



**MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE  
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA  
FORMATION DES CADRES ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

**DÉPARTEMENT DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR,  
DE LA FORMATION DES CADRES ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**CENTRE NATIONAL POUR LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE**

## **PROGRAMME D'ACQUISITION D'ÉQUIPEMENTS SCIENTIFIQUES AU PROFIT DES PÔLES DE COMPÉTENCES**

**Appel à propositions de projets de recherche au titre de 2009**

**DOC.1**

**FORMULAIRE DE DESCRIPTION ET DE PRÉSENTATION DES PROJETS**

**Projet III**

**Vibration des systèmes mécaniques: analyse, stabilité  
et contrôle**

**Février 2009**

**PROGRAMME D'ACQUISITION D'EQUIPEMENTS SCIENTIFIQUES  
AU PROFIT DES PÔLES DE COMPETENCES**

**I. IDENTIFICATION**

N° :

*Thématique générale du pôle :* **Modélisation, Expérimentation, Caractérisation  
Calcul en mécanique**

*Sous thématiques :* Vibration, stabilité et contrôle des systèmes ;

*Intitulé du projet*

**Vibration des systèmes mécaniques: analyse, stabilité et contrôle**

*Durée du*

*projet: 3 ans*

*Mots clés définissant le projet :* **Vibration, résonance, hystérésis, haute fréquence, contrôle, instabilité, actionneurs, capteurs, matériau piézoélectrique, viscoélastique, instabilité interfaciale, cellule de Hele-Shaw, repère tournant.**

**I.1. COORDONNATEUR NATIONAL DU PROJET**

*Nom :* Ouazzani *Prénom :* Mohamed Touhami

*Fonction :*

*Grade :* PES

*Laboratoire :* Mécanique

*Département :* Physique

*Etablissement :* Faculté des sciences Aïn Chock

*Adresse :* BP5366 Maârif

*Ville :* Casablanca

*Tél :* 022230682

*Fax :* 022230674 *E mail :*

**I.2. LABORATOIRES/EQUIPES<sup>1</sup> IMPLIQUES DANS LE PROJET**

Laboratoire/Equipe	Etablissement	Responsable
<b>Equipe1 :</b> Dynamique et comportement des structures mécaniques	Faculté des Sciences Aïn Chock	Mohamed Belhaq
<b>Equipe 2 :</b> Modélisation Mathématique et Contrôle	Faculté des Sciences et Techniques de Tanger	Azrar Lahcen
<b>Equipe3 :</b> Mécanique des fluides	Faculté des Sciences Aïn Chock	Saïd Aniss
<b>Equipe/Laboratoire 4 :</b> Modélisation et Simulation des Systèmes Mécaniques	Faculté des Sciences Tétouan	Larbi El Bekkali

**II. VALIDATION DU PROJET**

**Signatures du Président de l'Université et du chef d'établissement abritant le point focal national du pôle**

Le Président

Le Chef d'établissement

<sup>1</sup> Concernant les équipes, ne sont admises à participer au présent appel à projets que les équipes autorisées à être membres du pôle.

<b>Nom, Prénom et signature du Coordonnateur national du pôle</b>	

### III. PRESENTATION DU PROJET

#### III. 1. Description du projet

Le projet vise à développer des études analytiques, numériques et expérimentales pour des problèmes de vibration des systèmes mécaniques libres et forcés. Les études seront orientées vers l'analyse, la stabilité et le contrôle de ces systèmes. Seront considérés :

- (1) des systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS).
- (2) des systèmes vibro-impacte (SVI) à contacte Hertzienne sphère-plan.
- (3) des structures élastiques, en particuliers des poutres, des plaques et coques.
- (4) des structures viscoélastiques, à couches viscoélastiques ou patches piézoélectriques.
- (5) des cellules de Hele-Shaw en repère tournant.

#### **Thèmes (1), (2) :**

On propose d'étudier les effets d'une excitation à haute fréquence (EHF) sur les comportements non linéaire des SVI à contacte Hertzienne sphère-plan et des MEMS. On s'intéressera, en particulier, à l'effet d'une EHT sur le phénomène d'hystérésis. Une étude expérimentale est envisagée sur des SVI à contacte Hertzienne sphère-plan.

