

**DEMANDE D'ALLOCATION DE RECHERCHE DE L'ED SIE**  
**Année universitaire 2022-2023**  
**SUJET DE THESE**

**1. LABORATOIRE**

Nom ou sigle : **SYMME**  
Statut : **Equipe d'accueil**

**2. DIRECTION DE THÈSE**

Directeur de thèse (HDR) : **Christine BARTHOD (PR63)**  
Codirecteur éventuel : **Thomas MAZINGUE (MCF28)**

**Laboratoire partenaire ou collaborations éventuelles :**

**LISTIC (USMB)**

**3. SUJET DE THÈSE**

**Titre : Conception et réalisation d'un capteur de vibration à base de composite graphène dans une matrice viscoélastique pour la détection de personne dans l'habitat**

**4. RESUME**

**Français**

Le laboratoire SYMME travaille depuis plusieurs années sur la conception d'un capteur sismique à bas coût pour la géolocalisation de personnes dans l'habitat, en collaboration avec le LISTIC. Le principe de fonctionnement repose sur la mesure des changements des propriétés conductrices d'un matériau (composé d'une matrice viscoélastique à base de polysiloxane, et de graphène) lors de l'application d'une contrainte mécanique, telle qu'une vibration créée dans le sol par un pas humain. Un premier prototype de transducteur montre des résultats encourageants : une sensibilité comparable à celle du capteur le plus performant du marché (après filtrage), et un temps de réponse corrélé à la distance entre la source de l'onde sismique et le détecteur. Cependant, la réponse du transducteur doit être totalement caractérisée. Il convient donc de réaliser un étalonnage dans des conditions représentatives de son utilisation afin d'évaluer ses performances. Il est donc nécessaire d'établir un modèle de comportement liant les entrées et les sorties.

Le projet doctoral consiste donc à concevoir un capteur, composé d'une part d'un transducteur basé sur un matériau non-newtonien dont la loi de comportement est non-linéaire et d'autre part, soit d'un modèle électromécanique, soit d'un modèle numérique basé sur des algorithmes d'intelligence artificielle. Le capteur ainsi réalisé devra être capable d'extraire les principales caractéristiques de la vibration créée par une source sismique (amplitude, distance, etc). La possibilité de détecter des vibrations très faibles sans étage amplificateur avec de faibles volumes de matériaux dans des configurations non portées, contrairement aux transducteurs classiquement utilisés, représente une avancée scientifique remarquable. Des retombées scientifiques sont donc à prévoir dans le domaine de l'instrumentation (réponse vibrationnelle et sensibilité), ainsi qu'en traitement de données (modèle inverse, géolocalisation par trilatération).

Le candidat aura un profil instrumentation ou mécatronique. Il aura à disposition un banc de test opérationnel et des moyens de caractérisation. Il sera épaulé par les membres du laboratoire SYMME ayant des compétences en électronique et instrumentation et en matériaux fonctionnels. Il sera amené à travailler en relation avec le LISTIC. Ce projet s'inscrit pleinement dans les thématiques de l'école Doctorale SIE, et dans les domaines Mécatronique et Physique de l'Université Savoie Mont Blanc.

**English**

The SYMME laboratory has been working for several years on the design of a low-cost seismic sensor for the geolocation of people in the home, in collaboration with the LISTIC. The operating principle is based on measuring changes in the conductive properties of a material (composed of a viscoelastic matrix based on polysiloxane and graphene) when a mechanical stress is applied, such as a vibration created in the ground by a human step. A first prototype transducer shows

encouraging results: a sensitivity comparable to that of the best performing sensor on the market (after filtering), and a response time correlated to the distance between the source of the seismic wave and the detector. However, the transducer response must be fully characterized. It is therefore necessary to perform a calibration under conditions representative of its use in order to assess its performances. It is therefore necessary to establish a model of behavior linking the inputs and outputs.

The doctoral project therefore consists in designing a sensor, composed on the one hand of a transducer based on a non-Newtonian material with a non-linear behaviour law and on the other hand, either a numerical model based on artificial intelligence algorithms or an electro-mechanical model. The sensor must be able to extract the main characteristics of the vibration created by a seismic source (amplitude, distance, etc.). The possibility of detecting very weak vibrations without an amplifier stage with small volumes of material in unsupported configurations, unlike the transducers classically used, represents a remarkable scientific advance. Scientific spin-offs are therefore expected in the field of instrumentation (vibrational response and sensitivity), as well as in data processing (inverse model, geolocation by trilateration).

The PhD candidate will have an instrumentation and materials profile. He will have at his/her disposal the operational test bench and characterisation means. He will be supported by members of the SYMME laboratory with skills in electronics and instrumentation and in functional materials. He will work in collaboration with various academic partners (LISTIC). This project is fully in line with the axes of the SIE doctoral school, and with the Mechatronics and Physics theme of the Université Savoie Mont Blanc.

