

Titre: Conception et optimisation d'une sonde magnétique légère pour
Title: l'inspection non destructive des lignes à haute tension

Auteur: Yahya Iben Brahim
Author:

Date: 2022

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Iben Brahim, Y. (2022). Conception et optimisation d'une sonde magnétique
légère pour l'inspection non destructive des lignes à haute tension [Mémoire de
maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/10542/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10542/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Frédéric Sirois, & David Ménard
Advisors:

Programme: Génie électrique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Conception et optimisation d'une sonde magnétique légère pour l'inspection non destructive des lignes à haute tension

YAHYA IBEN BRAHIM

Département de génie électrique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie électrique

Août 2022

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Conception et optimisation d'une sonde magnétique légère pour l'inspection non destructive des lignes à haute tension

présenté par **Yahya IBEN BRAHIM**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Yves AUDET, président

Frédéric SIROIS, membre et directeur de recherche

David MÉNARD, membre et codirecteur de recherche

Yves-Alain PETER, membre

DÉDICACE

À tous ceux qui m'ont apportés soutien et motivation ces deux dernières années.

REMERCIEMENTS

Les deux années que j'ai passées à Montréal pour ma maîtrise ont constitué pour moi une expérience inoubliable, riche de nouvelles rencontres et de nouveaux apprentissages au sein d'une ville magnifique.

Je remercie mon directeur de recherche Prof. Frédéric Sirois de m'avoir accepté dans son laboratoire et accordé sa confiance et son soutien tout au long de ma maîtrise. Je tiens également à remercier Prof. David Ménard pour ses interventions pertinentes durant ce projet. Je voudrais également remercier tous mes collègues qui font du LSM un excellent environnement de travail, d'entraide et d'apprentissage.

Je suis particulièrement reconnaissant envers Jonathan Bellemare et Marina Gasparini, avec qui j'ai eu la chance de travailler étroitement au cours de ces deux années. Merci aussi à Nicolas Pouliot et Gilles Rousseau pour leur soutien technique. Je suis également reconnaissant envers le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et Hydro-Québec pour leur soutien financier.

Je n'oublie pas mes amis qui ont réussi à me faire sentir chez moi à Montréal. Je les remercie pour l'amour qu'ils ont insufflé à ma vie et espère avoir su leur apporter au moins autant de joie.

Enfin, je suis reconnaissant envers mes parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes choix. Merci aussi à mes frères et sœurs qui m'ont fait ressentir leur fierté malgré la distance qui nous sépare.

RÉSUMÉ

Les conducteurs électriques des lignes à haute tension vieillissent et subissent des dégradations dues à la corrosion, aux conditions météorologiques de l'environnement, aux dégâts mécaniques et à la fatigue interne. Si ces dégradations restent ignorées, elles peuvent rapidement évoluer et causer ultimement l'effondrement de la ligne. Il est donc crucial d'évaluer fréquemment l'état des conducteurs par contrôle non destructif.

Les conducteurs sont composés d'une âme d'acier protégée par un revêtement en zinc et des couches externes en aluminium. Il existe aujourd'hui plusieurs méthodes pour les inspecter. Hydro-Québec, partenaire du projet, montre un intérêt particulier pour deux technologies prometteuses : une sonde à courant de Foucault, principalement pour la détection des défauts dans les couches d'aluminium et de zinc, et une sonde magnétique, pour la détection des défauts dans l'âme d'acier. Dans ce travail de maîtrise, nous nous intéressons exclusivement à l'inspection par sonde magnétique, l'autre technologie étant étudiée en parallèle dans un projet de doctorat d'une autre étudiante.

Les sondes magnétiques actuellement disponibles dans le marché présentent plusieurs lacunes. Elles sont notamment très lourdes (> 20 kg), ont une petite ouverture (< 45 mm) insuffisante pour inspecter certains types de conducteurs, disposent d'un mécanisme de verrouillage nécessitant l'intervention d'un technicien et leurs mesures manquent de sensibilité. Le défi du projet est de trouver des solutions innovantes pour corriger ces différentes lacunes via la conception d'une nouvelle sonde très sensible, légère et déployable par drone, permettant d'automatiser et accélérer les inspections des lignes, tout en éliminant les risques d'intervention humaine.

La conception de la nouvelle sonde s'est faite en trois étapes principales. Tout d'abord, nous avons réalisé une simulation numérique par la méthode des éléments finis sur le logiciel Comsol Multiphysics. Cette simulation a permis de comprendre et visualiser les principes de fonctionnement de la sonde magnétique et a également permis d'explorer différentes géométries de sonde et de déterminer leurs avantages et inconvénients. En particulier, une sonde à trois pôles a été retenue comme choix final de géométrie. Cette géométrie dispose d'un design ouvert et, grâce à sa symétrie cylindrique, permet de compenser le décentrement du conducteur durant l'inspection. Il serait ainsi possible de la déployer par drone sans mécanisme de verrouillage, tout en produisant des mesures stables et fiables. Nous avons également optimisé cette géométrie pour respecter une contrainte de poids de 1.5 kg et une grande ouverture de 90 mm.

Ensuite, nous avons comparé plusieurs capteurs magnétiques disponibles sur le marché afin de choisir le capteur idéal pour la sonde. Des capteurs de technologies différentes ont été testés par un montage expérimental de bobines de Helmholtz qui a permis de déterminer leur erreur de linéarité, leur sensibilité et leur répétabilité. Un capteur de type fluxgate s'est distingué par son niveau de bruit très bas et sa haute résolution (de l'ordre du μT). Ce capteur est très sensible, mais a une plage de mesure réduite ($\pm 2 \text{ mT}$). Son utilisation dans la sonde est rendue possible par un choix de conception innovant, qui consiste à exploiter un entrefer dans le circuit magnétique de la sonde pour créer un “point zéro”, où le champ ambiant des aimants est nul. En plaçant le capteur au voisinage de ce point zéro, il devient possible d'effectuer les mesures sans le saturer.

Enfin, nous avons construit un prototype de sonde au laboratoire pour confirmer expérimentalement les résultats de la simulation numérique. Le prototype est capable d'inspecter des échantillons de conducteurs en les scannant de bout en bout. Les défauts sont détectés par les variations des signaux des capteurs fluxgate et sont localisés par un encodeur qui mesure la position de l'échantillon dans la sonde. Nous avons réalisé plusieurs échantillons au laboratoire en ajoutant des défauts artificiels de tailles connues à des morceaux de conducteurs sains. Ainsi, il était possible de caractériser et d'évaluer la sensibilité et la robustesse du prototype. Les mesures réalisées au laboratoire indiquent que la sonde prototype est capable de quantifier avec précision les pertes métalliques et de détecter la présence de brins brisés dans l'âme d'acier.

Nous sommes parvenus dans ce projet à concevoir une sonde magnétique capable de détecter les défauts dans l'âme d'acier des conducteurs des lignes à haute tension. La nouvelle sonde respecte les contraintes d'ouverture et de poids et semble être une solution prometteuse pour l'inspection automatisée par drone. Elle permet également d'obtenir des mesures sensibles et précises grâce aux capteurs Fluxgate utilisés et grâce à la compensation du décentrement du conducteur. Cependant, la sonde prototype actuelle nécessiterait des tests plus poussés sur le terrain afin de voir sa performance en situation opérationnelle réelle.

ABSTRACT

Electrical conductors on high voltage lines are damaged by corrosion, environmental conditions, mechanical stress and internal fatigue. If left unchecked, this damage can deteriorate rapidly and eventually cause the line to collapse. Therefore, it is crucial to regularly assess the condition of conductors through non-destructive testing.

These conductors are composed of a zinc-coated steel core and aluminum outer layers. There are various methods of inspecting them, but Hydro-Quebec, the project partner, is particularly interested in two promising technologies: an eddy current probe, mainly to detect defects in the aluminum and zinc layers, and a magnetic probe, to detect defects in the steel core. In this work, we focus exclusively on the magnetic probe, while the eddy current probe is being explored separately as part of a PhD thesis.

The magnetic probes currently available on the market have several deficiencies. For instance, they are very heavy (> 20 kg), have a small aperture (< 45 mm) which isn't sufficient to inspect certain types of conductors, and have a locking mechanism that requires a technician to mount it on the power line. In addition, their measurements can be very noisy and difficult to interpret. The challenge of this project is to find innovative solutions to overcome these various shortcomings by developing a new, highly sensitive and lightweight probe that can be deployed by drone to automate and accelerate line inspections and eliminate the risk of human intervention.

The design of the new probe was achieved in three main steps. First, we performed a numerical simulation using the finite element method with Comsol Multiphysics software. This simulation allowed us to understand the physics of the magnetic probe and its operation. It also allowed us to study different probe designs and determine their strengths and weaknesses. The final design choice was a three-pole probe. This particular three-pole design has an open and symmetrical geometry, which allows it to compensate for the conductor's imperfect centring during inspection. As a result, it can be deployed with a drone and without any locking mechanism, while providing stable and reliable measurements. We have also optimised this design to meet a weight limit of 1.5 kg and a large aperture of 90 mm.

In a second step, we compared several magnetic sensors available on the market in order to choose the best sensor for the probe. Sensors of different technologies were tested using an experimental Helmholtz coil set-up to evaluate their linearity error, sensitivity and repeatability. A Fluxgate sensor performed well with very low noise and high resolution (in the μ T range). While this sensor offers high sensitivity, it has a small measuring range (± 2 mT). Its

integration into the probe is made possible thanks to a key design choice, which consists of using an air gap in the probe's magnetic circuit to create a "zero point", where the ambient field of the magnets is null. By placing the sensor near this zero point, it becomes possible to make measurements without saturating it.

Finally, we built a prototype probe in the laboratory to experimentally validate the results of the numerical simulation. The prototype can inspect conductor samples by scanning them from end to end. Defects are detected by variations in the fluxgate sensor signals and located using an encoder that measures the position of the sample in the probe. We fabricated several samples in the laboratory by adding artificial defects of known size to pieces of healthy conductors. In this way, it was possible to characterize and evaluate the sensitivity and robustness of the prototype. Laboratory measurements showed that the prototype was able to accurately determine metal losses and detect the presence of broken strands in the steel core.

This project allowed us to develop a magnetic probe capable of detecting defects in the steel core of high voltage lines. This new probe respects the aperture and weight constraints and seems to be a promising solution for automatic inspection by drone. It also provides sensitive and accurate measurements thanks to the fluxgate sensors as well as the compensation for imperfect conductor centering. However, the current prototype of the probe still needs to be tested in the field to see how it performs in real-world conditions.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvii
LISTE DES ANNEXES	xviii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Éléments de la problématique	2
1.3 Objectifs de recherche	4
1.4 Plan du mémoire	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Les lignes à haute tension et leurs mécanismes de dégradation	6
2.1.1 Conducteurs ACSR	6
2.1.2 Dégradation des conducteurs	7
2.2 Contrôle non destructif des câbles métalliques	9
2.2.1 Objectif du contrôle non destructif	9
2.2.2 Différentes méthodes de contrôle non destructif	9
2.3 Matériaux magnétiques et aimants permanents	12
2.3.1 Diamagnétisme et paramagnétisme	12
2.3.2 Ferromagnétisme	13
2.3.3 Aimants permanents	15
2.4 Principe de fonctionnement de la magnétoscopie et applications	16

2.4.1	Circuits magnétiques	16
2.4.2	Fuite de flux magnétique	18
2.4.3	Inspection par champ magnétique résiduel	20
2.4.4	Applications	21
2.5	Sondes d'inspection magnétique dans la littérature et sur le marché	21
2.5.1	Exemple sur le marché : sonde LineVue de Kinetrics	22
2.5.2	Exemple en littérature : détection quantitative	23
2.6	Conclusion	25
CHAPITRE 3 SIMULATION NUMÉRIQUE DE LA SONDE MAGNÉTIQUE ET OPTIMISATION DE SA GÉOMÉTRIE		26
3.1	Logiciel de simulation et méthode des éléments finis	26
3.1.1	COMSOL Multiphysics	26
3.1.2	Méthode des éléments finis	27
3.1.3	Sources d'erreurs potentielles	27
3.2	Simulation de la sonde magnétique : premier modèle	28
3.2.1	Modélisation géométrique	28
3.2.2	Simulation avec un conducteur ACSR	30
3.2.3	Points de mesures et emplacement des capteurs magnétiques	33
3.3	Explorations géométriques et sonde à trois pôles	34
3.3.1	Sonde transversale	34
3.3.2	Sonde à 2 pôles	35
3.3.3	Sonde à 3 pôles	36
3.4	Optimisation de la sonde à trois pôles	37
3.4.1	Objectifs	38
3.4.2	Taille des paramètres géométriques	39
3.4.3	Taille de l'entrefer et point zéro magnétique	40
3.5	Détection de défauts dans l'âme d'acier	42
3.5.1	Analyse des résultats	43
3.5.2	Petit défaut LF et brin brisé	45
3.5.3	Position du brin brisé	46
CHAPITRE 4 COMPARAISON EXPÉRIMENTALE DE CAPTEURS MAGNÉTIQUES SOUS UN CHAMP DC		48
4.1	Capteurs magnétiques comparés et leurs technologies	48
4.2	Montage expérimental de mesure	50
4.2.1	Bobines de Helmholtz	50

4.2.2	Montage de mesure	52
4.2.3	Expériences	52
4.3	Résultats et discussions	53
4.4	Conclusion	55
CHAPITRE 5 ARTICLE 1 : ULTRASENSITIVE LIGHTWEIGHT MAGNETIC PROBE FOR NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF HIGH-VOLTAGE OVERHEAD LINES		56
5.1	Introduction	57
5.1.1	Power lines and ACSR conductors	57
5.1.2	MFL and existing probes	59
5.1.3	Objectives	60
5.2	Probe Design	61
5.2.1	Requirements and selected geometry	61
5.2.2	Zero magnetic field point	63
5.2.3	Choice of sensor	63
5.2.4	Physical configuration of the probe	64
5.2.5	Complete prototype	65
5.3	Experimental tests	66
5.3.1	Testing samples	66
5.3.2	Measurement procedure and data acquisition	69
5.4	Results and Discussion	71
5.4.1	Probe sensitivity	71
5.4.2	Quantitative detection of LMA and broken wire detection	71
5.4.3	Offset compensation	73
5.4.4	Corrosion of connecting splices	74
5.5	Conclusion	75
CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE		77
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		78
7.1	Synthèse des travaux	78
7.2	Limitations de la solution proposée	79
7.3	Améliorations futures	79
RÉFÉRENCES		81
ANNEXES		87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Résultats des simulations avec trois modélisations différentes de l'âme d'acier du conducteur multibrins	32
Tableau 4.1	Capteurs magnétiques comparés	48
Tableau 4.2	Résultats des métriques d'évaluation des capteurs	53
Tableau 5.1	List of LMA and LF samples used for testing the new magnetic probe	67

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Exemples de conducteurs ACSR avec une âme d'acier et une enveloppe en aluminium	2
Figure 1.2	Installation d'un dispositif d'inspection des lignes à haute tension par Hydro-Québec	3
Figure 1.3	Manchon de raccordement d'un conducteur ACSR	3
Figure 2.1	Exemples de conducteurs ACSR	7
Figure 2.2	Exemples de défauts LMA créés artificiellement dans un laboratoire .	8
Figure 2.3	Exemples de défauts LF créés artificiellement dans un laboratoire . .	8
Figure 2.4	Principe d'inspection par courant de Foucault de la sonde du LineCore	11
Figure 2.5	Diagramme schématique des domaines magnétiques d'un matériau ferromagnétique	13
Figure 2.6	Exemples de courbes d'hystérésis typiques de matériaux ferromagnétiques	15
Figure 2.7	Champ magnétique produit par un aimant permanent	16
Figure 2.8	Schéma de sonde magnétique et chemin du flux magnétique	17
Figure 2.9	Circuit magnétique simple avec et sans entrefer	17
Figure 2.10	Schématisation de la fuite de flux magnétique en présence d'un défaut	19
Figure 2.11	Diagramme schématique du processus de détection RMF	20
Figure 2.12	Robot d'inspection Linevue de Kinetrics et schéma du circuit magnétique de la sonde du robot	22
Figure 2.13	Principe de détection des défauts LF et LMA de la sonde Linevue de Kinetrics.	23
Figure 2.14	Modèle 3D de la simulation de la sonde de détection quantitative de Zhang <i>et al.</i>	24
Figure 2.15	Prototype de la sonde de détection quantitative de Zhang <i>et al.</i> et du circuit imprimé des capteurs à effet Hall	24
Figure 3.1	Exemple d'un maillage tétraédrique sur COMSOL	27
Figure 3.2	Géométrie du premier modèle de la sonde magnétique dans COMSOL	28
Figure 3.3	Exemple de résultat de simulation par éléments finis (Comsol Multiphysics) du premier modèle de sonde magnétique développé dans ce projet : vecteur de densité de champ magnétique \vec{B}	29
Figure 3.4	Modèle du conducteur ACSR en simulation	30
Figure 3.5	Espacement et espacement minimal entre la sonde et l'âme d'acier . .	31
Figure 3.6	Rayon effectif équivalent pour un conducteur à 7 brins	32

Figure 3.7	Densité du flux magnétique dans l'âme d'acier en fonction de l'espace- ment entre la sonde et l'âme d'acier	32
Figure 3.8	Emplacements des capteurs magnétiques dans la sonde	34
Figure 3.9	Vue en perspective de la sonde transversale	35
Figure 3.10	Lignes de flux magnétique pour la sonde transversale	35
Figure 3.11	Géométrie de la sonde à 2 pôles	36
Figure 3.12	Compensation des déplacements verticaux du câble - sonde à 2 pôles - mesure dans l'entrefer	37
Figure 3.13	Géométrie de la sonde à 3 pôles	37
Figure 3.14	Compensations des déplacements du câble - sonde à 3 pôles - mesure dans l'entrefer	38
Figure 3.15	Paramètres géométriques de la sonde	39
Figure 3.16	Optimisation des paramètres géométriques de la sonde	41
Figure 3.17	Lignes de flux et point zéro de champ magnétique dans la sonde	42
Figure 3.18	Variation du flux le long de l'axe z pour différentes tailles d'entrefer .	42
Figure 3.19	Modélisation des défauts LMA et LF dans l'échantillon de la simulation numérique	43
Figure 3.20	Résultats de simulation par éléments finis pour la détection de défauts LMA et LF de différentes dimensions	44
Figure 3.21	Densité de flux mesurée dans l'air en fonction du rayon de l'âme d'acier	45
Figure 3.22	Modélisation plus réaliste des défauts LF	45
Figure 3.23	Résultat de simulation pour un échantillon avec brin brisé	46
Figure 4.1	Diagramme du circuit interne d'un capteur à effet hall et montage recommandé	49
Figure 4.2	Circuit recommandé pour un capteur fluxgate de type DRV425	50
Figure 4.3	Circuit recommandé pour le capteur magnéto-résistif RR111	51
Figure 4.4	Dispositif de génération de champ magnétique : bobines de Helmholtz	51
Figure 4.5	Comparaison des différents capteurs	54
Figure 5.1	ACSR conductor (Curlew) made of 7 central galvanized steel strands and 54 peripheral aluminum strands	58
Figure 5.2	Schematic view of magnetic flux leakage in presence of a steel core defect	59
Figure 5.3	Installation of an inspection device for a river-crossing power line . .	60
Figure 5.4	3D finite element model of the magnetic probe implemented in Comsol Multiphysics	62

Figure 5.5	Schematic of a single pole with its different components, namely the yoke (1), the permanent magnets (2), the couplings (3) and the tested sample (4)	62
Figure 5.6	Magnetic flux lines around a pole of the magnetic probe, showing explicitly the location of the zero magnetic field point	64
Figure 5.7	3D model of the probe frame, showing the conductor access space, the slidable sensor platforms and a schematic of the conductor offset with respect to the central axis of the probe	65
Figure 5.8	Probe pole fabrication with soft steel laminations	65
Figure 5.9	Complete probe prototype	66
Figure 5.10	Example of healthy steel rod samples bundled to change the effective radius	67
Figure 5.11	Artificial LMA defect on an ACSR steel core - sample 3 (Lark)	67
Figure 5.12	Artificial LF defects on an ACSR steel core - samples 4 and 6 (Lark - Partridge)	68
Figure 5.13	Diagram of the connecting splice of two ACSR conductors	69
Figure 5.14	X-ray imaging of a corroded ACSR splice in an overhead power line	69
Figure 5.15	Experimental sample of the steel sleeve of an ACSR connecting splice	70
Figure 5.16	Amplitude of the output signal for steel rod samples of different effective radius	72
Figure 5.17	Probe scans of different ACSR steel core samples (Table 5.1)	72
Figure 5.18	Probe scans of different ACSR steel core samples (zoomed). Pictures of sample 4 and 6 are shown in Figure 5.12	74
Figure 5.19	Effectiveness of offset compensation of the conductor radial deviation from the central axis of the probe	75
Figure 5.20	Probe scans of the splice sample (Figure 5.15b) with different defect widths	75
Figure A.1	Résultat de l'expérience de linéarité	88
Figure A.2	Erreur des capteurs	89
Figure A.3	Détermination de l'erreur de linéarité	90
Figure A.4	Résultat de l'expérience de sensibilité	91
Figure A.5	Résultat de l'expérience de répétabilité pour le capteur MR (5)	92
Figure B.1	Mesure avec la sonde prototype, échantillon Partridge sans défauts.	
	Mesure dans l'air (capteur fluxgate)	95
Figure B.2	Mesure avec la sonde prototype, défaut LMA 10.2%, échantillon Partridge	95
Figure B.3	Mesure avec la sonde prototype, défaut LMA 14.1%, échantillon Lark	96

Figure B.4	Mesure avec la sonde prototype, défaut LF, échantillon Partridge . . .	96
Figure B.5	Mesure avec la sonde prototype, 2 défauts LF, échantillon Lark . . .	96

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AAAC	All Aluminium Alloy Conductor
AAC	All Aluminium Conductor
ACAR	Alluminium Conductor Aluminium Reinforced
ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced
ASTM	American Society for Testing and Materials
GMR	Giant Magneto-Resistance
IREQ	Institut de Recherche d'Hydro-Québec
LF	Local Fault
LMA	Loss of Metallic Area
LSM	Laboratoire de Supraconductivité et Magnétisme
MEF	Méthode des Éléments Finis
MFL	Magnetic Flux Leakage
NDT	Non Destructive Testing
NI	National Instruments
RMF	Residual Magnetic Field
SMILE	Sonde Multifonctionnelle d'Inspection des Lignes Électriques

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Méthodes de post-traitement des données de comparaison des capteurs	87
Annexe B	Mesure des capteurs fluxgate au point zéro vs mesure des capteurs à effet Hall dans l'entrefer	94

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Les réseaux de transport électrique sont d'une importance primordiale à notre vie quotidienne et notre accès à l'énergie. Ils permettent de transporter l'énergie électrique à partir des sites de production jusqu'aux postes de transformation (réseau de transport haute tension) puis jusqu'au consommateur (réseau de distribution). Le transport d'électricité peut être aérien ou souterrain. Les lignes souterraines sont plus résistantes aux intempéries que les lignes aériennes, mais leur coût d'installation est supérieur, et elles ne constituent actuellement que 11% du réseau de distribution québécois [1]. Quant au réseau de transport à haute tension, il est entièrement constitué de lignes aériennes, qui constituent l'option la moins coûteuse pour le transport de l'électricité, mais nécessitent une maintenance permanente afin de respecter les enjeux de sécurité et de fiabilité du réseau, ainsi que les spécifications et régulations internationales [2]. Hydro-Québec, en tant que pionnier du transport d'électricité à haute tension, a développé la première ligne haute tension 735 kV commerciale au monde et possède le plus vaste réseau de transport de l'Amérique du Nord avec 35000 km de lignes aériennes [3] [4].

Les lignes aériennes peuvent en effet être sujettes à des dysfonctionnements dus à l'usure et au vieillissement des conducteurs électriques. Ce genre de problème peut éventuellement causer une panne d'électricité sur tout un secteur et prendre plusieurs heures, voire plusieurs jours pour être résolu. De plus, le remplacement des conducteurs d'une ligne peut coûter dans les millions de dollars et nécessite souvent des années de planification [5]. Certains sites sont affectés plus que d'autres, selon l'âge des conducteurs, les conditions climatiques, la salinité de l'environnement ou même la pollution. La dégradation peut également résulter de phénomènes mécaniques, comme la fatigue interne ou les vibrations dues au vent [6].

Toutefois, l'usure des conducteurs haute tension peut être détectée bien avant le point critique de dysfonctionnement grâce à des **essais non destructifs (Non Destructive Testing (NDT))**. Une détection précoce de l'usure des conducteurs est donc une information primordiale qui permet d'**éviter les pannes et d'estimer l'état et la durée de vie des conducteurs dans le réseau**.

C'est dans ce cadre que l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ), en partenariat avec le Laboratoire de Supraconductivité et Magnétisme (LSM) de Polytechnique Montréal, a lancé le projet Sonde Multifonctionnelle d'Inspection des Lignes Électriques (SMILE), qui vise,

entre autres, à créer une sonde à courant de Foucault et une sonde magnétique permettant la détection des défauts et anomalies sur les conducteurs des lignes électriques. Ces sondes seront par la suite installées sur un robot ou un drone qui parcourra les lignes aériennes de transport d'électricité, ce qui permettra de localiser les défauts et d'obtenir le maximum d'informations sur l'usure des conducteurs [7].

Les conducteurs de transport d'électricité les plus courants sont les conducteurs ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) (figure 1.1). Ils sont composés d'une **âme d'acier**, généralement constituée de 1 à 37 brins qui assurent la résistance mécanique, et de **couche**s **externes en aluminium** qui assurent le transport du courant électrique [2]. Le projet SMILE dans sa globalité vise à concevoir une sonde multifonction capable de détecter plusieurs types de défauts dans le conducteur. Toutefois, **le sujet de cette maîtrise se limite uniquement à la recherche et au développement de la sonde magnétique pour la détection des défauts dans l'âme d'acier, en exploitant la propriété ferromagnétique de l'acier.**

1.2 Éléments de la problématique

Plusieurs sondes magnétiques permettant la détection des défauts dans les câbles d'acier existent déjà dans le marché, par exemple la sonde Rotesco [9], la sonde Intron [10] ou la sonde Magnograph [11]. Cependant, ces sondes sont conçues pour les câbles composés uniquement d'acier. Elles ne sont pas bien **adaptées aux conducteurs ACSR**. En effet, les conducteurs ACSR présentent un défi important pour les sondes magnétiques en raison des couches d'aluminium externes. Le diamètre résultant du conducteur est plus grand que celui de l'âme d'acier seule et la sonde ne peut pas s'approcher très près de l'acier. L'excitation magnétique fournie par la sonde s'en voit ainsi fortement diminuée, ce qui rend plus difficile la détection des défauts dans l'acier.

Les sondes actuelles présentent donc plusieurs lacunes qui les rendent peu performantes pour le contrôle non destructif des conducteurs ACSR. Quelques exemples sont présentés ci-dessous.

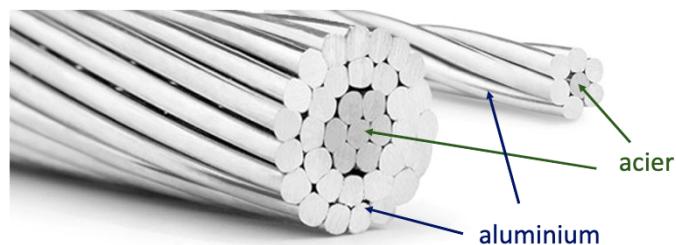


FIGURE 1.1 Exemples de conducteurs ACSR avec une âme d'acier et une enveloppe en aluminium. Tiré de [8]

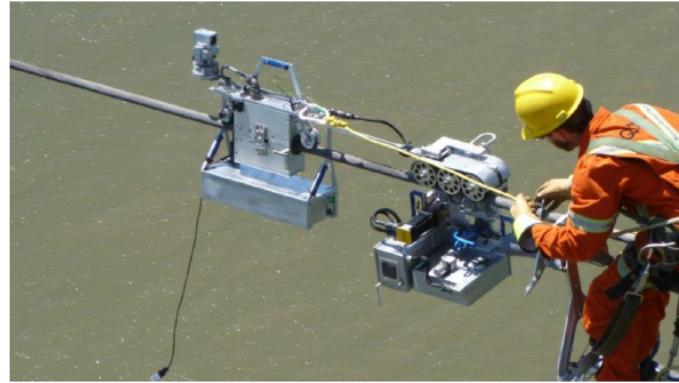


FIGURE 1.2 Installation d'un dispositif d'inspection des lignes à haute tension par Hydro-Québec. Tiré de [12]

- Elles sont très lourdes (plus de 10 kg) : c'est par exemple le cas des sondes Rotesco et Magnograph, ce qui les rend impossibles à **embarquer sur un drone**.
- Elles ont une **ouverture trop petite** (24 mm pour la sonde Intron par exemple). La majorité des conducteurs ACSR ne pourraient donc pas être testés.
- Afin d'être fixées autour du conducteur, ces sondes utilisent des **mécanismes d'ouverture** nécessitant l'intervention d'un technicien pour les installer sur les lignes à haute tension (jusqu'à 735 kV). Cela nuit significativement à **la rapidité des inspections** et expose le personnel de maintenance aux dangers associés à l'installation (figure 1.2).
- Certaines sondes présentent un niveau de bruit élevé dans le signal de mesure et une grande **sensibilité aux perturbations externes** (vibrations du conducteur, champs magnétiques externes, etc). La lecture et l'interprétation des données devient dans ce cas une tâche délicate, nécessitant un œil expert.

Un autre défi concerne l'**inspection des manchons de raccordement** (figure 1.3). Les conducteurs ACSR sont produits en longueurs finies de l'ordre du kilomètre, il est donc nécessaire de les rabouter pour constituer des lignes de plusieurs kilomètres. Cette jonction est réalisée grâce à des manchons de raccordement (par la suite abrégé "manchons"), dont le diamètre est encore plus grand que celui des conducteurs et pouvant également contenir des défauts de corrosion.



FIGURE 1.3 Manchon de raccordement d'un conducteur ACSR. Tiré de [13]

Au vu de ces différents défis, ce projet de maîtrise vise à **répondre à la problématique** suivante : dans quelle mesure est-il possible d'évaluer l'état de l'âme d'acier des conducteurs ACSR avec une sonde magnétique légère à grande ouverture ?

1.3 Objectifs de recherche

Le projet SMILE vise notamment à développer de nouvelles sondes optimisées pour évaluer l'état général et la durée de vie résiduelle des conducteurs ACSR utilisés dans les lignes à haute tension au Québec. La principale technologie explorée par l'IREQ au cours des dernières années est basée sur une sonde à courants de Foucault [14]. Une équipe de trois personnes du LSM de Polytechnique Montréal travaille sur le projet, dont une grande partie concerne l'optimisation de la sonde à courants de Foucault. Cependant, le sujet de cette maîtrise porte sur une autre partie du projet, liée à la détection de défauts dans l'âme d'acier des conducteurs. Il s'agit d'évaluer le potentiel d'une autre technologie : la sonde à aimants permanents.

Objectif principal

L'objectif principal de recherche est de **concevoir une nouvelle sonde magnétique légère, à grande ouverture, facile à déployer et optimisée pour la détection précise des défauts d'acier dans les conducteurs ACSR**.

L'âme des conducteurs ACSR est constitué de plusieurs brins d'acier (souvent 7 brins, dont un brin central et 6 brins torsadés autour). Cette âme peut contenir des défauts de natures différentes, qu'il est possible de classer en 2 catégories. Les pertes de section d'acier, appelées LMA (Loss of Metallic Area) et les brins brisés, appelés LF (Local Fault ou Localized Flaws). La nouvelle sonde développée doit permettre de détecter les deux types de défauts LMA et LF.

Objectifs spécifiques

Au vu des éléments précédents, cette maîtrise peut être divisée en cinq objectifs spécifiques :

1. Explorer différentes géométries de sonde magnétique par simulation numérique, et comprendre l'effet des différents éléments et paramètres sur le champ magnétique de la sonde, de même que leur influence sur la sensibilité des mesures.
2. Choisir une géométrie optimisée, qui satisfait les contraintes de poids réduit, de grande ouverture, de déploiement facile et de sensibilité aux défauts LMA et LF.
3. Comparer expérimentalement différents capteurs magnétiques disponibles sur le marché, afin de choisir le capteur idéal pour la géométrie retenue de la sonde magnétique.

4. Réaliser un prototype de la nouvelle sonde et valider expérimentalement les résultats de simulations en mesurant des échantillons de conducteurs ACSR contenant des défauts réalisés en laboratoire.
5. Analyser les limites de la sonde réalisée et proposer des améliorations éventuelles.

1.4 Plan du mémoire

Ce mémoire détaille les différentes démarches de recherche réalisées pour répondre aux objectifs précédents ainsi que les résultats obtenus tout au long de la maîtrise. Il est réparti en six chapitres incluant ce chapitre d'introduction et le dernier chapitre de conclusion. Le deuxième chapitre présente une revue de littérature, exposant l'état de l'art des différents domaines pertinents, ainsi que les principes théoriques de certaines notions essentielles au projet. Le troisième chapitre détaille les différentes géométries de sonde explorées en simulation par éléments finis, ainsi que les avantages de la géométrie à trois pôles retenue. Le quatrième chapitre présente la méthodologie expérimentale utilisée pour comparer différents capteurs magnétiques et les critères qui ont mené au choix du capteur de type fluxgate. Le cinquième chapitre est un article soumis au journal NDT & E International, qui détaille la procédure de conception du prototype de la nouvelle sonde et les résultats des tests menés au laboratoire. Enfin, le dernier chapitre de conclusion présente une synthèse des travaux, les limites de la sonde ainsi que certains axes d'amélioration possibles.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Les lignes à haute tension et leurs mécanismes de dégradation

2.1.1 Conducteurs ACSR

Plusieurs types de conducteurs¹ sont utilisés aujourd’hui dans les lignes aériennes à haute tension [2], notamment :

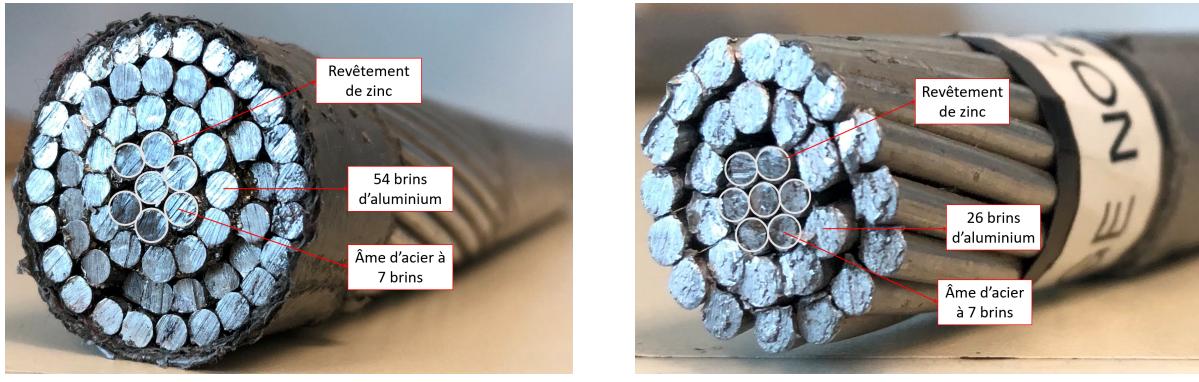
1. les conducteurs **AAC** : All Aluminium Conductor.
2. les conducteurs **AAAC** : All Aluminium Alloy Conductor.
3. les conducteurs **ACAR** : Aluminium Conductor Aluminium Reinforced.
4. les conducteurs **ACSR** : Aluminium Conductor Steel Reinforced.