Les MEMS à fonctionnement capacitif sont fabriqués à l'aide de deux électrodes que l'on peut modéliser par deux micro-poutres, l'une est mobile et l'autre est fixe à un substrat en silicium. Entre ces deux électrodes règne une différence de potentielle qui crée une force électrostatique attractive causant la déformation de l'électrode mobile et par conséquent la diminution de la distance entre les deux électrodes. En augmentant la différence de potentielle, les deux électrodes se touchent donnant lieu à une instabilité appelée le **pull-in**. Le pull-in peut être causé par des chocs mécaniques auxquels sont soumis les microstructures. Ce phénomène peut être indésirable car il peut causer la destruction de la microstructure, où il peut être exploitable pour décharger la capacité et actionner un processus tel que le déclenchement d'un airbag.

L'influence d'une EHF sur la dynamique d'un SVI à contacte Hertzienne soumis à une excitation sinusoïdale sera aussi analysée dans ce projet. Plusieurs mécanismes et systèmes mécaniques utilisent ce type de contacte pour transformer des mouvements et des forces et d'assurer des mouvements de rotation et de translation. Aussi, pour assurer un bon fonctionnement des mécanismes tels que engrenages et roulements à bille, l'étude de la dynamique des SVI est nécessaire.

#### **Thèmes (3), (4) :**

Des techniques de contrôle actif et hybride vont être développées et testées pour les structures poutres et plaques ainsi que sur les microstructures. Ces techniques sont basées sur les méthodes du contrôle optimal et sur la modélisation micromécanique pour les actionneurs et capteurs à hautes performances rétroactives. La modélisation micromécanique basée sur les techniques d'homogénéisation des matériaux hétérogènes va être développée pour l'élaboration des matériaux piézo-électriques et viscoélastiques nouveaux et à caractéristiques optimisées. Ces nouveaux matériaux piézo-électriques vont être utilisés comme actionneurs et capteurs.

Pour le contrôle passif, des matériaux viscoélastiques et à hautes performances amortissantes vont être utilisés comme couche externe ou interne ou en sandwich et donnant naissance à des structures à amortissement optimisé. Des procédés analytiques et numériques pour l'amortissement équivalent en régimes linéaire et non linéaire ainsi que pour les réponses dynamiques vont être développés.

Le contrôle hybride sera réalisé par les couches rectoactives et amortissantes par couplage de couches viscoélastiques et piézoélectriques additives aux structures poutres plaque et coques. Pour la modélisation et la simulation numérique du comportement vibratoire de telles structures ainsi que pour leur stabilisation et contrôle, de nouvelles méthodes analytiques et numériques vont être développées dans le cadre de ce projet.

Sera étudié aussi le problème de flambage d'une coque soumise à un chargement de compression uniforme, puis de flexion pure et enfin lorsqu'elle est soumise à un chargement combiné de flexion et de pression interne. On propose de développer pour les coques cylindriques minces (cas le plus fréquent dans la pratique) des approches permettant de mieux quantifier l'effet d'un défaut géométrique localisé.

#### **Thèmes (5) :**

En cellule de Hele-Shaw, lorsqu'on injecte un fluide d'une certaine viscosité à l'intérieur d'un autre de viscosité différente, une instabilité à l'interface des deux fluides a lieu après une période de translation, et qui se manifeste par la formation de doigts qui se propagent de manière stable dans la cellule. Le projet proposé concerne une étude théorique, numérique et expérimentale sur les instabilités interfaciales entre deux liquides de caractéristiques physiques différentes confinés dans une cellule de Hele-Shaw annulaire et horizontale en rotation autour de son axe de révolution. Nous nous intéressons à l'étude de stabilité de l'interface séparant deux liquides newtoniens ou l'interface séparant deux liquides non newtoniens ainsi que l'interface séparant un liquide magnétique (ferrofluide) et un liquide non magnétique en présence d'un champ magnétique.

