

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

CONTRIBUTION À LA CONCEPTION DES CAPTEURS INDUCTIFS DE MESURE
DE POSITION SANS CONTACT : APPLICATIONS AU DOMAINE DE
L'AUTOMOBILE

THÈSE PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE DU
DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
WALID GANNOUNI

JUILLET 2021

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (PH.D.)

Direction de recherche :

Mamadou Lamine Doumbia

Directeur de recherche

Adel Badri

Codirecteur de recherche

Jury d'évaluation :

Souso Kelouwani

Président du jury

Mamadou Lamine Doumbia

Directeur de recherche

Adel Badri

Codirecteur de recherche

Jamel Ghouili

Évaluateur externe

Tahar Tafticht

Évaluateur externe

Thèse soutenue le 07 Mai 2021

Résumé

Le travail dans le cadre de cette thèse de doctorat de titre « contribution à la conception des capteurs inductifs de mesure de position sans contact : applications au domaine de l'automobile », consiste à améliorer un système inductif de mesure de position absolue, en vue d'une utilisation dans les applications automobiles tout en tenant compte de la sécurité. Ce système de mesure sera étudié et analysé afin d'améliorer les performances d'exécution de la résolution de position.

Les avancées technologiques dans l'industrie automobile ont été considérables aux des dernières années. Le développement dans le domaine électronique en particulier a été à tel point important, que les systèmes électroniques font aujourd'hui partie intégrante des véhicules de nouvelle génération. Les systèmes de sécurité constituent l'une des sections les plus importantes des systèmes électroniques dans l'industrie automobile. La fonction de base de ces systèmes est de connaître la position absolue de certaines composantes du véhicule, telles que le système de direction et ce, afin de réaliser les contreactions éventuelles utiles au bon fonctionnement des ensembles électronique et mécanique. La complexité croissante des nouvelles technologies engendre la complexité des systèmes de réaction en cas de défaillances et/ou d'interférences. En ce sens, l'analyse de la sécurité devient une étape incontournable dans tout processus de développement.

La taille des capteurs inductifs représente un problème à une plus grande utilisation dans des systèmes d'applications modernes complexes dans l'industrie automobile. À cet effet, l'industrie s'est tournée vers des procédés de micro-usinage, qui ont été largement utilisés pour produire des microcapteurs tactiles et des capteurs de position angulaire basés sur un réseau d'inductances planaires. Cependant, des procédés de micro-usinage spéciaux et complexes sont nécessaires pour fabriquer ces capteurs. En outre, la réduction de la taille des capteurs électromécaniques diminue considérablement leur sensibilité et limite par conséquent, leurs performances. L'uniformité du processus et les dommages causés aux structures fragiles en couches minces, deviennent également un problème lors de la fabrication et de l'exploitation.

L'objectif de ce travail est de concevoir les éléments d'un capteur de position inductif sans contact, sous forme micro, qui surmonte un grand nombre de lacunes des technologies actuelles, telles qu'elles ont été identifiées précédemment. Dans cette thèse, une nouvelle génération de capteurs qui résolvent le problème de la taille et améliorent la rentabilité et la facilité de fabrication, y est décrite. Plus précisément, un nouveau capteur de position inductif basé sur des bobines planes et spiralées, est présenté. Ce capteur est conçu de manière à améliorer la relation entre les bobines planes proposées et la cible fournissant un déplacement angulaire *via* une relation mathématique non complexe. En raison de cette caractéristique, les positions sont facilement obtenues à partir du signal mesuré, ce qui n'est pas le cas pour la plupart des capteurs à bobines planes qui nécessitent des transformations mathématiques complexes et consomment des ressources considérables de calculs en temps réel.

Dans le cadre de ces travaux, une méthodologie a été adoptée afin d'identifier les faiblesses de la génération actuelle de capteurs de position inductifs et en traitant ces faiblesses, de pouvoir proposer une nouvelle évolution de ces capteurs. Cette méthodologie couvrira les aspects concernant le choix de la configuration du capteur de mesure de position sans contact, la modélisation d'un capteur inductif de position (un système de transfert d'énergie sans contact) ainsi que la synthèse de la fiabilité de capteur de position sans contact pour les applications automobiles. Une méthode simple de détection du champ magnétique induit et des courants de Foucault pour distinguer la position de la cible est proposée.

Un prototype du capteur proposé a été développé et testé. Le capteur a une précision comparable à celle de capteurs existants beaucoup plus grands (écart type d'erreur résiduelle de 2,55 % de la pleine échelle), une linéarité élevée ($R^2 = 99,3 \%$) et une faible sensibilité au bruit injecté de 0,5 % de la pleine échelle. Ce capteur de position rotatif, miniature et peu coûteux, pourrait trouver de nombreuses applications, notamment dans le domaine moderne de l'automobile.

Abstract

The work within the framework of this doctoral thesis titled "contribution to the design of inductive sensors for non-contact position measurement: applications to the automotive field", consists of improving an inductive absolute position measurement system, for use in automotive applications while taking safety into account. This measurement system will be studied and analyzed in order to improve the performance of the position resolution.

Technological advances in the automotive industry have been tremendous. Development in the electronic field in particular has been so important that electronic systems are now an integral part of new generation vehicles. Safety is one of the most important aspects of electronic systems in the automotive industry. The basic function of these systems is to measure the absolute position of certain components of the vehicle, such as the steering system, in order to carry out any reactions useful for the proper functioning of the electronic and mechanical assemblies. The increasing complexity of new technologies creates complexity in the response systems in the event of failures and / or interference. In this sense, safety analysis becomes an essential step in any development process.

The size of inductive sensors presents a problem for greater use in complex, modern, application systems in the automotive industry. For this purpose, the industry has turned to micromachining processes, which have been widely used to produce tactile microsensors and

angular position sensors based on an array of planar inductors. However, special and complex micromachining processes are required to fabricate these sensors. In addition, reducing the size of electromechanical sensors considerably reduces their sensitivity and consequently limits their performance. Process uniformity, and damage to fragile thin-film structures, also becomes a problem during manufacture and operation.

The objective of this work is to create the elements of an inductive contactless position sensor, in micro form, which overcomes many of the shortcomings of current technologies, as previously identified. In this thesis, a new generation of sensors which solve the problem of size and improve the affordability and the ease of manufacture, is described. More precisely, a new inductive position sensor based on planar, spiral coils, is presented. This sensor is designed to improve the relationship between the proposed planar coils and the target providing angular displacement via a non-complex mathematical relationship. Due to this characteristic, positions are easily obtained from the measured signal, which is not the case for most flat coil sensors which require complex mathematical transformations and consume considerable real-time computational resources.

As part of this work, a methodology was adopted in order to identify the weaknesses of the current generation of inductive position sensors and by addressing these weaknesses, to be able to propose a new evolution of these sensors. This methodology will cover the aspects concerning the choice of the configuration of the contactless position measurement sensor, the modeling of an inductive position sensor (a contactless energy transfer system) as well as the synthesis of the reliability of the sensor. contactless position for automotive

applications. A simple method of detecting the induced magnetic field and eddy currents to distinguish the position of the target is proposed.

A prototype of the proposed sensor has been developed and tested. The sensor has an accuracy comparable to that of much larger existing sensors (standard deviation of residual error of 2.55% of full scale), high linearity ($R^2 = 99.3\%$) and low sensitivity to injected noise 0.5% of full scale. This miniature, inexpensive rotary position sensor could find many applications, especially in the modern automotive field.

Avant-propos

Le travail présenté dans cette thèse s'affilie avec les disciplines du génie électrique et du génie industriel. Il explore la possibilité d'utiliser des capteurs inductifs de position angulaire miniaturisés. Cette recherche est menée par Walid Gannouni (étudiant au doctorat) et supervisée par les professeurs Mamadou Lamine Doumbia et Adel Badri, à l'Université du Québec à Trois-Rivières, Canada.

Tout d'abord, il me faut remercier infiniment mon directeur de recherche, professeur Mamadou Lamine Doumbia, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet de doctorat. Son support, ses conseils et son professionnalisme tout au long de la réalisation de cette thèse ont grandement contribué à m'aider et à rendre mon travail agréable. Je lui suis reconnaissant de m'avoir fait bénéficier de ses précieuses orientations et de sa rigueur intellectuelle que je n'oublierai jamais. Soyez assuré de mon attachement et de ma profonde gratitude.

Je souhaite aussi remercier mon codirecteur de recherche, professeur Adel Badri, pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Je lui suis reconnaissant d'avoir accepté la codirection de cette thèse et de m'avoir fait bénéficier de son expertise au Département du génie industriel. Je n'oublierai jamais son aide précieuse. Je tiens également à le remercier pour son soutien moral

ininterrompu et ses nombreux conseils scientifiques tout au long de ma thèse. Son exigence m'a grandement stimulé.

Je tiens à remercier les membres de mon jury de thèse, soit professeur Sousso Kelouwani, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être président de jury de thèse, pour toutes ses remarques intéressantes et les conseils scientifiques qu'il m'a prodigués durant l'examen doctoral. Je souhaite l'assurer de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt qu'il porte à ce travail.

Mes remerciements au professeur Jamel Ghouli de l'Université de Moncton et au professeur Tahar Tafticht de l'Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à mon jury de thèse en tant des qu'évaluateurs externes de mon travail, pour les suggestions et les remarques judicieuses qu'ils m'ont indiquées ainsi que pour le temps consacré à la révision de cette thèse.

Je remercie l'Organisation nationale de recherche canadienne Mitacs, pour les supports financiers. Ce travail a été soutenu par l'organisme subventionnaire Mitacs (numéro de subvention IT11495).

Mes remerciements sont aussi adressés à Simon Pyatt, technicien de recherche principale au *Birmingham Instrumentation Laboratory for Particle Physics and Applications* (BILPA) de

l'University of Birmingham au Royaume-Uni, pour son aimable assistance et à Piconics Inc. pour le don de micro-inducteurs à couche mince.

Évidemment, un très grand remerciement à ma famille qui m'a toujours soutenu et encouragé tout au long de cette thèse.

Je termine en confirmant que ce travail est original, qu'il n'a pas été publié ailleurs et qu'il n'est d'ailleurs actuellement pas envisagé de le publier. Ce travail de recherche est très original et pourra apporter des contributions fort intéressantes à l'industrie automobile et à la sécurité de ses usagers. Le développement des capteurs micro-électroniques fiables est un axe de travail qui contribue à la réduction des tailles et à l'augmentation de la durée de vie du système automobile. Cette thèse vise aussi à explorer de nouveaux horizons et d'envisager des solutions qui permettent d'avoir un nouveau type de capteur inductif de position.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract	vi
Avant-propos	ix
Table des matières	xii
Liste des tableaux	xvi
Liste des figures.....	xvii
Liste des acronymes et symboles.....	xx
Chapitre 1 - Introduction générale.....	1
1.1 Contexte	1
1.2 Motivation de recherche.....	3
1.3 Problématique et cadre général de la recherche	5
1.4 Objectifs	7
1.5 Originalité du sujet et contributions	8
1.6 Méthodologie retenue	10
1.7 Structure de la thèse.....	14
Chapitre 2 - Revue de l'état de l'art.....	15
2.1 Introduction	15
2.2 Recherche bibliographique par mots-clés	15

2.3	Dernières innovations	19
2.3.1	Capteurs inductifs triaxiaux	19
2.3.2	Contrôleur frontal analogique	21
2.3.3	Phénomène de lévitation	22
2.3.4	Systèmes microélectromécaniques gyroscopes.....	24
2.3.5	Mesures correctives	26
2.4	Capteurs de position industriels.....	27
2.4.1	Capteur de ZF Group.....	27
2.4.2	Capteur inductif de position ZMID520x.....	30
2.5	Principe de mesure inductive	32
2.5.1	Champs électriques et champs magnétiques	33
2.5.2	Utilisation croissante de la détection de position d'angle.....	33
2.6	Mécanisme de détection de position d'un capteur micro-inductif	34
2.6.1	Estimation de la fréquence naturelle.....	34
2.6.2	L'erreur de non linéarité du capteur	36
2.6.3	Détermination de l'intensité du champ magnétique	37
2.6.4	Détection sensible à la phase.....	39
2.7	Conclusion.....	42
	Chapitre 3 - Étude théorique de fiabilité des capteurs inductifs.....	43

3.1	Introduction	43
3.1	Définition de sécurité et fiabilité	44
3.2	Étude des causes micro-électroniques de défaillance	47
3.3	Modélisation du schéma de défaillance du capteur proposé	50
3.4	Comparaison avec des résultats existants	54
3.5	Conclusion.....	57
Chapitre 4 - Modélisation d'un capteur de position angulaire inductif		
	microminiaturisé.....	58
4.1	Introduction	58
4.2	Analyses de la bobine du capteur	58
4.3	Modélisation de lévitation inductive et magnétique.....	61
4.4	Modélisation des interfaces de détection et considération de conception	66
4.4.1	Modèle électrique de fonctionnement par signal induit.....	66
4.4.2	Modèle de détection de la tension induite à double-bobine.....	73
4.4.3	Modèle de détection des performances avec différents formats cibles	79
4.5	Conclusion.....	82
Chapitre 5 - Études expérimentales		
5.1	Introduction	84
5.2	Capacité de fabrication de la technologie des microsystèmes	84

5.3	Configuration expérimentale pour influencer le fonctionnement des bobines	86
5.4	Configuration expérimentale utilisant l'émetteur.....	90
5.4.1	Montage en surface.....	90
5.4.2	Effet de la position verticale au champ magnétique.....	92
5.5	Montage expérimental à l'aide de la bobine fabriquée.....	94
5.6	Fabrication de capteur.....	100
5.7	Installation expérimentale	104
5.8	Résultats expérimentaux et discussion.....	108
5.9	Conclusion.....	112
Chapitre 6 - Conclusion générale et perspectives de recherche		114
Références		118
Annexe A : liste des publications durant la thèse.....		127
Annexe B : Caractéristiques de logiciel de simulation		129
B.1	Analyse de la bobine de capteur.....	129
B.1.1	Capacités optimales de détection inductive	129
B.1.2	Mesure de la fréquence	131

Liste des tableaux

Tableau 2-1	Éléments bibliographiques correspondants dans les journaux	16
Tableau 2-2	Résultats bibliographiques Selon IEEE Xplore sur les capteurs inductifs	17
Tableau 2-3	Solutions compétitives en matière de compacité	31
Tableau 2-4	Principe de mesure de capteur automobile	32
Tableau 2-5	Description du schéma de mesure.....	41
Tableau 3-1	Niveau de sécurité acceptable.....	45
Tableau 3-2	Causes et modes associés aux défaillances du capteur microélectromécaniques.....	48
Tableau 3-3	Mécanismes de sécurité pour le capteur inductif proposé.....	49
Tableau 3-4	Comparaison entre les modèles de calcul utilisés et le résultat obtenu	56
Tableau 4-1	Paramètres proposés pour la conception des capteurs	80
Tableau 4-2	Comparaison avec des recherches pertinentes.....	83
Tableau 5-1	Liste des entreprises contactées ayant une solution acceptable	85
Tableau 5-2	Spécifications et schéma du capteur de position angulaire avec interfaces de détection sur un circuit intégré commercial ZMID5201	107

Liste des figures

Figure 1.1	Démarche méthodologique.....	12
Figure 2.1	Articles pertinents liés à l'étude effectuée.....	18
Figure 2.2	Implémentation d'un contrôleur frontal analogique (AFE) d'un capteur de position inductif [18].....	22
Figure 2.3	Suspension inductive micro-usinée avec noyau PMC : (a) lévitation de la masse de preuve ; (b) bobines avec noyau ; (c) schématique transversale des bobines avec noyau PMC [27]	23
Figure 2.4	Suspension hybride : (a) prototype de la suspension collée à un circuit imprimé ; (b) schéma de la conception de la suspension ;(c) conception des électrodes : 1-suspension, 2-rotation et 3-inclinaison des électrodes ; (d) vue de l'alignement des structures d'électrodes et de bobines à l'arrière (verre pyrex) de l'appareil [27]......	24
Figure 2.5	Capteurs de position linéaire de ZF Group [35]	28
Figure 2.6	Capteur de couple inductif pour EPS [37].....	29
Figure 2.7	Effet Coriolis	37
Figure 2.8	Schéma synoptique simplifié de la mesure de phase avec PSD	40
Figure 3.1	Redondance fonctionnelle et matérielle	44
Figure 3.2	Représentation du schéma de défaillance du capteur.....	52
Figure 3.3	Utilisation d'une limite de temps pour atténuer les défaillances à deux points.....	53
Figure 4.1	Inductance totale proportionnelle au nombre de tours et de couches	59
Figure 4.2	Courbe de l'inductance et de la résolution en fonction de la distance	60
Figure 4.3	Projection de capteur électromagnétique.....	62
Figure 4.4	Capteur micro-inductif basé sur le principe de lévitation	63

Figure 4.5	Élévation de la plaque de micromiroir en fonction de la tension	64
Figure 4.6	Force verticale électromagnétique en fonction de la tension	65
Figure 4.7	Tension et force verticale en fonction de l'élévation.....	66
Figure 4.8	Quatre bobines spirales à quatre couches minces	67
Figure 4.9	Caractéristiques du capteur ferromagnétique (a) inductance de la bobine, (b) flux magnétique et (c) angle mesuré	70
Figure 4.10	Caractéristiques du capteur de cible en cuivre (a) inductance de la bobine et (b) angle mesuré.....	72
Figure 4.11	Résultats de la simulation : (a) la simulation numérique de la distribution du champ magnétique au-dessus de la bobine d'émission, (b) le champ magnétique axial à une hauteur verticale Z.....	74
Figure 4.12	ln (B) en fonction de la distance	76
Figure 4.13	Conception du capteur et caractéristiques du troisième dispositif de capteurs (a-b) Schéma du capteur de position angulaire avec la cible rotative en cuivre, (c) Tension induite dans les bobines SC1 et SC2 liée à l'angle mécanique de la cible	78
Figure 4.14	Tension de sortie du capteur avec différents angles de secteur avec (a) une cible de 1/4 de cercle et (b) une cible de 3/4 de cercle. (c) tension induite normalisée, et (d) mesure de l'angle prévu.....	81
Figure 5.1	Montage expérimental d'un capteur inductif industriel	87
Figure 5.2	Sortie sinusoïdale et cosinus du capteur ZMID5201	88
Figure 5.3	Mesure de sortie influencée par l'écart d'air	89
Figure 5.4	Sensibilité au bruit magnétique injecté	89
Figure 5.5	(a) Montage des pièces sur un plan au sol avec de l'époxy non conducteur (b) Microcâblage thermosensible à l'aide d'un fil d'aluminium de 25.4 micromètres avec des plots de connexion de 0.1016 mm de diamètre	91
Figure 5.6	Résistance de série pour faire correspondre l'impédance de l'émetteur au générateur de signaux	92

Figure 5.7	(a) Mesure du champ magnétique de l'émetteur IDT, (b) Mesure du champ magnétique de l'émetteur fabriqué	93
Figure 5.8	Signal de récepteur dépendant de la position	94
Figure 5.9	Configuration expérimentale utilisant le module électronique ZMID5201SKIT avec le récepteur à micro-inductance	96
Figure 5.10	Configuration expérimentale utilisant la bobine émettrice alternative avec le récepteur à micro-inductance.....	97
Figure 5.11	Signaux d'entrée sinus et cosinus basés sur l'angle de rotation (degrés électriques)	99
Figure 5.12	<i>Arctan</i> en fonction de l'angle de rotation (degrés électriques).....	100
Figure 5.13	fabriqué du capteur inductif de position angulaire constitué (a) d'un bloc cible en cuivre et (b) de bobines de détection en or en forme de spirale.....	103
Figure 5.14	Dispositif de mesure (a) dispositif expérimental pour mesurer la variation du signal de sortie du capteur inductif avec le contrôleur de rotation, (b) position de fixation du prototype de capteur agrandi et (c) schéma fonctionnel de l'interface de conditionnement du capteur.....	106
Figure 5.15	Mesures de la tension de sortie, (a) variation des amplitudes du signal des bobines de détection avec l'angle de rotation, (b) sortie de l'angle mesuré φ en fonction de la position de l'angle mécanique.	109
Figure 5.16	Mesures de la tension de sortie en présence de bruit blanc, (a) variation des amplitudes de signal des bobines de détection avec l'angle de rotation, (b) sortie de l'angle mesuré φ en fonction de l'angle mécanique.	111
Figure B.1	Bobine spirale	130
Figure B.2	Composants parasites capacitifs	132

Liste des acronymes et symboles

ADC	Convertisseur analogique-numérique
AFE	Contrôleur frontal analogique
ASIL	Niveau d'intégrité de sécurité automobile
AGC	Contrôle automatique du gain
CCATM	Conseil canadien des administrateurs en transport motorisé
CMOS	Métal – oxyde – puce semi-conductrice
CS	Suspensions sans contact
CMS	Micro-capteur sans contact
CORDIC	Coordinate to Rotation Digital Computer
CV	Sens des aiguilles d'une montre
CCW	Sens contraire des aiguilles d'une montre
DFH	Défaillances dangereuses acceptables par heure
ECU	Unité de commande électronique
EMF	Electro motive force
EPS	Direction assistée électrique
EMR	Résonance électromagnétique automobile
EOS	Effets électriques de surtension

ESD	Décharge électrostatique
EOTTI	Intervalle de temps de tolérance d'opération d'urgence
FTTI	Temps et de tolérance d'opération d'urgence
FIT	Échecs dans le temps
FEM	Modèle d'éléments finis
FDI	Détection et isolation des défauts
HE	Effet de Hall
ISO	Organisation internationale de normalisation
LED	Diode électroluminescente
LPF	Low-Pass Filters
LC	Circuit résonant
MEMS	Technologie des micro-systèmes électromécaniques
MTTF	Temps moyen avant défaillance
MMT	Technologies des aimants mobiles
MPS	Micro Positioning System
NP0	Négatif-positif-zéro
OBD	Diagnostic embarqué
PM	Preuve d'une masse
PMC	Polymer Magnetic Composite

PCB	Circuit imprimé
PSD	Détection sensible à la phase
PMSM	Systèmes d'entraînement à machine synchrone
RCS	Calcul de fiabilité du schéma
SIL	Niveau d'intégrité de sécurité
SEMATECH	Semiconductor Manufacturing Technology
SRF	Fréquence d'auto-résonance
SAE	Society of Automotive Engineers
TSMC	Taiwan Semiconductor Manufacturing
Teotti	Temps de fonctionnement en mode de secours
VNA	Analyseur de réseau vectoriel
V	Tension
ZRO	Sortie à taux zéro
μm	Micromètre
COG	C-zéro-G
mT	Millitesla
μN	Micronewtons
°	Degré

Chapitre 1 - Introduction générale

1.1 Contexte

Selon le secteur automobile, la voiture électrique est un produit de la mécatronique et non simplement une combinaison de mécanismes. La technologie de contrôle électronique dans les véhicules a déjà été largement appliquée dans divers éléments de la voiture y compris le groupe motopropulseur, le châssis, la carrosserie et le contrôle environnemental entre autres. La technologie de contrôle électronique a également émergé comme une technologie clé pour assurer la performance et la sécurité du véhicule. Par exemple, la méthode de contrôle du moteur a été changée, passant d'une méthode mécanique à une méthode électronique.

La Société des ingénieurs de l'automobile (*Society of Automotive Engineers* – SAE) a publié une mise à jour en 2018 pour sa norme « Niveaux d'automatisation de la conduite SAE J3016™ » pour les véhicules à conduite autonome [1]. Cette classification fournit d'ailleurs une taxonomie commune et des définitions pour les véhicules sans conducteur. Au Canada, le Conseil canadien des administrateurs en transport motorisé (CCATM) a pris en considération les problèmes et préoccupations concernant les véhicules automatiques [2]. De nos jours, la plupart des nouveaux véhicules en circulation fonctionnent aux niveaux 0 et 1. Le niveau 2 est en développement et ces véhicules sont partiellement automatisés. Pour les

années 2025-2030, de nombreux véhicules seront exploités au niveau du fonctionnement automatisé 3-5 [3]. Les nouveaux systèmes ont besoin de capteurs plus efficaces avec un substrat de précision et de fiabilité.

Les systèmes électroniques des automobiles, comme les systèmes de freinage ou de direction, ont besoin d'un niveau de sécurité élevé (niveau de sécurité *-Automotive Safety Integrity Level-ASIL-D*). Ainsi, le système de direction assistée électrique (*Electronic Power Steering – EPS*) est un système essentiel à la sécurité, car il affecte la stabilité et la dynamique du véhicule. Afin d'assurer la sécurité, les normes ISO 26262 sont adaptées et dérivées de la norme IEC 61508. Cette dernière régit le développement du produit au niveau du système et gère la sécurité fonctionnelle des composants électriques et électroniques.

Ainsi, la modélisation et le contrôle des véhicules avec des systèmes de mesures précis, ont constitué un champ de recherche majeur ces dernières années, en raison de l'amélioration croissante des technologies d'assistance et du besoin persistant de garantir la sécurité et le confort du conducteur et des passagers. La variété des applications dans les industries automobiles est impressionnante et augmente sans cesse. Les capteurs de position inductifs sont parmi les capteurs les plus utilisés dans les applications automobiles pour mesurer la position mécanique à grande vitesse. En ingénierie automobile, par exemple pour le cas des capteurs d'angle ou de direction, l'utilisation des capteurs de type Hall ou magnéto-résistifs est indispensable. Toutefois, le contrôle du véhicule nécessite des systèmes de mesures pour effectuer un calcul précis. Or, étant donné l'indisponibilité et le coût non négligeable des

capteurs, leur sécurité reste encore à prouver en ce qui concerne certaines fonctionnalités dynamiques.

Dans le cadre de ces recherches, un capteur fiable et précis pour les systèmes automobiles du futur est proposé. L'utilisation de microcapteurs fiables pourrait contribuer, dans un futur proche, à la problématique technologique actuelle liée à la conduite autonome. Les capteurs inductifs s'avèrent être un des choix préférés pour mesurer la position d'un mouvement mécanique.

1.2 Motivation de recherche

Les détecteurs inductifs sont parmi les capteurs les plus utilisés dans le secteur automobile. Cependant, la grande taille du capteur due au processus actuel de fabrication, limite son utilisation dans différentes applications [4]. Dans cette thèse, on développe la prochaine génération de capteurs micro-inductifs fiables basés sur la technologie de micro-fabrication pour résoudre le problème de taille et augmenter l'efficacité. La technologie actuelle des circuits imprimés (*Printed Circuit Board* – PCB) est, grâce à son faible coût, la méthode de fabrication la plus utilisée pour les capteurs inductifs. Toutefois, le retard technologique en ce qui concerne la réduction de la taille des capteurs fait en sorte que celle-ci ne permette pas de répondre aux besoins techniques des applications actuelles. Le capteur micro-inductif constitue la solution parfaite à ce problème. Ainsi, il est nécessaire de construire ce nouveau type de capteur basé sur la technologie de micro-usinage.

Les microsystemes (*Micro Electro Mechanical System* - MEMS), nées il y a une vingtaine d'années, sont des microcapteurs et microactuateurs. Ils sont micro-usinés et intégrables avec leur électronique. Ils utilisent pour leur fabrication, une technologie d'usinage du silicium employant des procédés généralement collectifs dans l'industrie de la microélectronique. Cependant, il n'y a pas eu de relation entre la microdéformation et les signaux électromagnétiques obtenus; également, l'électronique de mesure existante n'est pas applicable à la détection de microdéplacement avec la variation d'inductance mutuelle dans la gamme des nanohenries [5].

Actuellement, la cible dans les recherches et les développements dans l'industrie automobile réside dans l'augmentation de l'aspect sécurité. La technologie microélectronique devrait jouer un rôle extrêmement important dans ces futures recherches, en particulier pour atteindre des niveaux de sécurité plus élevés. L'intégration de la technologie microélectronique dans divers appareils est essentielle pour que le système puisse conserver un haut niveau de productivité de masse. Cette technologie contribue à l'amélioration des performances, de la fiabilité et des capteurs à moindre coût qui soutiennent les fonctions automobiles de base, notamment la conduite et l'arrêt. Les technologies microélectroniques sont mises en œuvre pour augmenter le niveau de précision et de sécurité automobile.

1.3 Problématique et cadre général de la recherche

La robustesse, la fiabilité et le coût des capteurs de position représentent un problème à une plus grande utilisation dans des systèmes d'applications modernes complexes dans l'industrie automobile. À cet effet, l'industrie s'est tournée vers des procédés de micro-usinage, qui ont été largement utilisés pour produire des microcapteurs tactiles [6,7] et des capteurs de position angulaire basés sur un réseau d'inductances planaires [8,9]. L'efficacité de divers microcapteurs qui utilisent des approches de détection complémentaires métal-oxyde-semiconducteur (*complementary metal – oxide – semiconductor* - CMOS) [10] et capacitives [11] a été démontrée avec succès. Par exemple, les couches minces pour les systèmes microélectromécaniques piézoélectriques (MEMS) sont des microgénérateurs compacts et rentables qui absorbent les vibrations environnementales [12,13]. Cependant, des procédés de micro-usinage spéciaux et complexes sont nécessaires pour fabriquer ces capteurs. En outre, la réduction de la taille des capteurs électromécaniques diminue considérablement leur sensibilité et limite par conséquent leurs performances [14]. L'uniformité du processus et les dommages causés aux structures fragiles en couches minces deviennent également un problème lors de la fabrication et de l'exploitation.

Récemment, l'accent a été mis sur l'intégration et la fabrication de micro-conducteur [15,16]. Ce capteur a l'avantage de produire un minimum d'erreurs, mais présente une relation entrée/sortie non linéaire. Les méthodes de mesure et d'étalonnage utilisées dans certaines études [18-21] sont très compliquées et très difficiles à appliquer à la détection de déplacements à l'échelle micrométrique. L'une de ces études récentes a utilisé une méthode

d'étalonnage de la position angulaire avec deux capteurs de position absolue, donnant une erreur angulaire de 4° [20]. Ces études montrent également que la précision de la mesure diminue dans la même proportion que les dimensions physiques du capteur diminuent elles aussi. Il est donc impensable que de telles approches soient viables pour de nouvelles réductions d'échelle.

L'industrie automobile en particulier se concentre de plus en plus sur les systèmes autonomes. Cela exige des niveaux toujours plus élevés de sécurité / d'intégrité. L'état actuel de la technique des capteurs souffre de limitations de miniaturisation, de coût et de robustesse limitant la possibilité de redondance et donc de sécurité / d'intégrité. Cette étude vise à résoudre les problèmes suivants :

- ✓ La grande taille et le coût élevé des capteurs de position dans l'industrie automobile.
- ✓ Le besoin actuel de procédés de micro-usinage spéciaux et complexes dans l'industrie automobile.
- ✓ La fragilité de la génération actuelle de capteurs.
- ✓ La réduction de la sensibilité et de la performance des capteurs électromécaniques.

1.4 Objectifs

L'objectif de ce travail est de créer les éléments d'un capteur angulaire sans contact, sous forme micro. Dans cette thèse, une nouvelle génération de capteurs micro-inductifs qui résolvent le problème de la taille et améliorent la rentabilité et la facilité de fabrication, est proposé. Plus précisément, un nouveau capteur de position inductif basé sur des bobines planes et spiralées, est présenté. Le capteur est conçu de manière à améliorer la relation entre les bobines planes et la cible fournissant un déplacement angulaire *via* une relation mathématique non complexe. En raison de cette caractéristique, les positions sont facilement obtenues à partir du signal mesuré, ce qui n'est pas le cas de la plupart des capteurs à bobines planes qui nécessitent des transformations mathématiques complexes et consomment des ressources considérables de calcul en temps réel. Une méthode simple de détection du champ magnétique induit et des courants de Foucault pour distinguer la position de la cible est donc proposée. En revanche, avec d'autres analyses de capteurs inductifs microélectroniques sans contact [22-25], aucune diminution significative des capacités de détection angulaire n'est prévue et ce, malgré la réduction significative de la taille physique. La réduction de la taille et du coût augmente les possibilités d'architectures redondantes, améliorant ainsi la sécurité.

1.5 Originalité du sujet et contributions

Dans cette étude, un capteur inductif de position angulaire comprenant des inducteurs en spirale d'or à couche mince sur des puces céramiques est proposé comme alternative à l'état actuel de la technique qui souffre de limitations en termes de possibilités de microminiaturisation, de précision et de robustesse. Un capteur basé sur des bobines spiralées normales employées dans les éléments résonants des circuits à micro-ondes et comme bobines de choc dans les sources d'énergie, sera conçu et fabriqué. Les mécanismes de détection du capteur inductif proposé utilisent différentes variations de captage du signal en fonction de la géométrie. La variation de la géométrie des bobines de l'émetteur et du récepteur, la fréquence de fonctionnement et l'entrefer entre les bobines de l'émetteur et du capteur, sont autant d'éléments qui influencent les performances du capteur. Cette approche présente l'avantage de fournir une détection angulaire tout en étant nettement plus facile et plus économique à fabriquer par rapport aux capteurs actuellement disponibles sur le marché. Le capteur est conçu de telle manière que l'inductance par rapport au déplacement angulaire possède une relation mathématique (arc tangente). Grâce à cette caractéristique, la position angulaire est obtenue facilement à partir du signal du capteur sans avoir besoin de calculs mathématiques complexes, ce qui n'est pas le cas pour la plupart des capteurs à bobine plane.

Les normes de sécurité internationales actuelles exigent l'utilisation d'architectures redondantes pour atteindre le niveau de sécurité requis. En réduisant la taille et le coût des capteurs, on augmente les possibilités d'architectures redondantes, améliorant ainsi la sécurité. En réduisant la complexité du capteur, on augmente la fiabilité du capteur.

Il devrait être possible de fabriquer des éléments de détection électriquement indépendants sur plusieurs couches, occupant effectivement le même espace physique, afin de fournir des capteurs redondants dans les applications critiques pour la sécurité.