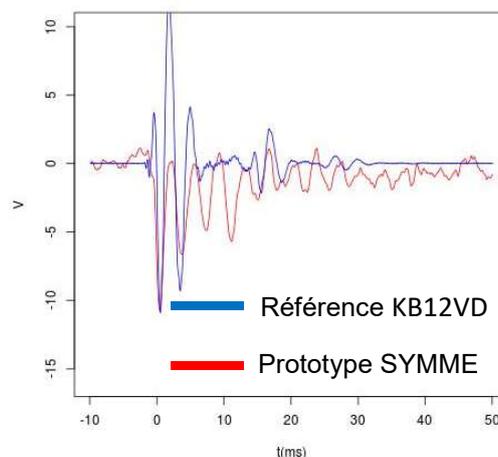
## 5. PROJET DE RECHERCHE DETAILLE

### Contexte

Dans le cadre de l'aide au maintien des personnes en situation de vulnérabilité à domicile, le suivi des habitudes de déplacements d'un individu constitue une information pertinente pour le suivi de son état de santé, voire le déclenchement d'une alarme en cas d'inactivité (malaise, chute dans le cas d'une personne âgée). La localisation peut être effectuée de différentes manières. Les solutions basées sur un GPS sont limitées par les dysfonctionnements en intérieur ainsi que par une précision insuffisante. Certains travaux de recherche exploitent des capteurs portés par l'individu, dédiés ou par une application dans un smartphone. Les limitations sont réelles : l'objet peut être perçu comme intrusif ou stigmatisant car il doit d'une part être porté par la personne, et ses batteries suffisamment chargées. D'autre part, l'objet porté peut être mal accepté car il peut renvoyer à la personne l'image négative de sa vulnérabilité. Une solution alternative est la localisation à partir des vibrations sismiques créées par les impacts des pas et détectées par des capteurs fixes placés dans l'habitat [1].

Ces vibrations, dites « à très faible énergie » [2], sont produites par des impacts dont les ondes de choc se propagent à la surface d'un solide. On peut ressentir ce phénomène lors d'un passage d'un camion à proximité du bâtiment dans lequel on se trouve. Les solutions existantes les plus performantes permettant d'effectuer de la mesure sismique à faible énergie utilisent des structures avec des empilements de lames de matériaux piézoélectriques et nécessitent une amplification. Cette technologie est coûteuse car son élaboration est complexe pour atteindre une sensibilité élevée [3].

Une étude préliminaire sur un matériau intrinsèquement sensible aux vibrations à faible énergie, menée en collaboration entre le SYMME et le LISTIC (projet AAPR GRUSS et projet AAPR SNAIL) a conduit à l'élaboration d'un démonstrateur de capteur sismique. Le principe de fonctionnement repose sur les propriétés d'un matériau composé d'une matrice viscoélastique à base de polysiloxane et de graphène. Ce dernier est réparti ici sous forme de nanofeuilles conductrices et de manière aléatoire au sein de la matrice, conférant au composite une conductivité électrique. Lors de l'application d'une contrainte sur le matériau, le réaménagement conséquent des nanofeuilles dans tout le volume du composé conduit à un brusque changement de la conductivité. Il est possible d'utiliser ce concept pour détecter des vibrations de très faible énergie [4]. Le principe a été mis en œuvre au SYMME par l'intermédiaire d'un prototype de transducteur, qui admet, sans amplification, une sensibilité du même ordre de grandeur que le capteur sismique Innomic KB12VD, le plus performant du marché (10000 mV/g), mais intégrant une forte amplification [5]. La figure 1 montre la réponse du dispositif prototype suite à un choc produit par la chute d'un marteau sur une surface, en comparaison avec le capteur de référence Innomic KB12VD.



**Figure 1** : Comparaison des réponses du capteur de référence et du capteur GRUSS à un impact produit par un marteau instrumenté

Le conditionnement du prototype de transducteur est très simple puisqu'il consiste en un pont diviseur de tension équilibré et alimenté en 10 V. Le signal obtenu (après filtrage) sur la figure 1 confirme la cohérence de la réponse avec

celle obtenue par l'accéléromètre Innomic KB12VD. Les premières observations indiquent que le temps de réponse est bien corrélé à la distance entre le transducteur et la source de l'onde sismique. Ce dispositif est donc très prometteur.

Ce résultat préliminaire constitue une réelle avancée pour la détection de pas dans l'habitat. En effet, on trouve dans la littérature des dispositifs dans lesquels le graphène est utilisé pour la détection de vibrations ou de pression mais il est soit imprégné dans des tissus pour la mesure de données biologiques [6], soit incorporé dans des matrices souples et élastiques [7], ou encore dans des dispositifs de type MEMS [8]. Il reste absent pour la détection d'ondes sismiques, pour lesquelles les systèmes piézoélectriques onéreux restent la référence [9].