Le choix de l’aluminium dans ces conducteurs se justifie par son excellente conductivité électrique, sa faible masse volumique par rapport aux autres métaux, son faible coût et sa résistance à la corrosion. Le problème des conducteurs en aluminium est leur faible résistance mécanique. Il est donc naturel de les renforcer avec de l’acier pour les aider à supporter leur propre poids. C’est pourquoi les conducteurs ACSR sont les plus courants dans les réseaux électriques actuels. Ils permettent de supporter une tension mécanique plus élevée sur le conducteur et donc d’avoir des longueurs de conducteur plus importantes sans pylône de support. Un autre avantage est que l’acier se dilate moins que l’aluminium sous l’effet thermique des courants dans le conducteur², ce qui rend les conducteurs ACSR moins sujets à l’affaissement que les conducteurs en aluminium.

Ces conducteurs sont constitués de plusieurs couches concentriques. Chaque couche est constituée de plusieurs brins (fils) de 2 à 4 mm de diamètre (voir figure 2.1). Les brins centraux constituent ce qu’on appelle l’âme d’acier du conducteur. Le diamètre et le nombre de brins utilisés pour les couches d’aluminium et l’âme d’acier varient selon le type de conducteur ACSR. Pour simplifier la désignation des différentes versions des conducteurs ACSR, il est commun de leur donner un nom. Au Québec, des noms d’oiseaux sont utilisés pour les nommer. Par exemple, sur la figure 2.1 (b), le conducteur Partridge est constitué de 7 brins d’acier d’un diamètre de 2 mm et de 26 brins d’aluminium d’un diamètre de 2.57 mm [15].

1. Dans ce mémoire, le terme “câble” est utilisé pour désigner le cas général d’un câble métallique. Le terme “conducteur” est spécifique aux câbles qui conduisent l’électricité.

2. Le coefficient de dilatation thermique de l’acier ($\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) est environ 2 fois plus petit que celui de l’aluminium ($\alpha = 23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).



(a) Conducteur ACSR Zebra

(b) Conducteur ACSR Partridge

FIGURE 2.1 Exemples de conducteurs ACSR [Photo prise par Marina Gasparini, doctorante à Polytechnique Montréal]

Il existe plus de 70 types différents de conducteurs ACSR, mais le principe reste toujours le même. Les brins d'aluminium sont utilisés pour conduire le courant électrique et l'âme en acier est utilisée pour assurer la résistance mécanique du câble. L'acier est recouvert d'une fine couche de zinc qui agit comme une anode sacrificielle et protège l'âme du conducteur de la corrosion galvanique. Certains conducteurs ACSR utilisent d'autres matériaux pour le revêtement de l'acier. Ces revêtements doivent toutefois respecter les normes internationales publiées par l'ASTM (American Society for Testing and Materials) [16] [17].

2.1.2 Dégradation des conducteurs

La durée de vie des conducteurs ACSR est en général assez élevée, mais elle dépend de l'emplacement du conducteur. Par exemple, au-dessus des cours d'eau, près de l'océan, ou dans un secteur industriel, la durée de vie est grandement diminuée [18]. Les conditions environnementales, météorologiques, ainsi que les méthodes de fabrication et d'installation différentes, font que la dégradation n'est pas uniforme partout dans le réseau électrique. Les modes de dégradation sont également nombreux.

Il existe en effet plusieurs types de défauts dans les conducteurs ACSR. Les défauts externes sont les plus communs. Ils sont souvent causés par le frottement sur le sol ou d'autres surfaces pendant la fabrication ou l'installation du conducteur. Sur les conducteurs ACSR, ces défauts ne sont pas les plus dangereux³ et peuvent être détectés grâce à une inspection visuelle. Les

3. Néanmoins, si les défauts externes sont trop importants, ils peuvent amplifier l'effet couronne [19] et accélérer la dégradation du conducteur.

défauts internes, notamment les défauts dans l'âme d'acier, sont plus critiques et peuvent être classés en deux catégories [20] :

Défauts LMA : Correspondent à une réduction dans la section d'acier (voir figure 2.2), souvent causée par la corrosion interne, qui se produit lorsque des contaminants ou de la vapeur d'eau pénètrent entre les fils d'aluminium à l'intérieur du conducteur. La corrosion des brins d'acier dans les conducteurs ACSR commence dès que la couche de revêtement en zinc disparaît. L'âme d'acier entre en contact avec l'aluminium interne et la corrosion galvanique se déclenche [21].

Défauts LF : Correspondent à des défauts localisés, souvent sous forme de brins brisés (voir figure 2.3). Ils sont souvent causés par des dommages mécaniques comme la fatigue interne et les vibrations dues au vent. La fragilisation par corrosion peut aussi causer ou faciliter l'apparition des défauts LF.

Dans son article de 1985 sur l'inspection des câbles d'acier en service, Weischedel [20] affirme qu'une étude statistique menée sur plus de 8000 rapports d'essais réalisés en laboratoire et sur le terrain révèle que 10 % de tous les câbles en service étaient dans un état inacceptable et potentiellement dangereux, et 2 % des câbles étaient dans un état extrêmement dangereux



(a)

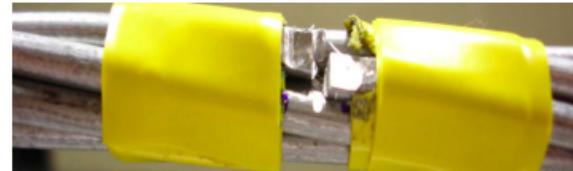


(b)

FIGURE 2.2 Exemples de défauts LMA créés artificiellement dans un laboratoire. Adapté de [22]



(a)



(b)

FIGURE 2.3 Exemples de défauts LF créés artificiellement dans un laboratoire. Adapté de [22]

aux États-Unis. Des inspections périodiques des ACSR en service sont donc nécessaires pour éviter les dangers inévitables reliés à leur défaillance.

2.2 Contrôle non destructif des câbles métalliques

2.2.1 Objectif du contrôle non destructif

La majorité des produits fabriqués en industrie passent par un contrôle de qualité avant d'être commercialisés. L'objectif de ce contrôle est d'assurer que le produit répond aux exigences des cahiers de charges et restera fiable durant sa période de service. Dans certaines industries à haut risque, notamment en aéronautique et en énergie nucléaire, ces tests de qualités sont obligatoires non seulement à la production, mais durant toute la période de service. Les structures et les composantes sont souvent testées en plein fonctionnement pour assurer que les défauts causés par la corrosion ou la fatigue interne ne se développent pas au point de causer des conséquences désastreuses [23]. Les techniques utilisées pour tester dans ces conditions sont appelées des **méthodes d'essais non destructives (NDT methods)**.

Les lignes à haute tension sur les réseaux électriques doivent également être testés pendant leur fonctionnement. Les méthodes de contrôle non destructif sont l'outil idéal pour les inspections régulières des conducteurs. Elles permettent de suivre l'évolution des défauts et d'évaluer l'état des lignes sans interrompre le service.

2.2.2 Différentes méthodes de contrôle non destructif

Il existe une très grande variété de méthodes de contrôle non destructif utilisant des principes et technologies totalement différentes. On peut citer les méthodes acoustiques, mécaniques, visuelles, optiques, radiologiques, thermiques, électriques, magnétiques, etc. Certaines de ces méthodes sont toutefois plus adaptées pour le contrôle non destructif des câbles métalliques que d'autres, notamment :

- **Inspections optiques et visuelles à l'aide de caméras** : Ces inspections utilisent des caméras permettant de visualiser l'état externe du câble. Dans certains cas, une usure externe est synonyme de défauts internes, corrosion, fractures ou allongement de l'âme du câble. Yuan *et al.* [24] décrivent l'utilisation d'un système de vision artificielle pour la détection des taches d'usure de la courroie de transmission de transport du charbon. Grâce à un traitement d'image en temps réel, ils sont capables d'alerter efficacement la production en cas de défaillance des courroies de transmission. Cependant, cette méthode reste majoritairement limitée à la détection des défauts externes.

- **Inspection par ultrasons :** La détection des défauts par ultrasons est une méthode prometteuse qui permet l'automatisation des inspections. Cette méthode est souvent utilisée pour l'inspection des structures mécaniques et civiles. Des ondes ultrasonores guidées sont envoyées dans les câbles des structures, parcourant de longues distances et sont sensibles aux défauts sur leur chemin de propagation. Les ondes sont partiellement réfléchies au niveau des défauts. Les ondes réfléchies sont mesurées et des algorithmes de traitement de signal déterminent la position des défauts en prenant en compte le temps de propagation des ondes. Toutefois, la nature dispersive des ondes, surtout dans le cas des câbles à plusieurs brins dans lesquels les brins sont en contact les uns avec les autres, complique la tâche et limite la précision de ce genre de méthodes, d'autant plus que les câbles peuvent être composés de brins de différents matériaux, par exemple, l'acier et l'aluminium, dans lesquels les ondes se déplacent à des vitesses différentes [25].
- **Méthodes mécaniques :** Les inspections par méthodes mécaniques peuvent prendre plusieurs formes. Par exemple, dans leur investigation des différentes méthodes de détection de défauts dans les lignes aériennes à haute tension au Japon, Komoda *et al.* [26] décrivent deux méthodes mécaniques : (i) la méthode de vibration longitudinale, où il est question de générer des vibrations longitudinales sur le câble à tester, puis recevoir les ondes réfléchies et détecter les formes d'ondes créées par un défaut, et (ii) la méthode de rigidité à la flexion, où plusieurs rouleaux sont déplacés au-dessus et en dessous du câble pour appliquer une contrainte de flexion prédéfinie. Le déplacement des rouleaux est mesuré et change légèrement en cas de présence de défauts. Ces méthodes mécaniques sont très peu utilisées aujourd'hui dans l'inspection des lignes à haute tension, car elles sont difficiles à mettre en place en pratique et ne donnent pas des résultats assez précis.
- **Détection par imagerie et radiations :** L'inspection par imagerie (rayons X) ou radiations (rayons Gamma) est souvent utilisée dans le cas où les câbles d'acier sont recouverts de matériaux plastiques. Ces méthodes viennent dans ce cas remplacer les méthodes visuelles, mais le principe est le même. La détection se fait sur une photo obtenue par imagerie. Peng and Wang [27] ont par exemple étudié le temps d'exposition et la sensibilité des câbles d'acier des ponts suspendus à la détection par rayons gamma et ont montré des résultats prometteurs à travers des tests réels sur le terrain. Cette méthode est toutefois souvent critiquée à cause des contaminations radioactives.

- **Inspection par courants de Foucault :** C'est une inspection basée sur le principe de l'induction électromagnétique. Par exemple, dans le cas du LineCore [28], une bobine d'excitation alimentée en courant alternatif induit des courants de Foucault dans le conducteur à tester. L'amplitude, la phase et le trajet des courants de Foucault sont influencés par les propriétés de l'échantillon, et le champ magnétique généré par les courants de Foucault dans l'échantillon induit une tension dans une bobine réceptrice (figure 2.4). Ainsi, en observant les changements de cette tension induite, on peut déterminer si l'objet testé est défectueux [29]. L'inspection par courants de Foucault est de loin l'une des méthodes les plus populaires aujourd'hui pour les tests non destructives des lignes haute tension. Cette méthode a d'ailleurs beaucoup évolué au cours des dernières décennies. Des nouvelles variations de la méthode, plus performantes, ont vu le jour pour corriger ses lacunes et optimiser les mesures, notamment l'inspection par courants de Foucault multi-fréquences et l'inspection par courants pulsés [30] [31].
- **Magnétoscopie :** Les méthodes d'essai non destructives magnétiques consistent à appliquer un champ magnétique (souvent en utilisant des aimants permanents) au câble à examiner, puis à observer les changements de flux magnétique qui en résultent dans la région étudiée. Les méthodes magnétiques sont très efficaces, mais leur application se limite aux matériaux ferromagnétiques [23]. La magnétoscopie sera abordée plus en détail dans les prochaines sous-sections.

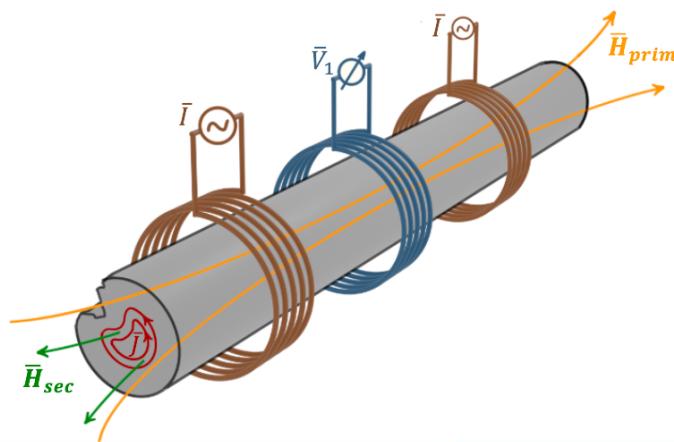


FIGURE 2.4 Principe d'inspection par courant de Foucault de la sonde du LineCore

En marron, des bobines d'excitation, génèrent le champ H_{prim} . Les courants de Foucault induits (en rouge) sont déformés à cause du défaut. En bleu, la bobine de détection mesure la tension induite par $H_{prim} + H_{sec}$ [Schéma réalisé par Marina Gasparini].

En 2015, Titan *et al.* [32] ont affirmé dans leur revue de littérature en Chine et à l'étranger que les méthodes magnétiques et électromagnétiques sont les plus utilisées pour la détection des défauts dans les câbles métalliques, en raison de leur grande efficacité, précision, facilité d'implémentation, absence de contact avec l'échantillon testé et balayage rapide du câble, ainsi que le traitement aisément des données. Pour l'étude menée dans cette maîtrise, qui vise à déceler les défauts dans la partie ferromagnétique des conducteurs ACSR, les méthodes d'inspection par magnétoscopie sont les plus pertinentes.

2.3 Matériaux magnétiques et aimants permanents

Les matériaux peuvent être classés en trois grandes catégories en fonction de leurs propriétés magnétiques : les matériaux diamagnétiques, paramagnétiques et ferromagnétiques [33].

Au niveau macroscopique, les propriétés magnétiques se manifestent par la réaction des matériaux à un champ magnétique externe. Les matériaux ferromagnétiques les plus connus sont principalement le fer, le nickel, le cobalt et certains de leurs alliages. Ces matériaux réagissent très fortement aux champs magnétiques. Cependant, toutes les substances ordinaires présentent certains effets magnétiques, souvent très faibles comparés aux effets dans les matériaux ferromagnétiques.

2.3.1 Diamagnétisme et paramagnétisme

Les propriétés magnétiques sont d'origine microscopique. Dans certaines substances, les atomes n'ont pas de moment magnétique permanent, ou plus précisément, les spins des électrons et les mouvements orbitaux de chaque atome se compensent, et le moment magnétique total est nul. Dans certains matériaux, sous un champ magnétique externe, des petits courants sont induits dans l'atome. Selon la loi de Lenz, ces courants s'opposent à la direction du champ. Le matériau est légèrement repoussé par le champ externe. C'est ce qu'on appelle le **diamagnétisme**.

Dans d'autres matériaux, notamment lorsque les atomes ont des électrons non appariés, le moment magnétique moyen de chaque atome n'est pas nul. En plus de l'effet diamagnétique, le champ externe aligne les moments magnétiques des atomes, produisant une aimantation induite dans la même direction que le champ. Ces matériaux sont légèrement attirés par les champs magnétiques, car l'effet d'alignement est plus fort que l'effet diamagnétique. C'est ce qu'on appelle le **paramagnétisme**. Le paramagnétisme est généralement peu intense, car les forces d'alignement sont relativement faibles par rapport aux forces d'agitation thermique qui désorganisent la direction des moments magnétiques des atomes [34].

Pour les applications de contrôle non destructif par champ magnétique statique, les effets paramagnétiques et diamagnétiques peuvent être négligés devant les effets ferromagnétiques. Typiquement, l'aluminium et l'air, qui sont des matériaux paramagnétiques, peuvent être considérés comme du vide d'un point de vue magnétostatique.

2.3.2 Ferromagnétisme

La figure 2.5.a montre la structure microscopique d'un matériau ferromagnétique non aimanté (c'est-à-dire dans son état naturel). Les moments magnétiques des atomes peuvent être orientés de façon aléatoire et, par conséquent, le moment magnétique net du matériau peut toujours être nul. Mais la particularité du ferromagnétisme consiste en la présence de groupes d'atomes voisins qui sont tous alignés dans la même direction. Il s'agit d'un effet qui ne peut être expliqué que par la mécanique quantique. Ces groupes s'alignent spontanément sans la présence d'un champ extérieur. Ces groupements d'atomes qui ont tous des moments magnétiques alignés sont appelés domaines magnétiques (ou domaines de Weiss). Ces domaines constituent la principale différence entre les matériaux ferromagnétiques et paramagnétiques [35].

Sous l'effet d'un champ magnétique externe, certains des domaines entiers s'alignent sur le champ appliqué (figure 2.5.b). Si le champ est suffisamment fort, tous les domaines finissent par s'aligner (figure 2.5.c). Lorsque tous les moments magnétiques des atomes sont alignés, le matériau ferromagnétique est fortement aimanté et présente une très forte attraction au champ magnétique. Cet alignement peut être jusqu'à dix mille fois plus fort que l'alignement paramagnétique.

Saturation magnétique : Lorsque tous les domaines magnétiques sont alignés sous l'effet d'un champ magnétique externe, le matériau ferromagnétique est saturé (figure 2.5.c).

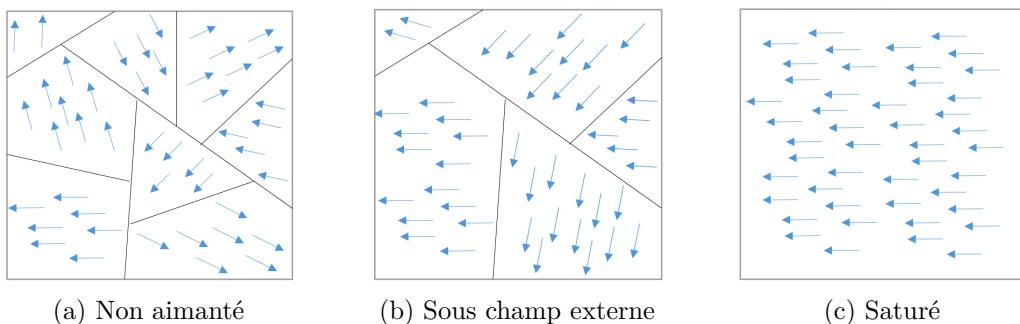


FIGURE 2.5 Diagramme schématique des domaines magnétiques d'un matériau ferromagnétique

L'intensité du champ à l'intérieur du matériau atteint une limite qui ne peut être dépassée même si le champ externe augmente. C'est ce qu'on appelle la saturation magnétique. La valeur de l'intensité du flux magnétique à saturation B_{sat} varie d'un matériau à l'autre. Par exemple, elle peut passer de 0,6 T pour le nickel à 2 T pour le fer [23].

Une fois saturé, le matériau ferromagnétique peut conserver son aimantation même lorsque le champ externe disparaît. Ce phénomène est appelé rétention, rémanence ou mémoire magnétique. Les matériaux qui conservent la majeure partie de l'aimantation sont appelés matériaux ferromagnétiques durs, et ceux qui ne conservent qu'une petite quantité d'aimantation sont appelés matériaux ferromagnétiques doux. La relation exacte entre le champ magnétique d'excitation externe H' et l'intensité du champ à l'intérieur du matériau ferromagnétique B est complexe et peut être décrite par ce qu'on appelle l'hystérésis magnétique.

Hystérésis magnétique : L'intensité du champ magnétique B est reliée au champ d'excitation H' par la perméabilité magnétique $\mu = \mu_r \mu_0$ selon la relation suivante :

$$B = \mu_r \mu_0 H' = \mu_r H, \quad (2.1)$$

où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H.m⁻¹ est la perméabilité magnétique du vide, μ_r est la perméabilité relative du matériau en question et H est l'intensité du champ d'excitation dans le vide.

Pour les matériaux paramagnétiques, cette relation est linéaire d'où $\mu_r \simeq 1$. Mais pour les matériaux ferromagnétiques, cette relation est non linéaire et donne lieu à la courbe B-H (ou courbe d'hystérésis) de la figure 2.6.

Lorsque H augmente à partir de 0, B augmente le long de la courbe (a). Cette courbe au centre de la courbe d'hystérésis représente la courbe de première aimantation. Elle représente la réponse du matériau à partir d'un état désaimanté (ou état naturel). Initialement, un H relativement petit est suffisant pour que B soit grand. La perméabilité relative initiale est très grande. Pour des valeurs plus élevées de H , la courbe d'aimantation se stabilise. La saturation magnétique est atteinte. La courbe de première aimantation est hautement non linéaire. Toutefois, loin de la saturation, pour un petit champ d'excitation, il est possible de l'approximer par une droite.

Lorsque le champ H diminue à partir de la saturation, le champ B ne retourne pas à la courbe (a), mais suit la courbe (b). Le matériau ferromagnétique conserve un champ résiduel. Lorsque H atteint la valeur 0, le champ B ne s'annule pas. Il atteint la valeur du **champ rémanent** B_r : même sans champ d'excitation, le matériau ferromagnétique reste aimanté. Lorsque H devient négatif, B continue le long de la courbe (b) jusqu'à s'annuler, puis atteint

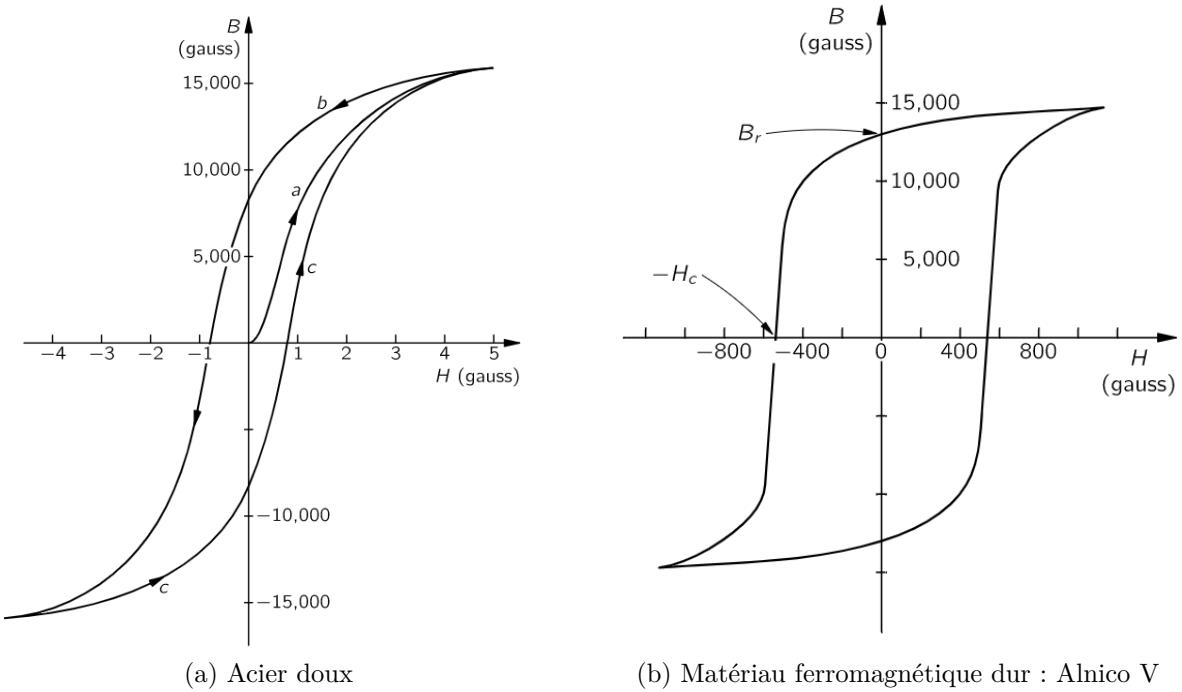


FIGURE 2.6 Exemples de courbes d'hystérésis typiques de matériaux ferromagnétiques doux et dur. Tiré de [34]. Note : 1 gauss = 10^{-4} T

la saturation dans le sens négatif. On appelle **champ coercitif** H_c le champ magnétique qu'il faut appliquer pour obtenir une aimantation nulle.

Pour un matériau ferromagnétique, l'équation 2.1 est une relation fausse. La perméabilité relative dans ce cas est mal définie. En effet, la valeur de B à un moment donné dépend non seulement de ce qu'est H à ce moment, mais aussi de son histoire antérieure. C'est ce qu'on appelle la mémoire magnétique.

Les courbes d'aimantation et d'hystérésis sont différentes selon les matériaux. La forme des courbes dépend principalement de la composition chimique et de la microstructure du matériau, déterminés par son procédé de fabrication. En particulier, les matériaux ferromagnétiques durs ont une rémanence et une coercivité plus élevée (voir l'exemple de l'Alnico V sur la figure 2.6b). Ces matériaux sont donc principalement utilisés pour la fabrication d'aimants permanents.

2.3.3 Aimants permanents

Un aimant permanent est un matériau qui produit son propre champ magnétique. Les matériaux ferromagnétiques, après avoir été aimantés, conservent un champ magnétique

rémanent et sont donc considérés comme des aimants permanents. La grande majorité des aimants vendus sur le marché aujourd’hui sont des aimants à base de terres rares, fabriqués à partir de matériaux magnétiques durs. Par exemple, les aimants à base de néodyme sont les aimants les plus puissants du marché [36]. Ils sont composés d’un alliage de néodyme, de fer et de bore ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). La microstructure de cet alliage lui confère une rémanence et une coercivité très élevées, et donc un champ élevé. Le champ rémanent d’un aimant au néodyme peut facilement atteindre 1,2 T.

Les aimants permanents (ou simplement “aimants” par la suite) sont produits sous différentes formes géométriques, ce qui permet d’obtenir des champs magnétiques de différentes distributions spatiales. Cependant, selon l’équation locale de Maxwell ($\text{div}(\vec{B}) = 0$), il n’existe pas de source ponctuelle de champ : tous les aimants sont des dipôles magnétiques. Les pôles d’un aimant sont nommés nord (N) et sud (S). Par convention, on considère que les lignes de champ magnétique d’un aimant partent du pôle nord de l’aimant et reviennent au pôle sud (voir figure 2.7).

2.4 Principe de fonctionnement de la magnétoscopie et applications

2.4.1 Circuits magnétiques

Afin de comprendre le principe de fonctionnement d’une sonde magnétique, il est important de comprendre ce qu’est un circuit magnétique. Par équivalence avec le circuit électrique, le circuit magnétique est un chemin fermé, généralement constitué d’un matériau ferromagnétique, et dans lequel est confiné un champ magnétique. Le champ magnétique est représenté par des lignes de flux, mais, contrairement à un circuit électrique dans lequel circulent des charges électriques, rien ne circule physiquement dans un circuit magnétique [38].

Dans un circuit magnétique, une bobine ou un aimant permanent agit comme un “générateur” de champ (ou source magnétomotrice). Par exemple, dans le cas de la plupart des sondes d’inspection magnétique, des aimants permanents sont utilisés pour créer un champ magnétique

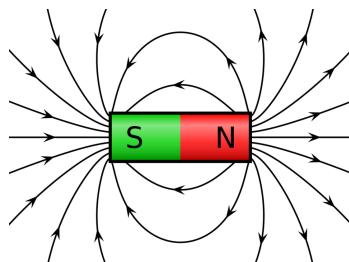


FIGURE 2.7 Champ magnétique produit par un aimant permanent. Tiré de [37]

d'excitation statique. La sonde, seule, peut être vue comme un circuit magnétique ouvert, que le câble ou la plaque à inspecter vient fermer (voir figure 2.8). La présence d'un défaut dans le câble équivaut alors à la présence d'un petit espace d'air (aussi appelé entrefer) dans le trajet du flux magnétique dans le circuit. Cet entrefer, comme le prouvent les équations ci-dessous, provoque une réduction de la densité de flux dans le circuit magnétique.

Dans le cas d'un circuit magnétique simple (voir figure 2.9) La densité de flux s'exprime comme le rapport entre le flux magnétique ϕ et la section du circuit A :

$$B = \frac{\phi}{A} . \quad (2.2)$$

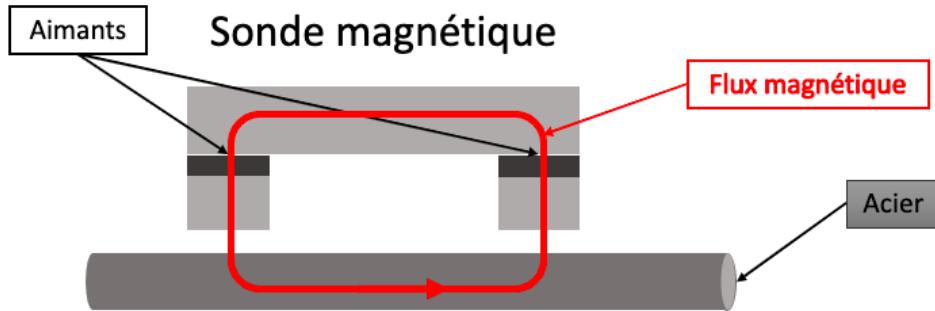


FIGURE 2.8 Schéma de sonde magnétique et chemin du flux magnétique

Les aimants jouent le rôle de générateur magnétique. La sonde, le câble et l'entrefer forment ensemble le circuit magnétique.

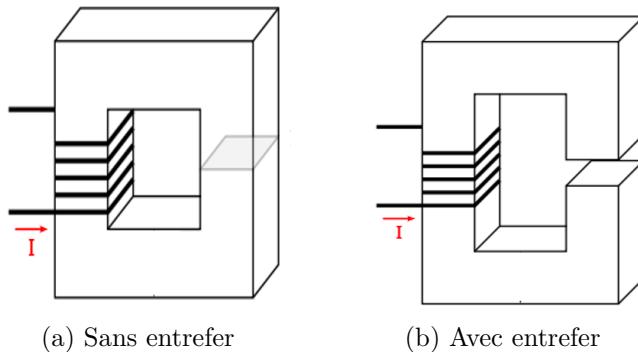


FIGURE 2.9 Circuit magnétique simple (a) sans et (b) avec entrefer. Tiré de [38]

Le flux magnétique, quant à lui, est inversement proportionnel à la réluctance⁴ \mathcal{R} du circuit, qui est elle-même inversement proportionnelle à la perméabilité relative μ_r du circuit, selon les équations ci-dessous :

$$\phi = \frac{NI}{\mathcal{R}} \quad (2.3)$$

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A}, \quad (2.4)$$

où NI représente la force magnétomotrice de la bobine, N étant le nombre de tours et I le courant électrique dans la bobine, l représente la longueur moyenne du chemin parcouru par le flux magnétique et μ_0 la perméabilité du vide.

La réluctance du circuit avec entrefer (figure 2.9b) peut être exprimée comme la somme de la réluctance du métal \mathcal{R}_m et celle de la région d'air \mathcal{R}_{air} :

$$\mathcal{R}_b = \mathcal{R}_m + \mathcal{R}_{air} = \mathcal{R}_m + \frac{l_0}{\mu_0 A}. \quad (2.5)$$

Quant à la réluctance du circuit sans entrefer (figure 2.9a), elle peut s'exprimer comme la somme de \mathcal{R}_m et la réluctance de la partie métallique qui a remplacé l'entrefer \mathcal{R}'_m :

$$\mathcal{R}_a = \mathcal{R}_m + \mathcal{R}'_m = \mathcal{R}_m + \frac{l_0}{\mu_0 \mu_r A}. \quad (2.6)$$

Il est alors possible de comparer la densité du flux dans les deux circuits a et b :

$$\mu_r > 1 \implies \mathcal{R}'_m < \mathcal{R}_{air} \implies \mathcal{R}_a < \mathcal{R}_b \implies \phi_a > \phi_b \implies B_a > B_b. \quad (2.7)$$

En d'autres termes, la réluctance du circuit en présence d'un entrefer augmente, car la perméabilité diminue, et donc plus l'entrefer est grand, plus la densité de flux est faible. Ce résultat simple explique la base du contrôle magnétoscopique : **une mesure du flux dans un circuit magnétique détecte une chute de la densité du flux en présence d'un défaut.**

2.4.2 Fuite de flux magnétique

Pour les petits défauts, tels que les brins brisés des câbles d'acier (défauts LF), la quantité d'acier dans le circuit magnétique est pratiquement la même avec et sans défaut. L'entrefer résultant de ce type de défaut ne produit pas de changement notable du flux magnétique dans

4. La réluctance dans un circuit magnétique est l'équivalent de la notion de résistance dans un circuit électrique. L'équivalent de la loi d'Ohm est la loi d'Hopkison : $NI = \mathcal{R}\phi$.

le circuit. La méthode de détection des défauts LF repose sur un autre principe : la fuite de flux magnétique **MFL** (Magnetic Flux Leakage).

