

# Introduction

Les motivations qui poussent à l'utilisation du contrôle des vibrations des ponts sont nombreuses. Les grands ponts modernes à haubans ou suspendus sont de plus en plus flexibles. Leur chargement a plus que doublé en dix ans, alors que leur poids propre a diminué. Ils sont donc plus sensibles aux excitations extérieures comme le vent et les séismes. Il s'agit d'une tendance qui s'accroît et qui trouve son origine entre autres dans une amélioration des performances des matériaux de construction. De plus, l'exigence de projeter des ponts en degré de résister, sans dégâts appréciables, à des hautes actions dynamiques.

Plutôt que de renforcer et de rigidifier la structure afin d'affronter des actions extérieures peu fréquentes, il s'agit de s'y opposer de manière contrôlée en produisant des forces de réaction adaptées lorsque ces actions se produisent. Les systèmes de contrôle sont principalement trois : passif, actif et semi-actif. Le contrôle passif consiste à superposer à la structure un dispositif qui dissipe l'énergie ou filtre la transmission des efforts dans la structure, au moins à une fréquence donnée. Il ne nécessite ni mesure ni source d'énergie externe. Le contrôle actif vise à imposer une force ou un déplacement en certains points du système, en fonction notamment de l'état mesuré au même instant, ou de l'histoire de celui-ci. Ceci exige un système de capteurs, un traitement du signal, une stratégie de contrôle, un ordinateur temps réel, un système d'actionneurs et une source importante d'énergie externe. Le contrôle semi-actif, en revanche, ne nécessite qu'une faible source d'énergie pour modifier la propriété mécanique du dispositif de contrôle. Il combine les principaux traits des systèmes actifs et passifs. D'où, le système de contrôle semi-actif des structures est une extension logique de technologie du contrôle actif et passif.

Parmi les amortisseurs les plus utilisés en génie civil, on peut citer les amortisseurs à masse accordée (TMDs). Les travaux de Frahm (1911) [38] et Ormondroyd et Den Hartog (1928) [78] sont parmi les premières études d'application de ce type d'appareil aux différents systèmes mécaniques. Ces amortisseurs sont couramment utilisés dans différentes structures du génie civil, comme les bâtiments et les ouvrages souples tels que les passerelles, les

ponts suspendus et les ponts à haubans. La performance de ces amortisseurs est très liée aux réglages de leurs paramètres. De même, leur efficacité varie beaucoup lorsque la structure évolue ainsi que le type de chargement. D'où, l'idée principale d'introduire le contrôle semi-actif qui permet selon une loi de contrôle d'adapter les paramètres de l'actionneur en temps réel lorsque la structure évolue ou lorsqu'elle est soumise à différents types des sollicitations.

L'objectif de ce travail est de mettre en place les outils numériques nécessaires, de réaliser la conception en détail de l'actionneur, afin d'amortir le mode de torsion d'une maquette de pont en construction, et la faisabilité de version semi-active, à base d'amortisseur électromécanique, afin que l'actionneur permette une adaptation en temps réel aux évolutions de la structure et des sollicitations.

Dans ce travail on a introduit un nouvel actionneur électromécanique principalement composé d'un TMD pendulaire couplé à un alternateur qui sert à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique qui sera dissipée par effet Joule dans une résistance externe. Puis, on a introduit une nouvelle méthode de conception des paramètres du TMD pendulaire : un critère d'optimisation du taux de décroissance exponentiel. Enfin, on a développé une loi de contrôle semi-actif permettant une adaptation en temps réel des paramètres de l'actionneur aux évolutions de la structure aux cours du temps et des sollicitations. Cette loi de contrôle est appliquée sur la résistance externe attachée aux bornes de l'alternateur.

Les travaux de cette thèse sont exposés comme suit :

Le chapitre 1 est consacré à un bref aperçu sur les systèmes de contrôle passif et les lois de contrôle actif et semi-actif.