Toutefois, à l'heure actuelle, la réponse du transducteur possède certaines propriétés qui doivent être caractérisées (non-linéarités, dérive temporelle). Il convient donc de réaliser son étalonnage complet afin d'évaluer ses performances (erreur de précision, stabilité, temps de réponse, ...). Pour le rendre utilisable, il est nécessaire d'établir un modèle de comportement liant les entrées et les sorties. Cette démarche est indispensable pour comprendre quelles informations peuvent être extraites du signal délivré par le transducteur, et les caractériser. Il faut pour cela l'associer à une partie traitement du signal qui en fera un capteur, c'est-à-dire un système permettant de faire la mesure d'une grandeur physique et donner une information exploitable et reproductible. La finalité est de rendre ce capteur utilisable dans n'importe quelle configuration de mesure.

### **Description et objectif du travail**

L'objectif de la thèse est de concevoir un capteur sismique ultra-sensible, simple à fabriquer et à bas coût, aux performances similaires à celles du capteur Innomic KB12VD. La finalité, à l'issue des 3 ans de financement, est de réaliser un démonstrateur de principe dont la réponse sera exploitable pour la localisation de personnes dans leur habitat. Le travail de thèse se situe dans le cadre d'une recherche finalisée multidisciplinaire (matériaux, instrumentation, traitement de données). Il s'effectuera au laboratoire SYMME et en relation avec le LISTIC qui sera l'utilisateur final du capteur sur la partie traitement de données, en cohérence avec les thématiques de recherche. Par ailleurs, le projet entre dans les axes Systèmes et Ingénierie de l'Ecole doctorale SIE de l'Université Savoie Mont Blanc.

Le projet doctoral est donc axé sur le développement d'un capteur sismique à base d'un matériau composite graphène-matrice viscoélastique en silicone. Les performances attendues sont :

- Bande passante 10 – 200 Hz
- Haute sensibilité (10 000 mV/g)
- Bonne répétabilité (10%)
- Dimensions réduites ( $< 5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ )

Une première partie de la thèse sera consacrée à l'étude du transducteur. En effet, la méthode de synthèse du composite ainsi que sa mise en œuvre dans un boîtier permettant l'extraction simple d'un signal électrique ont été identifiés, mais n'ont pas été optimisés. En particulier, la stabilité (temporelle, en température, ...) du matériau composite devra être caractérisée. Une démarche mécatronique sera mise en place de façon à concevoir le transducteur en parallèle avec son conditionneur et en tenant compte de l'intégration du matériau sensible, de manière à obtenir un signal à la fois le plus sensible et le plus répétable possible.

Une deuxième partie portera sur l'étude du modèle de comportement du matériau. Le transducteur fournit jusqu'à présent une réponse qui n'est pas exploitable avec les méthodes habituellement utilisées (diagramme de Bode, réponse impulsionnelle). Il s'agira donc d'établir d'un modèle électromécanique reproduisant la réponse observée par l'expérience et permettant d'extraire des invariants exploitables pour remonter aux caractéristiques de la vibration perçue (distance source sismique-transducteur, amplitude, etc). En cas de difficulté de mise en œuvre d'un tel modèle, une méthode d'extraction de loi de comportement inverse du capteur sismique par des techniques d'apprentissage d'intelligence artificielle [10,11] sera envisagée.

Une dernière partie sera dédiée à la caractérisation des performances du capteur, dans ses conditions prévues d'utilisation, à savoir dans un dispositif de localisation d'une personne dans une pièce grâce à la détection de ses pas.

### Dissémination

La diffusion du travail de thèse et l'échange avec des chercheurs experts dans le domaine est prévue avec des participations à la plus importante conférence dans le domaine des capteurs innovants (IEEE Sensors Conference). La publication d'articles sur les innovations et les réalisations expérimentales seront un objectif dans les revues de référence : IEEE Sensors Journal, Sensors and Actuators, Measurement. Afin d'expliquer la problématique de santé à un large public, une participation au Café-débats Entre Midi & Science sera proposée ; tout comme la coopération aux actions du Stabbi'Lab, livinglab dédié à la prévention du risque de chute et des troubles de l'équilibre et de la marche, avec lequel le laboratoire SYMME collabore actuellement. Un démonstrateur pourra également être proposé pour la Fête de la Science.