Dans un circuit magnétique, les lignes de champ se déforment près des coins, des changements brusques de géométrie et des discontinuités (voir figure 2.10). Il en résulte une augmentation de l'intensité du flux magnétique dans l'air à proximité des défauts. Cette augmentation peut être mesurée en plaçant des bobines de détection ou un capteur magnétique à l'intérieur de la sonde, au-dessus du câble à inspecter. Un défaut est détecté en percevant un pic dans le signal mesuré dans cette région. L'origine de ce phénomène de fuite magnétique est associé à l'apparition de pôles magnétiques nord et sud sur les côtés opposés de la discontinuité : le défaut se comporte alors comme un dipôle magnétique [23].

Le champ magnétique résultant de la MFL est généralement très faible. Son intensité dépend directement de la force de l'excitation magnétique fournie au câble ou au matériau testé. Si la force magnétomotrice n'est pas suffisante, ou si le câble a un grand diamètre, les lignes de champ "contournent" le défaut, c'est-à-dire que les brins sains du câble peuvent encore transporter la totalité du flux magnétique. Ainsi, aucune fuite de flux magnétique vers la surface du matériau ne peut être mesurée. Selon Huang et Wang [29], le matériau testé doit être aimanté presque à saturation. Cette exigence de saturation des matériaux se retrouve souvent dans la littérature. Par exemple, dans le livre Electromagnetic Testing (NDT handbook) [40], les auteurs précisent que les matériaux ferromagnétiques doivent être aimantés entre 1,6 T et 1,8 T pour obtenir une fuite magnétique mesurable. Atteindre ces valeurs d'aimantation nécessite une excitation magnétique très forte et donc des sondes de grande taille, souvent très lourdes.

Aujourd'hui, les méthodes magnétiques deviennent la base des systèmes automatisés d'inspection des câbles métalliques dans lequel le facteur humain est complètement éliminé [41].

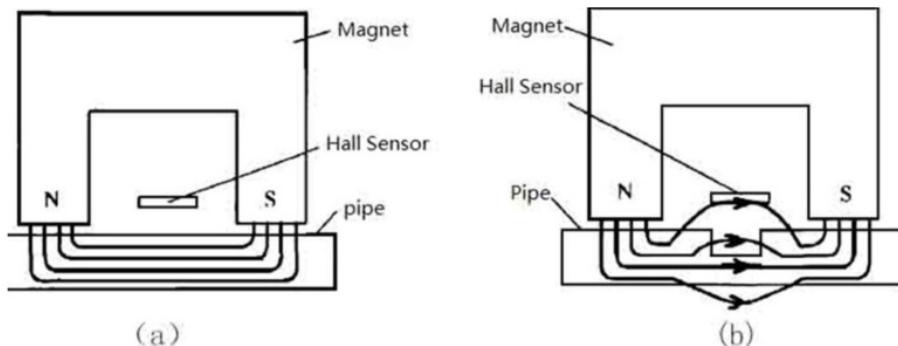


FIGURE 2.10 Schématisation de la fuite de flux magnétique en présence d'un défaut. Exemple d'inspection de pipelines avec un capteur à effet Hall. Tiré de [39]

À cette fin, les recherches actuelles dans le domaine visent à surmonter les inconvénients de la méthode MFL, tels que le poids élevé des sondes et leur portabilité limitée, tout en améliorant la précision de la détection des défauts. De nouvelles méthodes magnétiques sont donc développées pour résoudre ce problème, notamment l'inspection par champ magnétique résiduel.

2.4.3 Inspection par champ magnétique résiduel

L'inspection par champ magnétique résiduel **RMF** (Residual Magnetic Field), également appelée inspection par mémoire magnétique, est une nouvelle méthode d'inspection introduite pour résoudre les problèmes de la méthode MFL conventionnelle. En effet, dans la méthode conventionnelle, le défi consiste à détecter les faibles signaux MFL à travers le fort champ magnétique des aimants ou de la bobine d'excitation. Or, les capteurs magnétiques sensibles ont très souvent une faible plage de mesure et sont ainsi saturés par le champ d'excitation. Le rapport signal/bruit est également très bas avec la méthode MFL conventionnelle.

La méthode RMF résout ce problème en effectuant la mesure loin du champ d'excitation. Cette mesure est rendue possible grâce à la propriété d'aimantation (ou mémoire magnétique) des matériaux ferromagnétiques.

En l'absence d'aimantation, un composant ferromagnétique produit un champ magnétique négligeable car, dans son état naturel, les orientations de spin des domaines magnétiques sont désordonnés. Cependant, lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué, les domaines magnétiques s'orientent de manière cohérente et le composant s'aimante. Une mémoire magnétique se forme et ne disparaît pas même lorsque le champ magnétique externe d'excitation disparaît. Le composant génère désormais son champ magnétique propre, appelé RMF.

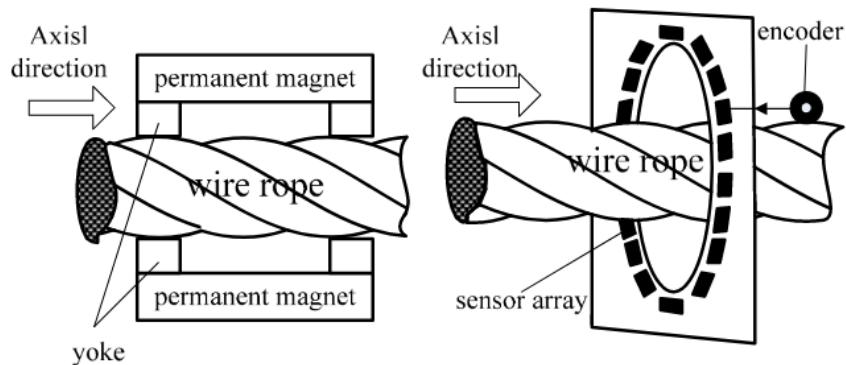


FIGURE 2.11 Diagramme schématique du processus de détection RMF. Tiré de [42]

Ce champ résiduel varie en fonction de la géométrie du câble testé. En particulier, une fuite magnétique peut être observée à la surface du câble si celui-ci contient un défaut. En se basant sur cette propriété, il est possible de concevoir un dispositif permettant de détecter les défauts du câble. Par exemple, Zhang *et al.* [42] proposent dans leur article sur la méthode RMF un prototype composé de deux parties (figure 2.11). Tout d'abord, le câble traverse la première partie, composée d'aimants permanents, utilisés pour aimanter le câble dans le sens longitudinal. Ensuite, le câble aimanté traverse la deuxième partie, composée d'un réseau de capteurs magnétiques et d'une carte de commande. Dans l'article, le réseau de capteurs est composé de 18 capteurs GMR (Giant Magneto-Resistance), répartis sur la circonference du câble pour former un cercle.

Le signal RMF mesuré est très faible, mais comme il est mesuré en dehors du champ d'excitation des aimants, des capteurs sensibles peuvent être utilisés (typiquement des capteurs GMR sur ce prototype). L'utilisation de 18 capteurs autour du câble permet de localiser précisément le défaut dans le câble, mais surtout de traiter efficacement le signal en combinant les informations des différents capteurs et en éliminant le bruit commun à l'aide de filtres et d'algorithmes adaptés [43].

2.4.4 Applications

Les domaines d'application du contrôle non destructif par magnétoscopie sont nombreux. Il s'agit en effet d'une méthode d'inspection très efficace pour tout matériau contenant une partie ferromagnétique. Les méthodes magnétiques sont par exemple largement utilisées dans les industries pétrolières et gazières, notamment dans le diagnostic des pipelines, où la maintenance des réseaux de pipelines représente un enjeu important en termes de sécurité et d'environnement [44]. Elles sont également utilisées pour l'inspection des câbles de ponts roulants [41], des câbles de suspension d'ascenseurs et des conducteurs des lignes à haute tension [22].

2.5 Sondes d'inspection magnétique dans la littérature et sur le marché

Les descriptions détaillées des sondes d'inspection opérationnelles sont difficiles à trouver dans la littérature. La majorité des sondes magnétiques sur le marché utilisent des principes de mesure basés sur la méthode MFL, mais les inventeurs ne révèlent pas les détails de la conception ou le choix des technologies utilisées dans leurs prototypes, afin de protéger leurs sondes de la concurrence. À titre d'exemple, la société chinoise TCK.W [45] est l'une des plus grandes entreprises d'inspection de câbles d'acier. La société possède 29 brevets et 19 droits

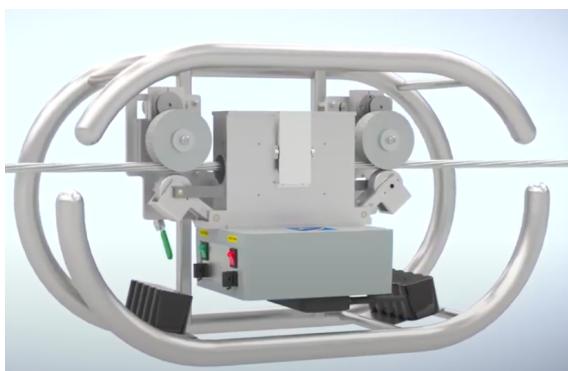
d'auteur sur des logiciels d'inspection et utilise principalement des méthodes de détection à mémoire magnétique.

Deux exemples sont présentés ci-dessous, pour lesquels il était possible de trouver assez de détails pour en faire revue intéressante.

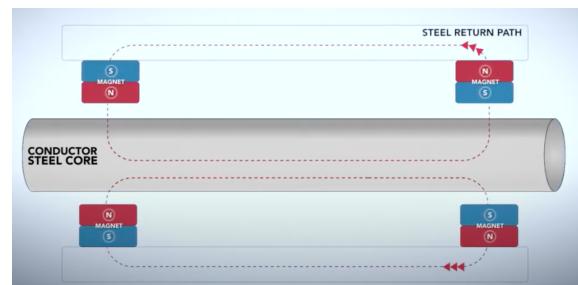
2.5.1 Exemple sur le marché : sonde LineVue de Kinetrics

Kinetrics est une entreprise canadienne qui propose des solutions pour le secteur de l'énergie. En 2018, ils ont proposé le produit Linevue [46]. Il s'agit d'un robot qui inspecte les conducteurs aériens de transport d'électricité. Le robot se déplace le long des lignes à haute tension et envoie les données d'inspection à un ordinateur d'analyse au sol. LineVue permet l'inspection visuelle des conducteurs ACSR à l'aide de caméras montées sur le robot. Il permet également l'inspection de l'âme d'acier des conducteurs grâce à une sonde magnétique à aimants permanents, qui constitue le corps du robot (voir figure 2.12).

Le LineVue nécessite l'intervention d'un technicien pour être installé sur les lignes électriques. Le technicien doit s'approcher des lignes à l'aide d'un camion nacelle, d'un hélicoptère ou en escaladant les pylônes électriques, puis placer le robot sur le conducteur. Le robot est doté d'un mécanisme d'ouverture/fermeture qui permet au conducteur de passer à l'intérieur de la sonde magnétique. Les roues sont ensuite placées au-dessus et au-dessous du câble et le robot peut se déplacer de manière autonome le long du conducteur tout en collectant des données. Avec ses batteries, ses moteurs, ses roues, sa sonde et son électronique embarquée, le robot pèse environ 28 kg et peut inspecter des conducteurs ACSR d'un diamètre compris entre 15 et 45 mm.



(a) Robot Linevue



(b) Circuit magnétique Linevue

FIGURE 2.12 Robot d'inspection LineVue de Kinetrics et schéma du circuit magnétique de la sonde du robot. Tiré de [46]

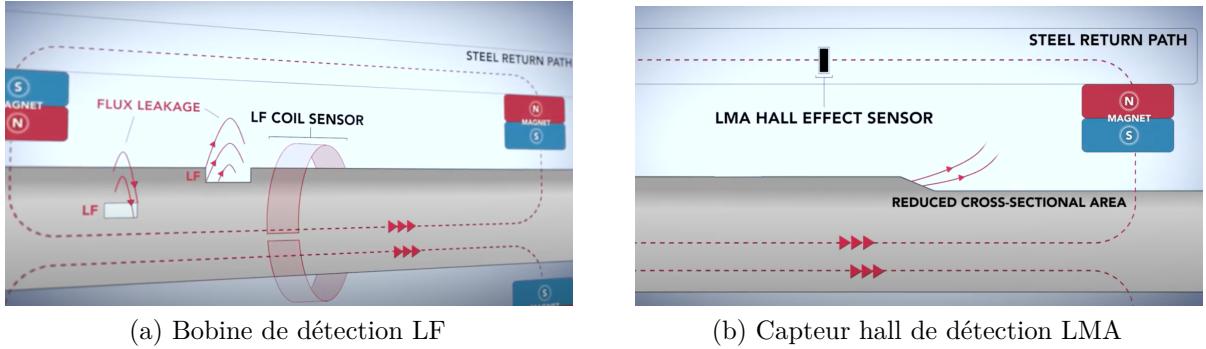


FIGURE 2.13 Principe de détection des défauts LF et LMA de la sonde Linevue de Kinetrics. Tiré de [46]

La sonde magnétique du LineVue est constituée de deux circuits magnétiques placés en haut et en bas du conducteur (appelés pôle supérieur et inférieur). Chaque pôle est constitué de deux aimants permanents, reliés par une barre en acier qui s'étend le long du conducteur (*steel return path* dans la figure 2.12). Les quatre aimants sont placés de manière à aimanter l'âme d'acier du conducteur longitudinalement, dans la même direction. La sonde est capable de détecter les défauts LF et LMA. Les défauts LF sont détectés en mesurant la fuite magnétique (MFL) avec une bobine de détection qui se referme autour du conducteur lorsque le robot est installé sur la ligne. Les défauts LMA, quant à eux, sont détectés par une mesure de l'intensité du flux magnétique dans le circuit en plaçant un capteur à effet Hall au milieu de la barre d'acier sur le chemin de retour du flux (figure 2.13).

Kinetrics a déjà effectué des inspections sur le terrain grâce au LineVue, notamment avec la société Hydro One. Selon eux, les données fournies sont assez précises, et le robot constitue une méthode viable d'inspection non destructive des conducteurs, qui ne requiert pas de prélever des échantillons ou de prévoir des interruptions de service.

2.5.2 Exemple en littérature : détection quantitative

Dans leur article de 2021, Zhang *et al.* [47] ont proposé une méthode qui permet de distinguer avec précision les défauts de surface des défauts internes dans les câbles d'acier, et qui peut également détecter quantitativement la largeur, la perte de section transversale et la profondeur des défauts. Leur méthode est basée sur une mesure magnétoscopique à l'aide d'une bobine d'induction et des capteurs à effet hall. Les différentes données de la mesure sont ensuite traitées par un algorithme d'apprentissage. Un réseau neuronal est entraîné sur les résultats d'une simulation numérique, puis appliqué à la mesure réelle pour distinguer les différents types de défauts et quantifier leur taille et leur forme.

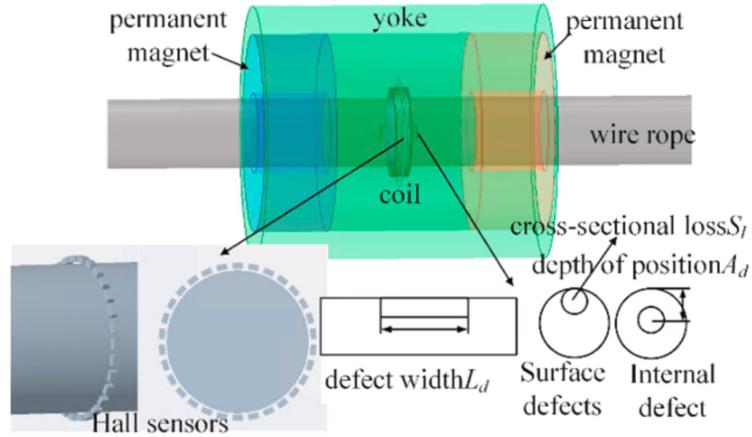


FIGURE 2.14 Modèle 3D de la simulation de la sonde de détection quantitative de Zhang *et al.*. Tiré de [47]

Le prototype de mesure utilisé dans leur étude est particulièrement intéressant. La géométrie de la sonde est complètement différente de celle de Kinetrics. L'excitation magnétique provient toujours d'aimants permanents, mais dans ce cas, ils sont en forme d'anneau (voir figure 2.14). Les deux aimants sont reliés par un cylindre métallique (appelé "yoke"). La sonde a une forme cylindrique et le câble est aimanté longitudinalement jusqu'à saturation lorsqu'il se trouve à l'intérieur. En réalité, la sonde est constituée de deux demi-cylindres qui sont ensuite fermés autour du câble à tester (figure 2.15.a). La conception du prototype en demi-cylindre permet de placer les capteurs à effet Hall et la bobine d'induction autour du câble avant de refermer la sonde.

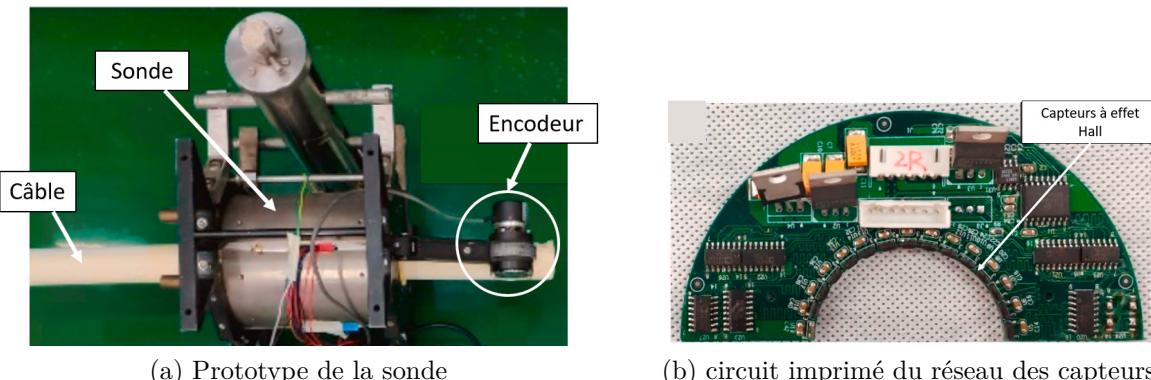


FIGURE 2.15 Prototype de la sonde de détection quantitative de Zhang *et al.* et du circuit imprimé des capteurs à effet Hall. Tiré de [47]

Les capteurs à effet Hall sont montés sur un circuit imprimé avec l'électronique nécessaire. Ces capteurs forment un réseau circulaire (voir figure 2.15.b) et permettent de mesurer la fuite magnétique dans les directions radiales autour du câble. En plus de ces mesures, une bobine d'induction est utilisée pour évaluer le flux magnétique dans le câble et un encodeur placé sur une roue en contact avec le câble est utilisé pour mesurer la position du câble. Les différentes données sont ensuite combinées et traitées par l'algorithme d'apprentissage. Les résultats sont jugés satisfaisants par les auteurs. Sur un câble commercial, la méthode permet de quantifier la longueur du défaut avec une erreur inférieure à 9.3 mm, sa profondeur avec une erreur inférieure à 1.4 mm et la perte de section avec une erreur inférieure à 1.1%.

2.6 Conclusion

Les technologies de contrôle non destructif représentent un sujet de recherche actif qui s'est développé très rapidement au cours des dernières années et qui est parfaitement adapté à l'inspection des conducteurs électriques des lignes à haute tension. En particulier, les méthodes magnétoscopiques ont le potentiel de détecter efficacement les défauts dans l'âme d'acier des conducteurs ACSR au vu des propriétés ferromagnétiques de l'acier.

Cependant, en raison des nombreux défis associés à l'inspection des lignes à haute tension, la conception d'une sonde magnétique adaptée et optimisée est une tâche délicate. Les différentes méthodes et solutions abordées dans cette revue de littérature ne peuvent pas être directement utilisées pour l'inspection des conducteurs ACSR. Néanmoins, elles représentent une source d'inspiration et un point de départ pour la conception d'une nouvelle sonde légère et précise. De plus, une aide importante à cet égard est la simulation numérique, qui utilise généralement l'analyse par éléments finis, pour comprendre et prévoir les relations entre la taille et la nature des défauts dans les conducteurs et le signal mesuré par des détecteurs appropriés.

CHAPITRE 3 SIMULATION NUMÉRIQUE DE LA SONDE MAGNÉTIQUE ET OPTIMISATION DE SA GÉOMÉTRIE

3.1 Logiciel de simulation et méthode des éléments finis

En règle générale, toute simulation numérique s'effectue selon les étapes suivantes :

- **Étude théorique** : permet de trouver les équations différentielles qui régissent le problème physique, ainsi que les conditions initiales et les conditions aux frontières.
- **Discrétisation spatio-temporelle** : permet d'utiliser les outils des mathématiques appliquées pour la résolution approchée, tels que la Méthode des Éléments Finis (MEF).
- **Implémentation** : choix de l'algorithme de résolution et d'un langage de programmation adaptés. L'implémentation doit être assez flexible pour permettre la modification de certains paramètres clés et l'affichage des résultats correspondants. Cela permet en général d'optimiser ces paramètres.

Pour des problèmes unidimensionnels simples, la simulation numérique peut être programmée à la main, sur des logiciels comme Python ou Matlab. Toutefois, pour un problème 3D faisant intervenir une géométrie complexe et plusieurs paramètres, cette tâche devient très lourde en pratique. L'utilisation de logiciels spécialisés dans la **simulation numérique des phénomènes physiques** est alors nécessaire. COMSOL Multiphysics est le logiciel qui a été choisi pour ce projet.

3.1.1 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation et d'optimisation basé sur la MEF. Il permet d'automatiser les étapes de simulation mentionnées ci-dessus. La configuration et la résolution d'une simulation sur COMSOL suivent un processus standard. Quel que soit le problème à résoudre, la simulation d'un modèle à partir de zéro se fait selon les étapes suivantes :

- Créer les objets géométriques et définir les paramètres.
- Spécifier les matériaux et leurs propriétés.
- Définir la physique et les conditions aux frontières.
- Choisir le type et la taille du maillage.
- Choisir le “solveur” et exécuter la simulation.
- Afficher les résultats désirés, sous forme de tableaux de valeurs, graphiques ou figures.

3.1.2 Méthode des éléments finis

La MEF est utilisée pour la résolution approchée des équations différentielles aux dérivées partielles. Pour les simulations présentées dans ce chapitre, cette méthode est en fait directement intégrée dans le solveur du logiciel COMSOL. Ainsi, il suffit d'en comprendre le principe afin d'avoir un regard critique sur les résultats du logiciel et les sources d'erreur.

Tout d'abord, la zone spatiale de calcul (appelée domaine) est divisée en un grand nombre d'éléments, suffisamment petits. Cette discrétisation est appelée **maillage** ou pavage du domaine. Chaque maille constitue un “élément fini”. Sur chacun de ces éléments, les équations différentielles sont linéarisées. Ensuite, les équations linéaires sont toutes regroupées dans une matrice globale, ce qui permet d'utiliser les conditions aux limites du problème (généralement définies sur les frontières du domaine), et de trouver une solution approchée. Cette solution est discrète : elle est définie sur chacun des éléments du domaine. Des fonctions polynomiales sont généralement utilisées pour construire cette solution discrète en tout point du domaine à partir de degrés de liberté situés sur les noeuds ou sur les arêtes du maillage.

3.1.3 Sources d'erreurs potentielles

L'erreur est définie comme l'écart entre la solution calculée et la solution réelle. Dans les simulations par éléments finis, les sources d'erreurs suivantes sont les plus communes :

- **Taille du maillage.** La géométrie réelle continue est remplacée par une géométrie discrète (maillage). Plus les points du maillage sont espacés, plus la solution calculée s'écarte de la solution réelle et l'erreur est importante. Mais si le maillage est très fin, le temps de calcul devient très long. Sur COMSOL, il est possible d'affiner le maillage à

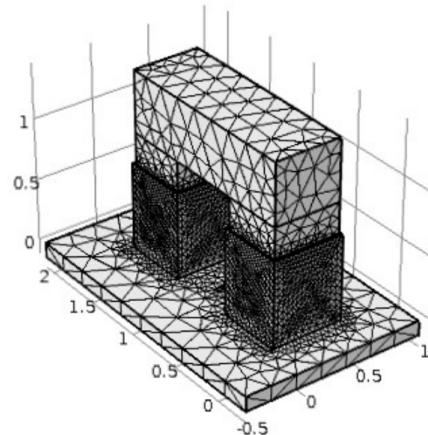


FIGURE 3.1 Exemple d'un maillage tétraédrique sur COMSOL. Tiré de [48]

des endroits spécifiques de la géométrie lorsqu'il est nécessaire d'augmenter localement la précision de la solution.

- **La modélisation 3D** des différentes pièces est une modélisation simplifiée de la réalité : la géométrie est parfaite et les matériaux sont homogènes, ce qui est rarement le cas dans la réalité.
- **Erreurs de calculs numériques** dues aux arrondies et à la linéarisation. Les erreurs interviennent souvent sous forme de bruit numérique.

3.2 Simulation de la sonde magnétique : premier modèle

3.2.1 Modélisation géométrique

Un premier modèle de la sonde magnétique a été réalisé sur COMSOL en se basant sur les différents principes et éléments vus dans la revue de littérature, et en s'inspirant de l'article de Jaimes Saavedra et Roa Prada [48] qui présente l'analyse de la sensibilité d'un circuit magnétique pour la détection de défauts sur une plaque d'acier par simulations dans COMSOL.

Le modèle (voir figure 3.2) contient les éléments suivants :

1. **Noyau magnétique** : appelé “noyau” dans le reste du mémoire. C'est une barre de flux en matériau magnétique de très haute perméabilité (par exemple de l'acier doux). Elle relie les deux aimants et fournit un chemin de flux magnétique entre eux.
2. **Aimants** : deux aimants permanents de part et d'autre du noyau. Ils sont orientés dans des directions opposées (Nord-Sud et Sud-Nord) de manière à générer un flux

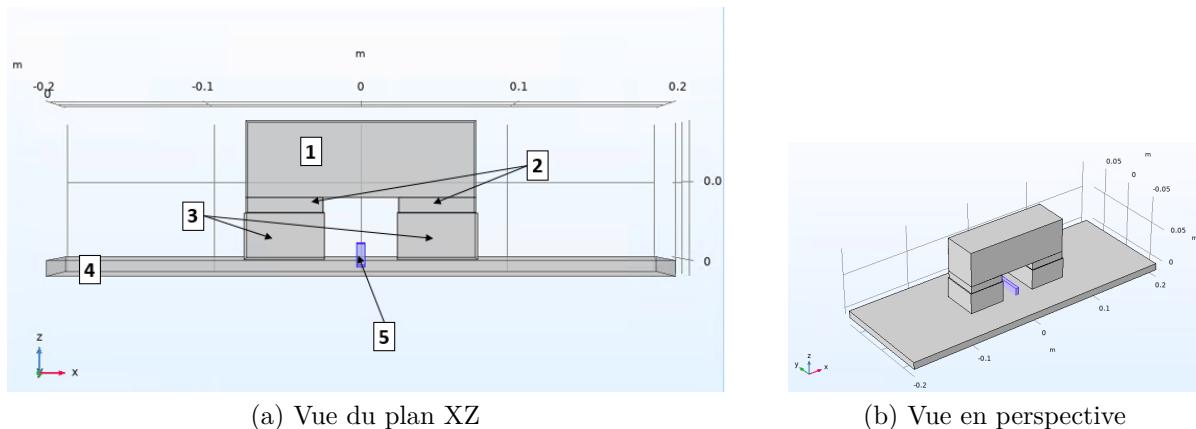


FIGURE 3.2 Géométrie du premier modèle de la sonde magnétique dans COMSOL

magnétique qui circule dans la direction de l'axe \vec{x} (longitudinalement) dans le noyau et dans l'échantillon testé.

3. **Coupleurs** : deux blocs modélisés dans le même matériau que le noyau. Ils permettent relier chacun des aimants à l'échantillon testé et de canaliser le flux magnétique dans la bonne direction.
4. **Échantillon testé** : modélisé par une plaque d'acier dans ce premier modèle pour des fins de simplification. L'échantillon testé sera remplacé ensuite par une modélisation de conducteur ACSR.
5. **Défaut** : modélisé par un bloc d'air (représenté en bleu sur la figure 3.2). Ce bloc traverse la plaque d'acier sur laquelle repose la sonde. Il est possible de modifier les paramètres du défaut, notamment sa longueur et sa profondeur.

L'ensemble des éléments 1, 2 et 3 (noyau + aimants + coupleurs) constituent un circuit magnétique ouvert qui est appelé **pôle de la sonde magnétique**. Le pôle de la sonde et l'échantillon testé constituent un circuit magnétique fermé dans lequel le flux magnétique reste confiné. Dans la simulation, ce circuit magnétique est immergé dans un large domaine d'air. Une fois que les matériaux et le maillage sont définis, il est possible d'exécuter la simulation. La figure 3.3 permet de visualiser le flux et l'intensité du champ magnétique dans le plan XZ. Le champ circule longitudinalement dans l'échantillon et est le plus fort au voisinage du défaut : on s'attend à la présence d'une fuite magnétique.

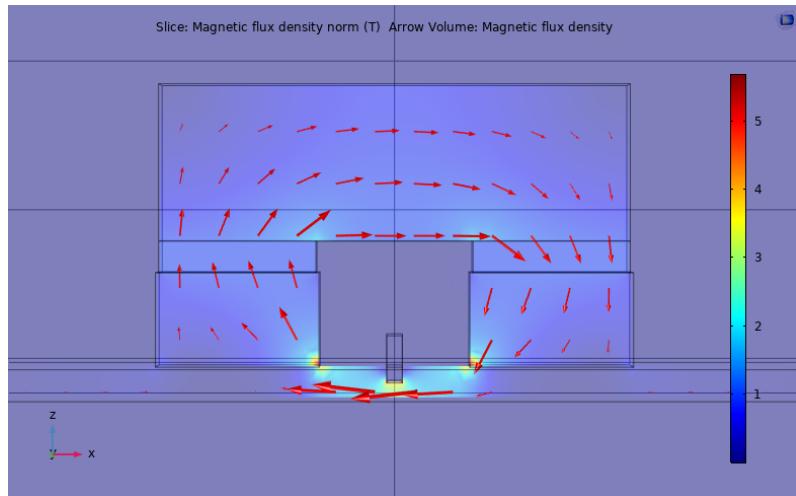


FIGURE 3.3 Exemple de résultat de simulation par éléments finis (Comsol Multiphysics) du premier modèle de sonde magnétique développé dans ce projet : vecteur de densité de champ magnétique \vec{B}

3.2.2 Simulation avec un conducteur ACSR

Afin de se rapprocher du modèle réel des lignes de transport d'électricité, il faut remplacer la plaque d'acier de la figure 3.2 par un modèle de conducteur ACSR. Pour rappel, le conducteur ACSR est un conducteur bimétallique : la couche interne est composée de brins d'acier et la couche externe est composée d'aluminium. Dans un premier temps, il est possible d'ignorer le caractère multibrins et de modéliser le conducteur par deux cylindres, un cylindre interne en acier et un cylindre externe en aluminium (voir figure 3.4). Ce modèle simple permet de gagner énormément en complexité et temps de simulation.

Espacement

Dans le cas d'un conducteur ACSR, les coupleurs de la sonde ne peuvent pas être en contact direct avec la partie ferromagnétique du conducteur (la couche d'acier interne). La couche d'aluminium empêche ce contact et crée une distance entre les coupleurs et l'acier. Cette distance est appelée **espacement** minimal (voir figure 3.5). La valeur exacte de l'espacement minimal dépend du type de conducteur ACSR à tester ou simuler. L'espacement entre la sonde et l'âme d'acier doit être suffisant pour permettre de tester des conducteurs de diamètres différents.

Le zinc et l'aluminium sont des matériaux paramagnétiques. D'un point de vue magnétostatique, ils peuvent être considérés comme équivalents à l'air, car leur perméabilité relative est très proche de 1. Elle est négligeable par rapport à celle de l'acier. Il est donc possible de supprimer complètement le cylindre externe d'aluminium dans la simulation, à condition de respecter en tout temps l'espacement minimal, tel que défini à la figure 3.5.

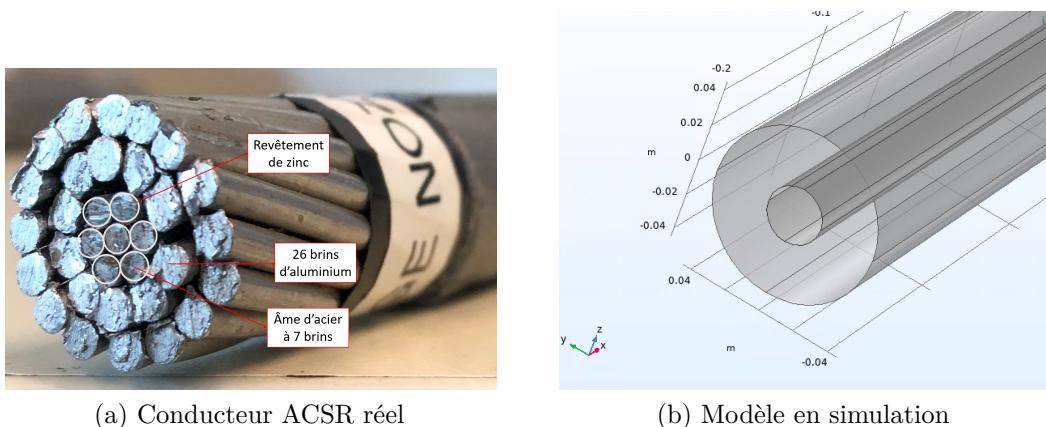


FIGURE 3.4 Modèle du conducteur ACSR en simulation

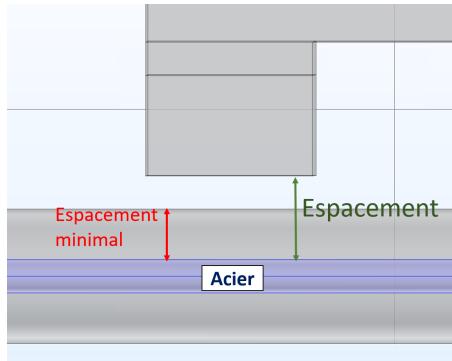


FIGURE 3.5 Espace et espace minimal entre la sonde et l'âme d'acier

Rayon effectif

Le rayon effectif est le rayon du cylindre qui a la même masse que l'âme d'acier du conducteur multibrins. Dans l'exemple d'une âme d'acier à 7 brins (figure 3.6), où le rayon de chaque brin est r , le rayon total de l'âme d'acier est $3r$. Toutefois, le rayon effectif R_{eff} est calculé en évaluant la masse équivalente entre le modèle cylindrique et le modèle multibrins.

$$m_{âme} = 7m_{brin} = m_{eff} . \quad (3.1)$$

Or

$$m_{brin} = \rho V_{brin} = \rho h \pi r^2 , \quad (3.2)$$

$$m_{eff} = \rho V_{eff} = \rho h \pi R_{eff}^2 , \quad (3.3)$$

où ρ est la masse volumique de l'acier considéré, V_{brin} le volume d'un brin, V_{eff} le volume du modèle cylindrique et h la longueur de l'échantillon testé. On obtient donc :

$$R_{eff} = \sqrt{7}r \approx 2.65r . \quad (3.4)$$

Le tableau 1 montre les résultats de 3 simulations différentes. Une simulation avec un modèle à 7 brins, une simulation avec un modèle “cylindre équivalent” de rayon effectif R_{eff} , et une simulation avec un modèle “cylindre plein” de rayon total $3r$. Selon ces résultats, la modélisation d'un conducteur multibrins par un cylindre de rayon effectif est une bonne première approximation.

