

**Programme 2011**  
**Bourses de thèse cofinancées CNRS - Ecole des Ponts ParisTech**  
(Contact CNRS libanais: Dr Charles Tabet email : [ctabet@cnrs.edu.lb](mailto:ctabet@cnrs.edu.lb))

**Sujet de thèse: Optimisation de l'utilisation de capteurs de vibrations  
pour la surveillance de santé des structures du génie civil**

Directeur de thèse : Pierre Argoul (Laboratoire d'accueil : Laboratoire Navier, <http://navier.enpc.fr/>), email : [pierre.argoul@enpc.fr](mailto:pierre.argoul@enpc.fr)

Co-directeurs de thèse : Wassim Raphael (Ecole Supérieure des Ingénieurs de Beyrouth, <http://www.fi.usj.edu.lb/>), Chargé de Recherche, email : [wassim.raaphael@usj.edu.lb](mailto:wassim.raaphael@usj.edu.lb)  
Fouad Kaddah, (Ecole Supérieure des Ingénieurs de Beyrouth), Chargé de Recherche, email : [fouad.kaddah@usj.edu.lb](mailto:fouad.kaddah@usj.edu.lb)

**Présentation détaillée du sujet :**

Afin d'améliorer l'évaluation de la performance des ouvrages, ou à défaut d'en avoir une vision objective et correcte, il est important de pouvoir caractériser de manière pertinente le comportement réel de l'ouvrage. Ce processus de détermination, de suivi et d'évaluation de cette aptitude au service est le principe même de ce que l'on appelle la Surveillance de Santé Structurale.

Les charges de services, les paramètres environnants et les actions accidentelles peuvent endommager les structures. L'inspection régulière de l'état des structures permet de détecter des défauts éventuels et d'assurer la fiabilité de ces ouvrages. Cependant, pour palier à la subjectivité des inspecteurs et également réaliser des inspections plus fréquentes, les méthodes globales sont attrayantes. Ce besoin de méthodes globales pour l'évaluation quantitative de l'endommagement des ouvrages a conduit au développement et à la recherche de méthodes fondées sur les changements des caractéristiques vibratoires.

L'idée de base, dans toutes les techniques de détection d'endommagements par essais vibratoires, réside dans l'idée que les paramètres modaux (fréquences propres, amortissements modaux et déformées modales) mesurés s'expriment en fonction des propriétés physiques de la structure (rigidité, masse, amortissement). De ce fait, les modifications pouvant intervenir sur les propriétés physiques ou mécaniques doivent être détectables au travers de changements des paramètres modaux. En général, les effets d'endommagements dans une structure peuvent être classés comme étant « linéaires » ou « non linéaires », suivant le comportement de la structure après endommagement. Nous nous intéressons aux endommagements « linéaires » pour lesquels la réponse de la structure peut toujours être modélisée en conservant la forme linéaire des équations du mouvement. Les méthodes « linéaires » peuvent ensuite être classées en deux catégories suivant qu'elles se basent ou non sur un modèle numérique de la structure étudiée. Les méthodes n'utilisant pas de modèle sont souvent basées sur le changement des paramètres

modaux et/ou de leurs dérivées ou bien sur le changement de matrices particulières comme celles de flexibilité et de rigidité.

Les avancées technologiques en matériels de mesure et en informatique ont largement contribué aux récentes améliorations dans la détection d'endommagements par analyse vibratoire. Notamment, l'émergence d'extensomètres « longue base » ces dernières années a permis d'envisager de nouvelles utilisations et de nouveaux développements pour l'étude du comportement vibratoire des ouvrages en service. Une thèse (G. Cumunel) réalisée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a d'ailleurs permis de montrer que ces capteurs présentent un intérêt fort pour les méthodes de détections d'endommagements faisant appel à la courbure modale. La spécificité de ce sujet consiste donc à définir les principes et les approches d'une mise en œuvre pratique des capteurs de vibrations pour l'évaluation dynamique des structures, notamment la détection d'endommagements. L'idée générale est de déterminer le ou les couple(s) instrumentation/méthode de détection le(s) plus adapté(s) suivant la structure étudiée.

