

# Étude et conception d'un capteur fluxgate 3D pour la mesure à haute résolution de la signature magnétique de navires

La plupart des navires ont une coque constituée d'alliages de fer qui est un métal ferromagnétique. Sous l'effet de l'environnement la coque se magnétise ce qui provoque une perturbation du champ magnétique terrestre. Cette perturbation peut être détectée par des dispositifs hostiles (mines marines par exemple). Il existe plusieurs méthodes qui permettent d'éviter la détection, l'une d'entre elles consistant à compenser la perturbation à l'aide de boucles de courant disposées dans le navire. Pour effectuer cette compensation, il est d'abord nécessaire de caractériser la perturbation. Cette caractérisation est effectuée à l'aide d'un drone volant qui effectue plusieurs passages au-dessus du navire tout en mesurant le champ magnétique à l'aide d'un capteur magnétique. L'objet de la thèse est de faire l'étude et le développement du capteur magnétique embarqué sur le drone. Les principaux paramètres du cahier des charges de ce capteur impose une résolution de 1nT, une bande-passante de 3kHz et une taille de capteur réduite.

Il existe une multitude de capteurs magnétiques différents qui pourraient convenir à l'application. Parmi les différentes possibilités nous avons opté pour un capteur fluxgate car celui-ci peut atteindre une résolution suffisante sans avoir à faire usage de techniques de fabrication complexes.

Le capteur fluxgate est constitué d'un noyau fait d'un matériau magnétique entouré par une bobine d'excitation et une bobine de mesure. Un courant d'excitation pouvant avoir diverses formes traverse la bobine d'excitation ce qui génère un champ dans le noyau magnétique. Cela fait varier l'aimantation, et donc, le flux magnétique dans le noyau. La bobine de mesure perçoit ces variations de flux ce qui provoque l'apparition d'un signal AC aux bornes de la bobine de mesure. L'amplitude de ce signal est essentiellement proportionnelle au champ magnétique externe. Ensuite, le signal de mesure AC est transformé en un signal DC (démodulé), en multipliant celui-ci par un signal de démodulation qui peut là aussi avoir diverses caractéristiques. Le signal démodulé est ensuite filtré afin de supprimer les harmoniques hautes fréquence restantes dans ce signal. Enfin, un champ de contre-réaction proportionnel au signal filtré est généré afin de compenser le champ magnétique externe. Ainsi, nous sommes en mesure de connaître l'amplitude du champ externe en mesurant l'amplitude du champ de contre-réaction que nous avons généré. Les systèmes de filtrage démodulation et contre-réaction peuvent être fait de différentes façon, on note l'existence de modules de traitement de signal numériques et analogiques.

Parmi les différentes géométries de noyau magnétique envisageables, nous avons opté pour un noyau magnétique de forme toroïdale. Ce choix a été fait principalement car celui-ci est le seul qui permet de mesurer deux composantes du champ magnétique avec un seul noyau. Les signaux d'excitation et de démodulation sont des signaux carrés générés à partir de circuits logiques standards et le système de filtrage et de correction est un simple intégrateur. Dans une première version, la contre-réaction du champ magnétique est faite en injectant un courant dans la bobine de mesure. Nous avons aussi

fait le choix de faire usage d'un système de traitement de signal analogique afin de supprimer les contraintes liées à l'échantillonnage des différents signaux.

Le développement du capteur complet est d'abord passé par une étape de dimensionnement, puis une étape de simulation du capteur. Lors du dimensionnement il a été étudié de façon très détaillée le circuit d'excitation. Cette étude a été nécessaire en raison du comportement non-linéaire de la bobine d'excitation. En fonction de l'état dans lequel se trouve le noyau magnétique (saturé ou non), l'inductance de la bobine varie très significativement. Cela rend l'étude du circuit d'excitation non-trivial et a fait l'objet d'une publication lors de la conférence IEEE Sensors 2020 [1]. Une fois le circuit d'excitation maîtrisé, nous avons mis au point le circuit de traitement de signal du fluxgate. Cela a été fait en effectuant une étude analytique du système complet afin d'extraire la fonction de transfert de celui-ci. Ensuite, nous avons ajusté chacun des paramètres du système en tenant compte des contraintes imposées par le cahier des charges.