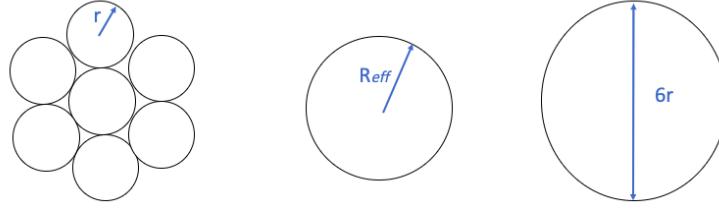


FIGURE 3.6 Rayon effectif équivalent pour un conducteur à 7 brins

TABLEAU 3.1 Résultats des simulations avec trois modélisations différentes de l'âme d'acier du conducteur multibrins

Intensité du champ	Modèle à 7 brins	Cylindre équivalent	Cylindre plein
dans l'échantillon	627.3 mT	629.5 mT	568.1 mT
dans le noyau	585.2 mT	585.1 mT	584.7 mT
dans l'air	2.49 mT	2.51 mT	2.98 mT

Matériaux ferromagnétiques et courbe B-H

Les matériaux ferromagnétiques ont une relation non linéaire $B = \mu(H)H$. COMSOL donne la possibilité de définir les courbes B-H des matériaux. Cependant, lorsque nous sommes loin de la saturation magnétique, qui est supérieure à 1 T pour ces matériaux, la courbe B-H peut être approximée par une ligne droite et la relation $B = \mu H$ est entièrement caractérisée par la perméabilité relative μ_r du matériau.

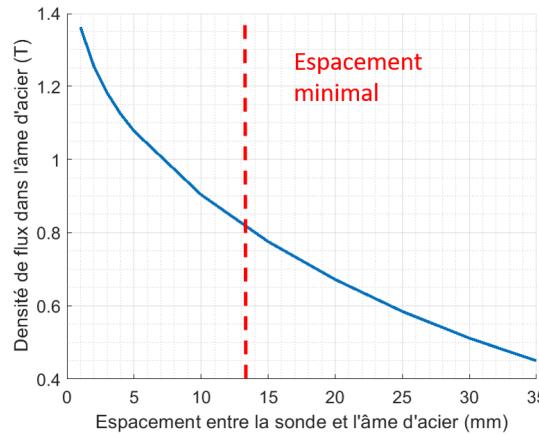


FIGURE 3.7 Densité du flux magnétique dans l'âme d'acier en fonction de l'espacement entre la sonde et l'âme d'acier

La simulation montre que plus l'espacement entre la sonde et l'échantillon est grand, plus l'excitation magnétique est faible et plus le champ dans l'échantillon testé est faible (voir figure 3.7). La position de la ligne rouge de l'espacement minimal dans la figure varie d'un conducteur à l'autre. Toutefois, la conclusion reste la même. Il n'est pas nécessaire de prendre en compte la non linéarité de la courbe B-H du matériau dans cette simulation avec un espacement aussi grand, car le matériau est loin de la saturation.

3.2.3 Points de mesures et emplacement des capteurs magnétiques

La présence d'un défaut dans l'échantillon testé a principalement deux effets sur le flux magnétique circulant dans la sonde :

1. **Réduction du flux total dans le circuit** : En présence de défaut, la réluctance totale du circuit augmente, car la réluctance de l'air est beaucoup plus importante que celle de l'acier. Par conséquent, le flux total diminue (voir équations 2.7). Cette variation du flux peut être mesurée en plaçant un capteur magnétique dans le circuit. Le choix naturel est de placer le capteur au milieu du noyau, où il est possible de mesurer le flux qui le traverse. Il faut pour cela créer une cavité d'air dans le noyau afin d'insérer le capteur. Toutefois, une petite cavité d'air ne suffirait pas, car le flux peut contourner la cavité en passant par l'acier doux autour de la cavité. Il est donc nécessaire de créer un entrefer complet au milieu du noyau (voir figure 3.8). Le flux passe nécessairement par cet entrefer et devient alors possible à mesurer avec une bonne précision.
2. **Fuite magnétique** : En présence d'un défaut (surtout un défaut LF), les lignes de champ se déforment au voisinage du défaut : on observe alors une fuite magnétique (voir figure 2.10). Il est possible de mesurer cette fuite magnétique en plaçant un capteur dans l'air pour faire une mesure au-dessus de la surface du conducteur (voir figure 3.8). Dans la simulation, le capteur est modélisé par un cube d'air où le maillage est raffiné.

En présence d'un défaut, le flux magnétique total dans le circuit magnétique diminue, tandis que le flux magnétique dans l'air au voisinage du défaut augmente. L'information contenue dans les deux mesures est souvent redondante, sauf pour les petits défauts qui ne changent pratiquement pas la réluctance du circuit, mais qui sont possibles à détecter grâce à la fuite magnétique.

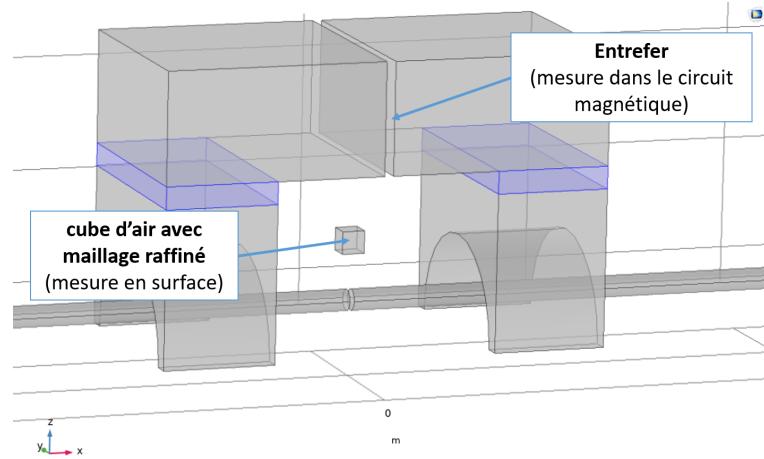


FIGURE 3.8 Emplacements des capteurs magnétiques dans la sonde

3.3 Explorations géométriques et sonde à trois pôles

3.3.1 Sonde transversale

La première nouvelle géométrie explorée en simulation durant cette étude fut la sonde transversale. L'idée derrière cette géométrie était d'envoyer un flux magnétique dans la direction perpendiculaire à l'axe du conducteur. Dans toutes les méthodes d'inspection non destructive des câbles métalliques en littérature, l'excitation magnétique est longitudinale. Une géométrie totalement différente qui permettrait une excitation magnétique transversale serait innovatrice. L'avantage éventuel d'une telle géométrie est la possibilité de réduire considérablement le poids de la sonde. En effet, il est question ici d'exciter une région plus petite de l'échantillon (le long de sa longueur).

Afin de réaliser cette nouvelle géométrie, il faut placer les aimants de part et d'autre du conducteur (voir figure 3.9), de sorte que le flux circule selon l'axe perpendiculaire au conducteur. La figure 3.10 montre les lignes de flux qui traversent le conducteur et bouclent le long de la sonde. Les résultats de la simulation montrent qu'il est bien possible d'exciter le câble transversalement avec cette géométrie.

La sonde transversale paraît prometteuse. Malheureusement, Le flux magnétique est quasiment non affecté par la présence d'un défaut. En effet, Le flux magnétique peut toujours prendre des chemins dans l'acier en contournant la zone de défaut de plus haute réluctance (voir figure 3.10b). La sensibilité de cette sonde aux défauts est donc très mauvaise, ce qui explique pourquoi on ne retrouve pas de géométries similaires dans la littérature.

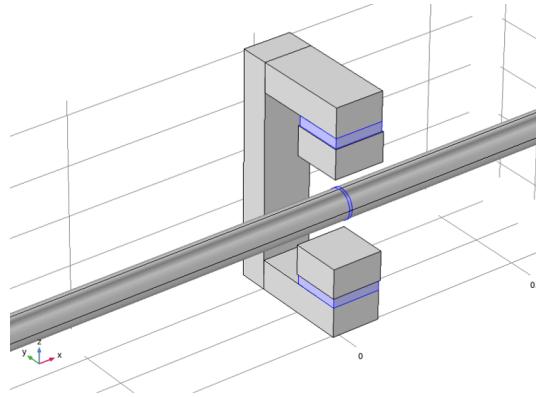


FIGURE 3.9 Vue en perspective de la sonde transversale

L'anneau en bleu dans le câble représente le défaut et les deux blocs en bleu sur la sonde sont les deux aimants permanents du pôle de la sonde.

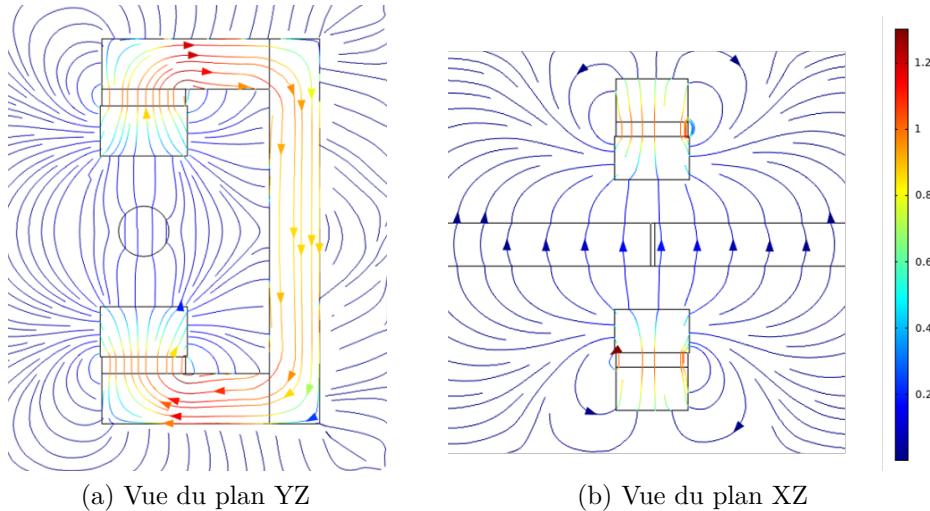


FIGURE 3.10 Lignes de flux magnétique pour la sonde transversale

3.3.2 Sonde à 2 pôles

Nous appelons **pôle** l'ensemble des deux aimants, le noyau et les deux coupleurs. La deuxième géométrie explorée fut la sonde à deux pôles (voir figure 3.11). Dans cette géométrie, deux pôles sont placés en miroir de part et d'autre du conducteur. L'excitation magnétique provient maintenant de 4 aimants, qui sont tous orientés de façon à faire passer le flux dans la même direction le long l'échantillon testé. On obtient donc une excitation magnétique plus forte grâce à cette géométrie. Certes, le poids de la sonde est doublée, mais il est possible de réduire la taille du noyau et des coupleurs, tout en ayant une excitation forte fournie par les 4 aimants.

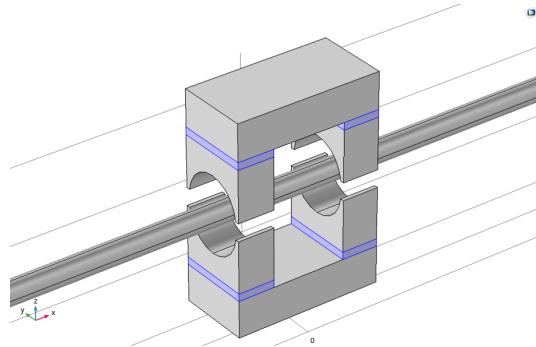


FIGURE 3.11 Géométrie de la sonde à 2 pôles

L'avantage principal de cette géométrie est sa symétrie, qui permet de corriger un des problèmes majeurs de la sonde à un pôle. En effet, sans présence de système de verrouillage mécanique, il n'y a aucune garantie que le conducteur reste stable durant une inspection. Les petits déplacements verticaux du conducteur changent l'espacement entre l'âme d'acier et la sonde, provoquant des variations de signal qui peuvent être interprétées à tort comme la présence d'un défaut dans l'âme d'acier. La sonde à deux pôles permet de compenser ces déplacements verticaux du conducteur en prenant la moyenne des deux valeurs de la mesure de chaque pôle. La figure 3.12 montre les résultats de simulation pour différentes positions verticales de l'échantillon entre les deux pôles. Le flux mesuré dans l'entrefer augmente d'autant plus que l'échantillon est proche du pôle en question. La moyenne des deux mesures reste par contre assez stable pour toutes les positions.

3.3.3 Sonde à 3 pôles

La géométrie à deux pôles permet de compenser les déplacements verticaux, mais ne permet pas de compenser les déplacements dans d'autres directions radiales (par exemple les déplacements horizontaux). Il est naturel de faire évoluer cette géométrie vers la sonde à 3 pôles (figure 3.13) qui utilise 6 aimants. Les 3 pôles sont placés à un angle de 120 degrés les uns par rapport aux autres, de manière à obtenir une symétrie cylindrique permettant de compenser les déplacements radiaux dans toutes les directions (voir figure 3.14).

En plus de la compensation horizontale et verticale, la sonde à trois pôles peut être déployée sur une ligne haute tension directement, sans mécanisme d'ouverture. Le conducteur peut être directement inséré entre les deux pôles du bas. Le diamètre de la sonde a été fixé à 9 cm pour permettre une ouverture de 6.5 cm entre les deux pôles d'en bas. Cette ouverture est largement suffisante vu que la grande majorité des conducteurs ACSR utilisés aujourd'hui dans les lignes haute tension ont un diamètre inférieur à 6 cm, sauf les manchons de raccordement,

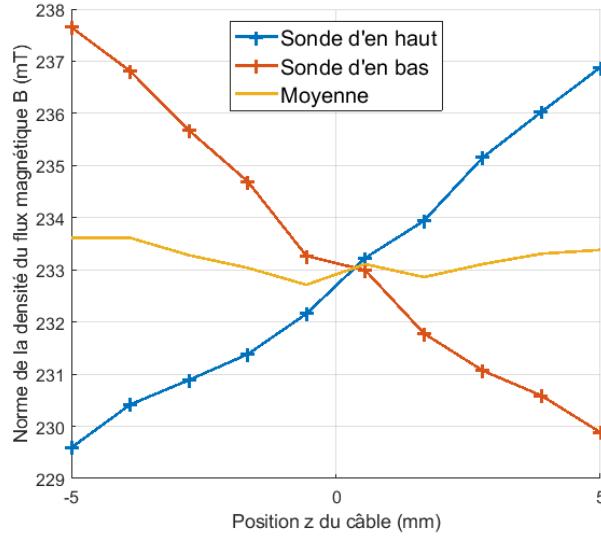


FIGURE 3.12 Compensation des déplacements verticaux du câble - sonde à 2 pôles - mesure dans l'entrefer

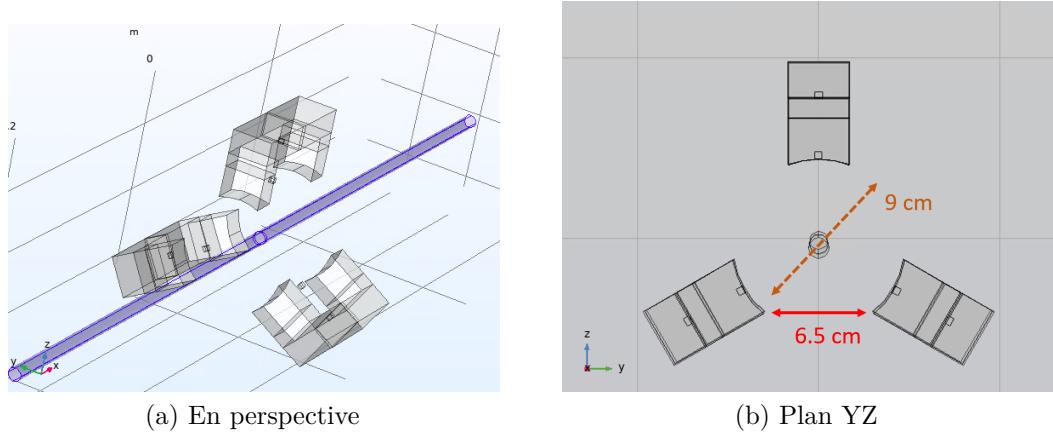


FIGURE 3.13 Géométrie de la sonde à 3 pôles

qui peuvent avoir un diamètre plus important. Cependant, il serait possible de les inspecter en insérant la sonde au niveau du conducteur à côté, puis en roulant jusqu'au manchon.

3.4 Optimisation de la sonde à trois pôles

La géométrie de la sonde à trois pôles a été choisie comme géométrie finale pour ses nombreux avantages, notamment la symétrie qui permet la compensation des déplacements du conducteur selon x et y, ainsi que sa conception ouverte, qui permet le passage du conducteur sans

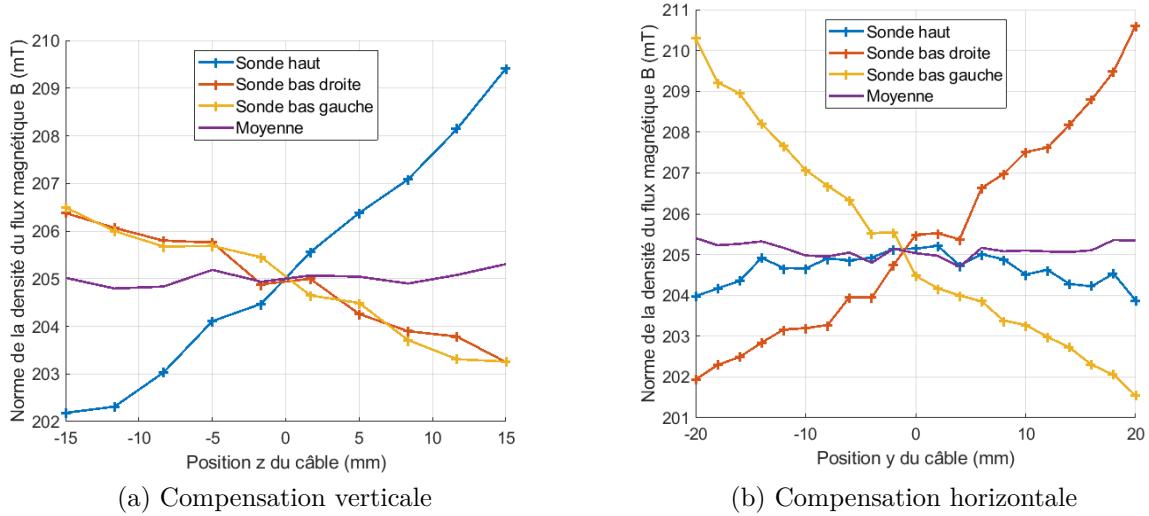


FIGURE 3.14 Compensations des déplacements du câble - sonde à 3 pôles - mesure dans l'entrefer

mécanisme d'ouverture ni de verrouillage. La prochaine étape est de s'assurer que cette sonde est déployable par drone. Pour cela, il faudrait réussir à réduire le poids de la sonde au maximum tout en gardant une bonne sensibilité de détection de défauts.

3.4.1 Objectifs

Un drone transporteur peut porter une charge maximale de 3 kg. Il faudrait donc que la sonde, avec toute son électronique embarquée, sa batterie d'alimentation et son cadre, pèse en dessous de 3 kg. L'objectif fixé en simulation est de réduire le poids à **1.5 kg pour les trois pôles**.

Le problème est que la réduction du poids de la sonde va nécessairement diminuer l'excitation magnétique, et réduire par conséquent l'intensité des variations de flux et de la fuite magnétique générée par un défaut, diminuant ainsi la sensibilité de la sonde. L'excitation magnétique peut être quantifiée par la **densité de flux induite dans un échantillon sain** par la sonde. Ce flux dans l'échantillon dépend du nombre et de la force des aimants, des matériaux utilisés dans la sonde, de la distance entre l'échantillon et les pôles de la sonde, de la géométrie de la sonde et de son volume.

Dans le cas de la sonde à trois pôles, le diamètre a été fixé à 9 cm, donc la distance entre les pôles et l'âme d'acier reste fixe. Par ailleurs, le matériau choisi pour les pôles (acier doux de

haute perméabilité) est également fixé. Le seul élément à optimiser est le volume de la sonde, en jouant sur les différents paramètres géométriques présentés à la figure 3.15.

L'objectif de l'optimisation du poids par simulation est le suivant : **maximiser le flux magnétique qui passe dans un échantillon sain en respectant une contrainte de poids de 1.5 kg pour les trois pôles**. Cette optimisation a été réalisée par une analyse de sensibilité, détaillée dans la prochaine sous-section.

3.4.2 Taille des paramètres géométriques

L'analyse de sensibilité consiste à regarder comment chacun des paramètres géométriques affecte le flux magnétique dans le câble, l'objectif étant de maximiser le flux tout en minimisant la taille des éléments des pôles de la sonde.

- **Taille des aimants** : Les aimants les plus puissants sur le marché aujourd’hui sont les aimants à base de néodyme. Un modèle carré de côté $W = 20$ mm et d'épaisseur de 5 mm a été choisi pour cette sonde, puis modélisé sur Comsol. Le choix des tailles s'est fait en fonction des disponibilités sur le marché. Aucune optimisation n'a été réalisée par rapport à cette taille à ce point-ci.
- **Largeur des coupleurs et du noyau (W)** : Elle a été choisie égale à la largeur des aimants. Si cette taille est plus petite ou plus grande, le noyau et les coupleurs n'épouseront plus la forme des aimants, et par conséquent, il y aura une fuite magnétique dans l'air au voisinage des aimants, ce qui réduit le flux canalisé dans l'échantillon.
- **Hauteur des coupleurs (h_c)** : Si les coupleurs sont de petite taille, ils ne canalisent pas bien le flux vers l'échantillon. En revanche, s'ils sont trop grands, ils éloignent les

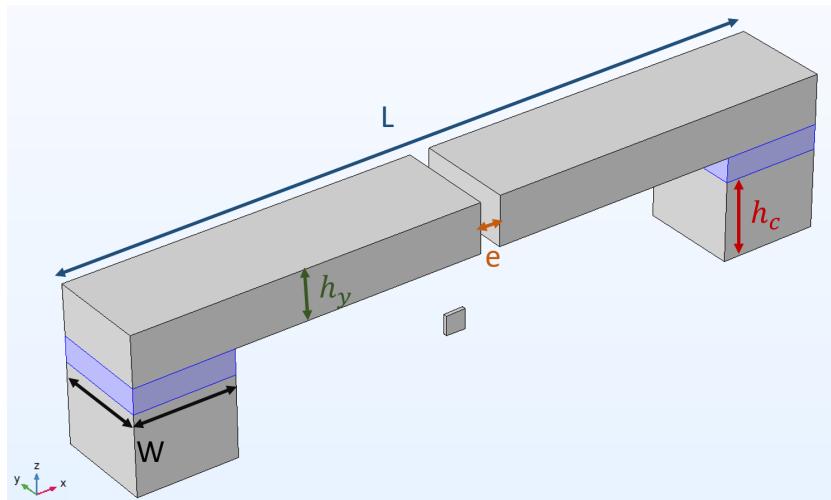


FIGURE 3.15 Paramètres géométriques de la sonde

aimants (car le diamètre de la sonde est fixé), et le flux dans l'échantillon diminue. La simulation permet d'obtenir la taille optimale qui maximise le flux dans le câble (voir figure 3.16a). La hauteur optimale choisie est $h_c = 16$ mm.

- **Longueur du noyau et de la sonde (L)** : Si le noyau est court, les deux coupleurs sont proches l'un de l'autre, le flux magnétique boucle plus facilement par l'air entre les deux, et moins de flux passe dans l'échantillon. En revanche, si le noyau est trop long, le flux des aimants est réparti sur une plus grande partie du câble, et la densité du flux dans le câble diminue. La simulation permet dans ce cas aussi d'obtenir la longueur optimale qui maximise le flux dans le câble (voir figure 3.16b). La longueur optimale choisie est $L = 140$ mm.
- **Hauteur du noyau (h_y)** : La figure 3.16c montre que plus la hauteur du noyau est grande, plus la densité de flux dans le câble est importante. Il faut donc choisir la hauteur la plus grande possible tout en respectant la contrainte du poids. Après calcul, cette hauteur a été fixée à $h_y = 10$ mm, de sorte que le poids total de chaque pôle ne dépasse pas 500 g.

Remarque : Forme des coupleurs

Durant les premières simulations de la sonde avec un échantillon cylindrique, les coupleurs ont été modélisés par une forme en arc, afin d'épouser la forme d'un conducteur ACSR. Une forme rectangulaire est toutefois plus pratique, car plus facile à usiner. Après avoir comparé les résultats de simulation avec les deux options, il s'avère que la forme des coupleurs n'influe pas sur la sensibilité de la sonde. Une forme rectangulaire plus simple a été retenue pour la suite de la conception.

3.4.3 Taille de l'entrefer et point zéro magnétique

L'entrefer dans le noyau a été créé dans un premier temps pour permettre de relever la mesure du flux dans le circuit en insérant un capteur magnétique dedans. La largeur de cet entrefer (le paramètre e sur la figure 3.15) peut être fixée à la largeur du capteur magnétique utilisé. Cette largeur doit rester petite pour éviter toute fuite magnétique non nécessaire qui réduit l'excitation magnétique et le flux canalisé dans l'échantillon.

Toutefois, cet entrefer joue un second rôle très important, qui permet d'améliorer radicalement la sensibilité de la sonde. En effet, il permet d'obtenir un point zéro magnétique au milieu de la sonde (figure 3.17). Cela est très utile, car il devient alors possible de mesurer des très faibles variations de flux en plaçant un capteur magnétique de haute résolution au point zéro.

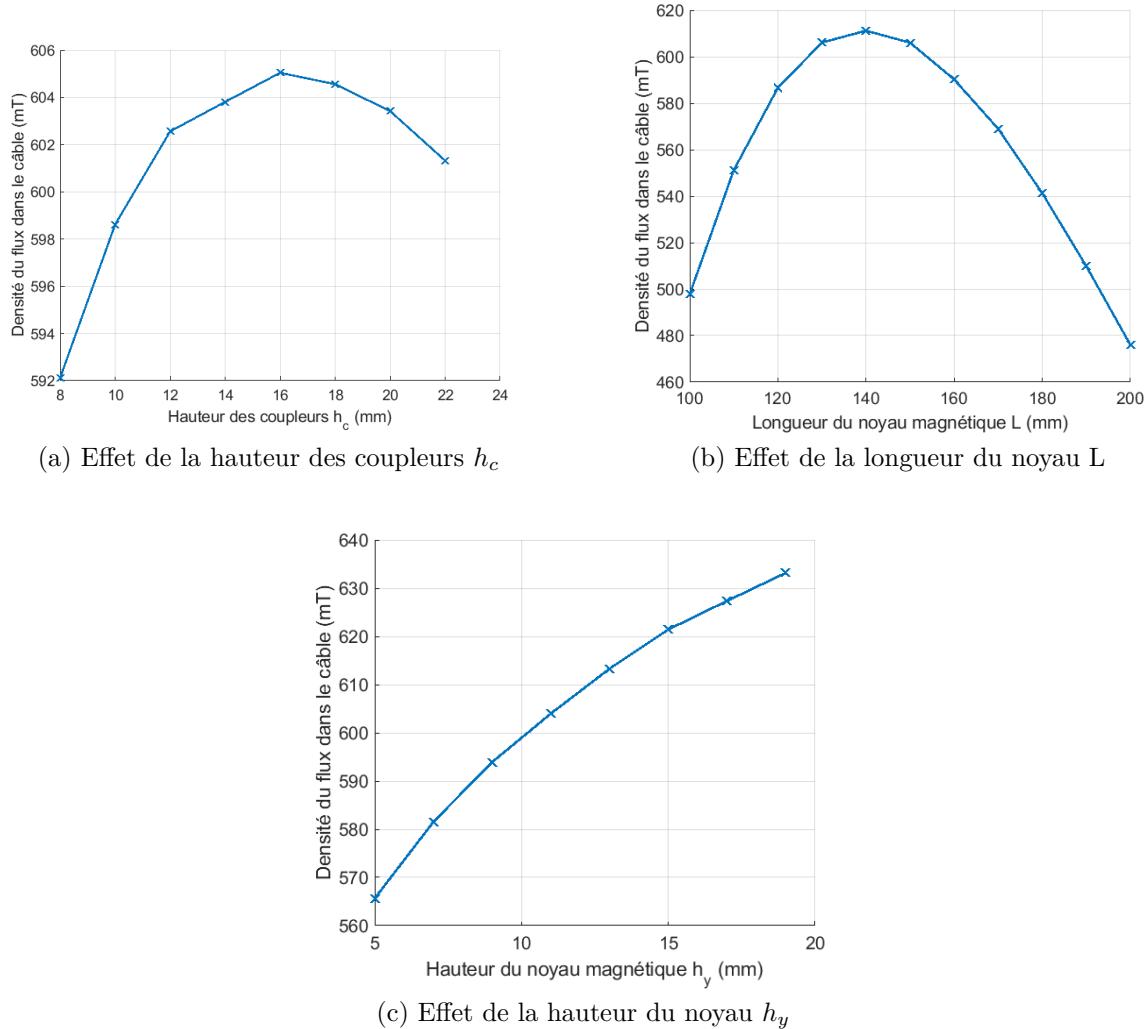


FIGURE 3.16 Optimisation des paramètres géométriques de la sonde

Les capteurs de haute résolution ont une très petite plage de mesure (de l'ordre du mT), et seraient saturés par le champ magnétique ambiant des aimants s'il n'y a pas de point zéro.

L'entrefer du noyau cause une fuite magnétique (comme celle d'un défaut) qui génère un champ opposé au champ \vec{B} circulant dans l'air entre les coupleurs. Les deux champs se compensent au milieu et créent un point zéro magnétique. Proche du noyau, la densité de flux B_x est négative, puis elle devient positive en s'éloignant du noyau. le champ B_x passe donc nécessairement par un point nul (point zéro). La taille de l'entrefer e permet de modifier la position du point zéro le long de l'axe z (axe perpendiculaire au câble). La figure 3.18 montre la valeur absolue du champ B_x en fonction de la distance du noyau pour différentes dimensions d'entrefer. Plus l'entrefer est grand, plus la fuite magnétique qu'il génère est grande et plus le

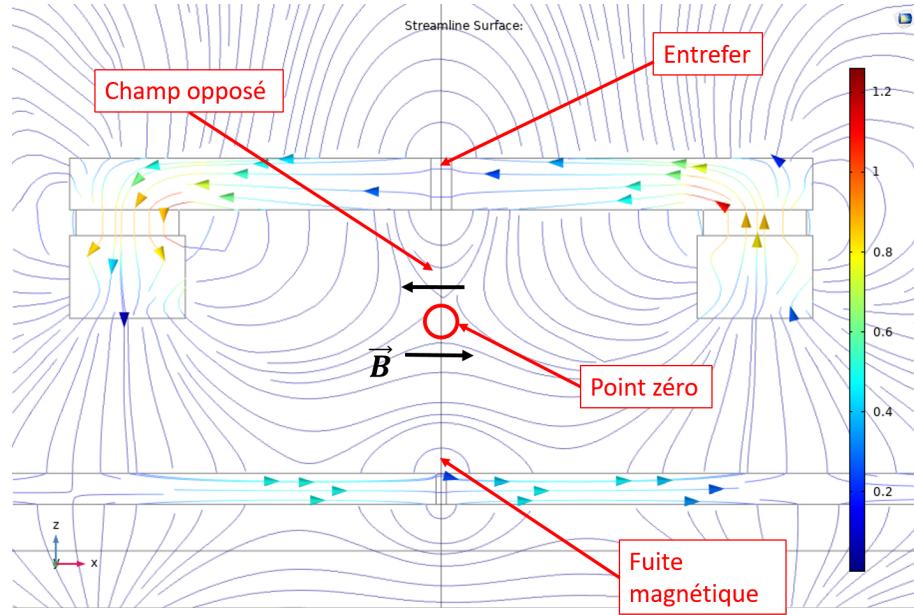


FIGURE 3.17 Lignes de flux et point zéro de champ magnétique dans la sonde

point zéro est loin du noyau et proche du câble. Une taille $e = 4$ mm a été choisie pour le modèle final de la sonde à trois pôles.