Les principales contributions de cette thèse sont la modélisation et l'expérimentation d'un nouveau capteur de position inductif. Ces contributions peuvent être énumérées comme suit :

- identification et caractérisation des capteurs et microtechniques existants;
- Amélioration de la fiabilité et modélisation du comportement de défaillance avec redondance pour augmenter l'intégrité;
 - Les normes de sécurité internationales actuelles exigent l'utilisation d'architectures redondantes pour atteindre le niveau de sécurité requis. En réduisant la taille et le coût des capteurs, on augmente les possibilités d'architectures redondantes, améliorant ainsi la sécurité.
 - En réduisant la complexité du capteur, on augmente la fiabilité du capteur.
- optimisation de l'architecture de mesure de position pour augmenter les performances;
 - Caractérisation du champ magnétique et des signaux induits par rapport au déplacement angulaire;

- Une réduction significative de la taille de la bobine de détection entraîne une diminution significative de la sensibilité. L'ajout d'une bobine d'excitation compense la sensibilité réduite;
- optimisation de l'architecture physique pour réduire les coûts de fabrication - proposition basée sur des bobines en spirale avec une technologie micro-électronique ;
 - Architecture de capteur axée sur la réutilisation d'éléments électroniques micro-miniatures discrets disponibles dans le commerce;
 - L'intégration d'éléments discrets sur un substrat porteur permet une fabrication beaucoup plus simple et moins coûteuse que les conceptions alternatives sur mesure à substrat unique.

1.6 Méthodologie retenue

Dans le cadre de ces travaux, une méthodologie systématique a été adoptée afin d'identifier les faiblesses de la génération actuelle de capteurs de position inductifs et en traitant ces faiblesses, de proposer une nouvelle évolution de ces capteurs.

La démarche méthodologique a été structurée comme suit :

- i) ***observation*** : questionnement critique sur l'analyse de précision, de sécurité et de fiabilité d'un capteur existant.

Deux approches sont possibles. Une seule sera sélectionnée pour mes travaux :

- partir de la conception du capteur et remonter aux aspects de fiabilité;
- partir des exigences de fiabilité pour aboutir à la conception du capteur (figure 1.1).

Les deux démarches sont correctes et valides. Il est proposé de commencer par définir l'aspect sécurité et fiabilité du capteur puis de développer un nouveau concept de capteur de position selon le niveau de sécurité requis. Selon le résultat de fiabilité, la composition électronique et électromécanique du capteur étudié, peut être modifiée, afin de concevoir un nouveau capteur plus fiable et mieux défini.

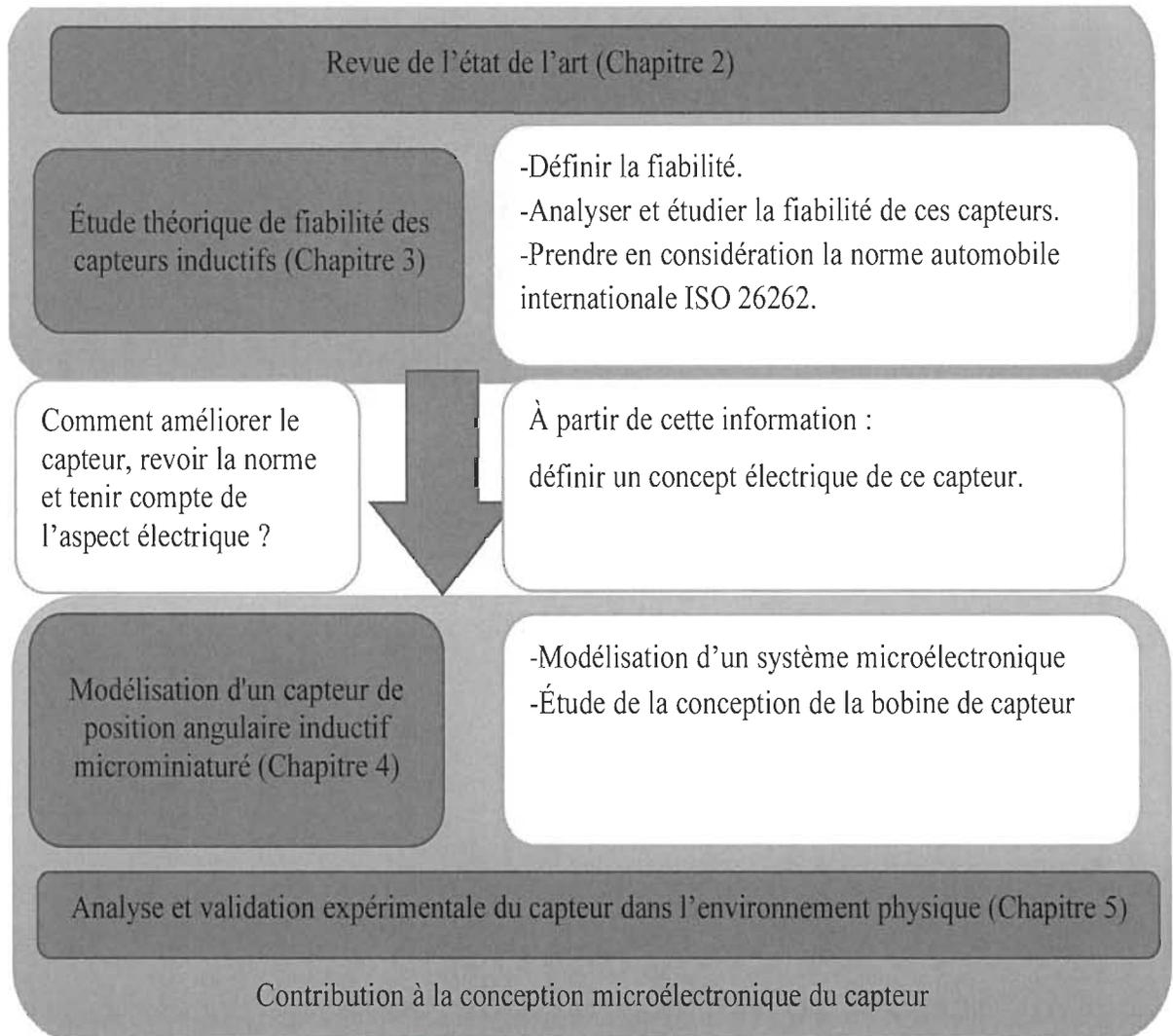


Figure 1.1 Démarche méthodologique

ii) ***Hypothèse*** : expression formelle d'une relation factuelle préconçue.

Proposition 1 : fiabilité des capteurs

La fiabilité des capteurs dans l'industrie automobile est avérée, mais ils ont besoin d'autres mécanismes de sécurité intégrés. La définition de la fiabilité est liée aux normes de sécurité internationales, aux limites environnementales et à la modularisation électronique

du capteur utilisé. Augmenter la fiabilité de ce capteur permet d'améliorer la précision de la position, ce qui aide également à améliorer la sécurité du domaine automobile.

Proposition 2 : changement des conceptions et des matériels électroniques

Un changement des conceptions et des matériels électroniques de mesure de position augmentera la performance de ces capteurs. La réduction de la taille des capteurs inductifs de position angulaire diminue considérablement leur sensibilité et limite par conséquent, leurs performances. Aucune diminution significative des capacités de détection angulaire n'est prévue malgré la réduction significative de la taille physique.

*iii) **Expérimentation** :* test systématique et vérification de l'hypothèse.

Une étude expérimentale est introduite. La caractérisation et la quantification des performances du capteur fabriqué, sont réalisées.

*iv) **Induction** :* généralisation des résultats expérimentaux à une déclaration formelle sur la théorie.

La validation scientifique est approuvée par la théorie, des simulations et une étude expérimentale. La justification scientifique sera validée par des comparaisons avec d'autres résultats et la bibliographie.

1.7 Structure de la thèse

Au chapitre 2, un aperçu de l'état actuel de la technique est exploré en ce qui concerne les capteurs de position inductifs miniaturisés à faible coût. Au chapitre 3, les principes de fonctionnement des capteurs inductifs sont abordés, car ils s'appliquent à une structure de fiabilité réalisable pour le capteur expérimental proposé. Divers modes de fonctionnement et structures alternatives sont ensuite modélisés et des prédictions théoriques de performance sont établies afin de sélectionner un candidat final pour la réalisation physique et les tests pratiques. Le chapitre 4 est consacré à la modélisation du capteur de position angulaire inductif microminiaturisé. Dans la définition, "microminiaturisé" est employé pour désigner une dimension inférieure à quelques millimètres. Le chapitre 5 quant à lui, est consacré à la caractérisation et à la quantification des performances du capteur fabriqué ainsi que la comparaison des performances expérimentales observées par rapport à celles des capteurs actuels alternatifs. Enfin, une conclusion générale et les perspectives du présent travail de recherche clôtureront cette thèse.

Chapitre 2 - Revue de l'état de l'art

2.1 Introduction

Afin d'effectuer la revue de l'état de l'art, on fera la revue de littérature des capteurs de mesure de position pour les cinq dernières années. Les bases de données Scopus et IEEE Xplore, le moteur de recherche Google Scholar et les informations de notre partenaire industriel ZF Group ont été utilisés pour réaliser la recension des écrits. De cette recension, seuls les articles scientifiques revus par les pairs, les rapports de recherche, les thèses, les normes et les lois sont inclus. Les articles professionnels et les articles datant de plus de dix ans ont été exclus, mis à part quelques articles très pertinents.

2.2 Recherche bibliographique par mots-clés

Après les recensions des écrits, une recherche bibliographique par mots est obtenue. Les termes clés « *inductive* », « *safety* », « *position* », « *reliability* », « *sensor* » et « *vehicle* » sont identifiés et organisés dans une structure logique, c'est-à-dire qu'ils sont regroupés et présentés sous forme d'organigramme. Ainsi, le modèle théorique a été basé sur la revue de littérature scientifique et a servi de point de départ pour la conception.

Seuls les résultats liés à cette thèse seront pris en considération. Le titre de la thèse de doctorat étant « Contribution à la conception des capteurs inductifs de mesure de position

sans contact : applications au domaine de l'automobile », on utilise dans la première étape, le mot-clé lié à cette formulation. Le tableau 2-1 montre le nombre d'articles de journaux recensés selon les mots-clés.

Tableau 2-1 Éléments bibliographiques correspondants dans les journaux

Mot-clé	Résultat	Article pertinent
<i>Inductive, sensor, contactless, measurement, safety et automotive</i>	Aucun résultat	Aucun résultat
<i>Inductive, sensor, contactless, measurement et safety</i>	Aucun	Aucun
<i>Inductive, sensor, contactless et measurement</i>	Huit articles	Ces articles [6, 7, 9, 26] présentent un système de mesure de position inductive précis
<i>Inductive, sensor, contactless et automotive</i>	Aucun	Aucun
<i>Inductive, sensor et contactless</i>	Quatorze articles	Références [8, 10, 11, 26, 27]
<i>Inductive, sensor, contactless et position</i>	Quatre articles	Dans les articles [19, 20, 27], des capteurs angulaires inductifs sont présentés
<i>Inductive, sensor, contactless et vehicle</i>	Quatre articles	Dans l'article [18], le frontal analogique (AFE) est présenté

Tableau 2-1 (suite)

Mot-clé	Résultat	Article pertinent
<i>Inductive position sensor</i>	Deux articles	L'article [28] présente une nouvelle simulation méthode
<i>Inductive position sensor, absolute, contactless et reliable</i>	Aucun	Aucun
<i>contactless position inductive sensors</i>	Quatre articles	Références [26] [27] et [29]

D'après les résultats obtenus dans la recherche bibliographique, il est observé que les articles envisagent soit la fiabilité soit le capteur. En raison du nombre limité d'articles scientifiques évalués par les pairs sur les capteurs de mesure de position automobile, une revue de littérature de autres capteurs inductifs dans les différents domaines, sera effectuée.

Dans cette étape, les mots-clés sont utilisés de façon séparée et structurée pour disposer de plus de résultats bibliographiques pertinents pour ce travail tout en tenant compte de la limitation de recherche (tableau 2-2).

Tableau 2-2 Résultats bibliographiques Selon IEEE Xplore sur les capteurs inductifs

Mots-clés utilisés	Nombre d'articles
<i>Inductive sensors</i>	83
<i>Inductive position sensors</i>	45
<i>Inductive position sensor et contactless</i>	2
<i>Inductive position sensor et measurement</i>	31
<i>Inductive position sensors et position error</i>	9
<i>Micro position sensor et vehicle</i>	12

Selon IEEE Xplore, il y a 45 articles et journaux entre l'année 2016 et le début de l'année 2020. À cette étape, une classification des articles consultés selon leur appartenance bibliographique (figure 2.1) est donc réalisée. Ces articles seront étudiés dans les prochaines sections.

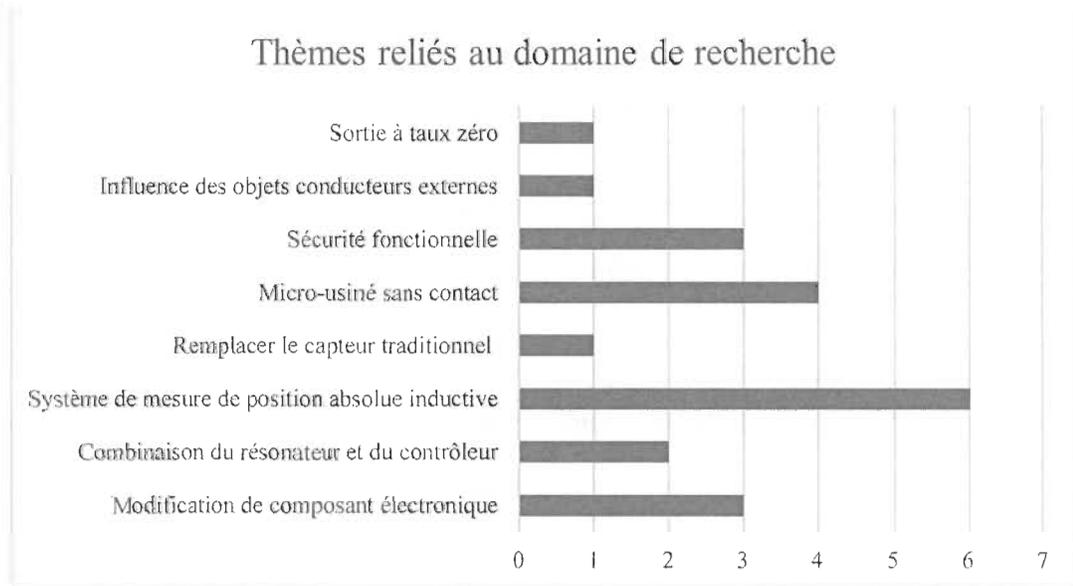


Figure 2.1 Articles pertinents liés à l'étude effectuée

On trouve dans la littérature, des thèses de doctorat qui portent sur les capteurs de position pour le domaine de l'automobile. L'une de ces thèses se concentre sur le diagnostic de capteur dans un véhicule à moteur thermique dans le but d'exploiter la mesure du champ magnétique [85]. Une autre thèse a étudié un moyen de réaliser une détection linéaire de position [86]. Ces capteurs ont été modélisés par des réluctances. Les effets fréquentiels des capteurs ont été étudiés afin de prédire l'évolution des paramètres (inductance et résistance) en série. Une autre thèse a quant à elle, présenté la conception et la réalisation d'un capteur de courant basé sur le principe de la Magnéto-Impédance Géante (MIG) [87]. Les

performances du capteur ont été étudiées pour des courants continus et alternatifs, en boucle ouverte et en boucle fermée. Un dernier travail a porté sur la mesure de courant à partir de mesures de champ magnétique sans canalisation de flux avec un seul microcapteur magnétique différentiel linéaire au-dessus des sections d'un conducteur en forme de U [88]. Cette structure a comme objectif d'améliorer la précision et d'assurer un bon rejet des perturbations magnétiques extérieures. Cependant, ces articles ne prennent pas en compte les aspects de taille, la facilité de fabrication et la diminution significative de détection angulaire malgré la réduction significative de la taille physique avec une relation mathématique non complexe, comme présenté dans cette thèse.

2.3 Dernières innovations

Dans cette section, les dernières innovations concernant les capteurs inductifs et le microsystème sont présentées. Ces articles sont choisis à la suite d'une recherche bibliographique.

2.3.1 Capteurs inductifs triaxiaux

Un capteur inductif fabriqué à l'aide du processus standard (*Taiwan Semiconductor Manufacturing*– TSMC) a récemment été étudié [6]. Il s'agit de mettre en œuvre un capteur tactile microtriaxial du type inductif en intégrant un complément métal – oxyde – puce semi-conductrice CMOS avec bobines de détection et une feuille d'acier inoxydable en utilisant l'encapsulation du polymère. Les sorties d'inductance sont restituées en utilisant le circuit

de conversion inductif en numérique (LDC1614, Texas Instruments, États-Unis). La charge tactile normale N_z réduira l'écart entre la puce CMOS et la tôle d'acier inoxydable afin d'augmenter l'inductance du signal. Aucun composant mécanique à film mince suspendu fragile n'est requis.

Une autre étude a utilisé un capteur tactile triaxial avec une bobine à quatre plans et un film conducteur réalisé avec un matériau hyper élastique [7]. Un capteur tactile doux à trois axes a été expérimenté. Une feuille d'aluminium de 0,2 mm (ProtoLaserU3, LPK F laser and Electronics AG, Allemagne) est utilisée en tant que cible de détection. Un capteur de force commercial (Nano17-E, automatisation industrielle ATI, États-Unis) monté sur la platine manuelle, enregistre la force normale et la force de cisaillement. L'inductance qui bascule d'une bobine à l'autre est mesurée *via* un multiplexeur intégré à un convertisseur inductif en numérique (LDC1614, Texas Instruments, États-Unis). Les données numériques sont envoyées à un contrôleur (NI MyRIO 1900, National Instruments, États-Unis) *via* le protocole I2C. La configuration expérimentale (même plateforme utilisée pour le capteur MagOne [83]) est utilisée pour calibrer le capteur. Une technique d'ajustement d'erreur des moindres carrés a été utilisée pour calculer les coefficients d'une équation polynomiale, décrivant la corrélation entre la valeur d'inductance mesurée (résolution 0,3 mN) et la force appliquée.

Une étude a utilisé un capteur de déplacement sans contact avec deux bobines plates gravées sur un circuit imprimé avec un noyau ferromagnétique [8]. Le noyau est déplacé par paliers de 5 mm et l'inductance mesurée à l'aide du convertisseur d'inductance numérique (LDC1000IC, Texas Instruments, USA). Ce capteur possède des erreurs négligeables dues à un désalignement du noyau (dans l'axe vertical de celui du déplacement), mais possède une relation entrée/sortie non linéaire. L'absence de toute connexion électrique à la partie mobile du capteur le rend plus fiable et améliore sa durée de vie. La structure symétrique du capteur le rend robuste.

2.3.2 *Contrôleur frontal analogique*

Afin d'améliorer la précision de la détection de position, un pilote de bobine avec un étalonnage automatique a été introduit, c'est-à-dire qu'un convertisseur analogique-numérique (ADC) est proposé pour convertir les signaux à huit phases tout en réduisant la consommation. Le contrôleur frontal analogique (AFE) pour un capteur de position inductif électromagnétique est établi dans les applications de contrôle de la vitesse de résonance [18] (figure 2.2). L'AFE utilise la position inductive sans contact de deux dimensions dans la résonance électromagnétique automobile (EMR) pour contrôle de vitesse. Il est composé d'un pilote de bobine avec un calibrage d'impédance automatique. Le pilote avec étalonnage d'impédance automatique génère la capacité de conduite, même si la charge a été modifiée.

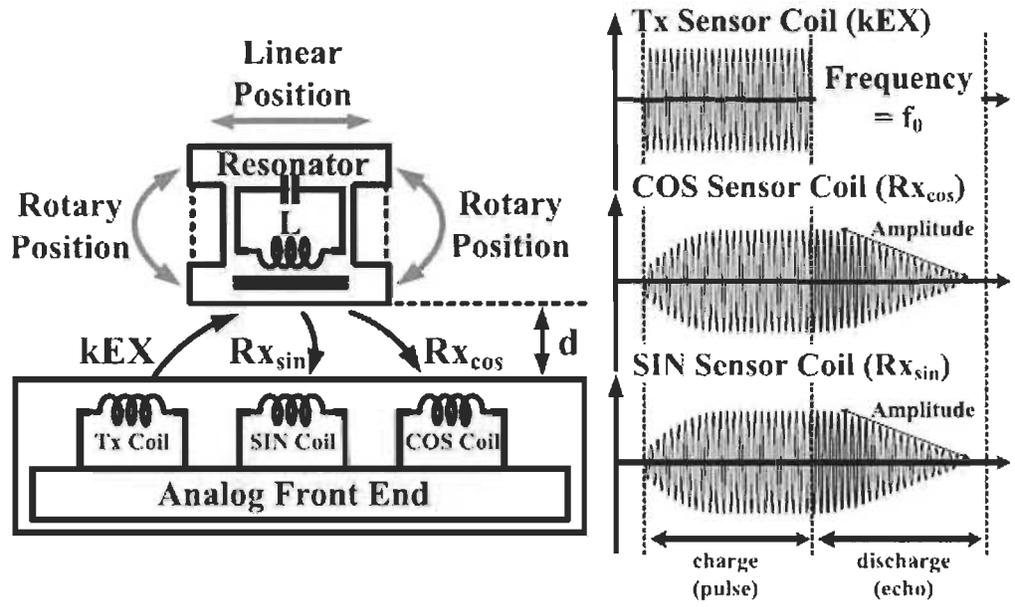


Figure 2.2 Implémentation d'un contrôleur frontal analogique (AFE) d'un capteur de position inductif [18]

2.3.3 Phénomène de lévitation

La lévitation dans les microdispositifs est réalisée au moyen de micro-usinage de suspensions sans contact (CS). La CS est constituée d'un champ de force source et d'une preuve de masse (PM). Elle peut être classée comme électrostatique, magnétique et hybride. La pertinence de l'application de CS électrostatique dans les capteurs micro-inertiels a déjà été prouvée [30]. La lévitation passive fournie par la CS magnétique offre des opportunités supplémentaires pour améliorer la suspension et l'augmentation des capacités opérationnelles au moyen de CS hybride [27]. La CS magnétique est très attractive et prometteuse pour la technologie de suspensions sans contact. La lévitation magnétique, utilisant des champs magnétiques statiques, nécessite soit une masse de preuve diamagnétique, soit un supraconducteur.

Une photographie du prototype avec noyau (*Polymer Magnetic Composite – PMC*) intégré démontre la lévitation réussie d'une masse de preuve avec un diamètre de 3,2 mm et une épaisseur de 13 μm (figure 2.3).

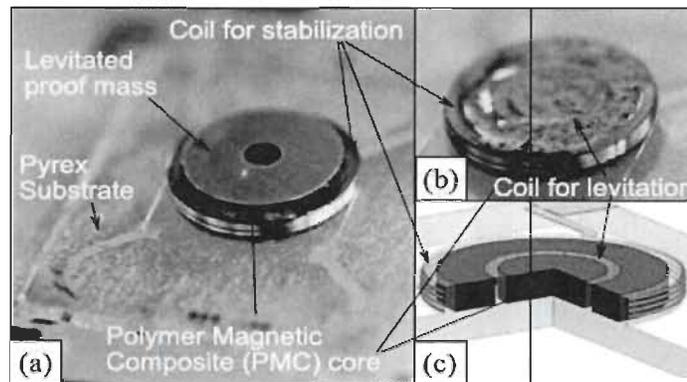


Figure 2.3 Suspension inductive micro-usinée avec noyau PMC : (a) lévitation de la masse de preuve ; (b) bobines avec noyau ; (c) schématique transversale des bobines avec noyau PMC [27]

L'article présente un composite magnétique polymère nouvellement développé pour une utilisation comme résistivité élevée avec noyau afin d'améliorer de manière significative la consommation d'énergie des suspensions inductives micro-usinées tridimensionnelles [31]. Par rapport à une structure de suspension inductive similaire sans noyau, le courant électrique nécessaire pour obtenir une hauteur de lévitation de 110 μm est de 65 mA contre 120 mA.

Le prototype développé de suspension hybride sans contact est en mesure de fournir le positionnement vertical linéaire dans la plage de 30 à 200 μm avec le positionnement angulaire de sa surface équatoriale (varie de ± 1 à ± 4 degrés) [27] (figure

2.4). Le positionnement angulaire par rapport à l'axe vertical dans une gamme de 37 degrés a été démontré par oscillation des particules à une fréquence de 1,5 Hz et une hauteur de lévitation de 90 μm . De plus, cette suspension offre également la possibilité d'ajuster les composants de rigidité. Par exemple, à une hauteur de lévitation de 100 μm , l'augmentation de la composante angulaire de la rigidité par un facteur de deux, est démontrée. La suspension peut fonctionner dans un mode bistable dans cinq directions.

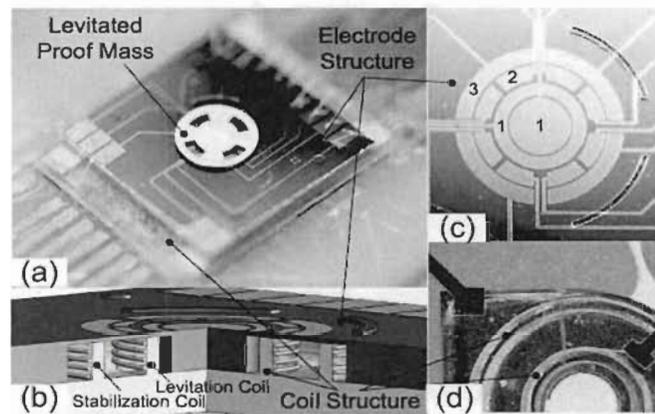


Figure 2.4 Suspension hybride : (a) prototype de la suspension collée à un circuit imprimé ; (b) schéma de la conception de la suspension ;(c) conception des électrodes : 1-suspension, 2-rotation et 3-inclinaison des électrodes ; (d) vue de l'alignement des structures d'électrodes et de bobines à l'arrière (verre pyrex) de l'appareil [27].

2.3.4 *Systèmes microélectromécaniques gyroscopes*

Les systèmes MEMS gyroscopes sont largement utilisés dans les applications automobiles (par exemple, pour le contrôle de stabilité et les systèmes de navigation automobiles) et autres (par exemple, les téléphones intelligents, les jeux et le système de stabilisation d'image). Les MEMS gyroscopes ont un très faible encombrement, ce qui

contribue à réduire les coûts de fabrication et à les rendre utilisables pour beaucoup d'applications.

De nombreux MEMS gyroscopes détectent la rotation *via* le principe de Coriolis. Un mode de détection vibratoire est typiquement utilisé. Un certain nombre de systèmes de mise en œuvre existent, tels que la vibration, les poutres, les plaques, les anneaux et les diapasons. Le plus souvent, un système de gyroscope vibratoire avec deux degrés couplés de liberté est utilisé comme abstraction minimale. La réduction de la taille de la puce entraîne entre autres, une réduction de coût, ce qui constitue l'un des objectifs de développement. Cependant, avec une taille de puce rétrécie, les effets non idéaux gagnent en importance. L'un d'entre eux est la sortie dite à taux zéro (ZRO), qui est un signal de rotation se produisant même en l'absence de rotation angulaire. Il est clairement indésirable dans la plupart des applications et devrait être évité par la conception. Un effet non idéal similaire est un signal de quadrature mécanique, qui se produit également en l'absence d'un taux angulaire mais avec un déphasage de 90° comparé au signal de taux. Avec une démodulation synchrone, le débit et le signal en quadrature peuvent être séparés [26].

Les causes profondes de la sortie à ZRO dans le système MEMS vibratoire gyroscope constitue des défis majeurs pour la haute performance des gyroscopes. La connaissance de ces causes est importante pour minimiser la ZRO et réaliser une conception de capteur robuste. Une nouvelle méthode pour décrire un gyroscope MEMS avec un modèle d'espace d'état paramétrique est introduite [32]. Le modèle est utilisé pour décrire théoriquement les influences comportementales. Une nouvelle approximation gyroscopique détaillée et

générale est utilisée pour varier et influencer les paramètres ainsi que vérifier la méthode avec des simulations. Généralement, il est possible de ne pas utiliser d'approximation mais un modèle d'éléments finis (FEM) ou un d'ordre réduit. Cependant, l'approximation choisie comporte plusieurs avantages. Non seulement le temps de calcul est réduit, mais on peut aussi bénéficier d'une évaluation générale de différents capteurs avec une structure commune. Cela signifie que l'approximation peut être utilisée pour identifier les paramètres critiques relatifs à ZRO. On peut s'en servir par exemple pour les décisions entre les différents modèles de gyroscopes de même concept.

2.3.5 Mesures correctives

La sécurité fonctionnelle s'avère d'une grande importance pour les véhicules en raison de la complexité croissante et du large emploi des composants électriques et électroniques. Une façon d'améliorer la sécurité fonctionnelle est de développer des systèmes fiables et robustes de diagnostic embarqué (*On-board diagnostics* – OBD).

Pour détecter des défauts spécifiques, il est nécessaire de sélectionner un test de diagnostic. Un diagnostic systématique basé sur un modèle d'analyse structurelle a ainsi été introduit. L'approche d'analyse structurelle pour la détection et l'isolation des défauts (*Fault detection and isolation* – FDI) évalue le modèle structurel d'un système en utilisant le modèle mathématique du système sous forme de matrice à partir de laquelle il est possible de déterminer la redondance analytique et de concevoir les structures résiduelles [33]. Ce

dernier est défini comme un ensemble d'équations extrait du modèle de système, dans lequel une ou plusieurs consistances des relations peuvent être considérées pour chaque faute.

Le diagnostic des défauts du capteur pour les véhicules électriques avec des systèmes d'entraînement à machine synchrone (*Permanent magnet synchronous motor* – PMSM) a été introduit [34]. Ce nouveau concept est généralement intégré avec différents types de capteurs y compris les capteurs de courant et les capteurs de tension. L'inconvénient de cette approche est la concentration de diagnostics de défauts sur les mouvements électriques sans que l'aspect mécanique ne soit pris en considération.

2.4 Capteurs de position industriels

2.4.1 Capteur de ZF Group

Au cours de stage chez la société internationale ZF Group, une recherche a été réalisée sur les solutions de capteurs de position. En tant que leader de la technologie de sécurité active et passive, ZF Group développe des solutions innovantes adaptées aux défis de la recherche. En raison de la confidentialité des informations industrielles, les informations disponibles sur Internet ont été prises en considération, mais seulement celles en provenance des sites de l'entreprise ZF Group. Seules les solutions comparables à cette recherche seront donc prises en considération.

La nouvelle génération de capteurs de position linéaires et angulaires de ZF Group poursuit de nouvelles voies en matière d'efficacité. La solution est basée sur un système modulaire et de protection selon IP68 pour les environnements difficiles. Basé sur un système modulaire, le capteur est disponible avec une ou deux sorties indépendantes pour les mesures de position (figure 2.5).



Figure 2.5 Capteurs de position linéaire de ZF Group [35]

Les capteurs fonctionnent grâce à la technologie d'effet de Hall (*Hall Effect* – HE) avec des champs magnétiques générés par des aimants permanents. Les capteurs fournissent un changement linéaire de la sortie de tension (radiométrique à la tension d'entrée) correspondant à un déplacement linéaire. La série linéaire peut mesurer jusqu'à 45 mm, tandis que la série angulaire offre une plage de mesure programmable de 0° à 360°. En raison de la qualité des composants utilisés, les deux capteurs ont une précision globale de $\pm 2\%$ et une linéarité du signal de sortie avec $\pm 1\%$ de pleine échelle.

Il existe des solutions industrielles d'entités internationales comme Bosch pour un capteur d'angle de couple. Ce capteur de couple du système de servodirection électrique

(Servolectric®) mesure le couple appliqué par le conducteur au volant [36]. Sur la base de ces données, l'unité de commande électronique calcule l'assistance de direction que le moteur électrique doit appliquer. Ainsi, 0,015 Nm est la norme de précision avec laquelle l'unité de contrôle peut calculer l'angle de braquage sur la base des données du capteur de couple. Ce dernier renferme deux canaux qui mesurent l'angle d'entrée et deux canaux qui mesurent l'angle de sortie. Cela signifie qu'au total, quatre canaux sont disponibles. Ce capteur de couple est un dispositif de type sans contact avec décalage de couple nul ajustable et une pente de sortie programmable. Les signaux du capteur de couple sont disponibles à la mise sous tension et ne nécessitent aucune initialisation ni apprentissage. Le capteur de couple est un dispositif de technologie à aimant mobile (*Moving Magnet Technologies – MMT*), logé dans la boîte de vitesses, monté parallèlement à la barre de torsion qui relie les côtés entrée et sortie de la colonne supérieure (figure 2.6).

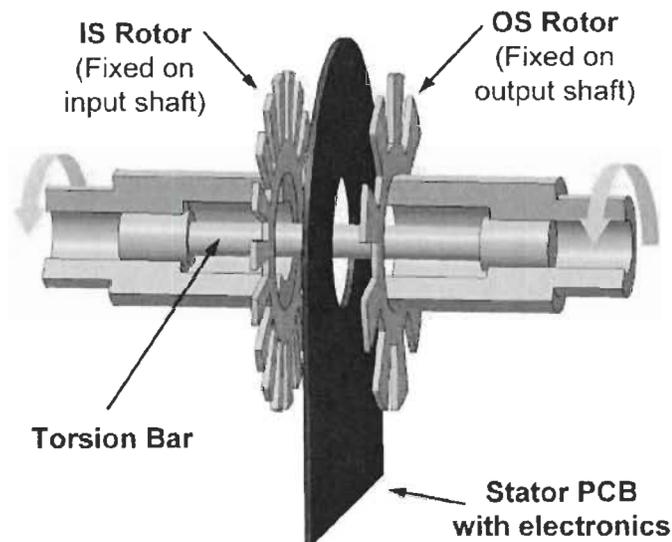


Figure 2.6 Capteur de couple inductif pour EPS [37]

La redondance permet de vérifier les signaux. Une telle vérification est également appelée synchronicité. Le capteur d'angle est fixé sur l'arbre de sortie et il se compose de deux systèmes de capteurs magnétiques ou inductifs.

2.4.2 *Capteur inductif de position ZMID520x*

Le capteur inductif de position ZMID520x est une solution industrielle conforme à la norme automobile ISO 26262 en ce qui concerne les sécurités fonctionnelles [38]. Dans cette recherche, le composant électrique ZMID5201STKIT offre l'opportunité d'une évaluation entièrement fonctionnelle du capteur de position. Ce kit regroupe les types linéaire, rotatif et arc (ZMID5201 [39]).

Un article scientifique [40] qui fait une comparaison avec le capteur inductif de position ZMID520x, a été trouvé dans la littérature. Cet article a démontré que le signal de position angulaire reste robuste pour 1 cm de dégagement par rapport à un fil transportant 400 A de courant, ce qui constitue une amélioration supplémentaire d'un ordre de grandeur par rapport aux capteurs à effet Hall traditionnels. Ce capteur utilise une technologie CMOS de 0,18 μm et atteint 0,7 de précision. Cela étend l'état de l'art pour les capteurs à base de Hall (tableau 2.3).