Cette étape de dimensionnement terminée, nous nous sommes ensuite concentrés sur la simulation du capteur. Il n'existait alors pas de modèle compact de l'élément sensible d'un fluxgate qui permette de simuler le comportement de l'élément sensible associé à son électronique de conditionnement et de traitement du signal. C'est pourquoi nous avons d'abord développé un modèle compact complet de cet élément sensible en verilog-A sous environnement Cadence®. Lors du développement du modèle il a fallu tenir compte de tous les flux qui entrent et sortent du noyau et prendre garde à ce que tous les différents flux soient conservés correctement. En particulier, ce langage de description matériel ne permettant pas de modéliser les champs scalaires et vectoriels, nous avons dû mettre au point une technique permettant de modéliser l'ensemble des flux magnétiques externes à l'élément sensible (champ terrestre, rebouclage des lignes de champs à l'extérieur du noyau). Le développement de ce modèle a fait l'objet d'une publication lors de la conférence IEEE Sensors 2020 [2].

Une fois le modèle d'élément sensible conçu, nous avons vérifié par la simulation si le dimensionnement effectué était correct ou non. Pour se faire, il nous a fallu d'abord développer des modèles comportementaux paramétrables pour chacun des composants du système, pour enfin simuler le comportement du capteur complet. Les simulations réalisées à l'aide de composants quasi-idéaux ont montré que le dimensionnement du circuit a été effectué correctement. Lorsque l'on introduit des défauts dans les composants, il apparaît une détérioration des performances du capteur. Les influences de chaque paramètre (gain, bande-passante, offset, ...) sur les performances du système ont pu être évaluées grâce à ces modèles comportementaux paramétrables.

S'en est suivi une étude pratique du capteur. Cette étude a d'abord commencé par le développement d'un support qui permet d'accueillir le noyau magnétique et ses différentes bobines (l'élément sensible) suivi de diverses expérimentations sur le capteur complet.

Le premier prototype de capteur a mis en évidence la présence d'une contre-réaction électrique involontaire qui atténue significativement la bande-passante du capteur. Aussi, la résolution du capteur n'était pas suffisante pour l'application visée.

Pour améliorer les performances, nous avons donc conçu un second prototype ayant pour but principale d'améliorer la résolution du capteur. Cela a été fait en ajoutant un

préamplificateur dans la chaîne directe du module de traitement de signal. Par ailleurs, pour supprimer la contre-réaction involontaire, le champ de contre-réaction est généré par une bobine dédiée dans le second prototype au lieu d'être généré par la bobine de mesure. Cela a permis de nettement améliorer les performances.

Avec ce second prototype nous avons ensuite étudié l'impact de la géométrie de la bobine de contre-réaction. Il apparaît qu'une bobine de plus grande taille permet de mieux compenser le champ magnétique externe. Toutefois, nous avons aussi mis en évidence la présence d'un transformateur parasite entre la bobine de mesure et la bobine de contre-réaction. Après avoir étudié l'effet du transformateur, il apparaît que celui-ci impacte significativement les performances du capteur. Nous avons ensuite étudié l'effet d'une asymétrie de la bobine d'excitation sur les performances du capteur à l'aide d'un troisième prototype. L'étude en question a montré que l'homogénéité de la bobine d'excitation n'est pas un facteur dominant sur les performances du capteur.

Lors de la thèse, nous avons réussi à dimensionner et mettre au point un capteur complet qui est fonctionnel. Celui-ci n'a toutefois ni la résolution ni la bande-passante visée. Néanmoins, la méthode de dimensionnement du circuit d'excitation s'est montrée très robuste et il est possible de facilement ajuster les paramètres afin d'obtenir un courant d'excitation ayant les caractéristiques recherchées. La partie du système dédiée à l'extraction du signal a conduit à des difficultés dont certaines restent encore à résoudre. L'étude pratique a néanmoins mis en évidence la présence d'un couplage inductif entre les différentes bobines de l'élément sensible. Cette étude a permis de montrer que ce couplage, bien que très faible, a un impact fort sur le comportement du système rebouclé.

Afin d'aboutir à un prototype pleinement fonctionnel de fluxgate, plusieurs pistes restent à explorer. L'étude du transformateur parasite entre les bobines de mesure et de contre-réaction doit être approfondie. Une étude plus approfondie du bruit dans le système doit également être menée.

[1] L. Malané, J.-B. Kammerer, L. Hébrard et V. Chereau, «Design methodology of square wave excited ring core for fluxgate sensor,» *IEEE Sensors*, Rotterdam, 2020.

[2] L. Malané, J.-B. Kammerer, L. Hébrard et V. Chereau, «Compact Model of Ring-Core Sensing Element of 2D Fluxgate Magnetometer,» *IEEE Sensors*, Rotterdam, 2020.