3.5 Détection de défauts dans l'âme d'acier

Cette section présente les résultats de la simulation numérique dans le cas de présence d'un défaut dans l'échantillon testé. Nous avons modélisé deux types de défauts :

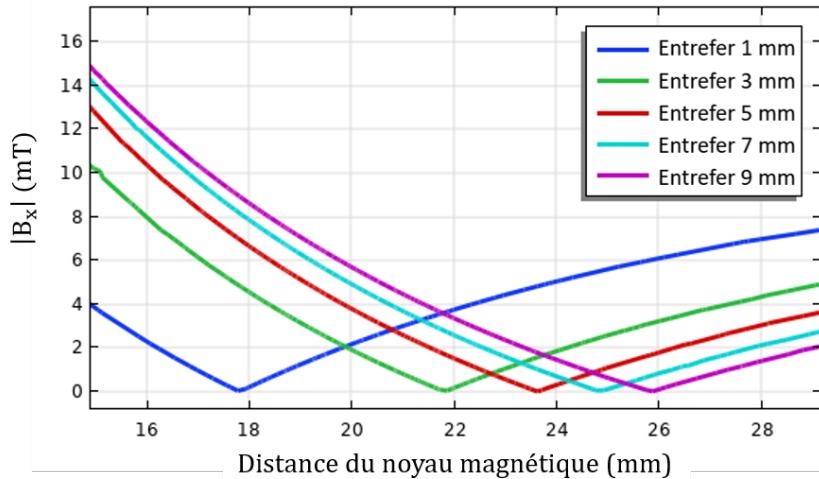


FIGURE 3.18 Variation du flux le long de l'axe z pour différentes tailles d'entrefer

- défauts LMA : correspondent à une réduction dans la section d'acier. Ils sont modélisés dans la simulation par une réduction de rayon de l'échantillon sur une longueur fixe de 15 cm (figure 3.19a).
- défauts LF : correspondent à des défauts locaux. Ils sont modélisés dans la simulation par un cylindre d'air qui coupe l'échantillon en deux (figure 3.19b).

La figure 3.20 montre la densité de flux B_x dans l'air à l'intérieur de la sonde, au voisinage du point zéro magnétique, lors d'un balayage de l'échantillon par la sonde. Le balayage est réalisé en modifiant la position x de la sonde dans la simulation. Des défauts LMA de différentes dimensions sont testés (figure 3.20a), de même pour des défauts LF (figure 3.20b).

3.5.1 Analyse des résultats

Tous les défauts semblent être facilement détectables, comme on peut s'y attendre puisque les défauts testés sont très gros. Cependant, nous remarquons la présence de bruit numérique dans les résultats de la simulation. Ce bruit est dû au maillage de la géométrie qui gagnerait à être raffiné, au prix de simulations plus longues à s'exécuter.

Pour les défauts LMA, il semble y avoir une relation linéaire entre la réduction du rayon et la densité de flux B_x . Nous avons vérifié cette relation par une seconde simulation, dans laquelle nous avons fait varier cette fois le rayon de la tige. Les résultats sont présentés à la figure 3.21. Le champ B_x varie en effet linéairement avec le rayon de l'échantillon testé. Si ce résultat est validé expérimentalement, cela signifierait que la sonde est robuste et capable de quantifier les pertes métalliques (LMA) dans les conducteurs.

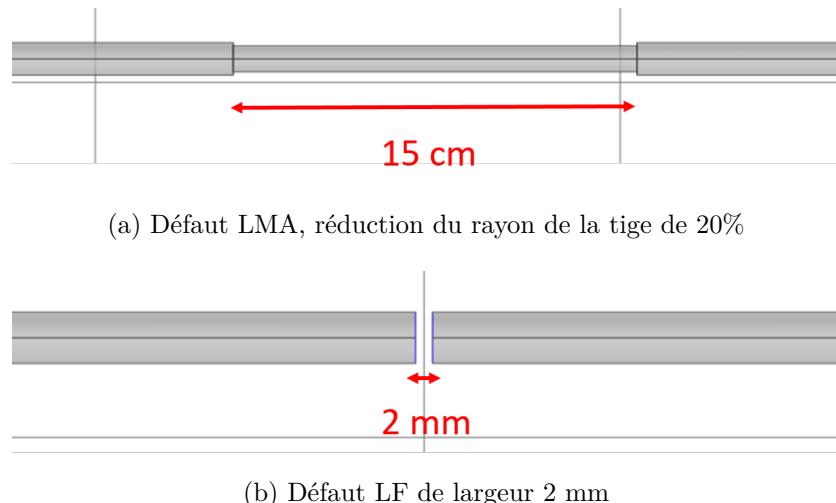
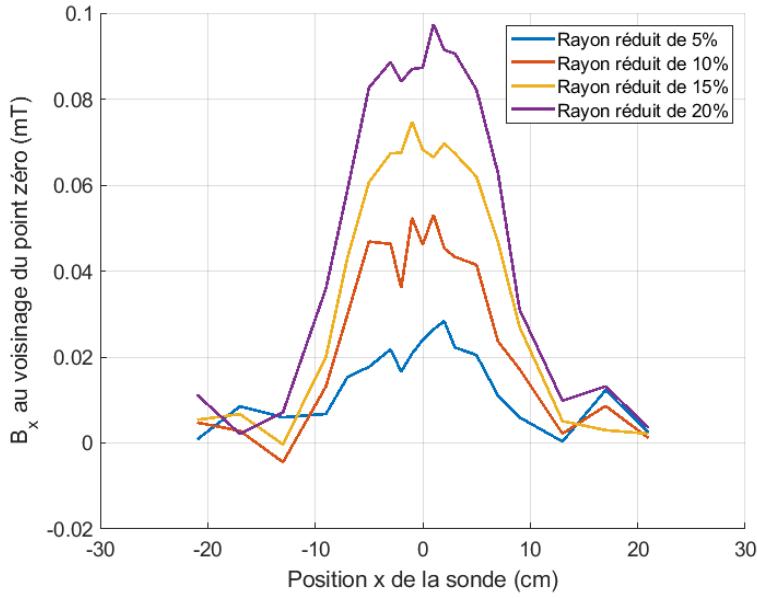
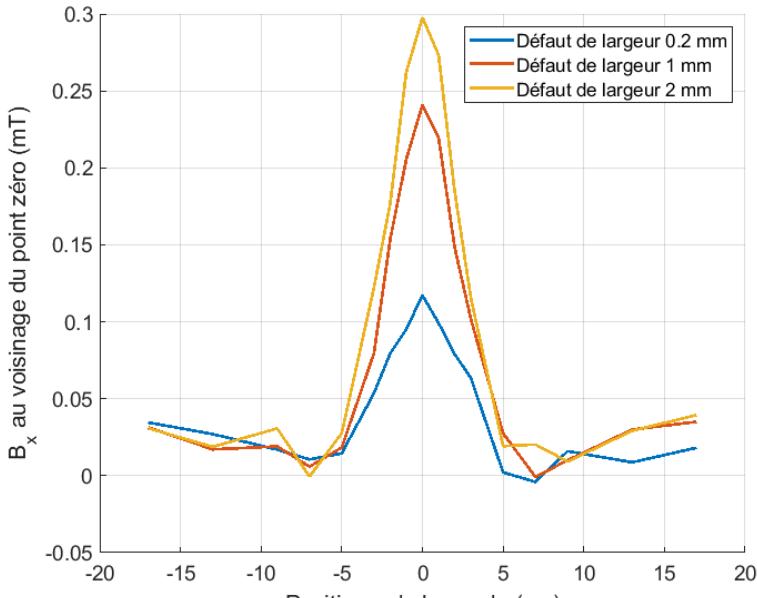


FIGURE 3.19 Modélisation des défauts LMA et LF dans l'échantillon de la simulation numérique



(a) Défauts LMA



(b) Défauts LF

FIGURE 3.20 Résultats de simulation par éléments finis pour la détection de défauts LMA et LF de différentes dimensions

Pour les défauts LF, les variations de flux sont encore plus importantes que celles causées par les défauts LMA. Cela est certainement dû à la présence de fuites magnétiques, mais surtout au fait que le défaut coupe complètement le chemin du flux dans l'acier. Cette modélisation

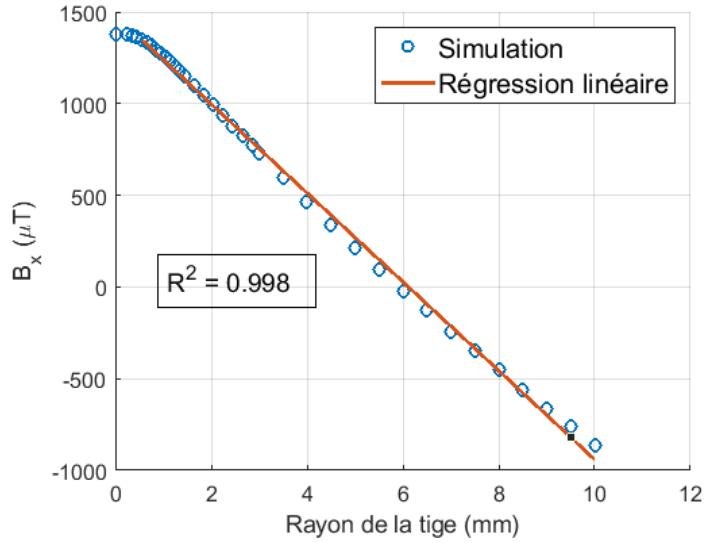


FIGURE 3.21 Densité de flux mesurée dans l'air en fonction du rayon de l'âme d'acier

du défaut ne représente pas bien la réalité, dans laquelle les défauts LF sont plus petits. En général, pour une âme d'acier multibrins, les défauts LF prennent la forme d'un brin brisé.

3.5.2 Petit défaut LF et brin brisé

Afin de se rapprocher de la réalité, nous avons simulé un défaut local plus petit dans l'échantillon (figure 3.22a) ainsi qu'une modélisation plus réaliste d'une âme d'acier à 7 brins avec un brin brisé (figure 3.22b).

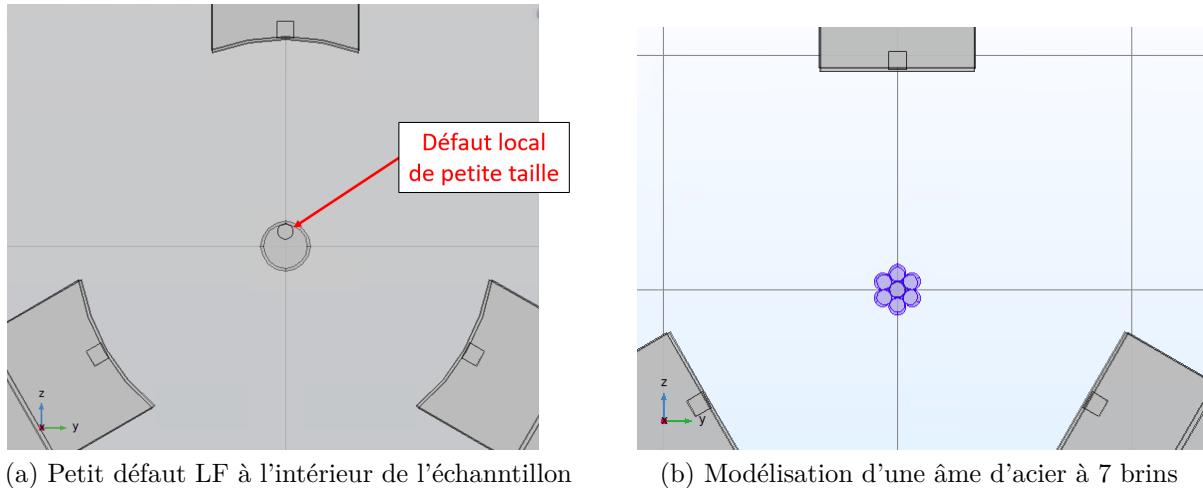


FIGURE 3.22 Modélisation plus réaliste des défauts LF

Malgré un raffinement du maillage de la simulation (qui rend la simulation très lourde et très lente), le défaut de la figure 3.22a ne génère aucune variation de flux suffisamment importante pour être détectée. En revanche, il semble possible de détecter le brin brisé dans la simulation de l'âme d'acier multibrins malgré le bruit numérique de la simulation. La figure 3.23 montre un petit pic autour de la position $x = 0$, où le brin brisé était présent.

3.5.3 Position du brin brisé

Dans la section précédente, le brin brisé est le brin du dessus dans la figure 3.22b. Cependant, tout autre brin périphérique brisé produit exactement le même signal. **Le champ mesuré est en fait invariant à la rotation du câble autour de son propre axe.** La fuite magnétique générée par le brin brisé se manifeste dans toutes les directions. Elle est bien sûr plus élevée à proximité du défaut, mais la mesure dans l'air de la sonde est relativement éloignée du câble. Nous ne sommes donc pas en mesure de déterminer exactement lequel des brins périphériques est brisé. Cela ne pose pas de problème dans le cas d'application de la sonde aux conducteurs ACSR car l'objectif est de détecter la présence d'un brin brisé et non de localiser précisément le défaut.

Il est possible de localiser précisément le brin brisé avec d'autres méthodes de mesure, par exemple avec la méthode décrite dans la section 2.5.2, où la mesure est effectuée par 18 capteurs à effet Hall formant un réseau circulaire autour du câble, près de sa surface (voir figure 2.15b) et permettant de mesurer la fuite magnétique dans les directions radiales autour du câble.

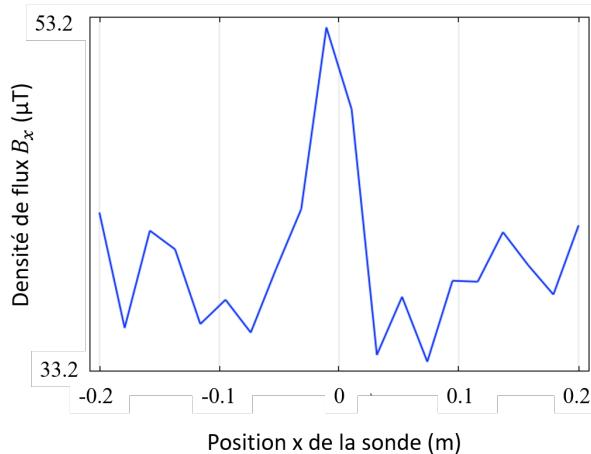


FIGURE 3.23 Résultat de simulation pour un échantillon avec brin brisé

Nous avons par contre observé que les défauts dans les brins extérieurs ont un pic de signal plus élevé que les défauts dans le brin central, ce qui est vraisemblablement dû au fait que le champ de fuite du brin central brisé est partiellement bloqué par les brins périphériques.

Ces résultats ont également été vérifiés expérimentalement dans le prototype de sonde conçu au chapitre 5.

CHAPITRE 4 COMPARAISON EXPÉRIMENTALE DE CAPTEURS MAGNÉTIQUES SOUS UN CHAMP DC

L'objectif de ce chapitre est de comparer expérimentalement plusieurs capteurs à axe unique disponibles sur le marché afin de sélectionner le capteur le plus sensible et le plus adapté pour la sonde magnétique. Trois technologies différentes de capteurs ont été testées : capteurs à effet Hall, magnéto-résistances et capteurs fluxgate. Les différents capteurs ont été testés sous un champ DC, pour simuler le champ statique de la sonde.

4.1 Capteurs magnétiques comparés et leurs technologies

Le tableau 4.1 liste les capteurs candidats qui ont été comparés dans cette étude.

Les différents capteurs sont basés sur différentes technologies de mesure du champ magnétique. Chacune de ces technologies a son propre fonctionnement et ses propres caractéristiques qui font la force ou la faiblesse des capteurs. Voici une brève description des technologies :

Gaußmètre : Le Gaußmètre utilisé dans cette étude est un Gaußmètre à effet Hall (modèle 475 DSP de LakeShore). Il permet d'effectuer des mesures de haute précision de champ magnétique grâce à l'utilisation d'un processeur de signal numérique (DSP : Digital Signal Processor). La technologie DSP crée une base solide pour une mesure de champ précise, stable et répétable dans le cas des champs DC et AC. Ce modèle est un instrument de mesure de laboratoire, qui dans le cas de cette étude, est utilisé comme référence de comparaison pour les capteurs magnétiques.

TABLEAU 4.1 Capteurs magnétiques comparés

N°	Référence	Technologie	Plage	Montage
0	LakeShore 475 DSP	Effet Hall, Gaussmeter	35 T	–
1	DRV5056A4	Effet Hall, Analog	158 mT	Sans filtre
2	DRV5056A4	Effet Hall, Analog	158 mT	Filtre passe bas
3	DRV5053RA	Effet Hall, Analog	18 mT	Sans filtre
4	DRV425RTJT	Fluxgate, Analog	2 mT	Filtre passe bas
5	RR111-1DC2-331	MR, Analog	1 mT	Filtre passe bas
6	RR112-1G42-531	MR, Analog	8 mT	Filtre passe bas

Effet Hall : Les capteurs à effet hall sont les capteurs de champ magnétique les plus populaires. Ils permettent de mesurer un champ magnétique statique grâce à l'effet Hall : un courant est appliqué dans une fine bande d'un semi-conducteur. En présence d'un champ magnétique perpendiculaire à la direction du courant, les porteurs de charge sont déviés par la force de Lorentz, produisant une tension électrique entre les deux côtés de la bande. Cette différence de tension est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique. L'électronique interne du capteur permet d'amplifier cette tension et de limiter le bruit de mesure. Les capteurs à effet Hall sont connus pour être **très linéaires** et pour avoir une assez **grande plage de mesure** (peut aller jusqu'à 3 T). Ils ont toutefois en général une **mauvaise résolution** (de l'ordre de 100 nT dans le meilleur des cas). Les deux capteurs à effet Hall testés dans cette étude sont des capteurs analogiques, ayant respectivement une plage de mesure de 158 mT [49] et de 18 mT [50].

Fluxgate : Les capteurs fluxgate sont moins répandus que les capteurs à effet Hall, en raison de leur plage de mesure réduite et de l'électronique assez compliquée requise pour les faire fonctionner efficacement. Cependant, ces capteurs ont une résolution très élevée (qui peut théoriquement atteindre 0.1 nT), ce qui pourrait être utile dans notre cas. Le principe du fonctionnement d'un capteur fluxgate est assez simple : un petit noyau ferromagnétique est entouré de deux bobines de fil. Une bobine d'excitation et une bobine de mesure. La bobine d'excitation sert à faire passer le noyau par un cycle alternatif de saturations magnétiques. Le champ du noyau induit un courant électrique dans la deuxième bobine, et ce courant de sortie est mesuré par un détecteur. En présence d'un champ externe, le noyau est plus facilement saturé en alignement avec ce champ et moins facilement saturé en opposition à celui-ci. Par

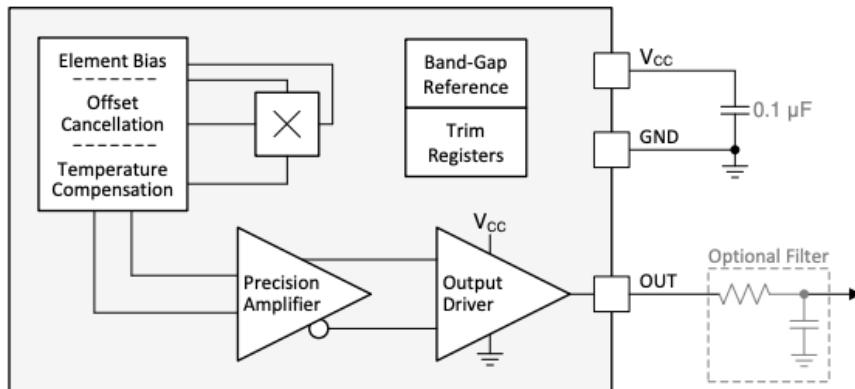


FIGURE 4.1 Diagramme du circuit interne d'un capteur à effet hall et montage recommandé.
Tiré de [49]

conséquent, le courant de sortie induit, est décalé par rapport au courant d'entrée. Ensuite, le courant dans la bobine de sortie est intégré, ce qui donne une tension analogique de sortie proportionnelle au champ magnétique. La figure 4.2 montre le montage recommandé pour le capteur fluxgate testé dans cette étude [51]. Un circuit imprimé (PCB) a été créé pour ce montage afin de faciliter la manipulation du capteur.

Magnéto-résistance (MR) : Les capteurs magnéto-résistif présentent en général un compromis entre les capteurs à effet hall et les capteurs fluxgate. Ils ont une résolution moyenne (autour de 10 nT dans le meilleur des cas), et une plage de mesure raisonnable (peut aller jusqu'à 10 mT). Les magnéto-résistances sont constituées de fines bandes de Permalloy, un alliage nickel-fer à haute perméabilité magnétique, dont la résistance électrique varie en fonction de la variation du champ magnétique. La figure 4.3 montre le montage recommandé pour les capteurs magnéto-résistifs testés dans cette étude [52] [53]. Un circuit imprimé a également été créé pour ce montage.

4.2 Montage expérimental de mesure

4.2.1 Bobines de Helmholtz

Afin de générer un champ magnétique DC pour tester les différents capteurs, des bobines de Helmholtz ont été utilisées (voir figure 4.4). Ces bobines permettent de gérer une région de champ magnétique très uniforme, d'intensité proportionnelle au courant électrique qui passe

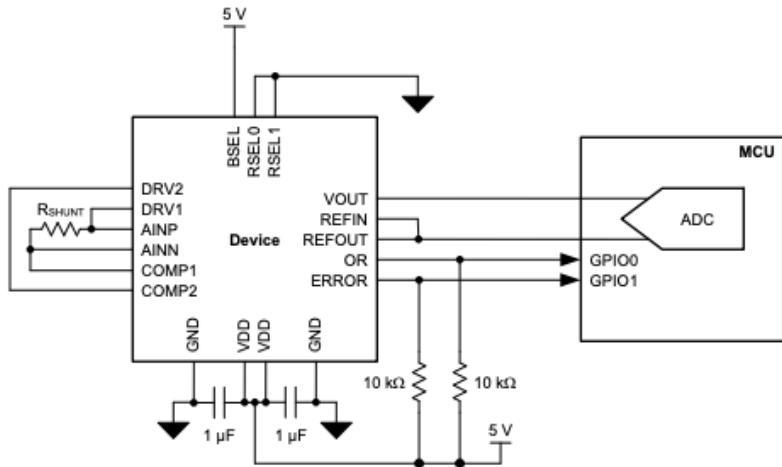


FIGURE 4.2 Circuit recommandé pour un capteur fluxgate de type DRV425. Tiré de [51]

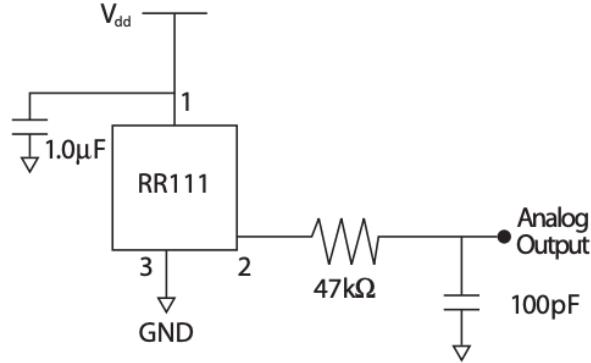


FIGURE 4.3 Circuit recommandé pour le capteur magnéto-résistif RR111. Tiré de [52]

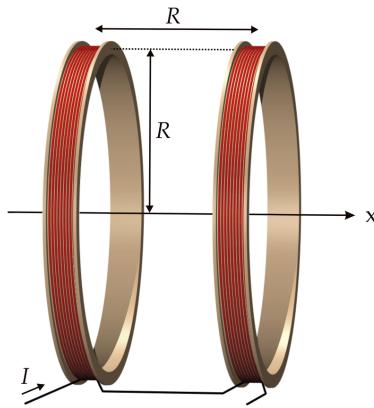


FIGURE 4.4 Dispositif de génération de champ magnétique : bobines de Helmholtz

dans les bobines, selon la relation suivante :

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 n I}{R} ,$$

où R est le rayon des bobines (et la distance entre les deux bobines), n est le nombre de spires dans une bobine et μ_0 est la perméabilité magnétique du vide.

Le coefficient de proportionnalité entre le courant I et la densité de champ magnétique B peut être calculé directement en utilisant la formule, ou expérimentalement en mesurant le champ à l'intérieur des bobines pour un courant connu. Nous avons utilisé le Gaussmètre pour effectuer la mesure. Nous avons obtenu le résultat suivant :

$$B = \alpha I$$

avec $\alpha = 0.4725 \text{ mT/A.}$

4.2.2 Montage de mesure

Les bobines d’Helmholtz sont connectées à une source de courant continu. La source utilisée dans cette étude est la source TDK Lambda GEN 20-76, capable de fournir un courant variant entre 0 et 76 A. Elle peut être directement contrôlée par ordinateur grâce au logiciel Labview. Les capteurs à tester étaient placés au centre des bobines, où le champ magnétique est uniforme. Une carte d’acquisition NI (National Instruments) permet d’alimenter les capteurs à 5V et de récupérer la tension de sortie aux bornes du capteur.

Un programme Labview permet de contrôler la source de courant afin de faire varier le champ magnétique dans les bobines, puis de lire, visualiser et enregistrer la réponse des capteurs. Cette réponse est post-traitée pour mieux comparer les différents capteurs magnétiques. Plusieurs expériences ont été menées, afin de tester plusieurs aspects des capteurs. La section suivante détaille ces expériences.

4.2.3 Expériences

Linéarité : La première expérience consistait à tester la linéarité des capteurs. Dans cette expérience, nous avons varié le courant de 0 à 8 A avec un pas de 0.1 A, ce qui donne 80 points de mesure. Pour chaque capteur, nous avons enregistré le courant de sortie de la source, ainsi que la tension de sortie du capteur pour chacun des points.

Chaque capteur a une réponse en tension différente, selon sa plage de mesure et son électronique interne. Il est donc nécessaire de changer cette tension en intensité de champ magnétique par transformation affine. L’annexe A sur le post-traitement des mesures explique les détails de cette transformation.

Sensibilité : La deuxième expérience consistait à quantifier la sensibilité des capteurs. Cette expérience utilisait le même montage que pour l’expérience de linéarité, mais pour cette mesure, nous avons fait varier le courant à chaque fois entre 2 A et 2.1 A avec un pas de 0.002 A, ce qui donne 50 points de mesure. Pour chaque capteur, nous avons enregistré le courant de la source et la tension de sortie aux bornes du capteur. Nous avons utilisé ensuite la même transformation affine pour changer cette tension en intensité de champ magnétique. L’idée derrière cette expérience était de voir la réponse des capteurs à une variation infime du champ magnétique (de l’ordre du μ T). Cette réponse a permis ensuite de quantifier le niveau de bruit des capteurs et de caractériser leur sensibilité.

Répétabilité : L'objectif de cette troisième expérience était de voir si les capteurs sont capables de reproduire exactement la même réponse quand les conditions de mesure sont exactement les mêmes. La répétabilité des mesures est en général directement reliée au niveau de bruit du capteur. Nous nous attendions donc que les résultats de cette expérience soient en accord avec ceux de l'expérience de sensibilité.

Toujours avec le même montage, nous avons basculé le courant entre les deux valeurs 2 A et 4 A 20 fois. Puis nous avons recommencé l'expérience une deuxième fois. Cela a permis d'avoir finalement 20 points de mesures à 2 A, et 20 points à 4 A. Ce qui a permis ensuite de calculer l'écart-type des mesures tel qu'expliqué dans l'annexe A. Le tableau des résultats dans la prochaine section montre la valeur de l'écart-type de répétabilité pour chaque capteur.

4.3 Résultats et discussions

Le tableau 4.2 montre les résultats des différentes expériences. Pour chaque capteur, l'erreur linéaire err_{lin} , l'écart-type de sensibilité σ_{sens} et l'écart-type de répétabilité σ_{rep} ont été calculés selon les méthodes détaillées en annexe A.

Il est intéressant de remarquer que pour la majorité des capteurs, l'écart-type de sensibilité et celui de répétabilité sont assez cohérents. Il est donc clair que ces deux métriques sont directement reliées au bruit du capteur. Toutefois, pour le capteur à effet Hall de plage 158 mT (capteurs 1 et 2), nous remarquons une inversion : le capteur sans filtre (1) est moins sensible et moins linéaire que le capteur avec filtre (2) mais ses mesures sont plus répétables. Cela suggère la présence d'un bruit intrinsèque au filtre passe bas. Il est possible que les valeurs de capacité et de résistance du filtre choisi soient à revoir.

Le tableau de résultats ne permettait pas de visualiser la différence entre les capteurs. Pour une meilleure comparaison, les résultats de ce tableau sont présentés à la figure 4.5. Chaque capteur est représenté par un disque dont le rayon est d'autant plus grand que la plage de

TABLEAU 4.2 Résultats des métriques d'évaluation des capteurs

N° capteur	Technologie	Plage	$err_{lin}(\mu\text{T})$	$\sigma_{sens} (\mu\text{T})$	$\sigma_{rep}(\mu\text{T})$
0	Gaussmeter	35 T	1.085	0.5913	0.5043
1	Hall	158 mT	11.88	2.935	2.885
2	Hall	158 mT	11.17	2.506	3.877
3	Hall	18 mT	6.196	2.115	2.676
4	Fluxgate	2 mT	3.729	0.36	0.1083
5	MR	1 mT	16.96	4.935	7.587
6	MR	8 mT	3.609	1.358	1.857

mesure du capteur est large. L'axe des abscisses représente l'erreur de linéarité en μT , et l'axe des ordonnées représente l'écart-type de sensibilité en μT également. Le capteur idéal se trouverait donc en bas à gauche du diagramme.

Au vu du diagramme de la figure 4.5, les résultats montrent clairement que le meilleur choix de capteur selon cette étude est le capteur fluxgate (4). Sa sensibilité est meilleure que celle du Gaussmètre, et il a pratiquement l'erreur de linéarité la plus basse avec le capteur magnétorésistif (6). Ce dernier capteur peut également être un choix acceptable, même si son niveau de bruit est un peu plus élevé. Il a toutefois une plage de mesure plus grande (environ 8 mT) ce qui assurerait d'éviter sa saturation dans le cas de notre application.

Le capteur à éviter à tout prix est le capteur MR (5). Il est environ 10 fois moins sensible que le capteur fluxgate, et présente une grande erreur de linéarité. Quant aux capteurs à effet Hall, ils donnent des résultats plutôt corrects compte tenu de leur très grande plage de mesure. Il est aussi intéressant de remarquer que le filtre passe-bas pour le capteur Hall est optionnel. Le capteur Hall (1) peut être utilisé pour mesurer les variations du flux magnétique

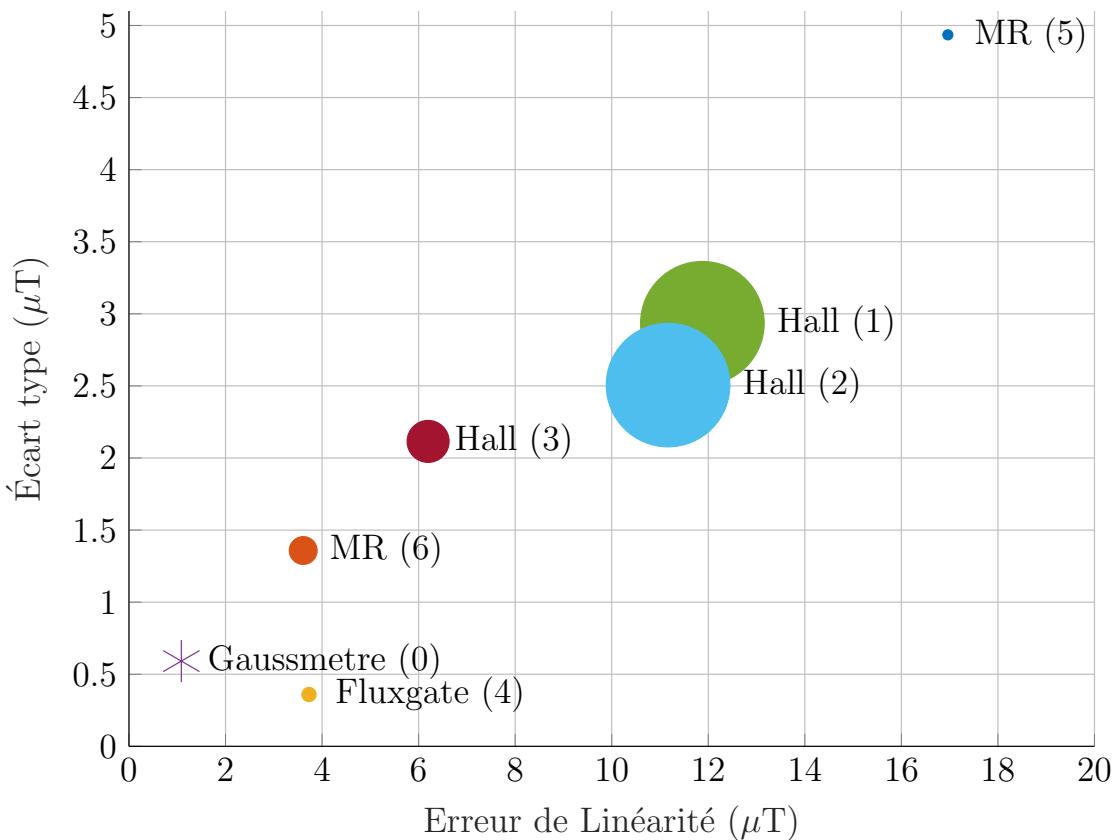


FIGURE 4.5 Comparaison des différents capteurs

à l'intérieur du circuit magnétique de la sonde, dans l'entrefer de la sonde par exemple, où sa grande plage de mesure serait très utile.

L'annexe B montre les données brutes d'inspection de certains échantillons au laboratoire avec la sonde prototype. Plus particulièrement, elle présente les résultats de mesure des capteurs fluxgate, placés dans l'air, au voisinage du point zéro magnétique, ainsi que des capteurs à effet Hall placés dans l'entrefer du noyau.

4.4 Conclusion

Cette comparaison a permis de mettre en place une procédure complète de test des capteurs magnétiques sous un champ magnétique DC de quelques mT en utilisant un montage assez simple de bobines de Helmholtz. Le capteur fluxgate DRV425 s'est avéré être le candidat idéal pour la sonde magnétique. Sa très bonne linéarité et son niveau de bruit très faible permettront d'améliorer significativement la sensibilité de la sonde. En plus, sa petite plage de mesure ne devrait pas poser de problème. En effet, les simulations numériques ont montré que l'entrefer dans le noyau magnétique permet d'obtenir un point zéro magnétique dans la zone d'air à l'intérieur de la sonde. Ce point zéro est l'endroit idéal pour placer un capteur magnétique afin de profiter de toute sa plage de mesure, sans le saturer par le champ ambiant des aimants. Selon les résultats de simulation, les variations du flux du champ magnétique B_x au point zéro, causées par les défauts dans le câble, ne dépassent jamais 1 mT. Il est donc possible d'utiliser un capteur avec une plage de mesure de l'ordre du mT, à condition de s'assurer que le capteur est placé au voisinage du point zéro au moment de la calibration de la sonde avec un câble sain.

