



**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE INSTRUMENTATION ENVIRONNEMENT ESPACE  
DPHY**

**Soutenance de thèse de Charles MAUC**

**Vendredi 9 décembre 2022 à 14h00**

***Développement magnétomètre miniature exploitant un résonateur  
MEMS et une structure multicouche de matériaux magnétiques***

***Lieu : C2N, 10 boulevard Thomas Gobert, Palaiseau***

Composition du jury :

- ✚ Nora Dempsey, Rapporteur, Directrice de recherche, Institut Néel / CNRS, Grenoble
- ✚ Bernard Legrand, Rapporteur, Directeur de recherche, LAAS / CNRS, Toulouse
- ✚ Gaëlle Lissorgues, Examinatrice, Professeure des universités, ESIEE, Université Gustave Eiffel, Noisy-Le-Grand
- ✚ Frédéric Mazaleyrat, Examineur, Professeur des universités, ENS Paris Saclay, Gif-Sur-Yvette

Résumé :

Les outils de navigation modernes utilisant des satellites s'avèrent très efficaces mais ne sont pas toujours disponibles par manque de réseau ou par choix géopolitique. Il est alors nécessaire de pouvoir naviguer de manière autonome. Pour ce faire, des cellules inertielles compactes composées d'accéléromètres et de gyromètres sont utilisées. Cependant, du fait des intégrations successives pour remonter à la position ainsi qu'au cap, des biais et dérives de biais de mesures sont introduits, rendant erronés les mesures sur le long terme. Pour corriger ces biais, il est possible d'associer aux accéléromètres et aux gyromètres des magnétomètres (navigation magnéto-inertielle) permettant l'estimation de la vitesse par la mesure du gradient local du champ magnétique terrestre ou bien permettant l'identification du nord magnétique terrestre pour recalibrer le cap périodiquement. Les travaux réalisés dans cette thèse ont pour but de concevoir et caractériser un magnétomètre se basant sur un résonateur MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) en quartz et une structure multicouche de matériaux magnétiques permettant d'adresser les applications de la navigation magnéto-inertielle. Parmi les critères d'intérêt, nous trouvons une résolution inférieure à 10 nT ainsi qu'une faible sensibilité aux grandeurs inertielles. Dans le deuxième chapitre, grâce à des simulations numériques exploitant la méthode des éléments finis, nous avons conçu un design de magnétomètre exploitant le couple magnétostatique induit par l'interaction entre le champ d'induction magnétique extérieur et le moment magnétique unidirectionnel des matériaux magnétiques. Ce couple entraîne l'apparition de deux forces égales en norme mais opposées en sens sur deux poutres résonant en flexion. La mesure différentielle des fréquences de résonances des deux poutres évoluant en sens opposés est directement proportionnelle à une composante du champ magnétique extérieur. Nous avons optimisé le design de la structure pour trouver le meilleur compromis entre grande sensibilité au champ magnétique et faible sensibilité à l'accélération et à la vitesse de rotation. Dans les simulations numériques, nous avons fait l'hypothèse d'un grand moment magnétique unidirectionnel des matériaux magnétiques utilisés. Dans le troisième chapitre, qui a pour but de satisfaire au mieux cette hypothèse, nous avons élaboré une structure multicouche composée d'une alternance de matériaux ferromagnétique (FeCo) et antiferromagnétique (NiMn) qui, traitée thermiquement sous champ magnétique, acquiert une anisotropie d'échange unidirectionnelle. La valeur, la direction et la stabilité du moment magnétique de cette structure multicouche affectent directement la sensibilité du magnétomètre au champ magnétique. Après des caractérisations physicochimiques de l'empilement, nous avons identifié les paramètres géométriques (épaisseur et nombre des couches, anisotropie de forme), et d'élaboration (durée et température du traitement thermiques) permettant d'assurer une sensibilité au champ magnétique nominale. Dans le dernier chapitre, nous avons fabriqué le résonateur en quartz dimensionné au chapitre 2, déposé les matériaux magnétiques sur les emplacements adéquats et nous l'avons intégré avec son électronique de proximité. Après avoir validé son

principe de fonctionnement, nous avons mesuré sa résolution, ses sensibilités à la température et à l'accélération. Ces caractérisations nous ont permis de mettre en évidence un phénomène limitant, non prévu initialement, qui dégrade les performances du capteur, en particulier sa résolution.

Mots clés : Magnétomètre, MEMS, Résonateur, Couches Minces, Modélisation, Magnétisme.