Tableau 2-3 Solutions compétitives en matière de compacité

Produit	Précision d'angle	Immunité des champs errants
Capteurs de Hall [40]	$< 0,7^\circ$	$> 5 \text{ mT}$ (le Millitesla est l'unité de la densité de flux magnétique)
ams AS5171 [41]	$< 0,9^\circ$	$> 5 \text{ mT}$
Capteurs inductifs ZMID520x [42]	$> 0,7^\circ$	Pratiquement infini

Il existe d'autres systèmes d'évaluation semblables au module ZMID5201SKIT. Le module LXM9518, développé par Microsemi [43] sera ici, pris en considération. L'interface de capteur de Microsemi constitue l'interface entre les applications de capteurs de position automobiles de haute fiabilité et de sécurité. Microsemi produit des capteurs de champ magnétique depuis 2010 et a lancé les modèles LX3301A et LX3302A pour répondre à des exigences en matière de positionnement haute performance. Les modèles LX3301A et LX3302A améliorent la précision des mesures angulaires, réduisent la sensibilité au bruit et réduisent les coûts du système [44]. Le LX3301A comprend un excitateur et un oscillateur intégrés conçus spécifiquement pour piloter des bobines de capteur à faible inductance à base de PCB. Le LX3301A comprend une paire de canaux analogiques adaptés qui traitent les signaux du capteur sous forme de paire sinus et cosinus. Cela se traduit par un rejet supérieur des sources de bruit internes et externes à l'ensemble du capteur. Le LX3301A est idéal pour les mesures linéaires, angulaires, en rotation, de proximité et de déplacement dans les systèmes électromécaniques. Dans les applications de rotation à 360 degrés, l'appareil atteint une résolution supérieure à 0,5 degré.

2.5 Principe de mesure inductive

L'objectif de la mesure inductive est de représenter une caractéristique physique ou mécanique dans un format électrique qui puisse être interprété par une machine. La détection peut être effectuée de diverses manières mathématiques en utilisant des principes de capteurs optiques, magnétiques, inductifs, capacitifs ou résistifs (tableau 2-4). Des principes inductifs, en particulier des types à inductance blindée (*screened inductance*), ont été introduits aussi pour les applications de direction [45].

Tableau 2-4 Principe de mesure de capteur automobile

Optique	Magnétique	Inductif	Capacitif	Résistif
<ul style="list-style-type: none"> - Réflexion de la lumière - Navette légère - Codage incrémental - Codage en quadrature - Codage absolu 	<ul style="list-style-type: none"> - Magnétorésistance <i>AMR (anisotropic magnetoresistance)</i> et GMR (<i>giant magnetoresistance</i>) - Effet Hall - Magnétostriction 	<ul style="list-style-type: none"> - Inductance blindée - Inductance variable - Obturateur de flux magnétique - Couplage inductif 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité variable 	<ul style="list-style-type: none"> - Potentiomètre - Potentiomètre sans contact

2.5.1 *Champs électriques et champs magnétiques*

Les champs électriques et les champs magnétiques sont différents, mais ils font en réalité partie d'une force plus grande appelée force électromagnétique. Les charges qui ne bougent pas produisent des champs électriques. Mais lorsque ces charges bougent, elles créent des champs magnétiques. Par exemple, un aimant n'est un aimant qu'à cause de ses charges mobiles à l'intérieur. Les charges se déplaçant dans un fil électrique produisent également des champs magnétiques. Si l'on déplace une boussole à proximité d'un fil électrique, l'on constate que son aiguille change de direction. Les mesures de principe des capteurs magnétiques et inductifs sont très proches. Les capteurs magnétiques mesurent la densité du flux magnétique ou l'orientation du champ magnétique. Les capteurs inductifs utilisent généralement les effets de la force électromotrice (*Electro motive force* – EMF). La méthode de mesure inductive est basée sur un signal appliqué à la bobine de réception et de transmission.

2.5.2 *Utilisation croissante de la détection de position d'angle*

La détection de position d'angle est la mesure du degré de rotation d'un objet autour d'un axe central. Dans certains cas, un système à pignon et crémaillère pourrait être utilisé comme moyen pour mesurer la position linéaire avec un capteur de position angulaire en convertissant le mouvement linéaire en un mouvement de rotation.

En outre, les capteurs de position angulaire à effet de Hall remplissent essentiellement la même fonction à l'aide d'un champ magnétique. D'autres appareils similaires, comme les encodeurs rotatifs, font principalement la même chose, la différence majeure étant l'utilisation de mesure de la lumière et de l'obscurité. Certes, ils détectent la position d'angle, mais ils le font en utilisant un émetteur de diode électroluminescente (*light-emitting diode*, LED), un disque fendu et un capteur photo. Le codeur est en mesure de convertir le mouvement de rotation en signaux électriques en faisant briller la lumière à travers chaque colonne de fentes sur le disque. Le capteur photo lit alors le niveau de zones claires ou sombres et traduit ensuite l'information en code informatique. La précision traditionnelle du codeur dépend largement de la résolution qui est déterminée par le nombre de colonnes et de rangées de fentes.

2.6 Mécanisme de détection de position d'un capteur micro-inductif

Dans cette partie, il sera question d'une stratégie de lecture différentielle micro-inductive pour mettre en œuvre le mécanisme de détection de position d'un capteur.

2.6.1 Estimation de la fréquence naturelle

La réponse du capteur à des signaux d'entrée variables est différente de celle affichée lorsque les signaux d'entrée sont constants, ce qui est décrit par des caractéristiques statiques. Ce phénomène s'explique par la présence d'éléments stockant de l'énergie, tels que des éléments inertiels (masse et inductance) ainsi que par la capacité (électrique, thermique et fluide). Les caractéristiques dynamiques sont l'erreur dynamique et la vitesse de réponse

(temps, constante et délai). L'erreur dynamique est la différence entre la valeur indiquée et la vraie valeur pour la quantité mesurée, lorsque l'erreur statique est nulle. La vitesse de réponse indique à quelle vitesse le système de mesure réagit aux changements dans la variable d'entrée. Un délai entre l'entrée appliquée et la sortie correspondante est sans importance du point de vue de la mesure. Cependant, si le capteur fait partie d'un système de contrôle, ce retard peut entraîner des oscillations.

Pour déterminer les caractéristiques dynamiques d'un capteur, il faut appliquer une quantité variable à son entrée. Cette entrée peut prendre différentes formes : transitoires (impulsion), périodiques (sinusoïdale) ou aléatoires. La sélection d'une entrée dépend du type de capteur. Par exemple, il est difficile de produire une température avec des variations sinusoïdales, mais il est facile de provoquer un changement de température soudain tel qu'une étape. Par ailleurs, il est plus aisé de provoquer une impulsion de cette façon que par l'accélération. Plusieurs expériences ont été réalisées pour évaluer la réponse en fréquence de l'appareil et son comportement en tant que fonction des signaux d'entrée (accélération et déplacement) pour différentes valeurs de l'inclinaison de l'appareil [46].

Afin de décrire mathématiquement le comportement d'un capteur, supposons que les entrées et les sorties soient variables. Ensuite, la relation entre la sortie du capteur et l'entrée peut donc être exprimée de manière simple. Un capteur de second ordre contient deux éléments de stockage d'énergie. Son entrée et sa sortie sont liées par un second ordre d'équation différentielle. On peut écrire la réponse prédite de l'électronique de conditionnement à une entrée impulsive $V_{coils}^{imp,pred}$ [47] [46] :

$$V_{coils}^{imp,pred} = V_M \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_d t) \quad (2.1)$$

Dans la première étape, il est nécessaire d'effectuer une estimation de la fréquence naturelle ω_n et du facteur d'amortissement ξ de l'appareil. ω_d est la fréquence angulaire naturelle amortie. V_M est l'amplitude du signal mesuré.

Dans le but d'adapter les données prédites par (2.1), l'algorithme d'optimisation de Nelder-Mead a été utilisé [48]. Cela exploite le J fonctionnel entre la sortie de tension de bobine $V_{coils}^{imp,pred}$ et le prédit de bobine :

$$J = \frac{\sqrt{\sum_i^N (V_{coils}^{imp,obs} - V_{coils}^{imp,pred})^2}}{N} \quad (2.2)$$

2.6.2 L'erreur de non linéarité du capteur

L'erreur de non linéarité du capteur est affectée par le nombre de spires, la largeur de la bobine, l'angle de la boucle et l'épaisseur du rotor. Pour réduire l'erreur de non linéarité, la structure du capteur doit être optimisée. L'erreur de non linéarité du capteur angulaire inductif peut être exprimée dans un cycle de mesure [49] :

$$L = \frac{|\varphi_m - \varphi_i|_{max}}{2\pi} \times 100\% \quad (2.3)$$

Où

L est l'erreur de non linéarité du capteur d'angle inductif;

φ_m est l'angle de phase de simulation ou l'angle de phase mesuré;

φ_i est l'angle de phase idéal.

2.6.3 Détermination de l'intensité du champ magnétique

Les microcapteurs de rotation utilisent généralement l'effet Coriolis, présenté sur la figure 2.7 [50].

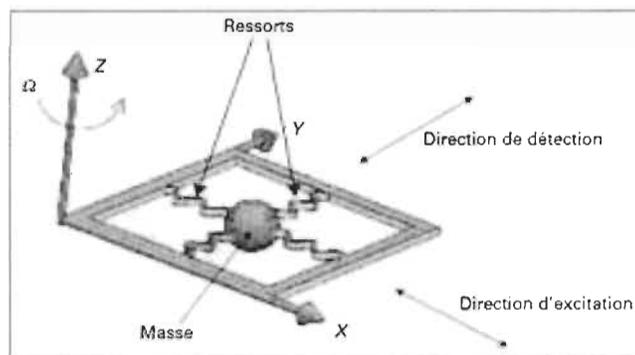


Figure 2.7 Effet Coriolis

Une masse est supportée par deux ressorts. Elle est mise en mouvement sinusoïdalement suivant l'axe X et la détection de la rotation se fait suivant l'axe Y . On a :

$$X = A_x \cos(\omega_x t) \quad (2.4)$$

X représente le déplacement suivant l'axe X ;

A_x l'amplitude du déplacement;

ω_x la pulsation du déplacement.

Si on applique une vitesse de rotation Ω autour de l'axe Z du système, une accélération A_y de la masse suivant l'axe Y sera engendrée :

$$A_y = 2\Omega x' = -2\Omega\omega_x A_x \sin(\omega_x t) \quad (2.5)$$

On mesure cette accélération par le déplacement suivant l'axe Y . L'inductance d'un capteur pourra donc être calculée tout en utilisant le principe de la mesure d'un accéléromètre. Le principe de la mesure vectoriels est important pour les capteurs accéléromètres, mais n'est pas applicable à cette recherche.

La loi de Biot-Savart est utilisée pour déterminer l'intensité du champ magnétique près d'un conducteur porteur de courant. On peut dire que cette loi permet d'établir l'intensité du champ magnétique générée par son élément courant source. La loi Biot-Savart est une équation qui décrit le champ magnétique créé par un fil porteur de courant en différents points. Afin d'observer la variation des inductances mutuelles, la distribution du champ magnétique et le couplage de flux du capteur seront calculés numériquement d'une bobine stationnaire unique de tours l_n , espacement μ_0 entre les conducteurs et une largeur. Le champ magnétique $B(p)$ en tout point p est obtenu en utilisant la loi Biot-Savart comme [17] :

$$B(p) = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l_n} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad (2.6)$$

μ_0	Perméabilité de l'espace libre
N	Nombre de boucles dans la bobine
l_n	Boucle N
\vec{dl}	Élément différentiel le long de la boucle
\vec{r}	Vecteur de l'élément différentiel \vec{dl} au point p

2.6.4 Détection sensible à la phase

Une technique connue sous le nom de détection sensible à la phase (*Phase Sensing Detector* – PSD) est utilisée pour identifier un signal à une fréquence de référence et une phase spécifique [51] [24]. Les solutions recensées dans la littérature avec le principe de mesure PSD n'appliquent pas d'exigences de sécurité. Les prototypes développés sont bien définis, mais ils ne sont pas testés dans différents environnements ou expérimentés sur une longue durée. L'approche de mesure utilise une tension sinusoïdale connue sans tenir compte de la distribution du champ magnétique du capteur. Cette méthode a été retenue car elle pouvait être applicable à l'approche choisie.

La caractéristique de l'inductance du capteur par rapport à un déplacement vertical a été mesurée en déplaçant le noyau et en enregistrant la sortie $\tan\varphi$ à chaque position :

$$\tan\varphi = \frac{V_{oq}}{V_{op}} \quad (2.7)$$

Avec : $V_{op} = V_{in}V_0\cos(\varphi)$

$$V_{oq} = V_{in}V_0\sin(\varphi)$$

Un schéma explicatif à base de PSD est utilisé pour mesurer $\tan\varphi$ (figure 2.8) [51].

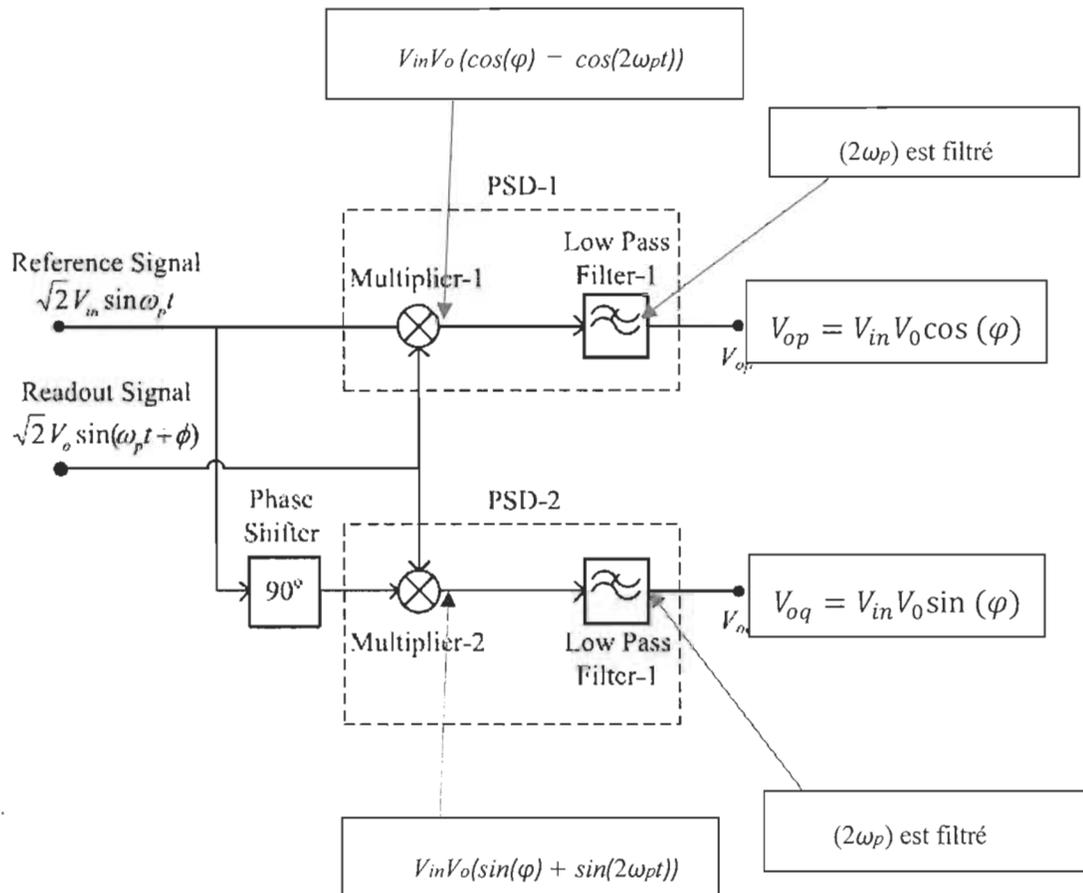


Figure 2.8 Schéma synoptique simplifié de la mesure de phase avec PSD

Tableau 2-5 Description du schéma de mesure

Filtres passe-bas (<i>Low-Pass Filters</i> – LPF)	Suppression de la fréquence $2fr$
$V_{in} = \sqrt{2} V_{in} \sin(\omega pt)$	Signal d'excitation comme signal de référence
$v_o = \sqrt{2} V_o \sin(\omega pt + \varphi)$	Tension, signal d'entrée au PSD
$V_{in}V_o (\cos(\varphi) - \cos(2\omega pt))$	Sortie du multiplicateur-1
$V_{in}V_o (\sin(\varphi) + \sin(2\omega pt))$	Sortie du multiplicateur-2
fr	Fréquence de résonance fixe
$\omega p = 2\pi fr$	Pulsation de resonance
φ	Où les plans de phase φ sont en degrés entre 90 et -90 degrés

En outre, le schéma basé sur PSD est utilisé pour extraire l'amplitude de la fréquence fr de la sortie de l'amplificateur de charge. Cette tension de sortie V_{op} du PSD est indépendante de V_{in} . Cela permet d'étendre la gamme en utilisant plusieurs ensembles de bobines. V_{op} indiquera la bobine qui est sous le noyau. Une fois que celle-ci est connue, la position du noyau peut être obtenue. Les signaux sonores dont les fréquences diffèrent de la fréquence de référence, sont rejetés.

2.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, une revue de l'état d'art et les méthodes de détection de position inductives, ont été réalisées. Divers modes de fonctionnement, performances établies et structures alternatives, sont étudiés afin de sélectionner un candidat final pour la prédiction théorique, la réalisation physique et les tests pratiques. Dans cette recherche sur l'état actuel de la technique, un module électronique des capteurs de position inductifs a été identifié. Les produits ZMID520x sont des composants matériels intermédiaires de sécurité prenant en charge les systèmes conformes à la norme automobile ISO 26262. Le composant électrique ZMID5201STKIT s'applique à une structure réalisable pour le capteur expérimental proposé. La loi de Biot-Savart, qui pouvait être applicable au capteur proposé, a été favorisée.

Chapitre 3 - Étude théorique de fiabilité des capteurs inductifs

3.1 Introduction

Afin de confirmer la présente proposition de recherche, on commencera par définir la fiabilité des capteurs de mesure de position puis, des modifications concernant les composants électriques de ce capteur seront apportées afin d'atteindre le niveau de sécurité exigé.

Dans ce travail, un capteur lié au domaine automobile sera utilisé. Après avoir effectué des recherches sur les exigences de fiabilité du capteur inductif sans contact, il a été constaté que la plupart des articles prennent en considération, le domaine de fiabilité de façon générale, l'objectif visé étant d'obtenir un capteur fiable selon la norme ISO 26262.

Pour les applications liées à la sécurité, une configuration redondante avec deux systèmes ou plus est requise. Le capteur inductif peut être configuré comme entièrement redondant. Dans cette configuration, chaque système a sa propre excitation séparée et son propre ensemble de bobines de réception. La structure du rotor est partagée. Chaque système fournit un signal de sortie indépendant. Un système redondant avec deux des bobines d'excitation est représenté par la figure 3.1.

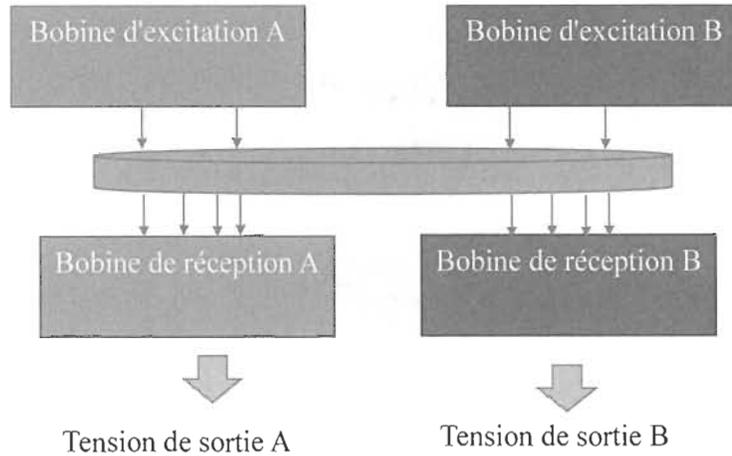


Figure 3.1 Redondance fonctionnelle et matérielle

3.1 Définition de sécurité et fiabilité

Afin de mieux comprendre le niveau de sécurité d'un capteur, on se référera à une estimation des erreurs de position dans des systèmes de sécurité critiques [52]. Ces capteurs sont assez dispendieux et ne possèdent pas un très haut niveau de robustesse. En effet, leur temps moyen avant défaillance (*Mean Time To Failure* – MTTF) se situe généralement entre $2 \cdot 10^6$ et $5 \cdot 10^5$ heures [53] - [54]. Cela rend leur utilisation dans des systèmes critiques de sécurité automobile, particulièrement difficile. Pour les domaines de l'aviation et du chemin de fer, les normes de sécurité internationales exigent moins d'une panne dangereuse de système toutes les 10^7 à 10^9 heures de fonctionnement [55] - [56].

Le tableau 3.1 présente quatre exemples d'événements dangereux d'un véhicule. Le niveau d'intégrité de sécurité automobile (*Automotive Safety Integrity Level* – ASIL) associé

selon la norme ISO 26262, le niveau d'intégrité de sécurité (*Safety integrity level – SIL*) selon la norme IEC 61508 et les défaillances dangereuses acceptables par heure (*Dangerous Failure per Hour – DFH*), sont ainsi attribués à chaque événement dangereux.

Tableau 3-1 Niveau de sécurité acceptable

Évènement dangereux	ASIL Niveau (ISO 26262)	SIL Niveau (IEC 61508)	Échecs dangereux par heure
Fermeture involontaire du lève-vitre [57]	A	1	$10^{-6} = < DFH < 10^{-5}$ 1/h
Accélération involontaire du véhicule pendant une manœuvre à basse vitesse parmi les piétons [58]	B	2	$10^{-7} = < DFH < 10^{-6}$ 1/h
Perte d'effet de freinage frein-à-fil à des vitesses supérieures à 100 km/h [59]	C	2	$10^{-7} = < DFH < 10^{-6}$ 1/h
Assistance de direction involontaire [60]	D	3	$10^{-8} = < DFH < 10^{-7}$ 1/h

Récemment, la plupart des études ont utilisé la décomposition ASIL pour réduire le coût de développement des fonctions automobiles [61,62]. Cependant, l'objectif de la

fiabilité pourrait ne pas être satisfait lorsque la décomposition ASIL est effectuée. L'ISO 26262, partie 9, section 5, fournit le guide pour la décomposition de l'ASIL. Si un composant a une erreur de mesure, tout le système de sécurité peut forcément être altéré.

Bien que des normes de prévision empiriques aient été utilisées depuis de nombreuses années, il est toujours recommandé de les utiliser avec prudence. Les inconvénients des méthodes empiriques ont été beaucoup discutés au cours des trois dernières décennies [64] [65] :

- les prédictions de fiabilité empiriques sont généralement mal corrélées avec les performances réelles;
- les profils de charge réels des composants sont souvent mal connus et ne sont pas explicites;
- les prévisions de fiabilité reposent uniquement sur des taux de défaillance constants destinés à modéliser les situations;
- les taux d'échec déterminés ne peuvent pas être garantis avec certitude. Ainsi, l'utilisateur ne peut vérifier explicitement les données de fiabilité calculées.

Les problèmes mentionnés ci-dessus clarifient le besoin urgent de s'abstenir de normes. L'idée est de vérifier si la méthode de calcul et son résultat sont applicables au domaine automobile.

3.2 Étude des causes micro-électroniques de défaillance

Les mécanismes de défaillance des systèmes microélectroniques dépendent du type de circuit, de la technologie de mise en œuvre et des facteurs environnementaux [66]. Comme la technologie des semi-conducteurs évolue rapidement, il est difficile pour les sources reconnues de l'industrie (ISO 26262) de suivre l'état de la technique. Pour cette raison, il est utile de prendre en compte les publications de groupes industriels tels que *Joint Electron Device Engineering Council* (JEDEC) [67], la feuille de route internationale pour les dispositifs et systèmes (IRDS) [68] et le conseil de fiabilité *Semiconductor Manufacturing Technology* (SEMATECH/ISMI) [69].

Les capteurs microélectroniques sont utilisés dans diverses applications et emploient une méthode de détection mécanique par un moyen de conversion typiquement élastoélectrique (basé sur le mouvement). Les effets possibles des modes de défaillance du microcapteur sont inclus dans le tableau 3.2.

Le tableau 3-3 fournit des mécanismes de sécurité utilisés avec le microcapteur inductif sans contact proposé. Les mesures de sécurité sont fournies pour soutenir la couverture diagnostique revendiquée.

Tableau 3-2 Causes et modes associés aux défaillances du capteur microélectromécaniques

Spécifications techniques	Mode de défaillance	Description	Effet possible
Ressort fracturé	Sensibilité non paramétrique	Les MEMS sont conçus avec des ressorts pour établir une sensibilité linéaire et limiter le déplacement	Si un ressort se fracture, la masse de preuve devient déséquilibrée
Surmenage mécanique général	Changement de sensibilité	Les sources de surcharge mécanique peuvent inclure un choc, des vibrations et des effets électriques de surtension (<i>Electrical Overstress – EOS</i>) ou décharge électrostatique (<i>Electrostatic discharge – ESD</i>)	Cela peut entraîner des dommages structurels aux composants du transducteur MEMS
Particules	Changement de sensibilité	Une particule est capable de provoquer plusieurs échecs	Si une particule est conductrice, elle peut créer un court-circuit
Métal cassé et matières étrangères	Décalage en dehors de la plage spécifiée	La sortie est décalée de la valeur idéale en l'absence de stimulus (énergie d'entrée)	Le seuil de commutation peut être inexact
Chute de charge, choc et vibration	Sensibilité trop élevée ou basse	La sensibilité dévie au-delà des limites spécifiées	Une perte de sensibilité peut provoquer un faux signal
Fractures plates	Décalage de sensibilité, changement de dynamique du capteur	Les systèmes microélectromécaniques sont conçus avec des ensembles de doigts interdigités capacitifs pour détecter le mouvement de masse de preuve	Si un doigt se fracture, la capacité totale est réduite, ce qui entraîne une diminution de la sensibilité et un décalage

Tableau 3-3 Mécanismes de sécurité pour le capteur inductif proposé

Mécanisme de sécurité	Description	Implémentation
Filtre de masse avec haute pression	Pour fournir un mécanisme de filtre passe-bas (<i>low-pass filter</i> – LPF) qui rejette le bruit	Le capteur est constitué de groupes de doigts « peignes » avec un espace; la chambre de masse est scellée sous pression; les pressions de molécules de gaz permettent une déviation de fréquences
Diaphragmes redondants	Fournir une référence permanente à comparer à l'élément primaire du système	Les sensibilités sont partagées et s'annulent mathématiquement
Annuler le décalage	Utiliser une méthode pour annuler le décalage	Une routine d'étalonnage est exécutée à chaque cycle pour quantifier la tension de décalage
Test spécifique au transducteur	Il peut être difficile d'évaluer l'intégrité d'un capteur en l'absence de conditions environnementales	Une valeur en dehors de la plage de zéro admissible indiquerait un déséquilibre ou une rupture de la masse sismique ou de l'intégrité de l'électrode de détection
Contrôle automatique du gain (AGC)	La sortie électrique est amplifiée pour être encore utilisée dans un système de détection	Le contrôle automatique du gain (AGC) permet d'ajuster le gain de l'amplification du transducteur en fonction de l'amplitude du signal de sortie du transducteur

3.3 Modélisation du schéma de défaillance du capteur proposé

Du point de vue de la fiabilité, les capteurs inductifs ne sont pas réparables. Il est ainsi possible de définir une durée de vie T , comme la durée de temps au cours de laquelle le composant remplit sa fonction prévue. T est une variable aléatoire continue avec une fonction de densité de probabilité $f(t)$, connue comme étant le temps de défaillance de distribution. La probabilité qu'un composant non réparable survive au-delà d'un temps spécifié t est $P(T > t)$, équivalente à sa fonction de fiabilité $R(t)$ [52]. Ceci est formellement défini en théorie des probabilités comme un cumulatif complémentaire de fonction de distribution :

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{+\infty} f(x)dx \quad (3.1)$$

Rien n'indique avec certitude que cette information soit applicable. Pour le démontrer, on prend la version finale de la norme ISO 26262 partie 10 de sécurité fonctionnelle [70]. La norme ISO 26262 (partie 4, version 2018, section 6.4.2.2) spécifie que l'intervalle de temps et de tolérance d'opération d'urgence (*Fault Tolerant Time Interval* – FTTI) doit être pris en compte dans la définition de l'intervalle de traitement des défauts pour chaque mécanisme de sécurité.

Pour les défaillances à deux points, la limitation de temps imposé après la première défaillance réduit la probabilité que la deuxième défaillance se produise. Une limitation de temps permet de minimiser les valeurs de danger. Toutefois, après le premier échec, le risque

de défaillance augmente. L'approche d'un temps de fonctionnement réduit afin d'atténuer les défauts de double point, est alors utilisé. Une valeur de temps de fonctionnement réduite de sorte que le taux d'échecs (*Failures in Time – FIT*) pour le danger soit suffisamment bas au départ d'un système pleinement opérationnel et après la première défaillance, est définie.

C'est la méthode de tolérance d'opération d'urgence (*Emergency Operation Tolerance Time Interval – EOTTI*) qui sera utilisée. L'implémentation de l'intervalle de temps de tolérance des opérations d'urgence (EOTTI) T_{eotti} , est requise. L'intervalle de temps de tolérance est considéré comme le temps d'échec après l'apparition de la panne ou de la perte de redondance. Pour les systèmes où la tolérance aux pannes est obtenue en utilisant la redondance, une fois que le système a terminé la réaction lors de la première défaillance, le système est en mode de fonctionnement sans redondance. La durée autorisée à rester dans un tel fonctionnement est limitée pour réduire le risque d'une seconde faute. Cela constitue un facteur possible pour déterminer l'intervalle de temps de tolérance de fonctionnement d'urgence. Cette méthode est mise en œuvre pour le capteur microélectronique fabriqué (Figure 3.2). λ_S est le taux de défaillance ponctuelle et résiduelle d'émetteur de signal. λ_D est le taux de défaillance détecté par les bobines de réception 1 et 2. T_{eotti} est calculée en comparant le paramètre de probabilité de violation de l'objectif de sécurité par rapport à l'utilisation attendue du véhicule ($T_{lifetime}$). T_{eotti} peut maintenant être calculée comme l'équation (3.2) :

$$T_{eotti} = \frac{T_{lifetime} \times \lambda_{target}}{\lambda_{degr}} \quad (3.2)$$

Où :

λ_{target} correspond à la notation ASIL de l'élément après l'occurrence du défaut ou de la perte de redondance (taux de FIT du capteur ciblé après le premier échec);

λ_{degr} est la moyenne de probabilité par heure pendant l'intervalle de temps de tolérance d'opération d'urgence d'une défaillance après l'occurrence du défaut (capteur FIT après la première défaillance);

$T_{lifetime}$ est la durée d'opération prévue du capteur.

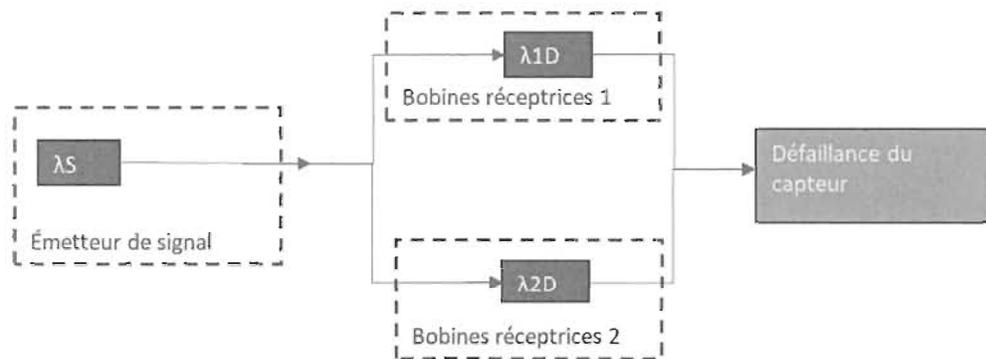


Figure 3.2 Représentation du schéma de défaillance du capteur

Dans la première étape, les des taux de défaillance directs (λ_S par l'émetteur de signal et λ_D par les bobines de réception 1 et 2), sont définis. Le taux d'échec pour un émetteur (50 FIT) et un récepteur de bobine en série (500 FIT) est de 550 FIT. Pour un capteur inductif de position avec objectif de sécurité ASIL B, la norme ISO 26262 prévoit une exigence maximum de 100 FIT (Figure 3.3). En cas de défaillance du capteur qui est structuré avec une seule bobine de réception, un taux d'échec de capteur 550 FIT n'est pas conforme.

Le taux d'échec présenté avec deux bobines de réception est de 52.5 FIT. Cela représente le taux de défaillance à partir d'un capteur pleinement fonctionnel et maintenant conforme à l'exigence automobile industrielle (ASIL B, $100 \text{ FIT} \leq$). Cependant, après la défaillance du premier récepteur, le capteur est effectivement en mode de secours à partir duquel le taux de FIT pour la défaillance du capteur passe à 550 FIT.

