stabilité vibratoire dynamique et aéroélastique. Une revue approfondie de la littérature est présentée, abordant notamment les phénomènes d'interaction entre le pont suspendu, les sols en mouvement sous effet sismique, les véhicules en mouvement, ainsi que les effets des flux d'air. Ces interactions sont cruciales pour comprendre les forces aérodynamiques auto-excitées, un élément clé dans la modélisation de la dynamique de ces ponts.

L'analyse modale de la structure du pont, en particulier la projection modale des vibrations de la structure, joue un rôle central dans la linéarisation des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) régissant le mouvement de la structure. Pour ce faire, les vibrations libres du tablier du pont suspendu ont été analysées pour en extraire une base modale, comprenant les fréquences naturelles et les modes propres. Pour cette tâche, une formulation par éléments finis, reposant sur la théorie de la déformation en cisaillement du premier ordre à cinq variables (FSDT), a été utilisée pour modéliser la vibration libre du pont. L'ensemble du système d'EDP a été formulé en appliquant le principe de Hamilton, et la théorie des câbles peu profonds a été intégrée pour évaluer l'effet des suspentes sur les paramètres modaux du pont.

Dans un second temps, l'étude se penche sur l'instabilité élastique, ou flambement, du tablier du pont suspendu sous l'effet d'un chargement sismique dynamique non uniforme. Le tablier est modélisé comme une plaque rectangulaire symétrique en matériaux composites stratifiés, soumis à diverses conditions aux limites. Les EDP sont dérivées en utilisant la FSDT de Reissner-Mindlin et le principe de Hamilton. Un amortissement structural de type Rayleigh a également été introduit pour évaluer son impact sur les caractéristiques d'instabilité. L'analyse modale a permis de découpler les EDP en un système d'équations différentielles ordinaires de type Mathieu-Hill (EOMH), ce qui a simplifié la résolution du problème. La méthode de Bolotin a ensuite été utilisée pour identifier les régions d'instabilité dynamique (DIR) du pont, une approche fondamentale pour comprendre les zones critiques où le pont pourrait se trouver exposé à des risques d'effondrement.

Dans une troisième section, l'accent est mis sur l'analyse des instabilités aérodynamiques. Le phénomène de flottement unidimensionnel, en flexion verticale et en torsion pure, ainsi que le flottement de couplage intermodal, sont étudiés en utilisant les théories quasi-stationnaires (QST) de Scanlan, qui permettent de déterminer les charges aérodynamiques auto-excitées. En projetant le système de mouvement sur un mode unidimensionnel (flexion ou torsion), nous avons



## Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales

pu identifier les vitesses critiques du vent responsables de ces instabilités, notamment en référence à l'effondrement dramatique du pont de Tacoma aux Etats-Unis en 1940. Des données aérodynamiques relatives au pont du Grand Belt, au Danemark, ont également été exploitées pour effectuer des études paramétriques approfondies. L'étude des mécanismes de génération de flottement intermodal a permis d'analyser l'influence des dérivées aérodynamiques sur les instabilités multi-modes. Ces analyses ont mené à la résolution d'un problème non linéaire de valeurs propres, ce qui a permis de déterminer les fréquences et taux d'amortissement associés à une vitesse de vent donnée. Les résultats obtenus ont été comparés avec des données issues de la littérature pour valider les modèles théoriques.

Enfin, dans la dernière section, cette thèse propose une formulation visant à simuler les interactions entre le TGV marocain et le pont Lokkous, afin de restituer l'instabilité dynamique en flexion verticale du pont. Le sous-système véhicule a été modélisé comme une barre rigide suspendue, tenant compte de l'effet de tangage. Le pont a été modélisé comme une poutre d'Euler-Bernoulli simplement appuyée. Le problème d'interaction entre ces deux sous-systèmes a été résolu à l'aide d'une formulation par éléments finis unidimensionnels, couplée à une discrétisation des équations du véhicule selon la méthode de Newmark à accélération constante. Les degrés de liberté du véhicule ont ensuite été condensés avec ceux de l'élément de pont. Des scripts MATLAB ont été développés pour fournir des résultats critiques concernant l'instabilité élastique, aérodynamique et dynamique du pont, et ces résultats ont été soigneusement analysés pour en tirer des conclusions pratiques et théoriques.

En somme, cette thèse offre une contribution significative à la compréhension des phénomènes d'instabilité dynamique affectant les ponts suspendus, en fournissant un cadre complet pour l'évaluation des risques associés et en proposant des solutions pratiques et théoriques pour améliorer la conception et la sécurité de ces infrastructures critiques.

### Mots clés

Pont suspendu; Instabilité dynamique; Aéroélastique; Forces aérodynamiques; Flexion verticale ; Torsion ; Flottement couplé; Interaction pont/véhicule