### **III.2. Objectifs**

Le projet vise à développer une étude théorique, numérique et expérimentale dans le domaine de contrôle de stabilité des systèmes mécaniques cité plus haut. Les objectifs principaux sont :

- Etudier l'influence d'une EHF sur la dynamique non linéaire des MEMS et des SVI.
- Développer une stratégie pour contrôler l'hystérésis et les instabilités du type pull-in.
- Modélisation micromécaniques de nouveaux matériaux piézoélectriques et viscoélastiques.
- Développer des techniques de contrôle actif et hybride pour les structures et microstructures.
- Etudier le flambage des coques soumises à un chargement de compression, de flexion pure ou de flexion et de pression interne.
- Analyser l'effet des imperfections géométriques sur le comportement au flambage.
- Etudier l'instabilité interfaciale entre deux liquides non miscibles confinés dans une cellule de Hele-Shaw en rotation uniforme (configuration 1).
- Etudier l'instabilité et digitation dans une cellule de Hele-Shaw en rotation dans le cas d'un liquide magnétique en présence d'un gradient de champ (configuration 2).
- Effectuer une campagne expérimentale sur chacune des deux dernières configurations.

### III.3. Méthodologie

Des doctorants seront impliqués dans le projet ainsi que des membres permanents des équipes impliquées. Pour le bon déroulement de ce projet et pour assurer un bon fonctionnement du réseau, une étroite collaboration entre les différents membres des équipes ainsi que des co-encadrements de thèses vont être engagés.

**Thèmes (1), (2) :** L'étude sera axée sur le contrôle de l'hystérésis dans les capteurs de type micro-gyroscopie résonant et sur le contrôle des SVI à contacte Hertzienne sphère-plan. Les modèles que l'on considère et qui capturent les principaux phénomènes à étudier sont basés sur l'**oscillateur de Mathieu** avec des non linéarités paramétriques et des non linéarités dues à l'amortissement. La méthode suivie consiste à :

- se placer au voisinage de la résonance fondamentale (cette résonance a l'avantage en actuation micromécanique et en détection),
- appliquer une méthode de perturbation de type moyenne ou échelles multiples pour obtenir les courbes de réponse ou de résonance (amplitude en fonction de la fréquence).
- analyser l'effet d'une excitation rapide sur ces courbes de résonance et sur l'hystérésis.

Les résultats analytiques seront validés systématiquement à l'aide des simulations numériques basée sur l'intégration d'équations différentielles ordinaires non autonomes.

L'étude expérimentale sera développée en partie en collaboration avec les partenaires:

- le Laboratoire de Mécanique de Contacte et des Structures (LaMCoS) de INSA de Lyon, avec lequel un projet de coopération CNRST/CNRS est sous évaluation.
- Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) de l'Ecole Centrale de Lyon avec lequel un projet de coopération est en cours de préparation.

**Thèmes (3), (4) :** La méthodologie utilisée ici concernant la modélisation micromécanique et le contrôle actif et hybride des structures sont basées sur les méthodes du contrôle optimal. Le traitement qui sera adopté pour la modélisation et la simulation numérique utilisent :

- la méthode des éléments finis, la méthode des équations intégrales, la méthode de continuation et les méthodes de perturbation.
- le contrôle LQR, LQG,  $H_\infty$ .
- la modélisation micromécanique.

#### **Thèmes (5) :**

Concernant ce thème, la méthodologie qui sera suivie

Pour la partie analytique on utilisera :

- l'analyse dimensionnelle, l'étude asymptotique, la stabilité au sens de Liapounov et la théorie de Floquet.

Pour la partie analytique on utilisera la méthode spectrale et la méthode de Galerkin.

Pour la partie expérimentale on déterminera le seuil d'instabilité pour les différents configurations en visualisant le champ de température par camera rapide.

Dans cette partie du projet, nous proposons d'effectuer une analyse de stabilité linéaire d'une interface de deux fluides non miscibles, confinés dans une cellule de Hele-Shaw en rotation autour de son axe de révolution. Nous considérons ici le cas d'une interface séparant deux liquides newtoniens de caractéristiques physiques différentes ainsi que le cas d'une interface entre un liquide newtonien et un fluide non newtonien. Nous analysons donc l'influence des forces centrifuges ainsi que des forces de Coriolis sur cette instabilité.