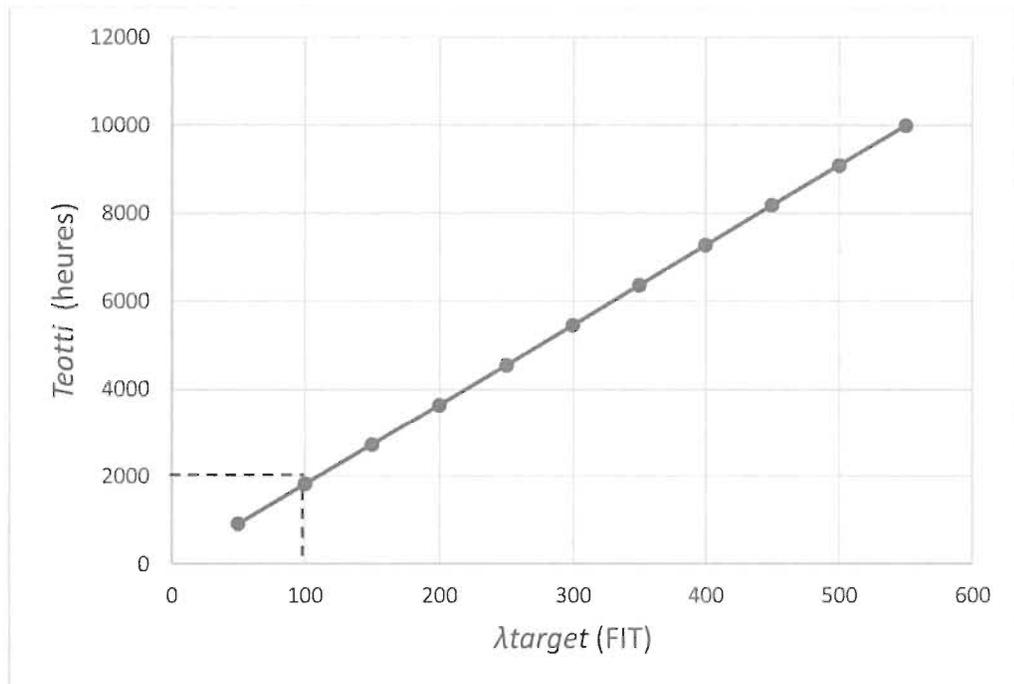


Figure 3.3 Utilisation d'une limite de temps pour atténuer les défaillances à deux points

Le risque de danger peut être encore réduit, si la durée de fonctionnement du mode de secours peut être limitée. Après ce temps, le système s'arrête de manière contrôlée. Une limitation de temps ($T_{eotti} = 1818$ heures) permet de respecter l'objectif de fiabilité (ASIL B, $100 \text{ FIT} \leq$) et de minimiser les valeurs de danger. Cela amène donc à penser que le délai doit être réduit davantage pour que le risque après le premier échec, atteigne toujours

l'objectif de fiabilité. La différence entre ce calcul et le cas précédent est une diminution importante du taux d'échec FIT, ce qui signifie qu'il y a contribution de l'architecture de redondance.

3.4 Comparaison avec des résultats existants

Une analyse et une comparaison entre cette calcul et le résultat d'autres calculs théoriques existants, seront faits. L'interprétation des résultats d'un tableau représentant des systèmes de détection de position à effet Hall, équipés d'algorithmes de détection et de compensation de défaut, a été établie [52]. Dans l'étude [62], les auteurs résolvent le problème de la minimisation du coût de développement en présentant deux algorithmes, soit le calcul de fiabilité du schéma (RCS) et la minimisation du coût de développement avec l'objectif de fiabilité (MDCRG). Les résultats du RCS pour calculer la valeur de fiabilité de chaque décomposition ASIL est comparé. Pour obtenir la valeur de fiabilité $R(G)$, il faut d'abord obtenir le schéma pour calculer la fiabilité de chaque tâche. La valeur de fiabilité de chaque tâche sur le schéma 1 est avant tout répertoriée. Les taux de défaillance λ_k de quatre ECU sont 0.01 (u1), 0.02 (u2), 0.03 (u3) et 0.04 (u4). ASIL D est décomposé en un ASIL C et un ASIL A dans le schéma 1. Ainsi, n1 avec le schéma 1 est exécuté sur les calculateurs avec $R(n1, u1, LC) = 0.92$ et $R(n1, u2, LC) = 0.80$. Enfin, la fiabilité $R(n1, schemel)$ de n1 avec le schéma 1 est calculée comme suit : 0,99. Les temps ne sont pas spécifiés ; seuls les temps d'exécution et de réponse sont mentionnés. Selon ce calcul, le taux d'échec est de 0.99.

La différence entre la méthode utilisée dans cette thèse pour évaluer la fiabilité du capteur inductif sans contact avec la valeur et les méthodes théoriques existantes, est présentée dans le Tableau 3 4.

Tableau 3-4 Comparaison entre les modèles de calcul utilisés et le résultat obtenu

Référence	Présente recherche	Référence [52]	Référence [62]
Spécification	Temps de fonctionnement réduit pour un capteur micro-inductif	Estimation de la défaillance de position à faible coût pour des systèmes fonctionnels critiques	Réduction des coûts de développement avec l'objectif de fiabilité pour la sécurité fonctionnelle des véhicules automobiles
Système	Redondance	Capteur de position à effet Hall	Fonction distribuée
Effet de fiabilité	Fiabilité de la détection basée sur microposition	Fiabilité de la détection de position par effet Hall	Calcul de fiabilité du schéma (RCS)
Échecs dans le temps (FIT)	Basée sur la norme ISO 26262	Basée sur des résultats théoriques existants	Distribuée
Temps	Temps de fonctionnement réduit selon le besoin	175 200 h	Non applicable
Détection de défaut, identification et compensation	Architecture de fiabilité parallèle	Architecture de fiabilité parallèle	Fonction multiple hétérogène
Taux d'échec du capteur	Varie selon le temps de fonctionnement	1.07	0.99

3.5 Conclusion

Pour soutenir cet objectif, une étude dont le but est de résoudre le problème de la minimisation du coût de développement tout en satisfaisant les objectifs de fiabilité, a été présentée. Pour les applications critiques en matière de sécurité, une configuration redondante avec deux ou plusieurs systèmes est nécessaire. Le capteur inductif peut être configuré comme entièrement redondant. Dans cette configuration, un système a sa propre excitation et son propre ensemble de bobines de réception. Chaque bobine de réception fournit un signal de sortie indépendant. L'implémentation de l'approche du calcul du taux d'échec avec la méthode de tolérance d'opération d'urgence de la norme automobile ISO 26262, a été effectuée. Les calculs ont révélé une diminution importante du taux d'échec, ce qui signifie qu'il y a contribution importante de l'architecture de redondance.

Chapitre 4 - Modélisation d'un capteur de position angulaire inductif microminiaturisé

4.1 Introduction

L'intégration de nouvelles techniques de système de micropositionnement (*Micro Positioning System* - MPS) dans un capteur inductif de mesure de position afin d'augmenter sa sensibilité de fonctionnement sera proposée. Durant l'implémentation, les modèles mathématique et électrique de l'utilisation de ces types de capteurs seront considérés, afin de déterminer le meilleur concept. Ce chapitre contient des prédictions théoriques des quatre approches potentielles pour le capteur. L'approche la plus prometteuse sera ensuite choisie comme base Pour l'étude expérimentale.

4.2 Analyses de la bobine du capteur

Les principaux paramètres influençant le bon fonctionnement des bobines avec le capteur inductif, sont la longueur et la largeur des bobines de l'émetteur et du récepteur. La fréquence et l'écart d'air entre la cible et la surface des bobines peuvent aussi affecter le signal du capteur. Pour soutenir la recherche par la simulation, un software (*WEBENCH Inductor Design Tool*, Texas Instruments) est utilisé (Annexe B) [73]. Cela peut également influencer la valeur de l'erreur de mesure de position. Comme l'inductance totale est proportionnelle au nombre de tours, le réglage du nombre de tours est un contrôle efficace

de l'inductance totale (figure 4.1). Les bobines qui n'ont pas une zone significative, ne contribuent pas à l'inductance globale alors qu'ils augmentent la fréquence de résonance. Pour la plupart des applications, un capteur circulaire est la forme optimale bien que les bobines carrées.

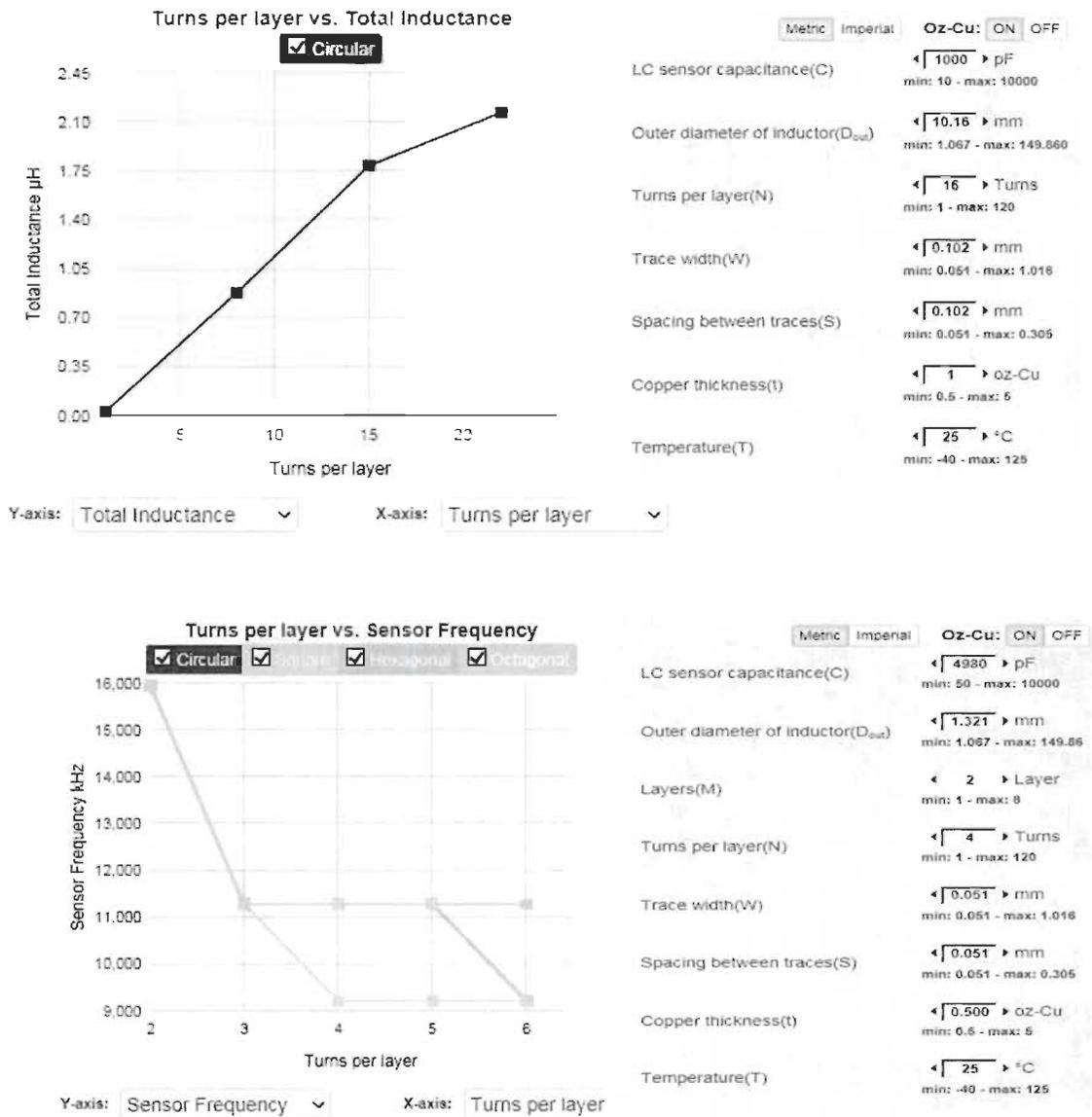


Figure 4.1 Inductance totale proportionnelle au nombre de tours et de couches

Le convertisseur numérique à inductance (LDC1614, Texas Instrument, USA) a été utilisé pour piloter le réseau d'oscillation et mesurer sa fréquence [74]. La capacité requise pour l'oscillation à la fréquence de résonance est de 64,19 pf avec inductance 3,94 uH. La fréquence des opérations varie en fonction de la position de la cible. Toutefois, une distance aussi faible qu'entre la cible et le capteur est souvent acceptable [75]. En général, lorsque la cible est la plus proche du capteur, la fréquence de celui-ci est la plus élevée (figure 4.2).

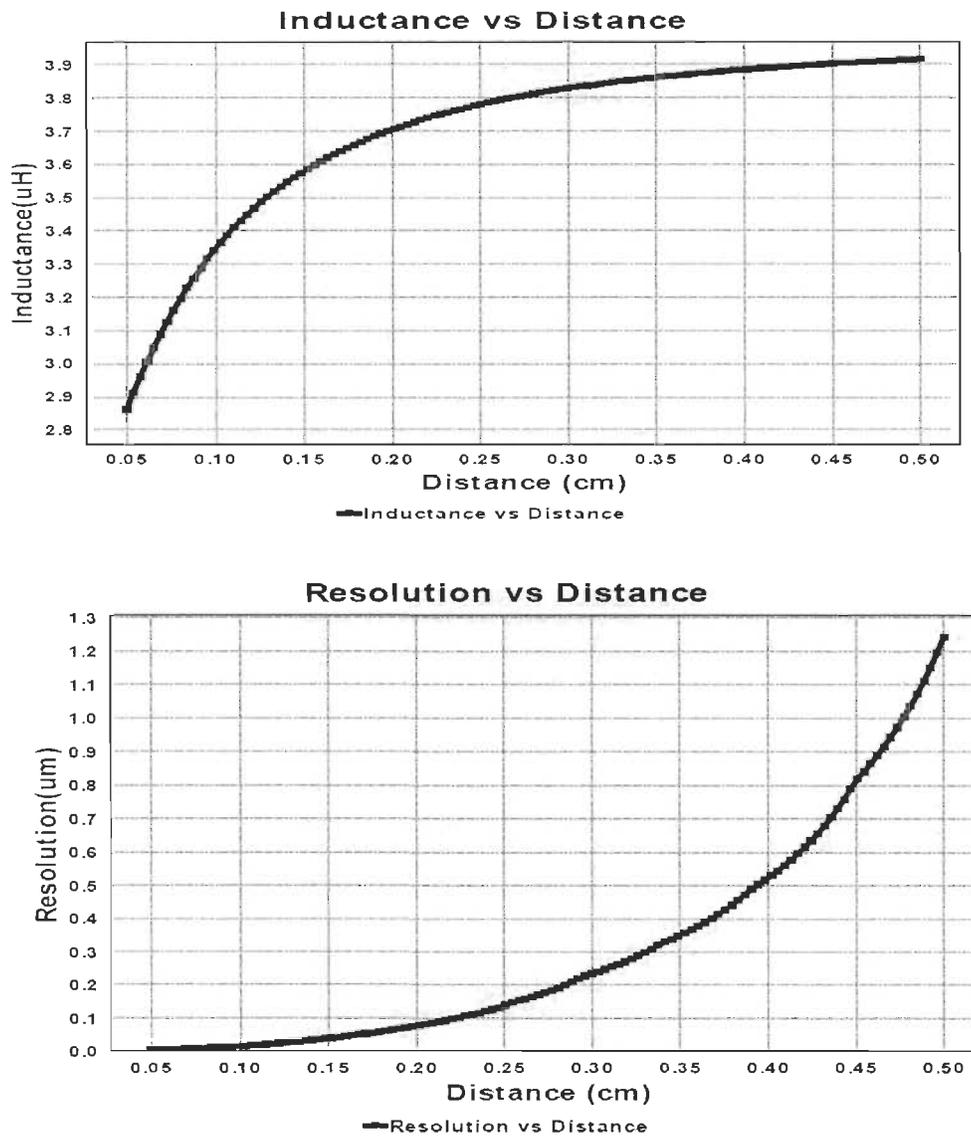


Figure 4.2 Courbe de l'inductance et de la résolution en fonction de la distance

4.3 Modélisation de lévitation inductive et magnétique

Un nouveau capteur de position micro-inductif sans contact magnétique basé sur la lévitation inductive et magnétique est proposé. Les phénomènes de lévitation ont été largement utilisés dans des systèmes électromécaniques MEMS pour surmonter les contraintes fondamentales liées à l'effet d'échelle et à la domination de la friction sur les forces d'inertie. En conséquence, de nouvelles générations de microcapteurs magnétiques basés sur la lévitation ont été démontrées en tant que micropaliers sans frottement [13], microcapteurs [14] et microaccélérateurs [76]. De manière générale, une référence sera faite à tous ces appareils en tant que microcapteurs sans contact (CMS). La lévitation électromagnétique élimine les frottements mécaniques entre les pièces mobiles et ouvre une porte très prometteuse pour l'amélioration de la précision de la position en même temps qu'une augmentation des capacités opérationnelles (figure 4.3).

Le rotor est magnétiquement soulevé par un système de lévitation magnétique intégré dont le déplacement doit être mesuré. Le capteur à bandes conductrices indiquées se situe dans la couche supérieure de la carte de circuit imprimé. Pour le calcul, l'exemple d'une voiture qui vient de démarrer et dont tout le système est en position zéro, sera utilisé. Le rotor est soulevé à moins de 0,55 mm. Cette position permet donc d'identifier la valeur minimale de l'inductance $L_c = L_{\min}$ de la bobine.

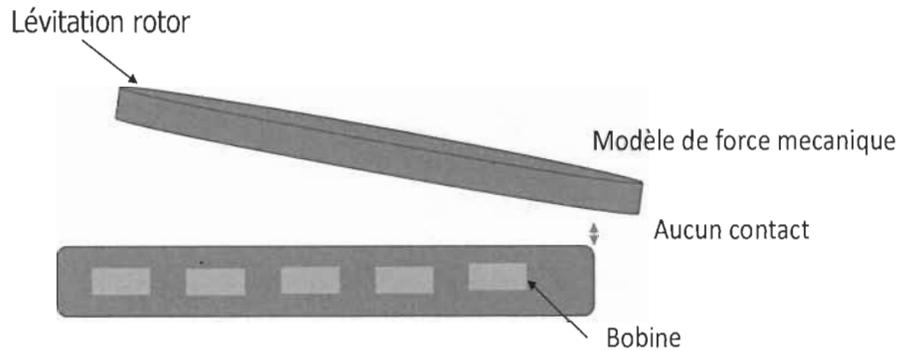


Figure 4.3 Projection de capteur électromagnétique

Les noyaux inductifs micro-usinés aident à utiliser efficacement le volume des bobines pour guider efficacement les lignes de champ magnétique autour des bobines en minimisant leur chemin à travers l'air. De ce fait, l'induction magnétique dans la zone de lévitation stable est augmentée, ce qui entraîne immédiatement une diminution des courants requis pour la lévitation. L'induction magnétique générée B_b et μ_{core} par bobines avec noyau [31] :

$$B_b \approx \frac{\mu_{core}(n_l - n_s)I}{l_{air}} \quad (4.1)$$

Où l_{air} est le chemin effectif du champ magnétique traversant l'air pour les bobines avec le noyau magnétique. n_l et n_s sont les nombre d'enroulements pour les bobines de lévitation et de stabilisation. I est le courant à travers la bobine.

Un nouveau matériel est également intégré au-dessous du capteur inductif afin d'augmenter l'énergie électromagnétique détectée par les électrodes. L'utilisation d'un

micromiroir a démontré son efficacité dans le travail de [22], tout en détectant la variation du couplage inductif résonnant entre deux bobines. Cependant, dans ce travail, le micromiroir est utilisé pour augmenter le champ magnétique provenant de la bobine d'excitation. La plaque a une surface de 3 mm avec un revêtement de 1 μm sur du silicium de 20 μm d'épaisseur (figure 4.4).

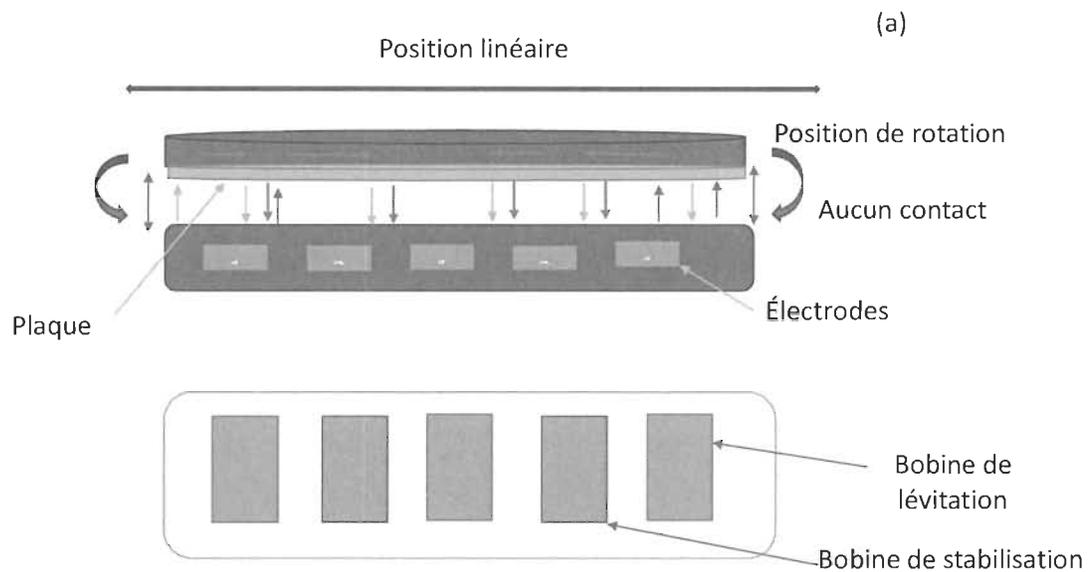


Figure 4.4 Capteur micro-inductif basé sur le principe de lévitation

La plaque électrothermique est initialement élevée à 550 μm au-dessus du substrat. L'avantage de ce type de conception de capteur est la gamme relativement grande de feuilletage de piston (jusqu'à 430 μm) qui peut être réalisée avec une tension corrélativement basse (jusqu'à 5 V). La tension se situe entre 1,2 V et 3,8 V. La courbe représentée à la figure 4.5 est calculée en utilisant l'équation :

$$D = \frac{D_0 - D_f}{1 + \exp((V - V_{mid})S)} + D_f \quad (4.2)$$

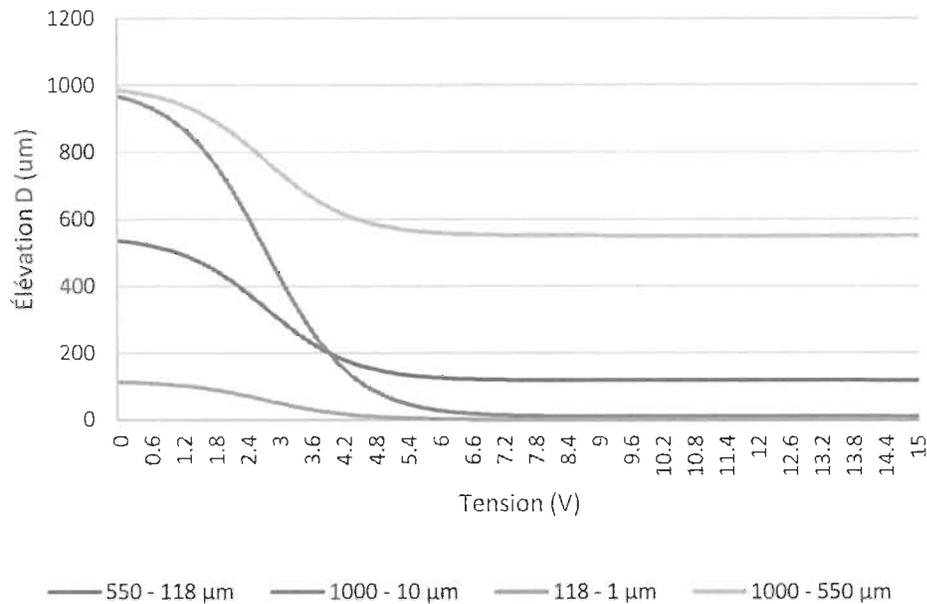


Figure 4.5 Élévation de la plaque de micromiroir en fonction de la tension

Il y a donc D comme élévation de plaque de miroir, D_0 et D_f comme élévations initiale et finale (550 μm – 118 μm ; 1 000 μm – 10 μm ; 118 μm – 1 μm ; 1 000 μm – 550 μm), $V_{mid} = 2,75$ V comme tension moyenne de la courbe, et $S = 1,217$ comme paramètre lié à la pente du centre. Pour les électrodes ayant les mêmes zones (A), la force correspondante (F) est calculée par la formule [27] :

$$F = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{4} \times \left(\frac{U}{h}\right)^2 \quad (4.3)$$

Où ε_0 est la permittivité de vide ($\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m);

ε_r est la permittivité relative (pour $\varepsilon \approx 1$);

h est la hauteur de lévitation;

U est la tension appliquée.

Cette formule a été utilisée pour calculer les composants verticaux et angulaires de la rigidité de suspension liée à son centre. L'approche présente la tension appliquée (U) et la force (F) par rapport au déplacement linéaire. La valeur D est utilisée comme l'élévation de plaque de miroir h dans la formule (4.3), afin de calculer la hauteur de lévitation. La force verticale électromagnétique par rapport à la tension est présentée dans la figure 4.6. Une combinaison de la force d'élévation et de l'élévation est présentée dans la figure 4.7. Dans le cas où la tension est supérieure à 5 volts, la position du rotor augmentera verticalement dans l'air. L'avantage de cette élévation est d'éviter les erreurs mécaniques et de bien définir la position de capture mesurée.

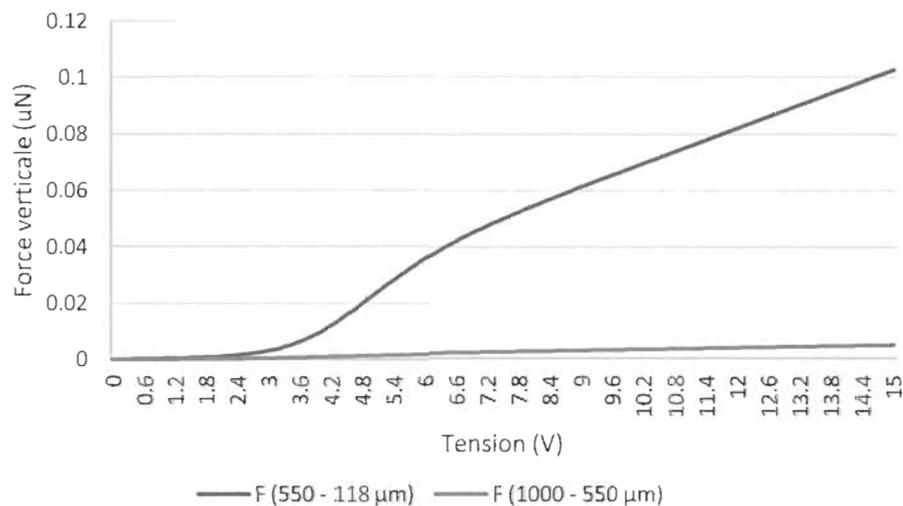


Figure 4.6 Force verticale électromagnétique en fonction de la tension

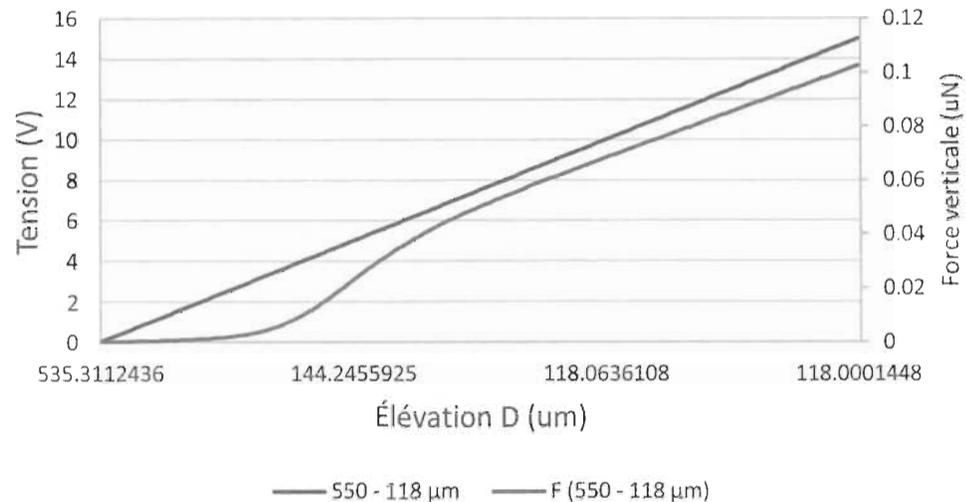


Figure 4.7 Tension et force verticale en fonction de l'élévation

L'utilisation d'un micromiroir et la lévitation d'un contact mécanique entre la cible et le capteur sont avantageuses d'un point de vue théorique. Une tension jusqu'à 5 V permet d'avoir une force verticale jusqu'à 0,02 μN (micronewtons). Le désavantage de cette approche est la vibration, qui peut distordre le signal et la position mesurée.

4.4 Modélisation des interfaces de détection et considération de conception

4.4.1 *Modèle électrique de fonctionnement par signal induit*

Le capteur fonctionne par inductance variable pour détecter la position d'une cible qui tourne sur un ensemble de bobines planes. L'illustration schématique de la figure 4.8a montre la première variante du capteur de position inductif rotatif proposé. L'interface de détection se compose de quatre bobines et d'une cible de capteur ferromagnétique sous la

forme d'un quart-de-cercle de 2 mm de rayon (R) et de 0,3 mm d'épaisseur (h) en acier AISI 410, située à 0,15 mm au-dessus des bobines. Le but de cette conception est de détecter l'angle de rotation φ autour de l'axe Z. La taille d'une bobine est de $2,03 \times 2,03$ millimètres avec 16 tours et consiste en un mince film bobine en spirale d'or sur une puce céramique. L'épaisseur du substrat céramique (C) est de 0,3 mm. Ces bobines discrets à film mince seront utilisés à la fois comme récepteur et émetteur de champ magnétique. Dans ce cas, les quatre bobines sont connectées à un signal de commande d'une fréquence de 1MHz et d'une amplitude de 1V pour produire un champ magnétique.

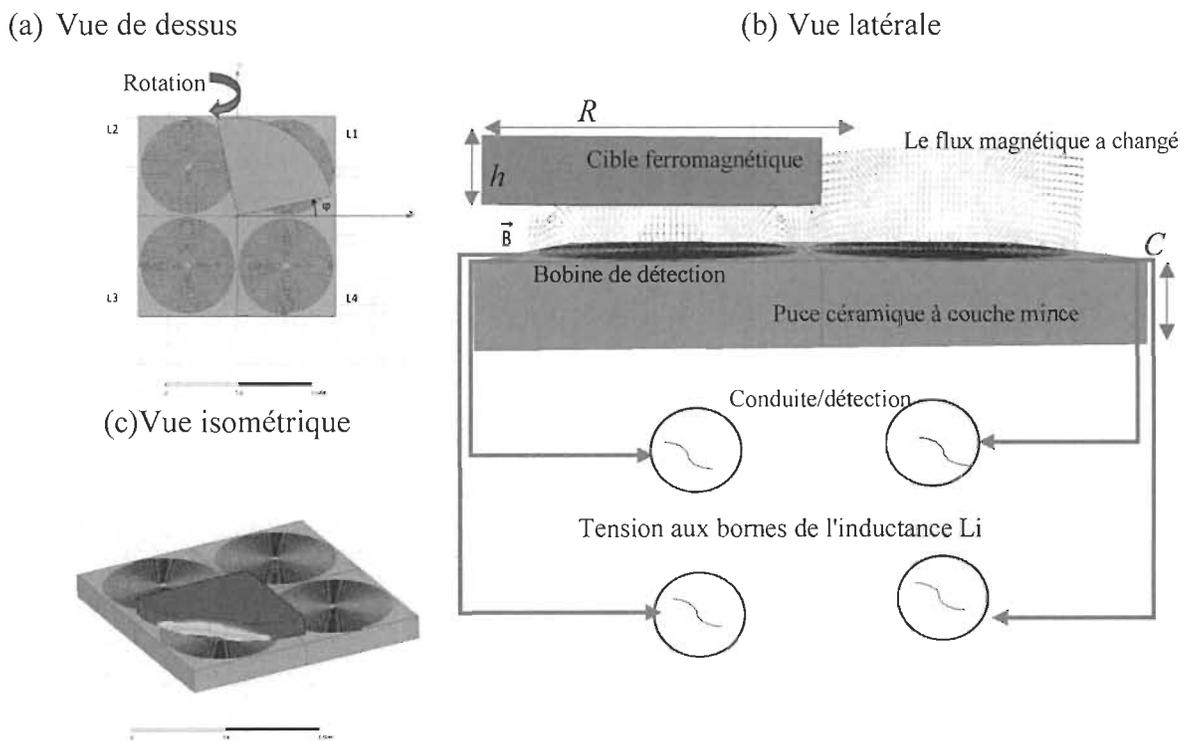


Figure 4.8 Quatre bobines spirales à quatre couches minces

Comme le montre la figure 4.8b, la cible ferromagnétique se trouve au-dessus des quatre bobines. Le flux du champ magnétique est modifié pour la bobine avec la cible ferromagnétique au-dessus. La cible ferromagnétique conduit le champ magnétique produit par la bobine et son champ est ajouté au champ global. L'augmentation du flux à travers la bobine signifie que l'inductance de la bobine semble accroître. Le flux total Φ à travers la surface de la bobine est défini par l'équation (4.4), où I est la valeur du courant et L l'inductance de la bobine. L'inductance de la bobine L est modifiée par la rotation de la cible magnétique sur la bobine.

$$\Phi = L \times I \quad (4.4)$$

Sur la base des inductances mesurées des bobines, il est maintenant possible de définir l'angle de rotation de la cible ferromagnétique en rotation. La simulation numérique du capteur proposé est réalisée avec le logiciel Ansys Maxwell [89]. Ce logiciel commercial par éléments finis (FEM) est utilisé pour prédire les performances et les caractéristiques du capteur. L'objectif est d'optimiser les dimensions du capteur et d'estimer la sensibilité résultante. Les mesures de la figure 4.9a montrent les changements d'inductance pour les bobines $L1$, $L2$, $L3$ et $L4$ en faisant tourner la cible ferromagnétique. Lorsque le bloc ferromagnétique se déplace au-dessus des quatre bobines, l'inductance L de la bobine correspondante qui se chevauche apparaît plus élevée. Le résultat calculé présente une forme d'onde (nanohenry [nH]) de type cosinus. Les simulations de la figure 4.9b illustrent la variation normalisée du flux magnétique Φ dans les équations (4.5 à .8) où $Lx > Lmin$. Le flux magnétique Φx est égal à 0 où $Lx \leq Lmin$. ($x=1, 2, 3$ ou 4). La variation du flux magnétique est presque linéaire pour les fonctions $\Phi1$, $\Phi2$, $\Phi3$ et $\Phi4$.