Dans le chapitre 2 on présente l'actionneur électromécanique qui est principalement formé d'un pendule couplé à un alternateur. Cet actionneur est attaché à l'extrémité d'une poutre encastree-libre afin d'amortir le premier mode de vibration. Le système d'équations du modèle complet est obtenu en utilisant le cas de discrétisation puis couplage. Les équations de la poutre sont obtenues en utilisant une discrétisation sur la base modale, les équations du TMD pendulaire sont obtenues à partir des équations de Lagrange et les équations mécanique et électrique de l'alternateur sont obtenues en appliquant, respectivement, le principe fondamental de la dynamique et la loi des mailles. Pour simuler le système complet couplé, on a identifié les paramètres de l'alternateur et le coefficient d'amortissement propre de l'actionneur.

Dans le chapitre 3 on a effectué une étude paramétrique du système formé par deux équations. L'équation de vibration du premier mode de la poutre et l'équation de l'actionneur

de référence : l'amortissement total est équivalent à un amortissement visqueux. Les paramètres optimaux de l'actionneur sont déterminés en introduisant une nouvelle méthode de conception qui consiste à la maximisation du taux de décroissance exponentiel. On a réalisé une étude détaillée de l'amortissement obtenu en variant les paramètres de l'actionneur. De cette étude, on a constaté que le meilleur emplacement de l'actionneur est dans la zone à déplacement maximal. Après avoir simulé le système complet couplé sur un système simple (poutre), on a présenté dans le chapitre 4 la simulation du démonstrateur d'un pont en construction contrôlé par l'actionneur électromécanique. La conception des paramètres de l'actionneur : la longueur du pendule et le coefficient d'amortissement total équivalent est réalisée en appliquant le critère d'optimisation introduit dans le chapitre 3. A partir de la simulation numérique, on a montré que cet actionneur, lorsqu'il est attaché à l'extrémité du tablier, est très efficace à amortir le mode de torsion de la maquette lorsqu'elle est en vibration libre ou également en vibration harmonique. Aussi, il est très efficace à amortir, suivant le plan de vibration du pendule, le premier ou le troisième mode de vibration lorsqu'il est attaché à l'extrémité supérieure du pylône. Par ailleurs, lorsque la maquette est équipée par trois actionneurs, les trois premiers modes sont bien contrôlés.

Dans le chapitre 5, d'une part on a développé une loi de contrôle semi-actif permettant une adaptation en temps réel des paramètres de l'actionneur aux évolutions de la maquette du pont lorsqu'elle est considérée en cours de construction. D'autre part, on a appliqué cette loi de contrôle pour adapter les paramètres de l'actionneur en temps réel selon les types des sollicitations en considérant que la maquette est soumise à différents types des chargements. En plus, cette loi de contrôle semi-actif est utilisée pour amortir deux modes différents : le mode de torsion et le sixième mode, en agissant sur un mode à chaque instant dans l'esprit de la méthode MIMSC.

Cette loi, qui peut être considérée très simple, s'applique sur la résistance externe qui permet de varier en temps réel l'amortissement et de compenser la rigidité de l'actionneur. La simplicité de cette loi consiste en l'introduction d'un seul capteur pour sa mise en oeuvre expérimentale comme il est indiqué dans le dernier chapitre.

Le chapitre 6 expose la mise en oeuvre expérimentale du contrôle passif et semi-actif sur la maquette du pont. On a confirmé expérimentalement, en contrôlant le mode de torsion de la maquette, la validité du critère d'optimisation du taux de décroissance exponentiel introduit dans le chapitre 4. Aussi, on a montré l'importance majeure des paramètres optimaux de l'actionneur sur l'amortissement.

Ensuite, on a introduit plusieurs actionneurs pour amortir plusieurs modes de vibration

de la maquette du pont : l'utilisation des trois actionneurs électromécaniques dont un est attaché à l'extrémité du tablier et les deux autres à l'extrémité supérieure du pylône permet d'amortir le premier mode vertical, les deux premiers modes horizontaux et le mode de balancement de la maquette du pont. Même lorsque les paramètres des deux actionneurs attachés à l'extrémité supérieure du pylône ne sont pas choisis de manière optimale, on note une amélioration significative de l'efficacité du TMD principal. Tous ces essais sont illustrés par des films qui sont représentés sur un CD-ROM.

Enfin, on a mis en oeuvre expérimentalement la boucle de contrôle semi-actif qui a permis de valider l'avantage de rendre l'efficacité de l'actionneur indépendante de l'évolution de la structure.