A partir d'une étude bibliographique, le doctorant dressera un état de l'art des différents types de mesure utilisée pour la surveillance de santé des structures, Structural Health Monitoring (SHM) en anglais. Cet état de l'art permettra de mettre en avant les paramètres identifiables par les différents moyens de mesure. Ensuite, à partir d'études bibliographiques déjà existantes sur la détection d'endommagements dans les structures, le doctorant choisira quelques méthodes pertinentes vis-à-vis de la première étude bibliographique (par exemple méthodes de la courbure modale, des courbures de flexibilité, de l'énergie de déformation pour l'extensométrie). La thèse peut par ailleurs s'appuyer sur d'autres travaux menés dans l'équipe sur la détection d'endommagements dans les câbles par analyse vibratoire, sur l'application de la décomposition orthogonale propre (POD en anglais) et de l'analyse en composantes principales (ACP) pour la détection de défauts. Enfin, un état de l'art sur l'optimisation du placement de capteurs permettra de définir des stratégies en fonction des paramètres identifiés par la mesure et des méthodes de détection d'endommagements choisies.

Le doctorant s'attachera ensuite à prendre en main différents outils d'analyse modale expérimentale (Transformée en Ondelettes Continues, méthodes des sous-espaces, analyse de FRFs), ainsi que l'utilisation de différents capteurs (déplacement, vitesse, accélération, déformation, ...). Après cela, à partir des différentes études bibliographiques, des algorithmes de placement optimal de capteurs devront être développés à partir de modèles éléments finis et implémentés par rapport à l'objectif visé pour la surveillance de santé structurale.

Cette recherche devra déboucher sur des principes concernant notamment le choix des capteurs (identification de la grandeur physique la mieux adaptée), leur nombre ainsi que leur positionnement sur la structure pour que la détection d'endommagements soit optimale. Des validations expérimentales pourront être effectuées sur une maquette de passerelle existant au sein de l'Equipe Structures de l'UR Navier ou également sur ouvrages réels, qui restent à définir. Elles seront d'autant plus intéressantes que la physique des capteurs, notamment la précision et la répétabilité de la mesure, pourra également être prise en compte.

### Plan prévisionnel de la thèse :

- 1) Etudes bibliographiques sur les différents types de mesure (accéléromètre, vibromètre, extensomètre, mesures optiques, centrale inertielle ...), les différentes méthodes de détection d'endommagements, et l'optimisation de placement de capteurs : 5 mois.
- 2) Appropriation et adaptation de méthodes d'analyse modale expérimentale (TOC, méthode des sous-espaces (COSMAD), analyse de FRFs (SDTools)), de méthodes de détection de défauts (courbure modale, POD, ACP) et de différents types de mesure (accéléromètre, extensomètre...). Mise au point d'expériences de Laboratoire : 7 mois.
- 3) Développements théoriques et simulations numériques de données : optimisation de différents paramètres de l'instrumentation (grandeur(s) mesurée(s), nombre de capteurs, placements,...) pour la détection d'endommagements. Proposition de plans d'instrumentations de structures : 12 mois
- 4) Comparaison théorie/expérience, traitement des données numériques et expérimentales : 6 mois
- 5) Rédaction de la thèse : 6 mois

### Techniques à utiliser :

Analyse temps-fréquence et transformée en ondelettes continue (TOC)  
Analyse modale expérimentale (SDTools, COSMAD)

### Bibliographie :

- Cumunel G., *Extensomètres à fibre optique Longue Base (ELB) pour l'évaluation dynamique des structures*, Thèse, Ecole des Ponts ParisTech, Marne la Vallée, 2008.
- De Stefano M., *Application of optimisation techniques to the diagnostic of aerospace structures*, Thèse, Politecnico di Torino, Italie, 2011.
- Meo M., Zumpano G., *On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure*, Engineering Structures 27 (2005) 1488–1497.
- Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B., *A Summary Review of Vibration-based Damage Identification Methods*, The Shock and Vibration Digest, 30(2) (1998) 91-105.
- Alvandi A., Cremona C., *Assessment of vibration-based damage identification techniques*, Journal of Sound and Vibration, 292(2006) 179-202.

## **Profil souhaité des candidats**

Formation souhaitée:

Master en génie civil ou génie mécanique  
ou  
Master en dynamique des structures  
ou  
Master de calcul scientifique

Connaissances souhaitées en

mécanique des matériaux  
mécanique vibratoire  
analyse modale expérimentale  
optimisation  
éléments finis  
programmation (principalement MATLAB)