CHAPITRE 5 ARTICLE 1 : ULTRASENSITIVE LIGHTWEIGHT MAGNETIC PROBE FOR NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF HIGH-VOLTAGE OVERHEAD LINES

Ce chapitre consiste en un article soumis au journal NDT & E International en juillet 2022. L'article présente la sonde prototype réalisée en laboratoire à partir du modèle de sonde à trois pôles conçu par simulation numérique et présente également les résultats des tests expérimentaux menés au laboratoire pour valider le fonctionnement du prototype. Après une brève introduction et revue de littérature, l'article détaille les méthodes de conception de la sonde prototype, les méthodes de tests, puis enfin les résultats et discussions, en mettant l'accent sur les nouveautés de ce travail par rapport aux sondes existantes sur le marché, à savoir :

- une nouvelle conception de sonde magnétique adaptée aux conducteurs ACSR et à leurs manchons de raccordement,
- l'utilisation d'un point zéro magnétique pour améliorer la sensibilité de la détection,
- l'utilisation de la symétrie pour compenser le décentrement du conducteur dans la sonde durant l'inspection,
- la détection des pertes métalliques et des défauts locaux sous excitation magnétique faible,
- une conception légère qui ne nécessite aucun mécanisme d'ouverture et rend la sonde adaptée à l'inspection par drone.

Remarque : *certaines parties de l'article sont redondantes avec les premiers chapitres du mémoire.*

Auteurs et affiliations :

Yahya Iben Brahim^a, Jonathan Bellemare^{a,b}, Gilles Rousseau^b, Nicolas Pouliot^b, David Ménard^a, Frédéric Sirois^a.

^a Polytechnique Montréal, Montréal, QC, Canada.

^b Institut de Recherche d'Hydro-Québec, Varennes, QC, Canada.

Keywords

NDT - Magnetic Flux leakage - ACSR conductors - Steel defects - Fluxgate sensors

Abstract

For power utilities with comprehensive asset management programs, inspection of high-voltage line conductors is critical to ensure network reliability. Current non-destructive testing methods for ferromagnetic materials are still not completely adapted to perform these inspections quickly, safely and accurately. This paper presents the prototype of a novel probe that is specifically designed for the inspection of conductors steel core. It is based on a novel lightweight and symmetrical design intended for automated inspection by drone. The sensitivity of the new probe is achieved by compensating for the conductor's imperfect centering during inspection and by creating a zero magnetic field point that allows the use of low range and accurate fluxgate sensors. Experimental results verify that the prototype is capable of detecting broken wires, quantifying metal area loss and inspecting steel core splice joints under unsaturated magnetic excitation, which is the key element to achieve a lightweight probe.

5.1 Introduction

5.1.1 Power lines and ACSR conductors

There are more than 5 million kilometers of high-voltage lines in the world, with approximately 200,000 kilometers added every year [54]. The majority of these lines are considered old (>50 years), which makes them prone to significant malfunctions. Replacing the conductors of a line costs millions of dollars and often takes years of planning [5]. The non-destructive testing of the line conductors is therefore a very important task in order to estimate the condition and the residual life of the power lines and prioritize the most urgent replacements in order to avoid major power outages.

The vast majority of electrical conductors used for high voltage lines are ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced). These conductors have a central steel core that provides mechanical strength. The steel core is usually made of 1 to 37 steel strands galvanized with zinc to protect steel against corrosion. Surrounding the steel core, there are typically 6 to 84 aluminum strands for electrical conduction [2]. An example of an ACSR conductor (Curlew) is shown in Figure 5.1. ACSR conductors are produced in piece lengths of few kilometers. To form a continuous power line, many line segments are connected in series with connecting splices, also made of steel and aluminum. These connecting splices have larger diameters than the conductors and are therefore challenging to inspect.

There are several types of degradation that affect ACSR conductors. Defects on the external aluminum layer are the most common. They are often caused by the scratching of the conductor on the ground during its manufacturing or its installation. Lightening strikes or phase-to-phase electric discharges happening during wind-induced large amplitude oscillations also generates surface defects such as melted or broken strands. This kind of defect can be detected by visual inspection [22]. However, internal defects, especially those in the steel core, are more critical because they are hidden and they can lead to a reduction of mechanical strength of the conductor, and eventually to its failure. Internal steel defects can be classified into two categories [20]:

- **LMA (Loss of Metallic Area):** Corresponds to a reduction in steel cross-section, often caused by internal corrosion.
- **LF (Localized Faults):** Mainly consists of broken steel strands. They are usually caused by mechanical damage such as internal fatigue and wind-induced vibrations.

There are a wide variety of NDT methods suitable for the inspection of metallic cables. These include visual inspection [24], mechanical methods [26], ultrasonic waves inspection [25], radiation and imaging methods [27], eddy current methods [31] and magnetic methods. All these methods have strengths and weaknesses. Due to the large number of power lines and the risks associated with their inspection, power utilities are constantly looking for ways to avoid sending human operators to evaluate the line conditions. Given their practicality, magnetic methods have become the basis of today's automated cable inspection systems, in which the human exposure is considerably reduced [55]. Current automated solutions consist of robots that move on the line conductors while carrying magnetic probes [22]. Robots capable of crossing obstacles need less human intervention and have also been explored [7] [56]. However, the next goal is to perform drone inspections, as they are faster and eliminate all sources of danger.

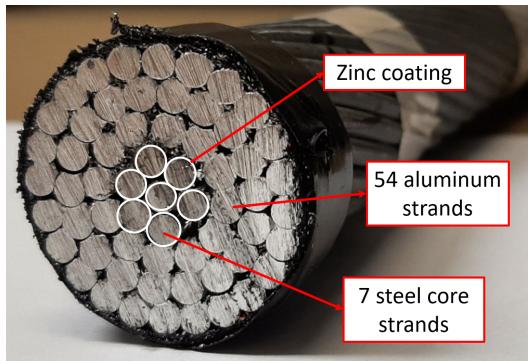


Figure 5.1 ACSR conductor (Curlew) made of 7 central galvanized steel strands and 54 peripheral aluminum strands

5.1.2 MFL and existing probes

Magnetic detection methods are mainly based on Magnetic Flux Leakage (MFL). In a magnetic circuit, field lines become distorted near corners, abrupt changes in geometry and discontinuities (see Figure 5.2). This results in an increase of the magnetic flux intensity in the air near defects. The magnetic leakage is due to the presence of north and south magnetic poles on either side of the local fault, since the defect acts as a small magnetic dipole. If one can measure this leakage flux with a sensitive measurement system (most often detection coils or magnetic sensors), it provides a direct means to detect defects [23].

The MFL technique is widely used for its efficacy, convenient implementation, fast cable scanning capability and relatively easy data processing [32]. However, the magnetic field resulting from MFL is generally weak and difficult to measure in the stronger ambient field of the magnets. Its magnitude depends directly on the strength of the magnetic excitation source applied on the wire. If the magnetization is not sufficient, the field lines bypass the defect, i.e., the healthy strands of the wire can still carry the majority of the magnetic flux. Therefore, flux leakage becomes almost impossible to measure.

According to literature [29] [40], the steel parts to be tested should be magnetized close to saturation. Unfortunately, ACSR conductors present a significant challenge for magnetic probes because of the outer aluminum layers (aluminum is not a magnetic material). The resulting diameter of the conductor is thus larger than that of the steel core alone, and the probe cannot get close to the steel. The lift-off is significant (see Figure 5.2), which greatly reduces the magnetic excitation provided by the probe. Nonetheless, recent studies by Zhang *et al.* [42] [57] showed that detection of defects in the unsaturated magnetic regime is possible.

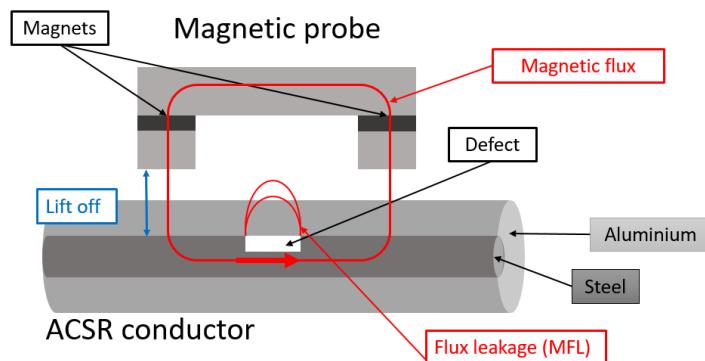


Figure 5.2 Schematic view of magnetic flux leakage in presence of a steel core defect

Several magnetic probes for defect detection in wire ropes already exist on the market, such as the Kinetrics LineVue probe [46], the Rotesco probe [9], the Intron probe [10] and the Magnograph probe [11]. However, these probes are usually designed for steel-only cables and are not suitable for drone inspection of ACSR conductors for several reasons:

- They are very heavy (>10 kg), which makes them impossible to carry by convenient sized drone.
- They have a small opening diameter (e.g. 24 mm for the lightweight Intron MH6-24), preventing connecting splices and larger ACSR conductors from being inspected.
- They have mounting mechanisms that require human intervention to be installed on high voltage lines (see Figure 5.3). This exposes maintenance personnel to the inherent risks of a live line environment and significantly reduces the inspection speed.
- They lack measurement accuracy for ACSR testing and have a low signal-to-noise ratio.

5.1.3 Objectives

In this work, we aimed at designing a new lightweight, easy-to-deploy, large-aperture magnetic probe optimized for accurate detection of steel defects in ACSR conductors and their connecting splices. The new design is symmetrical to compensate for conductor offset from the central axis of the probe, and relies primarily on the use of a sensitive, low-range fluxgate sensor strategically located near a zero magnetic field point. Experimental results demonstrate that the proposed design can accurately detect broken wires in the steel core and corrosion in the connection splices, and therefore measure quantitatively the loss of metallic area (LMA).

This paper is organized as follows: Section 5.2 provides details about the new probe design and how it has been achieved. Section 5.3 presents the experimental set-up and the different

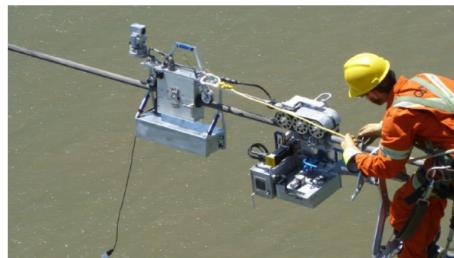


Figure 5.3 Installation of an inspection device for a river-crossing power line

The magnetic device weights 27 kg and the motorized unit weights 23 kg. The installation requires a temporary scaffolding to mount the inspection system pass vibration dampers.

samples used to test the probe prototype. Section 5.4 shows the measurement results and discuss the probe strengths and limitations.

5.2 Probe Design

5.2.1 Requirements and selected geometry

Before building the prototype probe, a 3D finite element model was developed in Comsol Multiphysics, and the probe performance has been evaluated by running multiple parametric simulations. The final geometry chosen was a three-pole probe (see Figure 5.4). The three poles are identical and consist of the elements 1, 2 and 3 shown in Figure 5.5.

Element 1, the *yoke*, is a flux bar made of very high permeability magnetic material (e.g. soft steel) connecting the two magnets (see below).

Element 2 consist of *permanent magnets* that are oriented in opposite directions (North-South and South-North) in order to generate a magnetic flux that circulates longitudinally along the tested sample.

Element 3, the *couplings*, consists of two blocks made of the same material as the yoke. They channel the magnetic flux in the direction of the sample under test (see below).

Element 4 in the figure is the *tested sample*, in this case an ACSR conductor. In the numerical simulations, the outer aluminum strands do not need to be modeled because aluminum is a paramagnetic material and behaves like air from a magnetic point of view. In addition, the multi-strand steel core was modeled as a single steel cylinder with an effective radius. The volume of the solid cylinder is equivalent to that of the multi-strand steel core. For instance, for a 7-strand rope of radius r , the effective radius of the cylinder is $r_{\text{eff}} = \sqrt{7}r$.

Each pole forms a magnetic circuit with the steel sample and magnetizes it along the conductor axis (x axis in Figure 5.4).

This particular 3-pole geometry was designed specifically to respect the constraints of on-site inspections by drone. First, we wanted a lightweight probe that would not be affected by the radial displacements of the conductor during inspection and that would not require a locking mechanism¹. This is different from existing wire rope magnetic probes, which typically have 2 heavy poles with locking mechanism, or less commonly 4 poles (such as the Magnograph [11]). In 2021, Zhang *et al.* [47] proposed a different prototype design, with a cylindrical probe, a

1. The locking mechanism is used on magnetic probes to ensure that the conductor is securely fastened inside the probe during inspection. It is usually accomplished by a clamping mechanism that the power line personnel lock when mounting the probe.

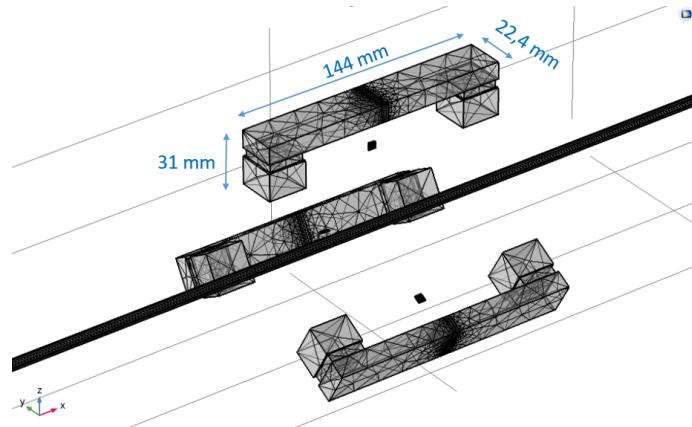


Figure 5.4 3D finite element model of the magnetic probe implemented in Comsol Multiphysics

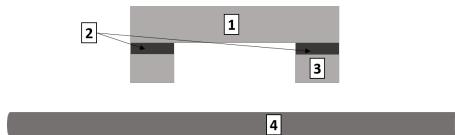


Figure 5.5 Schematic of a single pole with its different components, namely the yoke (1), the permanent magnets (2), the couplings (3) and the tested sample (4)

circular sensor array around the conductor and more accurate quantitative measurements. The 3-pole geometry retains this cylindrical symmetry while (i) reducing weight (ii) using rectangular shaped magnets and a more convenient and easier-to-machine yoke and couplings (iii) not requiring a locking mechanism (iv) utilizing the symmetry to compensate for the radial offset of the conductor (as demonstrated in section 5.4).

Another particular requirement of our design was to be able to inspect conductors with diameters up to 60 mm in the access between the two poles at the bottom of the probe. Therefore, the probe aperture was set to 90 mm to obtain around 65 mm access zone (see Figure 5.7b). In addition, the length of the yoke was set to approximately 14 cm (Figure 5.4). This was found as the best compromise between weight and magnetic flux density in the sample. Indeed, a shorter length increases the magnetic flux passing directly in the air from one coupling to the other and, as a consequence, to a decrease of the flux passing through the sample. Conversely, a longer yoke increases the weight, and distributes the flux over a longer section of the sample, resulting in a lower flux density. Finally, the other probe dimensions have been set to respect a maximum weight constraint of 500 g per pole.

The reduced weight and large aperture of the probe comes at the cost of a reduced magnetic excitation. The magnetization of the sample depends on its radius and permeability. We

could find by numerical simulations that in a sample with an effective radius of 3 mm and a relative magnetic permeability of 60², the magnetic flux is in the range of 550 mT, which is far from the saturation level of soft steel (above 1 T). We thus clearly operate in the unsaturated regime.

5.2.2 Zero magnetic field point

Because we operate below the saturation level of the sample, the magnetic leakage field is low and becomes difficult to measure in the strong background field produced by the magnets. However, it is possible to circumvent this problem by adding an air gap in the yoke to create a zero magnetic field point inside the probe, where the strong field of the magnets will not be perceived by the magnetic sensors.

Figure 5.6 shows how the zero magnetic field point is formed. The magnetic field \vec{B} flows in the direction of the x-axis in the air between the two couplings, and in the opposite direction in the yoke. The air gap causes a magnetic leakage which creates an opposite field in the air \vec{B}' . The two fields compensate each other inside the probe, and a zero magnetic field point is formed in the middle. In the vicinity of this point, the magnetic field is very weak, and it becomes possible to measure very small field variations with a high-resolution low-range sensor, without the risk of saturating it. Sekino *et al.* [58] had a similar approach in their design of the magnetic handheld probe for identification of sentinel lymph nodes in breast cancer patients. In their approach, however, the zero magnetic field point was achieved by using a ring-shaped magnet, not created by an air gap.

5.2.3 Choice of sensor

The choice of the probe's magnetic sensor is very important because it affects directly the sensitivity and reliability of the measurements. We wanted to choose the most sensitive/accurate magnetic sensor possible, keeping in mind that we should never operate beyond its saturation range. This is one of the reasons why the vast majority of existing probes use Hall effect sensors. These sensors have a wide measurement range and decent sensitivity. In more recent work, researchers [42] managed to use GMR sensors, which have smaller range but greater sensitivity. However, fluxgate sensors remain by far the most sensitive magnetic sensors³ on the market today, especially for low frequency fields and DC sensing [59]. They have not been used much in magnetic probes because of their restricted measurement range (typically in the

2. The relative magnetic permeability of the samples considered in this work were measured and found to be between 50 and 60 in all cases.

3. In their class, i.e. relatively compact and low cost magnetic sensors operating at room temperature.

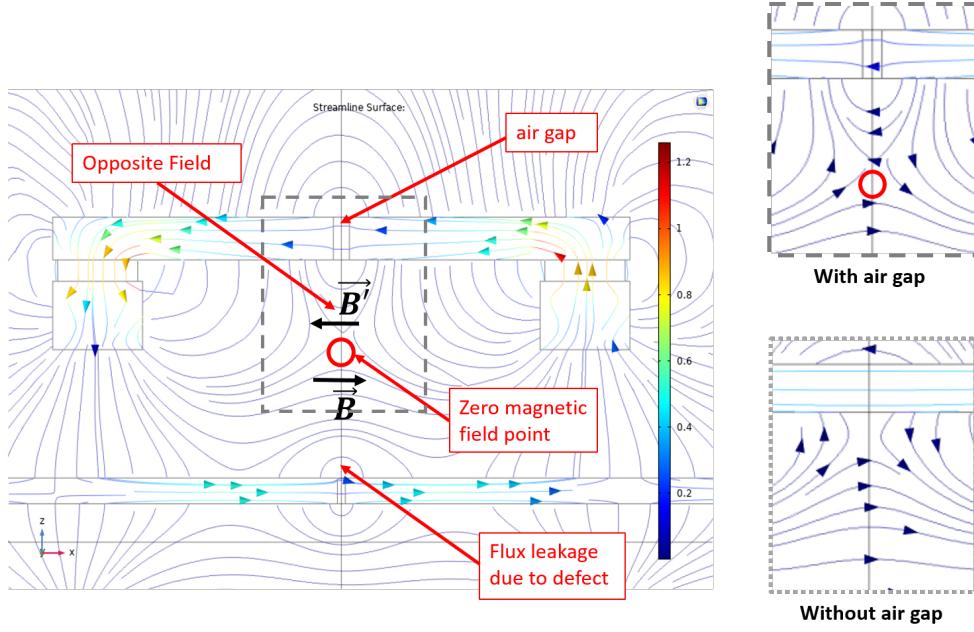


Figure 5.6 Magnetic flux lines around a pole of the magnetic probe, showing explicitly the location of the zero magnetic field point

range of 1 mT). We therefore explored if they could be used in our probe when located at the zero magnetic field point.

By using DC Helmholtz coils and a LakeShore Model 475 DSP gaussmeter to produce an accurate reference magnetic field, we conducted an experimental comparison of the sensitivity and accuracy of several sensors available on the market: Hall sensors [49] [50], Magnetoresistive sensors [52] [53] and a Fluxgate sensor [51]. Based on the results, the sensor selected for our probe was a Fluxgate DRV425 magnetic field sensor from Texas Instruments [51]. Its measurement range is ± 2 mT with a linearity error of $\pm 0.1\%$, and a noise spectral density of 1.5 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$.

5.2.4 Physical configuration of the probe

A 3D model of the probe frame was done with the Autodesk Inventor software and is shown in Figure 5.7. For each pole of the probe, a plastic shell was printed in two halves so that the permanent magnets (NdFeB) and soft steel could be placed inside (see Figure 5.8). The shells of the 3 poles were connected by a plastic frame and placed at 120 degrees from each other to guarantee perfect cylindrical symmetry. The frame is open at the bottom to leave a free access space for the conductor without any clamping or locking mechanism. There is however no guarantee that the conductor will remain stable in the center of the probe. Radial

displacements due to possible relative motion or vibration of the probe when it rolls along the conductor (called conductor offset, see Figure 5.7b) may cause signal variations that can be misinterpreted as the presence of a defect in the steel core. Fortunately, this offset can be compensated by utilizing the design symmetry and by averaging the signals measured by the 3 sensors, as shown in section 5.4.

The exact location of the zero magnetic field point was determined by finite element simulations, but it can be slightly different in the real prototype because of fabrication imperfections. For this reason, each pole was equipped with a slidable platform to hold the fluxgate sensors. This degree of freedom was essential in order to place each sensor in the vicinity of the zero magnetic field point.

5.2.5 Complete prototype

Figure 5.9 shows an image of the complete prototype probe. The plastic frame was 3D printed. In this first lab prototype, we chose to close the frame in a full-circle, in order to stiffen the

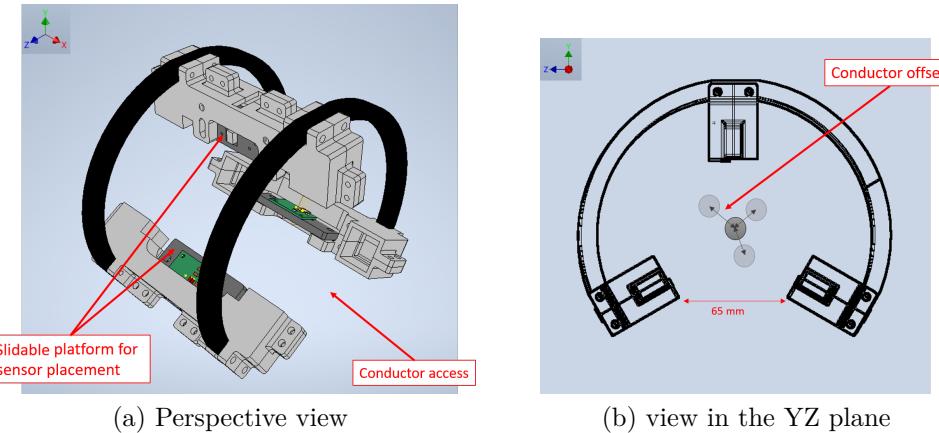


Figure 5.7 3D model of the probe frame, showing the conductor access space, the slidable sensor platforms and a schematic of the conductor offset with respect to the central axis of the probe



Figure 5.8 Probe pole fabrication with soft steel laminations

plastic structure and ease its manipulation. The samples could simply be inserted in the probe for testing. This has no effect on the magnetic characteristics of the probe.

An encoder pulley system was added to the prototype to measure the position of the steel core sample during testing. The fluxgate sensors were mounted on circuit boards with the necessary electronic components, and then positioned near the zero magnetic field point with the help of the sliding platforms.

5.3 Experimental tests

5.3.1 Testing samples

Steel rods for probe calibration

The first step of the experimental part aimed at calibrating the probe signals using steel rods with a relative permeability similar to that of the steel used in ACSR conductors. Several steel rods with radius of 1 mm, 1.5 mm and 2 mm were used to create samples with effective radius ranging between 1 mm to 6.63 mm (see Figure 5.10). Then, the relationship between the effective radius and the signal of the probe could be established. The effective radius is defined as $r_{eff} = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$ where A is the sum of the cross-sections of the individual steel rods.

Samples for LMA and LF measurements

After the calibration step, another set of samples were prepared in order to determine the capabilities of the probe, in particular their sensitivity to perform LMA and LF measurements

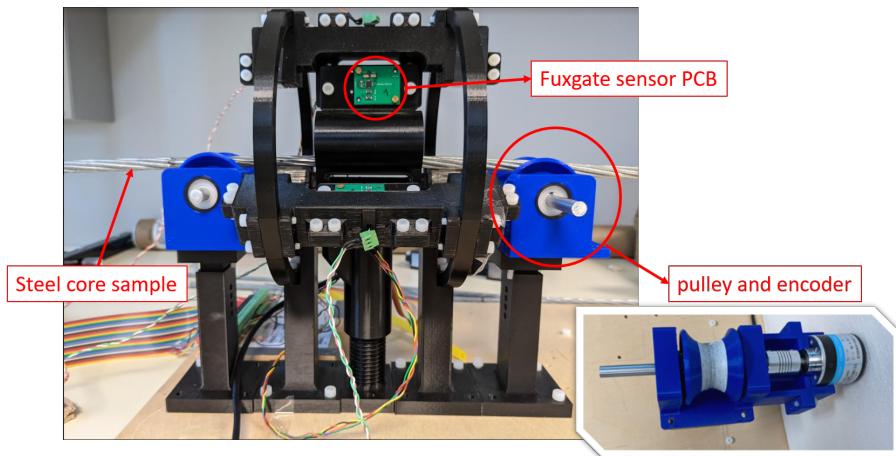


Figure 5.9 Complete probe prototype

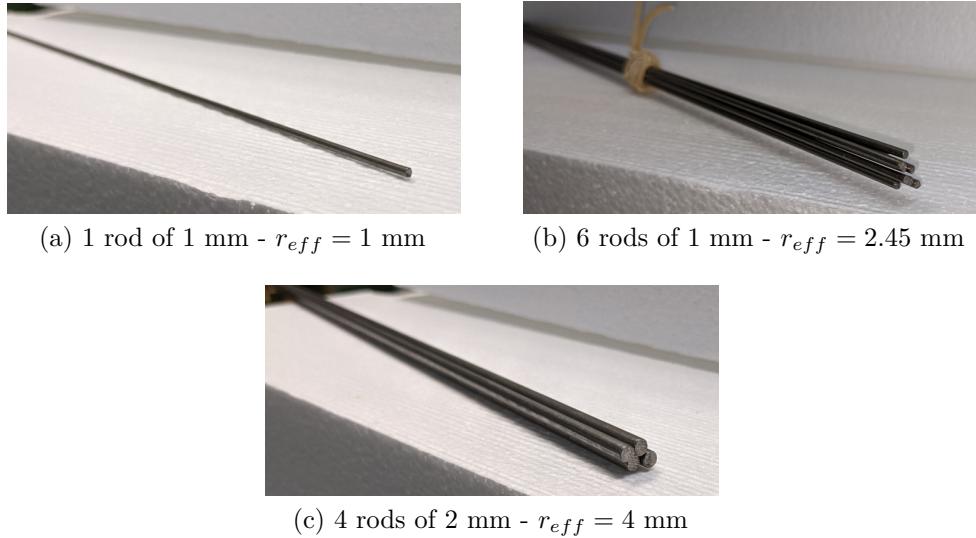


Figure 5.10 Example of healthy steel rod samples bundled to change the effective radius

Table 5.1 List of LMA and LF samples used for testing the new magnetic probe

Sample	ACSR type	Steel core	Effective radius	Defects
1	Curlew	7 rods of 1.75 mm	4.63 mm	healthy
2	Curlew	7 rods of 1.75 mm	4.63 mm	2 LF : out(1 mm) - inn(1 mm)
3	Lark	7 rods of 1.46 mm	3.86 mm	LMA : 14.1%
4	Lark	7 rods of 1.46 mm	3.86 mm	2 LF : out(1 mm) - out(<0.5 m)
5	Partridge	7 rods of 1 mm	2.65 mm	LMA : 10.2%
6	Partridge	7 rods of 1 mm	2.65 mm	LF : out (2 mm)

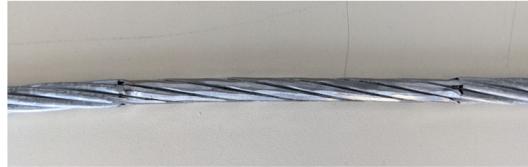


Figure 5.11 Artificial LMA defect on an ACSR steel core - sample 3 (Lark)

on real ACSR steel cores. In order to prepare these samples, different types of healthy ACSR conductors were selected, from which the outer aluminum layer was removed and only the steel cores were kept. Then, artificial defects were created in laboratory to emulate corrosion and localized defects. All the samples had the same length $L \simeq 610$ mm (24 inches). Table 5.1 lists the samples that have been tested. This list covers a large portion of the different ACSRs found on site, with respect to the steel effective radius.

For LMA defects, we ground the steel cross-section over a length of 15 cm in the middle of the sample. (see Figure 5.11). Then the weight of the sample was measured before and after the defect creation to determine the percentage of steel lost. For example, for sample number 3 (Lark), the initial mass of the 15 cm section was 55.2 g. This mass has been reduced by 7.8 g after creating the defect. The percentage of lost steel was therefore $7.8/55.2 = 14.1\%$.

For LF defects, we emulated them by breaking one or more strands in the test sample. To do so, we extracted a strand from the core, we cut it in half, and we re-inserted it in the core. Table 5.1 indicates which strand was broken in each of the LF samples. If it was an outer strand, it is indicated as "out", and if it as an inner strand, it is indicated as "inn". The width of the defect could be easily adjusted by moving the two halves of the strand apart to create a bigger gap (see Figure 5.12). This width is also mentioned in table 5.1 in the details column.

Splice samples

Splices are used to attach two segments of conductors to form a continuous line. The splicing technique provides the mechanical strength of the junction by removing the aluminum layers at the ends of the two segments and by replacing it with an inner steel sleeve. This sleeve is crimped around the bare steel cores at the end of the two segments. Then, the entire junction is wrapped in an outer aluminum sleeve, which completes the junction by ensuring the electrical continuity of the aluminum conductor from one segment to the other. Figure 5.13 shows a diagram of the splice. There are 4 different parts: the steel core of the conductor, the steel sleeve, the aluminum of the conductor and the aluminum sleeve.

The splices can be subject to severe defects due to corrosion of the joint's steel⁴. Figure 5.14 shows a typical defect observed in splices as seen on an X-Ray image. An entire portion of the steel core is corroded at the joint, creating a discontinuity in the steel core of the

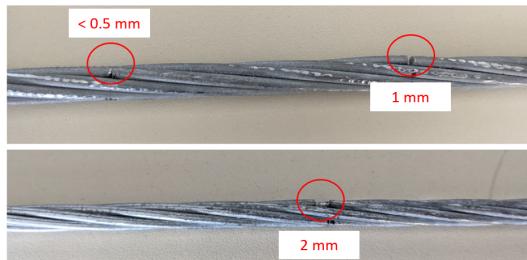


Figure 5.12 Artificial LF defects on an ACSR steel core - samples 4 and 6 (Lark - Partridge)

4. The weakest part of a transmission line is the splice joint. In many cases, the crimped joint causes the outer aluminum layer to disconnect and rainwater can enter the joint. Although grease is applied to seal the inside of the joint, it degrades over time.

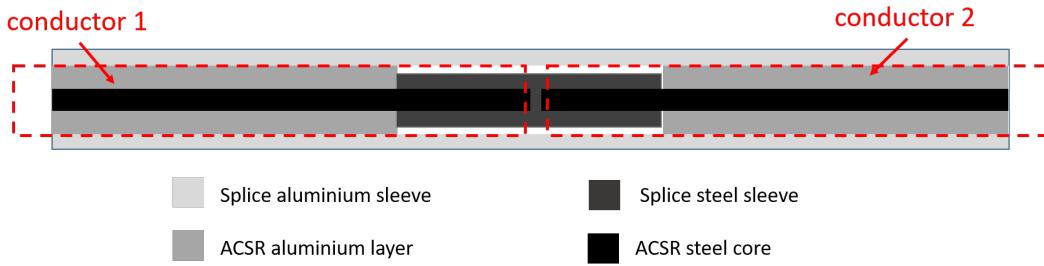


Figure 5.13 Diagram of the connecting splice of two ACSR conductors

conductor. The width of the defect can vary from a few millimeters to several centimeters. These corrosion defects are significant and theoretically easy to detect with magnetic sensors, but the splices themselves are much larger in diameter than the conductors, and are therefore impossible to insert into the majority of today's existing probes. In addition, splices contain a bigger amount of steel, which presents a risk of saturating the sensor. This is particularly relevant for the new probe design because we chose a low magnetic field range sensor.

Our prototype probe has a large enough aperture to inspect the splices. However, in order to ensure that it is capable of detecting corrosion defects in the steel sleeve without saturating the sensors, an experimental sample was prepared in laboratory (see Figure 5.15). The sample consisted of two half-inch diameter rods (1 and 2 in Figure 5.15a) inserted into a one-inch diameter hollow cylindrical rod (3 in Figure 5.15a). An artificial defect of varying width can be formed by sliding the first rod as shown in Figure 5.15b. A 3D printed plastic piece was used at the junction to hold the rods together and maintain a fixed defect width while scanning the sample with the probe.

5.3.2 Measurement procedure and data acquisition

Three experiments were performed with the different samples mentioned above.