### Enjeux

La détection de pas par faible énergie sismique à coût réduit apportera une contribution notable dans la localisation de personne en intérieur, la mesure des déplacements (habitat, industrie, etc) ouvrant des perspectives diverses (aide au maintien à domicile, sécurité des personnes, adaptation énergétique, etc.). Les domaines d'application peuvent être très variés et s'intègrent dans les axes de recherche du SYMME (Matériaux Systèmes Instrumentés Intelligents) et LISTIC (Représentation, Gestion et traitement des données pour l'humain - ReGard) ainsi que dans les axes de l'Université : Service et industrie du futur, Santé bien-être, Interaction Homme-environnement. Enfin, le projet doctoral permettra au chercheur recruté de développer ses compétences scientifiques, techniques et de gestion de projet.

### 6. CANDIDAT RECHERCHE : Détailler en quelques lignes vos besoins et les qualités du candidat recherché...

Le candidat aura idéalement des compétences en instrumentation et/ou mécatronique. Il devra être familier avec la programmation LabVIEW, posséder des notions en conception mécanique et en simulations multi-physiques de manière à optimiser le banc de mesure mis en place au laboratoire SYMME, et à développer le transducteur et le système de traitement du signal. Une ouverture vers la synthèse et la caractérisation de matériaux sera appréciée. Le doctorant aura à disposition un banc instrumenté pour les tests de sensibilité aux vibrations générées par un actionneur. Le candidat devra donc avoir un goût prononcé pour l'expérimentation, une culture scientifique large, être capable de travailler de manière autonome dans une équipe aux compétences variées et posséder un bon esprit de synthèse.

**7. FINANCEMENT DE LA THESE :** *Le contrat doctoral fixe une rémunération principale, indexée sur l'évolution des rémunérations de la fonction publique : depuis le 1er février 2017, elle s'élève à **1768,55 euros bruts mensuels** pour une activité de recherche seule. Des heures d'enseignements peuvent être effectuées dans la limite de 64 heures équivalent TD par année universitaire **après autorisation du président de l'université** et rémunérées au taux fixé pour les travaux dirigés en vigueur. D'autres activités complémentaires au contrat doctoral sont prévues par l'article 5 du décret n° 2009-464 du 23 avril 2009 modifié. La durée totale des activités complémentaires aux activités de recherche confiées au doctorant dans le cadre du contrat doctoral ne peut excéder un sixième du temps de travail annuel.*

### 8. CONTACT :

Nom prénom : <b>BARTHOD Christine</b> Tél : <b>04 50 09 65 12</b> Email : <a href="mailto:Christine.Barthod@univ-smb.fr">Christine.Barthod@univ-smb.fr</a>	Nom prénom : <b>MAZINGUE Thomas</b> Tél : <b>04 50 09 65 68</b> Email : <a href="mailto:thmaz@univ-smb.fr">thmaz@univ-smb.fr</a>	Nom prénom : <b>MARECHAL Luc</b> Tél : <b>04 50 09 65 57</b> Email : <a href="mailto:Luc.Marechal@univ-smb.fr">Luc.Marechal@univ-smb.fr</a>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## REFERENCES

---

- [1] V. Racic, A. Pavic, J. Bownjohn, *Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review*, Journ. Of Sound and Vibration, 306 (2009), 1 – 49. doi.org/10.1016/j.jsv.2009.04.020
- [2] M. Mirshekari, J. Fagert, S. Pan, P. Zhang, H Noh, *Mech. Systems and Signal Proc.*, 153 (2021) 107499. doi:10.1016/j.ymsp.2020.107499
- [3] <https://buy.wilcoxon.com/731a-p31.html>
- [4] S. C. Boland et al., *Sensitive electromechanical sensors using viscoelastic graphene-polymer nanocomposites*, Science 354 (2016) 1257-1260
- [5] <https://www.innomic.com/en/products/sensors/special-sensors/>
- [6] Zhen Yang et al., *Simultaneously Detecting Subtle and Intensive Human Motions Based on a Silver Nanoparticles Bridged Graphene Strain Sensor*, Appl. Mater. Interfaces 10 (2018) 3948–3954
- [7] M. B., L. Qiu, M. S. Arefin, A. Neild, M. Yuce, D. Li, T. Alan, *Detecting Subtle Vibrations Using Graphene-Based Cellular Elastomers*, Appl Materials & Interfaces 9 (2017) 11345-11349
- [8] S.-E.Zhu, M. K. Ghatkesar, C. Zhang, G. C.A. M. Janssen, *Graphen piezoresistive pressure sensor*, Applied Phys Let. 102 (2013) 161904
- [9] A.S.Fiorillo et al., *Theory, technology and applications of piezoresistive sensors: A review*, Sens. Act. A 281 (2018) 156-175
- [10] C. Sikounmo, E. Benoit, S. Perrin, *States measurement in a context of intelligent connected furnitures*, J. Phys.: Conf. Ser. 772 (2016) 012003
- [11] F. Khalek, M. Hartley, E. Benoit, S. Perrin, L. Marechal, C. Barthod, *A low-cost machine learning process for gait measurement using biomechanical sensors*, Measurement:Sensors (2021)