Nous considérons aussi un liquide magnétique (ferrofluide) confiné dans une cellule de Hele-Shaw horizontale en rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan horizontal de la cellule (configuration 1 & configuration 2). Le liquide magnétique étant soumis à un champ magnétique par l'intermédiaire d'un courant électrique. Nous allons étudier dans cette partie la stabilité de l'interface entre le liquide magnétique et un autre supposé non magnétique. Cette interface est supposée circulaire au départ autour de son axe de rotation. Aux forces volumiques de Coriolis et centrifuges se superposent des forces volumiques provenant de l'interaction entre champ magnétique et le liquide magnétique.

#### **III.4. Plan de travail et calendrier d'exécution**

**La première année** sera consacrée à :

**(thèmes (1) et (2)) :** La modélisation des MEMS et des SVI soumis à une EHF (thèmes (1) et (2)). Seront étudiés deux modèles à un ddl, un modélisant un système micro-gyroscope résonant et l'autre modélisant le contacte hertzienne sphère-plan. Les modèles adoptés sont non linéaires et la non linéarité est causée soit par la force électrostatique, soit par la force mécanique, soit par la combinaison des deux. Durant cette phase, la partie analytique sera développée sur les modèles sans excitation rapide. Les effets d'une excitation rapide et les études numériques débiteront dans la deuxième moitié de la première année.

**(thèmes (3) et (4)) :** La modélisation micromécanique des matériaux viscoélastiques et piézoélectriques nouveaux ainsi que l'analyse vibratoire des poutres à couches viscoélastiques ou patches piézoélectriques vont être élaborées.

**(thèmes (5)) :** La formulation du problème pour chacun des cas citée en objectifs (thème 5) et au démarrage de la résolution du problème. La résolution fera appel aussi bien à des méthodes analytiques que numérique.

**La deuxième année** sera consacrée au :

**(thèmes (1) et (2)) :** Le démarrage de l'étude expérimentale d'un SVI à contacte Hertzienne sphère-plan. Cette étude sera effectuée en collaboration avec le LDS, Ecole Centrale de Lyon. L'expérience sera réalisée durant la première moitié de l'année. La deuxième moitié de l'année sera consacrée à l'analyse des résultats expérimentaux.

**(thèmes (3) et (4)) :** La modélisation mathématique et simulation du contrôle actif et passif des plaques et coques à couches ou patches piézo-électriques et viscoélastiques.

**(thèmes (5)) :** La résolution et d'exploiter Des résultats obtenus pour concevoir un montage expérimental: cellule de Hele-Shaw annulaire pouvant effectuer des rotations constantes ou variables autour de son axe.

**La dernière année** sera consacrée à :

- la confrontation et l'exploitation des résultats,
- des travaux expérimentaux,
- la proposition des stratégies de contrôle des systèmes étudiés,
- une large diffusion des résultats dans des conférences et revues internationales.

#### IV. REPARTITION DES TACHES

Le tableau ci-dessous est destiné à préciser les tâches et activités spécifiques desquelles sera chargé(e) chaque laboratoire/équipe<sup>2</sup> pour la réalisation du projet.

Laboratoire/Equipe participant	Tâches et activités à réaliser par le laboratoire
<b>Equipe1</b> Dynamique et comportement des structures mécaniques	Etude théorique, numérique et expérimente de la dynamique des systèmes micro-gyroscopes résonants et des systèmes VI à contact Hertzienne sphère-plan.
<b>Equipe 2</b> Modélisation Mathématique et Contrôle	Modélisation micromécanique et contrôle actif et/ou passif de vibrations des structures
<b>Equipe3</b> Mécanique des fluides	Étude théorique et expérimentale au sein du laboratoire de Mécanique
Equipe/Laboratoire 4 Modélisation et Simulation des Systèmes Mécaniques	Modélisation et Simulation du flambage dans des Systèmes Mécaniques

#### V. PARTENARIAT<sup>3</sup>

Les partenaires qui participeront à ce projet :

(thèmes 1 et 2) :

1- Ecole Centrale de Lyon, LTDS

Une partie expérimentale sur l'étude de la dynamique d'un SVI à contact Hertzienne sphère-plan sera réalisée au LTDS.