- **Conductor scanning:** This is the standard method of line inspection in practice. The probe was moved along the conductor and the changes in the sensor signal were observed to detect defects. However, in the laboratory, for practical reasons, the probe remains stationary, and the sample was moved inside the probe. For these tests, the

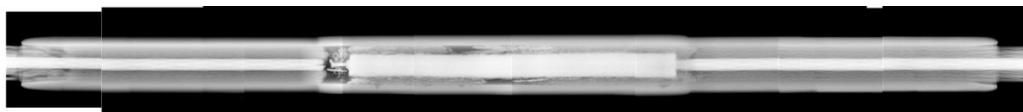


Figure 5.14 X-ray imaging of a corroded ACSR splice in an overhead power line

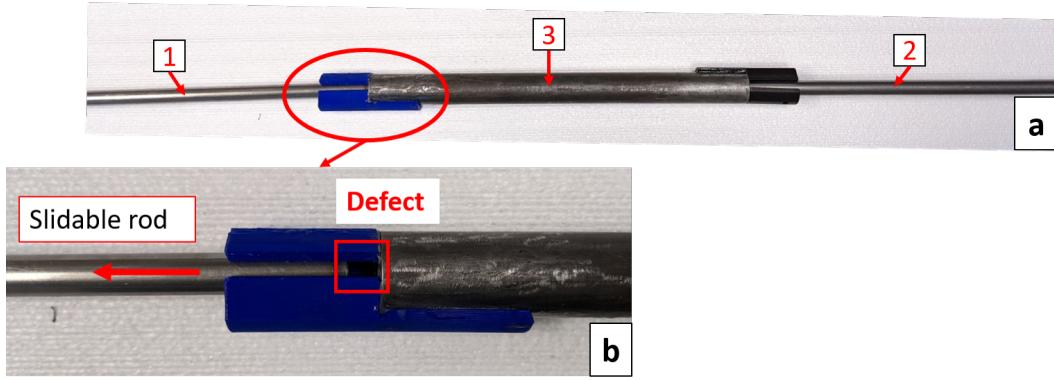


Figure 5.15 Experimental sample of the steel sleeve of an ACSR connecting splice

In the figure, 1 and 2 are half-inch rods, and 3 is a hollow one-inch rod with a half-inch inside diameter

sample was passed a first time into the probe over its whole length to ensure uniform magnetic retention along the strands. Then, the measurement was performed during the removal of the conductor⁵. This experiment was performed on the LMA and LF samples as well as on the splice sample.

- **Conductor radius:** This test was performed on the samples made of several steel rods. These samples were also passed entirely into the probe to ensure uniform magnetic retention. Then, they were centered and a measurement was taken.
- **Conductor offset (performance of the 3-pole compensation):** This test was performed with a single healthy sample. It was intended to determine the effectiveness of the offset compensation by comparing the output signal variation with and without compensation. In order to do this, the sample was placed in the center of the probe and then moved radially by 1 cm in several directions. The signal from each sensor was recorded during this operation, and the maximum change in signal amplitude was calculated to obtain the "without compensation" value (see Figure 5.19). The three sensors signals were then averaged, and the maximum change was calculated again to obtain the "with compensation" value. The same operation was repeated with a displacement of 2, 3 and 4 cm with respect to the central axis of the probe.

All data were collected using an NI acquisition card and the Labview software. Three analog voltage signals from the three fluxgate sensors were acquired, then the three signals were averaged to give the final output of the probe. Besides, the reading was done at a sampling

5. In an actual on site inspection, this usually translates into a full back-and-forth travel on the span of interest.

rate of 5 kHz, with a mean sampling on 10 consecutive points (to reduce the noise level), which resulted in 500 measurement points per second. This acquisition rate is deemed to be adequate, as transmission line inspection robots have linear velocities in the range of 0.5 to 1 m/s, resulting in a distance of 1 to 2 mm between measurements.

5.4 Results and Discussion

5.4.1 Probe sensitivity

Measurements made on the steel rod samples of Figure 5.10 showed that the probe response is indeed sensitive to the size of the sample under test (see Figure 5.16). The larger the steel core, the weaker the measured field. The graph further reveals that the relationship between the effective radius of the steel sample and the signal measured by the sensor is linear, with a sensitivity of $a = -436 \mu\text{T}/\text{mm}$. The linearity of this relationship is not intuitively obvious, but it was expected following finite element simulations. It is a very useful feature to quantify the size of LMA defects.

The first point of the curve (approx. $1999 \mu\text{T}$ at $r_{\text{eff}} = 0$) is not considered in the linear regression and corresponds to the response of the empty probe. In fact, when no sample is tested, we deliberately place each sensor just below its pole's zero magnetic field point, where they measure a field of about 2 mT. The sensors are very close to saturation, but as soon as a sample is inspected, the measured field strength decreases. It is thus possible to take advantage of the full range of the sensor (from 2 mT to -2 mT). Therefore, by extrapolation, it would be possible to inspect samples up to about 10 mm of effective radius without saturating the fluxgate sensors. The linearity of this extrapolation (illustrated by the dotted line in Figure 5.16) was not verified experimentally, but it was valid in the finite element simulation.

5.4.2 Quantitative detection of LMA and broken wire detection

Figure 5.17 shows the scan results of the LMA and LF samples in Table 5.1. The starting position (at 0 mm) is on the encoder pulley outside the probe. At the beginning, the probe is empty, but the samples are very close to the poles, hence the signal value is slightly below $2000 \mu\text{T}$. Then, the first 200 mm of the graph shows the sample entering in the probe. After 200 mm, we can see that the output value never stabilizes on a straight horizontal line, even for the healthy Curlew sample (blue line in Figure 5.17). This is due to the end effect of the short sample (about 60 cm long). It would not normally occur in an inspection of long conductors, i.e. conductors of several meters in length.

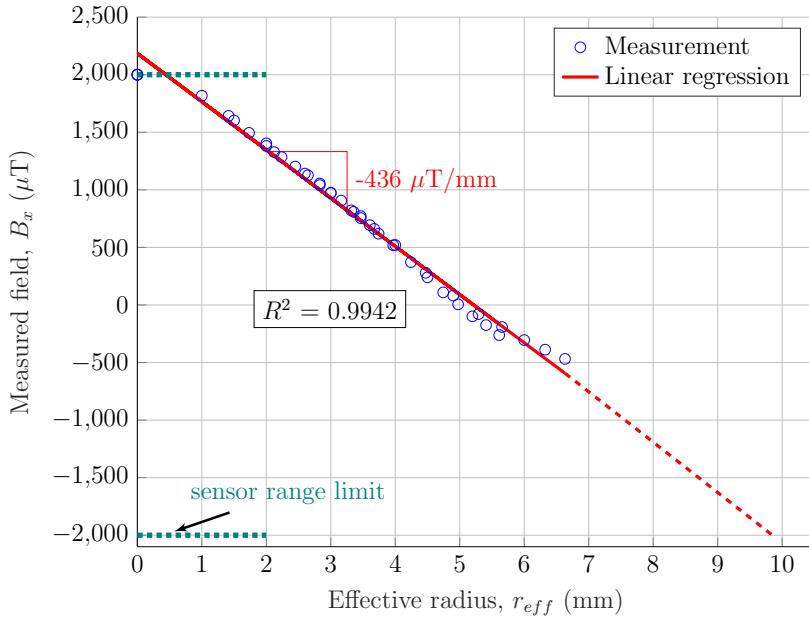


Figure 5.16 Amplitude of the output signal for steel rod samples of different effective radius

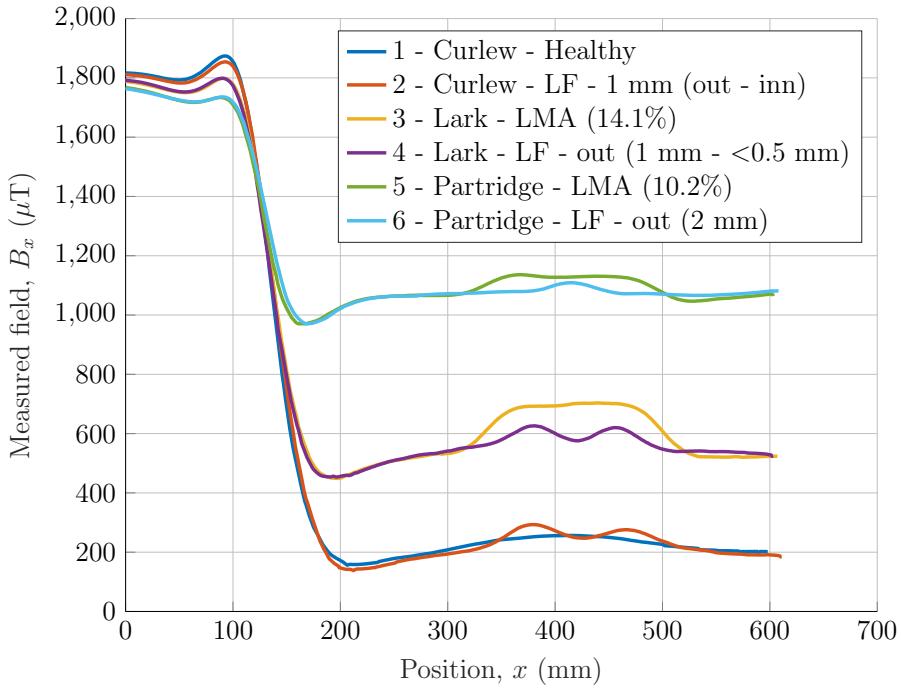


Figure 5.17 Probe scans of different ACSR steel core samples (Table 5.1)

To analyze the measurement results more closely, we zoomed Figure 5.17 results for samples 5 and 6 (Figure 5.18a) and for samples 2 and 4 (Figure 5.18b). It is worth mentioning that the

data shown in these plots are the true outputs of the probes. No post-processing algorithm has been applied, except the averaging over 10 consecutive data points as already mentioned. It is not possible to see the noise level on the measurement because the signal to noise ratio is impressively high ($\text{SNR} \simeq 60 \text{ dB}$). All LMA and LF defects of the different samples could be easily detected. On the plot of sample 5 (LMA defect on a Partridge conductor), we can even see a magnetic leakage peak on the corners of the signal rise (at positions 370 mm and 520 mm) due to the abrupt change of the steel section at the beginning and end of the LMA defect.

It is also possible to quantify the LMA using the sensitivity slope of Figure 5.16 ($a = -436 \mu\text{T}/\text{mm}$). For example, for sample 5, the following calculations give the percentage of section lost p .

The radius R_f of the damaged region is:

$$R_f = R_i + \Delta R = R_i + \frac{\Delta B_x}{a} = 2.65 + \frac{64}{-436} = 2.504 \text{ mm},$$

where $\Delta B_x = 64 \mu\text{T}$ is the LMA signal variation in Figure 5.18a. Then, by naming S_f the section of the damaged region and S_i the section of the healthy region, we find

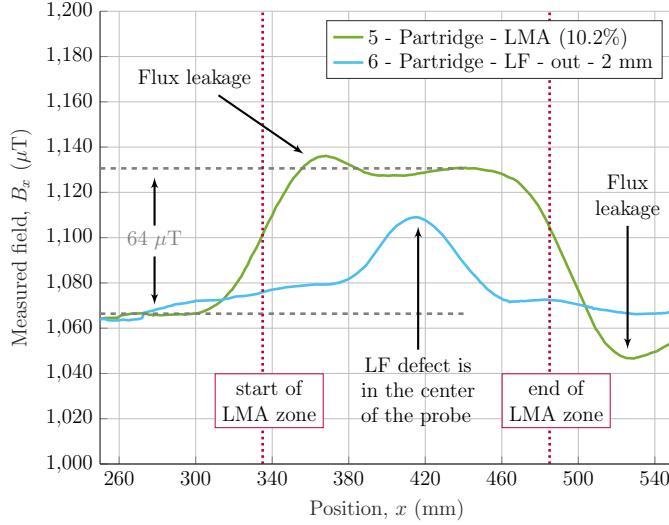
$$p = \frac{S_i - S_f}{S_i} = \frac{\pi R_i^2 - \pi R_f^2}{\pi R_i^2} = 10.7\%$$

This value is very close to the value measured and reported in table 5.1 (10.2%).

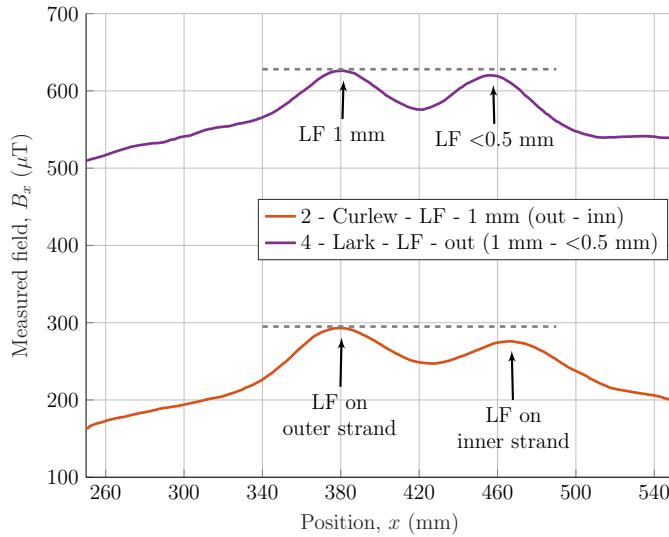
Figure 5.18b shows the magnetic leakage signal from the LF defects in samples 2 and 4. For each defect, a peak is observed when the defect reaches the middle of the probe under the sensors. We notice that defects in the outer strand have a higher peak signal than defects in the inner strand, and also that smaller width defects have a very slightly lower peak signal.

5.4.3 Offset compensation

Figure 5.19 demonstrates that the compensation by symmetry of the radial displacements (offset) of the steel sample with respect to the central axis of the probe is extremely effective for an offset of less than 2 cm. The amplitude variation of an LF and an LMA defect is given as a reference. It is clear that without compensation, the probe would be very vulnerable to the slightest disturbance due to conductor vibration or radial movement. It would then be practically impossible to measure small defects. Furthermore, an offset greater than 2 cm is very unlikely in reality. Disturbances are generally limited to displacements of a few millimeters.



(a) Zoom on measurements on sample 5 and 6



(b) Zoom on sample 2 and 4

Figure 5.18 Probe scans of different ACSR steel core samples (zoomed). Pictures of sample 4 and 6 are shown in Figure 5.12

5.4.4 Corrosion of connecting splices

We varied the width of the defect in the splice sample and we scanned the sample for each width. Figure 5.20 shows the relevant portion of the scan results. The beginning of the curve corresponds to the one-inch rod, and the end of the curve corresponds to the half-inch rod. It can be seen that even for a defect of very small width, the detection is obvious. The more important detail to notice here is that the sensors were not saturated during the scan because they did not exceed their saturation value of $-2000 \mu\text{T}$.

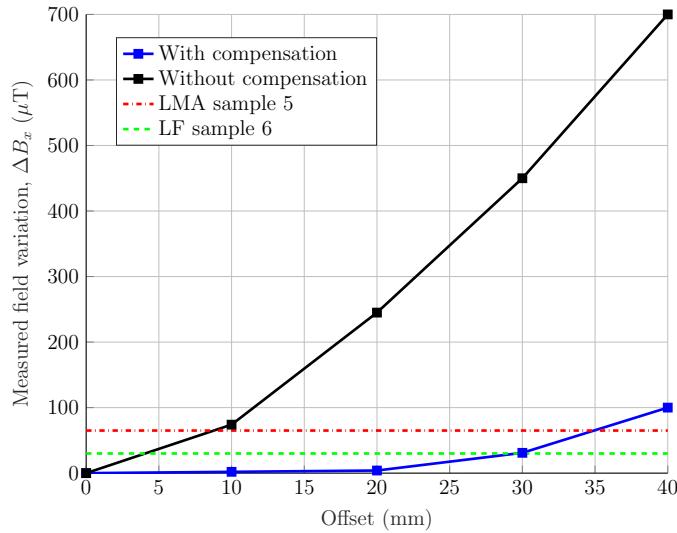


Figure 5.19 Effectiveness of offset compensation of the conductor radial deviation from the central axis of the probe

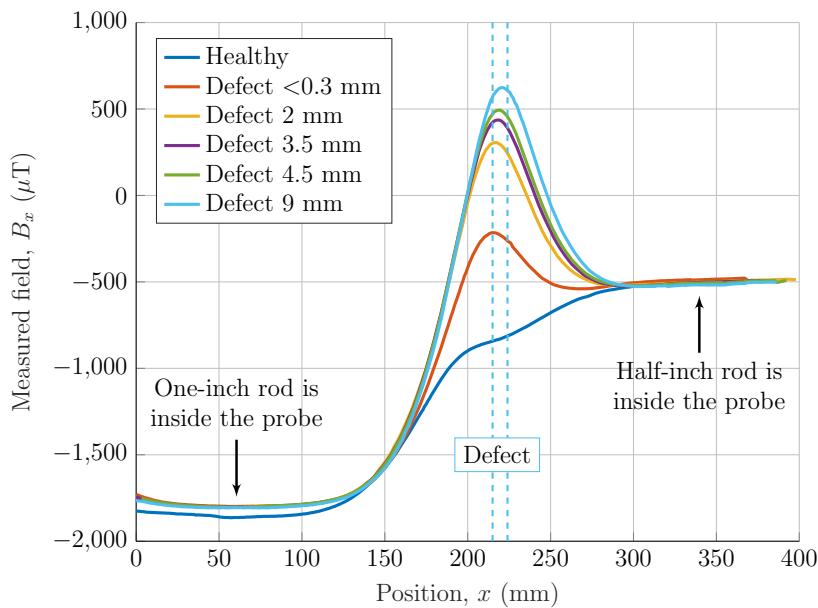


Figure 5.20 Probe scans of the splice sample (Figure 5.15b) with different defect widths

5.5 Conclusion

We have developed a new lightweight magnetic probe with a fluxgate sensor to detect localized defects and corrosion in the steel core and splices of overhead power line conductors. One of the remarkable features of the probe is the creation of a zero magnetic field point that allows the use of an ultra-sensitive low-range magnetic sensor and enables measurements without the

influence of the strong background magnetic field of the excitation magnets. This novel design allowed for highly accurate detection even under unsaturated magnetic excitation. Moreover, with its low weight ($\simeq 1.5$ kg –without on board equipment) and convenient open design, the probe is perfect for deployment by drone to speed up line inspections.

The experimental results show that, even with its large aperture (90 mm diameter), the probe can detect very small magnetic leaks (less than $30 \mu\text{T}$) produced by broken strands with an impressively low noise level. The output signal of the probe is also linear relative to the effective radius of the steel core (with a sensitivity of $-436 \mu\text{T}/\text{mm}$), which makes it very effective for steel section loss quantification. In addition, the probe symmetrical design is very robust to disturbances, as it reliably compensates for conductor's offset and displacement inside the probe (up to 2 cm in all radial directions). We have also conducted the first tests to detect corrosion in junction splices, and we have successfully proved that it is possible to inspect them without saturating the fluxgate sensors.

In the near future, we plan to further develop the prototype probe and make it more suitable for field inspection. The next step is to build an on-board power and communication system in order to perform drone testing on high voltage lines. Other complementary work on the probe signal processing was also explored, including analysis and cross-checking of information from the three sensors to discriminate and filter out external magnetic fields that can interfere with the inspection, namely the earth magnetic field. Nevertheless, we believe that the main strengths of this probe are its lightness and its innovative design, which provides highly accurate raw data, thereby improving the quality and speed of power line inspection.

Acknowledgement

The authors thank the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for the funding of this project.

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

L’inspection non destructive des conducteurs électriques dans les lignes à haute tension est une tâche essentielle pour assurer la fiabilité du réseau. Or, la revue de littérature présentée dans le chapitre 2 a montré que les sondes magnétiques utilisées aujourd’hui pour l’inspection de l’âme d’acier des conducteurs sont lourdes, ne sont pas assez précises et nécessitent une intervention du personnel pour être placées sur les lignes. Le travail de cette maîtrise consistait donc à concevoir et tester un nouveau prototype de sonde magnétique, spécifiquement créé pour effectuer cette inspection de façon automatique et rapide en étant transporté par drone.

La simulation numérique détaillée au chapitre 3 a permis de comprendre le fonctionnement de la sonde magnétique, d’explorer différentes formes géométriques et d’optimiser le poids de la sonde à trois pôles. Toutefois, pour des modélisations plus proches de la réalité, la simulation touchait à ses limites. Il était donc nécessaire de passer à un prototype de sonde expérimental pour valider les différents résultats numériques et tester des échantillons de conducteurs ACSR en laboratoire.

Avant de fabriquer le prototype, il fallait choisir un capteur magnétique sensible et adapté pour la sonde. Pour cela, une comparaison expérimentale de plusieurs capteurs a été réalisée et présentée au chapitre 4. Un capteur fluxgate a été choisi pour sa bonne précision et son faible niveau de bruit comparé aux autres capteurs disponibles sur le marché.

Enfin, un prototype de sonde a été fabriqué et testé au laboratoire. Les détails de conception, méthodes de fabrication et les tests expérimentaux de ce prototype ont fait l’objet d’un article soumis au journal NDT & E International. Cet article est présenté au chapitre 5. Les résultats expérimentaux détaillés dans l’article ont confirmé que le prototype est capable de détecter la présence de brins brisés, de quantifier avec précision les pertes métalliques et d’inspecter les manchons de raccordement des conducteurs.

Le chapitre 7 de conclusion explique les limitations de cette nouvelle sonde, et propose des améliorations futures visant à rapprocher le prototype d’un modèle commercialisable.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

7.1 Synthèse des travaux

Une sonde magnétique sensible, légère et capable d'inspecter l'âme d'acier des conducteurs des lignes à haute tension a été conçue et testée au laboratoire. Cette sonde servira à réaliser un dispositif automatisé d'inspection des lignes électriques par drone. Dans ce mémoire, la méthode de conception de cette sonde a été présentée en trois étapes. D'abord, une simulation numérique par éléments finis a été réalisée pour comprendre les principes de fonctionnement de la magnétoscopie, pour explorer différentes géométries de sondes magnétiques, puis pour optimiser la taille et la configuration de la géométrie choisie afin de minimiser le poids de la sonde et d'améliorer sa sensibilité. Sur la base de cette simulation, une géométrie particulière de sonde à trois pôles a été sélectionnée comme étant la plus adaptée à l'inspection par drone, avec un poids inférieur à 1.5 kg et un grand diamètre de 90 mm. Cette sonde à trois pôles a une conception ouverte permettant l'insertion du conducteur en son intérieur sans mécanisme de verrouillage. Elle permet également de compenser le décentrement du conducteur grâce à sa symétrie cylindrique, ce qui améliore considérablement la stabilité des mesures.

Ensuite, dans un deuxième temps, une comparaison expérimentale de capteurs magnétiques disponibles sur le marché a été réalisée dans l'objectif de choisir le capteur le plus sensible et le plus adapté à la sonde. Parmi les différents capteurs comparés, un capteur de type fluxgate s'est avéré être le candidat idéal, avec une résolution de l'ordre de $1 \mu\text{T}$ et un niveau de bruit 5 fois plus faible qu'un capteur à effet Hall. Cependant, ce capteur fluxgate possède une petite plage de mesure de $\pm 2 \text{ mT}$. La création d'un point zéro magnétique dans la sonde a permis de l'utiliser et d'éviter qu'il soit saturé par le champ ambiant des aimants.

Enfin, en exploitant les résultats de la simulation et de la comparaison des capteurs, un prototype a été fabriqué pour vérifier expérimentalement que la sonde est capable d'inspecter les conducteurs et détecter les défauts dans leur âme d'acier. En testant le prototype de sonde avec différents échantillons de conducteurs endommagés artificiellement au laboratoire, il a été possible de valider ses performances. En effet, les résultats expérimentaux démontrent que le prototype fabriqué permet de mesurer le rayon effectif de l'âme d'acier des conducteurs avec une sensibilité de $-436 \mu\text{T/mm}$. Il est ainsi capable de déterminer avec précision la section d'acier perdue dans un conducteur corrodé. Il est également capable de détecter les petites fuites magnétiques de moins de $30 \mu\text{T}$ causées par les brins brisés dans des âmes d'acier de 7 brins.

7.2 Limitations de la solution proposée

La sonde actuelle, malgré sa très bonne sensibilité, fonctionne dans un régime non saturé, c'est-à-dire que l'âme d'acier inspecté n'est pas excitée magnétiquement jusqu'à saturation. Cela permet d'obtenir une sonde légère portable par drone, mais présente en contrepartie une limite importante. En effet, il est difficile de détecter les brins brisés sur les conducteurs ayant une grande âme d'acier de 19 brins (répartis en 3 couches). L'excitation magnétique dans ce cas est insuffisante pour avoir une fuite magnétique mesurable. Le flux magnétique contourne le défaut en passant par les brins sains. Mais avec un diamètre de sonde plus petit (65 mm), l'excitation magnétique était plus forte et il était possible de détecter ces brins brisés. Ceci dit, les conducteurs les plus répandus sur les lignes à haute tension sont des conducteurs avec une âme d'acier de 7 brins.

Au-delà de cette limite expérimentale, le travail théorique réalisé durant ce projet gagnerait à être approfondi. Par exemple, la réponse de la sonde à l'hystérésis magnétique est mal caractérisée. Les mesures ne sont répétables que si l'échantillon testé est aimanté uniformément au moment de l'inspection. Dans la sonde actuelle, cela est réalisé par un premier passage du conducteur dans la sonde qui assure une rétention magnétique uniforme dans l'acier, avant de relever les mesures dans un second passage. Par ailleurs, la linéarité de la sonde en fonction du rayon effectif de l'âme d'acier est un résultat intéressant qu'il faudrait aussi expliquer, afin de comprendre ses limites. En plus, certaines différences entre les résultats de la simulation numérique et les résultats du prototype ne sont toujours pas résolues. Par exemple, la pente de la droite de calibration de la réponse de la sonde en fonction du rayon effectif est de $-436 \mu\text{T}/\text{mm}$ pour le prototype contre $-250 \mu\text{T}/\text{mm}$ en simulation.

7.3 Améliorations futures

La sonde magnétique développé dans le cadre de ce projet s'est avéré être une innovation importante dans le domaine du contrôle non destructif des lignes à haute tension. Elle est en cours de brevetage et fait l'objet d'un article soumis au journal NDT & E International. Cependant, le travail peut être amélioré dans les directions suivantes :

1. Développer un modèle analytique de la sonde par un circuit équivalent de réluctances. Ce modèle peut aider à comprendre les limites théoriques exposées dans la dernière section.
2. Ajouter un capteur magnétique à l'extérieur de la sonde pour mesurer puis filtrer le champ terrestre. Le champ terrestre peut en fait influencer la mesure si la sonde change d'orientation durant l'inspection.

3. Tester le prototype au laboratoire avec des conducteurs plus long de plusieurs mètres et sous haute tension.
4. Évaluer l'impact des champs magnétiques générés par des forts courant dans les conducteurs inspectés sur la mesure des capteurs fluxgate.
5. Développer un système d'alimentation et de communication embarqué et adapter le cadre du prototype afin d'effectuer des tests par drone sur le terrain.
6. Mettre au point une interface utilisateur et des algorithmes d'interprétation automatique des signaux des capteurs pour déterminer la nature des défauts détectés et quantifier la section d'acier perdue.

RÉFÉRENCES

- [1] Hydro-Quebec, “Underground Distribution,” févr. 2022. [En ligne]. Disponible : <http://www.hydroquebec.com/learning/distribution/voie-souterraine.html>
- [2] G. Orawski, “Overhead Lines,” dans *Electrical Engineer’s Reference Book*, 16^e éd. Elsevier, sept. 2002. [En ligne]. Disponible : <https://fdocuments.in/document/gorawski-overhead-lines.html?page=1>
- [3] Hydro-Quebec, “Power Transmission in Québec,” févr. 2022. [En ligne]. Disponible : <http://www.hydroquebec.com/learning/transport/grandes-distances.html>
- [4] Hydro-Quebec, “Transport d’électricité,” févr. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.hydroquebec.com/transenergie/fr/>
- [5] M. Joanny-Furtin, “Remplacement des lignes à haute-tension Bécancour / Trois-Rivières,” *Magazine Consta*s, vol. 54, mars 2021.
- [6] G. Chen, X. Wang, J. Wang, J. Liu, T. Zhang et W. Tang, “Damage investigation of the aged aluminium cable steel reinforced (ACSR) conductors in a high-voltage transmission line,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 19, p. 13–21, janv. 2012. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630711002160>
- [7] K. Toussaint, N. Pouliot et S. Montambault, “Transmission line maintenance robots capable of crossing obstacles : State-of-the-art review and challenges ahead,” *Journal of Field Robotics*, vol. 26, n°. 5, p. 477–499, mai 2009. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20295>
- [8] Southwire, “ACSR,” sept. 2020. [En ligne]. Disponible : <https://overheadtransmission.southwire.com/product/acsr/>
- [9] R. Inc., “Rotesco Inc.” févr. 2022. [En ligne]. Disponible : http://www.companylisting.ca/Rotesco_Inc/default.aspx
- [10] Intron, “Steel wire rope flaw detector INTROS,” févr. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.intron.ru/en/equipment/intros/>
- [11] H. . Sherwood, “NDT WIRE ROPE TESTER - MAGNOGRAPH®,” févr. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://heathandsherwood64.com/products/wire-rope-tester>
- [12] G. Rousseau, “Essais des sondes magnétoscopiques et du LineCore sur des câbles d’acier et des conducteurs provenant du projet Bout de l’Île,” IREQ, Rapport d’expertise, 2019.

- [13] preformed.com, “Épissure de compression PLP pour conducteurs ACSR et ACSS,” 2019. [En ligne]. Disponible : https://www.youtube.com/watch?v=AR0-SHyEYD4&ab_channel=PLP
- [14] G. Rousseau, “Revue de la théorie du LineCore et des applications,” IREQ, Rapport technique, 2018.
- [15] M. Cables, “Conductor Data Sheet, Aluminium Conductors Steel Reinforced (ACSR).” [En ligne]. Disponible : <https://www.midalcable.com/sites/default/files/ACSR-metric.PDF>
- [16] ASTM, “B498- Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Core Wire for Use in Overhead Electrical Conductors,” 2020.
- [17] ASTM, “B500 - Standard Specification for Metallic Coated or Aluminum Clad Stranded Steel Core for Use in Overhead Electrical Conductors,” 2018.
- [18] E. W. Greenfield et E. W. Everhart, “A Field Study of ACSR Cable in Severe Marine and Industrial Environment,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III : Power Apparatus and Systems*, vol. 76, n°. 3, p. 106–117, avr. 1957. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4499512/>
- [19] C. Gary, “Effet couronne sur les réseaux électriques aériens,” *Réseaux électriques et applications*, févr. 1998. [En ligne]. Disponible : <https://www.techniques-ingenieur.fr/doi/10.51257/a/v1/d4440>
- [20] H. R. Weischedel, “The Inspection of Wire Ropes in Service : A Critical Review,” *Materials Evaluation*, vol. 43, n°. 13, p. 1592–1605, 1985.
- [21] O. Guntner, L. Schmidt, L. Varga, S. Simon et J. Szabo, “Corrosion detector for assessing the remaining life of old steel reinforced aluminium conductors,” dans *PowerTech Budapest 99. Abstract Records. (Cat. No.99EX376)*. Budapest, Hungary : IEEE, 1999, p. 102. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/826533/>
- [22] A. V. Pinto, M. Z. Sebrao, C. R. S. H. Lourenco, I. S. de Almeida, J. Saad et P. M. Lourenco, “Remote detection of internal corrosion in conductor cables of power transmission lines,” dans *2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI 2010)*. Montreal, QC, Canada : IEEE, oct. 2010, p. 1–6. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5624453/>
- [23] J. Blitz, *Electrical and magnetic methods of nondestructive testing*, 2020, oCLC : 1230519101. [En ligne]. Disponible : <https://www.taylorfrancis.com/books/9781003062905>
- [24] J. Yuan, Y. X. Liu et S. H. Shao, “Coal Transport Tape Control System Based on Machine Vision,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 419, p. 745–750, oct. 2013. [En ligne]. Disponible : <https://www.scientific.net/AMM.419.745>

- [25] C. Schaal, S. Bischoff et L. Gaul, "Damage detection in multi-wire cables using guided ultrasonic waves," *Structural Health Monitoring*, vol. 15, n°. 3, p. 279–288, mai 2016. [En ligne]. Disponible : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1475921716642747>
- [26] M. Komoda, T. Kawashima, M. Minemura, A. Mineyama, M. Aihara, Y. Ebinuma, T. Kanno et M. Kiuchi, "Electromagnetic induction method for detecting and locating flaws on overhead transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, n°. 3, p. 1484–1490, juill. 1990. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/57992/>
- [27] P.-C. Peng et C.-Y. Wang, "Use of gamma rays in the inspection of steel wire ropes in suspension bridges," *NDT & E International*, vol. 75, p. 80–86, oct. 2015. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869515000766>
- [28] J. Bellemare, G. Rousseau, D. Valiquette, F. Sirois et N. Pouliot, "Reporting on the Last 6 years of Field Inspections Using LineCore for the NonDestructive Evaluation of Overhead Conductors," vol. 436, Canada, oct. 2021. [En ligne]. Disponible : <https://cigreconference.com/papers/2021/paper%20436.pdf>
- [29] S. Huang et S. Wang, *New Technologies in Electromagnetic Non-destructive Testing*, ser. Springer Series in Measurement Science and Technology. Singapore : Springer Singapore, 2016. [En ligne]. Disponible : <http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-0578-7>
- [30] B. A. Auld et J. C. Moulder, "Review of Advances in Quantitative Eddy Current Nondestructive Evaluation," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 18, n°. 1, p. 3–36, 1999. [En ligne]. Disponible : <http://link.springer.com/10.1023/A:1021898520626>
- [31] G. Y. Tian et A. Sophian, "Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors," *NDT & E International*, vol. 38, n°. 1, p. 77–82, janv. 2005. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869504000830>
- [32] J. Tian, J. Zhou, H. Wang et G. Meng, "Literature Review of Research on the Technology of Wire Rope Nondestructive Inspection in China and Abroad," *MATEC Web of Conferences*, vol. 22, p. 03025, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://www.matec-conferences.org/10.1051/matecconf/20152203025>
- [33] J. M. D. Coey, *Magnetism and magnetic materials*, 2010, oCLC : 1165542672. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1017/CBO9780511845000>
- [34] R. P. Feynman, *The Feynman lectures on physics. Volume 2 : Mainly electromagnetism and matter*, the new millennium edition, paperback first published éd. New York : Basic Books, 2011.