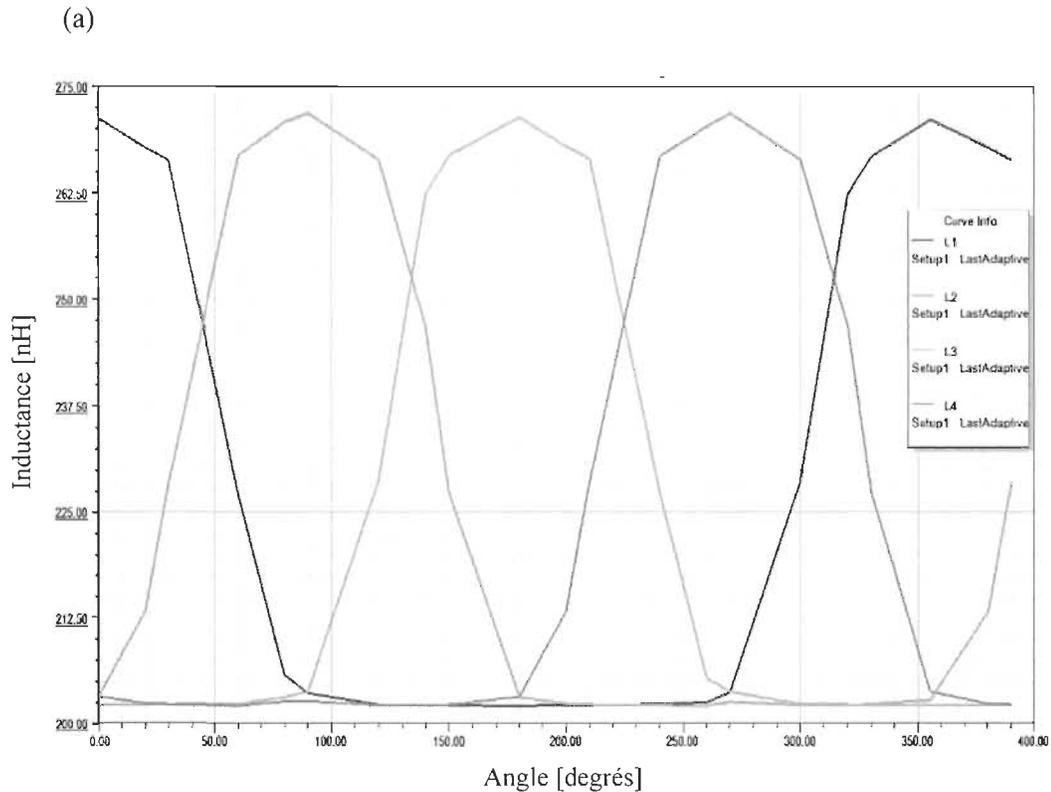
$$\Phi 1(L1) = \frac{\text{Arccos}\left[\frac{L1+L3-L2-L4}{L_{max}-L_{min}}\right]}{\pi} \quad (4.5)$$

$$\Phi 2(L2) = \frac{\text{Arccos}\left[\frac{L2+L4-L1-L3}{L_{max}-L_{min}}\right]}{\pi} \quad (4.6)$$

$$\Phi 3(L3) = \frac{\text{Arccos}\left[\frac{L3+L1-L2-L4}{L_{max}-L_{min}}\right]}{\pi} \quad (4.7)$$

$$\Phi 4(L4) = \frac{\text{Arccos}\left[\frac{L4+L2-L1-L3}{L_{max}-L_{min}}\right]}{\pi} \quad (4.8)$$

Enfin, une comparaison entre l'angle calculé et l'angle réel est démontrée. La figure 4.9c montre l'angle estimé en combinant les résultats de la simulation avec les inductances des bobines $L1$, $L2$, $L3$ et $L4$. L'erreur de déviation angulaire relative peut maintenant être calculée. Les résultats prévus en utilisant une régression linéaire montrent une erreur résiduelle de 13,39 degrés.



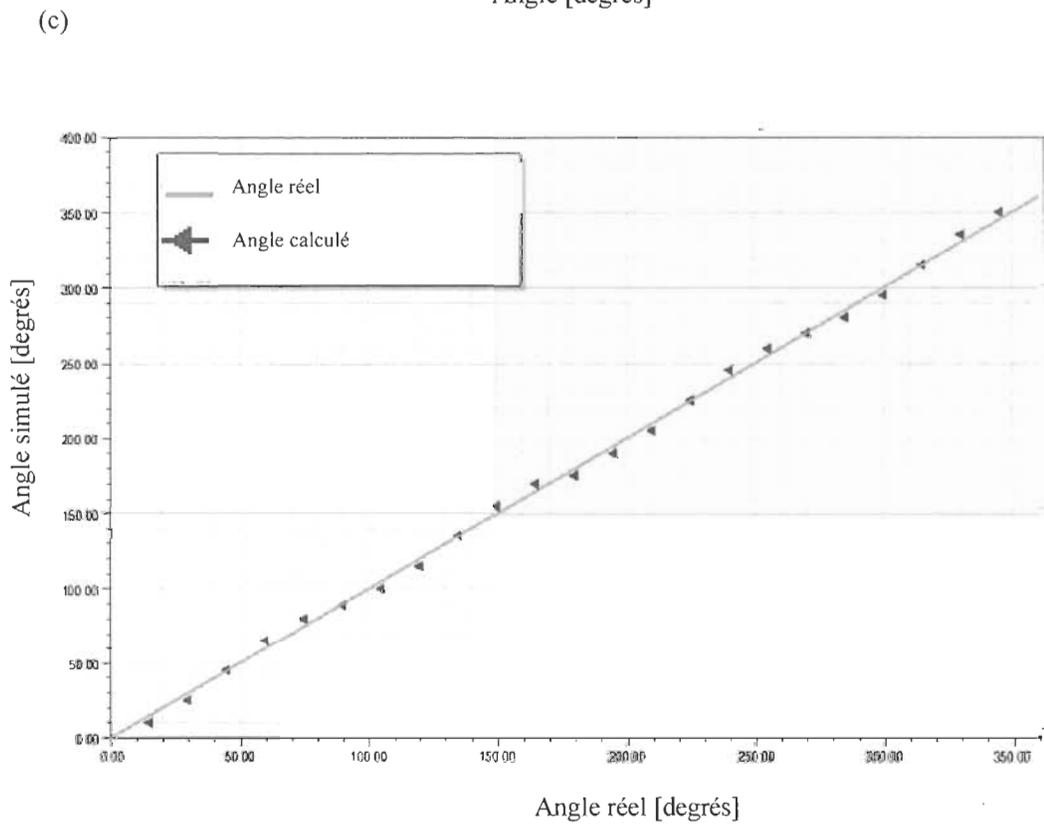
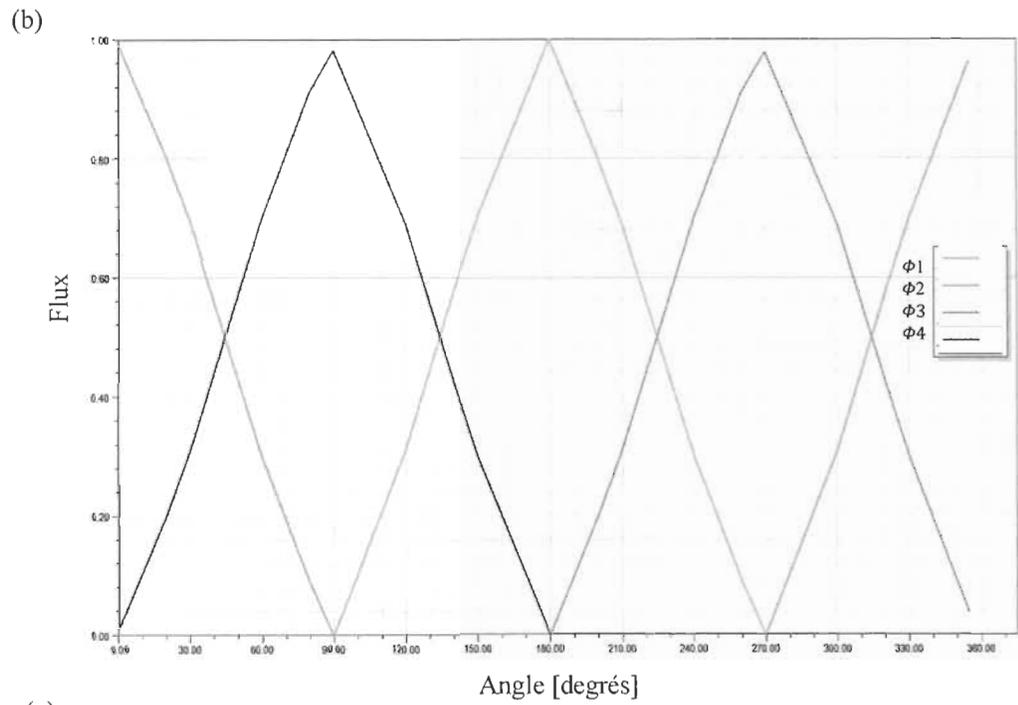


Figure 4.9 Caractéristiques du capteur ferromagnétique (a) inductance de la bobine, (b) flux magnétique et (c) angle mesuré

Dans une deuxième variante du capteur, le principe de l'effet des courants de Foucault est utilisé. Le même format et les mêmes dimensions sont employés pour le capteur et dans la première variante, mais avec une cible en cuivre. Une fréquence plus élevée est préférable pour la mesure L , car l'impédance totale $R+j\omega L$ devient plus grande et les variations de courant sont plus importantes. La plage de variation de l'inductance est de 140nH-200nH avec une résistance en courant continu de la bobine de 12 Ohm. Le champ magnétique produit induit des courants de Foucault dans la cible conductrice lorsqu'elle se déplace au-dessus de la bobine (Figure 4.8c). Ces courants dans le cuivre produisent leur propre champ dans une direction opposée à celle du champ de la bobine. Le champ magnétique global devient plus petit et le flux à travers la bobine diminue, ce qui entraîne une diminution apparente de l'inductance de la bobine. Le résultat de la mesure de la figure 4.10a est similaire à celui de la variante 1 (figure 4.9a). La variation des inductances de la bobine est utilisée pour calculer l'angle de rotation. Les fonctions $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 4$ sont les mêmes que dans l'équation (4.6) où $Lx < Lmax$. En utilisant cette expression, l'angle dans la figure 4.10b est alors calculé. Les résultats prévus à l'aide d'une régression linéaire montrent un écart-type d'erreur résiduelle de 10,5 degrés.

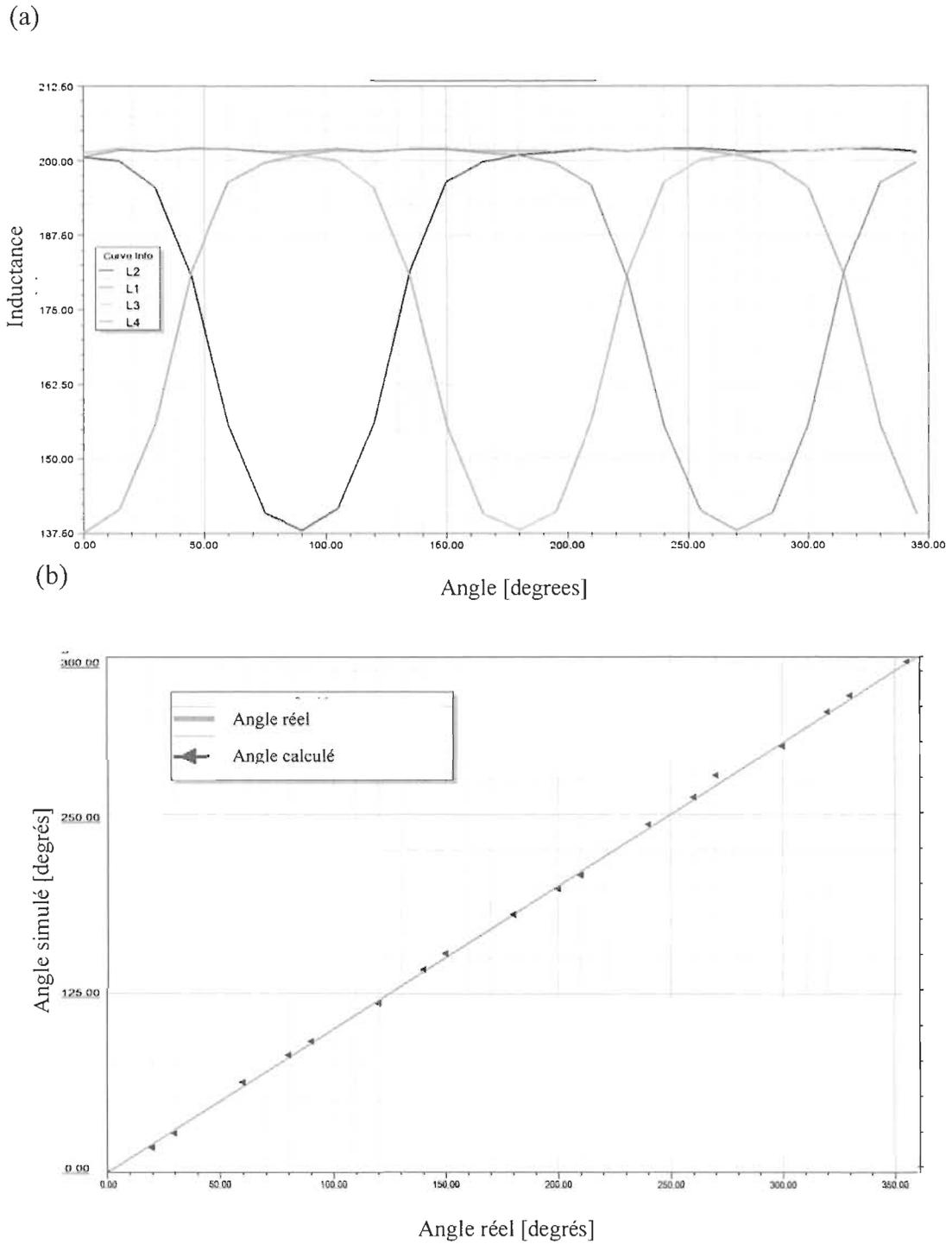


Figure 4.10 Caractéristiques du capteur de cible en cuivre (a) inductance de la bobine et (b) angle mesuré

4.4.2 Modèle de détection de la tension induite à double-bobine

Dans une troisième variante du capteur, une nouvelle disposition est utilisée, où les bobines agissent comme des bobines d'émission et de réception. La distribution du champ magnétique et le couplage du flux des bobines seront numériquement déterminés en fonction des paramètres des bobines présentés sur la figure 4.8. La bobine a été modélisée comme une série de boucles circulaires concentriques de largeur égale à 40 μm et d'espacement entre les spires de 20 μm . La figure 4.11a montre la distribution du champ magnétique d'une seule bobine émettrice de 16 tours en air libre. Le champ magnétique $B(p)$ à tout moment p est obtenu de la loi Biot-Savart [17] :

$$B(p) = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l_n} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3}, \quad (4.9)$$

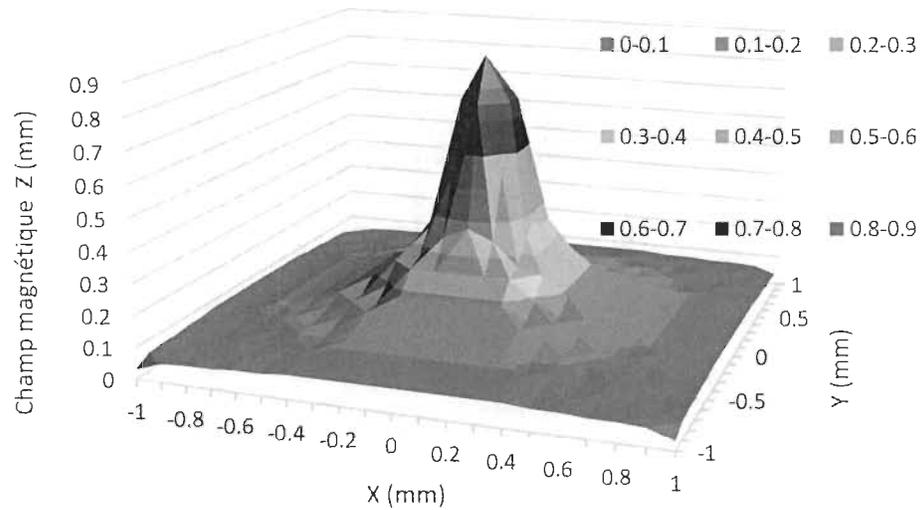
où N est le nombre de boucles dans la bobine, l_n est la boucle N , $d\vec{l}$ est l'élément infinitésimal de longueur et \vec{r} est le vecteur de l'élément différentiel $d\vec{l}$ au point p . Le changement de flux dans une bobine avec déplacement X est obtenu en intégrant le champ magnétique perpendiculaire à la boucle sur la surface de chaque boucle de la bobine, comme dans l'équation (4.10) :

$$\lambda_x = \sum_{n=1}^N \int_{A_n} B_z(s) ds, \quad (4.10)$$

où A_n est le domaine de la boucle N et B_z est la composante verticale du champ magnétique obtenue à partir de l'équation (4.12). Une intégration de surface de l'équation (4.10) est

utilisée pour calculer la composante de champ magnétique $B_z(s)$ à chaque élément de la grille. Pour un courant $I = 0,0122$ A, un angle de 90° et une seule boucle de rayon $R = 0,001$ m, le champ magnétique au centre de la boucle est $B = 0,7647 \times 10^{-5}$ tesla (0,07647 Gauss). À une distance $Z = 0,001$ m le long de la ligne médiane de la boucle, le champ magnétique axial est $B = 2,7704 \times 10^{-6}$ tesla (0,02704 Gauss).

(a)



(b)

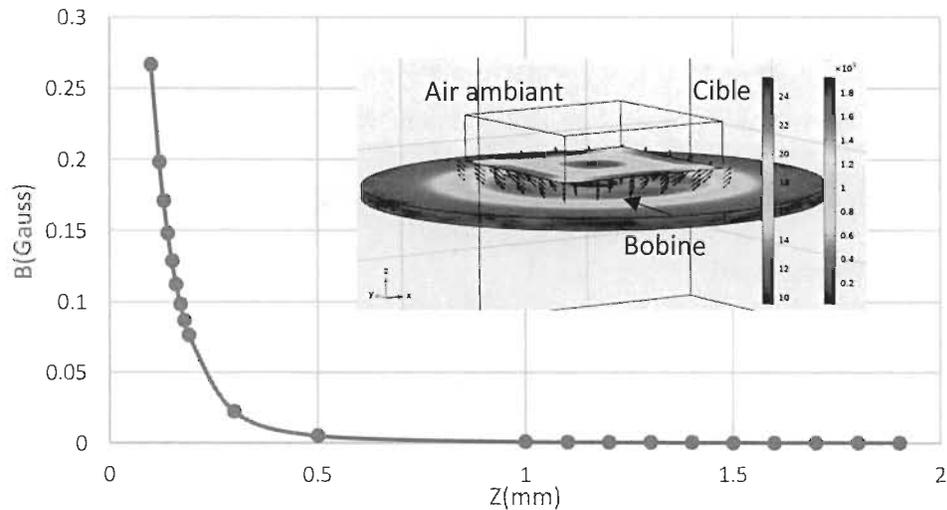


Figure 4.11 Résultats de la simulation : (a) la simulation numérique de la distribution du champ magnétique au-dessus de la bobine d'émission, (b) le champ magnétique axial à une hauteur verticale Z

Comme prévu, l'amplitude du champ magnétique est maximale au centre de la boucle et diminue vers l'extérieur. Les bobines internes ne contribuent pas de manière significative à l'inductance globale, mais elles augmentent la fréquence de résonance. Le champ magnétique obtenu à différentes hauteurs Z (mm) au-dessus de la bobine fixe est illustré à la figure 4.11b. La densité de flux magnétique B dans le domaine de la bobine (barre de couleur à gauche) et l'amplitude des courants de Foucault induits [A/m^2] dans la surface inférieure de la cible en cuivre (barre de couleur à droite) sont présentées. Les flèches noires correspondent à la densité de flux magnétique entre la bobine et la bosse. La relation entre l'intensité du champ B et la hauteur z peut être représentée sous la forme d'une loi de puissance inverse :

$$B(p) \propto \frac{1}{z^N} \quad (4.11)$$

Dans ce cas, $\ln(B(p)) \propto -N \ln(z)$ (4.12)

Un tracé de $\ln(B)$ en fonction de $\ln(z)$ est donc une ligne droite (pente moins N). D'après les résultats de la figure 4.12, N est calculé comme étant 2,7, ce qui indique que le champ diminue très rapidement avec la hauteur. La distance utilisable entre la cible et les bobines est comprise entre 0,1 et 0,3 mm.

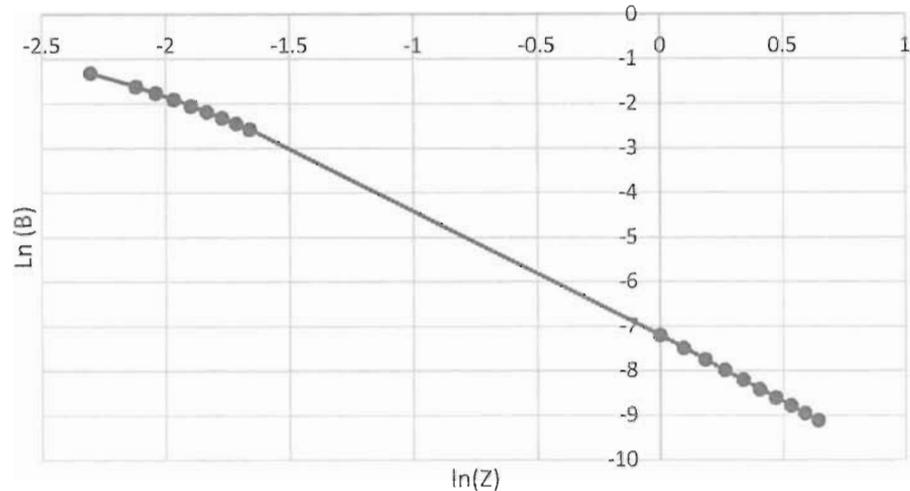


Figure 4.12 $\ln(B)$ en fonction de la distance

Le même principe de fonctionnement que celui dans la deuxième variante et le capteur angulaire plan, tel que présenté sur la figure 4.13a, est utilisé. Comme le montre la figure 4.10, la distribution du champ magnétique pour une bobine sur l'axe central est très faible. Pour cette raison, deux bobines d'excitation connectées au milieu pour obtenir une distribution de champ magnétique plus élevée, sont utilisées. Le bloc cible en cuivre, en forme de quart-de-cercle, a également un rayon plus élevé de 2,6 mm pour couvrir toutes les bobines. Les bobines du capteur SC1 et SC2 ont un enroulement dans le sens des aiguilles d'une montre, placé diamétralement opposée à un enroulement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre pour les bobines d'excitation E1 et E2. Le signal injecté dans la bobine d'excitation génère un champ magnétique variant dans le temps, qui induit une tension dans les bobines de détection entre les bobines d'excitation et de réception. Lorsque la cible se déplace au-dessus d'une bobine de détection, le couplage de flux varie et modifie la tension induite dans la bobine. Ainsi, les tensions à la sortie des bobines de détection SC1

et SC2 dépendent de la position de la cible. La tension induite dans une bobine de détection V_{SC} est :

$$V_{SC} = M \frac{dI_E}{dt} = M I_0 \omega \cos \omega t \quad (4.13)$$

où $I_E = I_0 \sin(\omega t)$, I_0 est l'amplitude maximale du courant d'excitation, ω est la fréquence d'excitation et M est l'inductance mutuelle entre les bobines d'excitation et de réception. La tension induite dans les bobines de détection V_{SC1} et V_{SC2} est maintenant définie avec l'inductance mutuelle M en fonction de la position angulaire φ de la cible conductrice. Les fonctions $M1(\varphi)$ et $M2(\varphi)$ peuvent donc être définies pour récupérer l'angle φ des amplitudes V_{SC1}^0 et V_{SC2}^0 . La tension induite dans la bobine de détection peut alors être représentée comme :

$$V_{SC1} = M_1(\varphi) \sin(\varphi) I_0 \omega \cos(\omega t) = V_{SC1}^0 \sin(\varphi) \quad (4.14)$$

$$V_{SC2} = M_2(\varphi) \cos(\varphi) I_0 \omega \cos(\omega t) = V_{SC2}^0 \cos(\varphi) \quad (4.15)$$

L'angle mesuré peut être extrait comme suit :

$$\frac{V_{SC1}}{V_{SC2}} = \frac{V_{SC1}^0 \sin(\varphi)}{V_{SC2}^0 \cos(\varphi)} = \frac{V_{SC1}^0}{V_{SC2}^0} \tan(\varphi) \quad (4.16)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{V_{SC1}}{V_{SC2}} k\right) \quad \text{Ou} \quad k = \frac{V_{SC2}^0}{V_{SC1}^0} \quad (4.17)$$

Le graphique de la figure 4.13c présente les tensions induites pour la bobine de réception SC1 et respectivement SC2 pour deux fréquences d'excitation différentes de 1 et 2

MHz et un courant dans la bobine d'excitation de 10mA. La tension induite dans les bobines de détection change au fur et à mesure que la cible tourne. La position de la cible est définie par l'angle de rotation φ . Comme les deux signaux sont à 180 degrés, un angle unique pour chaque combinaison de tensions ne peut être calculé. Cet arrangement n'est donc pas examiné plus avant.

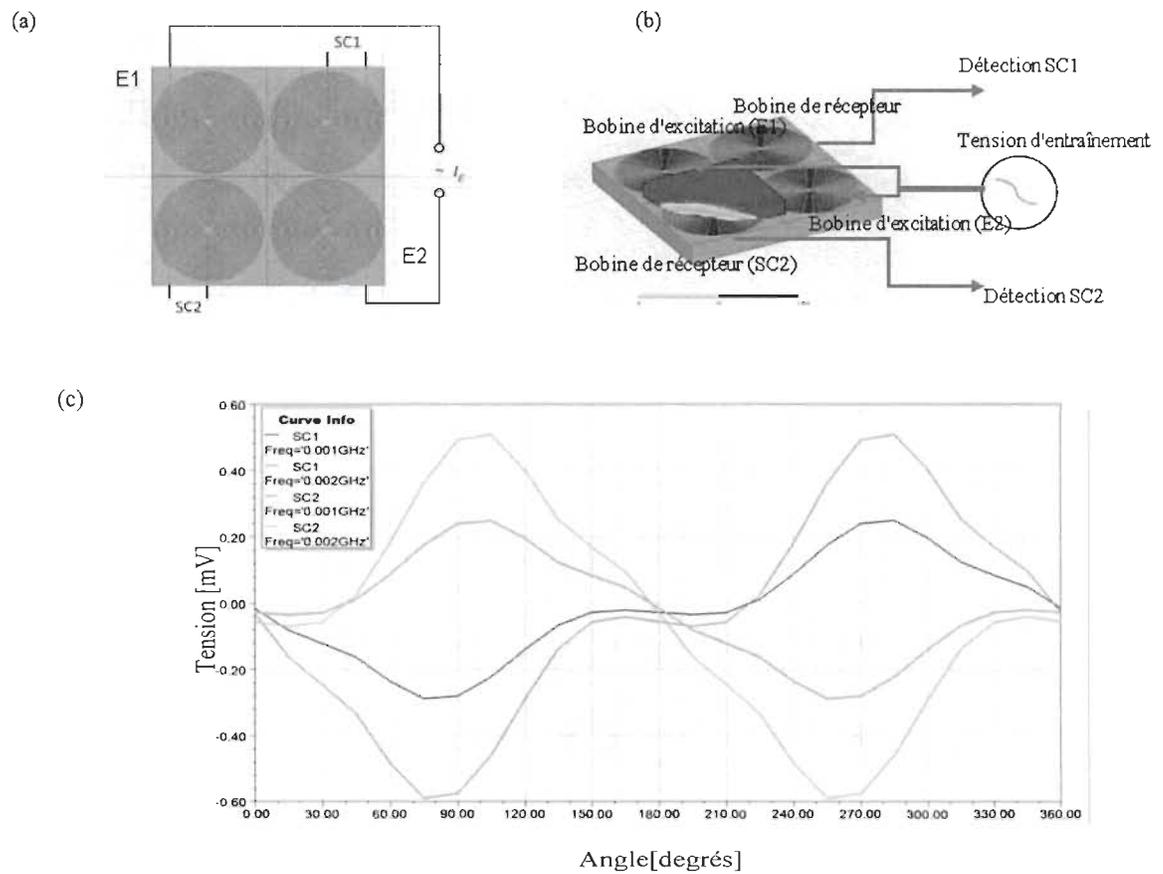


Figure 4.13 Conception du capteur et caractéristiques du troisième dispositif de capteurs (a-b) Schéma du capteur de position angulaire avec la cible rotative en cuivre, (c) Tension induite dans les bobines SC1 et SC2 liée à l'angle mécanique de la cible

4.4.3 Modèle de détection des performances avec différents formats cibles

Le capteur de position angulaire planaire proposé à la figure 4.14 utilise le même principe inductif que celui présenté à la section 4.5.2. La structure mise en œuvre comprend une bobine d'excitation modifiée à deux tours, une cible rotative circulaire en cuivre et quatre bobines de réception de la même configuration que celle de la figure 4.8. Les paramètres proposés pour la conception de capteur sont présentés dans le tableau 4-1. Les figures 4.16a et 4.16b présentent la tension de détection mesurée des bobines SC1 et SC2 aux fréquences d'excitation 1, 2 et 3,5 MHz. La bobine d'excitation à deux tours a un rayon de 2,52 mm et une largeur de cuivre de 0,3 mm. La cible en cuivre est un quart-de-cercle de 2,6 mm de rayon, situé à 0,15 mm au-dessus des bobines. La cible tourne autour de l'axe Z. La position de la cible est définie par l'angle φ . Les figures 4.16a et b montrent respectivement le quart-de-cercle et l'objectif des trois quarts. La forme d'onde produite par la cible des trois quarts-de-cercle présente une transition plus douce vers le zéro et est donc le modèle préféré. L'algorithme suivant est proposé afin d'extraire l'angle mesuré. Tout d'abord, les courbes mesurées sont décalées et mises à l'échelle, comme le montre la figure 4.14c. Les courbes normalisées pour 3,5 MHz sont maintenant désignées comme SC1SN et SC2SN. Ensuite, la fonction $\text{atan2}(\text{SC1SN}, \text{SC2SN})$ est calculée. Enfin, une approximation *spline* est créée (Figure 4.14d). Les résultats prévus en utilisant une régression linéaire (décalage de $2,5^\circ$ et pente de 1,0142) montrent un écart-type d'erreur résiduelle de 7,8 degrés.

Tableau 4-1 Paramètres proposés pour la conception des capteurs

Élément	Paramètre	Valeur	Unité
Bobine d'excitation	Diamètre extérieur	5.04	mm
	Diamètre intérieur	4.98	mm
	Profondeur des traces d'or	40	µm
	Nombre de tours	2	
	Fréquences d'excitation	3.5	MHz
Bobine de détection	Diamètre extérieur	2	mm
	Profondeur des traces d'or	40	µm
	Nombre de tours	16	
	Rayon de trois quarts de cercle	2.6	mm
Cible du cuivre	Rayon de trois quarts de cercle	2.6	mm
	Espacement entre les capteurs et les cibles	0.15	mm
	Épaisseur cible	0.3	mm

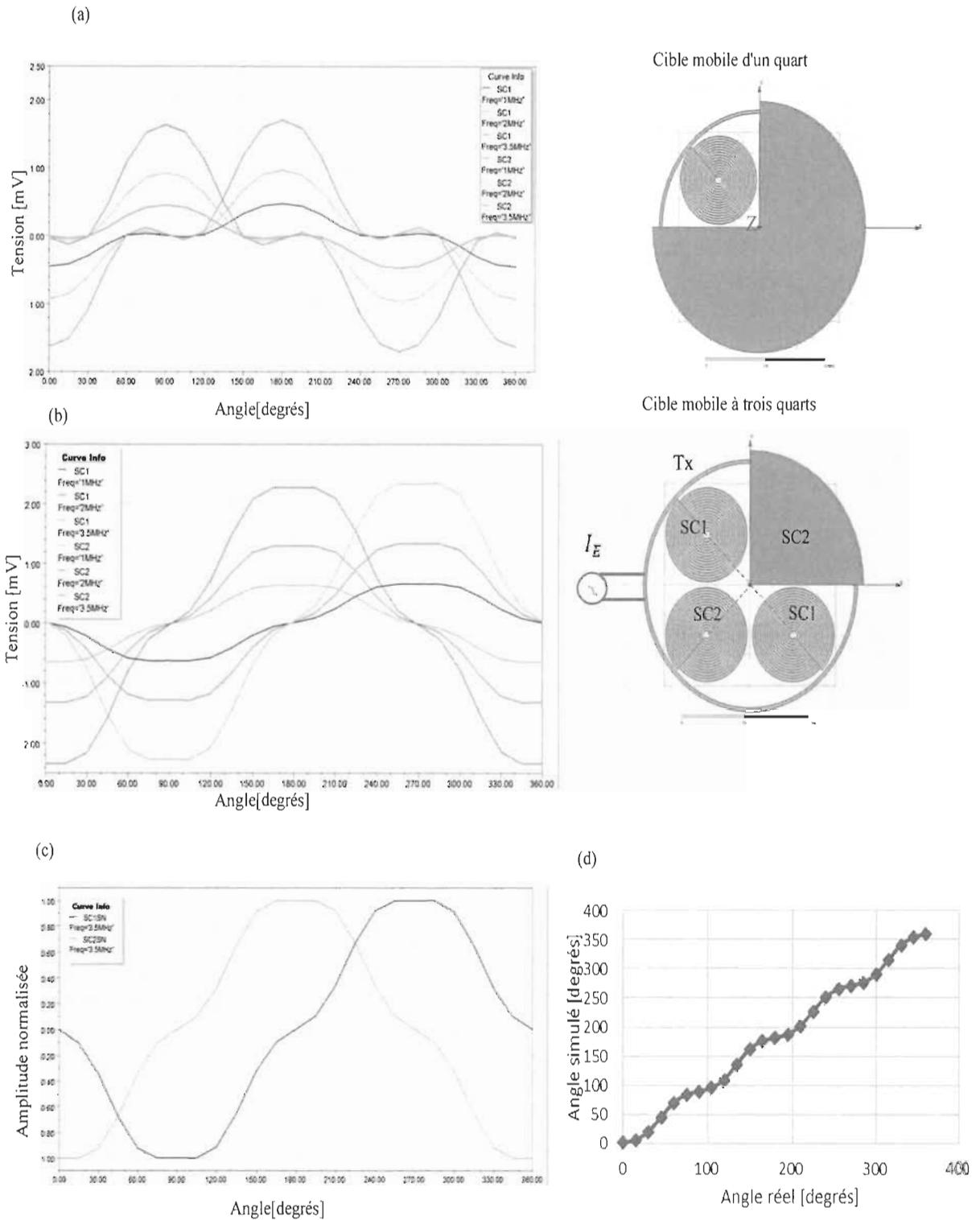


Figure 4.14 Tension de sortie du capteur avec différents angles de secteur avec (a) une cible de 1/4 de cercle et (b) une cible de 3/4 de cercle. (c) tension induite normalisée, et (d) mesure de l'angle prévu.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les principes de fonctionnement des capteurs inductifs sont abordés, car ils s'appliquent à une structure réalisable pour le capteur expérimental proposé. Divers modes de fonctionnement et structures alternatives sont ensuite modélisés et des prédictions théoriques de performance établies afin de sélectionner un candidat final pour la réalisation physique et les tests pratiques.