2- INSA Lyon, LaMCoS

Un projet de coopération CNRST/CNRS entre l'équipe 1 et le LaMCoS est sous évaluation. Ce projet vise à étudier les effets d'une excitation rapide sur la dynamique non linéaire des structures. Le LaMCoS s'intéresse aussi à la dynamique non linéaire des capteurs de type micro-gyroscope résonant et une collaboration est envisagée sur ce sujet.

(thèmes 3 et 4) :

Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux, UMR CNRS 7554, Université Paul Verlaine-Metz, Ile de Saulcy, 57045 Metz Cedex, France.

(thème 5):

Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA) - Convention CNRS-CNRST/2005/2008.

#### VI. IMPACT ET RETOMBÉES

##### VI.1. Impacts et retombées scientifiques

- Proposer des techniques de contrôle des instabilités des systèmes.
- Développer une recherche expérimentale dans le domaine de vibration.
- Organiser des workshops et congrès internationaux pour la dissémination et les échanges scientifiques nationaux et internationaux.
- Assurer un nombre de publication d'articles scientifiques dans des revues internationales.

<sup>2</sup> Voir note de bas de page n°1 ci-dessus.

<sup>3</sup> Dans le cas où tous les projets ou une partie d'entre eux feront l'objet d'un partenariat, préciser la nature de ce partenariat (Partenaire, participation à tout le projet ou à une partie du projet, moyens humains, matériels et financiers).



- Offrir une plate forme scientifique internationale favorable pour l'échange et la diffusion des connaissances dans le domaine de vibration.
- Contribuer à la formation des jeunes chercheurs dans le domaine de vibration et de contrôle.
- Développer une recherche théorique et expérimentale dans le domaine des instabilités interfaciales.
- Développer de nouveaux procédés permettant de déclencher un transfert thermique par convection contrôlé. Ces travaux s'insèrent donc dans le domaine du génie des procédés en thermique.

#### **VI.2. Impact socio-économique (contexte et valorisation attendue)<sup>4</sup>**

- Se doter d'un environnement de recherche expérimentale pour faciliter la collaboration avec le milieu socio-économique dans le domaine de vibration et de contrôle des systèmes.
- Posséder une expérience dans l'expertise vibratoire des machines et des structures. A savoir :

- 1- analyse et diagnostic des phénomènes vibratoires des machines tournantes sur site,
- 2- analyse dynamique des structures (résonance, analyse modale,...),...
- 3- développer la formation professionnelle et la formation continue dans le domaine de l'analyse vibratoire et le contrôle.

Secteurs économiques concernés : industrie mécanique, industrie automobile, aéronautique...

### **VII. EQUIPEMENT DISPONIBLE ET SOURCES DE FINANCEMENT**

#### **VII.1. Equipement disponible pour la réalisation du projet<sup>5</sup>**

Concernant le coté expérimental, l'équipe 1 dispose d'une partie d'équipement expérimental (acquise dans le cadre du PARS), à savoir :

- deux tables vibrantes,
- Un amplificateur de puissance,
- Un oscilloscope digital,
- Des accéléromètres,

Un complément d'équipement d'analyses et mesures des vibrations est nécessaire non seulement pour effectuer des expériences au laboratoire, mais aussi pour développer la formation professionnelle et offrir un service d'expertise à l'industrie. L'équipement demandé est détaillé dans Doc. 1.

#### **VII.2. Moyens financiers disponibles pour la réalisation du projet<sup>6</sup>**

**VI.2. Equipements demandés pour la réalisation du projet**  
(Remplir pour cela le formulaire Doc.3)

<sup>4</sup> S'agissant de projets de recherche appliquée, leur valorisation réelle ou potentielle devrait être précisée (Utilisateur réel ou potentiel, secteur économique concerné, solution(s) apportée(s) par le projet, impact économique, etc.)

<sup>5</sup> Lister les équipements en précisant la nature de leur utilisation en rapport le projet.

<sup>6</sup> Dans le cas où une partie du financement des équipements demandés serait assurée en dehors du budget du Département, préciser la provenance de ce financement et dans quel cadre il est accordé au pôle.