- [35] S. Chikazumi, C. D. Graham et S. Chikazumi, *Physics of ferromagnetism*, 2^e éd., ser. International series of monographs on physics. Oxford ; New York : Oxford University Press, 2009, n°. 94.
- [36] W. T. Benecki, “The Permanenet Magnet Market,” Orlando, Florida, 2015. [En ligne]. Disponible : https://www.waltbenecki.com/uploads/Magnetics_2013_Benecki_Presentation.pdf
- [37] W. Comons et Geek3, “File : cylindrical magnet thumb.” [En ligne]. Disponible : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10587119>
- [38] G. Cormier, “Cours d'électrotechnique, chapitre 7. Circuits Magnétiques et Inductance.” [En ligne]. Disponible : http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/Electrotechnique/Chap7.pdf
- [39] Y. Shi, C. Zhang, R. Li, M. Cai et G. Jia, “Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection,” *Sensors*, vol. 15, n°. 12, p. 31 036–31 055, déc. 2015. [En ligne]. Disponible : <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/12/29845>
- [40] S. S. Udpa et P. O. Moore, édit., *Electromagnetic testing*, ser. Nondestructive testing handbook (3rd ed.). Columbus, Ohio : American Society for Nondestructive Testing, 2004, n°. v. 5.
- [41] V. Sukhorukov, D. Slesarev, I. Shpakov, V. Y. Volokhovsky, A. Vorontsov et A. Shalashilin, “Automated Condition Monitoring with Remaining Lifetime Assessment for Wire Ropes in Ladle Cranes,” *Materials Evaluation*, vol. 79, n°. 11, p. 1050–1060, nov. 2021. [En ligne]. Disponible : <https://ndtlibrary.asnt.org/2021/AutomatedConditionMonitoringwithRemainingLifetimeAssessmentforWireRopesinLadleCranes>
- [42] J. Zhang, X. Tan et P. Zheng, “Non-Destructive Detection of Wire Rope Discontinuities from Residual Magnetic Field Images Using the Hilbert-Huang Transform and Compressed Sensing,” *Sensors*, vol. 17, n°. 3, p. 608, mars 2017. [En ligne]. Disponible : <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/3/608>
- [43] J. Zhang et X. Tan, “Quantitative Inspection of Remanence of Broken Wire Rope Based on Compressed Sensing,” *Sensors*, vol. 16, n°. 9, p. 1366, août 2016. [En ligne]. Disponible : <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1366>
- [44] S. Sainson, *Inspection en ligne des pipelines : principes et méthodes*. Paris : Éd. Tec & doc, 2007.
- [45] T. R. Monitor, “Solution pour la technologie de détection de câbles d'acier,” févr. 2022. [En ligne]. Disponible : <http://fc.wireropetest.cc/about>
- [46] Kinetrics, “LineVue - Automated Field Inspection for Overhead Conductors,” avr. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.kinetrics.com/spotlight/Pages/LineVue-Media.aspx>

- [47] D. Zhang, E. Zhang et X. Yan, “Quantitative method for detecting internal and surface defects in wire rope,” *NDT & E International*, vol. 119, p. 102405, avr. 2021. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869521000049>
- [48] C. F. Jaimes Saavedra et S. Roa Prada, “Sensitivity Analysis of a Magnetic Circuit for Non-Destructive Testing by the Magnetic Flux Leakage Technique,” *Prospectiva*, vol. 14, n°. 2, p. 20, juin 2016. [En ligne]. Disponible : <http://ojs.uac.edu.co/index.php/prospectiva/article/view/678>
- [49] T. Instruments, “DRV5056 Unipolar Ratiometric Linear Hall Effect Sensor,” avr. 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5056.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-wwe&ts=1617300722580>
- [50] T. Instruments, “DRV5053 Analog-Bipolar Hall Effect Sensor,” avr. 2018. [En ligne]. Disponible : https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5053.pdf?ts=1654874435956&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [51] T. Instruments, “DRV425 Fluxgate Magnetic-Field Sensor,” oct. 2015. [En ligne]. Disponible : https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv425.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-wwe&ts=1652717107217&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fgeneral%252Fdocs%252Fsuppproductinfo.tsp%253FdistId%253D10%2526gotoUrl%253Dhttps%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Flit%252Fgpn%252Fdrv425
- [52] REDROCK, “RR111 SERIES TMR ANALOG MAGNETIC SENSOR,” 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.cotorelay.com/wp-content/uploads/2018/02/RedRock-111TMR-Datasheet.pdf>
- [53] REDROCK, “RR112-1G43-531/532 TMR ANALOG MAGNETIC SENSOR,” 2021. [En ligne]. Disponible : <https://cotorelay.com/wp-content/uploads/2020/10/RedRock-RR112-1G42-1G43-531-532-Datasheet.pdf>
- [54] T. Grejtak, A. Van Berkel et Y.-S. Yu, “Evolution of Energy Networks : Decarbonizing the Global Energy Trade,” 2022. [En ligne]. Disponible : luxresearchinc.com
- [55] V. V. Sukhorukov, “Steel Rope Diagnostics by Magnetic NDT : From Defect Detection to Automated Condition Monitoring,” *Materials Evaluation*, vol. 79, n°. 5, p. 438–445, mai 2021. [En ligne]. Disponible : <https://ndtlibrary.asnt.org/2021/SteelRopeDiagnosticsbyMagneticNDTFromDefectDetectiontoAutomatedConditionMonitoring>
- [56] F. Mirallès, P. Hamelin, G. Lambert, S. Lavoie, N. Pouliot, M. Montfrond et S. Montambault, “Linedrone technology : Landing an unmanned aerial vehicle on a power line,” dans *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, p. 6545–6552.

- [57] J. Zhang, P. Zheng, X. Tan et S. Lu, “Theoretical Analyses of Unsaturated Magnetic Excitation in Wire Rope,” *Materials Evaluation*, vol. 78, n°. 3, p. 387–399, mars 2020. [En ligne]. Disponible : <https://ndtlibrary.asnt.org/2020/TheoreticalAnalysesofUnsaturatedMagneticExcitationinWireRope>
- [58] M. Sekino, A. Kuwahata, T. Ookubo, M. Shiozawa, K. Ohashi, M. Kaneko, I. Saito, Y. Inoue, H. Ohsaki, H. Takei et M. Kusakabe, “Handheld magnetic probe with permanent magnet and Hall sensor for identifying sentinel lymph nodes in breast cancer patients,” *Scientific Reports*, vol. 8, n°. 1, p. 1195, déc. 2018. [En ligne]. Disponible : <http://www.nature.com/articles/s41598-018-19480-1>
- [59] P. Ripka et M. Janosek, “Advances in Magnetic Field Sensors,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, n°. 6, p. 1108–1116, juin 2010. [En ligne]. Disponible : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5443656/>

ANNEXE A MÉTHODES DE POST-TRAITEMENT DES DONNÉES DE COMPARAISON DES CAPTEURS

Transformation affine

Nous appliquons une transformation affine à la tension de sortie des capteurs, afin de changer cette tension en intensité de champ magnétique et de comparer la réponse des différents capteurs.

Soit B la densité du champ magnétique à l'intérieur des bobines. Soit V la tension de sortie du capteur. On cherche deux constantes a et b telles que $aV + b$ soit le plus proche possible de B . Ce problème peut être résolu par la méthode linéaire des moindres carrés.

Pour chaque capteur, les mesures nous fournissent un vecteur des valeurs de courant d'entrée I , et un vecteur des valeurs de tension de sortie V . Dans la section sur les bobines d'Helmholtz, nous avons relié le vecteur B au vecteur I , soit $B = \alpha I$.

Ensuite, en notant :

$$\Theta = \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & V_1 \\ 1 & V_2 \\ .. & .. \\ 1 & V_{N-1} \\ 1 & V_N \end{bmatrix},$$

on peut réécrire le problème sous forme matricielle :

$$\Theta = \operatorname{argmin} \frac{1}{2} \|B - X\Theta\|^2.$$

Fondamentalement, nous minimisons la somme des erreurs quadratiques entre notre transformation affine $aV + b$ et les valeurs théoriques du champ magnétique des bobines B . La méthode linéaire des moindres carrés possède une solution littérale. Cette solution est appelée l'équation normale, et nous pouvons l'utiliser pour calculer Θ :

$$\Theta = (X^T X)^{-1} X^T B.$$

On obtient ainsi les valeurs des paramètres a et b pour chaque capteur, et on peut appliquer notre transformation affine pour changer la tension de sortie du capteur en intensité de champ magnétique.¹

Erreur de linéarité

Une fois que les transformations affines ont été réalisées sur toutes les mesures des capteurs, il est maintenant possible de comparer leur performance, en commençant par l'expérience de linéarité décrite plus tôt. La figure A.1 montre les résultats de l'expérience de linéarité (après ajustement affine) pour des capteurs de chaque technologie. Il est difficile de dire lequel des capteurs a la réponse la plus linéaire juste à partir de cette courbe. Il faut donc trouver une métrique permettant de quantifier la linéarité des capteurs. La figure A.2 trace l'erreur des

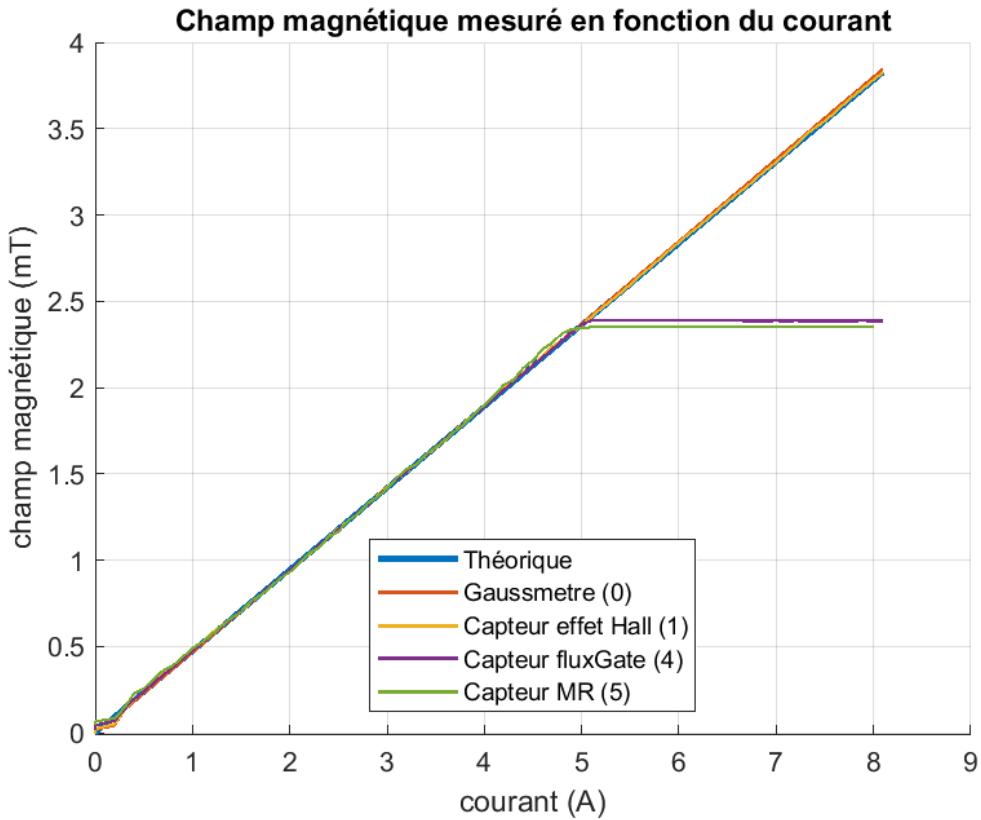


FIGURE A.1 Résultat de l'expérience de linéarité

1. Pour les capteurs avec la plus petite plage de mesure, nous observons une saturation. Il faut faire attention de ne pas inclure les points de mesure en saturation dans la résolution du problème des moindres carrées.

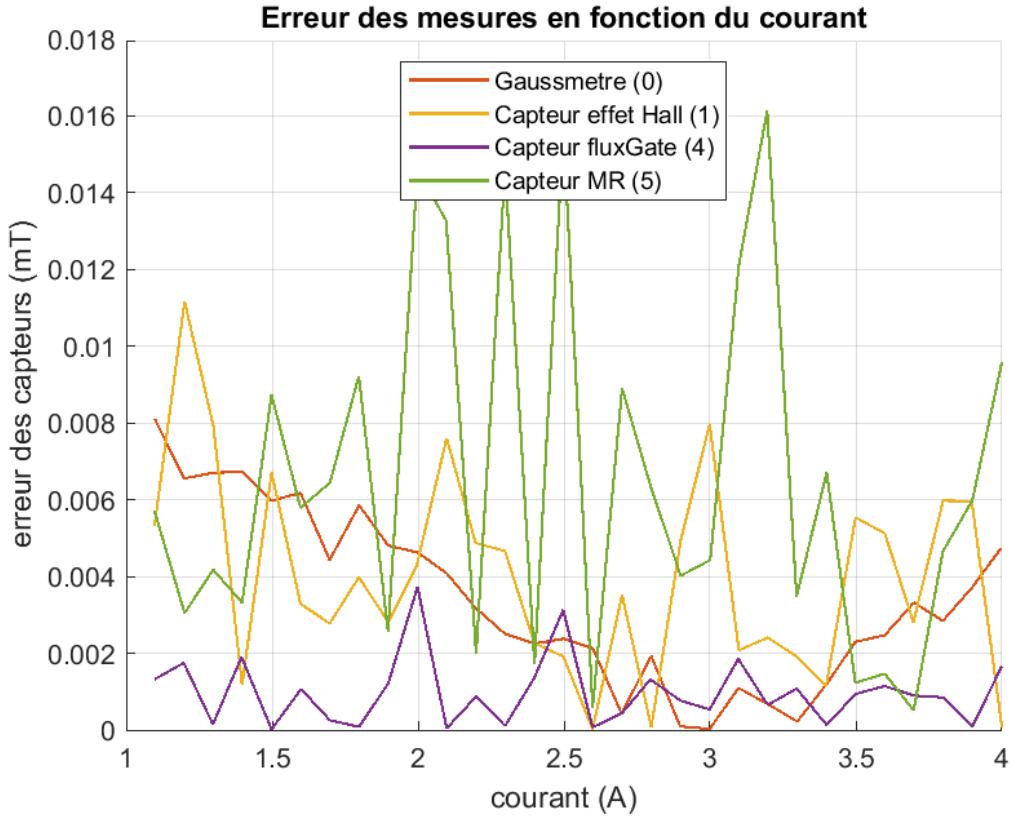


FIGURE A.2 Erreur des capteurs

capteurs par rapport à la droite linéaire théorique du champ magnétique des bobines :

$$err = |B_{capteur}(I) - \alpha I| .$$

Cette courbe ne permet pas non plus de quantifier l'erreur de linéarité, même si elle donne une meilleure idée de la performance des différents capteurs. Plusieurs métriques permettent de quantifier l'erreur linéaire :

- **coefficient de détermination linéaire R^2** : Ce coefficient est utilisé en statistiques pour mesurer la qualité d'une régression linéaire. Il permet de déterminer à quel point les points de mesures suivent une droite.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} ,$$

où les y_i sont les points de mesures, \bar{y} est la moyenne des points de mesure, et les \hat{y}_i sont les valeurs prédictes (linéaires). Dans notre cas, $y_i = B(I)$ et $\hat{y}_i = \alpha I$.

Le problème avec le coefficient de détermination est qu'il considère les bruits des capteurs comme erreur de linéarité.² Aussi, pour les capteurs testés dans cette étude, la valeur de R^2 était souvent proche de 1 (en dehors de la saturation), ce qui indique que tous les capteurs ont une réponse "assez" linéaire sous un champ DC, mais cela ne permettait pas de comparer leurs performances.

- **Écart maximum** : Comme montré sur la figure A.3, Il est possible de quantifier l'erreur linéaire en prenant la valeur absolue de l'écart maximum entre la courbe du capteur et ligne droite de référence $B = \alpha I$.

L'écart maximum permet de mieux capturer l'erreur de linéarité car il mesure à quel point la mesure s'écarte de la droite de référence. Il est donc moins affecté par le bruit des mesures que le coefficient R^2 .

Il est à noter que la mesure de tous les capteurs a été ajusté à la droite de référence par transformation affine comme expliqué précédemment. De plus, cette métrique permet de mieux comparer les performances des différents capteurs. Nous optons donc pour la méthode de l'écart maximum pour caractériser l'erreur de linéarité.

Erreur de sensibilité

Une fois l'erreur de linéarité caractérisée, nous pouvons maintenant caractériser la sensibilité des capteurs. La figure A.4 montre les résultats de l'expérience de sensibilité pour des capteurs de chaque technologie. De façon qualitative, la courbe permet d'avoir une idée sur le niveau

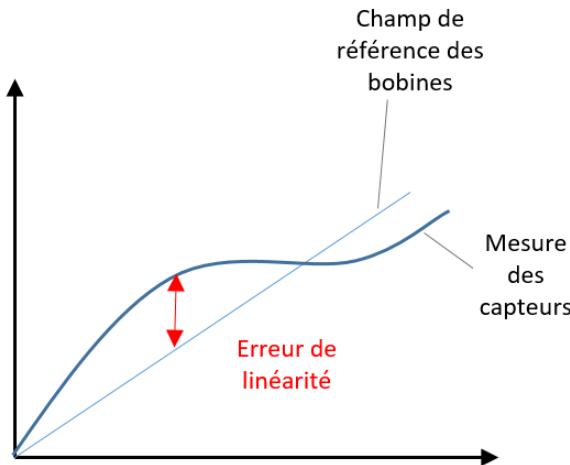


FIGURE A.3 Détermination de l'erreur de linéarité

2. Idéalement, une réponse de capteur qui oscille aléatoirement autour de la droite de référence, mais qui suit une tendance linéaire, ne devrait pas affecter l'erreur de linéarité, mais affecter l'erreur de sensibilité.

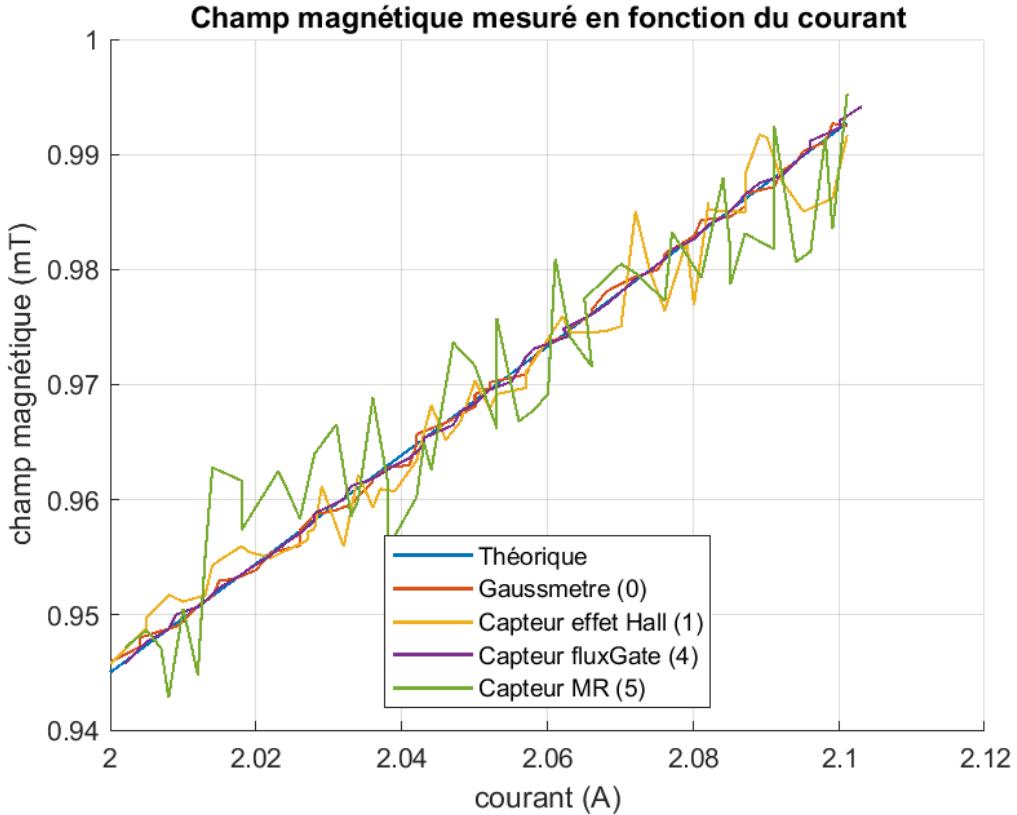


FIGURE A.4 Résultat de l'expérience de sensibilité

de bruit et la sensibilité des capteurs. On voit par exemple que le capteur fluxgate et le gaussmètre ont une réponse beaucoup plus sensible que les autres capteurs. Toutefois, pour une comparaison plus quantitative, il est important d'avoir une métrique pour mesurer cette sensibilité.

Une des métriques les plus adaptées dans ce cas est l'écart-type (ou la variance) des points de mesure. L'écart-type est une mesure statistique des écarts aléatoires de mesure, il permet donc de quantifier la la sensibilité de mesure des capteurs. Dans notre cas, on calcule la variance par rapport à la droite linéaire de référence qui représente le champ des bobines, selon la formule suivante :

$$var = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (B_i - \alpha I_i)^2 ,$$

où B_i est le i -ème point de mesure du capteur (après ajustement), I_i est le courant correspondant à ce point de mesure, et N est le nombre total de points de mesure (dans le cas de l'expérience de sensibilité, $N = 50$).

L'écart-type peut être ensuite calculé à partir de la variance :

$$\sigma = \sqrt{var} .$$

Le tableau des résultats de la prochaine section présente l'écart-type de chaque capteur. Plus l'écart-type est grand, plus le bruit du capteur est important et sa sensibilité est moindre.

Erreur de répétabilité

La répétabilité décrit la capacité d'un capteur à donner les mêmes mesures (la même tension) au même champ magnétique, s'il est mesuré plusieurs fois sous les mêmes conditions. La figure A.5 montre un exemple de résultat qu'on obtient avec l'expérience de répétabilité. Dans ce cas, il est possible de voir que le capteur MR ne donne pas à chaque fois la même mesure lorsque le courant change de valeur puis revient à la valeur de départ. Pour quantifier ces variations, il est possible d'utiliser l'écart-type, qui indique la déviation moyenne des mesures au même champ.

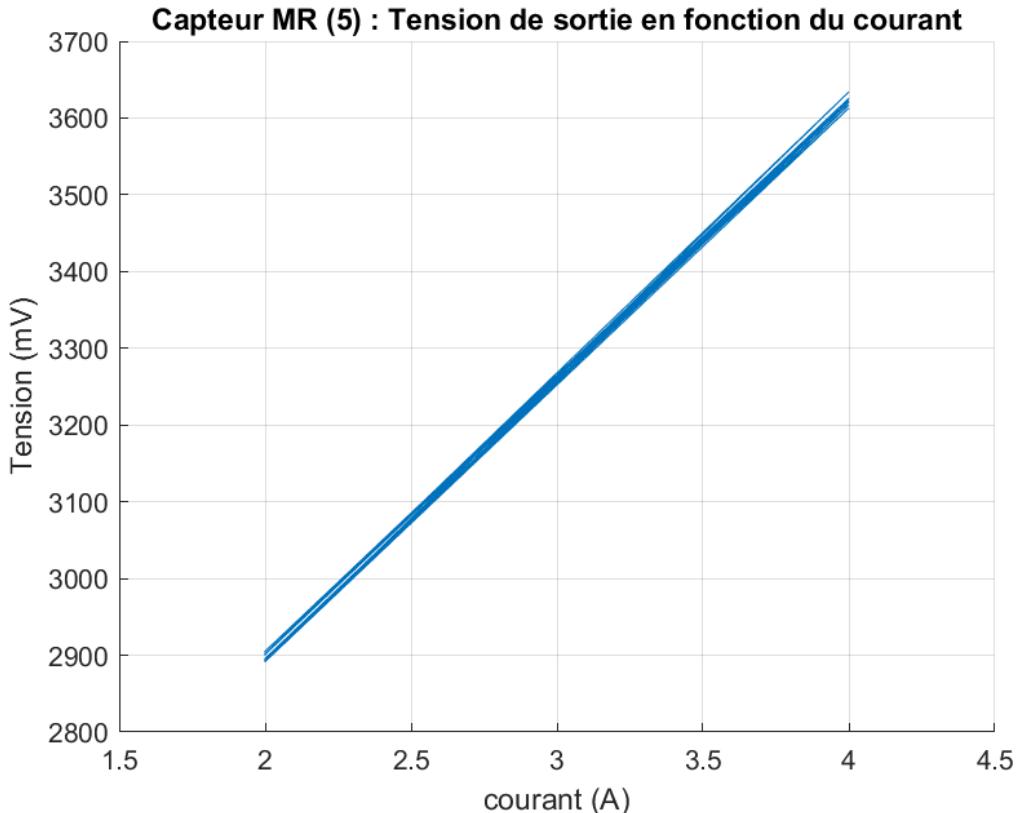


FIGURE A.5 Résultat de l'expérience de répétabilité pour le capteur MR (5)

Comme expliqué précédemment dans la description de l'expérience de répétabilité, nous disposons de $N_2 = 20$ points de mesure à $I = 2$ A et $N_4 = 20$ points à $I = 4$ A. Pour ces mesures, toutes les conditions de montage et de température sont gardées constantes, les écarts observés sont donc uniquement dûs à l'erreur de répétabilité du capteur.

Avant de calculer l'écart-type de ces mesures, on commence d'abord par changer la tension de sortie du capteur en champ magnétique, en utilisant la transformation affine décrite plus tôt. Ensuite, pour chaque capteur, on calcule les deux écarts types (à $I = 2$ A et $I = 4$ A), puis on choisit la pire valeur des deux, afin de tenir compte de la performance du capteur dans le pire cas.

$$\sigma_{repet} = \max(\sigma_2, \sigma_4) ,$$

où

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} (B_{i,2} - \bar{B}_2)^2}$$

et

$$\sigma_4 = \sqrt{\frac{1}{N_4} \sum_{i=1}^{N_4} (B_{i,4} - \bar{B}_4)^2} ,$$

avec $B_{i,2}$ les points de mesures à $I = 2$ A, ajustés par transformation affine en intensité de champ magnétique et \bar{B}_2 est la moyenne de tous ces points. La même logique s'applique au cas $I = 4$ A.

ANNEXE B MESURE DES CAPTEURS FLUXGATE AU POINT ZÉRO VS MESURE DES CAPTEURS À EFFET HALL DANS L'ENTREFER

Les figures B.1, B.2, B.3, B.4 et B.5 représentent la réponse de la sonde (moyenne des trois capteurs) dans le cas de la mesure dans l'air avec les capteurs fluxgate, ainsi que dans le cas de la mesure dans l'entrefer avec les capteurs à effet Hall. Les courbes sont en fonction du temps, car ces mesures ont été prises avant l'installation du système d'encodeur pour le prototype. Les échantillons sont glissés dans la sonde approximativement à la même vitesse et le signal est enregistré en fonction du temps. L'objectif ici est de comparer les mesures précises des capteurs fluxgate avec les mesures bruitées des capteurs à effet Hall.

Remarque : Tous les échantillons utilisés dans ces mesures sont courts. Nous observons donc des effets de bouts assez importants, notamment lorsque le conducteur entre dans la sonde ou en sort. Ces effets de bouts n'ont toutefois rien à avoir avec les défauts, comme démontré avec le scan du conducteur sain sur la figure B.1. Il est également intéressant de remarquer que les effets de bouts sont moins marqués avec la mesure dans l'entrefer des capteurs à effet Hall. Cela montre que cette mesure, malgré sa sensibilité réduite, pourrait se révéler utile afin de confirmer ou corriger la mesure dans l'air.

Discussions : Avec la mesure dans l'air des capteurs fluxgate, tous les défauts testés sont facilement détectables. Il est même possible de détecter les deux brins brisés côté à côté dans l'échantillon Lark (figure B.5) et dire lequel des deux défauts est le plus grand. En contrepartie, la mesure dans l'entrefer est beaucoup moins sensible, notamment :

- Les défauts LF sont pratiquement invisibles. En fait, la réponse des capteurs fluxgate aux défauts LF est principalement une conséquence de la fuite magnétique causée par les brins brisés. Cette fuite magnétique est observable uniquement dans l'air, et elle est quasiment impossible à mesurer dans l'entrefer.
- Le bruit de mesure est beaucoup plus grand.

Par contre, les défauts LMA sont assez faciles à voir. La mesure dans l'entrefer semble en effet avoir l'avantage d'être uniquement sensible à la quantité d'acier dans la sonde. Avoir ces deux mesures serait alors une façon possible de différencier les défauts LMA et LF.

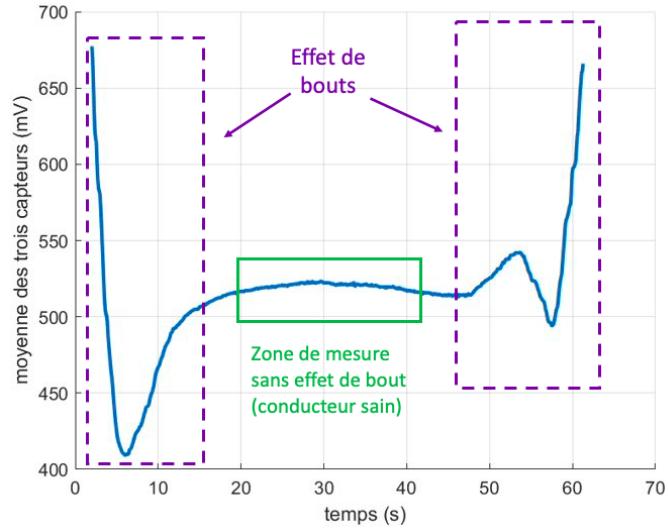


FIGURE B.1 Mesure avec la sonde prototype, échantillon Partridge sans défauts. Mesure dans l'air (capteur fluxgate)

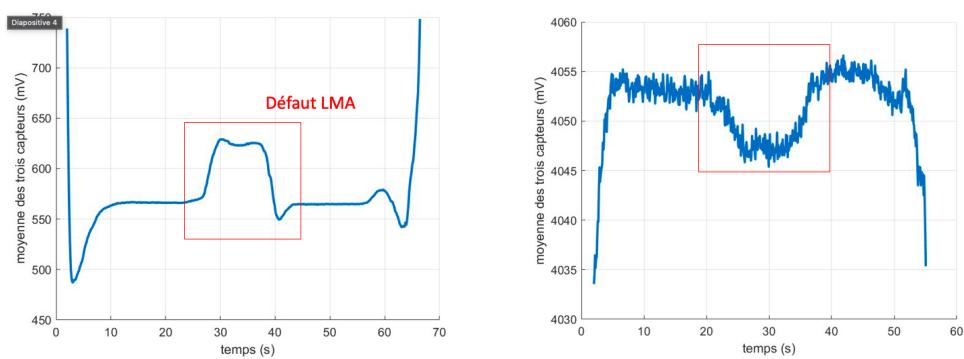
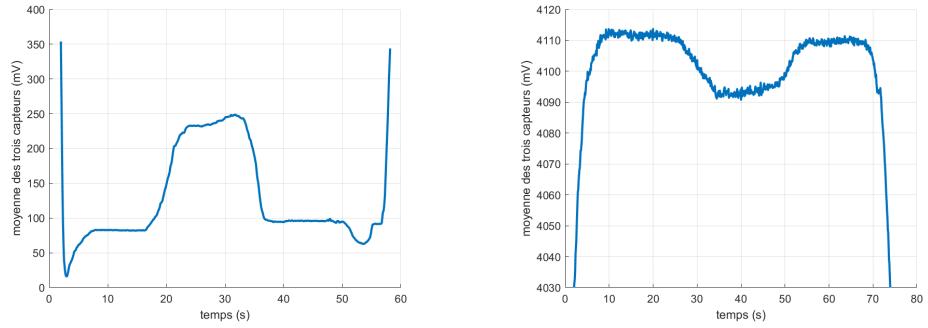
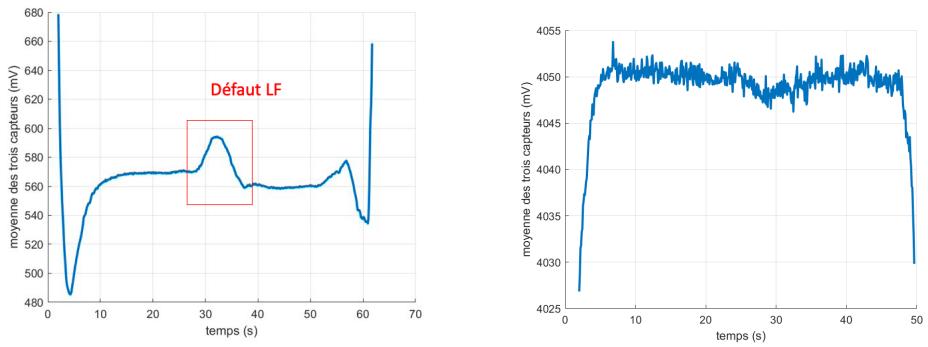


FIGURE B.2 Mesure avec la sonde prototype, défaut LMA 10.2%, échantillon Partridge



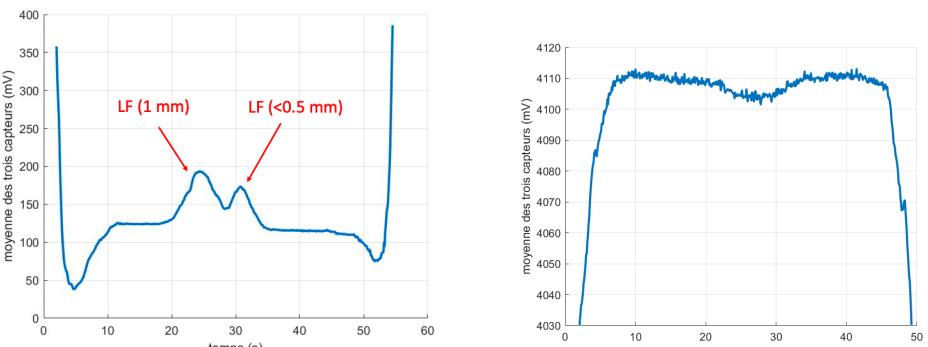
(a) Mesure dans l'air (capteur fluxgate) (b) Mesure dans l'entrefer (capteur Hall)

FIGURE B.3 Mesure avec la sonde prototype, défaut LMA 14.1%, échantillon Lark



(a) Mesure dans l'air (capteur fluxgate) (b) Mesure dans l'entrefer (capteur Hall)

FIGURE B.4 Mesure avec la sonde prototype, défaut LF, échantillon Partridge



(a) Mesure dans l'air (capteur fluxgate) (b) Mesure dans l'entrefer (capteur Hall)

FIGURE B.5 Mesure avec la sonde prototype, 2 défauts LF, échantillon Lark