L'utilisation d'un micromiroir et la lévitation sont avantageuses d'un point de vue théorique. Une tension jusqu'à 5 V permet une force verticale jusqu'à $0,02 \mu\text{N}$. L'avantage de cette élévation est que la cible en mouvement ne subira pas de défaillance mécanique. Son inconvénient est la vibration qui peut perturber la sortie du signal et la position mesurée.

En comparaison avec d'autres conceptions de capteurs inductifs microélectroniques sans contact [17] [23] [77-79] (Tableau 4-2), on ne prévoit pas de diminution significative des capacités de détection angulaire malgré la réduction notable de la taille physique. Les résultats montrent une régression linéaire avec un décalage de $2,5^\circ$ et un *offset* de 1,0087 (R^2 99,5 %) avec un écart-type d'erreur résiduelle de $7,8^\circ$ (2,16 % de la pleine échelle). Certains capteurs existants à une échelle beaucoup plus grande, prétendent atteindre des précisions approchant 1,1 % [20]. La précision des mesures diminue au fur et à mesure que les dimensions physiques du capteur diminuent elles aussi. On constate une légère diminution des capacités de détection angulaire malgré la réduction significative de la taille physique.

Tableau 4-2 Comparaison avec des recherches pertinentes

Système de détection	Caractéristiques du capteur	Gamme évolutive	Contact électrique avec les éléments mobiles	Phénomènes de lévitation	Pourcentage de non linéarité	Géométrie du capture
Présent travail	Linéaire	Possible	Non	Oui	Jusqu'à ± 0.5	4.3 mm² Un quart-de-cercle de 2,6 mm de rayon
Transformateur différentiel variable linéaire planaire pour la détection de déplacement [17]	Linéaire	Non	Oui	Non	0.9	114 mm x 114 mm 196 cm ² (espace) 56 mm (gamme de détection)
					0.8	140 mm x 140 mm 196 cm ² (espace) 70 mm (gamme de détection)
Bobines planaires [23]	Non linéaire	Non	Oui	Non	Non applicable	62.3 cm ² (espace) 8 mm (gamme de détection)
Bobine avec guide de modèle [77]	Linéaire	Non	Non	Non	Jusqu'à ± 1	100 mm (gamme de détection) 320 cm ³ (volume)
Capteur de position inductif sans fer [78]	Linéaire	Non	Oui	Non	Non applicable	50 mm
Capteur de courant de Foucault [79]	Non linéaire	Non	Non	Non	Non applicable	3 mm

Chapitre 5 - Études expérimentales

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, les études expérimentales pour la mise en œuvre de capteurs de position inductifs seront décrites. Afin de pouvoir effectuer des études expérimentales, la méthode suivante a été choisie pour valider ce travail :

- capacité de fabrication d'un capteur inductif avec la technologie des microsystemes;
- expérimenter les capteurs industriels de position en environnement réel et les comparer avec les premiers résultats expérimentaux obtenus;
- faire des modifications paramétriques et architecturales;
- utiliser les méthodes de détection de position et les implémenter à un capteur prototype;
- comparer les résultats théoriques avec ceux du test en environnement réel.

5.2 Capacité de fabrication de la technologie des microsystemes

Il s'agit d'envisager l'implantation d'un capteur inductif. Il est prévu de créer des bobines miniaturisées. Le matériel doit être un métal conducteur électrique afin de produire

un champ magnétique. Pour organiser une configuration expérimentale, différents fabricants supportant les travaux de recherche scientifique ont été contactés (tableau 5.1).

Tableau 5-1 Liste des entreprises contactées ayant une solution acceptable

Fabrication académique	Technologie	Soutien de l'équipe de fabrication universitaire
CMC Microsystems (Canada)	TSMC et MEMS	Uniquement architecture spéciale avec long processus d'application
MEMSCAP The Power of a Small World	Piezoelectric MEMS technologie	Processus de conception et de fabrication MEMS <i>via</i> CMC Microsystems Espace de silicium de 9 x 9 mm.
Epectec/ JLCPCB/ PCBWay/ 3dphotonix/ Sunstone	Fournir PCB et Flex services	Impossible de fournir la taille requise Le matériau standard pour les PCB est le cuivre stratifié en fr4 (fibre de verre renforcée de résine)
Nanoshift, LLC	MEMS et semi-conducteur	Seulement pour un plus grand nombre de pièces
Microfluidicfoundry	Fournir des services de microfabrication	Incapable de fournir une structure complexe

Toutes les demandes étaient prohibitives pour les petites quantités requises. En effet, les procédés de fabrication exigeaient la conception de structures spécifiques et des quantités minimales de commande de 1 000 ou plus.

Cependant, un fabricant des inducteurs discrets à film mince destinés à être utilisés dans des applications de télécommunication hybrides, a pu être identifié (PICONICS *Micro-Electronic inductors*, USA). Ce film mince en spirale d'or (SP16-80-ABW; A = alumina ; B = 0.254 millimètre d'épaisseur de substrat ; W = or sur un côté) est déposé sur une puce en céramique. Cette configuration peut être utilisée lorsque la valeur d'inductance faible (219 nH) est exigée [80]. Ces conducteurs en spirale sont largement utilisés dans les éléments résonnants des circuits à micro-ondes. Dans cette recherche, ce conducteur sera utilisé comme récepteur et émetteur de champ magnétique. Un inconvénient mineur de cette géométrie est que l'or conduit au contact central peut varier en longueur et causer un petit changement de valeur d'un circuit à l'autre.

5.3 Configuration expérimentale pour influencer le fonctionnement des bobines

L'expérimentation d'un capteur industriel afin d'être en mesure de cerner les erreurs et la limite des résultats est essayée. Cette étape est réalisable, mais elle comporte des limites. Les informations existantes sur ces capteurs sont peu nombreuses. En raison de leur sensibilité, il y avait un grand intérêt à tester ces capteurs.

La configuration expérimentale initiale consiste à tester le capteur de position inductif (ZMID5201 *Inductive Position Sensing Evaluation Board*, *Integrated Device Technology* – IDT) en mode de fonctionnement normal (figure 5.1). Le capteur de position inductif (rotatif 360° ZMID5201) génère un champ magnétique dans la zone de la bobine d'émission qui est capté par la bobine de réception. L'élément de détection de position inductif est un ensemble

de bobines comprenant une bobine de transmission et deux bobines de réception couvrant les champs magnétiques requis. Les deux bobines du récepteur sont conçues avec un déphasage et la bobine de l'émetteur les entoure. La cible est placée au-dessus d'elles et se déplace sur un plan contenant toutes les bobines. La cible génère une tension secondaire plus faible. La fréquence de l'oscillation est réglée par la capacité C5 (820 pF) et la résistance R5 (2 k Ω). Les exigences de fréquence d'oscillation sont de 2,2 à 5,6 MHz. IDT fournit un outil logiciel pour soutenir la conception de bobines [81] [82]. Le capteur utilise la technologie de la compensation d'erreur d'angle dynamique et l'immunité de champ magnétique.

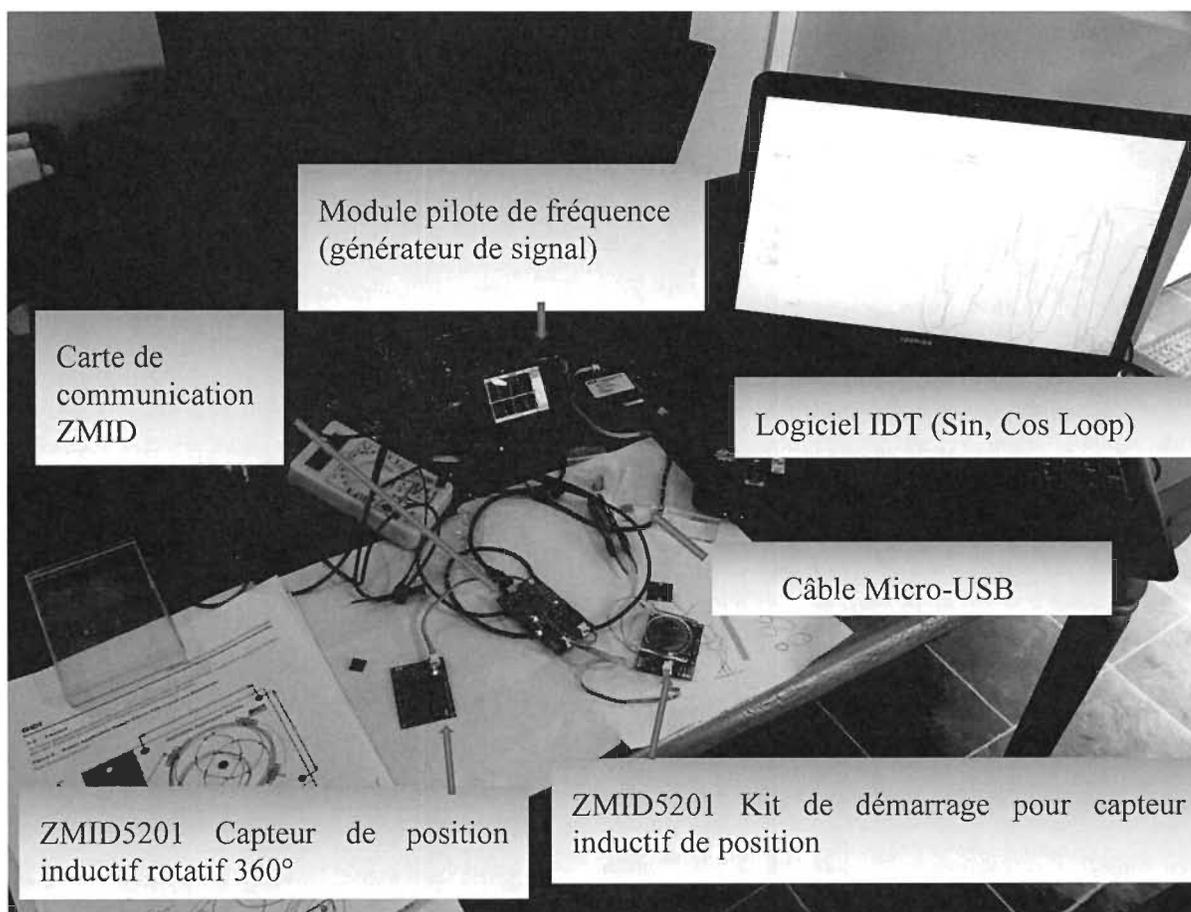


Figure 5.1 Montage expérimental d'un capteur inductif industriel

Un bref test de fonctionnement est effectué pour mesurer le courant et procéder à la vérification du fonctionnement. Après les tests des composants, le dispositif testé doit généralement répondre à la classe fonctionnelle, ce qui signifie que le dispositif doit fonctionner comme prévu et sans aucune contrainte (figure 5.2).

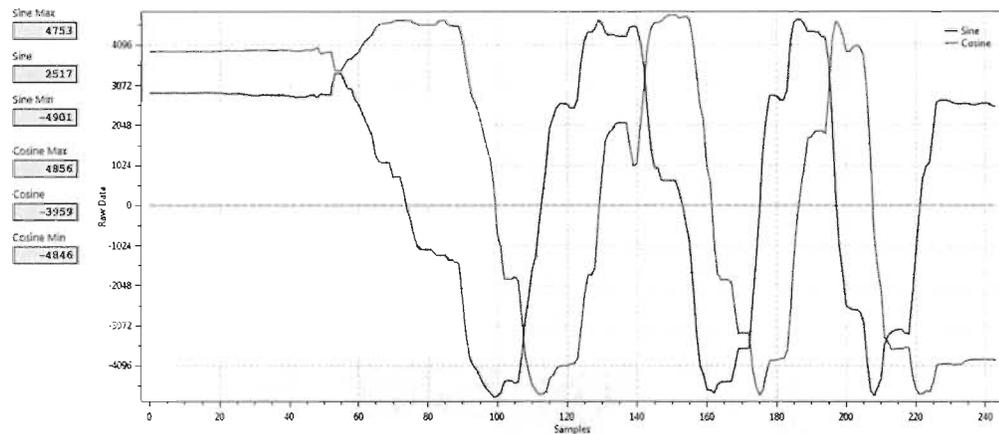


Figure 5.2 Sortie sinusoïdale et cosinus du capteur ZMID5201

L'écart d'air entre la cible et le circuit imprimé (où les bobines sont intégrées) influence le bon fonctionnement des bobines. Le module ZMID5201 a été mesuré pour évaluer les performances de détection de précision à un espace d'air. Pour cette mesure, La cible est initialement élevée à un entrefer de 1,5 mm. La distance entre les bobines et la surface cible dévie la sortie numérique position précise. La résolution de position de la bobine réceptrice n'est pas linéaire, car le capteur inductif est sensible à l'écart d'air (figure 5.3).

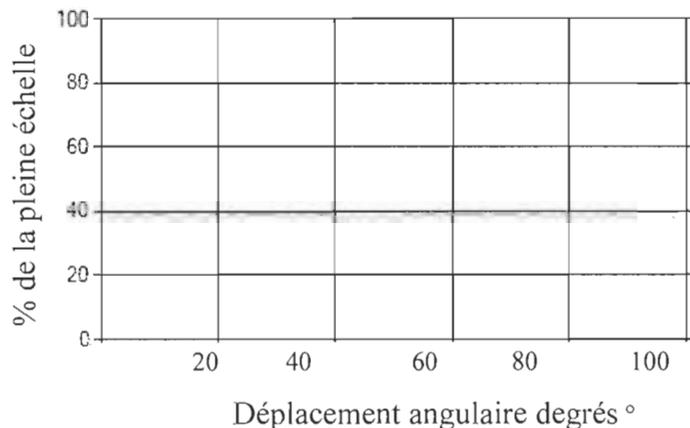


Figure 5.3 Mesure de sortie influencée par l'écart d'air

La structure de cette configuration expérimentale est composée de deux bobines non connectées. Le capteur inductif produit à l'extrémité de la tête de détection des bobines un champ magnétique oscillant. Lorsqu'un deuxième champ magnétique oscillant pénètre dans ce champ, celui-ci est perturbé le champ oscillant. L'inductance mutuelle avec les deux bobines dévie la position précise (figure 5.4). La résolution de position de la bobine de réception inductive a été modifiée, car un émetteur externe de champ magnétique a été injecté à la bobine de l'émetteur existant.

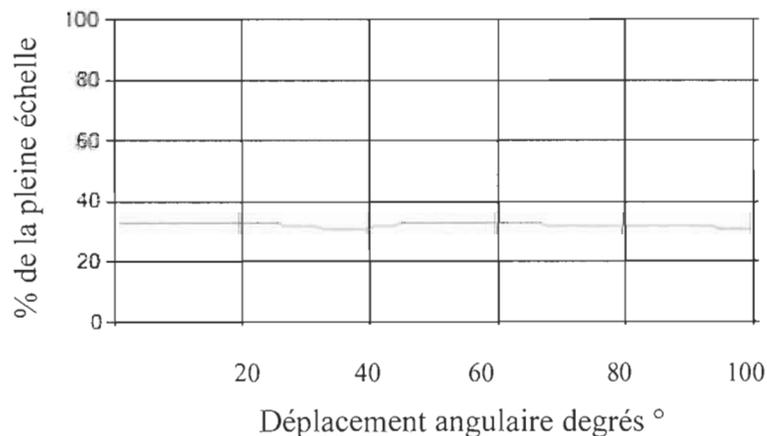


Figure 5.4 Sensibilité au bruit magnétique injecté

5.4 Configuration expérimentale utilisant l'émetteur

On propose est d'intégrer une nouvelle solution avec un capteur inductif sans contact, tout en utilisant une série de micro-inducteurs.

5.4.1 Montage en surface

Huit inducteurs ont été attachés (Spiral Chip SP16-80-ABW) à un adaptateur de circuit imprimé (Surface Mount Board Epoxy Glass 37 x 21,5 mm FR4, numéro de pièce : RE931-05ST, Roth Elektronik). De l'époxy à polymérisation lente a été utilisé afin que le placement permette un ajustement. Il y a un petit déversement de colle sur l'inducteur qui a été placé en premier et qui constitue donc la première tentative.

Le laboratoire d'instrumentation de Birmingham pour la physique des particules et ses applications (BILPA, Université de Birmingham, Royaume-Uni) a accompagné la réalisation de la liaison de fil et la photographie de l'assemblage. Une soudure à coin de fil fin (Hesse & Knipps BondJet 820) configurée pour un fil d'aluminium de 25 microns a été utilisée par câble thermosensible avec un fil d'aluminium de 0.0254 mm à des plots de connexion de 0.1016 mm de diamètre. Le microscope optique (microscope numérique vhx Keyence et microscope stéréo Olympus sz61) ayant une grande profondeur de champ et des capacités de mesure avancées a été utilisé pour l'inspection et la photographie (figure 5.5).

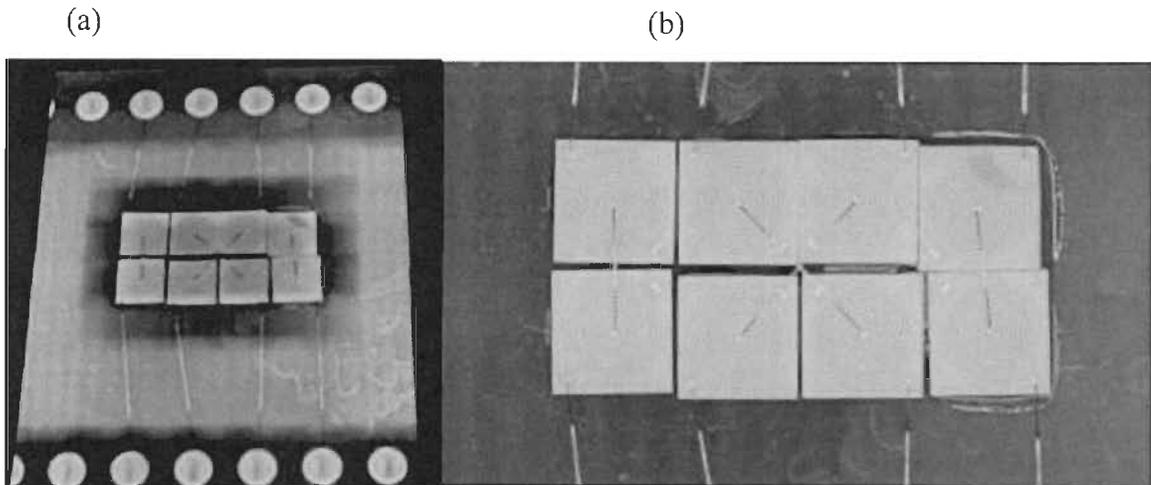


Figure 5.5 (a) Montage des pièces sur un plan au sol avec de l'époxy non conducteur
 (b) Microcâblage thermosensible à l'aide d'un fil d'aluminium de 25.4 micromètres avec des plots de connexion de 0.1016 mm de diamètre

Une résistance des deux bobines d'inducteur connectées en série de $20,8 \Omega$ avec le multimètre (M-830B, Mastech) a été détectée. Pour pouvoir conduire la bobine de l'émetteur avec le générateur de signal à oscilloscope intégré (Digital Storage oscilloscope DSO DS212, MINIWARE), une résistance avec 390Ω (Série Axial Fixed Resistor 390Ω , RS PRO) a été utilisée (figure 5.6). La sortie du générateur d'impulsions est reliée par un câble coaxial à la pince de couplage, dont la sortie est connectée à l'oscilloscope avec un câble coaxial.

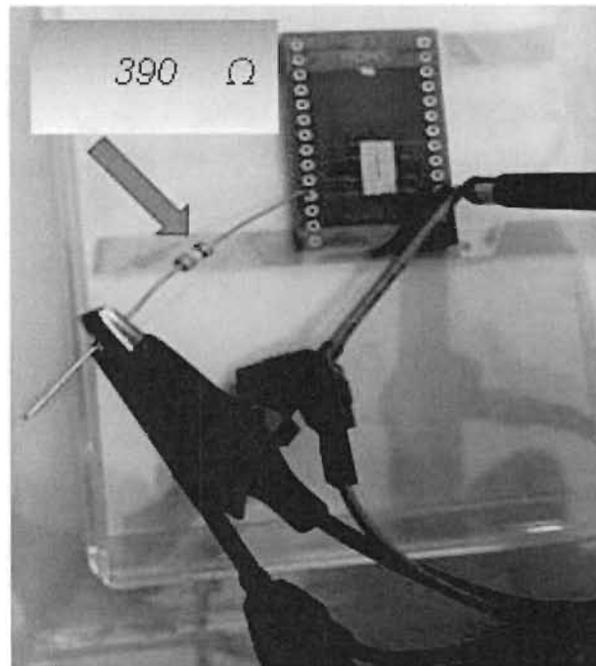


Figure 5.6 Résistance de série pour faire correspondre l'impédance de l'émetteur au générateur de signaux

La résistance totale est de 410.8 Ohms (390 Ohms résistance supplémentaire et 20.8 Ohms résistance de bobine). Le courant est de 12.17 milliampères (mA) (déviations de voltage de 5 volts par une résistance de 410.8 Ohms).

5.4.2 *Effet de la position verticale au champ magnétique*

Afin de mieux comprendre les signaux obtenus du résultat de simulation numérique précédente, il a été décidé d'étudier les champs magnétiques provenant des bobines de l'émetteur. Ces champs ont été examinés à l'aide d'un oscilloscope dédié, relié à une sonde construite sur mesure et fabriquée avec une bobine à montage en surface.

Tout d'abord, le champ produit par le capteur de position inductif (ZMID5201, IDT) a été examiné et s'est avéré produire une amplitude maximale du signal de seulement 20 mV (figure 5.7 (a)). L'expérience a ensuite été modifiée pour utiliser les bobines de l'émetteur fabriqué. Celles-ci ont été connectées à la résistance avec 390 Ω , afin de pouvoir piloter la bobine émettrice avec le générateur de signal de l'oscilloscope. L'expérience réalisée avec l'émetteur fabriqué a révélé que le niveau du signal reçu par les bobines de l'émetteur n'était pas suffisant pour être mesuré. L'oscilloscope a démontré que l'émetteur fabriqué fournissait un signal très faible et qu'il n'était pas possible de lire le champ magnétique créé (figure 5.7 (b)).

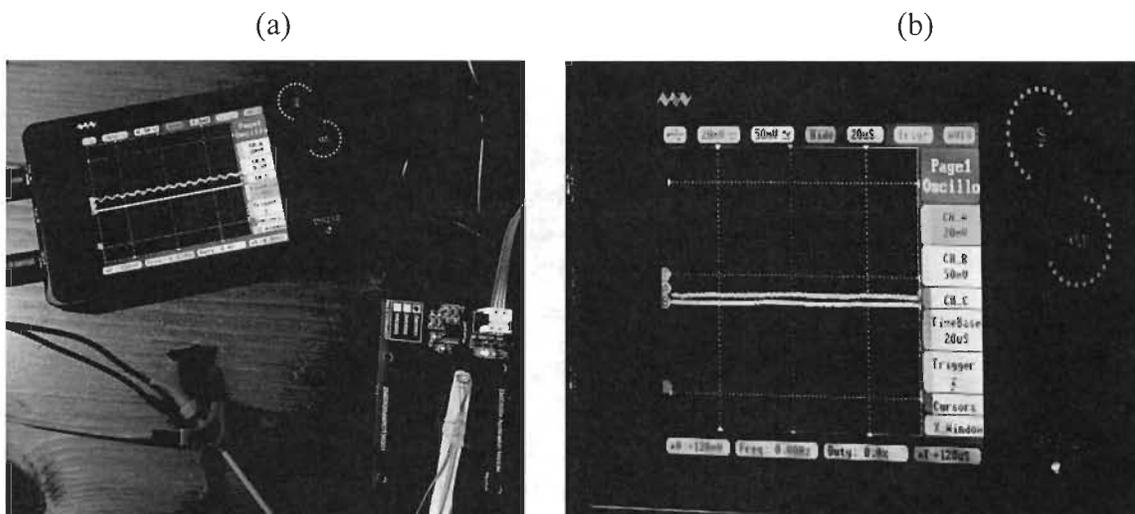


Figure 5.7 (a) Mesure du champ magnétique de l'émetteur IDT, (b) Mesure du champ magnétique de l'émetteur fabriqué

Afin de garder la sensibilité de mesure aux interférences faibles, un système de mesure est introduit. La configuration expérimentale à l'aide de l'émetteur fabriqué a révélé que le niveau de réception du signal des bobines de réception n'était pas suffisant pour être mesuré. La configuration expérimentale a été modifiée pour se substituer à une bobine de

transmission alternative obtenue à partir d'un capteur de position inductif ZMID5201. Cela a produit un signal reçu capturé par l'oscilloscope (figure 5.8).

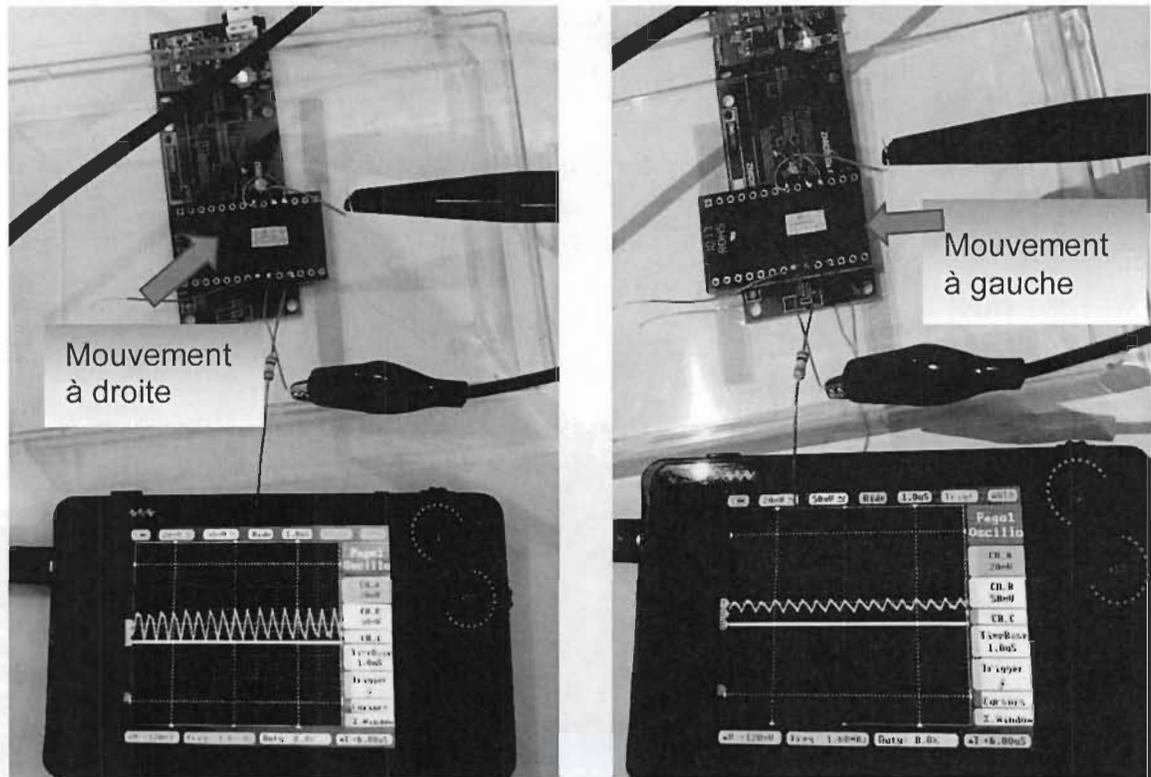


Figure 5.8 Signal de récepteur dépendant de la position

5.5 Montage expérimental à l'aide de la bobine fabriquée

À cette étape du doctorat, le module électronique ZMID5201SKIT a été utilisé pour tester le signal de sortie après des modifications au capteur. Il s'agit d'expérimenter la partie inductive du capteur. Ce dernier est conçu de telle façon que la forme d'inductance contre le déplacement angulaire est sinusoïdale. En raison de cette caractéristique, la position est

obtenue facilement à partir de l'inductance mesurée, ce qui n'est pas le cas pour la majeure partie des capteurs à base de bobine plate. Le capteur proposé possède une sensibilité très basse, à défaut d'avoir un alignement vertical et angulaire. Un plan de mesure à base de détecteur sensible est employé pour mesurer l'inductance.

Les bobines de réception fabriquées ont été reliées au circuit électronique d'origine à la place des bobines de réception imprimées. Le signal obtenu du récepteur fabriqué a été examiné à l'aide d'une application logicielle dédiée. Le récepteur fabriqué fournissait une sortie dépendante de la position. La distance entre le membre du noyau et la surface de la bobine est maintenue faible (moins de 0,5 mm) pour obtenir une sensibilité élevée. L'électrode de réception est placée à l'intérieur du bord de l'électrode de l'émetteur de manière à minimiser le couplage direct entre les deux électrodes à travers la couche de PCB. Le module électronique ZMID5201STKIT comprend également une carte de communication nécessaire pour assurer l'interface avec le logiciel de contrôle et une sortie analogique (figure 5.9).

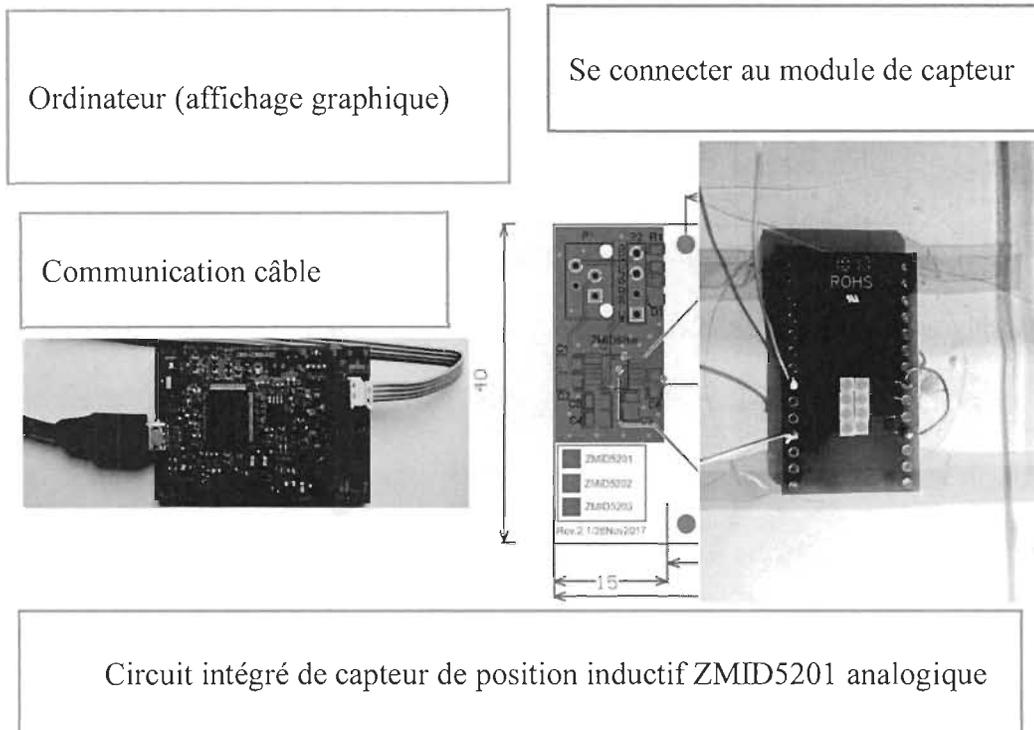


Figure 5.9 Configuration expérimentale utilisant le module électronique ZMID5201SKIT avec le récepteur à micro-inductance

Le fonctionnement global du capteur est vérifié et validé (figure 5.10). Les étapes suivantes sont appliquées :

- placer le capteur en mode de fonctionnement et attendre une durée minimale de 2 minutes pour atteindre la stabilisation;
- valider les outils de surveillance générant des défauts;
- vérifier l'amplitude des impulsions;

- surveiller et enregistrer l'amplitude des lignes de capteurs;
- enregistrer les données du capteur pendant le test.

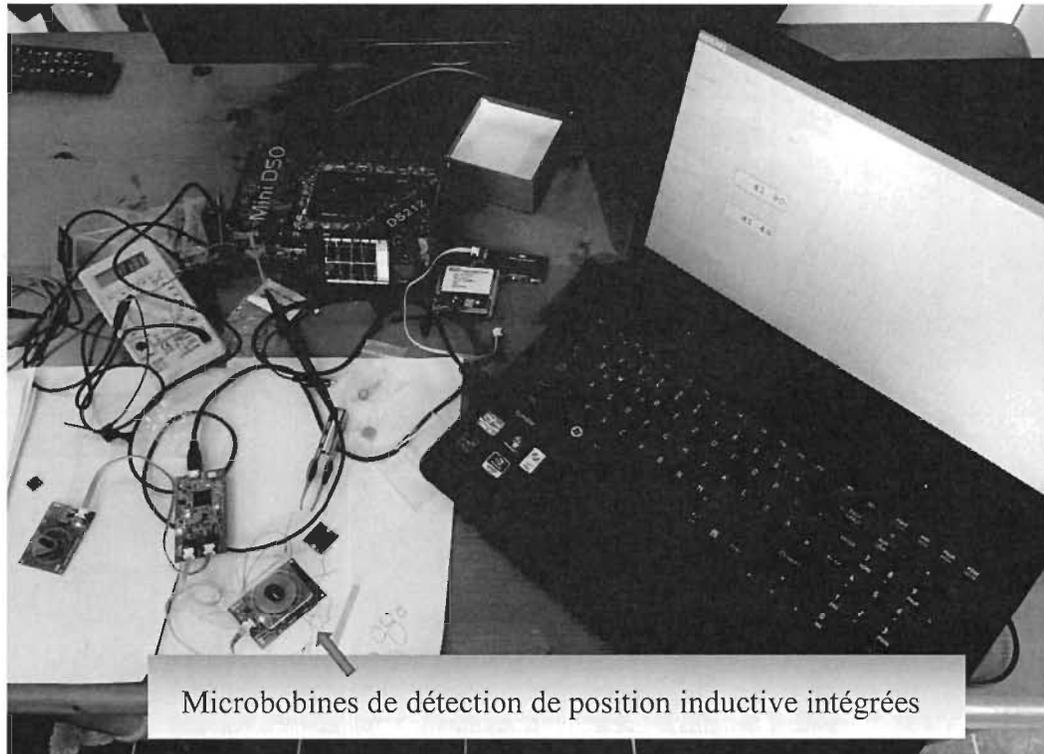


Figure 5.10 Configuration expérimentale utilisant la bobine émettrice alternative avec le récepteur à micro-inductance

L'inversion individuelle de la polarité du signal du récepteur permet de faire varier l'angle spatial d'une plage de 0 à 90° à une plage de 0 à 360°. Trois scénarios différents sont possibles :

- dénominateur de *atan* inversé : la sortie a un décalage de 90°;

- signe inversé des deux récepteurs : cela correspond à un déplacement de 180° dans le système de coordonnées;
- numérateur de $atan$ inversé : la sortie a un décalage de 270° .

Un algorithme numérique (*Coordinate to Rotation Digital Computer* - CORDIC) convertit les coordonnées rectangulaires en coordonnées polaires et ne nécessite aucune multiplication. Cette technique pour mesure l'angle d'un point, en choisissant le point (X, Y) comme centre de rotation :

$$\tan(\varphi) = \frac{X \times \sin(\varphi)}{Y \times \cos(\varphi)} \quad (5.1)$$

$$\arctan\left(\frac{X \times \sin(\varphi)}{Y \times \cos(\varphi)}\right) = \arctan(\tan(\varphi)) = \varphi \quad (5.2)$$

$$Mag = \sqrt{(X \times \sin(\varphi))^2 + (Y \times \cos(\varphi))^2} \quad (5.3)$$

Pour tester le capteur, le noyau sera déplacé par étapes et la sortie sinus et cosinus sera notée pour chaque position. La valeur de $\tan(\varphi)$ est clairement unique pour chaque position de l'émetteur noyau. Un graphique montrant la courbe sinusoïdale ajustée et l'erreur dans la mesure par rapport au déplacement enregistrée à partir du prototype développé, est tracé (figure 5.11).

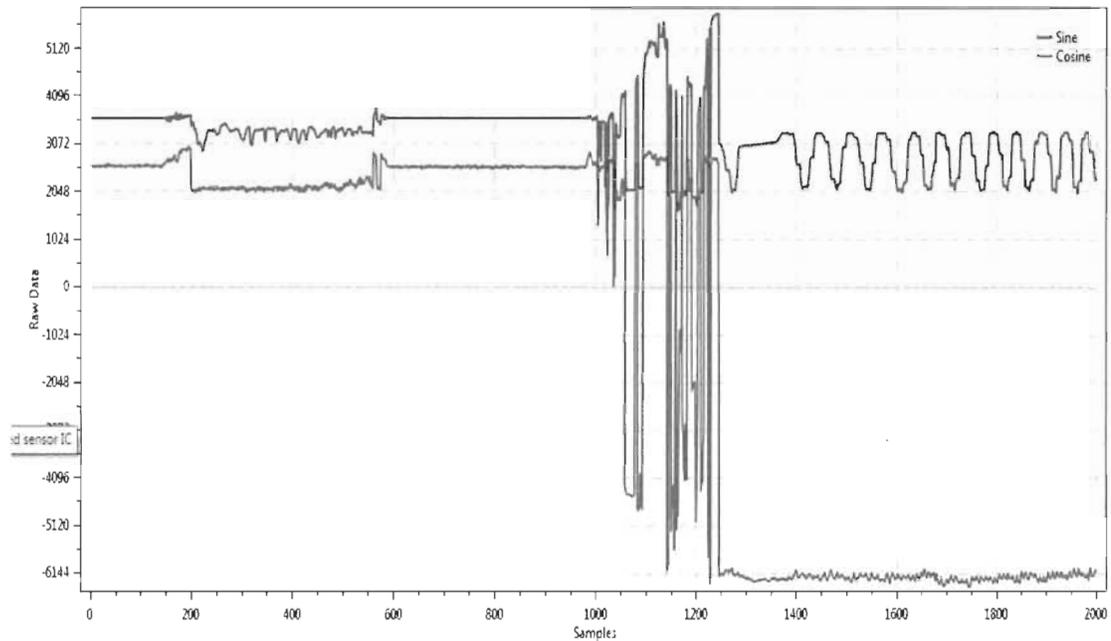


Figure 5.11 Signaux d'entrée sinus et cosinus basés sur l'angle de rotation (degrés électriques)

Entre 0 et 1 000, aucune cible n'était présente. Entre les échantillons 1 000 et 1 250, la cible était attachée. Il convient de noter qu'à l'échantillon 1 250, la connexion électrique à la deuxième bobine du récepteur (trace verte) s'est rompue mécaniquement. Entre 1 250 et 2 000, la cible était présente et en mouvement. Le signal de la première bobine de réception (trace rouge) varie en fonction de la position cible comme prévu. Le signal de la deuxième bobine de récepteur ne le fait pas en raison de la défaillance mécanique.

La polarité du champ magnétique dépend de la direction du courant dans la boucle. Le sens des aiguilles d'une montre (CV) et le sens contraire des aiguilles d'une montre (CCW) déterminent la polarité de la tension dans chaque boucle (cos, sin). Les modèles d'onde sinusoïdale et cosinus se combinent pour générer les sorties proportionnelles distinctes

lorsque le marqueur magnétique se déplace de manière rectiligne au-dessus du capteur (figure 5.12). La position de la cible est indiquée par la phase différentielle et l'amplitude des signaux mesurés sur les bobines du récepteur.

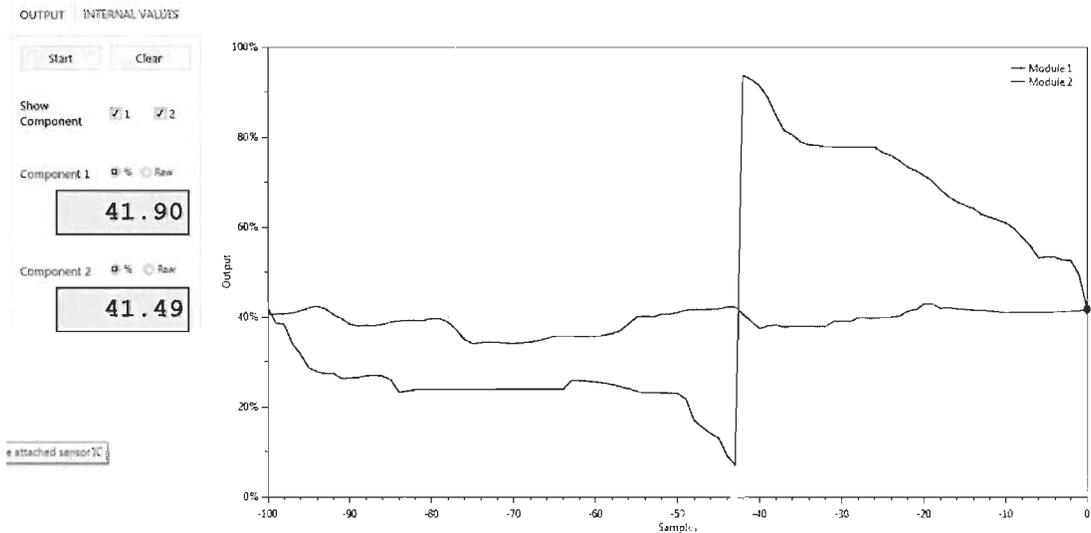


Figure 5.12 *Arctan* en fonction de l'angle de rotation (degrés électriques)

À des fins de comparaison, le tracé bleu (module 1) indique la sortie de position conditionnée obtenue à l'aide du capteur de position inductif rotatif ZMID5201 à 360°. Le tracé en violet (module 2) indique la sortie de la position conditionnée des récepteurs fabriqués. Malheureusement, cela ne montre pas une bonne corrélation avec la position de la cible en raison de la défaillance de fil d'aluminium de 25 microns.

5.6 Fabrication de capteur

Le capteur proposé a été fabriqué à l'aide de composants commerciaux standards, facilement disponibles et couramment utilisés dans la fabrication des téléphones mobiles.

Ces composants (fournis par Piconics Inc. USA) ont été assemblés manuellement pour voir produire le capteur complet qui fait l'objet de cette thèse.

Les éléments de fabrication du capteur de position angulaire inductif proposé sont présentés à la figure 5.13. Le capteur de position a été développé en utilisant un ensemble de bobines d'or en spirale déposées sur des substrats céramiques et une cible conductrice en cuivre. Ces bobines sont fabriquées commercialement par Piconics. L'élément inductif de détection de position comprend un ensemble de quatre bobines au milieu d'une bobine émettrice circulaire. Les conducteurs sont connectés en diagonale (sans connexion au centre, là où les fils de liaison se croisent). La polarité des bobines de détection dépend de la direction du courant dans chaque boucle. Pour cette raison, la bobine de détection a un enroulement dans le sens des aiguilles d'une montre placée diamétralement opposée à un enroulement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre des bobines de réception connectées.

Chaque bobine de détection a une épaisseur de la trace dorée de 40 μm . Le diamètre intérieur de la bobine est de 0,1 mm et son diamètre extérieur de 2 mm. Le substrat des bobines de détection est de 2,03 x 2,03 mm et d'une épaisseur de 0,3 mm avec 16 tours. La cible conductrice du capteur est un cercle de trois quarts-de-cercle de 2,6 mm de rayon et de 0,3 mm d'épaisseur en cuivre et est située à 0,15 mm au-dessus des bobines. Afin de garder la sensibilité de capteur aux interférences faibles, la bobine d'excitation a un rayon de 2,52 mm et une épaisseur de cuivre de 0,3 mm. La configuration de bobine de transmission produit un signal capturé par l'oscilloscope.

La cible conductrice de trois quarts-de-cercle est placée sur le substrat du capteur et est déplacée dans un mouvement rotatif au-dessus de toutes les bobines. Le substrat du capteur a été fixé à un adaptateur de plaque stratifiée en fibre de verre. Une résine époxy à polymérisation lente a été utilisée pour ajuster l'emplacement des bobines. De plus, une soudure en coin à fil mince a également été utilisée.

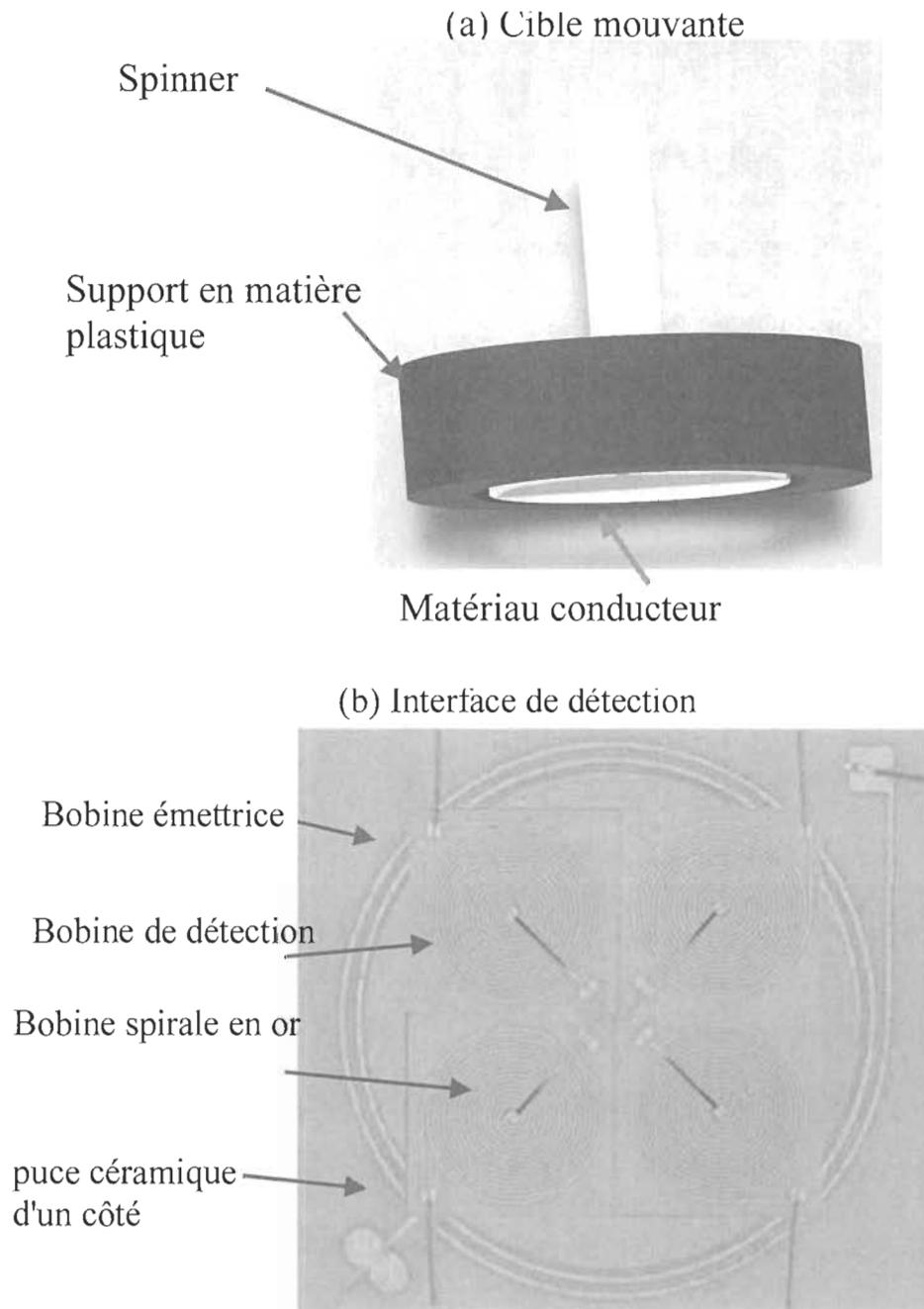


Figure 5.13 fabriqué du capteur inductif de position angulaire constitué (a) d'un bloc cible en cuivre et (b) de bobines de détection en or en forme de spirale

5.7 Installation expérimentale

Le dispositif de test de la figure 5.14 a été utilisé pour caractériser le capteur de position inductif rotatif sans contact. Le capteur a été fixé sur l'étage de positionnement de la plate-forme de rotation. Afin d'obtenir des résultats expérimentaux probants, les axes de rotation de la plate-forme de rotation et le capteur d'angle sont soigneusement alignés pour éviter toute erreur due à l'excentricité. La plate-forme d'essai de positionnement intègre un capteur angulaire optique calibré en laboratoire qui fournit une mesure de la position angulaire réelle avec une précision de 15 minutes d'arc.

Le banc d'essai a été démagnétisé. L'expérience a été réalisée à température ambiante. Aucune précaution particulière n'a été prise pour éliminer les champs électromagnétiques parasites, sauf que la configuration de test était située sur un plan de masse mis à la terre.

Le déplacement angulaire appliqué au capteur est contrôlé par un contrôleur de moteur à basse tension du commerce (RS Components 244-2686 PRO, DC Motor Controller). Les signaux de position non conditionnés du capteur peuvent être mesurés à l'aide d'un oscilloscope commercial (Tektronix, MSO3034 - MSO / MDO).

Les bobines de réception fabriquées ont été connectées à une puce électronique de réception ZMID5201 et la sortie a été examinée en utilisant un logiciel pour calculer la position. Une rotation de la cible a été exécutée et les amplitudes de sortie pour chaque

position ont été notées. La bobine émettrice fait partie du circuit oscillant qui est stimulé par un générateur de signaux haute fréquence embarqué.

Le schéma de l'interface du capteur inductif est résumé dans le tableau 5-2. Le circuit d'émission se compose d'un circuit LC qui est formé par l'inductance de la bobine d'émission et d'un condensateur sur la carte de circuit imprimé. La bobine émettrice est connectée entre EP et EN. La fréquence de résonance est ajustée avec un condensateur CT parallèle entre EP et EN. Les bobines de réception sont connectées entre R1 et R2 respectivement. La broche SOUT est la sortie analogique pour la connexion externe à l'ordinateur. La broche VDDE est la tension d'alimentation externe avec le condensateur de découplage C_{VE} recommandé. L'inductance du fil de liaison est de 2,5 nH avec une autorésistance de 0,1 Ohms. Pour des raisons de simplicité, l'inductance et la résistance du fil de liaison ont été intégrées dans les paramètres respectifs des bobines. Le capteur génère un champ magnétique dans la zone de la bobine de l'émetteur qui est capté par les bobines du récepteur. La cible génère une faible tension secondaire dans les bobines du capteur, qui varie avec l'angle de rotation et peut être mesurée.

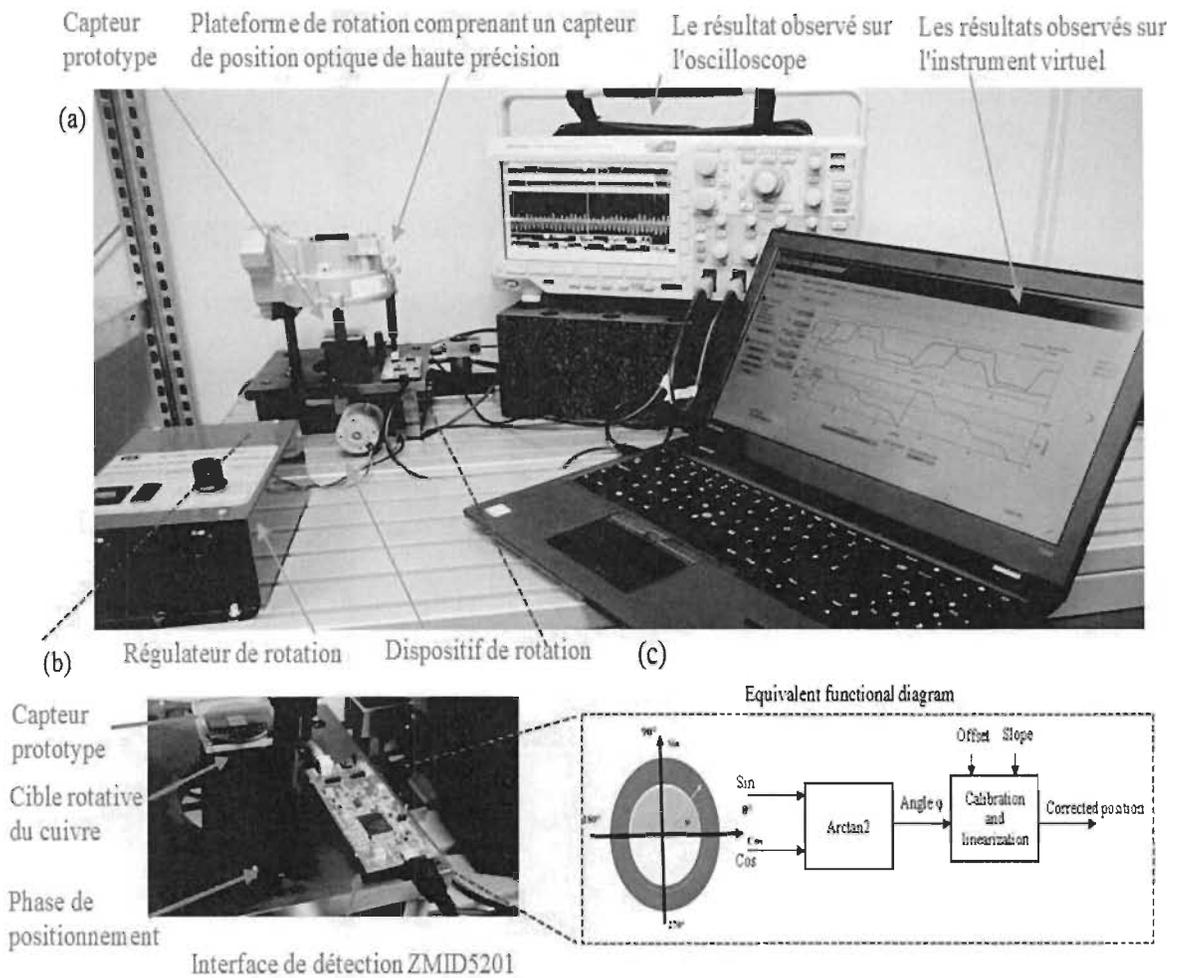


Figure 5.14 Dispositif de mesure (a) dispositif expérimental pour mesurer la variation du signal de sortie du capteur inductif avec le contrôleur de rotation, (b) position de fixation du prototype de capteur agrandi et (c) schéma fonctionnel de l'interface de conditionnement du capteur

Tableau 5-2 Spécifications et schéma du capteur de position angulaire avec interfaces de détection sur un circuit intégré commercial ZMID5201

Schéma du capteur		Spécifications électriques du capteur			
		Element	Parameter	Value	Unit
<p>The diagram shows the internal circuitry of the ZMID5201. On the left, there are three power pins: VDD (5V), GND, and VSS. The receiver section (top) consists of two parallel LC circuits. The first circuit (R1P/R1N) has inductor L1 and capacitor C1 in parallel, with resistor R1 in series. The second circuit (R2P/R2N) has inductor L2 and capacitor C2 in parallel, with resistor R2 in series. The transmitter section (bottom) has an LC circuit with inductor L_T and capacitor C3 in parallel, and resistor R_T in series. The output pins are labeled SOU_T and C.</p>	Inductance de bobine de récepteur	L1, L2	440.5	nH	
	Capacité de la bobine du récepteur	C1, C2	0.0064	pF	
	Résistance de la bobine du récepteur	R1, R2	24	Ohms	
	Inductance de la bobine d'excitation	L _T	939.8	nH	
	Condensateur d'oscillateur d'excitation	C _T	2.2	nF	
	Capacité de la bobine d'excitation	C3	0.0019	pF	
	Résistance de la bobine d'excitation	R _T	6	Ohms	
	Tension d'alimentation externe	VDD	5	V	
	Condensateur d'alimentation	CVE	100	nF	
	Fréquence d'excitation de l'oscillateur de l'émetteur		3.5	MHz.	

5.8 Résultats expérimentaux et discussion

Cette étude a utilisé le dispositif expérimental de la figure 5.14 pour évaluer les performances d'un capteur de position inductif sans contact avec cible en cuivre. Tout d'abord, une rotation du bloc de capteurs en cuivre a été effectuée par étapes et les sorties pour chaque position à partir de l'interface de détection du tableau 5-2 ont été notées. La position de la cible est indiquée par l'amplitude différentielle des signaux mesurés par les bobines du récepteur. La position de la cible peut être calculée à partir des deux tensions du récepteur. Les signaux mesurés, SC1 et SC2, dans la figure 5.15a, sont convertis en angle dans la figure 5.15b en mettant en œuvre la fonction trigonométrique $arctan$ dans l'équation 5.4.

$$arctan2(\sin(\varphi), \cos(\varphi)) = \varphi \quad (5.4)$$

En outre, des paramètres de calibrage pour l'angle mesuré, ont été définis. La méthode d'étalonnage fournit un étalonnage de sortie avec la cible en place à une distance opérationnelle des bobines de réception. Le but de l'étalonnage est de s'assurer qu'aux extrémités opposées de la rotation mécanique, les positions mesurées sont respectivement zéro et la position maximale. L'angle est corrigé en utilisant le décalage du zéro et l'erreur de gain pour calculer la position calibrée. Un graphique montrant la position corrigée par rapport à la rotation enregistrée lors de l'expérience est tracé sur la figure 5.15b. Les résultats montrent une régression linéaire avec un décalage de $1,67^\circ$ et une pente de 1,0087 (R^2 99,3 %) avec un écart-type d'erreur résiduelle de $9,2^\circ$ (2,55 % de la pleine échelle).

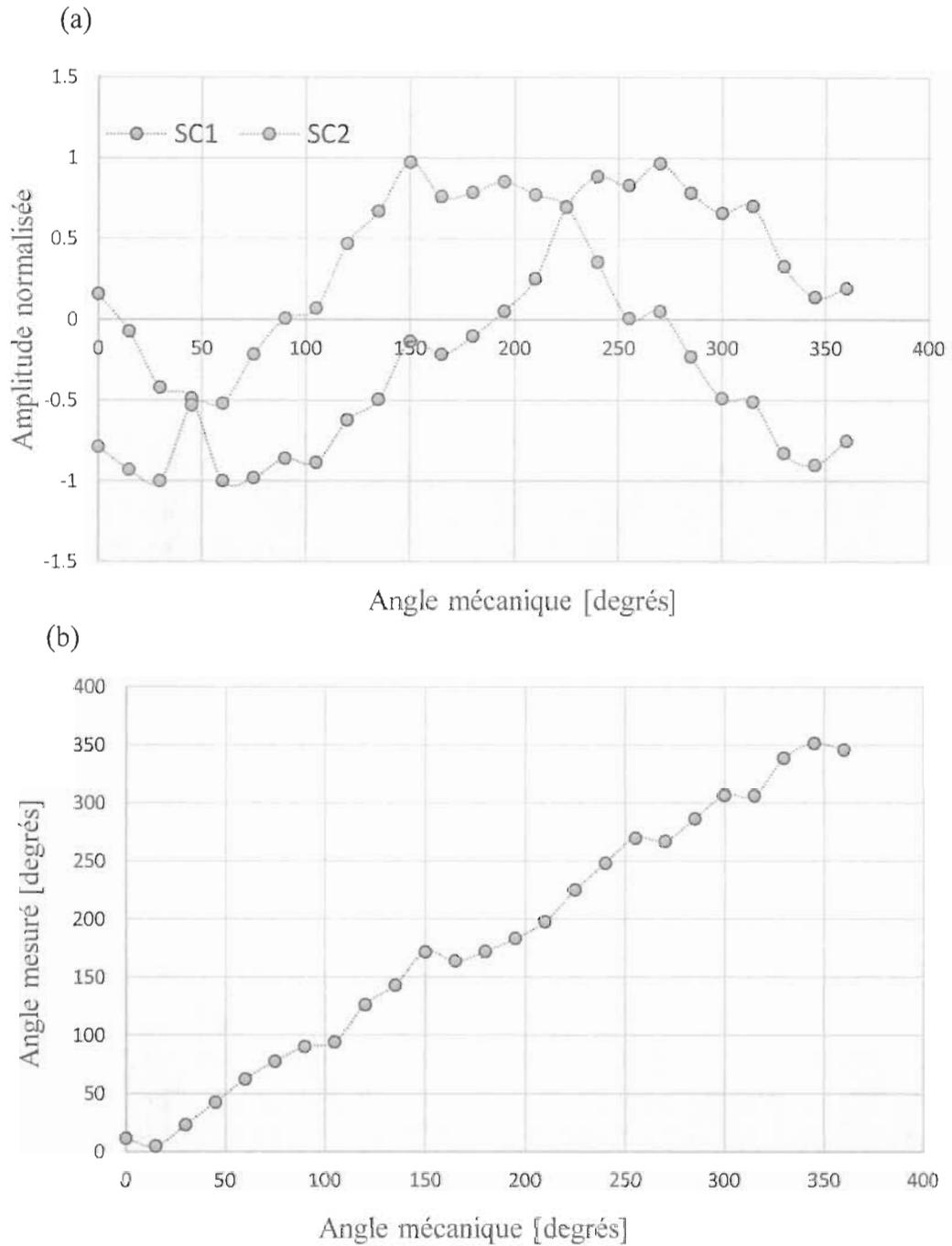


Figure 5.15 Mesures de la tension de sortie, (a) variation des amplitudes du signal des bobines de détection avec l'angle de rotation, (b) sortie de l'angle mesuré φ en fonction de la position de l'angle mécanique.

Enfin, dans cette étude, le dispositif d'essai illustré à la figure 5.14a a été utilisé pour évaluer les performances du modèle de capteur proposé à la figure 5.13 en présence de bruit

blanc provenant d'un générateur de bruit couplé magnétiquement au capteur. Le champ de bruit magnétique efficace au niveau du plan du capteur a été calculé comme étant de 0,26 Gauss. Des mesures ont été effectuées pour identifier l'influence de ce bruit sur le fonctionnement du capteur. Les résultats présentés à la figure 5.16 représentent la sortie du capteur obtenue en utilisant la même méthodologie que celle de la figure 5.15. Les résultats montrent à nouveau une régression linéaire avec un décalage de $3,7^\circ$ et une pente de 1,027 (R^2 98,8 % donnant une sensibilité au bruit de 0,5 %). L'écart-type de l'erreur résiduelle est augmenté de $2,9^\circ$ à $12,1^\circ$ (3,36 % de la pleine échelle).

Les capteurs inductifs souffrent généralement du bruit dû à la proximité de champs électromagnétiques interférents. Ceci peut être évité par l'incorporation d'un blindage électromagnétique et mécanique approprié.

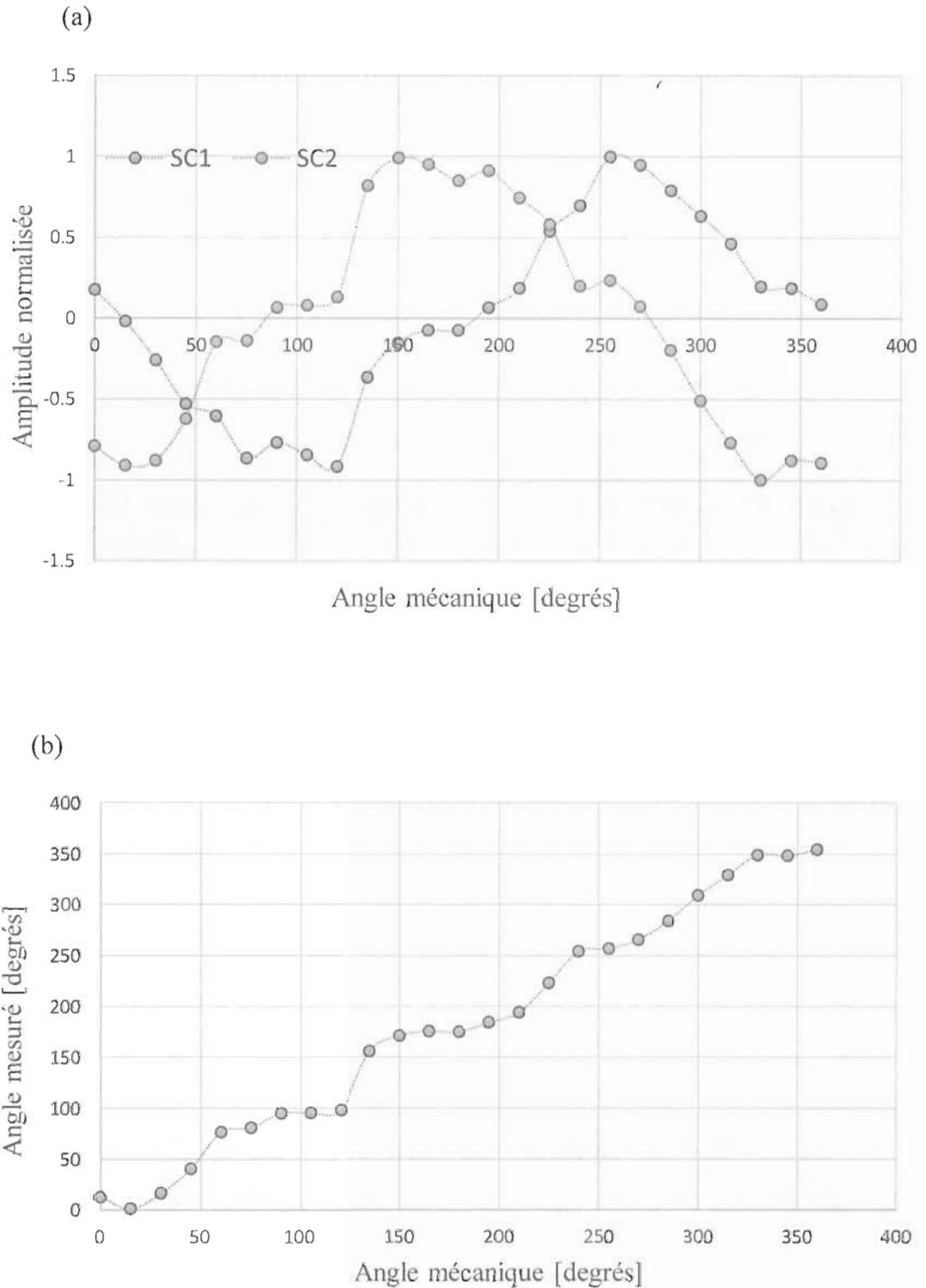


Figure 5.16 Mesures de la tension de sortie en présence de bruit blanc, (a) variation des amplitudes de signal des bobines de détection avec l'angle de rotation, (b) sortie de l'angle mesuré φ en fonction de l'angle mécanique.

Le capteur de position angulaire planaire proposé fonctionne de la même manière que le capteur proposé dans une étude précédente [84, 28] en utilisant le principe de la réluctance variable. La différence fondamentale en est une d'échelle. La taille du capteur proposé est réduite d'un facteur de presque 10 (5 mm contre 45 mm). Le prototype du capteur a été assemblé manuellement en utilisant des composants commerciaux standards, facilement disponibles et couramment utilisés dans la fabrication des téléphones portables. Le coût de chaque inducteur de puce spiralée est inférieur à 20 cents et le circuit d'interface (ZMID5201) est inférieur à 2,76 dollars. Le coût total du capteur est inférieur à 3,76 dollars. Il y a potentiellement une diminution des capacités de détection angulaire en raison de la réduction significative de la taille physique. Cependant, le capteur a une précision comparable à celle des capteurs existants beaucoup plus grands. Un exemple avec une taille approximative de 60 mm prétend atteindre des précisions approchant 4° [20], contrairement au capteur proposé qui présente une précision de $9,2^\circ$, mais qui a une taille de 5 mm. Un capteur d'angle miniature disponible dans le commerce coûtant 135 dollars (Novotechnik RFC-4853-636-121-501) a une précision de mesure de 10° et une taille physique de 48 mm.

5.9 Conclusion

Un nouveau capteur inductive angulaire utilisant des bobines spiralés à film mince déposés sur une puce céramique à l'échelle du millimètre a été conçu et s'est avéré performant. Il est nettement plus facile et moins coûteux à fabriquer qu'un autre capteur comparable utilisant une technologie différente. Le bobine planaire conçu a été analysé à l'aide d'un circuit intégré et ses mesures ont été comparées aux résultats théoriques. La

performance du capteur mis en œuvre s'est avérée légèrement meilleure que celle prévue avant la mise en œuvre. La précision a été mesurée comme étant de l'ordre de $9,2^\circ$ alors que la précision prédite était de $7,8^\circ$. La précision s'est dégradée en présence du bruit électromagnétique à environ $12,1^\circ$, mais il est prévu que cela puisse être évité par l'incorporation appropriée d'un blindage dans l'emballage du capteur. Il fallait s'y attendre, car le résultat pratique atteint rarement la prévision théorique. Il est possible de poursuivre les travaux pour améliorer la précision du capteur proposé.

Chapitre 6 - Conclusion générale et perspectives de recherche

Le développement d'un capteur inductif de position sans contact avec la technologie microélectronique a été discuté dans cette thèse. Un intérêt particulier en ce qui a trait aux questions de structure, de dimensionnement ainsi qu'à une gestion efficace et fiable du champ électromagnétique de microcapteurs inductifs miniaturisés, a été démontré.

La problématique de dimension et de fiabilité d'un capteur inductif électromécanique a été présentée dans le premier chapitre. Plusieurs travaux abordant l'utilisation d'un capteur inductif pour le calcul de position existent, mais rares sont ceux qui ont traité leur problématique de fiabilité ainsi que leur sécurité fonctionnelle. Ainsi, la réduction de la taille des capteurs électromécaniques diminue considérablement leur sensibilité et limite par conséquent leurs performances.

Dans l'objectif de définir un nouveau concept de capteur de position selon le niveau de sécurité requis, l'état actuel de la technique en ce qui concerne les capteurs de position inductifs a été démontré dans le deuxième chapitre. Ces techniques souffrent de limitations en termes de possibilités de microminiaturisation, de précision et de robustesse.

Au chapitre 3, une étude théorique de fiabilités applicable à une structure de fonctionnement réalisable des capteurs inductifs a été présentée. Pour soutenir cet objectif, une étude dont le but est de résoudre le problème de la minimisation du coût de

développement tout en satisfaisant les objectifs de fiabilité a été présentée. Une configuration redondante avec deux ou plusieurs systèmes est nécessaire. Dans cette configuration, le capteur inductif a sa propre excitation et son propre ensemble de bobines de réception. Chaque bobine de réception fournit un signal de sortie indépendant. L'implémentation de l'approche du calcul du taux d'échec avec la méthode de tolérance d'opération d'urgence de la norme automobile ISO 26262 a été élaborée. Les calculs ont révélé une diminution importante du taux d'échec, ce qui signifie qu'il y a contribution importante de l'architecture de redondance.

Le chapitre 4 procède ensuite à la modélisation et aux prédictions théoriques de performance établies afin de sélectionner un candidat final pour la réalisation physique. Différents mécanismes de détection du capteur inductif ont été étudiés. Différentes variations du signal, de fréquence et de géométrie sont performées. Les choix comprennent des bobines en spirale d'or à couche mince sur des puces céramiques. Ces bobines sont utilisés à la fois comme récepteur et émetteur de champ magnétique et le champ électromagnétique généré est quantifié. Cette approche présente l'avantage de fournir une détection angulaire tout en étant nettement plus facile et plus économique à fabriquer par rapport aux capteurs actuellement disponibles sur le marché. Le capteur est conçu de telle manière que l'inductance par rapport au déplacement angulaire possède une relation mathématique (arc tangente). Grâce à cette caractéristique, la position angulaire est obtenue facilement à partir du signal du capteur sans avoir besoin de calculs mathématiques complexes, ce qui n'est pas le cas pour la plupart des capteurs à bobine plane.

Une validation expérimentale de ce nouveau capteur avec le mince bobine à spirale d'or a été réalisée afin de vérifier les résultats pratiques obtenus. Un capteur détectant le comportement d'une cible mouvante a été mis en place. Les signaux mesurés sont calibrés pour assurer la correspondance avec les extrêmes de la position du capteur et convertis en un angle mesuré et ce, en mettant en œuvre des fonctions trigonométriques. Ces calculs peuvent être effectués à l'aide d'une simple table de correspondance bidimensionnelle, rapide et très économique en termes de ressources de traitement. Une nouvelle stratégie de contrôle basée sur la combinaison du logiciel industriel et la microbobine, caractérisée par sa simplicité d'implémentation et son faible coût, a été présentée et validée expérimentalement. Le capteur a une précision comparable à celle de capteurs existants beaucoup plus grands (écart-type d'erreur résiduelle de 2,55 % de la pleine échelle), une linéarité élevée ($R^2 = 99,3 \%$) et une faible sensibilité au bruit injecté de 0,5 % de la pleine échelle. Les contributions scientifiques sont publiées durant la thèse (Annexe A).

Les deux hypothèses spécifiées dans l'introduction générale de cette thèse sont valides. Pour la première proposition, une augmentation de la fiabilité du capteur proposé est liée à l'augmentation de la complexité de concepts électroniques intégrés. Cette conception m'aura permis d'améliorer la précision de la position après une étude théorique et une validation expérimentale. Pour la deuxième proposition, il y a potentiellement une diminution quantitative considérable des performances de détection de position angulaire en raison de la réduction significative de la taille physique. Cependant, comme prévu, le capteur a une précision comparable à celle des capteurs existants beaucoup plus grands.

En terminant, ce travail de recherche a ouverte des voies pour l'étude d'un capteur microélectronique basé sur le principe micro-inductif. Le développement de microcapteurs sans contact a mis en évidence ses limites, en matière d'erreur de position et de fiabilité. Dans le cadre de cette thèse, le choix de composants électriques s'est porté sur un capteur de position pour lequel le principe de conception a été partiellement repensé. La fabrication d'un capteur de position inductif à l'échelle du micromètre est extrêmement difficile. L'approche adoptée a démontré que les principes de fonctionnement sont réalisables. Il est possible de fabriquer des composants de détection indépendants sur plusieurs couches, afin de fournir des capteurs redondants dans les applications de la sécurité critiques. Cependant, la mise en œuvre d'un tel microcapteur s'est avérée au-delà des capacités de cette expérimentation. On considère que l'étude a démontré la viabilité de cette approche pour produire des capteurs de position angulaire inductif extrêmement petits et rentables. On considère également qu'il est possible de poursuivre les travaux afin d'améliorer la précision et la durabilité du capteur proposé. Ce capteur de position rotatif, miniature et peu coûteux est parfaitement adapté à ces applications automobiles; par exemple, la détection de la position des soupapes et des pédales, où l'immunité au bruit électrique est un grand avantage. Dans les prochaines années, la conduite autonome sera possible. Dans ce contexte, les systèmes automobiles auront de nouveaux défis à relever, tels que la performance d'exécution de la résolution de position et la communication entre les véhicules. Il est forcément encouragé de poursuivre les travaux avec notre partenaire industriel de la technologie de la transmission et du châssis ainsi que de la technologie de sécurité active et passive automobile ZF Group et ce, afin de développer des solutions innovantes adaptées aux défis de la recherche.

Références

- [1] SAE International Vehicle Standard J3016, Standards www.sae.org/autodrive, Visite le 28/07/2020.
- [2] Canadian Council of Motor Transport Administrators, Automated Vehicles in Canada, ISBN: 978-1-927993-25-5, November 30, 2016.
- [3] K. Laroche K., R. Love, Automated Vehicles: Revolutionizing our World. Borden Ladner Gervais, 2016.
- [4] Kirill Poletkin, PhD; Applied levitation, <https://poletkin.wordpress.com/author/poletkin/> , Visité le 28/07/2020.
- [5] R. Zhang, H. Liu, Y. Zhou, Z. Yang and J. Han, “Design and Analysis of a Mutual Inductance Coupling-Based Microdeformation Sensor,” in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 4, pp. 821–829, April 2017. doi: 10.1109/TIM.2017.2654518.
- [6] S. Yeh and W. Fang, “Inductive Micro Tri-Axial Tactile Sensor Using a CMOS Chip With a Coil Array,” in IEEE Electron Device Letters, vol. 40, no. 4, pp. 620–623, April 2019. DOI: 10.1109/LED.2019.2901946.
- [7] H. Wang, D. Jones, G. de Boer, J. Kow, L. Beccai, and A. Alazmani, “Design and Characterization of Tri-Axis Soft Inductive Tactile Sensors,” in IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 19, pp. 7793–7801, 1 Oct.1, 2018. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2845131.
- [8] K. R. Sandra, A. S. A. Kumar, B. George and V. J. Kumar, “A Linear Differential Inductive Displacement Sensor With Dual Planar Coils,” in IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 2, pp. 457–464, 15 Jan.15, 2019. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2877209.
- [9] P. Sagar, H.K. Hassan, A.S. Gour, and R. Karunanithi, “Multilayer planar inductor array based angular position sensor for cryogenic application,” Elsevier Cryogenics Journal, Vol. 96, pp. 18–24, 2018, doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.10.001.

- [10] C.-L. Lu and M.-K. Yeh, "Thermal stress analysis for a CMOS-MEMS microphone with various metallization and materials," *Elsevier Microelectronic Engineering Journal*, vol. 213, pp. 47–54, 15 May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.04.013>.
- [11] Y. Hata, Y. Suzuki, M. Muroyama, T. Nakayama, Y. Nonomura, R. Chand, H. Hirano, Y. Omura, M. Fujiyoshi, and S. Tanaka, "Integrated 3-axis tactile sensor using quad-seesaw-electrode structure on platform LSI with through silicon vias," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 273, pp. 30–41, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.02.013>.
- [12] M.T. Todaro, F. Guido, V. Mastronardi, D. Desmaele, G. Epifani, L. Algieri, M. De Vittorio, "Piezoelectric MEMS vibrational energy harvesters: Advances and outlook," *Elsevier Microelectronic Engineering Journal*, vol. 183–184, pp. 23–36, 5 November 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.10.005>.
- [13] Y.-S. Kim, N.G. Dagalakis, Y.-M. Choi, "Optical fiber Fabry-Pérot micro-displacement sensor for MEMS in-plane motion stage," *Elsevier Microelectronic Engineering Journal*, vol. 187–188, pp. 6–13, 5 February 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.11.010>.
- [14] K. V. Poletkin, A. I. Chernomorsky, and C. Shearwood, "Proposal for micromachined accelerometer, based on a contactless suspension with zero spring constant," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 7, pp. 2407–2413, July 2012. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2188831.
- [15] M.L.F. Bellaredj, C.A. Pardue, P. Kohl, and M. Swaminathan, "Fabrication of package embedded spiral inductors with two magnetic layers for flexible SIP point of load converters in Internet of Everything devices," *Elsevier Microelectronic Engineering Journal*, vol. 189, pp. 18–27, 5 April 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.12.012>.
- [16] B. Bardet, S. Desplobain, J. Billoué, L. Ventura, and G. Gautier, "Integration of low-loss inductors on thin porous silicon membranes," *Elsevier Microelectronic Engineering Journal*, vol. 194, pp. 96–99, 5 July 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.03.020>.
- [17] N. Anandan and B. George, "Design and development of a planar linear variable differential transformer for displacement sensing," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 16, pp. 5298–5305, Aug. 2017. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2719101.

- [18] S. Kim et al., "An Inductive 2-D Position Detection IC with 99.8% Accuracy for Automotive EMR Gear Control System," in *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 25, no. 5, pp. 1731–1741, May 2017.
- [19] Z. Gao, B. Zhou, B. Hou, C. Li, Q. Wei, R. Zhang, Self-Calibration of Nonlinear Signal Model for Angular Position Sensors by Model-Based Automatic Search Algorithm. *Sensors* 2019, 19, 2760.
- [20] J. Kim, J. Kim, C. Kang, J. Lee, J. Jin, On-machine calibration of angular position and runout of a precision rotation stage using two absolute position sensors, *Measurement*, Volume 153, 2020, 107399, ISSN 0263–2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107399>.
- [21] H. Liu, H. Wang, Y. Lyu, C. He, Z. Liu, A novel triboelectric nanogenerator based on carbon fiber reinforced composite lamina and as a self-powered displacement sensor, *Microelectronic Engineering*, Volume 224, 2020, 111231, ISSN 0167–9317, <https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111231>.
- [22] V.F.G. Tseng and H. Xie, V.F.G. Tseng and H. Xie, "Resonant Inductive Coupling-Based Piston Position Sensing Mechanism for Large Vertical Displacement Micromirrors," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 207–216, Feb. 2016. DOI: 10.1109/JMEMS.2015.2499301.
- [23] S.M. Djuric, "Performance analysis of a planar displacement sensor with inductive spiral coils," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 4, pp. 1–4, Apr. 2014. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2288273.
- [24] A. Babu and B. George, "A Linear and High Sensitive Interfacing Scheme for Wireless Passive LC Sensors," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 23, pp. 8608–8616, Dec.1, 2016. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2614816.
- [25] S.-K. Yeh, J.-H. Lee, and W. Fang, "On the detection interfaces for inductive type tactile sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 297, 111545, 2019, ISSN 0924–4247. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111545>.
- [26] B. Aschenbrenner and B. G. Zagar, "Analysis and Validation of a Planar High-Frequency Contactless Absolute Inductive Position Sensor," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 3, pp. 768–775, March 2015. doi: 10.1109/TIM.2014.2348631.

- [27] K. Poletkin, Z. Lu, U. Wallrabe and V. Badilita, "A New Hybrid Micromachined Contactless Suspension With Linear and Angular Positioning and Adjustable Dynamics," in *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 24, no. 5, pp. 1248–1250, Oct. 2015. doi: 10.1109/JMEMS.2015.2469211.
- [28] M. Passarotto, G. Qama and R. Specogna, "A Fast and Efficient Simulation Method for Inductive Position Sensors Design," 2019 IEEE SENSORS, Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 1–4, doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956502.
- [29] A. S. Anil Kumar and B. George, "A Noncontact Angle Sensor Based on Eddy Current Technique," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 4, pp. 1275–1283, April 2020, doi: 10.1109/TIM.2019.2908508.
- [30] Y. Yin, B. Sun, F. Han, "Self-locking avoidance and stiffness compensation of a threeaxis micromachined electrostatically suspended accelerometer," *Sensors*, vol. 16, 711, 2016 doi: 10.3390/s16050711.
- [31] K. V. Poletkin et al., "Polymer Magnetic Composite Core Boosts Performance of Three-Dimensional Micromachined Inductive Contactless Suspension" in *IEEE Magnetics Letters*, vol. 7, pp. 1–3, 2016, Art no. 1307603. doi: 10.1109/LMAG.2016.2612181.
- [32] L. Meyer, A. Buhmann, R. Eid, and J. G. Korvink, "Root Cause Analysis of Zero-Rate Output Sources in an MEMS Gyroscope", *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 17, NO. 4, FEBRUARY 15, 2017.
- [33] J. Zhang, H. Yao and G. Rizzoni "Fault Diagnosis for Electric Drive Systems of Electrified Vehicles Based on Structural Analysis", *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, VOL. 66, NO. 2, FEBRUARY 2017.
- [34] Y. Iwaji, J. Nakatsugawa, T. Sakai, S. Aoyagi and H. Nagura, "Motor drive system using nonlinear mathematical model for permanent magnet synchronous motors," 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA), Hiroshima, 2014, pp. 2451–2456. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869933.
- [35] New linear- and angular position sensors, <http://switches-sensors.zf.com/asia-en/new-linear-angular-position-sensors/>, Visite 29/06/2020.
- [36] Servolectric® electric power steering system Torque sensor, Bosch 2018.

- [37] K. Yoo, J. Seo, J. Ban, L. Hyukjung, J. Kim, W. Kim, “Study on Development of Torque and Angle Sensor for EPS” 2012-01-0941; SAE 2012 World Congress & Exhibition; 2012-04-16.
- [38] IZMID5201STKIT; Disponible sur https://canada.newark.com/integrated-device-technology/zmid5201stkit/starter-kit-inductive-position/dp/67AC8709?ost=ZMID5201STKIT&ddkey=https%3Aen-CA%2FElement14_Canada%2Fsearch, accessed on 10 October 2018.
- [39] Inductive Position Sensor Evaluation Kits ZMID5201 - Proximity, Inductive Sensor Evaluation Board <https://www.digikey.ca/product-detail/en/idt-integrated-device-technology-inc/ZMID5201STKIT/1833-1025-ND/8571736> accessed on 8 October 2018.
- [40] N. Dupré, O. Dubrulle, Huber, S.; Burssens, J.-W.; Schott, C.; Close, G. Experimental Demonstration of Stray-Field Immunity beyond 5 mT for an Automotive-Grade Rotary Position Sensor. Proceedings 2018, 2, 763.
- [41] AMS. AS5171: High-Resolution On-Axis Magnetic Angular Position Sensor. Datasheet. June 2016. Available online: <https://ams.com/as5171>, accessed on 8 October 2017.
- [42] IDT. ZMID520xMROT36001 Rotary Application Module User Manual. December 2017. Available online: <https://www.idt.com/document/man/zmid520xmrot36001-application-module-user-manual>, accessed on 10 February 2018.
- [43] LXM9518 Programmer for LX3301A and LX3302A Evaluation Kits, <https://www.microsemi.com/existing-parts/parts/149675>, Viste le 16.01.2019.
- [44] Microsemi Inductive Position Sensors, https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/135261-lx3301a-product-brief, Visité le 16.01.2019.
- [45] J. Marek, H. Trah, Y. Suzuki, I. Yokomori, Sensors for Automotive Applications, online book, 2006.
- [46] B. Ando, S. Baglio, V. Marletta and A. Valastro, “A Short-Range Inertial Sensor Exploiting Magnetic Levitation and an Inductive Readout Strategy,” in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 67, no. 5, pp. 1238–1245, May 2018. doi: 10.1109/TIM.2017.2785022.

- [47] R. Pallás-Areny and J. G. Webster, "Sensors and Signal Conditioning", 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2000.
- [48] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright, "Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions," *SIAM J. Optim.*, vol. 9, no. 1, pp. 112–147, 1998.
- [49] L. Ye, M. Yang, L. Xu, X. Zhuang, Z. Dong and S. Li, "Nonlinearity Analysis and Parameters Optimization for an Inductive Angle Sensor", Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; *Sensors* 2014, doi:10.3390/s140304111.
- [50] G. Amendola, p. Poulichet, I. Sevely et I. Valbin, "Capteurs MEMS Techniques de mesures", Actualisation permanente sur Techniques de l'Ingénieur www.techniques-ingenieur.fr Doc. R 431.
- [51] A. Babu and B. George, "Design and Development of a New Non-Contact Inductive Displacement Sensor," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 976–984, Feb.1, 2018. doi: 10.1109/JSEN.2017.2780835.
- [52] G. De Donato, G. Scelba, M. Pulvirenti, G. Scarcella and F. Giulii Capponi, "Low-Cost, High-Resolution, Fault-Robust Position and Speed Estimation for PMSM Drives Operating in Safety-Critical Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*. doi: 10.1109/TPEL.2018.2820042.
- [53] Baumer Group, "Sine encoders ITD22H00 SIL" datasheet, May 2017.
- [54] Kollmorgen, "Safety Characteristic Data", <https://kdn.kollmorgen.com/content/Safety-Characteristic-Data>, Accessed Jul. 7, 2018.
- [55] A. Boglietti, A. Cavagnino, A. Tenconi, and S. Vaschetto, "The safety critical electric machines and drives for the more electric aircraft: a survey," in *Proc. IEEE IECON 2009*, Nov. 2009.
- [56] D.J.K. Griffin, and G. Bearfield, "The use of design targets in harmonisation of safety management in the European rail industry", in *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*, L. Walls, M. Revie, and T. Bedford, Eds. Boca Raton: CRC Press, 2016.

- [57] J. Schwarz, "Functional safety and automotive software; introduction ISO 26262 at Daimler," Daimler AG, Stuttgart, Germany, Sept. 2012. [Online] Available: <https://www.ipa.go.jp/files/000004100.pdf>. [Accessed Jul. 7, 2018].
- [58] J. Birch, F. Bitsch, J. Guiochet, M. Kaâniche, "Safety cases and their role in ISO 26262 functional safety assessment," Computer Safety Reliability and Security. SAFECOMP. Lecture Notes in Computer Science, vol 8153. Springer, Berlin, Heidelberg 2013.
- [59] C. Ebert. "Functional Safety with ISO 26262," Vector Consulting Services GmbH, Stuttgart, Germany, Oct. 2016. [Online] Available: https://vector.com/portal/medien/vector_consulting/publications/Webinar_Safety.pdf. [Accessed Jul. 7, 2018].
- [60] H. Kwon, R. Itabashi-Campbell, and K. McLaughlin, "ISO26262 application to electric steering development with a focus on hazard analysis," in Proc. IEEE SysCon 2013, Apr. 2013.
- [61] P. Yih, Steer-by-wire: implications for vehicle handling and safety, Stanford University, doctor of philosophy, January 2005.
- [62] G. Xie, Y. Chen, Y. Liu, R. Li and K. Li, "Minimizing Development Cost With Reliability Goal for Automotive Functional Safety During Design Phase," in IEEE Transactions on Reliability, vol. 67, no. 1, pp. 196–211, March 2018. doi: 10.1109/TR.2017.2778070.
- [63] International Organization for Standardization; ISO/FDIS 26262-1 Road vehicles - Functional safety - Part 1: Vocabulary (Online Browsing Platform (OBP)) <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:26262:-1:dis:ed-2:v1:en :term:3.42>, Visited le 05/07/2020.
- [64] F. Boullie 'A review of reliability prediction methods for electronics devices' Microelectronics reliability 42.8, 1155–1162, 2002.
- [65] U. Weinrich, G. Baumann, H. Reuss and S. Walz, "Holistic view of the reliability prediction using the example of steering electronics," Reliability by Design; 9. ITG/GMM/GI-Symposium, Cottbus, Germany, 2017.
- [66] INTERNATIONAL STANDARD ISO/FDIS 26262-2 Road vehicles — Functional safety — Part 11: Guidelines on application of ISO 26262 to semiconductors; Reference number ISO/FDIS 26262-2:2018

- [67] JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry, <https://www.jedec.org/>, Online, 30/04/2019.
- [68] International Roadmap for Devices and Systems (IRDS); <https://irds.ieee.org/>, Online, 30/04/2019.
- [69] SEMATECH SEmiconductor MAnufacturing TECHnology (SEMATECH), ISMI stands for International SEMATECH (Semiconductor Manufacturing Technology) Manufacturing Initiative www.sematech.org , Online, 30/04/2019
- [70] Véhicules routiers, sécurité fonctionnelle — Partie 10 : Lignes directrices relatives à l'ISO 26262, ISO/TC 22/SC 32, 2018.
- [71] Planar Spiral Inductances,” IEEE Journal OF Solid-state Circuits, vol. 34, no. 10, pp 1419–1424, Oct.1999.
- [72] C. Oberhauser, LDC Sensor Design Texas Instruments, April 2018 <http://www.ti.com/lit/an/snoa930a/snoa930a.pdf> Online, 30/04/2019.
- [73] Simulation the design of the sensor coil Using WEBENCH <https://webench.ti.com/>, Online, 30/04/2019
- [74] LDC131x and LDC161x EVM User’s Guide, September 2016 <http://www.ti.com/lit/ug/snou135a/snou135a.pdf>, Online, 30/04/2019
- [75] Y.Su, X. Liu, C.K. Lee, and S.Y. Hui, “On the Relationship of Quality Factor and Hollow Winding Structure of Coreless Printed Spiral Winding (CPSW) Inductor,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 6, pp. 3050–3056, Jun. 2012.
- [76] I. Sari and M. Kraft, “A MEMS linear accelerator for levitated microobjects,” Sens. Actuators A, Phys., vol. 222, pp. 15–23, Feb. 2015.
- [77] N. Mison, L. Q. Ying, R. N. Firdaus, N. Abdullah, N. F. Mailah, and H. Wakiwaka, “Effect of inductive coil shape on sensing performance of linear displacement sensor using thin inductive coil and pattern guide,” Sensors, vol. 11, 2011.
- [78] M. Martino, A. Danisi, R. Losito, A. Masi, and G. Spiezia, “Design of a linear variable differential transformer with high rejection to external interfering magnetic field,” IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 2, pp. 674–677, Feb. 2010.

- [79] M. R. Nabavi and S. N. Nihtianov, "Design strategies for eddy-current displacement sensor systems: Review and recommendations," *IEEE Sensors J.*, vol. 12, no. 12, pp. 3346–3355, Dec. 2012.
- [80] Spiral Chip Inductor SP16-80-ABW (A=Alumina, B=10 mil thick substrate, W=Gold on one side) <http://www.piconics.com/spiral-inductors/>, Online 30/04/2019
- [81] ZMID520x Inductive Coil Design Tool Software:
<https://www.idt.com/document/swr/zmid520x-inductive-coil-design-tool-software>,
Online 30/04/2019.
- [82] ZMID520x User Guide – Inductive Coil Design Tool:
<https://www.idt.com/document/mas/zmid520x-user-guide-inductive-coil-design-tool>,
Online 30/04/2019.
- [83] H. Wang et al., "Design methodology for magnetic field-based soft triaxis tactile sensors," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1356, 2016.
- [84] B. P. Reddy, A. Murali and G. Shaga, "Low cost planar coil structure for inductive sensors to measure absolute angular position," 2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST), Shenzhen, 2017.
- [85] A. Goff, *Contrôle et diagnostic par un réseau de capteurs magnétiques en automobile*, Université de Grenoble, 2011.
- [86] B. Legrand, *Capteurs de position fonctionnant par saturation d'un circuit magnétique, application au domaine de l'automobile*, Sciences de l'ingénieur, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003.
- [87] M. Zidi, A. Asfour, J. Yonnet, *Utilisation de la Magnéto-Impédance Géante pour la réalisation d'un capteur de courant à large dynamique*, JCGE / SEEDS , Jun 2013.
- [88] Al. Msaed, *Micro capteur magnétique de mesure de courant et traitement intégré*. Sciences de l'ingénieur, Institut National Polytechnique de Grenoble , 2009.
- [89] Ansys Maxwell, *Electromechanical Device Analysis Software*,
<https://www.ansys.com/de-de/products/electronics/ansys-maxwell>, Visite le
28/07/2020.

Annexe A : liste des publications durant la thèse

Walid Gannouni, Mamadou Lamine Doumbia, Adel Badri,

Study on the viability of a microminiature inductive angular position sensor using low-cost fabrication techniques,

Microelectronic Engineering,

Volume 236, 2021, 111480, ISSN 0167-9317, <https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111480>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167931720302689>)

Abstract: In this study, we propose an inductive angular position sensor comprising thin film, gold spiral inductors on ceramic chips as an alternative to the current state of the art which suffers from limitations in terms of the scope for micro-miniaturization. The geometry of the transmitter and receiver coils, operating frequency, and the air gap between the transmitter and sense coils all influence the performance of the sensor. Herein, we design and fabricate an inductive position sensor based on micro inductors normally employed in the resonant elements of microwave circuits and as chokes in power sources. We use these inductors as both a magnetic field receiver and transmitter and quantify the generated electromagnetic field. This approach has the advantage of providing angular sensing while being substantially easier and more economical to fabricate compared to currently available commercial sensors. The sensor is designed in such a way that the inductance versus angular displacement possesses an arctangent relationship. Due to this feature, the angular position is obtained easily from the sensor signal without the need for complex mathematical calculations, which is not the case for most of the planar coil-based sensors. A prototype of the proposed sensor has been developed and tested. The sensor has an accuracy comparable with much larger existing sensors (residual error standard deviation 2.55% of full scale), a high linearity (R^2 99.3%) and a low sensitivity to injected noise (0.5%). This low-cost, miniature, rotary position sensor could find numerous applications especially in the modern field of automotive engineering.

Keywords: Inductive position sensor; Magnetic field; Micro inductor; Electromagnetic sensing; Eddy current; Angular displacement

Walid Gannouni, Mamadou Lamine Doumbia, Adel Badri

Systematic approach furthering confirmation measures of safety critical automotive systems,

Transaction WIT Transactions on The Built Environment

Volume 174, Pages 10, Page Range 237 – 246, Published 2018

Paper DOI 10.2495/SAFE170221 Copyright WIT Press

Abstract: Different system elements are developed independently from diverse suppliers and teams before being integrated together into safety critical automotive systems such as steering or braking systems by a manufacturer. It must be guaranteed that, despite this independent development, the achievement of the safety requirements for the overall system can be demonstrated. The necessary agreements and the integration of the necessary safety information for the overall system generate higher extra costs. In order to reduce development time and cost, systematic reuse can be a solution to engineering the required artifacts. Reassessment represents an additional source of cost. Even small modifications of a system or exchanging a component after it has been certified necessitates a reassessment. The effort required for reassessment, in many cases reaches the original effort of certification for the complete system or even exceeds it. To minimize the effort and cost of a reassessment, this paper introduces a theoretical foundation of a model-based engineering approach to reuse a safety case and change only the modified parts. This paper presents a reusability framework to support the distributed development environment together with the different composition scenarios with respect to ISO26262. A further benefit of this approach is that for development of variants in product-line, the Safety assessment process can now be easily expressed and managed.

Keywords: modularization, functional safety, product-line and composition

Annexe B : Caractéristiques de logiciel de simulation

B.1 Analyse de la bobine de capteur

Pour soutenir la recherche par la simulation, un software (*WEBENCH Inductor Design Tool*, Texas Instruments) sera utilisé pour valider la conception de la bobine de capteur [73]. WEBENCH fournit les capacités de mesure souhaitées pour optimiser les paramètres du capteur. Le processus d'analyse du capteur est de :

- déterminer la taille d_{out} ;
- régler la largeur de trace et l'espace au minimum permis;
- déterminer l'épaisseur et les nombres des couches;
- régler le nombre de tours de façon à ce que le rapport $\frac{d_{in}}{d_{out}}$ soit supérieur à 0,3.

B.1.1 Capacités optimales de détection inductive

Pour obtenir les capacités optimales d'un capteur, il doit être décomposé en composants de l'inductance et du condensateur. Les applications de détection inductive utilisent un capteur composé d'une bobine en parallèle avec un condensateur pour former un oscillateur résonant *LC*. L'inductance et la capacité déterminent la fréquence du capteur (équation B.1) :

$$f_{sensor}(Hz) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (B.1)$$

Pour une inductance en spirale à couche unique, l'équation de Mohan peut être utilisée pour calculer l'inductance globale d'une bobine pour diverses géométries (figure B.1) [71] :

$$L = K_1 \mu_0 \frac{n^2 d_{avg} c_1}{1+k_2\rho} \left(\ln\left(\frac{c_2}{\rho}\right) + c_3\rho + c_4\rho^2 \right) \quad (B.2)$$

Où :

K_1 et K_2 dépendent de la géométrie;

μ_0 est la perméabilité de l'espace libre, $4\pi \times 10^{-7}$;

n est le nombre de tours;

$d_{avg} = \frac{d_{out}+d_{in}}{2}$ est le diamètre moyen;

$\rho^2 = \frac{d_{out}-d_{in}}{d_{out}+d_{in}}$ représente le taux de remplissage;

c_i sont des facteurs dépendant de la disposition en fonction de la géométrie.

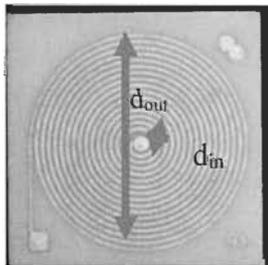


Figure B.1 Bobine spirale

Afin d'assurer un bon facteur de qualité et une faible dérive de température pour le circuit LC , il convient d'utiliser des condensateurs céramiques de classe C0G (C-zéro-G),

également connus sous le nom NP0 (négatif-positif-zéro). Le facteur Q pour le circuit résonant parallèle peut être déterminé comme suit (équation B.3) :

$$Q_p = \frac{R'}{\omega l} = R' \sqrt{\frac{c}{l}} \quad (\text{B.3})$$

Où :

Q_p facteur de qualité;

R' résistance parallèle;

$\omega_r l$ réactance de la bobine à la fréquence de résonance;

c capacité du condensateur parallèle;

l inductance de la bobine du circuit imprimé.

La plage de variation de l'inductance est de 140nH-200nH avec une résistance parallèle R' en courant continu de la bobine de 12 Ohm.

B.1.2 Mesure de la fréquence

Les tours individuels d'un conducteur sont séparés par un diélectrique sur une surface physique. Cela produit un petit condensateur parasite à chaque tour [72]. À haute fréquence, les signaux travers la capacité parasite plutôt que de traverser le long de l'enroulement en spirale (figure B.2). La capacité parasite (*Self Resonant Frequency* - SRF) n'est pas stable. Il est recommandé de maintenir la fréquence du capteur au-dessous de la SRF.

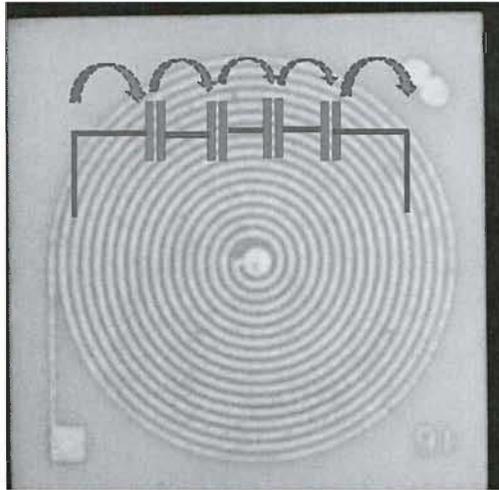


Figure B.2 Composants parasites capacitifs

Le SRF d'un conducteur peut être mesuré avec un analyseur d'impédance. Le SRF est mesuré en connectant le conducteur et en traçant l'amplitude de l'impédance et la phase par rapport à la fréquence. Un analyseur de réseau vectoriel (VNA) est également capable d'effectuer cette mesure. Dans ce cas, il est important de calibrer le VNA.